

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

STIRLING SOĞUTUCULU VE İKİ SERBESTLİK DERECELİ
BİR KARDAN MEKANİZMASININ GÜRBÜZ KONTROLÜ

HASAN DOĞAN

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

STIRLING SOĞUTUCULU VE İKİ SERBESTLİK DERECELİ
BİR KARDAN MEKANİZMASININ GÜRBÜZ KONTROLÜ

HASAN DOĞAN

Prof. Dr. Zafer BİNGÜL
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Dr.Öğr. Üyesi Selçuk KİZİR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Dr.Öğr. Üyesi Metin TOZ
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 08.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Gelişmiş görüntüleme sistemlerinin kullanımı gün geçtikçe sivil ve askeri uygulamalarda artış göstermektedir. Görüntüleme sistemleri algılama yöntemlerine göre farklı uygulamalara sahip geniş bir mühendislik alanını oluşturmaktadır. Kızılötesi görüntüleme sistemleri ise pasif algılama metodu olarak sınıflandırılıp gece ve gündüz ortam koşullarında kullanılabilmesi sebebi ile ön plana çıkmaktadır.

Tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleri ile çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren Sn. Prof. Dr. Zafer BİNGÜL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde ve öncesinde gerek teknik desteği gerek yol gösterici öneri ve değerlendirmeleri sebebi ile başta Sn. Dr. Bülent ÖZKAN olmak üzere Sn. Dr. Galip Serdar TOMBUL, Sn. Burak Eren BİRİNCİ, Sn. Tayfun ÇELİK, Sn. Yasin YENİAYDIN, Sn. Ersin DAŞ ve desteklerini esirgemeyen Optik Tasarım Birimi ve enstitü personellerine teşekkürlerimi bir borç bilirim. Katkılarınız oldukça verimli sonuçlar elde edilmesinde büyük fayda sağlamıştır.

Son olarak çalışma döneminde manevi destekleri, anlayışları ve sabırları sebebi ile annem, babam ve ablama minnet duygularımı sunarım.

Temmuz - 2019

Hasan DOĞAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
ÖZET.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
GİRİŞ	1
1. KIZİLÖTESİ GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİ.....	2
1.1. Çalışmanın Amacı	2
1.2. Algılama Yöntemleri.....	2
1.3. Görüntülemenin Temelleri	3
1.4. Kızılötesi Görüntülemenin Temelleri.....	4
1.5. Kızılötesi Soğutma Yöntemleri	7
1.5.1. Joule-Thompson (J-T) soğutucu	7
1.5.2. Stirling soğutucu	9
1.6. Kardan Mekanizması.....	10
1.7. Kardan Mekanizmasının Kararlılaştırma	12
1.8. Görüntüleme Sistemlerinde Bulanıklık Analizi	14
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	16
3. KARDAN TASARIMI.....	27
3.1. Kardan Kinematik Analizi	27
3.1.1. Konum analizi	28
3.1.2. Hız analizi	28
3.1.4. İvme analizi.....	31
3.2. Benzetimler	31
3.3. Tasarım Bileşenlerinin Seçimi	49
3.1.3. Motor seçimi	49
3.1.4. Konum algılayıcısı seçimi.....	67
3.4. Test Düzeneği.....	69
3.5. DC Motor Dinamik Modeli.....	71
4. SİSTEM TANIMLAMA	72
4.1. Deneysel Sistem Tanımlamanın Temelleri	72
4.2. Giriş Sinyalleri	74
4.3. Sistem Tanımlama.....	75
5. KONTROLÇÜ TASARIMI.....	84
5.1. PID Kontrolcü Tasarımı	84
5.2. Gürbüz Kontrolcü Tasarımı	89
5.2.1. H_{∞} kontrolcü tasarımı.....	96
5.2.2. Çevrim şekillendiren kontrolcü.....	122
5.3. Bilgisayar Benzetimlerinin Karşılaştırılması	126
6. DENEYSEL SONUÇLAR.....	142
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	161

KAYNAKLAR	164
EKLER.....	167
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	197
ÖZGEÇMİŞ	198



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Görüntüleme prensibi – görünür bölge	3
Şekil 1.2.	Görüntüleme prensibi – kızılötesi bölge	4
Şekil 1.3.	Kızılötesi tayf.....	4
Şekil 1.4.	Siyah cisim ışıması	5
Şekil 1.5.	Orta ve uzun dalga boyu karşılaştırması.....	6
Şekil 1.6.	Mühimmat güdümü için kullanılan örnek Joule-Thompson soğutucu	8
Şekil 1.7.	Stirling soğutucu tipleri	10
Şekil 1.8.	Kardan ve hedef arasındaki kinematik ilişki.....	11
Şekil 1.9.	Tek eksenli kardan mekanizması	12
Şekil 1.10.	Bozucu etkiler altında bakış hattı değişimi	13
Şekil 1.11.	Ataletsel kararlılaştırma uygulamaları.....	13
Şekil 2.1.	Yandönme-yunuslama kardan yapısına sahip bir kardan mekanizmasının görseli	16
Şekil 2.2.	Yandönme-yunuslama kardan yapısına sahip bir kardan mekanizmasının görseli	17
Şekil 2.3.	PID, LQG and MCV kontrolcülerin yataydaki işaretleme başarımlarının karşılaştırılması.....	18
Şekil 2.4.	Yandönme-yunuslama kardan yapısına sahip bir kardan mekanizmasının görseli	18
Şekil 2.5.	Yandönme eksenli bozucu girişlere karşı başarımları	19
Şekil 2.6.	Yunuslama eksenli bozucu girişlere karşı başarımları.....	20
Şekil 2.7.	Kardan mekanizması tasarımlarının görseli (eski-solda, yeni-sağda)	20
Şekil 2.8.	Kardan mekanizması test düzeneği.....	21
Şekil 2.9.	Kardan mekanizması z-eksenli pozitif şok testi ivme sonuçları	21
Şekil 2.10.	Yunuslama-yandönme kardan yapısına sahip bir kardan mekanizmasının görseli	22
Şekil 2.11.	Yuvarlanma-yunuslama (1-2) kardan yapısına sahip bir kardan mekanizmasının görseli	22
Şekil 2.12.	1-2 kardan yapısında PID kontrolcünün bozucu girişlere karşı başarımları.....	23
Şekil 2.13.	1-2 kardan yapısında kayar kipli kontrolcünün bozucu girişlere karşı başarımları	23

Şekil 2.14.	Çok serbestlik dereceli bir kardan mekanizmasının kavramsal çizimi	24
Şekil 2.15.	Kararlılaştıma çevriminin bode grafiği	25
Şekil 3.1.	Mühimmatın konum yörüngesi (senaryo #1).....	32
Şekil 3.2.	Mühimmat Euler açıları (senaryo #1).....	33
Şekil 3.3.	Kardanın mühimmata göre açısal konumları (senaryo #1).....	34
Şekil 3.4.	Kardanın mühimmata göre açısal konumları (senaryo #1, son aşama yakınlaştırılmış)	34
Şekil 3.5.	Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #1).....	35
Şekil 3.6.	Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #1, son aşama yakınlaştırılmış)	35
Şekil 3.7.	Kardanın mühimmata göre açısal ivmeleri (senaryo #1).....	36
Şekil 3.8.	Kardanın mühimmata göre açısal ivmeleri (senaryo #1, son aşama yakınlaştırılmış)	36
Şekil 3.9.	Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #1)	37
Şekil 3.10.	Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #1, son aşama yakınlaştırılmış)	37
Şekil 3.11.	Mühimmatın konum yörüngesi (senaryo #2).....	38
Şekil 3.12.	Mühimmat Euler açıları (senaryo #2).....	38
Şekil 3.13.	Kardanın mühimmata göre açısal konumları (senaryo #2).....	39
Şekil 3.14.	Kardanın mühimmata göre açısal konumları (senaryo #2, son aşama yakınlaştırılmış)	39
Şekil 3.15.	Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #2).....	40
Şekil 3.16.	Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #2, son aşama yakınlaştırılmış)	40
Şekil 3.17.	Kardanın mühimmata göre açısal ivmeleri (senaryo #2).....	41
Şekil 3.18.	Kardanın mühimmata göre açısal ivmeleri (senaryo #2, son aşama yakınlaştırılmış)	41
Şekil 3.19.	Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #2)	42
Şekil 3.20.	Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #2, son aşama yakınlaştırılmış)	42
Şekil 3.21.	Mühimmatın konum yörüngesi (senaryo #3).....	43
Şekil 3.22.	Mühimmat Euler açıları (senaryo #3).....	43
Şekil 3.23.	Kardanın mühimmata göre açısal konumları (senaryo #3).....	44
Şekil 3.24.	Kardanın mühimmata göre açısal konumları (senaryo #3, son aşama yakınlaştırılmış)	44
Şekil 3.25.	Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #3).....	45

Şekil 3.26.	Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #3, son aşama yakınlaştırılmış)	45
Şekil 3.27.	Kardanın mühimmata göre açısal ivmeleri (senaryo #3).....	46
Şekil 3.28.	Kardanın mühimmata göre açısal ivmeleri (senaryo #3, son aşama yakınlaştırılmış)	46
Şekil 3.29.	Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #3)	47
Şekil 3.30.	Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #3, son aşama yakınlaştırılmış)	47
Şekil 3.31.	İkizkenar yamuk tork profili	50
Şekil 3.32.	Kardan kütle merkezi ve eksen kaçıklığının gösterimi.....	51
Şekil 3.33.	Stirling soğutucu titreşimlerinin ölçümü	55
Şekil 3.34.	Stirling soğutucu titreşimlerinin ölçümü	56
Şekil 3.35.	Stirling soğutucu doğrusal ivme bileşenleri.....	57
Şekil 3.36.	Stirling soğutucu doğrusal ivme bileşenleri – soğuk kalma fazının yakınlaştırılmış görüntüsü	57
Şekil 3.37.	Toplam bozucu tork (senaryo #1).....	60
Şekil 3.38.	Toplam bozucu tork (senaryo #1, son aşama yakınlaştırılmış)	60
Şekil 3.39.	Toplam bozucu tork (senaryo #2).....	61
Şekil 3.40.	Toplam bozucu tork (senaryo #2, son aşama yakınlaştırılmış)	61
Şekil 3.41.	Toplam bozucu tork (senaryo #3).....	62
Şekil 3.42.	Toplam bozucu tork (senaryo #3, son aşama yakınlaştırılmış)	62
Şekil 3.43.	Toplam tork gereksinimi (senaryo #1).....	63
Şekil 3.44.	Toplam tork gereksinimi (senaryo #1, son aşama yakınlaştırılmış)	64
Şekil 3.45.	Toplam tork gereksinimi (senaryo #2).....	64
Şekil 3.46.	Toplam tork gereksinimi (senaryo #2, son aşama yakınlaştırılmış)	65
Şekil 3.47.	Toplam tork gereksinimi (senaryo #3).....	65
Şekil 3.48.	Toplam tork gereksinimi (senaryo #3, son aşama yakınlaştırılmış)	66
Şekil 3.49.	İki eksenli test kardanı tasarımı	69
Şekil 3.50.	Gerçek zamanlı kontrol test yapısı	70
Şekil 3.51.	Eşdeğer motor modeli [18]	71
Şekil 4.1.	Sistem tanımlama yapısı [19]	72
Şekil 4.2.	Bozucu gürültü eklenmiş sistem tanımlama yapısı.....	73
Şekil 4.3.	Sistem tanımlama giriş-çıkış sinyalleri (Data7, yandönme eksen).....	76

Şekil 4.4.	Sistem tanımlama giriş-çıkış sinyalleri (Data19, yunuslama eksenini).....	76
Şekil 4.5.	Sistem üzerinden ölçülen çıkış ile sistem tanımlama ile elde edilen modelin çıkışı (yandönme eksenini, Data7).....	80
Şekil 4.6.	Sistem üzerinden ölçülen çıkış ile sistem tanımlama ile elde edilen modelin çıkışı (yunuslama eksenini, Data19)	82
Şekil 5.1.	Temel PID kontrol blok yapısı.....	85
Şekil 5.2.	Ayrık zamanlı temel PID kontrol blok yapısı	88
Şekil 5.3.	Bir sistemin 2-normunun Bode grafiği (genlik)	90
Şekil 5.4.	Bir sistemin ∞ -normunun Bode grafiği (genlik).....	91
Şekil 5.5.	Gülbüz kararlılık (RS) için çevrim kazancının Nyquist çizimi	91
Şekil 5.6.	Nominal performans (NP) için çevrim kazancının Nyquist çizimi	92
Şekil 5.7.	Gülbüz performans (RP) için çevrim kazancının Nyquist çizimi	93
Şekil 5.8.	Toplamsal belirsizlik.....	93
Şekil 5.9.	Çarpımsal belirsizlik	94
Şekil 5.10.	Birim geri beslemeli kontrol yapısı	94
Şekil 5.13.	H_{∞} kontrolcü tasarım aşamaları.....	97
Şekil 5.11.	H_{∞} Kontrolcü yapısı.....	98
Şekil 5.12.	H_{∞} kontrolcü yapısı (giriş-çıkış sinyallerinin sınıflandırılması)	99
Şekil 5.14.	Üst doğrusal kesirsel dönüşüm	100
Şekil 5.15.	Alt doğrusal kesirsel dönüşüm.....	100
Şekil 5.16.	Tipik duyarlılık fonksiyonu	103
Şekil 5.17.	Tipik çevrim kazancı fonksiyonu	104
Şekil 5.18.	Ağırlık fonksiyonlarının seçim kriterlerinin gösterimi	104
Şekil 5.19.	Hata ağırlık fonksiyonu (W_e)	105
Şekil 5.20.	Kontrol sinyali ağırlık fonksiyonu (W_u)	106
Şekil 5.21.	Referans ağırlık fonksiyonu (W_r)	106
Şekil 5.22.	Bozucu ağırlık Fonksiyonu (W_d)	107
Şekil 5.23.	Gürültü ağırlık fonksiyonu (W_n)	107
Şekil 5.24.	Yandönme eksenini için tasarımı yapılan ve indirgeme işlemi yapılan transfer fonksiyonlarının Bode diyagramları	111
Şekil 5.25.	Yunuslama eksenini için tasarımı yapılan ve indirgeme işlemi yapılan yransfer fonksiyonlarının Bode diyagramları	112
Şekil 5.26.	Belirsizlikler ile modellenen sistemin duyarlılık, tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonları ve çevrim kazancı (yandönme eksenini).....	112

Şekil 5.27.	Belirsizlikler ile modellenen sistemin duyarlılık, tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonları ve çevrim kazancı (yunuslama ekseni)	113
Şekil 5.28.	Belirsizlikler ile modellenen sistemin basamak cevabı (yandönme ekseni)	114
Şekil 5.29.	Belirsizlikler ile modellenen sistemin basamak cevabı (yunuslama ekseni)	114
Şekil 5.30.	Belirsizlikler ile modellenen sistemin Bode diyagramı (yandönme ekseni)	115
Şekil 5.31.	Belirsizlikler ile modellenen sistemin Bode diyagramı (yunuslama ekseni)	115
Şekil 5.32.	Belirsizlikler ile modellenen kapalı çevrim sistemin basamak cevabı (yandönme ekseni)	116
Şekil 5.33.	Belirsizlikler ile modellenen kapalı çevrim sistemin basamak cevabı (yunuslama ekseni)	116
Şekil 5.34.	Belirsizlikler ile modellenen kapalı çevrim sistemin Bode diyagramı (yandönme ekseni)	117
Şekil 5.35.	Belirsizlikler ile modellenen kapalı çevrim sistemin Bode diyagramı (yunuslama ekseni)	117
Şekil 5.36.	Belirsizlikler ile modellenen sistemin Nyquist çizimi (yandönme ekseni)	118
Şekil 5.37.	Belirsizlikler ile modellenen sistemin Nyquist çizimi (yunuslama ekseni)	118
Şekil 5.38.	Yandönme ekseni genlik Bode diyagramı	119
Şekil 5.39.	Yunuslama ekseni genlik Bode diyagramı	119
Şekil 5.40.	Yandönme ekseni genlik ve faz marjini	120
Şekil 5.41.	Yunuslama ekseni genlik ve faz marjini	120
Şekil 5.42.	Çevrim kazancının şekillendirilmesi için blok şeması	123
Şekil 5.43.	Kontrol edilmemiş örnek bir çevrim kazancı	123
Şekil 5.44.	Kontrolcüsü optimize edilmiş örnek bir çevrim kazancı	124
Şekil 5.45.	Yandönme eksenine ait çevrim kazancının Bode diyagramı	125
Şekil 5.46.	Yunuslama eksenine ait çevrim kazancının Bode diyagramı	126
Şekil 5.47.	Kontrolcü benzetimleri için hazırlanan Simulink yapısı - genel	127
Şekil 5.48.	Kontrolcü benzetimleri için hazırlanan Simulink yapısı – emir	127
Şekil 5.49.	Kontrolcü benzetimleri için hazırlanan Simulink yapısı – bozucu torklar	128
Şekil 5.50.	Kontrolcü benzetimleri için hazırlanan Simulink yapısı – yandönme ekseni kontrolcülleri	128
Şekil 5.51.	Yandönme ekseni sistem modeli	129

Şekil 5.52.	H_{∞} kontrolcü (a) ve PID kontrolcü (b) Simulink blokları.....	129
Şekil 5.53.	Test emrine karşı kontrolcü çıktıları (yandönme eksenini)	130
Şekil 5.54.	Test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yandönme eksenini).....	131
Şekil 5.55.	Test emrine karşı akım gereksinimleri (yandönme eksenini)	132
Şekil 5.56.	Test emrine karşı akım gereksinimleri (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yandönme eksenini).....	132
Şekil 5.57.	Test emrine karşı kontrolcü çıktıları (yunuslama eksenini).....	133
Şekil 5.58.	Test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yunuslama eksenini)	133
Şekil 5.59.	Test emrine karşı akım gereksinimleri (yunuslama eksenini)	134
Şekil 5.60.	Test emrine karşı akım gereksinimleri (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yunuslama eksenini)	134
Şekil 5.61.	PRBS bozucu etkiler altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (yandönme eksenini)	135
Şekil 5.62.	PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yandönme eksenini).....	136
Şekil 5.63.	PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] sabit bölgesi yakınlaştırılmış) (yandönme eksenini)	136
Şekil 5.64.	PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (sinüs maksimum bölgesi yakınlaştırılmış) (yandönme eksenini).....	137
Şekil 5.65.	PRBS bozucu altında test emrine karşı akım gereksinimi (yandönme eksenini).....	137
Şekil 5.66.	PRBS bozucu altında test emrine karşı akım gereksinimi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (eandönme eksenini)	138
Şekil 5.67.	PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (yunuslama eksenini)	138
Şekil 5.68.	PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yunuslama eksenini)	139
Şekil 5.69.	PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] sabit bölgesi yakınlaştırılmış) (yunuslama eksenini).....	139
Şekil 5.70.	PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (sinüs maksimum bölgesi yakınlaştırılmış) (yunuslama eksenini)	140
Şekil 5.71.	PRBS bozucu altında test emrine karşı akım gereksinimi (yunuslama eksenini)	140
Şekil 5.72.	PRBS bozucu altında test emrine karşı akım gereksinimi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yunuslama eksenini)	141
Şekil 6.1.	Gerçek zamanlı emir takibi.....	142
Şekil 6.2.	Gerçek zamanlı emir takibi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)	143

Şekil 6.3.	Gerçek zamanlı akım tüketimi	143
Şekil 6.4.	Gerçek zamanlı akım tüketimi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)	144
Şekil 6.5.	Gerçek zamanlı emir takibi	144
Şekil 6.6.	Gerçek zamanlı emir takibi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)	145
Şekil 6.7.	Gerçek zamanlı akım tüketimi	145
Şekil 6.8.	Gerçek zamanlı akım tüketimi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)	146
Şekil 6.9.	Fitrelenmiş referans emir	146
Şekil 6.10.	Gerçek zamanlı filtrelenmiş emir takibi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)	147
Şekil 6.11.	Gerçek zamanlı filtrelenmiş emir için akım tüketimi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)	147
Şekil 6.12.	Yandönme eksenini enerji tüketimi	148
Şekil 6.13.	Yunuslama eksenini enerji tüketimi	149
Şekil 6.14.	Gerçek zamanlı uygulamada akım bozucusu Simulink bloğu	149
Şekil 6.15.	Yandönme eksenini basamak bozucu akım profili	151
Şekil 6.16.	Basamak bozucu akım etkisi altında yandönme eksenini aç cevabı	151
Şekil 6.17.	Basamak bozucu akım etkisi altında yandönme eksenini aç cevabı (yakınlaştırılmış)	152
Şekil 6.18.	Yandönme eksenini basamak bozucu akım profili	153
Şekil 6.19.	Basamak bozucu akım etkisi altında yandönme eksenini aç cevabı	153
Şekil 6.20.	Basamak bozucu akım etkisi altında yandönme eksenini aç cevabı (yakınlaştırılmış)	154
Şekil 6.21.	Yunuslama eksenini basamak bozucu akım profili	154
Şekil 6.22.	Basamak bozucu akım etkisi altında yunuslama eksenini aç cevabı	155
Şekil 6.23.	Basamak bozucu akım etkisi altında yunuslama eksenini aç cevabı (yakınlaştırılmış)	155
Şekil 6.24.	Yunuslama eksenini basamak bozucu akım profili	156
Şekil 6.25.	Basamak bozucu akım etkisi altında yunuslama eksenini aç cevabı	157
Şekil 6.26.	Basamak bozucu akım etkisi altında yunuslama eksenini aç cevabı (yakınlaştırılmış)	157
Şekil A.1.	Mühimmat – kardan – hedef kinematik ilişkisi	168
Şekil A.2.	Mühimmat eksen takımı dönüş sıralaması	169

Şekil A.3.	Kardan eksen takımı dönüş sıralaması.....	170
Şekil A.4.	Kardan eksen takımı dönüş sıralaması.....	171
Şekil A.5.	Sistem tanımlama PRBS sinyali (yandönme eksen, Data1-Data4).....	187
Şekil A.6.	Sistem tanımlama PRBS sinyali (yandönme eksen, Data5-Data8).....	187
Şekil A.7.	Sistem tanımlama PRBS sinyali (yandönme eksen, Data9-Data12).....	188
Şekil A.8.	Sistem tanımlama PRBS sinyali (yandönme eksen, Data13-Data15).....	188
Şekil A.9.	Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data1-Data4).....	189
Şekil A.10.	Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data5-Data8).....	189
Şekil A.11.	Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data9-Data12).....	190
Şekil A.12.	Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data13-Data16).....	190
Şekil A.13.	Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data17-Data20).....	191
Şekil A.14.	Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data21)	191
Şekil A.15.	Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yandönme eksen, Data1-Data4).....	192
Şekil A.16.	Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yandönme eksen, Data5-Data8).....	192
Şekil A.17.	Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yandönme eksen, Data9-Data12).....	193
Şekil A.18.	Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yandönme eksen, Data13-Data15).....	193
Şekil A.19.	Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data1-Data4).....	194
Şekil A.20.	Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data5-Data8).....	194
Şekil A.21.	Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data9-Data12).....	195
Şekil A.22.	Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data13-Data16).....	195
Şekil A.23.	Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data17-Data20).....	196

Şekil A.24. Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data21).....	196
---	-----



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Hedef sıcaklarına baēlı dalga boyu kestirimi	6
Tablo 1.2.	Stirling soēutucu tipleri	9
Tablo 2.1.	Kontrolcū performanslarının karēılaētırılması	25
Tablo 3.1.	Senaryo #1 iēin kinematik analiz sonuēları	48
Tablo 3.2.	Senaryo #2 iēin kinematik analiz sonuēları	48
Tablo 3.3.	Senaryo #3 iēin kinematik analiz sonuēları	48
Tablo 3.4.	İki eksenli kardan tasarımı kinematik tasarım parametreleri.....	49
Tablo 3.5.	İē ve dıē eksenlere ait kūtle ve atalet verileri.....	51
Tablo 3.6.	Rastsal titreēim deēerleri	53
Tablo 3.7.	Stirling soēutucu ivme verileri	58
Tablo 3.8.	Stirling soēutucu deēerleri.....	58
Tablo 3.9.	Stirling soēutucu bozucu tork deēerleri.....	58
Tablo 3.10.	Stirling soēutucu en yūksek bozucu tork deēerleri.....	63
Tablo 3.11.	Toplam tork gereksinimi.....	66
Tablo 3.12.	Seēilen eyleyicilerin ōzellikleri	67
Tablo 3.13.	Optik sistem parametreleri.....	68
Tablo 3.14.	Seēilen ēōzēcūnūn ōzellikleri	69
Tablo 4.1.	Sistem tanımlama verileri – yandōnme eksenı	78
Tablo 4.2.	Yandōnme eksenı ēapraz doērulama matrisi	79
Tablo 4.3.	Sistem tanımlama verileri – yunuslama eksenı.....	80
Tablo 4.4.	Yunuslama eksenı ēapraz doērulama matrisi	81
Tablo 5.1.	Kontrolcū tasarım kriterleri	84
Tablo 5.2.	PID kontrolcū parametreleri	89
Tablo 5.3.	Sinyaller ve sistemler iēin normların tanımı	90
Tablo 5.4.	H_{∞} kontrolcū tasarımında kullanılan aēırlık fonksiyonları.....	96
Tablo 5.5.	Gūrbūz kontrolcū tasarımında tanımlanan belirsizlikler	108
Tablo 5.6.	Kontrolcū tekil deēerleri	110
Tablo 5.7.	“starbmag” alanının aēıklaması	121
Tablo 5.8.	“robuststab” ēıktıları	122
Tablo 5.9.	Kontrolcū tasarım parametreleri	124

Tablo 5.10.	Test emir profili	130
Tablo 5.11.	Bozucu tork modelinin özellikleri	135
Tablo 6.1.	Gerçek zamanlı bozucu akım değerleri	150
Tablo 6.2.	Yandönme eksenli kontrolcülerinin başarımlarının karşılaştırılması.....	158
Tablo 6.3.	Yunuslama eksenli kontrolcülerinin başarımlarının karşılaştırılması.....	159



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\vec{a}_{M/0}$	: Mühimmatın yere göre doğrusal ivme vektörü, (m/s ²)
$\vec{a}_{T/S}$	: Hedefin kardana göre doğrusal ivme vektörü, (m/s ²)
A_w	: Ağırlık fonksiyonunun kalıcı durum hatası katsayısı
B	: Sönüm katsayısı, (kg/s)
$\cos \alpha$	: α açısının kosinüsü
$\hat{C}^{(0,m)}$	: F_0 eksen takımı ile F_m eksen takımı arasındaki dönüşüm matrisi
$\hat{C}^{(0,s)}$	: F_0 eksen takımı ile F_s eksen takımı arasındaki dönüşüm matrisi
$\hat{C}^{(m,s)}$	: F_m eksen takımı ile F_s eksen takımı arasındaki dönüşüm matrisi
$\hat{C}^{(m,s)} [i,j]$	: $\hat{C}^{(m,s)}$ matrisinin i. satırı ve j. sütunundaki eleman
$\hat{C}^{(s,m)}$	: F_s eksen takımı ile F_m eksen takımı arasındaki dönüşüm matrisi, $\hat{C}^{(m,s)}$ matrisinin tersine eşittir ($\hat{C}^{(s,m)} = (\hat{C}^{(m,s)})^T$)
d	: Kuvvet kolu, (m)
d	: Dedektör piksel boyutu, (μ m)
d_s	: F_m eksen takımı ile F_s eksen takımı arasındaki $\vec{u}_1^{(m)}$ üzerinde tanımlı mesafe, (m)
d_i	: i.eksendeki kütle kaçıklığının mesafesi (i=p,y), (m)
d^i	: i.eksendeki kütle kaçıklığı (i=p,y, = d ⁿ), (m)
D_k	: F_k eksen takımına göre türev operatörü
$d(t)$	: Zamana bağlı bozucu sinyali
$e(t)$	: Zamana bağlı hata sinyali
F	: Kuvvet, (N)
F_0	: Sabit eksen takımı
f_c	: Köşe frekansı, (Hz)
F_m	: Mühimmat gövdesinde tanımlı eksen takımı
f_{optic}	: Optik sistemin odak uzaklığı, (mm)
F_s	: Kardan eksenleri dönü merkezinde tanımlı eksen takımı
F_t	: Hedef üzerinde tanımlı eksen takımı
$G_o(s)$	: Belirsizlik içermeyen transfer fonksiyonu
$\ G\ _1$	: G transfer fonksiyonunun 1-normu
$\ G\ _2$	: G transfer fonksiyonunun 2-normu
$\ G\ _\infty$	: G transfer fonksiyonunun ∞ -normu
G_m	: Genlik marjini, (dB)
$G_p(s)$	: $G_o(s)$ sistemine $\Delta(s)$ belirsizlikleri eklenmiş transfer fonksiyonu
$G_{zw}(s)$	: Frekansa bağlı G sistemi veya transfer fonksiyonu
$I(s)$	: Frekans uzayında tanımlı i sinyali (i=u,r, e, d, n)
IFOV	: Dedektör anlık görüş açısı, (°)
i_{max}	: i ifadesinin maksimum değeri
J	: Atalet momenti, (kgm ²)
K	: Yay sabiti, (kg/s ²)

K_b	: Motor hız sabiti, (V/rpm)
K_d	: PID kontrolcünün türevsel katsayısı
K_{fic}	: İç eksen (yandönme eksen) için tasarlanan H_∞ kontrolcüsü
K_{fr_ic}	: İç eksen (yandönme eksen) için tasarlanan indirgenmiş H_∞ kontrolcüsü
K_{fdis}	: Dış eksen (yunuslama eksen) için tasarlanan H_∞ kontrolcüsü
K_{fr_dis}	: Dış eksen (yunuslama eksen) için tasarlanan indirgenmiş H_∞ kontrolcüsü
K_i	: PID kontrolcünün integral katsayısı
K_{Ldis}	: Dış eksen (yunuslama eksen) için tasarlanan çevrim kazancının şekillendirilmesi ile elde edilen kontrolcü
K_{Lic}	: İç eksen (yandönme eksen) için tasarlanan çevrim kazancının şekillendirilmesi ile elde edilen kontrolcü
K_p	: PID kontrolcünün oransal katsayısı
K_t	: Motor tork sabiti, (Nm/A)
L	: Çevrim kazancı
m	: Kütle, (kg)
M	: Mühimmat eksen takımı merkezi
m_i	: i. eksenin kütlesi (i=p,y), (kg)
M_w	: Ağırlık fonksiyonunun duyarlılık kazanç katsayısı
N	: PID kontrolcünün türevsel katsayısına ait filtre katsayısı
$n(t)$	: Zamana bağlı gürültü sinyali
O	: Sabit eksen takımı merkezi
p	: Mühimmat açısız hız vektörünün $\vec{u}_1^{(m)}$ yönündeki bileşeni, (m/s)
p	: Yunuslama eksen (pitch)
P_m	: Faz marjini, ($^\circ$)
q	: Mühimmat açısız hız vektörünün $\vec{u}_1^{(m)}$ yönündeki bileşeni, (m/s)
r	: Mühimmat açısız hız vektörünün $\vec{u}_1^{(m)}$ yönündeki bileşeni, (m/s)
R	: Elektriksel Direnç, (Ω)
$\hat{R}_i(\alpha)$	: $\vec{u}_i$ birim vektörü etrafında α açısı kadar dönüşü ifade eden dönüşüm matrisi (i=1, 2, 3)
$\vec{r}_{M/O}$	: Mühimmatın yere göre bağıl konumu, (m)
rpm	: Devir/dakika
$\vec{r}_{S/M}$	: Kardanın mühimmata göre bağıl konumu, (m)
$r(t)$	: Zamana bağlı referans sinyali
$\vec{r}_{T/O}$	: Hedefin yere göre bağıl konumu, (m)
$\vec{r}_{T/S}$	: Hedefin kardana göre bağıl konumu, (m)
S	: Kardan eksen takımı merkezi
S	: Duyarlılık fonksiyonu
$\sin \alpha$	: α açısının sinüsü
T	: Hedef eksen takımı merkezi
T	: Tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonu
T	: Sıcaklık, ($^\circ$, K)
$\tan(\alpha)$	: α açısının tanjantı
T_{ata}	: Atalet sebebi ile oluşan tork, (Nm)
TF_{ic}	: İç eksene (yandönme eksen) ait transfer fonksiyonu
TF_{dis}	: Dış eksene (yunuslama eksen) ait transfer fonksiyonu
t_i	: i. zaman verisi, (s)

T_i^j	: j eksenine ait i atalet değeri sebebi ile oluşan tork (j=y,p ; j=ata,mer,tit,sür,Stir), (Nm)
T_{mer}	: Kütle merkezi kaçıklığı sebebi ile oluşan tork, (Nm)
T_p	: Azami tork, (Nm)
T_{peak}	: Maksimum tork, (Nm)
T_{rms}	: Etkin tork, (Nm)
T_s	: Örnekleme süresi, (s)
T_{stall}	: Durdurma torku, (Nm)
T_{Stir}	: Stirling soğutucu sebebi ile oluşan tork, (Nm)
$T_{sür}$	: Sürtünme ve kablo direngenliği sebebi ile oluşan tork, (Nm)
T_{tit}	: Rastsal titreşim sebebi ile oluşan tork, (Nm)
u	: Mühimmat hız vektörünün $\vec{u}_1^{(m)}$ yönündeki bileşeni, (m/s)
$\vec{u}_i^{(k)}$	: F_k eksen takımının i. birim vektörü (k=m, s, t, 0 ; i=1, 2, 3)
$u(t)$	: Zaman bağlı u sinyali
$u(t)$	: Zamana bağlı kontrol sinyali
$\ u\ _1$	: u sinyalinin 1-normu
$\ u\ _2$	: u sinyalinin 2-normu
$\ u\ _\infty$	: u sinyalinin ∞ -normu
V	: Bara gerilimi, (V)
v	: Mühimmat hız vektörünün $\vec{u}_2^{(m)}$ yönündeki bileşeni, (m/s)
$\vec{v}_{k/l}^{(i)}$	: $\vec{V}_{k/l}$ vektörünün F_i ekseninde ifadesi
$\vec{V}_{M/0}$	: Mühimmatın yere göre doğrusal hız vektörü, (m/s)
$\vec{V}_{S/M}$	: Kardanın mühimmata göre doğrusal hız vektörü, (m/s)
$\vec{V}_{T/0}$	: Hedefin yere göre doğrusal hız vektörü, (m/s)
$\vec{V}_{T/S}$	: Hedefin kardana göre doğrusal hız vektörü, (m/s)
w	: Mühimmat hız vektörünün $\vec{u}_3^{(m)}$ yönündeki bileşeni, (m/s)
w	: Gürbüz kontrolde tanımlı genel giriş sinyali
W_B	: Sönüm katsayısı belirsizliği için tanımlanan ağırlık fonksiyonu
W_d	: Bozucu giriş için tanımlı ağırlık fonksiyonu
W_e	: Hata sinyali için tanımlı ağırlık fonksiyonu
W_K	: Yay sabiti belirsizliği için tanımlanan ağırlık fonksiyonu
W_{K_t}	: Motor tork sabiti belirsizliği için tanımlanan ağırlık fonksiyonu
W_n	: Sensör gürültüsü için tanımlı ağırlık fonksiyonu
W_r	: Referans giriş için tanımlı ağırlık fonksiyonu
W_u	: Kontrol sinyali için tanımlı ağırlık fonksiyonu
x	: $\vec{r}_{T/S}$ vektörünün $\vec{u}_1^{(0)}$ yönündeki bileşeni
y	: Yandönme eksenini (yaw)
y	: $\vec{r}_{T/S}$ vektörünün $\vec{u}_2^{(0)}$ yönündeki bileşeni
y_k	: $\vec{r}_{k/0}$ vektörünün $\vec{u}_2^{(0)}$ yönündeki bileşeni (k=M, T)
z	: $\vec{r}_{T/S}$ vektörünün $\vec{u}_3^{(0)}$ yönündeki bileşeni
z	: Gürbüz kontrolde tanımlı genel çıkış sinyali
z_k	: $\vec{r}_{k/0}$ vektörünün $\vec{u}_3^{(0)}$ yönündeki bileşeni (k=M, T)
x_k	: $\vec{r}_{k/0}$ vektörünün $\vec{u}_1^{(0)}$ yönündeki bileşeni (k=M, T)
$\Delta(s)$	: Belirsizliklerin tanımlandığı transfer fonksiyonu

$\frac{\partial y}{\partial x}$	: y ifadesinin x bağımsız değişkenine göre kısmi türevi
ϕ_m	: Mühimmatın yuvarlanma açısı, (°)
ϕ_s	: Kardanın yere göre yuvarlanma açısı(roll), (°)
γ	: Sistemin referans ∞ -normu değeri (genelde $\gamma \leq 1$)
λ	: Dalga boyu, (μm)
ω_B	: Ağırlık fonksiyonunun bant genişliği katsayısı
ω_c	: Köşe frekansındaki açısal hız, (rad/s)
ω_n	: Sistemin doğal frekansı, (Hz)
$\vec{\omega}_{m/o}$	: Mühimmatın yere göre açısal hız vektörü, (°/s)
$\vec{\omega}_{s/o}$	: Kardanın yere göre açısal hız vektörü, (°/s)
$\vec{\omega}_{s/m}$	: Kardanın mühimmata göre açısal hız vektörü, (°/s)
ψ	: Kardanın mühimmata göre yandönme (yaw) açısı, (°)
ψ_m	: Mühimmatın yunuslama açısı, (°)
ψ_s	: Kardanın yere göre yandönme açısı, (°)
θ	: Kardanın mühimmata göre yunuslama (pitch) açısı, (°)
θ_m	: Mühimmatın yandönme açısı, (°)
θ_s	: Kardanın yere göre yunuslama açısı, (°)
ξ	: Sistemin sönüm oranı
$\dot{\cdot}$	: Zamana göre birinci türev
$\ddot{\cdot}$	: Zamana göre ikinci türev

Kısaltmalar

BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız doğru akım)
CMO	: Current Monitor Out (Akım görüntüleme çıkışı)
DOF	: Degree of Freedom (Serbestlik derecesi)
EMI	: Electro-Magnetic Interference (Elektromanyetik girişim)
FOR	: Field of Regard (Görüş alanı)
FOV	: Field of View (Görüş açısı)
IFOV	: Instantaneous Field of View (Anlık görüş açısı)
IMU	: Inertial Measurement Unit (Ataletsel ölçüm birimi)
IWLS	: Iterative Linear Least Squares (Yinelemeli doğrusal en küçük kareler)
J-T	: Joule-Thompson
LFT	: Linear Fractional Transform (Doğrusal Kesirsel Dönüşüm, DKD)
LMI	: Linear Matrix Inequality (Doğrusal matris eşitsizliği)
LOS	: Line of Sight (Bakış hattı)
LTR	: Loop Transfer Recovery (Çevrim transfer telafisi)
LWIR	: Long-Wave Infrared (Uzun dalga kızılötesi)
LQG	: Linear Quadratic Gaussian (Doğrusal karesel gaus)
MCV	: Minimal Cost Variance (En düşük maliyet değişimi)
MIMO	: Multi-Input-Multi-Output (Çok-Girişli-Çok-Çıkışlı)
MWIR	: Mid-Wave Infrared (Orta dalga kızılötesi)
PID	: Proportional-Integral-Derivative (Oransal-integral-türevsel)
PIV	: Proportional-Integral-Velocity (Oransal-integral-hız)
PRBS	: Pseudo Random Binary Sequence (Sözde rastgele dizi)
PSO	: Partical Swarm Optimization (Parçacık sürü eniyileme)

PWM	: Pulse-Width Modulation (Darbe genişlik modülasyonu)
<i>rms</i>	: Route Mean Square (kareleri toplamının karekökü, etkin değer)
SNR	: Signal to Noise Ratio (Sinyal gürültü oranı)
STF	: Self-Tuning Fuzzy (Kendinden ayarlanmalı bulanık, KAB)
SVD	: Singular Value Decomposition (Tekil değer ayrıştırma)
SWIR	: Short-Wave Infrared (Kısa dalga kızılötesi)
VAF	: Variance Accounting For (Değişim hesaplama)
1-2	: Roll-Pitch (Yuvarlanma-yunuslama)
2-3	: Pitch-Yaw (Yunuslama-yandönme)



STIRLING SOĞUTUCULU VE İKİ SERBESTLİK DERECELİ BİR KARDAN MEKANİZMASININ GÜRBÜZ KONTROLÜ

ÖZET

Kızılötesi görüntüleme sistemleri, gece ve gündüz ortam koşullarında görüntü alabilmesi açısından sivil ve askeri uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde sistemin daha yüksek görüş açısına sahip olabilmesi için yönlendirme mekanizmaları kullanılmaktadır. Bu mekanizmalar kardan mekanizması olarak adlandırılmaktadır. Kardan mekanizmaları ihtiyaca göre farklı yapılara ve farklı serbestlik derecelerine sahip olabilmektedir. Bu çalışmada iki serbestlik dereceli kardan mekanizması incelenmektedir. Kızılötesi görüntüleme sistemlerinin bazılarında ısı gürültüleri azaltmak üzere kriyojenik soğutma ihtiyacı gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında görüntüleme sistemi Stirling soğutucu kullanılarak soğutulduğu bir durum incelenmektedir. Stirling soğutucu yapısında bulunan hareketli parçalar sebebi ile titreşime sebep olmaktadır. Kızılötesi dedektör ile Stirling soğutucuların yüksek vakum altında paketlenerek bir bütün olarak üretilmesi sebebi ile bu titreşimler titreşim yalıtıcılar ile pasif olarak sönmelenmemektedir. Görüntüleme sisteminden alınan görüntülerin bulanıklaşma olmadan elde edilmesi için kardan mekanizmasında kullanılan kontrolcülerin bu titreşimlere karşı gürbüz olması beklenmektedir. Kardan mekanizmalarının kontrolü için birçok kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Görüntüleme sistemine etkileyen dış bozucular sebebi ile kontrol sistemlerinde gürbüz yöntemler tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında kardan mekanizması için PID, H_{∞} ve çevrim kazancının şekillendirilmesi ile elde edilen çevrim şekillendiren kontrolcü tasarlanmaktadır. Tasarımı yapılan kontrolcülerin başarımları hem benzetim ortamında hem de gerçek zamanlı olarak test edilmektedir. Elde edilen sonuçlar zorlayıcı koşullar altında gürbüz kontrol yöntemleri olan H_{∞} ve çevrim şekillendiren kontrolcülerin bozucu girişler altında daha iyi başarımlar sağladığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gürbüz Kontrol, Kardan Mekanizması, Kızılötesi Görüntüleme Sistemleri, Kontrol Teorisi, Stirling Soğutucu.

ROBUST CONTROL OF A 2-DOF GIMBAL MECHANISM INTEGRATED WITH STIRLING COOLER

ABSTRACT

Infrared imaging systems are frequently preferred in civil and military applications due to its day and night operation capabilities. Steering mechanisms are used in infrared imaging systems to get wider field of views. This mechanism is called gimbal mechanism. Gimbal mechanisms may have different configurations and different degree of freedoms according to the requirements. In this study, 2-DOF gimbal mechanism is investigated. In some infrared imaging systems, cryogenic cooling is required to avoid thermal noises. The investigated infrared system is integrated with Stirling cooler. Stirling coolers vibrate cause of its moving parts. Infrared detectors and coolers are assembled in high vacuum conditions and used one piece without disassembled. That's why this vibration can not be isolated with passive vibration isolators. Controller used in gimbal mechanisms must be robust for this disturbances to get quality images without blur. There are lots of control methods used for gimbal mechanisms. Owing to external disturbances, robust control methods are preferred. PID, H_∞ and robust loopshaping controllers are designed for the gimbal mechanism in this study. Controllers designed are tested as a realtime application in addition to simulations. According to the results, robust controllers are well performed and more effective under disturbances.

Keywords: Robust Control, Gimbal Mechanism, Infrared Imaging Systems, Control Theory, Stirling Cooler.

GİRİŞ

Görüntüleme sistemlerinin sabit bir pozisyonda düşeyde ve yatayda görebildiği açılar görüş açısı (Field of View, FOV) olarak tanımlanmaktadır. Tasarım gereksinimlerine göre bazen FOV değerleri yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple görüntüleme sistemi ile daha geniş açılarda görüntü almak üzere mekanizma tasarımları yapılmaktadır. Görüntüleme sisteminin yönlendirilerek görebildiği ve görüş açısına göre daha geniş olan açı görüş alanı (Field of Regard, FOR) olarak adlandırılmaktadır. Görüntüleme sistemi yönlendirme mekanizmasına ise kardan (Gimbal) adı verilmektedir.

Bu çalışmada, belirlenen gereksinimlere göre kardan tasarımı yapılmaktadır. Kardan tasarımı için ilk olarak kardan yapısının belirlenmesi gerekir. Kardan yapısı belirlendikten sonra kardanın kinematik analizi yapılarak sonuçlara göre kardan bütünü için bileşen seçimleri yapılmaktadır. Tasarımda kullanılacak bileşen seçimlerine göre ise sistem tasarımı işlemleri icra edilmektedir. Tasarım çalışmaları sonucunda elde edilen bütün için sistem tanımlama ve kontrolcü tasarımı faaliyetleri yürütülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, iki eksenli kardan tasarımı yapılarak buna uygun olarak test düzeneği kurulmaktadır. Test düzeneği üzerinden gerçek zamanlı verilere göre sistem tanımlama işlemi yapılarak elde edilen sisteme gereksinimlere uygun olarak kontrolcü sentezlenmektedir.

1. KIZILÖTESİ GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİ

Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde daha yüksek görüş kabiliyetine sahip olmak için kardan sistemleri tasarlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında iki eksenli bir kardan mekanizması tasarlanmaktadır. Sistemde kullanılan kızılötesi kamerada soğutma sistemi olarak Stirling soğutucu kullanılmaktadır. Kızılötesi kamera kardan sisteminde dönel faydalı yük olarak kullanılırken Stirling soğutucu soğutma işlemi sırasında titreşime sebep olmaktadır.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, yukarıda tanımlanan kızılötesi görüntüleme sistemi için Stirling soğutucu titreşimlerine rağmen istenilen performansı gerçekleştiren bir kontrolcü tasarımı yapmaktır.

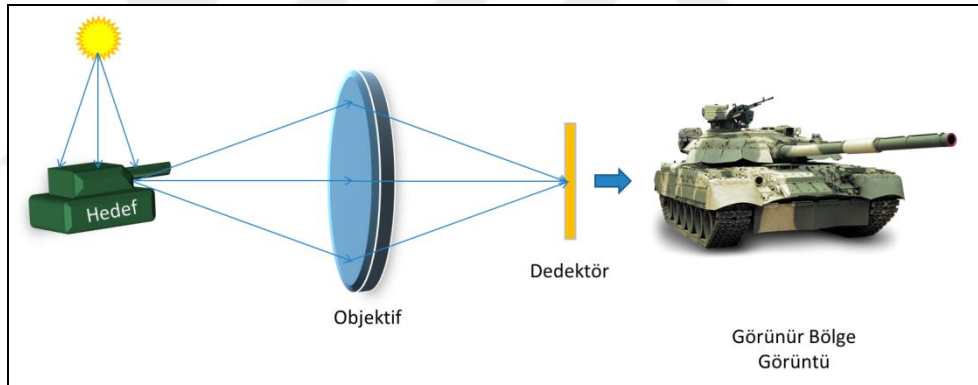
1.2. Algılama Yöntemleri

Algılama sistemlerinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler aktif, yarı aktif ve pasif algılama olarak sınıflandırılabilir. Aktif algılama yönteminde algılanacak hedefe algılama sistemi üzerinden sinyal gönderilip alınarak algılama işlemi yapılır. Buna karşın yarı aktif algılama yönteminde gönderilen sinyal algılama sisteminden bağımsız farklı bir kaynaktan gönderilmektedir. Pasif algılama yönteminde ise algılama sadece algılama sistemine gelen sinyaller ile yapılmakta olup ayrıca bir sinyal gönderme işlemi yapılmamaktadır.

Radar ve lazer algılama yöntemi aktif veya yarı aktif bir yöntem olarak kullanılabilir. Eğer hedef farklı bir işaretleme sistemi ile işaretlenerek algılama yapılırsa bu yöntem yarı aktif bir yöntem olarak sınıflandırılmaktadır. Kızılötesi algılama sistemi ise pasif bir algılama yöntemidir. Kızılötesi algılama sistemleri cisimlerin kendiliğinden yaptığı ışınlamaları tespit etmektedir.

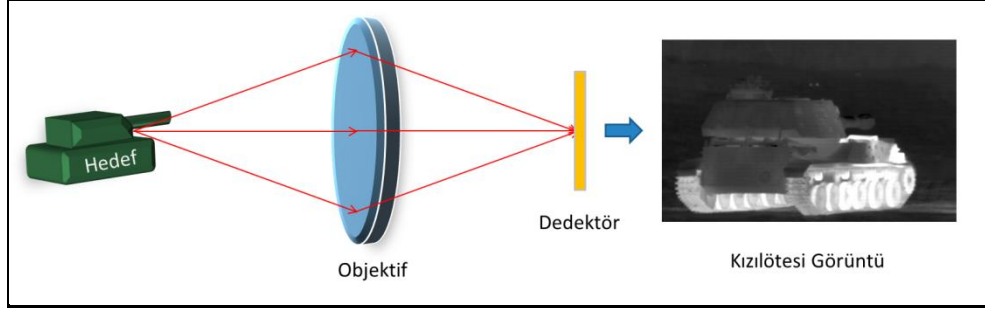
1.3. Görüntülemenin Temelleri

Görüntüleme sistemleri farklı dalga boylarında farklı işleyişler ile yapılabilmektedir. 0,4-0,75 [μm] dalga boyu görünür tayfsal bölgeyi (Spectrum) ifade etmektedir [1]. Görünür bölgede görüntüleme, görüntülemesi yapılan hedef cismin üzerinden yansıyan güneş ışınların algılanması ile yapılmaktadır. Hedef üzerinden yansıyan ışınlar bir optik sistem vasıtasıyla dedektör üzerine düşürülmektedir. Dedektör, algıladığı ışınları bazı elektronik kartlar ve bilgisayarlar ile anlaşılır hale getirmektedir. Görünür bölgedeki görüntüleme prensibi Şekil 1.1 ile özetlenebilmektedir. Görünür bölgede görüntüleme işlemi, bir ışık kaynağından gelen ışınların veya bir ışık kaynağının yansıyan ışınlarının toplanması ile yapılmaktadır. Bu sebeple bu tayfsal bölgede bir ışık kaynağında ihtiyaç duyulmaktadır. Işık kaynağı olmayan ortam koşullarında bu tayfsal bölgede görüntüleme yapılamamaktadır.



Şekil 1.1. Görüntüleme prensibi – görünür bölge

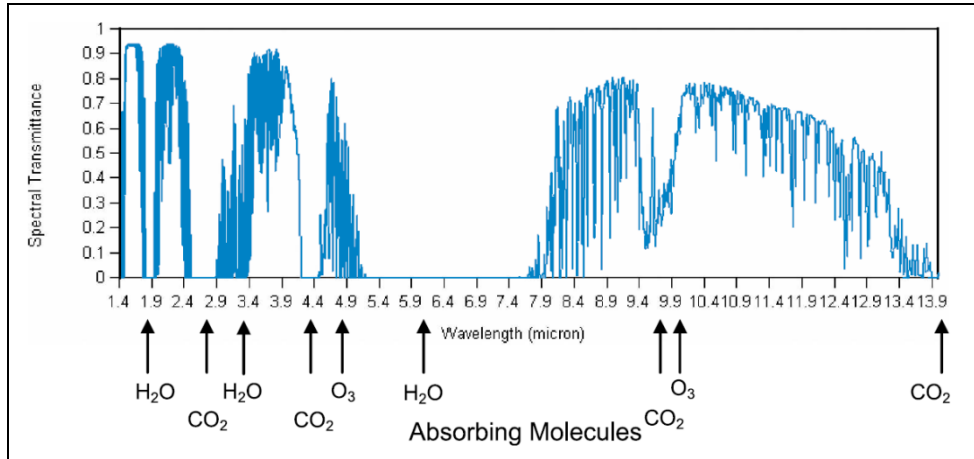
0,75-15 [μm] dalga boyu kızılötesi tayfsal bölgeyi ifade etmektedir [1]. Kızılötesi bölgede görüntüleme görünür bölgedekine benzer şekilde yapılmaktadır; ancak kızılötesi bölgede optik sistemin topladığı ışınlar güneşin veya herhangi bir ışık kaynağının yansıyan ışınları değil hedef cismin kendi üzerinden gelen ısı yayınıdır. Mutlak sıcaklık (0 [K]) üzerinde ısıya sahip her cisim ısı yayını yapmaktadır. Kızılötesi bölgedeki görüntüleme prensibi Şekil 1.2 ile özetlenmektedir.



Şekil 1.2. Görüntüleme prensibi – kızılötesi bölge

1.4. Kızılötesi Görüntülemenin Temelleri

0,75-15 [μm] dalga boyu ile tanımlanan kızılötesi tayfsal bölge genel olarak kendi içinde üç alt tayfsal bölgeye ayrılır. 1-3 [μm] dalga boyu, kısa dalga boyu kızılötesi (Short-Wave Infrared, SWIR) bölge; 3-5 [μm] dalga boyu, orta dalga boyu kızılötesi (Mid-Wave Infrared, MWIR) bölge; 8-12 [μm] dalga boyu, uzun dalga boyu kızılötesi (Long-Wave Infrared, LWIR) bölge olarak tanımlanmaktadır. Kızılötesi tayfsal bölge boyunca bazı dalga boylarında atmosferdeki bazı moleküller sebebi ile soğrulma gerçekleşir. Kızılötesi tayfsal bölge Şekil 1.3 ile gösterilmektedir. Şekil 1.3'te görülebileceği gibi yaklaşık 5,4-7,4 [μm] arasındaki dalga boyundaki yayınımlar atmosferdeki su moleküllerince soğrulmaktadır ve bu bölgede geçirgenlik azalmaktadır.



Şekil 1.3. Kızılötesi tayf [1]

Kızılötesi sistemlerin birçok üstün yönünün yanında bazı zayıf yanları da mevcuttur [2].

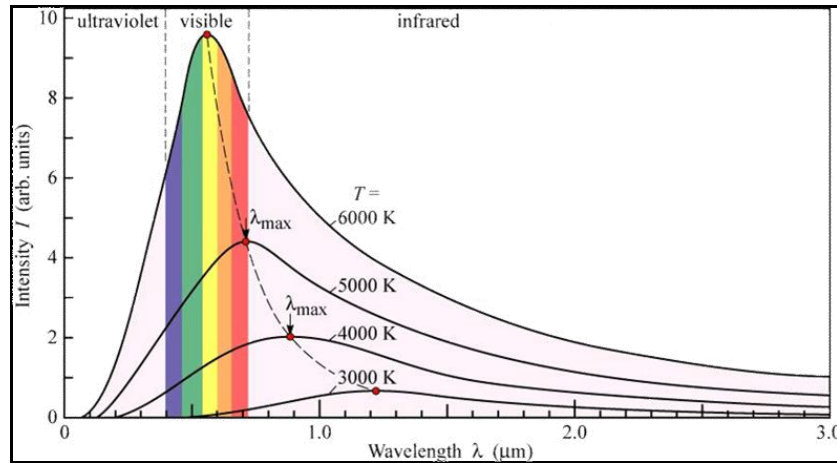
Kızılötesi sistemlerin üstün yanları:

- Aktif sistemlere göre küçük boyutlu ve daha hafif
- Aktif sistemlere göre düşük maliyetli
- Görünür bölge gizleme metotlarına karşı etkin
- Gece ve gündüz ortam koşullarında çalışır olma
- Radar sistemlerine göre daha yüksek açısal doğruluk
- En az menzil limitinin olmaması
- Destek donanım gerekliliğinin azlığı

Kızılötesi sistemlerin zayıf yanları:

- Atmosfer koşullarına bağımlı olması sebebi ile her hava koşulunda çalışamama zayıflığı ve arka plan gürültüleri
- Yalnız bakış hattı tespiti imkânı
- Kriyojenik soğutma ihtiyacı

Isıl yayınım yapan objeler/hedefler kendi sıcaklıklarına göre farklı dalga boylarında daha iyi görüntülenebilmektedir. Şekil 1.4'te farklı sıcaklıkların en iyi görüntülenebileceği dalga boylarına ait veriler yer almaktadır. Şekil 1.4'teki grafikler göstermektedir ki farklı sıcaklıklara ait hedefler farklı dalga boylarında farklı oranlarda yayınım yapmaktadır. Bu durumda da ilgili hedefler farklı dalga boyları ve/veya farklı bantlar kullanılarak daha iyi görüntülenebilmektedir. Şekil 1.4 ile verilen grafik Siyah Cisim (Black Body) ışıması olarak bilinmektedir.



Şekil 1.4. Siyah cisim ışıması [3]

En yüksek dalga boyu (1.1) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilir [3].

$$\frac{\partial M_{e,\lambda}(\lambda,T)}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \lambda_{\max} T = 2898 [\mu\text{m.K}] \quad (1.1)$$

(1.1) numaralı denklem göz önüne alınırsa bazı hedef sıcaklıklarının hangi dalga boylarında algılanabileceği tespit edilebilmektedir. Tablo 1.1’de hedef sıcaklıklarına bağlı olarak dalga boyları hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada kullanılan hedef sıcaklıkları yaklaşık olarak kullanılmaktadır ve sadece dalga boyu ve görüntüleme bantlarının ayırımını ifade etmek üzere verilmektedir.

Tablo 1.1. Hedef sıcaklıklarına bağlı dalga boyu kestirimi

Hedef Sıcaklığı	Dalga Boyu	Kızılötesi Bölge	Örnek Hedef
300 [K]	9,66 [μm]	LWIR	Oda sıcaklığındaki hedefler, insan, binalar vb.
1000 [K]	2,898 [μm]	SWIR, MWIR	Motor sıcaklığındaki hedefler, uçak vb.
4000 [K]	0,7245 [μm]	Görünür Bölge	Yüksek sıcaklığa sahip hedefler, Güneş vb.

Kızılötesi alt bölgelerin kendi aralarında farklı üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Şekil 1.5’te yanan bir aracın MWIR ve LWIR kameralar ile alınan görüntüleri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere MWIR yanma görülen bölgelerde LWIR’a göre doyuma ulaşmakta ve yanan aracın yakın bölgeleri iyi bir şekilde görüntülenememektedir. Bu sebeple Şekil 1.5’te görülene benzer bir harekât ortamında uzun dalga boyunda görüntüleme yapmak tercih edilebilecektir.



Şekil 1.5. Orta ve uzun dalga boyu karşılaştırması [4]

Görüntüleme sistemi tasarımında ele alınacak ilk hususlardan birisi görüntülenecek muhtemel hedeflerin belirlenmesi ve bu hedeflere ve uygulama veya harekât koşullarına uygun görüntüleme bandının belirlenmesidir. Seçilen görüntüleme bandına göre elektro-optik tasarım yapılmaktadır. Bu işlemlerin ardından gerek duyulması halinde kardan mekanizması tasarımını da içeren elektro-mekanik tasarımlar ele alınmaktadır.

1.5. Kızılötesi Soğutma Yöntemleri

Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde karanlık akım (Dark Current) sebebi ile oluşabilecek ısı gürültüyü azaltmak için soğutma gereksinimi doğabilmektedir. Soğutma işlemi soğutmalı kızılötesi görüntüleme sistemlerinde kriyojenik (Cryogenics) sıcaklık olan 77 [K] değerine kadar yapılmaktadır. Günümüzde bazı soğutmalı kızılötesi dedektörler için 100 [K] civarında soğutma yeterli olmaktadır.

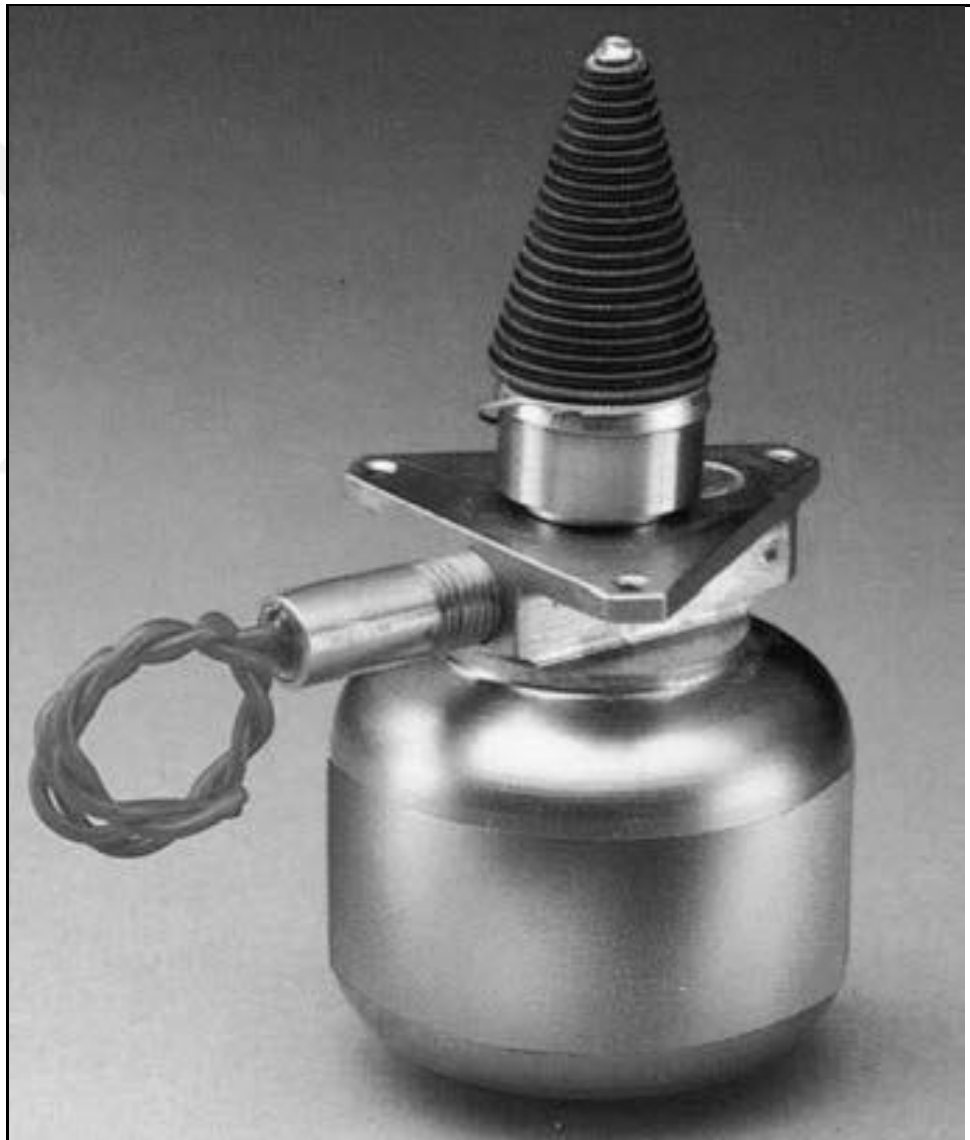
Gifford McMahon, Pulse Tube, Sorption, Brayton, Adiabatic Demagnetization, Peltier, Stirling ve Joule-Thompson gibi birçok kriyojenik soğutma yöntemi vardır [5]. Özellikle hacim ve ağırlık kısıtları sebebi ile güdümlü mühimmatlarda ve insansız hava araçlarında en çok Stirling soğutucu ve Joule-Thompson soğutucu kullanılmaktadır. Diğer soğutma yöntemleri endüstriyel uygulamalar ve uzay uygulamaları gibi başka alanlarda tercih edilmektedir. Peltier soğutma ise soğutmasız kızılötesi görüntüleme sistemlerinde performansı iyileştirmek için uygulanan bir yöntemdir. Peltier soğutma metodunda önemli gelişmeler katedilerek kızılötesi soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılacağı tahmin edilmektedir.

Tez kapsamında güdümlü mühimmatlarda sıklıkla tercih edilen Stirling soğutucu ve Joule-Thompson soğutucu üzerinde durulacaktır. Tez kapsamında tasarımı yapılan deney düzeneğinde tümleşik dönel tip Stirling soğutucu (Integrated Rotary Stirling Cooler) kullanılmaktadır.

1.5.1. Joule-Thompson (J-T) soğutucu

J-T soğutucu, yüksek basınçlı bir soğutucu akışkanın ince bir boru hattından ilerlerken bir anda yüksek hacimli bir alana girmesi ve ortamdan ısı çekmesi ile soğutma işlemini gerçekleştirmektedir. J-T soğutma bir açık çevrim soğutma

yöntemidir. J-T soğutma yönteminde yüksek basınçlı gazın muhafazası için bir gaz tankına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 1.6'da gaz tankı ile tümleşik olarak görülen bir J-T soğutucu yer almaktadır. J-T soğutucunun soğuma süresi birkaç dakika gibi kısa olması sebebi ile tercih sebebidir. Dedektör soğuduktan sonra dedektörün soğuk kalma süresi gaz tankının hacmine bağlı olarak değişmektedir. Ne kadar yüksek hacimli gaz tankı olursa dedektör o kadar uzun süre soğutulabilir. Gaz tankı sebebi ile görüntü alma süresi sınırlanmaktadır ve bu durum J-T soğutucunun bir zayıf yönü olarak ele alınmaktadır.



Şekil 1.6. Mühimmat güdümü için kullanılan örnek Joule-Thompson soğutucu [5]

J-T soğutucu yapısında hareketli bir parça barındırmaması sebebi ile üstün bir özelliğe daha sahiptir. Bu durum soğutucunun herhangi bir titreşime sebep olmamasının yanı sıra güvenilirlik açısından da olumlu bir etkidir. Savunma sanayinde birçok mühimmatta kullanılan kızılötesi görüntüleme sisteminde J-T soğutucu kullanıldığı tahmin edilmektedir.

1.5.2. Stirling soğutucu

Stirling soğutucu, soğutucu akışkanın bulunduğu hacmi azaltarak ve artırarak kapalı çevrim olarak soğutma işlemini gerçekleştirmektedir. Bu işlem yapılırken hareketli pistonlar kullanılmaktadır. Hareketli pistonlar sebebi ile soğuma işlemi sırasında titreşim meydana gelmektedir. J-T soğutucunun aksine ayrıca bir gaz tankı ihtiyacı bulunmayıp görüntü alma süresi soğutucunun ömrü ile sınırlanmaktadır.

Stirling soğutucular hareket şekline ve mekanik yapısına göre dönel veya doğrusal olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Bunun yanında dönel tip Stirling soğutucu aynı zamanda tümleşik veya ayırık olarak farklı yapılarda olabilir. Farklı üretici firmalara ait bazı ticari Stirling soğutucu ve tipleri Tablo 1.2 ile verilmektedir. Stirling soğutucu tipleri ve örnekleri Şekil 1.7’de gösterilmektedir.

Tablo 1.2. Stirling soğutucu tipleri

Üretici	Model Numarası	Soğutucu Tipi
RICOR [®]	K508	Tümleşik Dönel
THALES [®]	RM4	Tümleşik Dönel
RICOR [®]	K549	Ayrık Dönel
THALES [®]	LSF95097	Ayrık Doğrusal
RICOR [®]	K527	Ayrık Doğrusal
AIM [®]	SX040	Ayrık Doğrusal
COBHAM [®]	LC1075	Ayrık Doğrusal



Şekil 1.7. Stirling soğutucu tipleri [5]

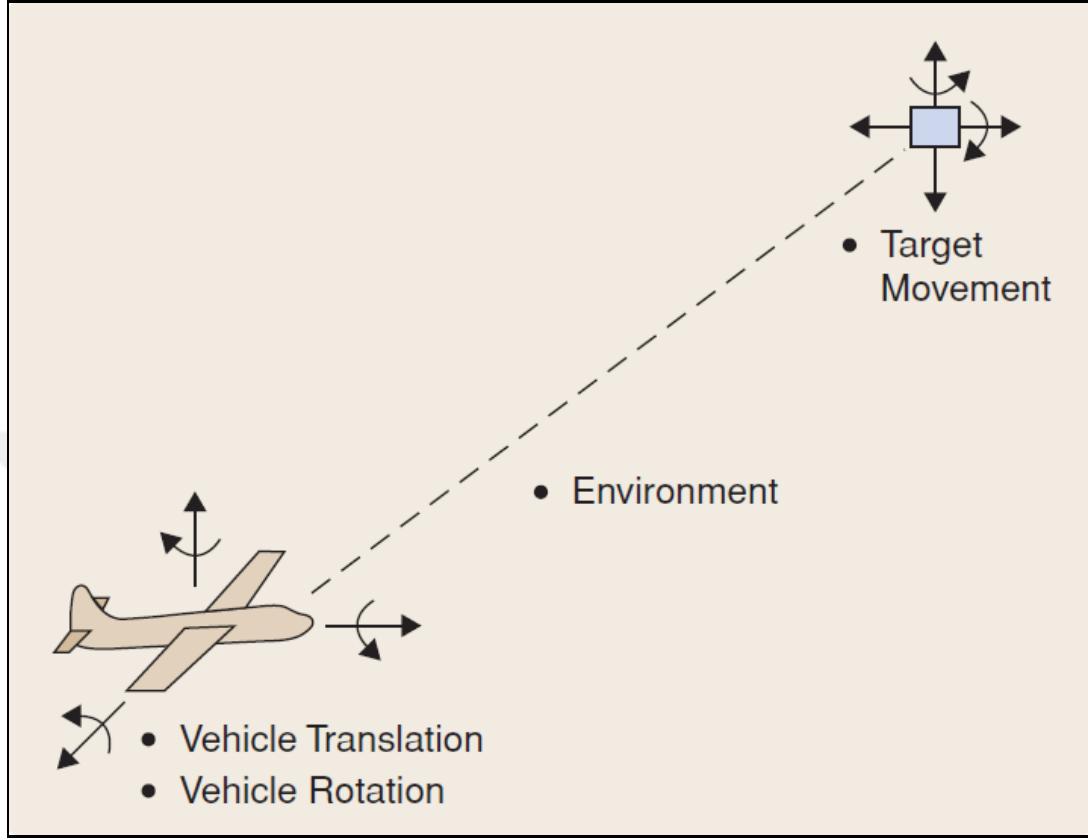
Stirling soğutucu soğutma işlemi sırasında oluşturduğu titreşim sebebi ile dedektör ile paketlenmiş olarak bir yapıya sabitlenerek kullanılmaktadır. Bu tarzda bir kardanlı tasarımda dedektör üzerinde toplanacak ışınlar gerekli optik bileşenler ile toplanarak dedektöre odaklanmalıdır. Bunun gibi tasarımlarda ışınların kardan yapısı ve ilgili diğer optik elemanlar ile yönlendirilmesi söz konusu olduğu için optik kayıplar artmaktadır.

Tez kapsamında ele alınan tasarımda Stirling soğutucu bir yere sabitlenmek yerine kamera bütünü olarak kardan yapısında yararlı dönel yük olarak kullanıldığı kabul edilmektedir. Bu tasarım seçeneğinde Stirling soğutucunun yaratacağı titreşimler görüntülerde bozulmalara sebep olabilecektir. Görüntülerde bulanıklaşma olmaması gerek görüntü işleme işlemleri için gerekse hedef ile ilgili elde edilebilecek bilgiler sebebi ile önemli bir hususdur.

1.6. Kardan Mekanizması

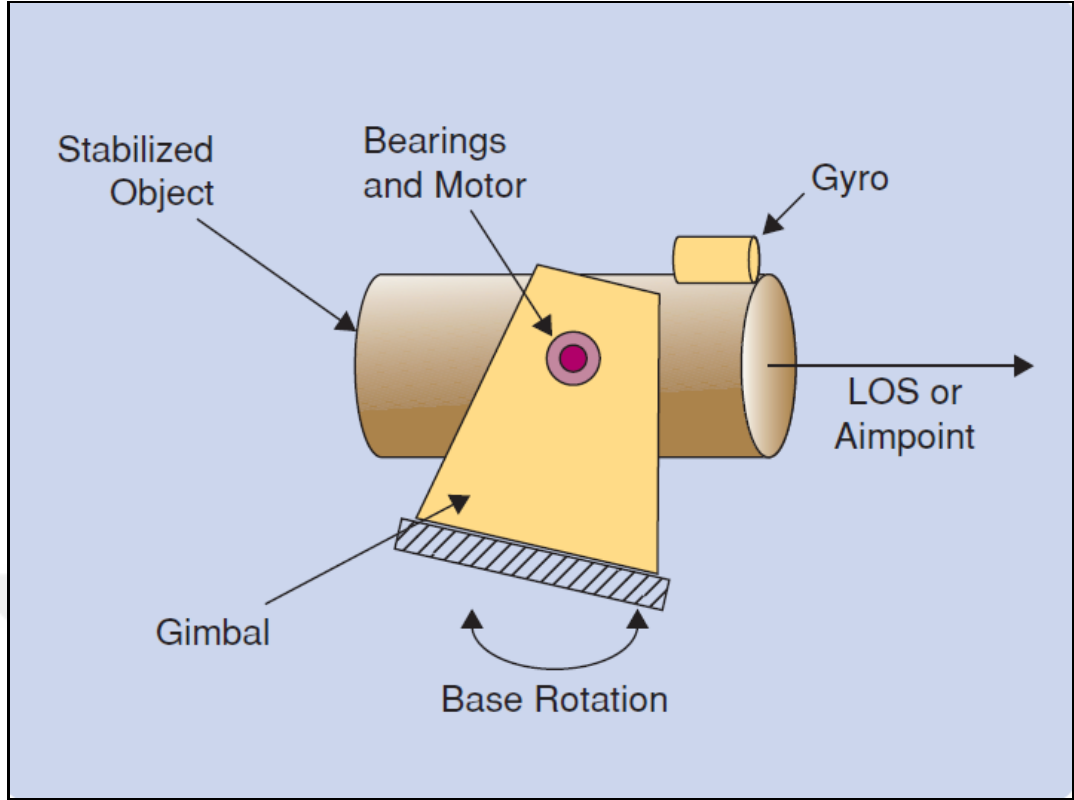
Görüntüleme sistemi yönlendirme mekanizması olarak kullanılan kardan mekanizması için bağlı olduğu platform (mühimmat, uçak, insansız hava aracı vb.) ile hedef arasındaki kinematik ilişki önemli bir tasarım girdisidir. Kardan ve hedef arasındaki kinematik ilişkide her ikisinin de duruşu (Pose) incelenmektedir. Duruş ifadesi içerisinde dönel (Rotation) ve doğrusal (Translation) hareketleri barındırmaktadır. Kardan ve hedef arasındaki ilişki Şekil 1.8'deki gibi

görselleştirilebilmektedir. Kardan kinematik analizi 3.1 numaralı bölümde ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.



Şekil 1.8. Kardan ve hedef arasındaki kinematik ilişki [6]

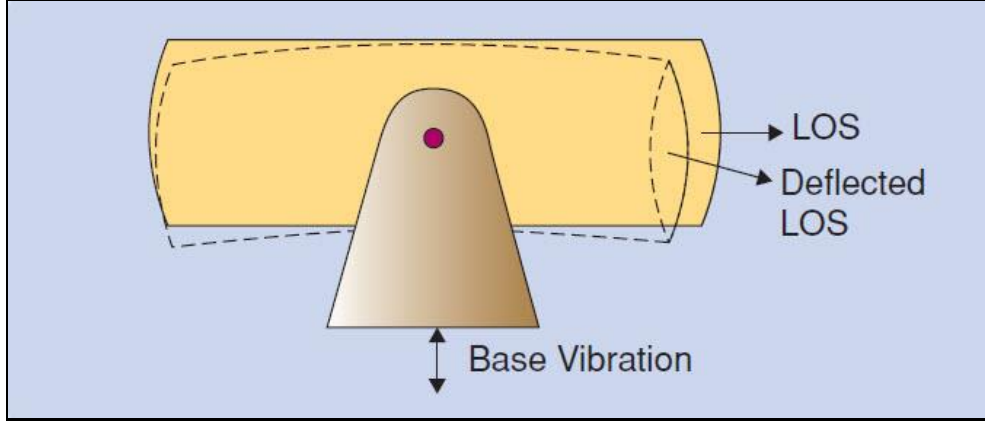
Kardan mekanizması tasarım gereksinimlerine göre farklı serbestlik derecelerine (Degree of Freedom, DOF) sahip olabilmektedir. Şekil 1.9’da tek serbestlik derecesine sahip bir yönlendirme mekanizması gösterilmektedir. Bu mekanizmanın amacı platform hareketlerinden gelen bozucu etkilere (Base Motion) rağmen bakış hattının (Line of Sight, LOS) sürekli olarak hedefe yönelimini sağlamaktır. Mekanizmanın tahrik edilebilmesi için kullanılan eyleyici (Motor) yönlendirilecek yararlı yük hareketini sağlayacak şekilde yataklama (Bearing) işlemi ile bütünlenmektedir. Yararlı yükün (Payload) üzerinde yönelim hareketlerinin hız bilgisini elde etmek amacı ile dönüölçer (Gyro) isimli elemanlar da kullanılmaktadır.



Şekil 1.9. Tek eksenli kardan mekanizması [6]

1.7. Kardan Mekanizmasının Kararlılaştırma

Görüntüleme sisteminde bütünlenen platformların hareketleri ve çevresel dış bozucu etmenler sebebi ile elde edilen görüntülerin bulanık olmaması için kardan mekanizmasında kararlılaştırma (Stabilization) işlemi yapılmaktadır. Platformdan gelen etkiler sebebi ile Şekil 1.9’da verilen tek eksenli bir kardan mekanizmasında bakış hattının nasıl bozulabileceği Şekil 1.10’da gösterilmektedir. Şekil 1.10’da gösterilen dış bozucular görüntüleme sisteminin bütünlendiği kaideye titreşim olarak yansımaktadır. Hava platformları ele alınırsa bahsedilen titreşimler aerodinamik yükler sebebi ile meydana gelmektedir, deniz platformlarında bu bozucu hareketler özellikle deniz dalgaları sebebi ile vukuu bulurken kara araçlarında ise özellikle karayolu engebeleri sebebi ile gerçekleşmektedir.



Şekil 1.10. Bozucu etkiler altında bakış hattı değişimi [6]

Kararlılaştırma işlemi için bazı örnek uygulamalar Şekil 1.11’de verilmektedir. Kararlılaştırma gereksinimleri uygulama alanlarına göre değişiklik gösterebilmektedir; zira kararlılaştırma yapılacak görüntüleme sistemi sivil, askeri, havacılık veya uzay alanlarında olabilmektedir.



Şekil 1.11. Ataletsel kararlılaştırma uygulamaları [6]

Kardan mekanizması için tanımlanabilecek bozucu etkiler aşağıdaki gibi ayrıntılı olarak listelenebilir [6]:

- Sürtünme (Friction)
- Kütle kaçıklığı (Imbalance)

- Kinematik bağıllık (Kinematic Coupling)
- Aerodinamik moment ve kuvvetler (Aerodynamic Torques and Forces)
- Dinamik kaçıklıklar (Dynamic Imbalance)
- Jiroskopik torklar (Gyroscopic Torques)
- Sistem üzerindeki titreşimler (Onboard Shaking Forces)
- Eyleyici ve dişli etkileri (Actuator and Gear Reactions)
- Kablo ve yay torkları (Cable and Spring Torques)
- Manyetik mukavemet (Magnetic Cogging)
- Yapısal etki olarak bükülme (Bending)
- Yapısal etki olarak optik elemanların yer değişimi (Optical Component Displacements)
- Elastik uyum problemleri (Aniso-Elastic Effects)
- Dönüölçer ve algılayıcı gürültüsü (Gyro and Sensor Noise)
- Bakış hattı ve dönüölçer hizalama hataları (LOS and Gyro Misalignment)
- Sayısallaştırma hatası (Quantization)
- Elektronik histerisis ve gürültü (Electronic Hysteresis and Noise)

Tez kapsamında yukarıda ele alınan etkilerin çoğu 3.3 numaralı bölümde ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Sistem üzerindeki titreşimler olarak tanımlanan etki Stirling soğutucu titreşimlerine karşılık gelmektedir. Sistem tasarımı yapılırken yukarıda bahsedilen bozucu etkiler mutlaka göz önüne alınmalıdır.

1.8. Görüntüleme Sistemlerinde Bulanıklaşma Analizi

Kardan tasarımının en önemli aşamalarından birisi sistem gereksinimlerini karşılayacak en iyi kardan yapısına karar verme aşamasıdır. Kardan yapısına karar verme aşamasında ise kardanın yerleşimi ve işgal ettiği hacim, tasarlanan kardan için gerekli alt bileşenler ve platform uçuş senaryolarına göre görüntüde bulanıklaşma olup olmaması değerlendirilmesi gereken hususlardır. Platform veya mühimmat uçuş senaryolarında yer alması istenen kaçınma ve atak manevralarına sebebi ile kardan yardımı ile elde edilen görüntülerde bulanıklaşma meydana gelebilmektedir. Bilhassa yüksek frekanslarda optik eksen etrafındaki dönüşleri kararlılaştırma işlemi bulanıklaşmayı azaltmak için kullanılan önemli tekniklerden birisidir [7].

Bulanıklaşma analizi bazı rastgele uçuş senaryoları türetilerek yapılabilmektedir. Bazı uçuş senaryoları [8] numaralı çalışmada incelenmektedir. Çalışma sonuçlarına göre uçuş senaryolarında zorlayıcı atak ve kaçınma manevraları olmadığında kardan yapıları arasında doğrudan belirgin bir fark görülmemektedir; ancak kardan yapısına göre ivme gereksinimleri değişiklik göstermektedir. Bulanıklaşma seviyeleri yaklaşık aynı olması sebebi ve daha düşük ivme gereksinimi sebebi ile bu tez kapsamında yerleşim, alt bileşen, hacim, ağırlık vb. tasarım hususları göz önüne alınarak 2-3 (Pitch-Yaw, yunuslama-yandönme) kardan yapısı tercih edilmektedir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kardan mekanizması bir yönlendirme sistemi olduğu için görüntüleme sistemlerinin yansıra işaretleme sistemlerinde sivil ve askeri uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Tezin bu bölümünde kardan mekanizması ve kardan mekanizmasının kontrolüne dair yapılmış bazı çalışmalara yer verilmektedir.

Yandönme-yunuslama (yaw-pitch, 2-3) kardan yapısına sahip bir kardan tasarımı [9] numaralı çalışmada incelenmektedir. Tasarımı yapılan kardan Şekil 2.1’de verilmekte olup sistem lazer ve radar işaretleme sistemi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Yandönme-yunuslama kardan yapısına sahip bir kardan mekanizmasının görseli [9]

Kardan mekanizması [9] numaralı çalışmada doğrudan sürürlü fırçasız doğru akım motoru (direct-drive brushless direct current motor (BLDC)) ile kullanılmaktadır. Bu çalışmada, açısal konum algılayıcı olarak ise

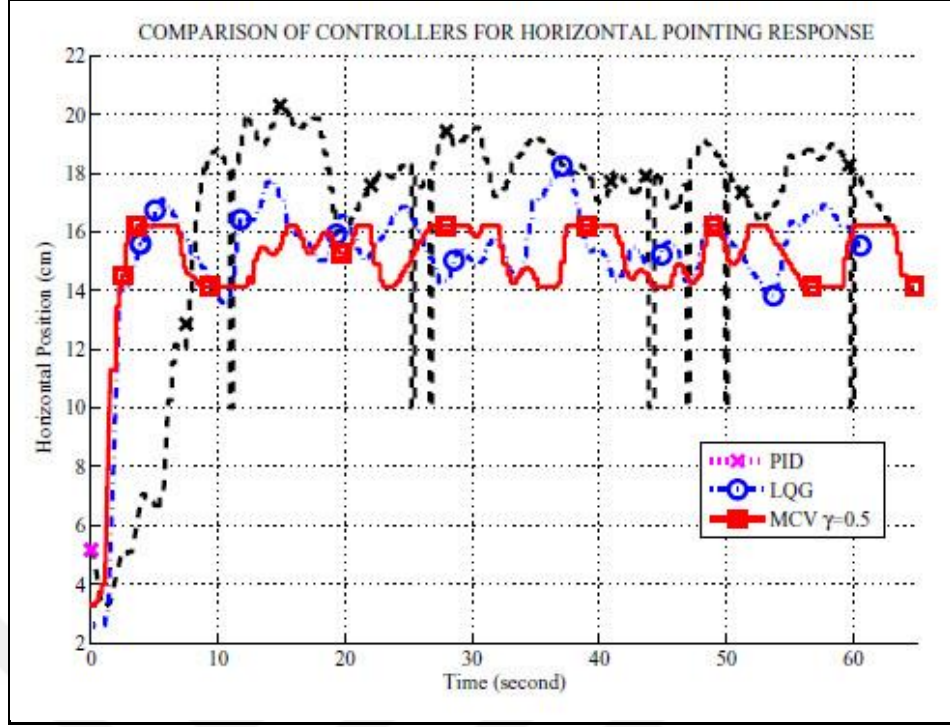
kodlayıcı (Encoder) tercih edilmektedir. Çalışmada çözücü kullanılmamasının sebebi çözücünün kodlayıcıya göre karmaşık bir yapıya sahip olması ile algılayıcının beslenmesi ve veri okunması için ayrıca bir elektronik devre ihtiyacı olması olarak ifade edilmektedir. Çalışmada kontrol yöntemi olarak PID (Proportional-Integral-Differential) ve PIV (Proportional-Integral-Velocity) kontrol metotları geliştirilmektedir. Daha iyi sonuçlar elde edilmesi sebebi ile PIV tipi kontrolcü uygulanmaktadır.

Şekil 2.2’deki gibi lazer işaretleme sisteminde kullanılmak üzere modellenen bir yandönme-yunuslama kardan yapısına sahip bir kardan [10] numaralı çalışmada incelenmektedir. Kardan tasarımında eyleyici olarak BLDC motor kullanılmaktadır.



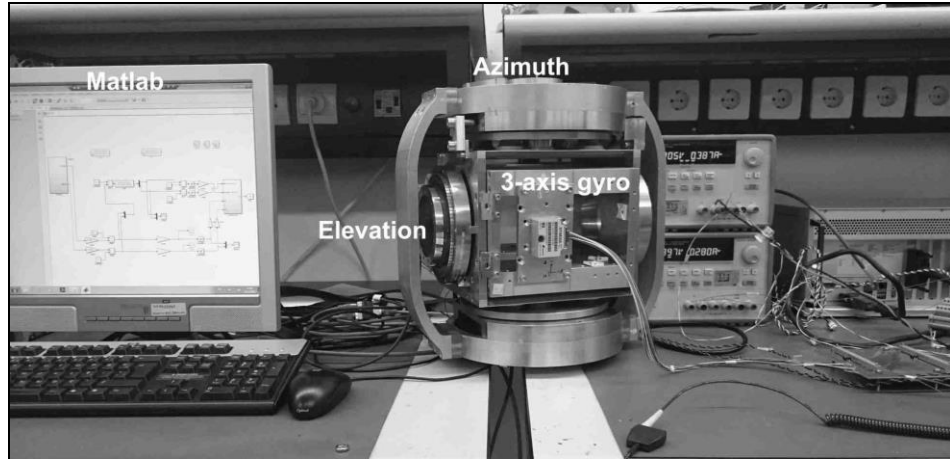
Şekil 2.2. Yandönme-yunuslama kardan yapısına sahip bir kardan mekanizmasının görseli [10]

PID kontrolcü ile LQG (Linear Quadratic Gaussian) ve MCV (Minimal Cost Variance) kontrolcülerinin başarımları [10] numaralı çalışmada karşılaştırılmaktadır. Çalışma sonucu göstermektedir ki Şekil 2.3’teki gibi MCV kontrolcü LQG ve PID kontrolcülere göre işaretleme hatasını daha fazla azaltması suretiyle daha iyi başarımlar göstermektedir.



Şekil 2.3. PID, LQG and MCV kontrolcülerin yataydaki işaretleme başarımlarının karşılaştırılması [10]

İki eksenli bir kardan tasarımı yapılarak gerçek zamanlı kontrolü [11] numaralı çalışmada yapılmaktadır. Kardanın kontrolü için LQG/LTR (Linear Quadratic Gaussian/Loop Transfer Recovery) , H_∞ ve μ kontrolcü sentezleri yapılarak kontrolcülerin başarımları karşılaştırılmaktadır.

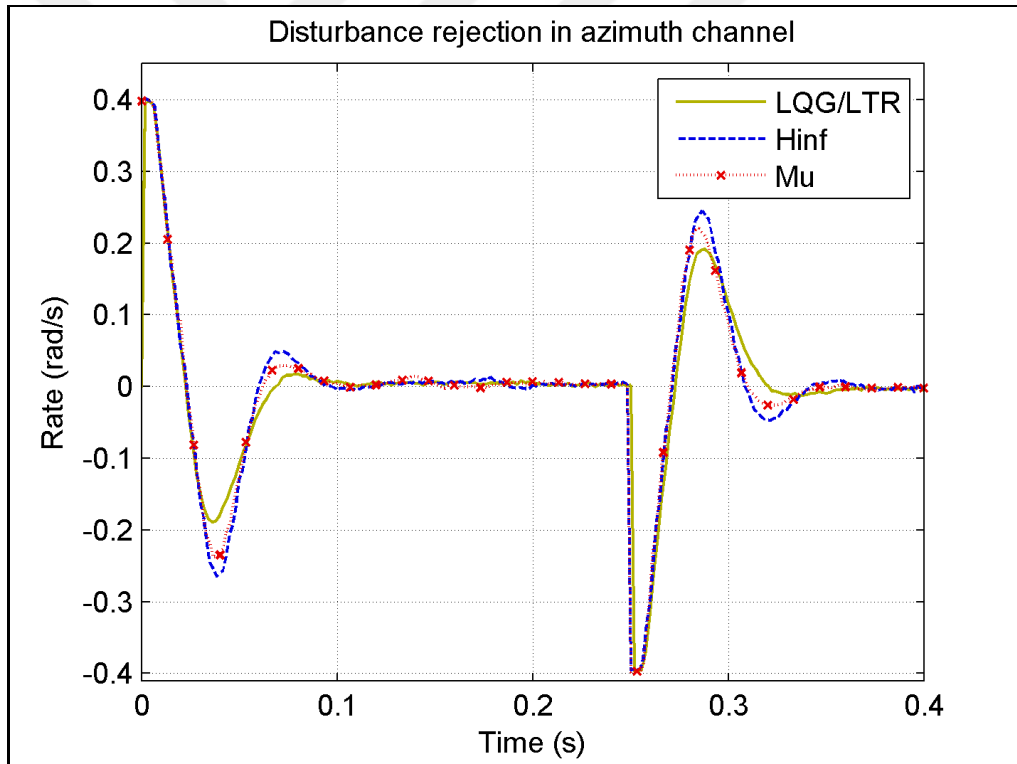


Şekil 2.4. Yandönme-yunuslama kardan yapısına sahip bir kardan mekanizmasının görseli [11]

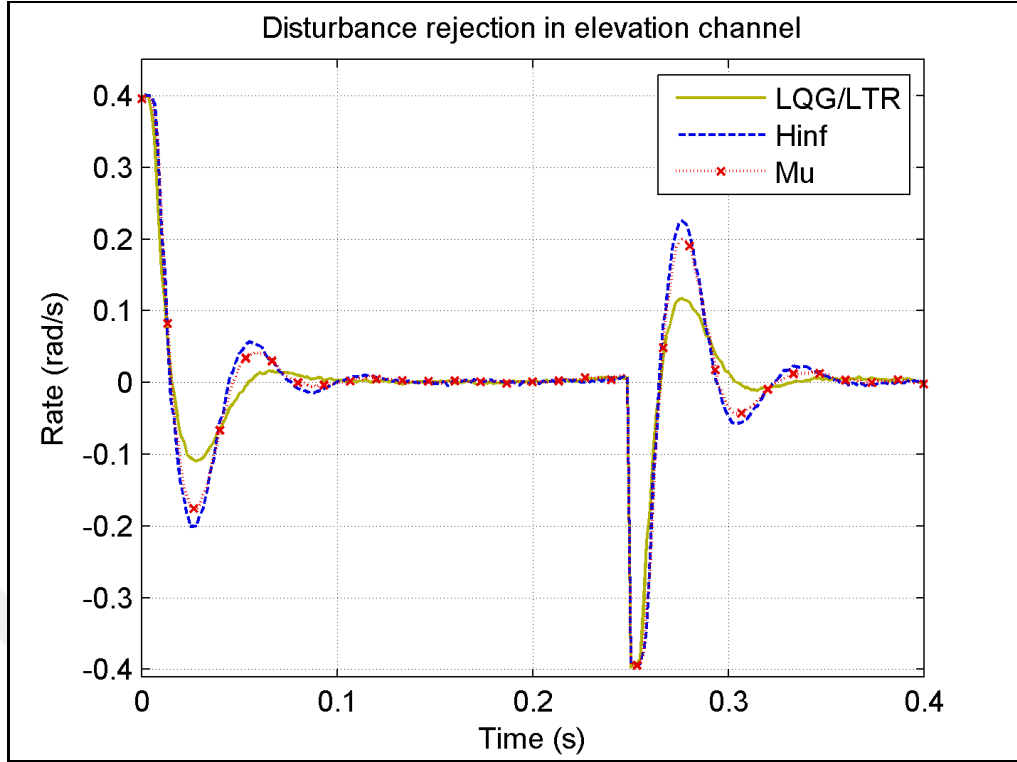
Yandönme ve yunuslama eksenleri için tasarımı yapılan kontrolcülerin bozucu girişe karşı performansları [11] numaralı çalışma için sırasıyla Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da

verilmektedir. Düşük frekans bölgelerinde H_∞ kontrolcünün yüksek kazançla sahip olması sebebi ile en iyi başarıma sahip olduğu görülmektedir. Orta frekans bölgesinde LQG/LTR kontrolcü en iyi başarıma gösterirken μ kontrolcüsünün de kesme frekansları çevresinde daha iyi çalıştığı gözlemlenmektedir. Orta frekans bölgesinde en kötü başarıma H_∞ kontrolcü göstermektedir. Yüksek frekans bölgelerinde de yine H_∞ kontrolcü daha iyi başarıma göstermektedir. Bu frekans bölgesinde LQG/LTR kontrolcü ise yüksek kazanç sebebi ile en kötü başarıma sahip kontrolcü olarak ifade edilmektedir.

Çalışma bölgesinin düşük frekansları ifade ettiği durumlarda H_∞ kontrolcünün bütün frekans bölgesinin tamamında çalışma yapılması durumunda ise μ kontrolcüsünün kullanılması [11] numaralı çalışmada önerilmektedir. (Şekil 2.5 ve Şekil 2.6)

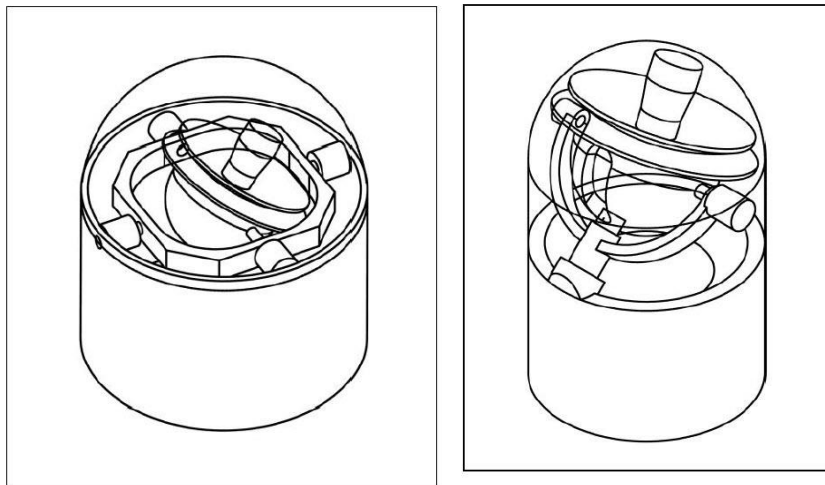


Şekil 2.5. Yandönme eksenini bozucu girişlere karşı başarıma [11]



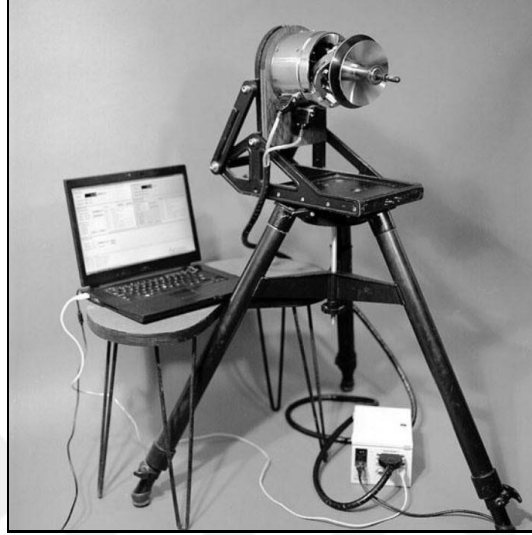
Şekil 2.6. Yunuslama eksenini bozucu girişlere karşı başarımı [11]

Yeni bir kardan mekanizma tasarımı ile [12] numaralı çalışmada algılayıcı yüzey alanı yüzde ikiyüzden daha fazla arttırılmaktadır. Bu çalışmalar kapsamında tasarlanan eski ve yeni tip kardan mekanizmaları Şekil 2.7’de verilmektedir. Yapılan yeni tasarım ile kardan hareket alanı genişletilerek daha basit ve kompakt bir yapı oluşturulmaktadır.

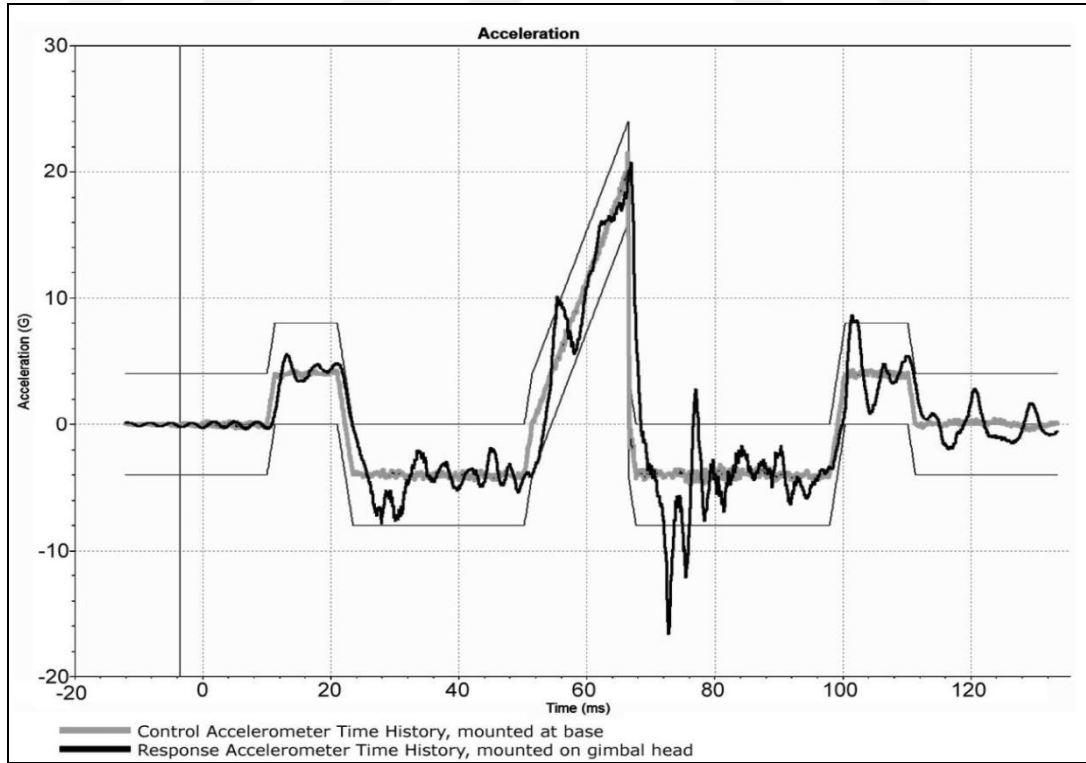


Şekil 2.7. Kardan mekanizması tasarımlarının görseli (eski-solda, yeni-sağda) [12]

Şekil 2.8’de [12] numaralı çalışmada tasarımı yapılan kardan mekanizmasının test düzeneği görülmektedir. Tasarımı yapılan yeni mekanizmanın titreşim ve şok gibi çevresel etkilere karşı daha gürbüz olduğu ifade edilmektedir. Kardan şok testine ait z eksenindeki ivme sonuçları Şekil 2.9’da verilmektedir.



Şekil 2.8. Kardan mekanizması test düzeneği [12]



Şekil 2.9. Kardan mekanizması z-ekseni pozitif şok testi ivme sonuçları [12]

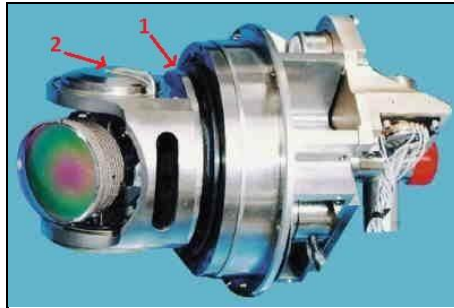
Kardan mekanizmasında oluşabilecek dinamik kaçıklıklar [13] numaralı çalışmada incelenmektedir. Ağırlık merkezinin motor dönme eksenine göre dengelenmediği durumlarda istenmeyen ekstra tork gereksinimlerinin doğabileceği ve bu durumda kontrol sisteminin veya kontrol kuralının zorlanabileceği ifade edilmektedir.



Şekil 2.10. Yunuslama-yandönme kardan yapısına sahip bir kardan mekanizmasının görseli [13]

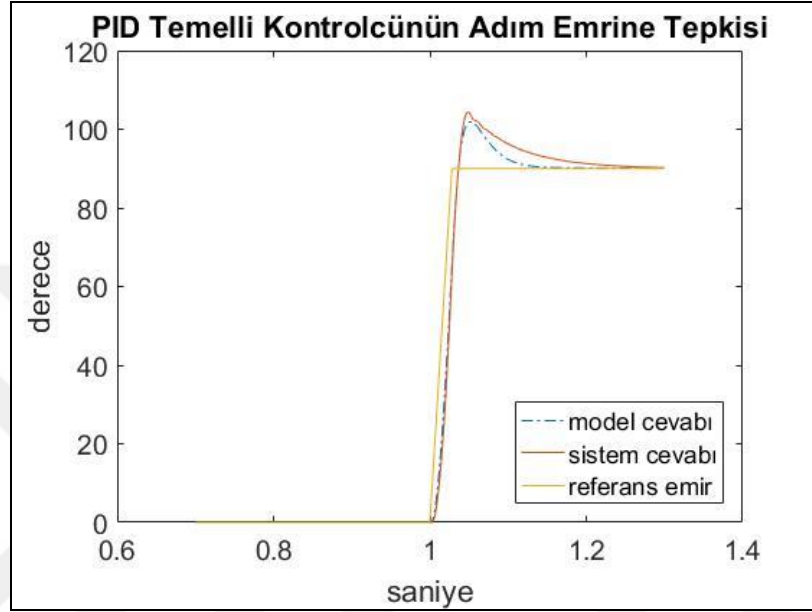
Dinamik kütle kaçıklığı için [13] numaralı çalışmada bir yöntem önerilmektedir. Dengeleme olmaması durumunda kütle kaçıklığı sebebi ile sistemin daha fazla enerji tüketeceği de ifade edilmektedir. Statik dengelemenin yanısıra dinamik dengelemenin önemi vurgulanmaktadır.

Yuvarlanma-yunuslama (Roll-Pitch,1-2) kardan yapısına sahip Şekil 2.11’de gösterilen AIM-9X füzesinin Arayıcı’sında yer alan tasarım [14] numaralı çalışmada incelenmektedir. Çalışma kapsamındaki kardan yapısı yuvarlanma-yandönme olarak tanımlanmaktadır. Yuvarlanma eksenini sebebi ile diğer eksenin ifadesinin çok bir farkı kalmamaktadır; zira 90° yuvarlanma eksenindeki dönüşlerde yuvarlanma-yandönme ve yuvarlanma-yunuslama (Roll-Yaw,1-3) kardan yapıları birbiri ile aynı olmaktadır.

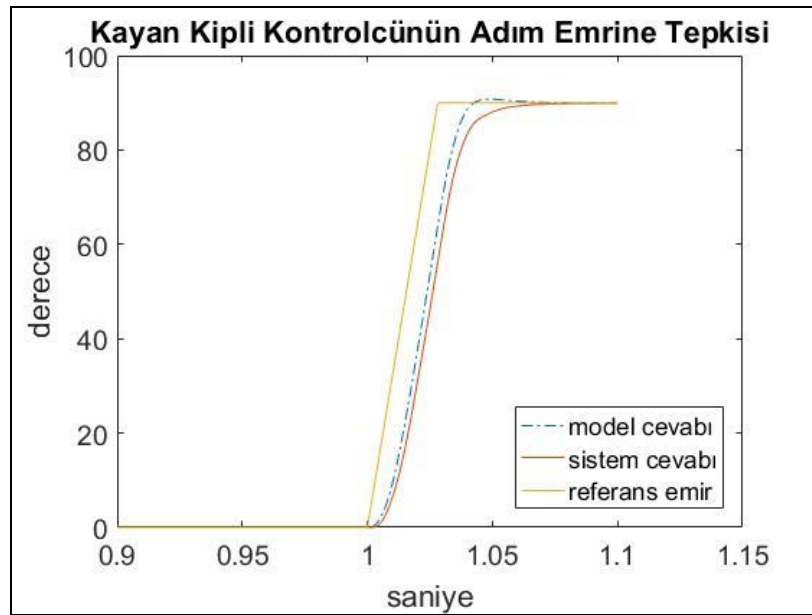


Şekil 2.11. Yuvarlanma-yunuslama (1-2) kardan yapısına sahip bir kardan mekanizmasının görseli [14]

Kontrolcü tipi olarak PID ve kayar kipli (Sliding Mode) kontrolcü [14] numaralı çalışmada kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre kayar kipli kontrolcünün bozucu etkilere karşı daha iyi cevaplar verdiği ifade edilerek kayar kipli kontrolcü ön plana çıkarılmaktadır. PID ve kayar kipli kontrolcülerin başarımları sırasıyla Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te verilmektedir.

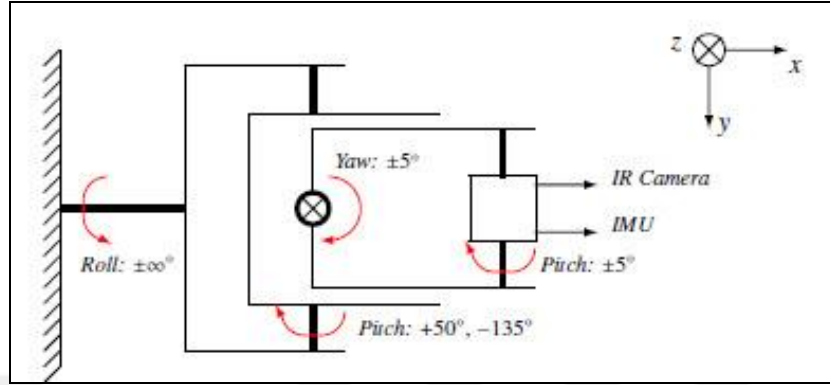


Şekil 2.12. 1-2 kardan yapısında PID kontrolcünün bozucu girişlere karşı başarımları [14]



Şekil 2.13. 1-2 kardan yapısında kayar kipli kontrolcünün bozucu girişlere karşı başarımları [14]

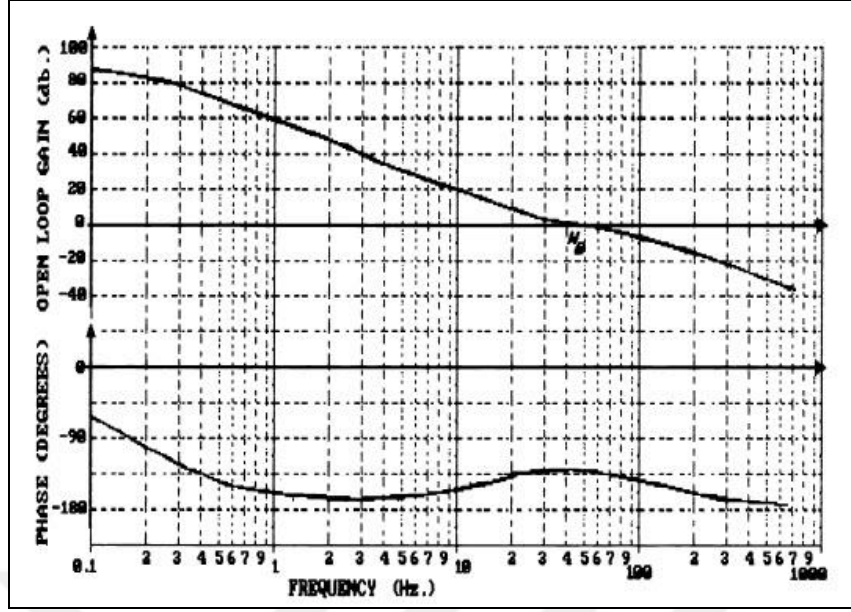
4 eksenli kızılötesi elektrooptik kardan sistemi [15] numaralı çalışmada incelenmektedir. Kardan mekanizmasının şematik çizimi Şekil 2.14'te verilmekte olup bütün eksenler birbirine dönel eklemler ile bağlanmaktadır.



Şekil 2.14. Çok serbestlik dereceli bir kardan mekanizmasının kavramsal çizimi [15]

Kardan mekanizması için [15] numaralı çalışmada kontrol yöntemi olarak IWLS (Iterative Linear Least Squares) isimli bir kestirimci kullanılmaktadır. Bunun amacı gürbüz ve en uygun çözüm yöntemlerindeki yerel minimumları eleyerek evrensel (global) minimumu bulmaktır. Bu şekilde çözüm konveks bir hal almaktadır ve bu metot çözüm yöntemini daha basit bir hale getirmektedir.

Bir optik hedef takip sistemi (Optical Target Tracking System) de [15] numaralı çalışmada incelenmektedir. Mekanizmada yüksek hassasiyet ve doğruluk sebebi ile elektriksel tahrik yöntemi tercih edilebileceği ifade edilmektedir. Elektriksel tahrik elemanının dişli elemanlar ile yüksek torkların elde edilebileceği ancak bu mekanizmalarda da boşlukların problem olabileceği belirtilmektedir. Bu tarz dişli mekanizmalarının kullanılması durumunda boşluk alma mekanizma ve yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir. Bu çalışmada kardan mekanizmasına gelebilecek atmosferik yükler sebebi ile oluşabilecek dalgalanma torkları (Ripple Torques) ve mekanik gürültülerden bahsedilmektedir. Şekil 2.15'te görülebileceği gibi tasarımı yapılan kontrol yapısındaki çevrim kazancının Bode grafiği s-uzayında " $\frac{A}{s}$ " şeklinde bir karakteristiğe yaklaşırsa da bazı frekans noktaların kırınlımlara yaşanmaktadır. İlgili kırımın noktaları kontrol çıktısında faz kazancı gibi getiriler sağlamaktadır.



Şekil 2.15. Kararlılaştırma çevriminin bode grafiği [16]

İki eksenli bir kardan yapısı için [17] numaralı çalışmada iki farklı kontrol yönteminin başarımları incelenmektedir. İlk yöntem olarak kendinden ayarlamalı bulanık PID (KAB PID, self-tuning fuzzy PID) tercih edilmekte olup ikinci bir kontrol yöntemi olarak ise parçacık sürü eniyileme (Partical Swarm Optimization, PSO) metodu kullanılıp yapay sinir ağları üzerinden eğitilerek PID katsayıları bulunmaktadır.

Tablo 2.1’de benzetimi yapılan iki kontrolcü tipi için başarımlarının karşılaştırılması verilmektedir. [17] numaralı çalışmaya göre kendinden ayarlamalı PID yöntemi, PSO PID yöntemine göre daha iyi çalışmakta ve daha az hata oluşmaktadır.

Tablo 2.1. Kontrolcü performanslarının karşılaştırılması [17]

Test	Sapma Ekseni Hatası [miliderece]		Yükselme Ekseni Hatası [miliderece]	
	KAB PID	PSO PID	KAB PID	PSO PID
10°-1 [Hz]	5	15	8	20
5°-2 [Hz]	12	50	17	65
1°-10 [Hz]	20	100	25	105

Literatür araştırması kapsamında kardan mekanizmalarında iki eksenli mekanizmaların sıklıkla kullanıldığı tespit edilmektedir. Bunun sebebi görüntüleme

veya işaretleme sistemlerinde görüntüler iki boyutlu olup hedef işaretleme veya takip işlemleri için iki boyutlu konum bilgisi yeterli olmaktadır. Üç veya daha fazla eksene sahip kardan mekanizmaları daha yüksek yük, daha yüksek görüş alanı ve operasyonel başarımlar gibi farklı gereksinimleri karşılamak üzere tercih edilmektedir.

Kardan mekanizmalarının kontrolünde ise genellikle gürbüz kontrol yöntemlerinin uygulandığı görülmektedir. Bunun sebebi de kardanın bozucu etkiler altında da başarımlarında çok kayıp olmamasının beklenmesidir. Gürbüz kontrol yöntemleri arasında LQG/LTR , H_{∞} , μ ve kayar kipli kontrolcüler olmasına rağmen kontrolcü kontrol kuralının daha iyi algoritma ve yöntemler ile düzenlendiği kontrol yöntemleri de tercih edilebilmektedir. Kardan mekanizması için gürbüz PID tasarımları da günümüzde kullanılan yöntemler arasındadır.

3. KARDAN TASARIMI

Kardan tasarımı aşamalarından kardan yapısını belirlenmesi sonrasında yapılacak ilk işlem adımı kinematik analiz olarak ele alınabilmektedir. Kinematik analiz sonucu elde edilen konum değerleri kardan mekanizmasının mekanik açı limitlerini oluşturmaktadır. Kinematik analiz çıktısı olarak ele alınan sabit yer eksen takımına göre hesaplanan hız değeri, kararlılaştırma için kullanılacak dönölçerin hız limitini belirlemek için kullanılmaktadır. Bir diğer kinematik analiz çıktısı olan ivme değerleri ise kardan mekanizmasında tahrik elemanı olarak kullanılacak eyleyicinin (motorun) tork değerini belirlemek için girdi olarak kullanılmaktadır.

3.1. Kardan Kinematik Analizi

Platform hareketlerine rağmen görüntüleme sisteminin sürekli hedefe yönelebilmesi için kardan eksenlerinin yapması gereken açısal konum, hız ve ivme değerleri kardan kinematik analizi olarak ele alınmaktadır. Bu bölümde daha önce belirlenen 2-3 kardan yapısı için platform (mühimmat), görüntüleme sistemi (kardan) ve hedef arasındaki kinematik ilişki modellenerek kardan eksenlerinin kinematik parametreleri türetilmektedir. Elde edilen sonuçlar platform için rastgele türetilen üç senaryoya uygulanarak, olası operasyonel koşullarda gerçekleşebilecek kardan açısal konum, hız ve ivme değerleri belirlenmektedir. Elde edilen sonuçlar ise elektromekanik tasarıma ve diğer sistem tasarımı hususlarına girdi sağlamaktadır.

Kardan mekanizmasının kinematik analizi ekler kısmında detaylı olarak verilmektedir. Bu kısımda kinematik analizin temel denklemleri sunulmaktadır.

3.1.1. Konum analizi

3.1.1.1. Kardanın mühimmata göre açısal konum bileşenleri

ϕ_s açısının bulunma yöntemi ile benzer şekilde kardanın mühimmata göre yandönme ve yunuslama açıları sırasıyla (3.1) ve (3.2) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\hat{C}_0^{(m,s)}[3,1]\right)^2 + \left(\hat{C}_0^{(m,s)}[1,1]\right)^2}}{\hat{C}_0^{(m,s)}[2,1]} \right) \quad (3.1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{-\hat{C}_0^{(m,s)}[3,1]}{\hat{C}_0^{(m,s)}[1,1]} \right) \quad (3.2)$$

3.1.2. Hız analizi

3.1.3.1. Kardanın yere göre açısal hız bileşenleri

Kardanın yere göre Euler açılarının zamanla değişimi ψ_s , θ_s ve ϕ_s açılarının zamana göre türevleri alınarak elde edilebilmektedir.

$$\dot{\psi}_s = \frac{\dot{y}x - y\dot{x}}{x^2 + y^2} \quad (3.3)$$

$$\dot{\theta}_s = \frac{\dot{\theta}_{sx}}{\dot{\theta}_{sy}} \quad (3.4)$$

(3.4) numaralı denklemdeki $\dot{\theta}_s$ ifadesinin pay ve paydası olan $\dot{\theta}_{sx}$ ve $\dot{\theta}_{sy}$ ifadeleri sırasıyla (3.5) ve (3.6) numaralı denklemlerdeki gibidir.

$$\dot{\theta}_{sx} = -\dot{z}x \cos \psi_s + zx \dot{\psi}_s \sin \psi_s + z\dot{x} \cos \psi_s \quad (3.5)$$

$$\dot{\theta}_{sy} = x^2 + (-z \cos \psi_s)^2 \quad (3.6)$$

Kardanın yuvarlanma hızının yere göre açısal hızı olan $\dot{\phi}_s$ ise (3.7) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\dot{\phi}_s = \frac{\dot{A}B + A\dot{B}}{A^2 + B^2} \quad (3.7)$$

(3.7) numaralı ifadede yer alan $\dot{A}$ ifadesi (3.8) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\dot{A} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 \quad (3.8)$$

$$A_1 = s\theta_m s\phi_m c\theta_s [\dot{\theta}_s c(\psi_s - \psi_m) - \dot{\theta}_m] \quad (3.9)$$

$$A_2 = c\theta_s c\phi_m [\dot{\phi}_m c\theta_m + \dot{\theta}_s s(\psi_s - \psi_m)] \quad (3.10)$$

$$A_3 = s\theta_s c\phi_m c(\psi_s - \psi_m) [\dot{\phi}_m s\theta_m + (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m)] \quad (3.11)$$

$$A_4 = s\theta_s s\phi_m s(\psi_s - \psi_m) [(\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s\theta_m + \dot{\phi}_m] \quad (3.12)$$

$$A_5 = s\theta_s c\theta_m s\phi_m [\dot{\theta}_m c(\psi_s - \psi_m) - \dot{\theta}_s] \quad (3.13)$$

(3.7) numaralı ifadede yer alan $\dot{B}$ ifadesi (3.14) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\dot{B} = -(B_1 + B_2 + B_3) \quad (3.14)$$

$$B_1 = s\phi_m c(\psi_s - \psi_m) [(\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s\theta_m + \dot{\phi}_m] \quad (3.15)$$

$$B_2 = c\phi_m s(\psi_s - \psi_m) [\dot{\phi}_m s\theta_m + (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m)] \quad (3.16)$$

$$B_3 = \dot{\theta}_m c\theta_m s\phi_m s(\psi_s - \psi_m) \quad (3.17)$$

3.1.3.2. Kardanın mühimmata göre açısal hız bileşenleri

Kardanın mühimmata göre açısal hızı (3.18) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\vec{\omega}_{s/m} = \vec{\omega}_{s/0} - \vec{\omega}_{m/0} \quad (3.18)$$

$\vec{\omega}_{s/0}$ kardanın yere göre açısal hız bileşenlerini kardan eksenleri bileşenleri cinsinden (3.21) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\vec{\omega}_{s/0} = \vec{\omega}_{s/sb} + \vec{\omega}_{sb/sa} + \vec{\omega}_{sa/0} \quad (3.19)$$

$$\vec{\omega}_{s/0}^{(s)} = \dot{\phi}_s [\hat{C}^{(sb,s)}]^T \bar{u}_1 + \dot{\theta}_s [\hat{C}^{(sa,s)}]^T \bar{u}_2 + \dot{\psi}_s [\hat{C}^{(0,s)}]^T \bar{u}_3 \quad (3.20)$$

$$\vec{\omega}_{s/0}^{(s)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta_s \\ 0 & c\phi_s & c\theta_s s\phi_s \\ 0 & s\phi_s & c\theta_s c\phi_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_s \\ \dot{\theta}_s \\ \dot{\psi}_s \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$\vec{\omega}_{m/0}$ ve $\vec{\omega}_{s/m}$ hızları sırasıyla (3.24) ve (3.26) numaralı denklemlerdeki gibi elde edilebilmektedir.

$$\vec{\omega}_{m/0} = p\vec{u}_1^{(m)} + q\vec{u}_2^{(m)} + r\vec{u}_3^{(m)} \quad (3.22)$$

$$\vec{\omega}_{m/0}^{(s)} = \hat{C}^{(s,m)} \vec{\omega}_{m/0} = [\hat{C}^{(m,s)}]^T \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\vec{\omega}_{m/0}^{(s)} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\psi & -s\theta c\psi \\ -c\theta c\psi & c\psi & s\theta c\psi \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\vec{\omega}_{s/m}^{(s)} = \dot{\psi} [\hat{C}^{(a,s)}]^T \vec{u}_3 + \dot{\theta} [\hat{C}^{(m,s)}]^T \vec{u}_2 \quad (3.25)$$

$$\vec{\omega}_{s/m}^{(s)} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} s\psi \\ \dot{\theta} c\psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Elde edilen ifadeler (3.18) numaralı denklemde yerlerine yazılarak kardanın mühimmata göre hız bileşenleri bulunabilmektedir.

$$\vec{\omega}_{s/m}^{(s)} = \vec{\omega}_{s/0}^{(s)} - \vec{\omega}_{m/0}^{(s)} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_s - \dot{\psi}_s s\theta_s - p c\theta c\psi - q s\psi + r s\theta c\psi \\ \dot{\theta}_s c\phi_s + \dot{\psi}_s c\theta_s s\phi_s + p c\theta c\psi - q c\psi - r s\theta c\psi \\ -\dot{\theta}_s s\phi_s + \dot{\psi}_s c\theta_s c\phi_s - p s\theta - r c\theta \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

(3.26) ve (3.28) numaralı denklemler eşitlenirse $\dot{\psi}$ ve $\dot{\theta}$ ifadeleri (3.29) ve (3.30) veya (3.31) numaralı denklemlerdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\dot{\psi} = \omega_3 \quad (3.29)$$

$$\psi = 0 \text{ ise } \dot{\theta} = \frac{\omega_2}{c\psi} \quad (3.30)$$

$$\psi \neq 0 \text{ ise } \dot{\theta} = \frac{\omega_1}{s\psi} \quad (3.31)$$

3.1.4. İvme analizi

3.1.4.1. Kardanın mühimmata göre açısıl ivme bileşenleri

(3.29) ve (3.30) veya (3.31) numaralı denklemlerdeki ifadelerin türevleri alınırsa kardanın mühimmata göre açısıl ivme bileşenleri (3.32) ve (3.33) veya (3.34) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\ddot{\psi} = \dot{\omega}_3 \quad (3.32)$$

$$\psi = 0 \text{ ise } \ddot{\theta} = \frac{\dot{\omega}_2 c\psi + \omega_2 \dot{\psi} s\psi}{(c\psi)^2} \quad (3.33)$$

$$\psi \neq 0 \text{ ise } \ddot{\theta} = \frac{\dot{\omega}_1 s\psi - \omega_1 \dot{\psi} c\psi}{(s\psi)^2} \quad (3.34)$$

(3.32), (3.33) ve (3.34) numaralı denklemlerde yer alan $\dot{\omega}_1$, $\dot{\omega}_2$ ve $\dot{\omega}_3$ ifadeleri sırasıyla (3.35), (3.36) ve (3.37) numaralı denklemlerdeki gibidir.

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_1 = & \ddot{\phi}_s - \dot{\psi}_s s\theta_s - \dot{\psi}_s \dot{\theta}_s c\theta_s - \dot{p}c\theta c\psi + p\dot{\theta}s\theta c\psi + p\dot{\psi}c\theta s\psi - \dot{q}s\psi - q\dot{\psi}c\psi + r\dot{s}\theta c\psi + r\dot{\theta}c\theta c\psi \\ & - r\dot{\psi}s\theta s\psi \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_2 = & \ddot{\theta}_s c\phi_s - \dot{\theta}_s \dot{\phi}_s s\phi_s + \ddot{\psi}_s c\theta_s s\phi_s - \dot{\psi}_s \dot{\theta}_s s\theta_s s\phi_s + \dot{\psi}_s \dot{\phi}_s c\theta_s c\phi_s + \dot{p}c\theta s\psi - p\dot{\theta}s\theta s\psi + p\dot{\psi}c\theta c\psi \\ & - \dot{q}c\psi + q\dot{\psi}s\psi - r\dot{s}\theta c\psi - r\dot{\theta}c\theta c\psi + r\dot{\psi}s\theta s\psi \end{aligned} \quad (3.36)$$

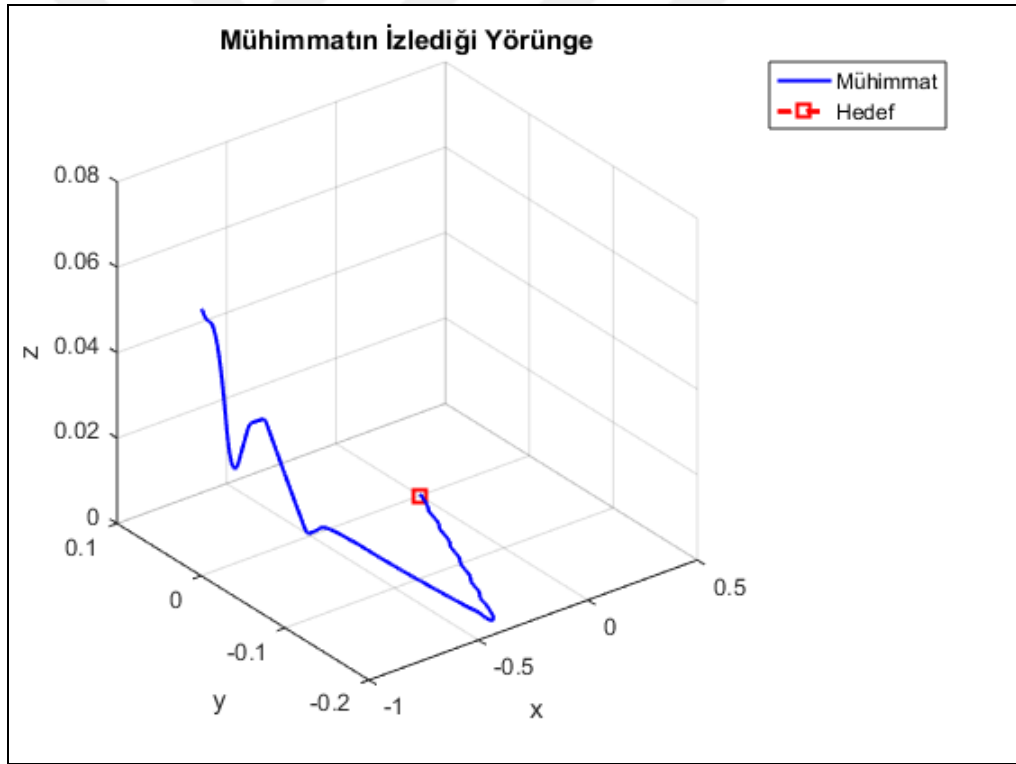
$$\dot{\omega}_3 = -\ddot{\theta}_s s\phi_s - \dot{\theta}_s \dot{\phi}_s c\phi_s + \ddot{\psi}_s c\theta_s c\phi_s - \dot{\psi}_s \dot{\theta}_s s\theta_s c\phi_s - \dot{\psi}_s \dot{\phi}_s c\theta_s s\phi_s - \dot{p}s\theta - p\dot{\theta}c\theta - r\dot{c}\theta + r\dot{\theta}s\theta \quad (3.37)$$

3.2. Benzetimler

3.1 numaralı bölümde bu noktaya kadar 2-3 kardan yapısına sahip bir kardanın kinematik analizi anlatılmaktadır. Kardan tasarımı için kinematik analizlerin nümerik çıktılarına ihtiyaç vardır. Bu sebeple tez kapsamında rastgele türetilen üç farklı uçuş senaryosu kullanılmaktadır. Her üç uçuş senaryosuna göre de elde edilen sonuçlar değerlendirilerek kardan tasarım girdileri hesaplanmaktadır.

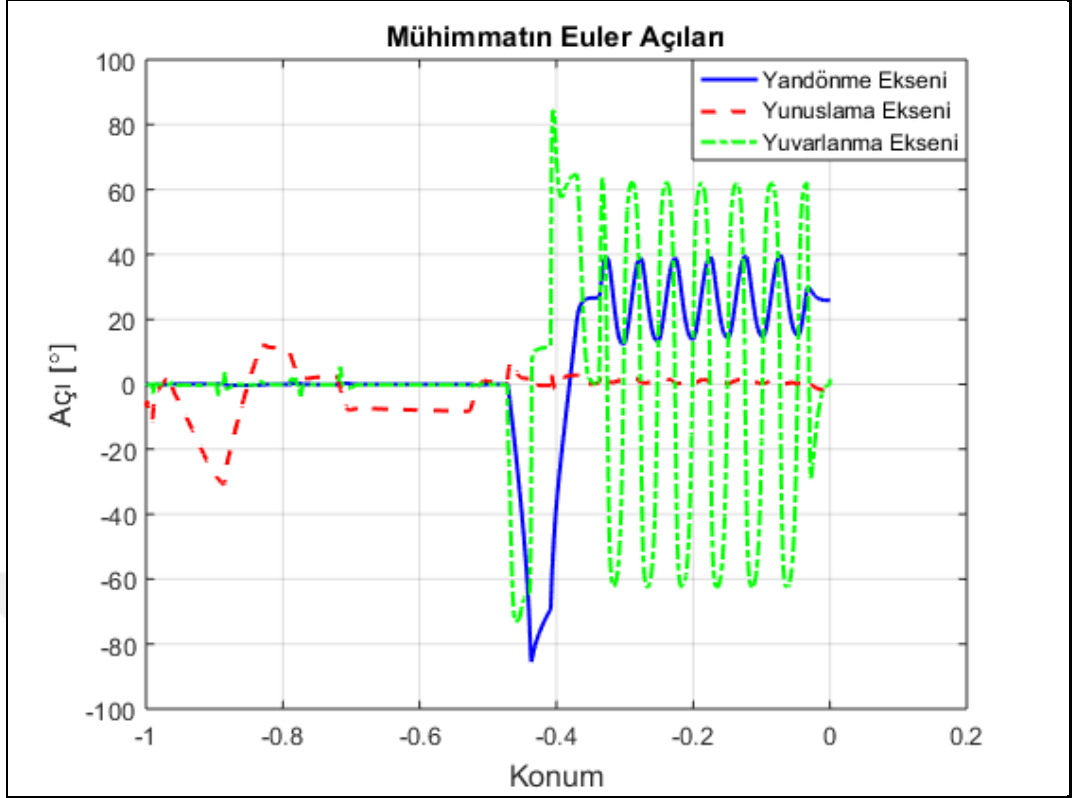
Tez kapsamında kullanılan uçuş senaryoları senaryo #1, senaryo #2 ve senaryo #3 olarak adlandırılmaktadır. Her uçuş senaryosunda mühimmat farklı hareketler yaparak uçuş durumları modellenmektedir.

Senaryo #1’de mühimmatın izlediği yörünge Şekil 3.1’te verilmektedir. Kinematik analiz benzetimlerinde verilen sonuçlar elde edilen konum değerlerinin en yüksek değerine göre bire normalize edilmektedir. Uçuş senaryolarında hedef merkezli koordinat eksenini kullanılmaktadır. Bu sebeple hedef koordinat sistemi merkezinde olacak şekilde modellenmektedir. Hedef merkezli koordinat sisteminde hedefin üzerinde olduğu nokta koordinat merkezi iken hedefin z eksenindeki kendi yüksekliği sebebi ile mühimmatın hedef ile temas noktası koordinat merkezinin z ekseninde hedef yüksekliği kadar bir mesafededir. Uçuş senaryolarında mühimmat koordinat merkezi noktasına varana kadar uçuş yapmaktadır. Hedef yüksekliği sebebi ile son verilerde hedef, koordinat merkezine ulaşan mühimmata göre geride kaldığı için kardan verilerinde ani dönüşler görülmektedir. Bu veriler ihmal edilmektedir.



Şekil 3.1. Mühimmatın konum yörüngesi (senaryo #1)

Şekil 3.2’de senaryo #1’e ait mühimmatın euler açıları verilmektedir. Elde edilen veriler incelendiğinde mühimmat hedefe yaklaşırken yaklaşık 60° gibi değerler ile yuvarlanma hareketi yapmaktadır.

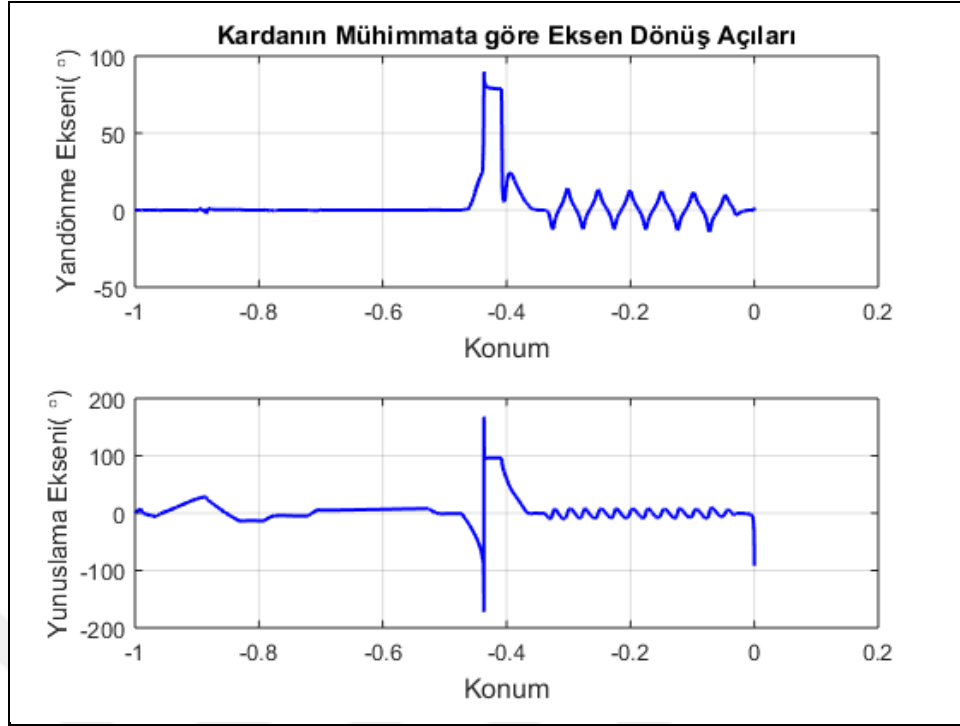


Şekil 3.2. Mühimmat Euler açıları (senaryo #1)

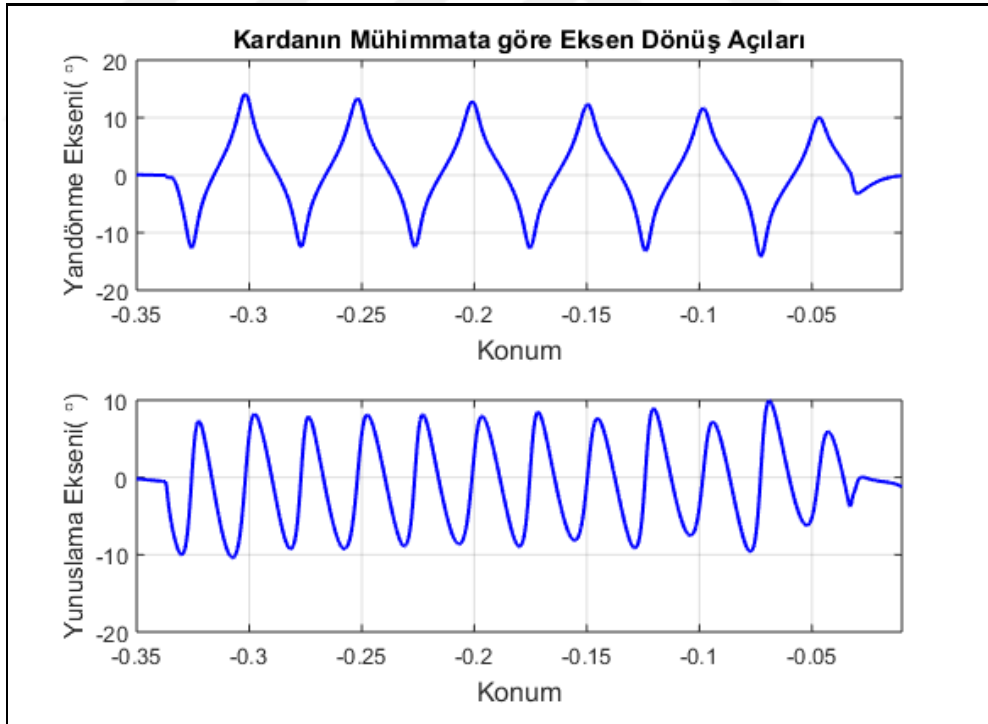
Kardanın mühimmata göre açısal konumu Şekil 3.3'te verilmektedir. Elde edilen verilerde bazı noktalarda analitik çözümler sebebi ile ani hareketler görülmektedir. Gerçek bir uçuş sırasında gerek bu gibi ani hareketlerin yapılamaması veya yapılmasının tercih edilmemesi sebebi ile bu ani değerler ihmal edilebilmektedir. Mühimmat sistemlerine bağlı olarak kullanılan görüntüleme sistemleri genelde son aşamalarda aktif olarak kullanılması sebebi ile kardan tasarımında son aşama verilerinin kullanılması gerekmektedir.

Şekil 3.3'te elde edilen verilerin son aşamasındaki veriler Şekil 3.4'te verilmektedir.

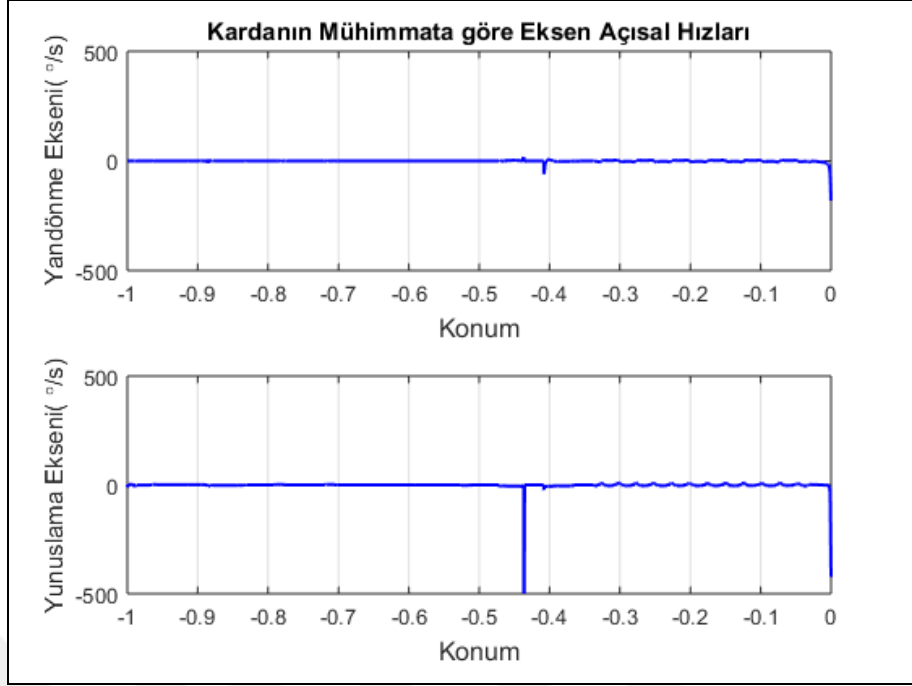
Kardanın mühimmata göre açısal hız değerleri Şekil 3.5'te, son aşama yakınlştırılmış değerleri ise Şekil 3.6'da verilmektedir.



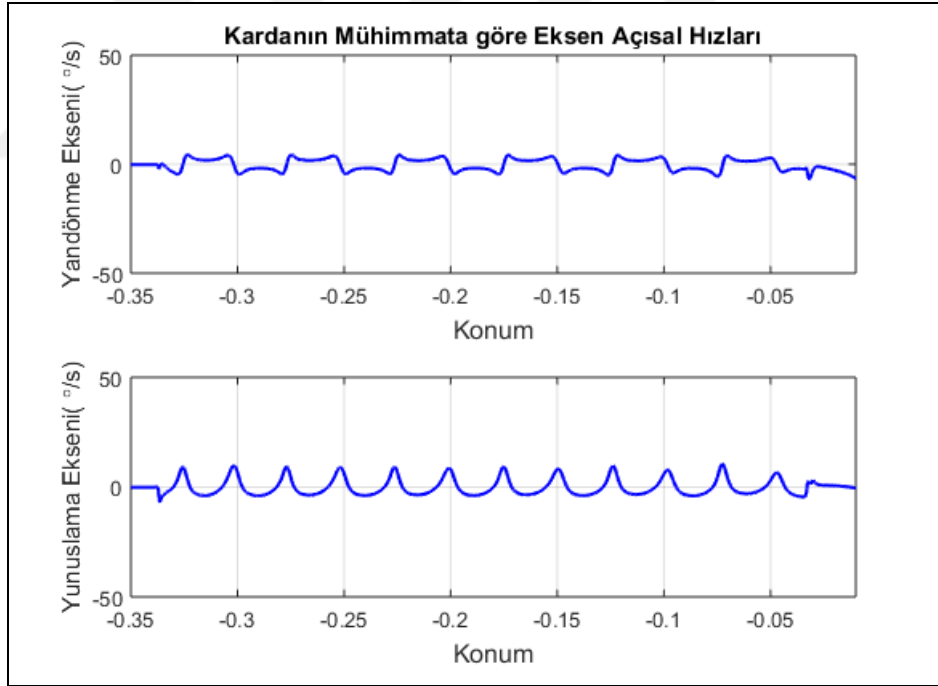
Şekil 3.3. Kardanın mühimmata göre açısıl konumları (senaryo #1)



Şekil 3.4. Kardanın mühimmata göre açısıl konumları (senaryo #1, son aşama yakınlştırılmış)

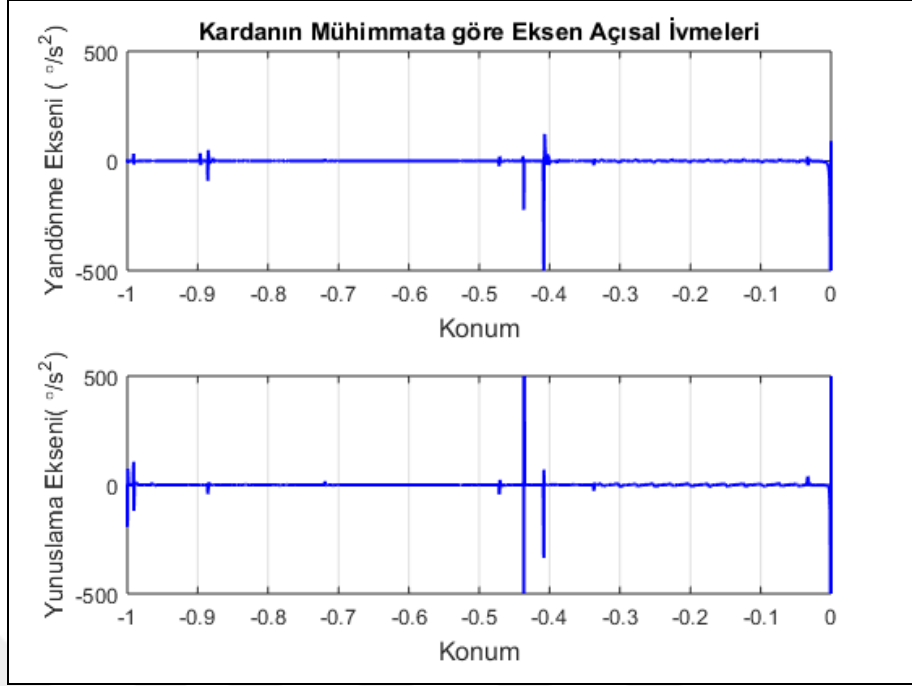


Şekil 3.5. Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #1)

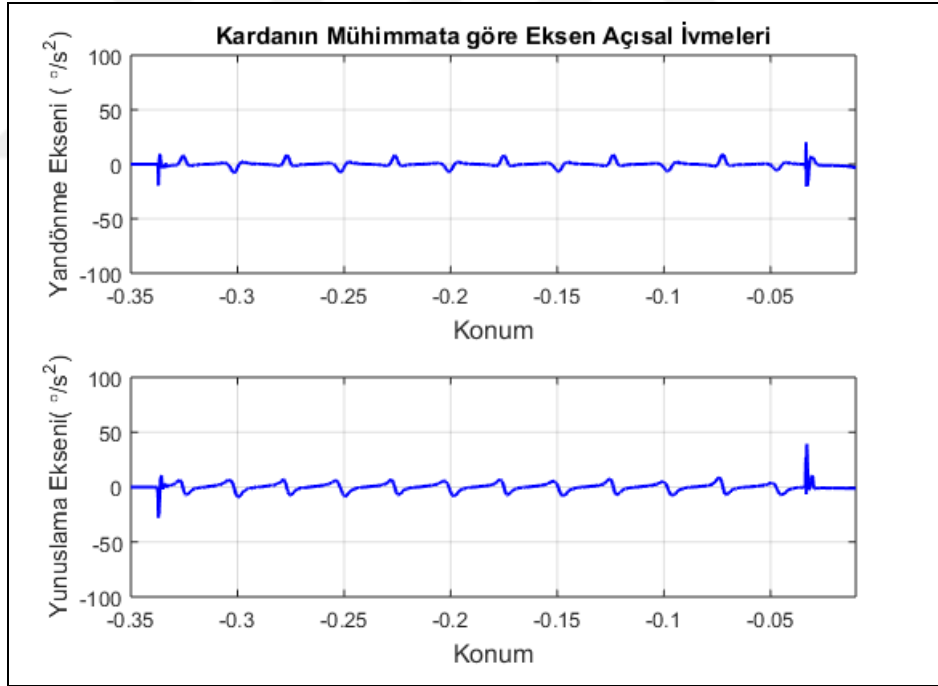


Şekil 3.6. Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #1, son aşama yaklaştırılmış)

Kardanın mühimmata göre açısal ivme değerleri Şekil 3.7’de, son aşama yaklaştırılmış değerleri ise Şekil 3.8’de verilmektedir.

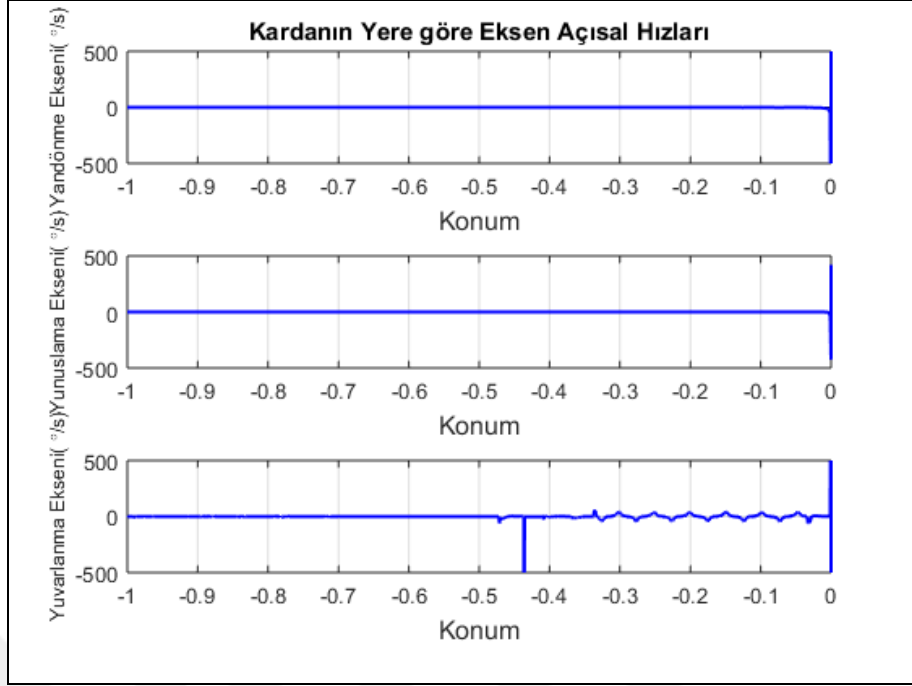


Şekil 3.7. Kardanın mühimmata göre açısal ivmeleri (senaryo #1)

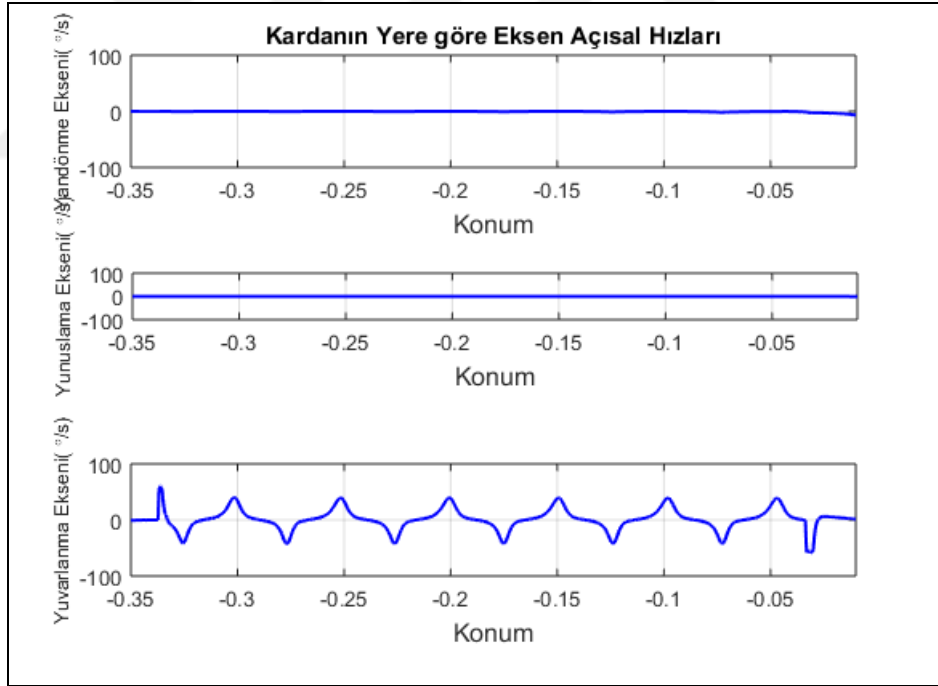


Şekil 3.8. Kardanın mühimmata göre açısal ivmeleri (senaryo #1, son aşama yakınlştırılmış)

Kardan tasarımında kullanılan kardanın yere göre açısal hızları Şekil 3.9'daki gibi değil Şekil 3.10'daki gibi son aşama dikkate alınarak değerlendirilmektedir.

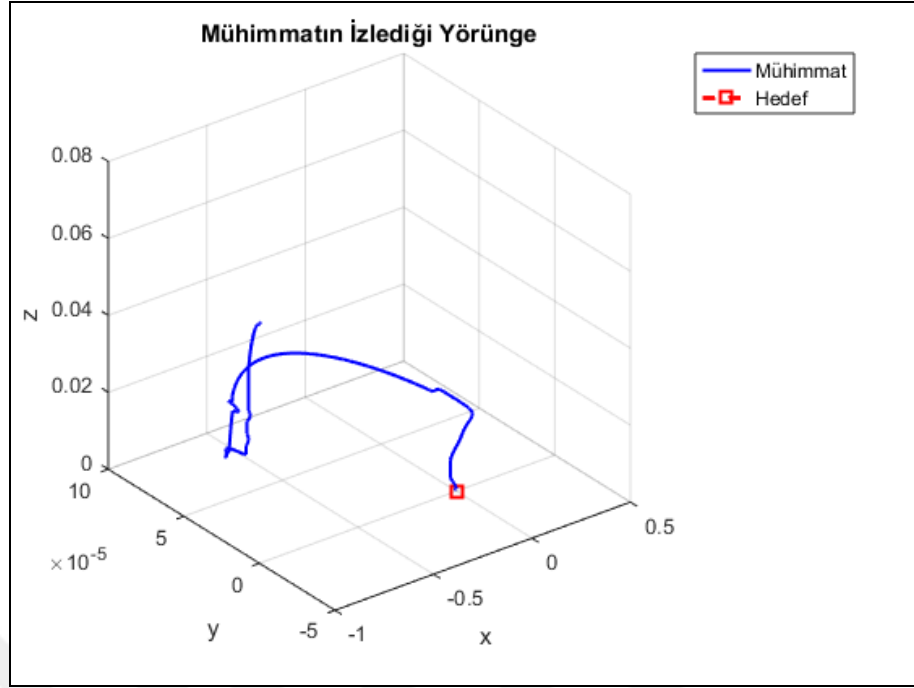


Şekil 3.9. Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #1)

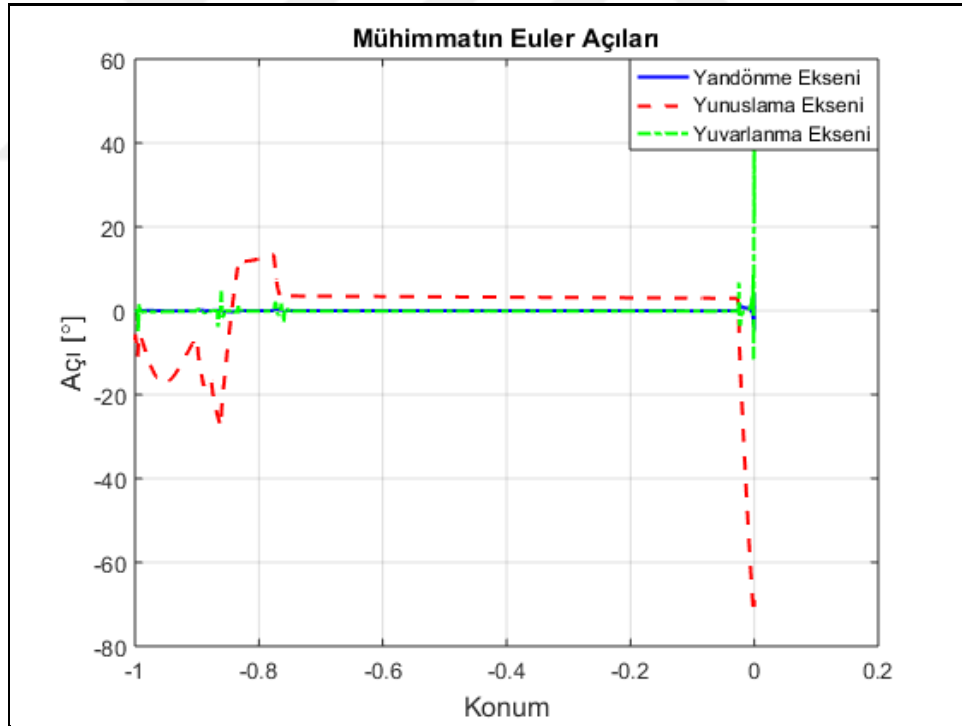


Şekil 3.10. Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #1, son aşama yakınlaştırılmış)

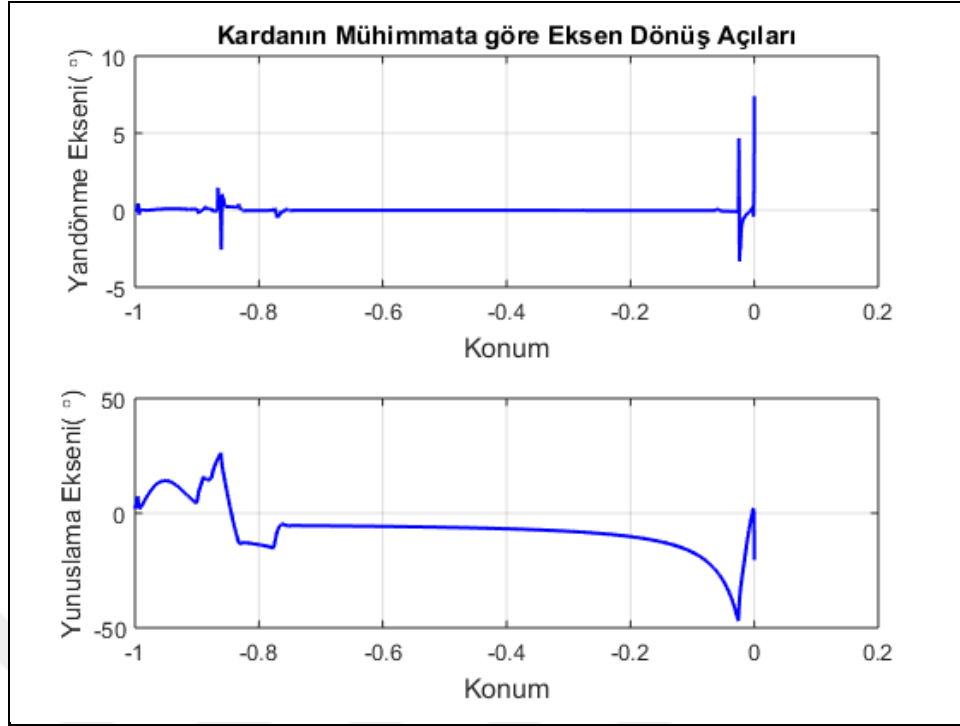
Senaryo #1 için verilen ve değerlendirilen verilerin hepsi senaryo #2 için sırasıyla Şekil 3.11-Şekil 3.20’de verilmektedir.



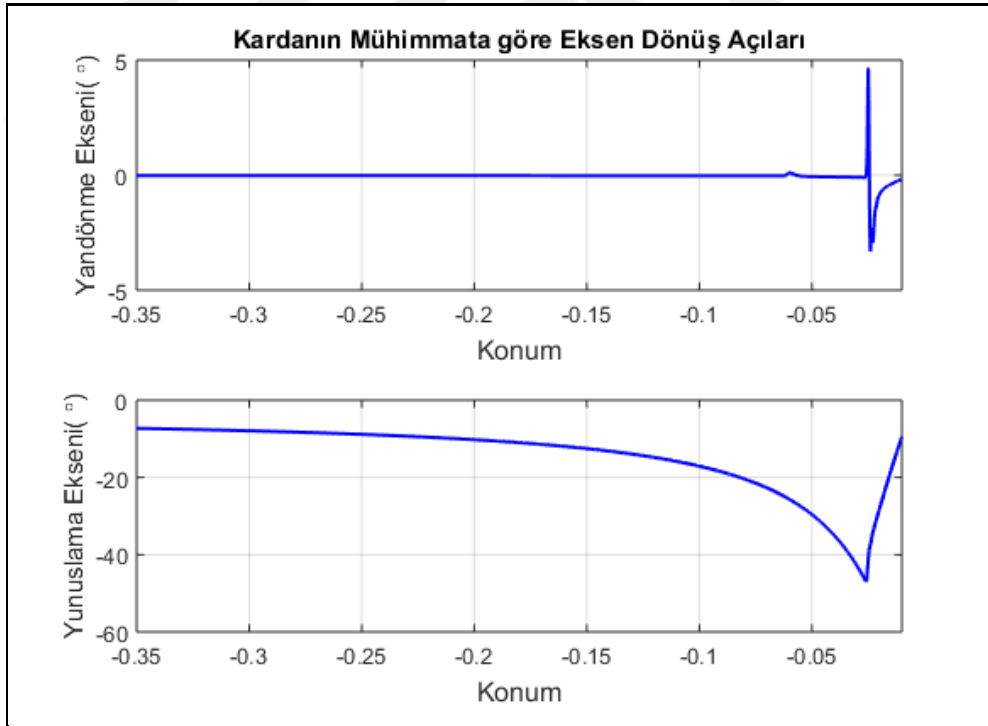
Şekil 3.11. Mühimmatın konum yörüngesi (senaryo #2)



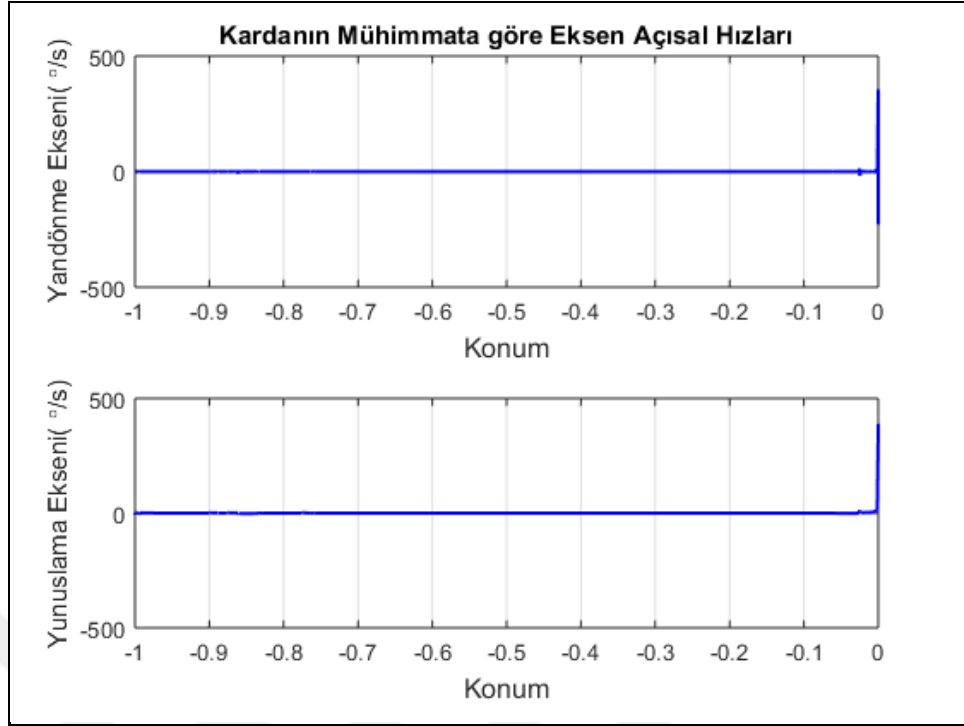
Şekil 3.12. Mühimmat Euler açıları (senaryo #2)



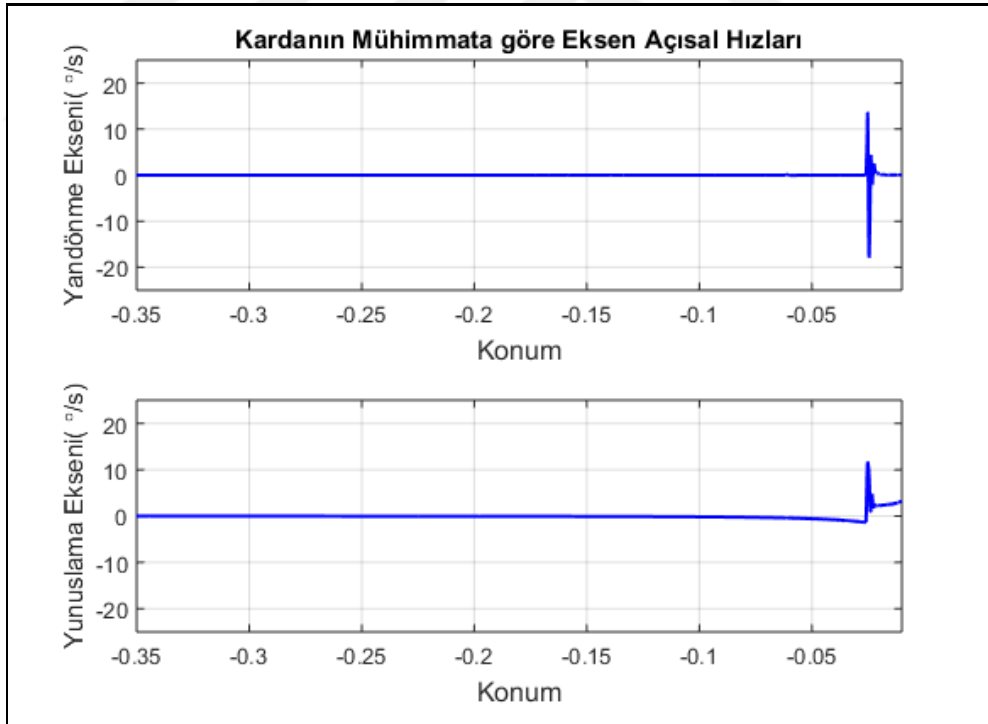
Şekil 3.13. Kardanin mühimmata göre açısai konumları (senaryo #2)



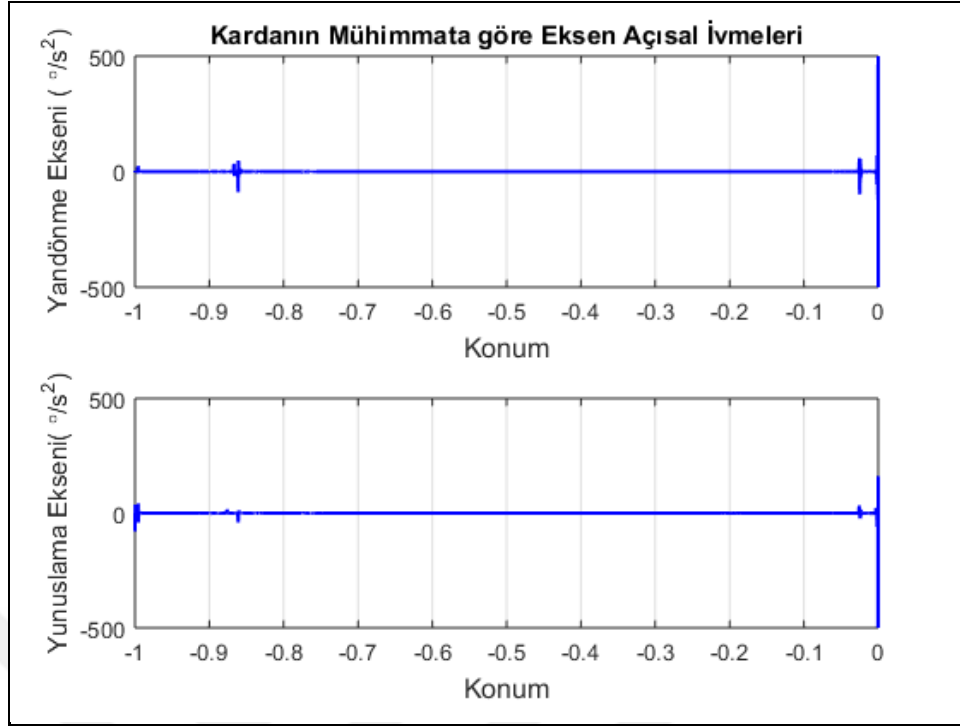
Şekil 3.14. Kardanin mühimmata göre açısai konumları (senaryo #2, son aşama yakınlştırılmış)



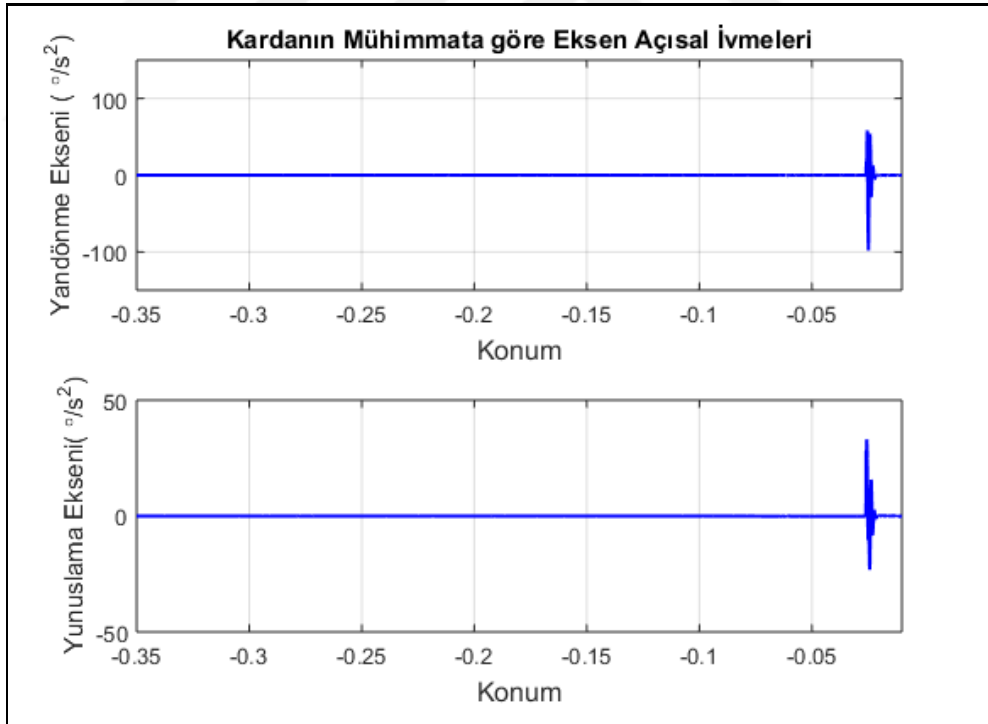
Şekil 3.15. Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #2)



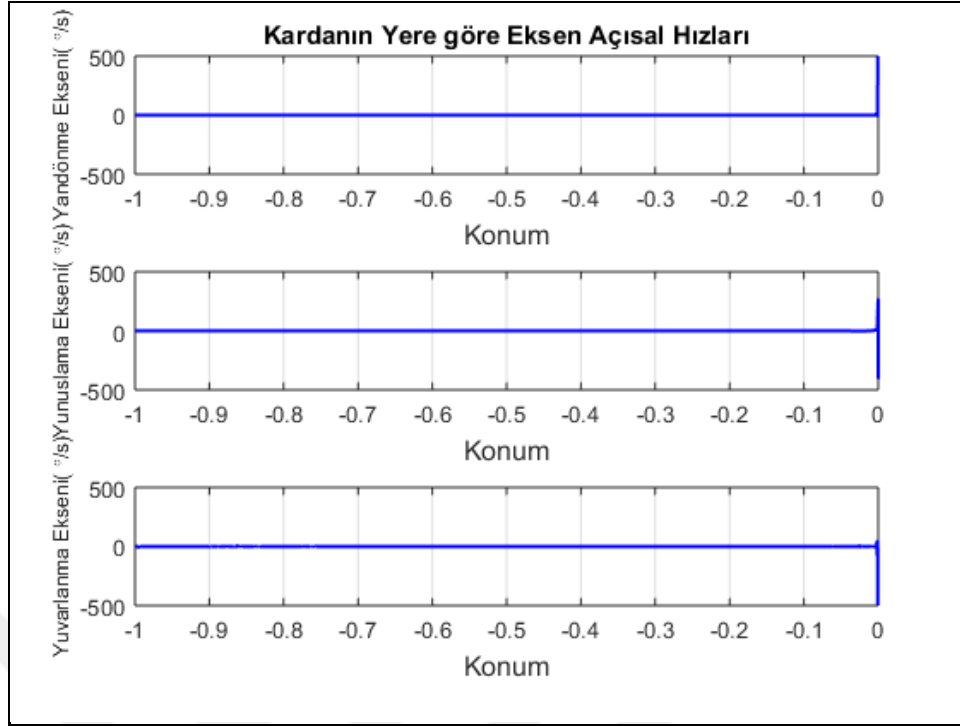
Şekil 3.16. Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #2, son aşama yakınlştırılmış)



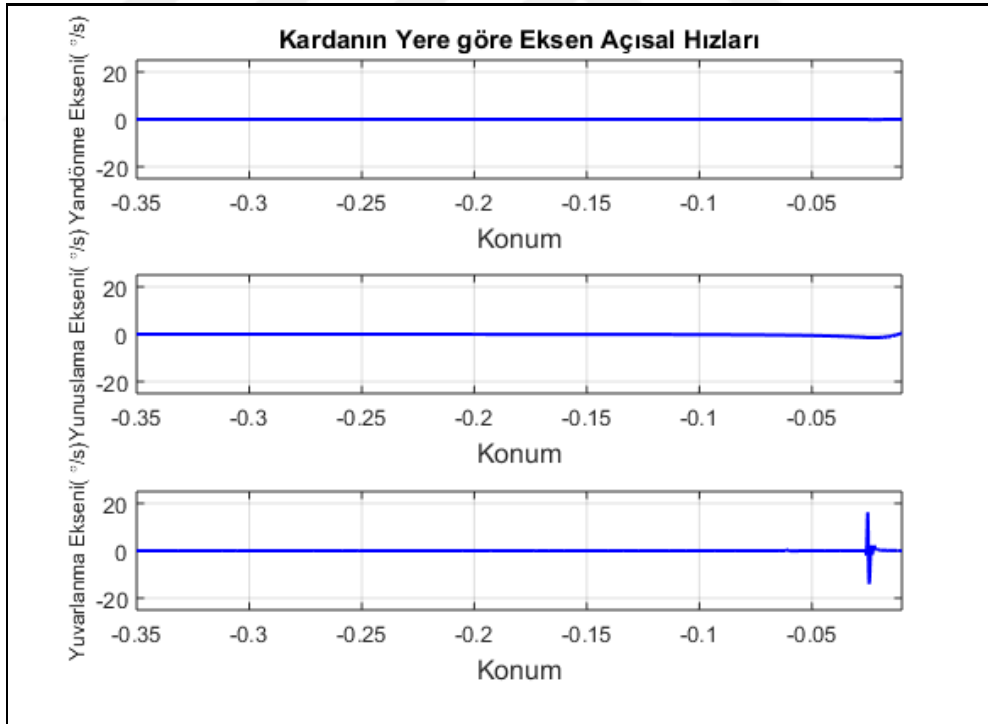
Şekil 3.17. Kardanın mühimmata göre açısal ivmeleri (senaryo #2)



Şekil 3.18. Kardanın mühimmata göre açısal ivmeleri (senaryo #2, son aşama yakınlaştırılmış)

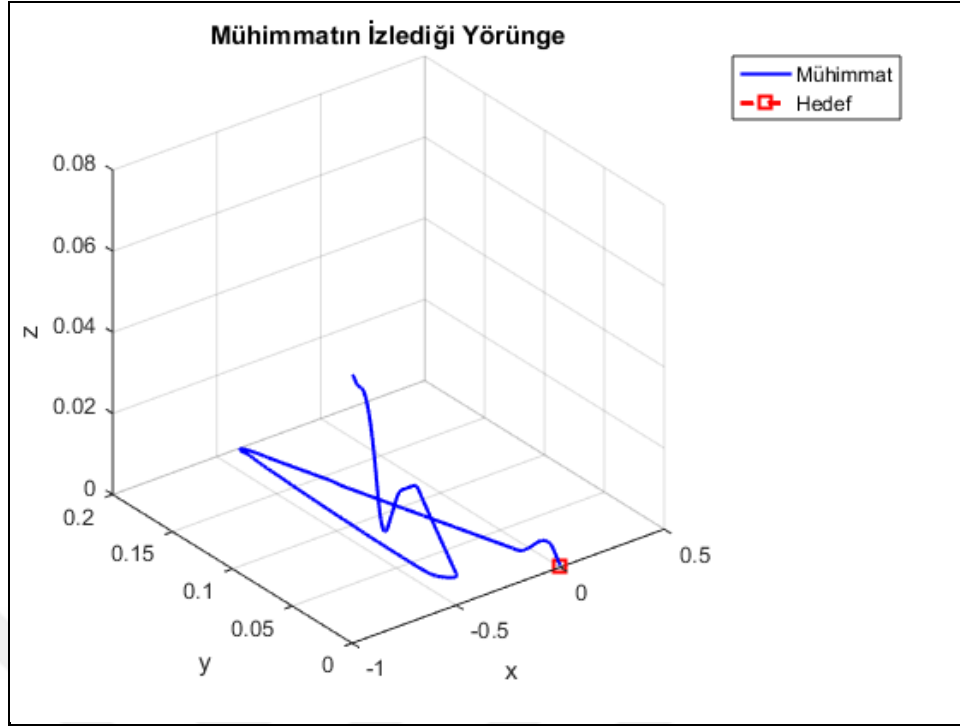


Şekil 3.19. Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #2)

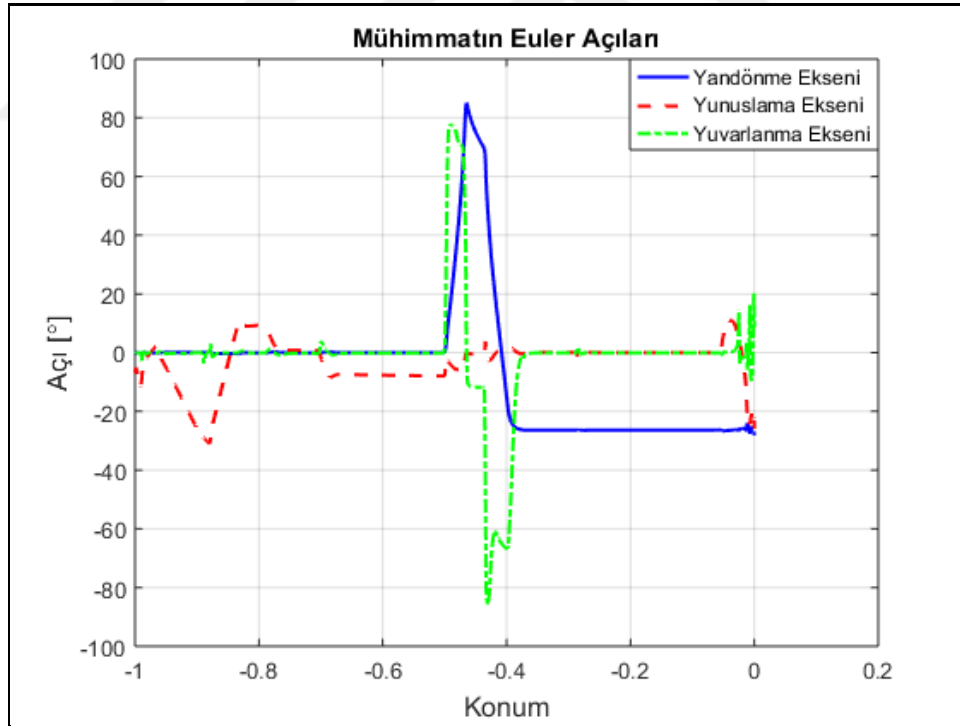


Şekil 3.20. Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #2, son aşama yakınlştırılmış)

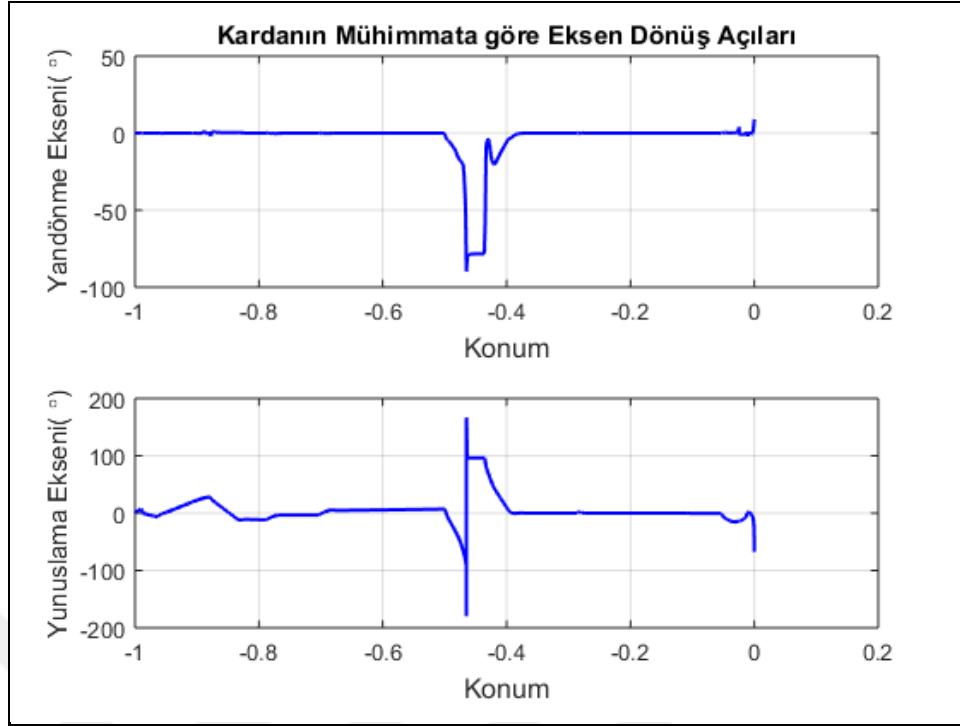
Senaryo #3 için elde edilen kinematik veriler ise sırasıyla Şekil 3.21-Şekil 3.30'da verilmektedir.



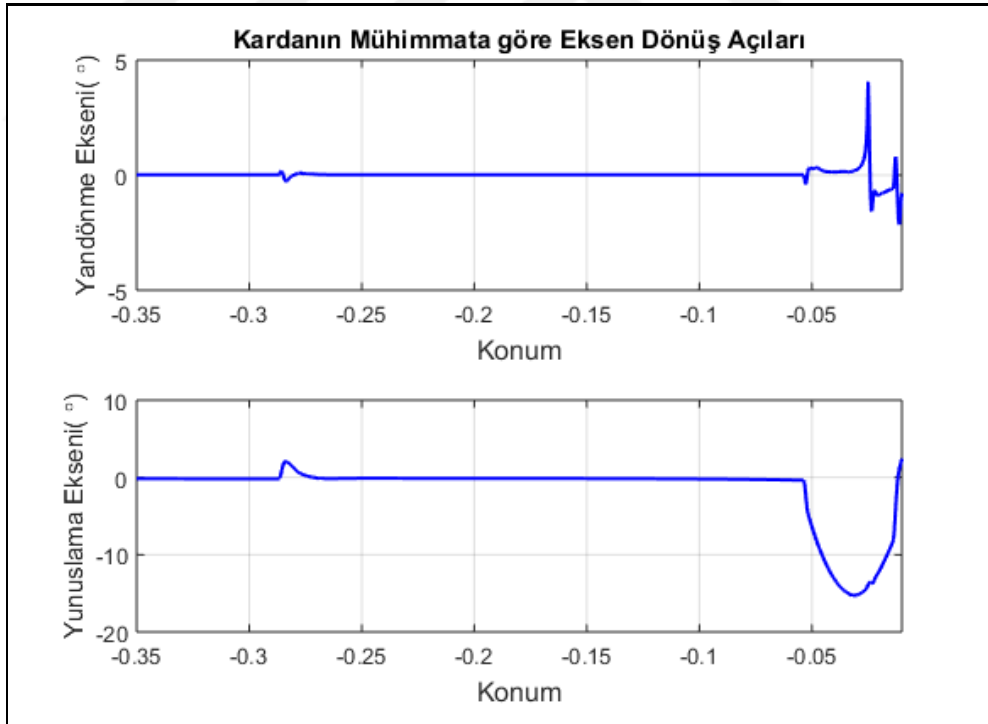
Şekil 3.21. Mühimmatın konum yörüngesi (senaryo #3)



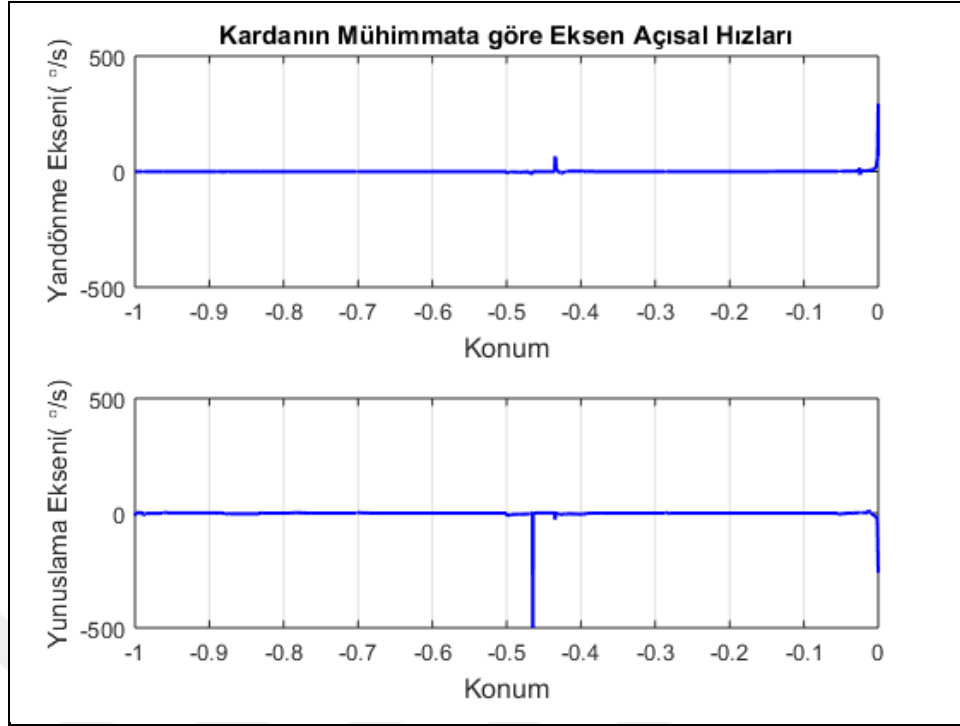
Şekil 3.22. Mühimmat Euler açıları (senaryo #3)



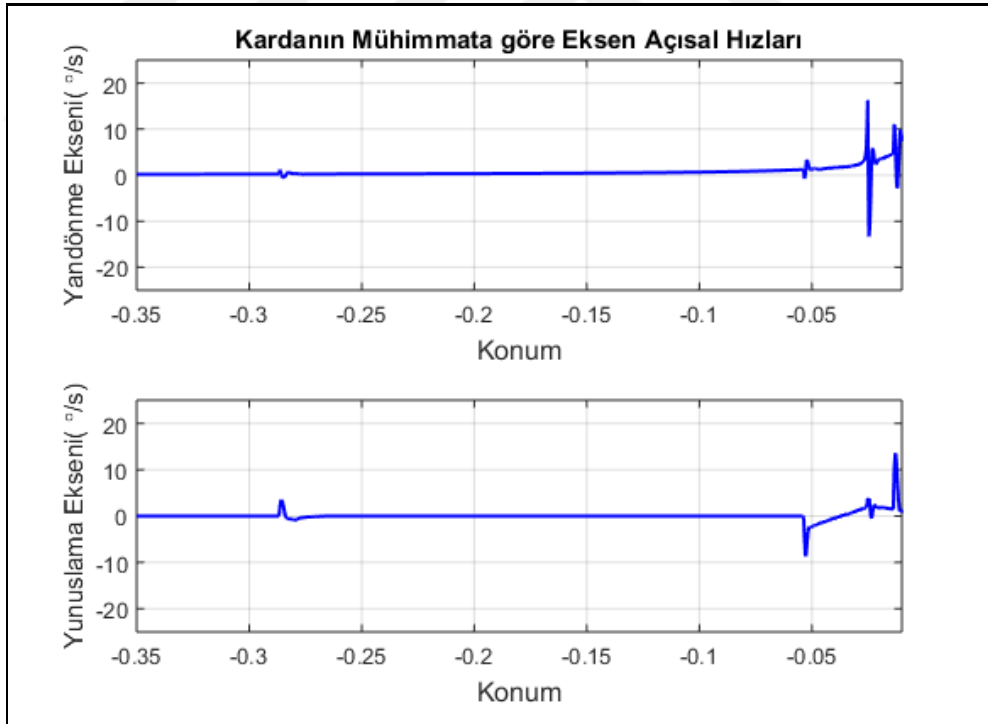
Şekil 3.23. Kardanın mühimmata göre açısal konumları (senaryo #3)



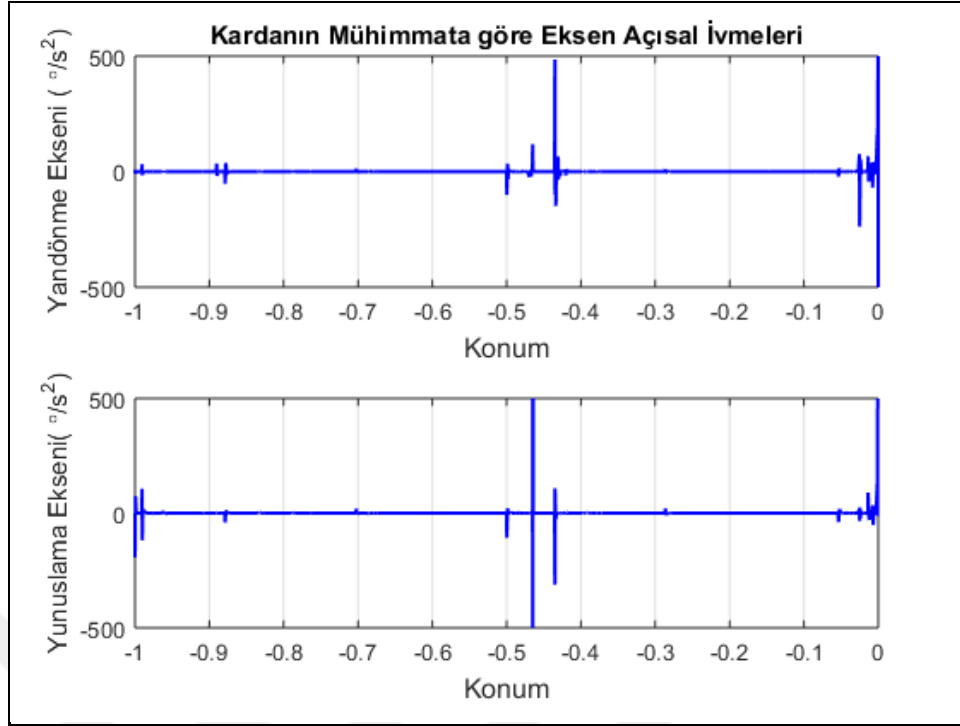
Şekil 3.24. Kardanın mühimmata göre açısal konumları (senaryo #3, son aşama yakınlştırılmış)



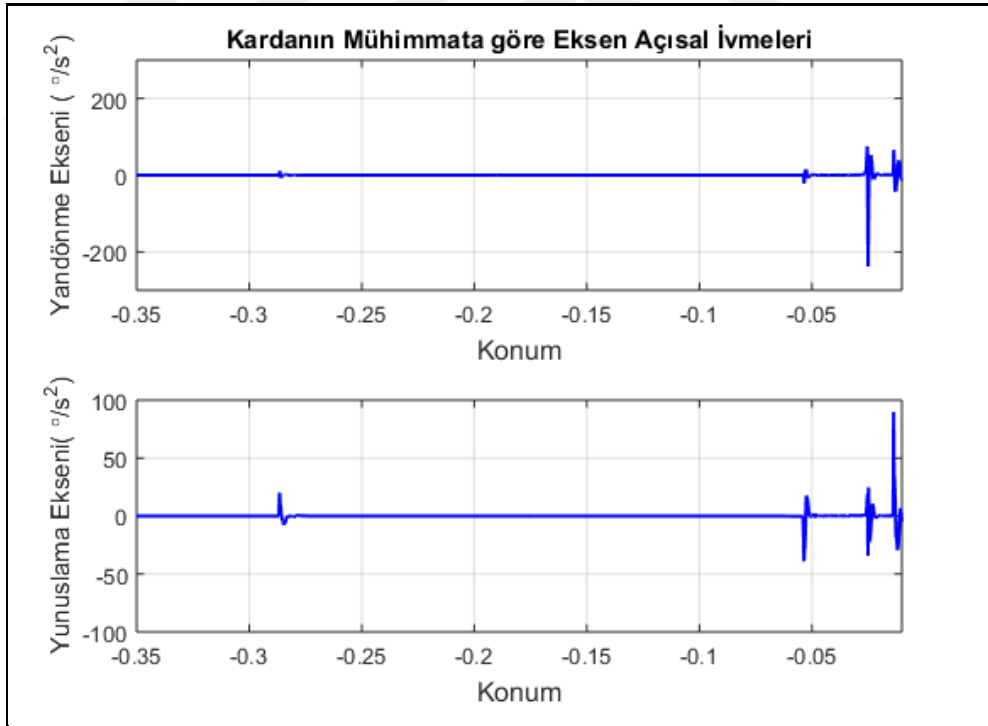
Şekil 3.25. Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #3)



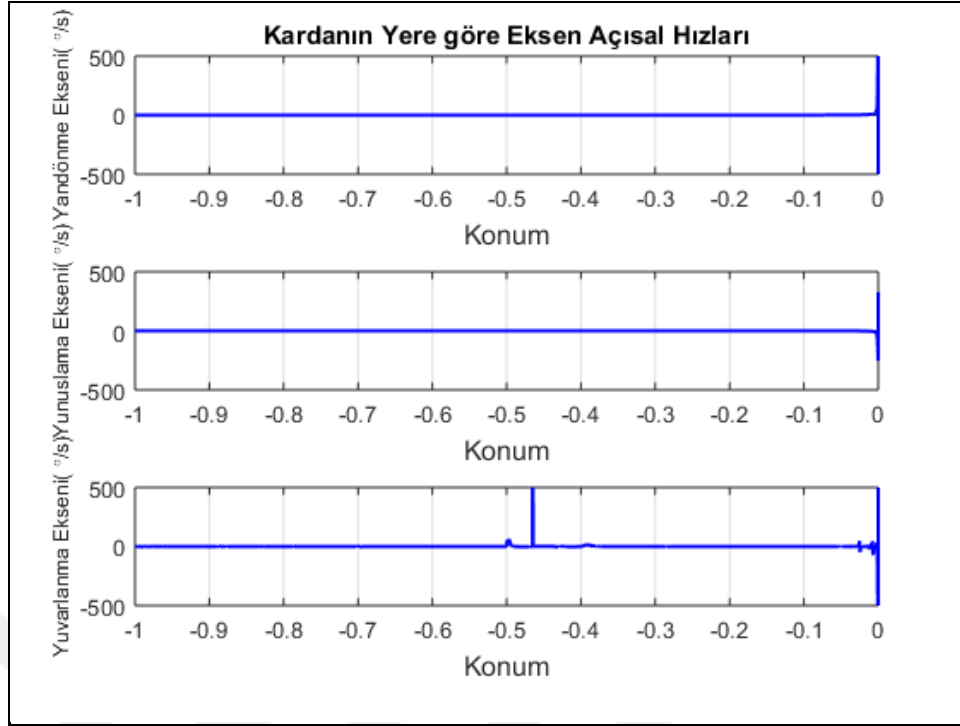
Şekil 3.26. Kardanın mühimmata göre açısal hızları (senaryo #3, son aşama yakınlştırılmış)



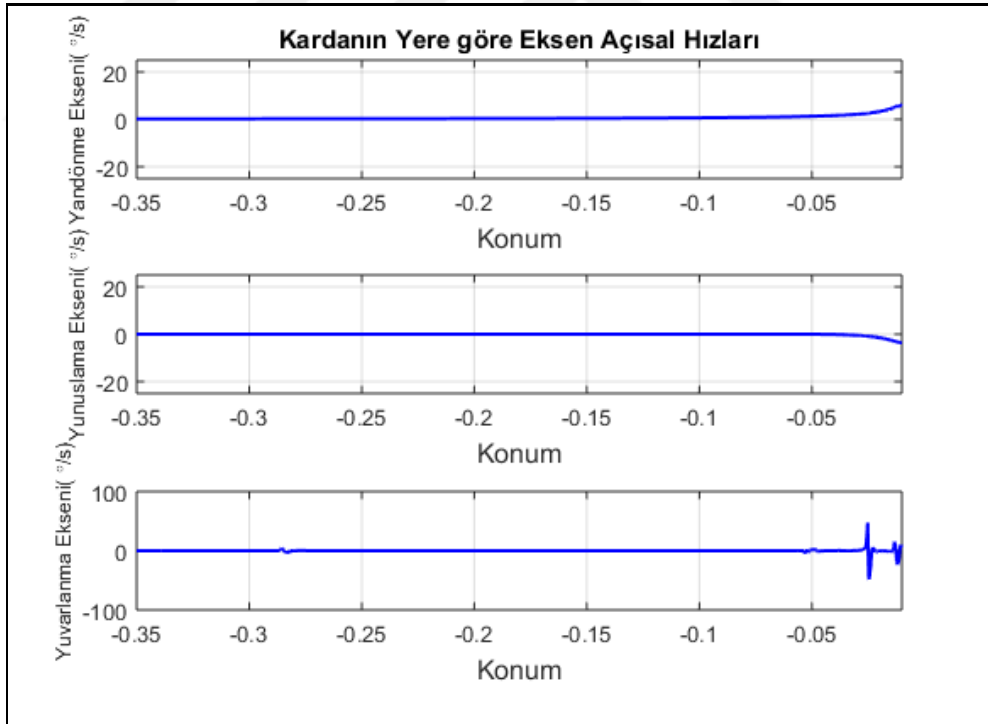
Şekil 3.27. Kardanin mühimmata göre açısai İvmeleri (senaryo #3)



Şekil 3.28. Kardanin mühimmata göre açısai İvmeleri (senaryo #3, son aşama yakınlştırılmış)



Şekil 3.29. Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #3)



Şekil 3.30. Kardanın yere göre açısal hızları (senaryo #3, son aşama yakınılaştırılmış)

Senaryo #1 kullanılarak elde edilen kinematik sonuçlar Tablo 3.1’de verilmektedir. Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’te verilen değerler son aşama verilerinin en yüksek değerleridir.

Tablo 3.1. Senaryo #1 için kinematik analiz sonuçları

Eksen Verisi	İç Eksen (Yandönme)	Dış Eksen (Yunuslama)
Mühimmata göre Açısal Konum [°]	14,1	11,3
Mühimmata göre Açısal Hız [°/s]	42,4	19,4
Mühimmata göre Açısal İvme [°/s ²]	127,2	57,4

Senaryo #2 kullanılarak elde edilen kinematik sonuçlar Tablo 3.2’de verilmektedir.

Tablo 3.2. Senaryo #2 için kinematik analiz sonuçları

Eksen Verisi	İç Eksen (Yandönme)	Dış Eksen (Yunuslama)
Mühimmata göre Açısal Konum [°]	7,4003	47,0214
Mühimmata göre Açısal Hız [°/s]	21,7590	38,4900
Mühimmata göre Açısal İvme [°/s ²]	98,1231	60,2304

Senaryo #3 kullanılarak elde edilen kinematik sonuçlar Tablo 3.3’te verilmektedir.

Tablo 3.3. Senaryo #3 için kinematik analiz sonuçları

Eksen Verisi	İç Eksen (Yandönme)	Dış Eksen (Yunuslama)
Mühimmata göre Açısal Konum [°]	4,0628	15,2598
Mühimmata göre Açısal Hız [°/s]	16,3238	9,9014
Mühimmata göre Açısal İvme [°/s ²]	238,1127	89,8381

Tablo 3.1-Tablo 3.3’te elde edilen sonuçlara göre kardan kinematik kabiliyeti belirlenmektedir. Elde edilen verilere göre kardanın açısal konumunun yandönme eksenini için 15° ve yunuslama eksenini için ise 45° olması yeterlidir. Kardanın mekanik tasarımı Tablo 3.4’te verilen yandönme eksenini için 30° ve yunuslama eksenini için 45° olacak şekilde gerçekleştirilmektedir.

Kardan tasarımında kullanılan açısal konum değerleri aslen görüntüleme sisteminin giriş bölümünde bahsedilen görüş alanına tekabül etmektedir. Kardanın kendisinin bu değerden görüş açısının yarısı kadar daha az dönebilmesi yeterli olmaktadır. Bu şekilde de uçuş senaryolarından türetilen kinematik gereksinimler karşılanabilmektedir.

Tablo 3.4. İki eksenli kardan tasarımı kinematik tasarım parametreleri

Eksen Verisi	İç Eksen (Yandönme)	Dış Eksen (Yunuslama)
Mühimmata göre Açısal Konum [$^{\circ}$]	± 30	± 45
Mühimmata göre Açısal Hız [$^{\circ}/s$]	± 50	± 50
Mühimmata göre Açısal İvme [$^{\circ}/s^2$]	± 250	± 250

Tablo 3.4’te verilen mühimmata göre açısal ivme ve açısal hız verileri sırasıyla 3.1.3 numaralı bölümde tahrik elemanı seçiminde kullanılmaktadır.

3.3. Tasarım Bileşenlerinin Seçimi

3.1.3. Motor seçimi

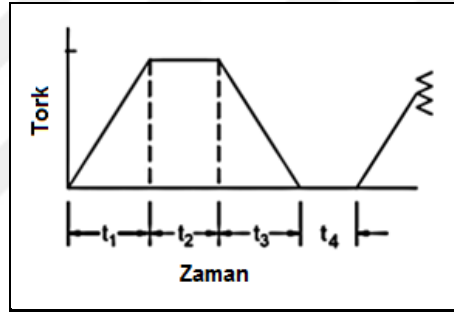
2-3 kardan yapısında her ekseninde birer adet olmak üzere toplamda iki adet eyleyici (elektrik motoru) kullanılmaktadır. Görüntüleme sistemi için ayrılan hacmin hava platformlarında genellikle kısıtlı olması sebebiyle motorlar şasisiz (frameless) ve yassı (pancake) tip olarak seçilmesi uygun görülmektedir. Ömür, fırça tozu, ark oluşturma, aşınma, mekanik gürültü, elektromanyetik girişim (electro-magnetic interference, EMI) sorunları, düşük verim ve hız açısından motorlar incelendiğinde fırçasız motorların fırçalı motorlara göre daha üstün olduğu bilinmektedir. Bu sebeple kullanılacak motorların fırçasız tip olması daha uzun süreli çalışan sistemlerde performans açısından daha faydalı olacaktır. Motor komütasyonunda (commutation) ise en yaygın ve diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında görece daha basit bir yöntem olan hall etkili tipte algılayıcı (Hall-effect sensor) ile denetim kullanılacaktır. Özetlenirse eyleyici olarak BLDC (Brushless Direct Drive) motor seçimi yapılmaktadır. Kardan sistemlerinde kullanılan motorlar genelde düşük hızlarda yüksek torklar ile çalıştığı için bu tip motorlar özellikler tork motoru olarak da adlandırılmaktadır.

3.1.3.2. Motor tork bileşenlerinin hesaplanması

Kardan motorlarının karşı koyacağı torkların kestirimi için motor üzerine etkiyecek yüklerin belirlenmesi gerekmektedir. Motor tork bileşenleri (3.38) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$T_p = T_{ata} + T_{mer} + T_{tit} + T_{sür} + T_{stir} \quad (3.38)$$

(3.38) numaralı denklemde yer alan T_p kardanın azami tork ihtiyacıdır. T_{ata} , T_{mer} , T_{tit} , $T_{sür}$ ve T_{stir} ise sırasıyla atalet sebebiyle oluşacak torku, kütle merkez kaçıklığı sebebiyle oluşacak torku, titreşim sebebiyle oluşacak torku, sürtünme ve kablo direngelikleri sebebiyle oluşacak torku ve Stirling soğutucu titreşimi sebebi ile oluşacak toku ifade etmektedir.



Şekil 3.31. İkizkenar yamuk tork profili

Motorların önceden belirlenen senaryolar esnasında yapacağı hareketleri Şekil 3.31'te verilen ikizkenar yamuk tork profili ile modellenirse eksenlerin ortalama tork ihtiyacı (T_{rms}) de (3.39) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{T_p^2 t_1 + (T_{mer} + T_{tit} + T_{sür})^2 t_2 + (T_{ata} - T_{mer} - T_{tit} - T_{sür})^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} \quad (3.39)$$

3.1.3.3. Atalet torkunun hesaplanması

Kardan eksenlerinin mühimmat hareketlerine rağmen hedefe yönelebilmesi için atalet sebebiyle oluşan tork değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu nedenle kardanın ulaşması gereken açısal ivme değerlerine ve motorların hareket ettireceği kütlelerin atalet momentlerine ihtiyaç vardır. Yandönme ekseninin dönme eksenine göre atalet momenti bileşeni I_y ve yunuslama ekseninin dönme eksenine göre atalet

momenti bileşeni de I_p ile gösterilirse atalet sebebiyle yandönme ve yunuslama motorlarına binecek yükler sırasıyla (3.40) ve (3.41) numaralı denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$T_{ata}^y = I_y \cdot \ddot{\psi} \quad (3.40)$$

$$T_{ata}^p = I_p \cdot \ddot{\phi} \quad (3.41)$$

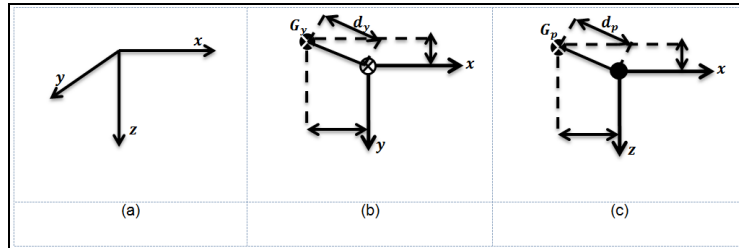
Motorların taşıyacağı eksenlerin atalet momenti bileşenleri test sisteminin katı modeli üzerinden ölçülerek ilgili denklemlere girilmektedir. $\ddot{\psi}$ ve $\ddot{\phi}$ açısal ivme değerleri ise uçuş senaryoları esnasında kardan eksenlerinin gerçekleştirmesi gereken yandönme ve yunuslama düzlemlerindeki açısal ivme bileşenleridir. İvme değerleri yapılan kinematik analiz ile elde edildi. Kardan eksenleri için kütle ve atalet değerleri ise Tablo 3.5’te verilmektedir.

Tablo 3.5. İç ve dış eksenlere ait kütle ve atalet verileri

Parametre	İç Eksen (Yandönme Eksen)	Dış Eksen (Yunuslama Eksen)
Kütle Verisi [kg]	2,0	2,7
Atalet Verisi [kg.m ²]	0,0069	0,0085

3.1.3.4. Doğrusal ivme sebebi ile oluşan bozucu torkun hesaplanması

Kardan dönü merkezi ile kardan bütünü kütle merkezi olabildiğince birbirlerine yakın olacak şekilde mekanik tasarım yapılmasına rağmen üretim toleransları, malzeme dağılımının homojen olmaması, bütünleme toleransları ve bileşen kütlelerindeki farklılıklar sebebi ile kütle merkezi ile kardan dönü merkezi arasında bir miktar eksen kaçıklığı meydana gelmesi kaçınılmazdır. Meydana gelen bu kaçıklık ise motorlara fazladan yük binmesine sebep olmaktadır.



Şekil 3.32. Kardan kütle merkezi ve eksen kaçıklığının gösterimi

Kardan kütle merkezi ve eksen kaçıklığı Şekil 3.32’de gösterilmektedir. Burada G_y ve G_p sırasıyla yandönme ve yunuslama eksenlerinin kütle merkezlerini göstermektedir. d_y ve d_p ise sırasıyla yandönme ve yunuslama eksenlerinin kütle merkezleri ile dönü merkezi arasındaki eksenel kaçıklığını ifade etmektedir. Bu durumda her iki eksen için toplam kütle kaçıklığı miktarı gr.cm cinsinden (3.42) ve (3.43) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$d^y = m_y d_y \quad (3.42)$$

$$d^p = m_p d_p \quad (3.43)$$

(3.42) ve (3.43) numaralı denklemlerde yer alan d^y ve d^p sırası ile yandönme ve yunuslama eksenlerindeki toplam kütle kaçıklığı miktarını ifade etmektedir.

Tez kapsamındaki hesaplarda da izin verilen en fazla kütle kaçıklığı 10 [gr.cm] olarak kabul edilmektedir.

$$d^p = 10 \text{ [gr.cm]} = 10 \times 10^{-5} \text{ [kg.m]} \quad (3.44)$$

$$d^y = 10 \text{ [gr.cm]} = 10 \times 10^{-5} \text{ [kg.m]} \quad (3.45)$$

Bu durumda kütle kaçıklığından dolayı mühimmat üzerine etkiyen doğrusal ivmenin oluşturacağı en yüksek statik moment (3.46) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$T_{\text{mer}} = \frac{Fd}{m} = \frac{(m.a)d}{m} = a.d \quad (3.46)$$

(3.46) numaralı denklemde yer alan m ilgili eksene ait kütleyi, a ilgili kardan ekseninin bileşke doğrusal ivmesi ve d ise ilgili eksenin kütle merkezi kaçıklık miktarını ifade etmektedir. Kütle ifadesi sadeleştirilirse her bir eksen için kütle merkezi kaçıklığından dolayı oluşan bozucu tork yunuslama ve yandönme eksenleri için sırasıyla (3.47) ve (3.48) numaralı denklemlerdeki gibi elde edilebilmektedir.

$$T_{\text{mer}}^p = \left(\hat{C}^{(s,m)} a_M^x + \hat{C}^{(s,m)} a_M^z \right) . d^n \quad (3.47)$$

$$T_{\text{mer}}^y = \left(\hat{C}^{(s,m)} a_M^y + \hat{C}^{(s,m)} a_M^z \right) . d^n \quad (3.48)$$

(3.47) ve (3.48) numaralı denklemlerde yer alan a_M^x , a_M^y ve a_M^z sembolleri mühimmat ekseninde tanımlı doğrusal ivme bileşenleridir. $\hat{C}^{(s,m)}$ ise mühimmat eksenini ile kardan eksenini arasındaki dönüşüm matrisidir.

$$\hat{C}^{(s,m)} = [\hat{C}^{(m,s)}]^T \quad (3.49)$$

Tablo 3.6. Rastsal titreşim değerleri

Eksenler	Doğrusal İvme Değerleri
a_M^x [g]	5.938
a_M^y [g]	5.285
a_M^z [g]	8.789

3.1.3.5. Rastsal titreşim sebebi ile oluşan bozucu torkun hesaplanması

Kardanın uçuş esnasında maruz kalacağı rastsal titreşim seviyeleri Tablo 3.6’da verilmektedir. Üç ekseninde de meydana gelen titreşim kuvveti bileşkesinin kardan eksenlerine etki edeceği kabul edilirse kardan eksenlerinin maruz kalacağı rastsal bozucu tork değerleri (3.50) ve (3.51) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$T_{tit}^y = d^y \cdot \left(\sqrt{(5,938)^2 + (5,285)^2 + (8,489)^2} \right) \cdot 9,81 \quad (3.50)$$

$$T_{tit}^p = d^p \cdot \left(\sqrt{(5,938)^2 + (5,285)^2 + (8,489)^2} \right) \cdot 9,81 \quad (3.51)$$

3.1.3.6. Sürtünme ve kablo direngenliği sebebi ile oluşan bozucu torkun hesaplanması

Kardan eksenlerinde sürtünmeye sebep olabilecek bileşenler rulmanlar ve elektrik motorudur. Bununla birlikte kablaj ve bütünleme esnasında oluşacak gerilmeler de sürtünmede artışa sebep olacaktır. Rulmanlar sebebiyle oluşacak sürtünme torkunun seçilen rulman kataloğu gözönüne alınarak yaklaşık 0.018 [Nm] olacağı kabul edilmektedir. Motordan dolayı oluşacak sürtünme kuvveti ise seçilen motorların katalogları göz önüne alınarak yandönme eksenini için 0.012 [Nm] ve yunuslama eksenini için 0.035 [Nm] olarak kabul edilmektedir. Bütünleme esnasındaki

belirsizlikler sebebiyle oluşacak bozucu torkun ise en fazla 0.02 [Nm] olacağı kabul edilmektedir.

Sürtünme, kablaj ve muhtelif sebepler ile oluşabilecek ek tork ihtiyacı yandönme ve yunuslama eksenleri için sırasıyla (3.52) ve (3.53) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$T_{sür}^y = 0,018 + 0,012 + 0,02 = 0,050 \text{ [Nm]} \quad (3.52)$$

$$T_{sür}^p = 0,018 + 0,035 + 0,02 = 0,073 \text{ [Nm]} \quad (3.53)$$

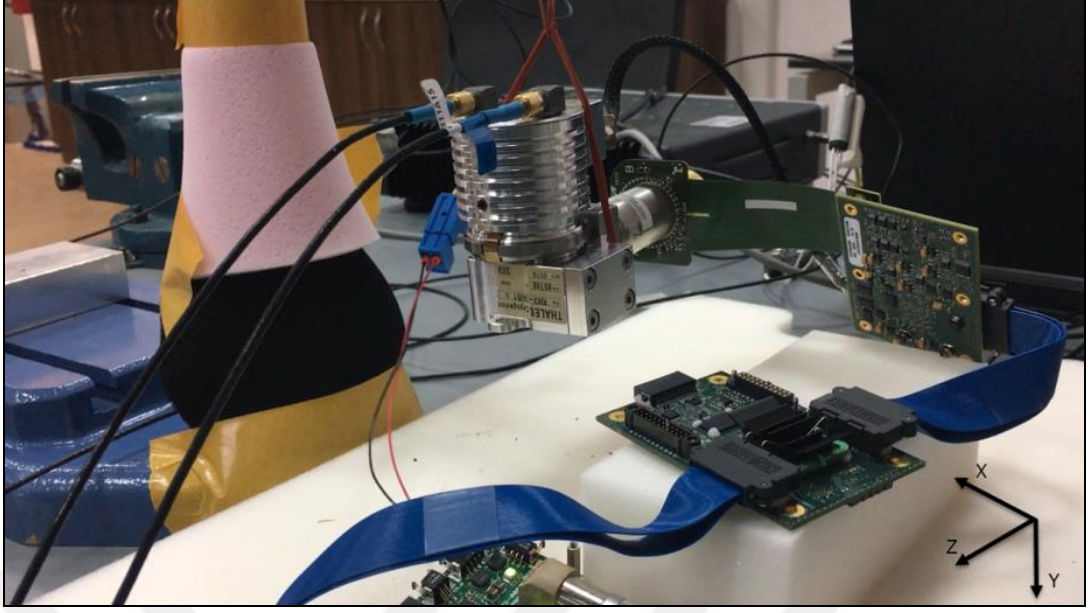
3.1.3.7. Stirling soğutucu titreşimi sebebi ile oluşan bozucu torkun hesaplanması

Stirling soğutucu içerisinde pistonlu bir yapı ile çalışması sebebi ile soğutma işlemi sırasında titreşime sebep olmaktadır. Bu titreşim de kontrol sistemi yapısında tanımlanacak bir bozucu tork olarak modellenenilmektedir. Stirling soğutucu titreşimleri sebebi ile oluşacak tork değerini hesaplamak için basit bir titreşim ölçümü yapılmaktadır. Titreşim ölçümü için Şekil 3.33'te görülen test sistemi kurulmaktadır. Test sisteminde örnek bir Stirling soğutucu, soğutucu hareketlerini sınırlamayacak elastik özelliklere sahip bir malzeme ile havada asılı halde tutulmaktadır. Stirling soğutucunun çalışmasını sağlayan elektronik kartlar da Şekil 3.33'teki gibi bağlanmaktadır. Test düzeneğinden alınacak verilerde elastik malzemenin ve elektronik kartların bağlantıları sebebi ile oluşabilecek veri kayıpları ihmal edilmektedir.



Şekil 3.33. Stirling soğutucu titreşimlerinin ölçümü

Şekil 3.33'te kurulan düzeneğe ivme verilerini almak üzere Stirling soğutucunun üzerine Şekil 3.34'teki gibi iki adet ivmeölçer bağlanmaktadır. Kullanılan iki adet ivmeölçer yerleşimleri sebebi ile birbirlerine göre benzer veriler toplayacağı değerlendirildiği için verilerin kendi içinde tutarlı olması beklenmektedir. Elde edilecek veriler kullanılırken her iki ivmeölçerden alınan verilerin ortalaması alınarak değerlendirilmektedir. Şekil 3.34'te yerleştirilen ivmeölçerlerin yerleşimi alınacak verilerin doğruluğu açısından önem arz etmektedir. İvmeölçerler Stirling soğutucu yapısında kullanılan pistonların hareket eksenlerine göre hizalanarak veri toplanması en doğru sonuçları sağlayacaktır; ancak bu tez kapsamında modelleme amacı ile verilerin yaklaşık değeri elde edilmek istenmektedir.

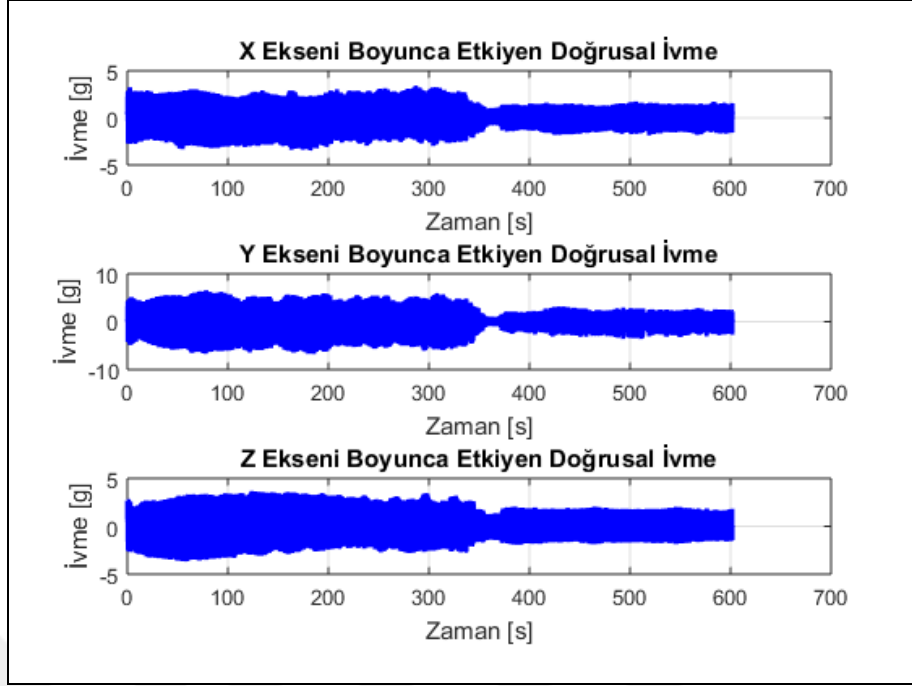


Şekil 3.34. Stirling soğutucu titreşimlerinin ölçümü

Şekil 3.34'te kurulan düzenek ile Stirling soğutucudan dolayı oluşacak bozucu torkun yaklaşık olarak ne kadar olduğu hesaplanmaktadır.

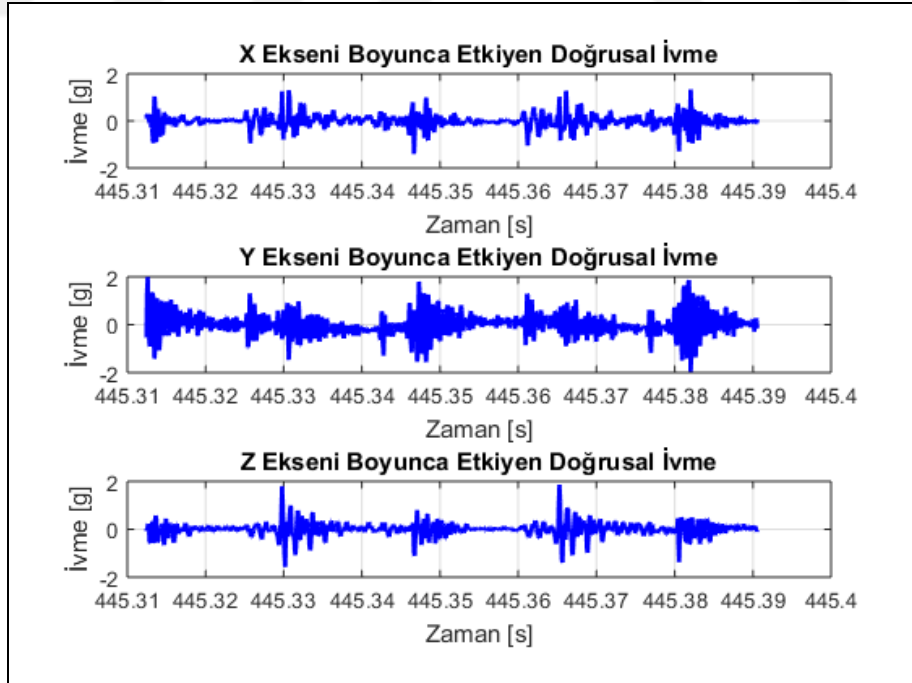
Stirling soğutucu kızılötesi dedektörü kriyojenik sıcaklıklara soğuturken iki farklı fazda bu işlemi yapmaktadır. İlk faz, dedektörü istenen sıcaklıklara indirdiği fazdır. İkinci faz ise istenen sıcaklıklarda dedektörün soğuk kalmasını sağladığı fazdır. Stirling soğutucu her iki soğuma fazında farklı titreşim seviyelerine sahip olacaktır. Tez kapsamında özellikle soğuma gerçekleşikten sonraki faz olan soğuk kalma fazındaki titreşimler bozucu etki olarak ele alınmaktadır.

Şekil 3.35'te elde edilen veriler Stirling soğutucunun her iki fazında da alınan bütün sonuçları göstermektedir. Sonuçlardan da görüleceği üzere Stirling soğutucu kriyojenik sıcaklıklara inene kadar geçen sürede daha çok ısı yükü ihtiyacı sebebi ile pistonlar daha hızlı çalışarak soğumayı gerçekleştirmektedirler. Bu sebeple de bu fazda titreşim değerleri daha fazla gözlemlenmektedir.



Şekil 3.35. Stirling soğutucu doğrusal ivme bileşenleri

Stirling soğutucunun soğuk kalma süresince gerçekleşen titreşimler Şekil 3.36’da yakınlştırılarak verilmektedir.



Şekil 3.36. Stirling soğutucu doğrusal ivme bileşenleri – soğuk kalma fazının yakınlştırılmış görüntüsü

Stirling soğutucu sebebi ile oluşacak bozucu tork hesaplanırken Şekil 3.36’da elde edilen veriler kullanılmaktadır. Tablo 3.7’de verilen eksenler Şekil 3.34’te verildiği şeklindedir.

Tablo 3.7. Stirling soğutucu ivme verileri

Eksenler	En Yüksek İvme Değeri [g]
X Eksen	1,8110
Y Eksen	3,1808
Z Eksen	1,9619

Stirling soğutucu sebebi ile oluşacak torku hesaplarırken elde edilen doğrusal ivme verilerinden piston eksenlerinin kesişim noktasından o eksen boyunca etkiyen bir kuvvet olarak (3.54) numaralı denklemdeki gibi modellenenilmektedir.

$$F=ma \quad (3.54)$$

$$T_{\text{stir}}=Fr \quad (3.55)$$

(3.54) ve (3.55) numaralı denklemde yer alan kütle ve dönme merkezine olan mesafe değeri Tablo 3.8’de verilmektedir. Bu değerler tasarımı yapılan katı modelden alınmaktadır.

Tablo 3.8. Stirling soğutucu değerleri

Parametre	Değeri
Kütle [kg]	0,800
Mesafe [m]	0,050

Stirling soğutucu sebebi ile oluşacak bozucu tork değeri hesaplanırken Tablo 3.7’de verilen değerler kullanılmaktadır ve elde edilen sonuçlar Tablo 3.9’da verilmektedir.

Tablo 3.9. Stirling soğutucu bozucu tork değerleri

Eksenler	En Yüksek Bozucu Tork Değeri [Nm]
X Eksen	0,0724
Y Eksen	0,1272
Z Eksen	0,0785

Tablo 3.9’da elde edilen değerler 5 numaralı bölümde tasarımı yapılan kontrolcü yapılarındaki benzetimlerde kullanılmaktadır.

Tablo 3.9’da X eksenini için verilen tork değeri doğrudan kardanın iç kısmında yer alan yandönme eksenine etkimektedir. Bu bozucu tork yandönme eksenini motorunun tork hesabını yaparken eklenmesi gereken bir tork değeridir.

Yunuslama eksenine etkileyen tork değeri ise Tablo 3.9’da verilen Y eksenini için verilen bozucudur. Bu tork da yunuslama motoru tork gereksinimini hesaplanırken kullanılmaktadır. Yunuslama eksenini doğrudan ölçüm yapılan bu eksene bağlı olmadığı için ilgili dönüşüm matrisi ile çarpılması gerekir. Stirling soğutucu sebebi ile oluşacak bozucu tork kabaca elde edilmek istendiği için bu durum da ihmal edilebilmektedir. Gerek duyulması halinde bu ve benzeri ihmaller sebebi ile toplam tork gereksinimini bir güvenlik katsayısı ile çarpılabilmektedir.

3.1.3.8. Toplam bozucu tork

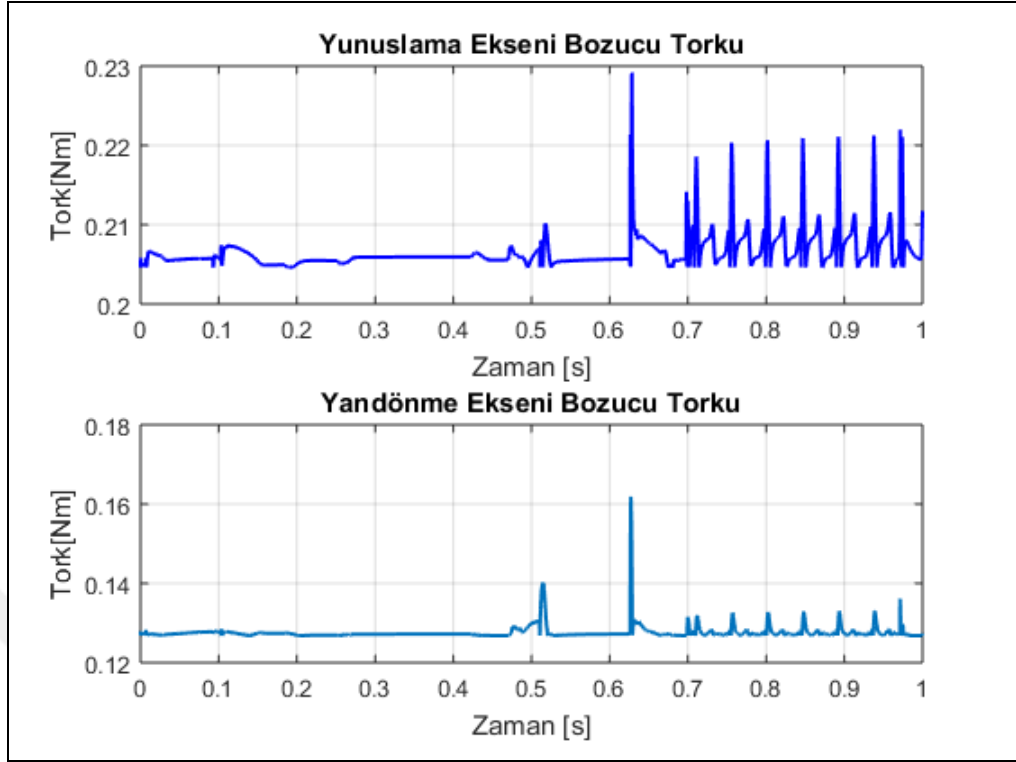
Eksenslere ait toplam bozucu tork kütle kaçıklığı sebebi ile oluşan tork, sürtünme ve kablo direngenliği sebebi ile oluşan tork ve Stirling soğutucu sebebi ile oluşan bozucu torklardan oluşmaktadır.

Kütle kaçıklığı sebebi ile oluşan tork rastsal uçuş titreşimleri ile hesaplandığı için uçuş senaryolarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Uçuş senaryolarında diğer hesaplamalarda olduğu gibi son aşamalara ait veriler dikkate alınarak tasarım işlemleri yapılmaktadır.

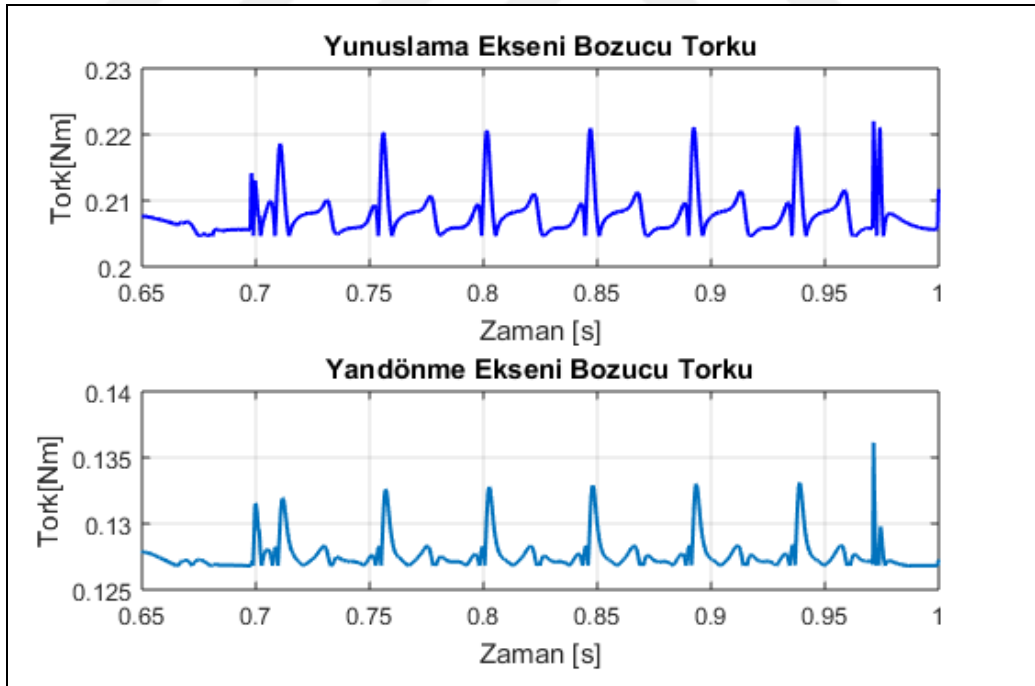
Şekil 3.37’de senaryo #1 ile gerçekleşen toplam bozucu tork verilirken Şekil 3.38’de ise son aşama verilerinin yakınlştırılmış hali verilmektedir.

Şekil 3.39’da senaryo #2 ile gerçekleşen toplam bozucu tork verilirken Şekil 3.40’da ise son aşama verilerinin yakınlştırılmış hali verilmektedir.

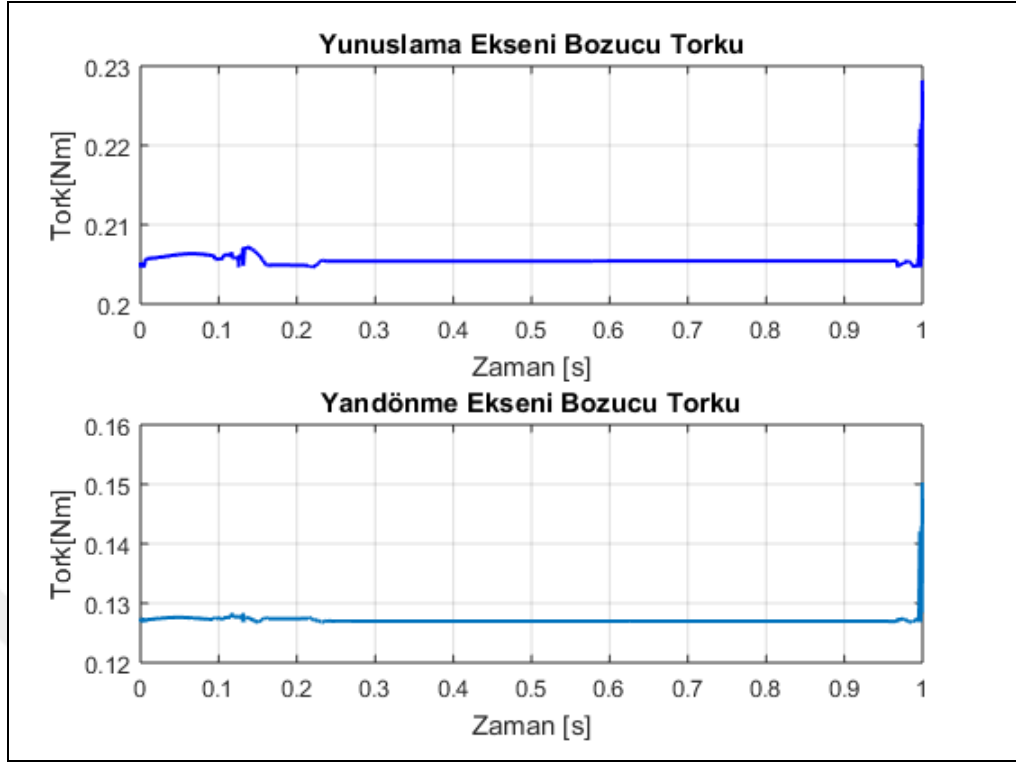
Şekil 3.41’de senaryo #3 ile gerçekleşen toplam bozucu tork verilirken Şekil 3.42’de ise son aşama verilerinin yakınlştırılmış hali verilmektedir.



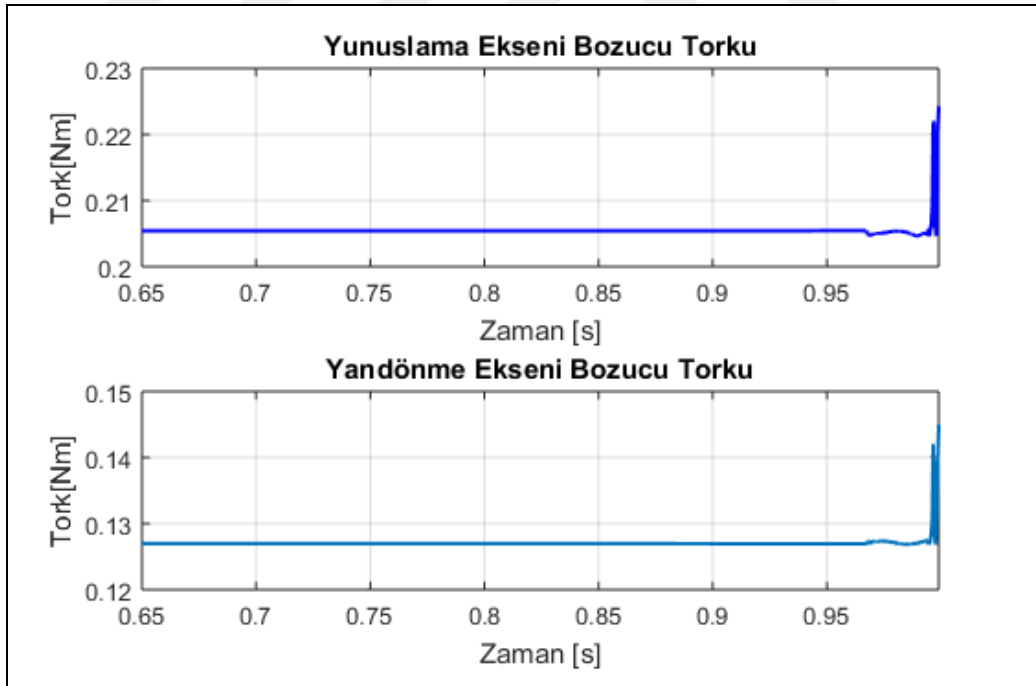
Şekil 3.37. Toplam bozucu tork (senaryo #1)



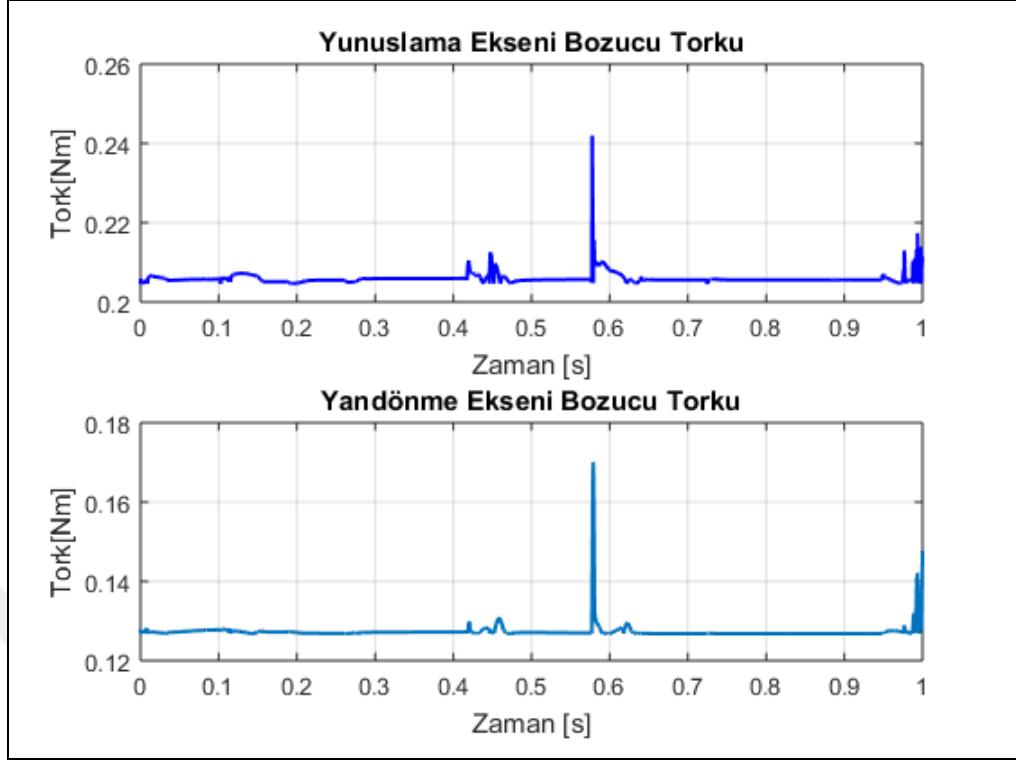
Şekil 3.38. Toplam bozucu tork (senaryo #1, son aşama yakınlaştırılmış)



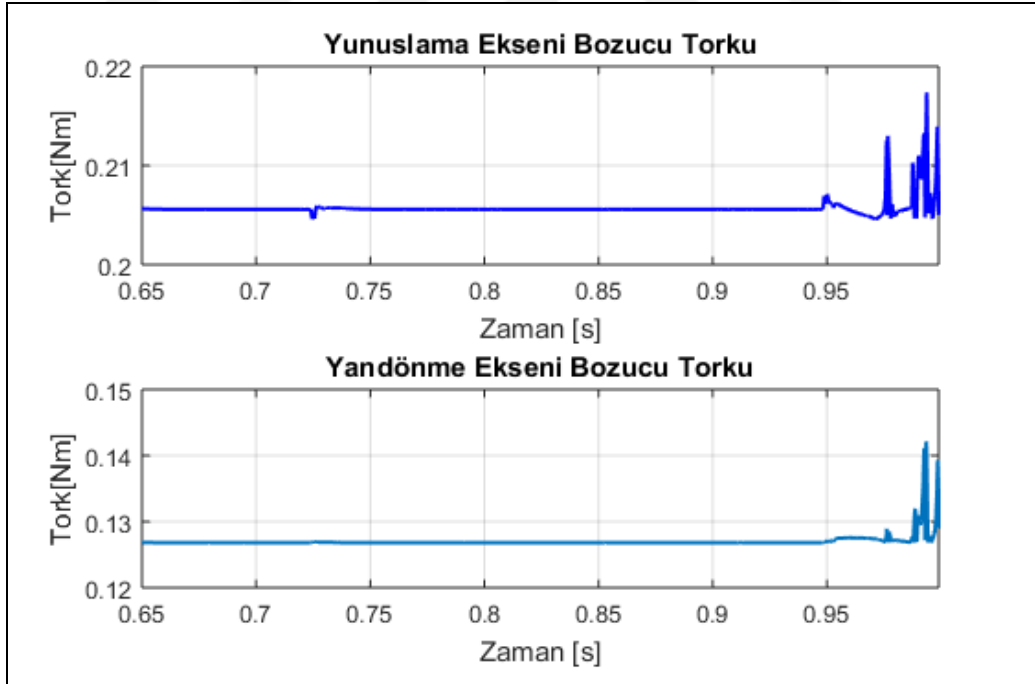
Şekil 3.39. Toplam bozucu tork (senaryo #2)



Şekil 3.40. Toplam bozucu tork (senaryo #2, son aşama yakınlştırılmış)



Şekil 3.41. Toplam bozucu tork (senaryo #3)



Şekil 3.42. Toplam bozucu tork (senaryo #3, son aşama yaklaşılmış)

Senaryolara bağlı olarak yandönme ve yunuslama eksenlerinde hesaplanan toplam bozucu tork Tablo 3.10'da verilmektedir. Tablo 3.10'da verilen değerler son aşamadaki hesaplanan en yüksek değerleri göstermektedir.

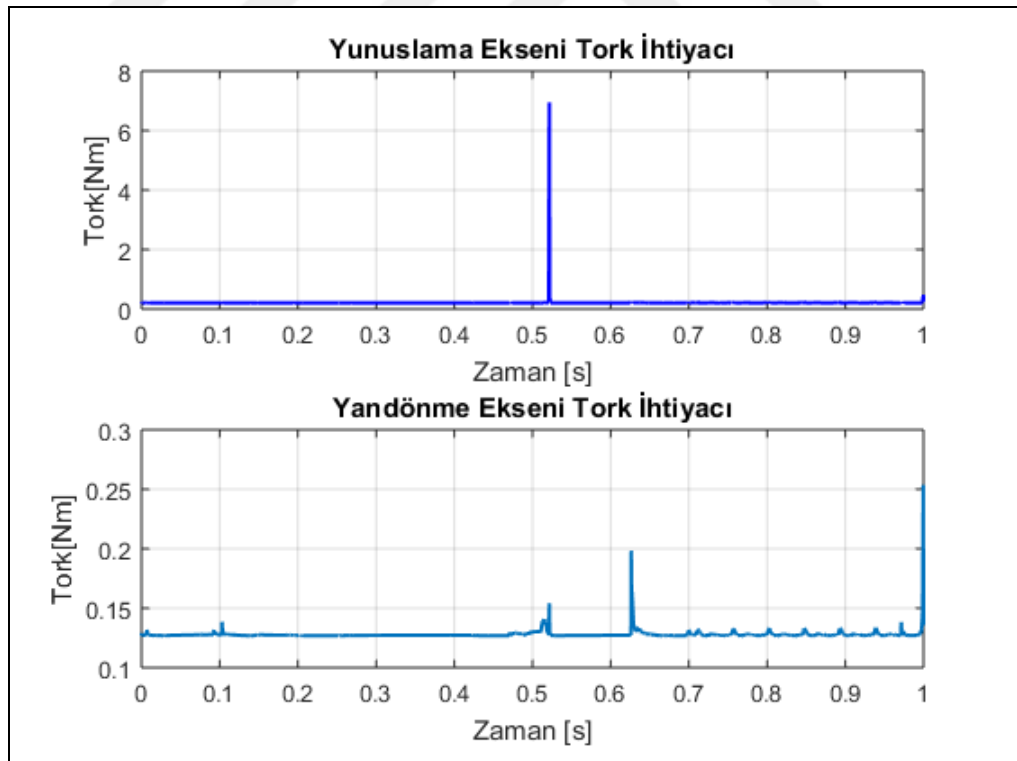
Tablo 3.10. Stirling soğutucu en yüksek bozucu tork değerleri

Senaryolar	Yandönme Eksenli Bozucu	Yunuslama Eksenli Bozucu
	Torku [Nm]	Torku [Nm]
Senaryo #1	0,1361	0,2220
Senaryo #2	0,1503	0,2282
Senaryo #3	0,1476	0,2174

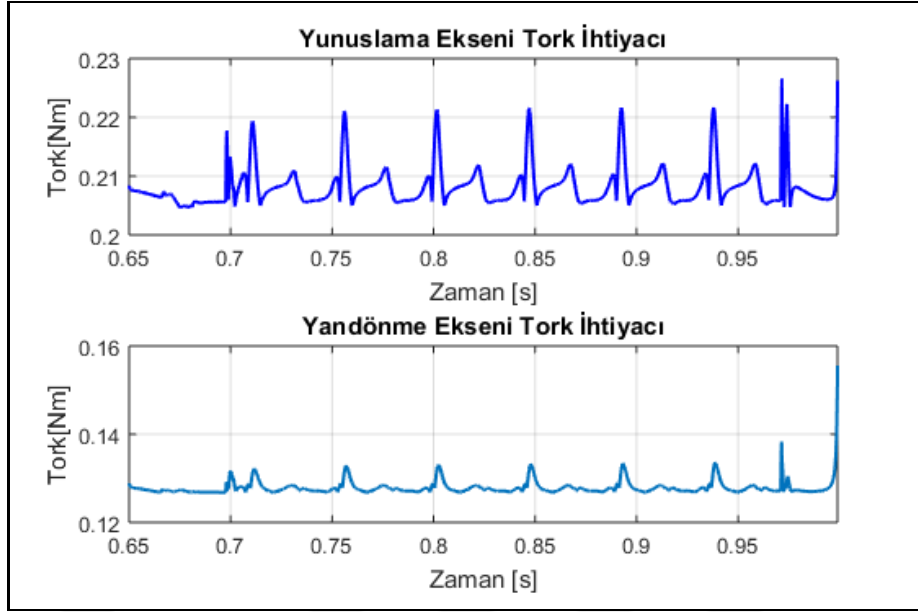
3.1.3.9. Toplam tork gereksinimi

Toplam bozucu torkların yanısıra eyleyicilerin yönlendireceği kütlelerin ataletlerinin hareketleri ile oluşturacağı tork gereksinimleri vardır. Önceki bölümde hesaplanan toplam bozucu torklara bu değerler de eklenince kardan tasarımında kullanılacak motorların toplam tork gereksinimleri ortaya çıkmaktadır.

Şekil 3.43'te senaryo #1 ile gerçekleşen toplam tork gereksinimi verilirken Şekil 3.44'te ise son aşama verilerinin yakınlaştırılmış hali verilmektedir.

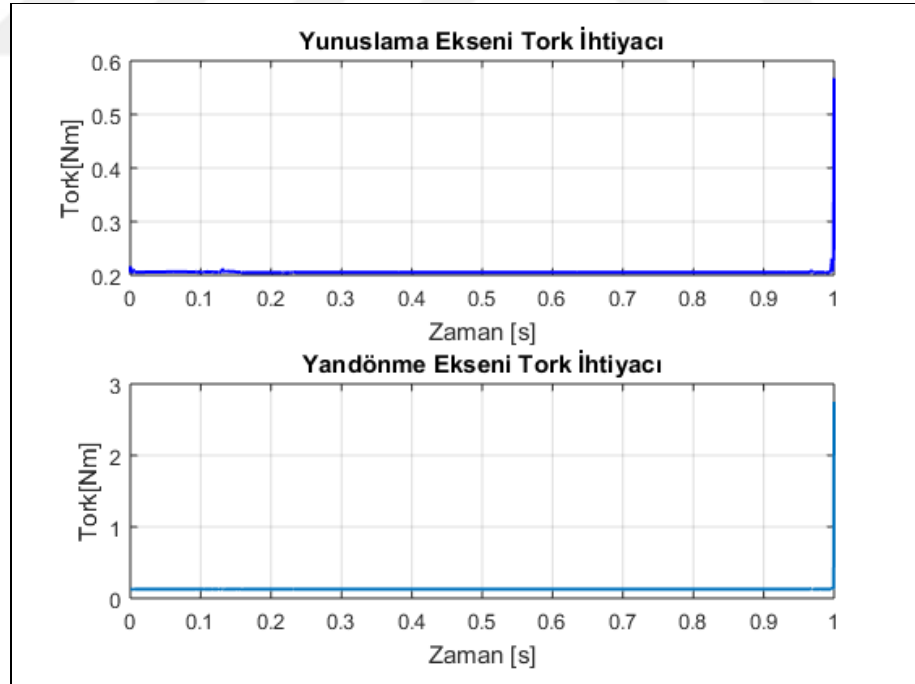


Şekil 3.43. Toplam tork gereksinimi (senaryo #1)

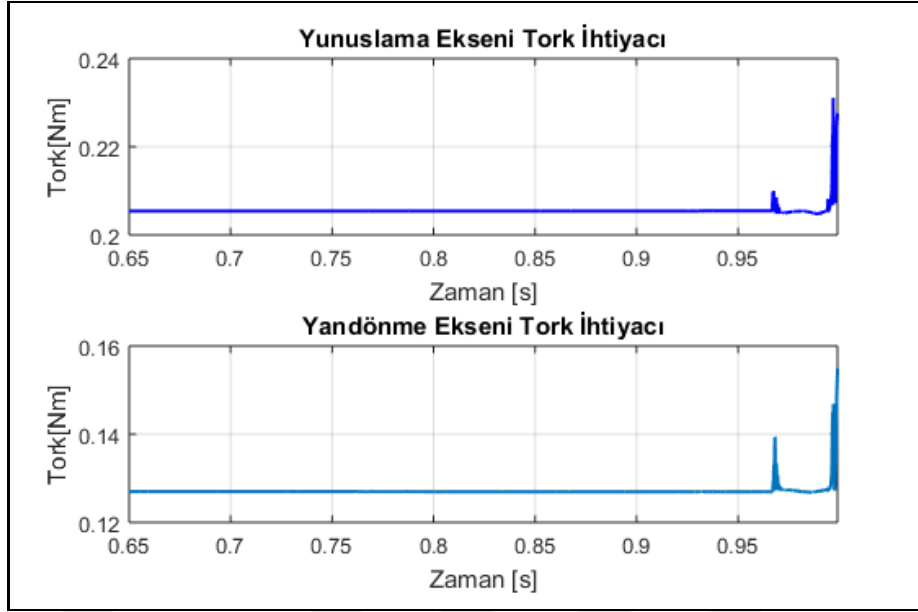


Şekil 3.44. Toplam tork gereksinimi (senaryo #1, son aşama yakınlaştırılmış)

Şekil 3.45'te senaryo #2 ile gerçekleşen toplam tork gereksinimi verilirken Şekil 3.46'da ise son aşama verilerinin yakınlaştırılmış hali verilmektedir.

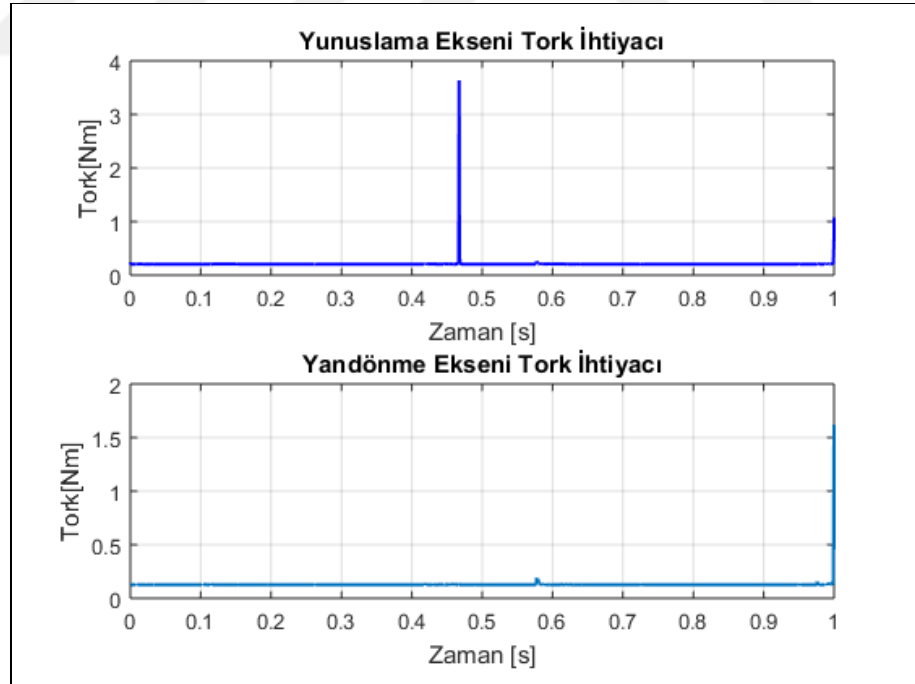


Şekil 3.45. Toplam tork gereksinimi (senaryo #2)

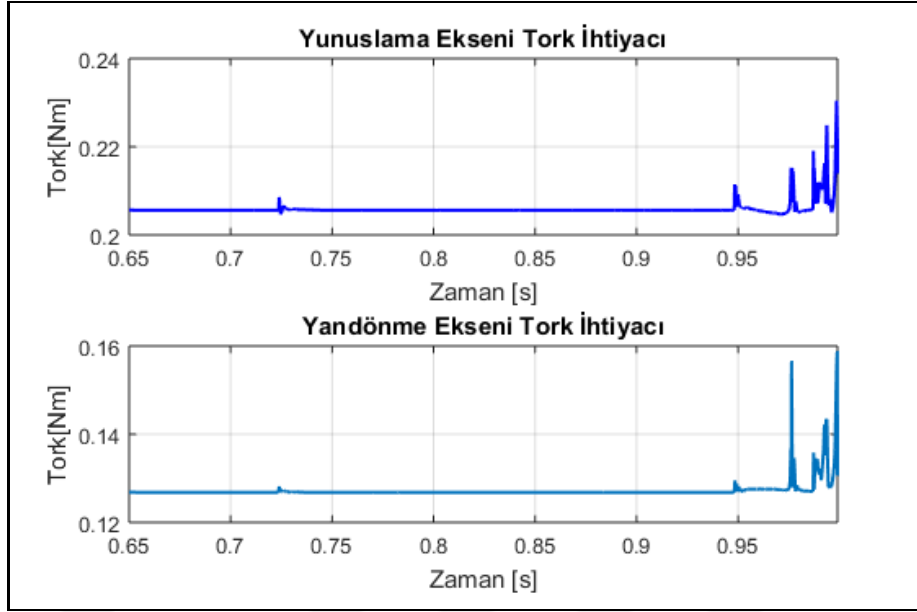


Şekil 3.46. Toplam tork gereksinimi (senaryo #2, son aşama yakınlaştırılmış)

Şekil 3.47’de senaryo #3 ile gerçekleşen toplam tork gereksinimi verilirken Şekil 3.48’de ise son aşama verilerinin yakınlaştırılmış hali verilmektedir.



Şekil 3.47. Toplam tork gereksinimi (senaryo #3)



Şekil 3.48. Toplam tork gereksinimi (senaryo #3, son aşama yakınlaştırılmış)

Senaryolara bağlı olarak yandönme ve yunuslama eksenlerinde hesaplanan toplam tork gereksinimleri Tablo 3.11’de verilmektedir. Tablo 3.11’de verilen değerler son aşamadaki hesaplanan en yüksek değerleri göstermektedir.

Tablo 3.11. Toplam tork gereksinimi

Senaryolar	Yandönme Eksen Bozucu	Yunuslama Eksen Bozucu
	Torku [Nm]	Torku [Nm]
Senaryo #1	0,1383	0,2266
Senaryo #2	0,1504	0,2311
Senaryo #3	0,1566	0,2248

3.1.3.10. Motor hız gereksiniminin hesaplanması

Kardan motorlarının hız gereksinimi kinematik analizler ile hesaplanan mühimmata göre hız verileridir. Bu veriler Tablo 3.4’te verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre seçilen motorun hızı en az 50 [°/s] olmalıdır. Motorları beslemek üzere kullanılacak bara gerilimi belli ise motorun hız katsayısı (3.56) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$K_b = \frac{\text{Besleme Gerilimi}}{\text{açısal hız}} [Vs/^{\circ}] \quad (3.56)$$

3.1.3.11. Motor özellikleri

Benzetimlerde kullanılan uçuş senaryolarına göre, tork ve hız gereksinimleri incelenerek uygun bir eyleyici seçilmektedir. Eyleyici seçimi yapılırken hesaplanan en yüksek tork ve hız gereksinimlerinin yanında sürekli çalışma durumundaki tork ve hız değerleri de göz önüne alınmalıdır. Bu aşamaya kadar ifade edilen bütün etkiler göz önüne alınarak seçilen eyleyiciye ait özellikler Tablo 3.12’de verilmektedir.

Tablo 3.12. Seçilen eyleyicilerin özellikleri

Parametreler	Yandönme Eksen	Yunuslama
	Motoru	Eksen Motoru
Sürekli Durdurma Torku [Nm]	0,115	0,825
Maksimum Tork [Nm]	0,342	1,650
Motor Tork Sabiti [Nm/A]	0,0328	0,165
Motor Zıt EMK Sabiti [V/krpm]	2,47	40,8
Maksimum Statik Sürtünme [Nm]	0,0120	0,035
Direnç [Ω]	1,38	8,05

Yandönme eksen için seçilen motora ait Tablo 3.12’de verilen özellikler ile Tablo 3.11’de hesaplanan tork gereksinimleri karşılaştırılırsa yandönme eksenindeki motorun zorlayıcı bir koşulda çalışacağı değerlendirilmektedir; zira seçilen motoru sürekli durdurma torku gerek duyulan toplam tork değerinden biraz daha azdır.

3.1.4. Konum algılayıcısı seçimi

Çevresel etmenlere karşı dayanımı sebebi ile açısal konum algılayıcı olarak çözücü (Resolver) kodlayıcıya (Encoder) göre askeri uygulamalar daha çok tercih edilmektedir. Son yıllarda geliştirilen kodlayıcıların çevresel etmenlere karşı dayanımı artmaktadır. Bu sebeple zamanla çözücünün yerine kodlayıcı tercih edilebilmektedir. Bu tez kapsamında açısal konum algılayıcı olarak çözücü kullanılmaktadır.

Çözücü seçimi yapılabilmesi için öncelikle görüntüleme sisteminin işaretleme doğruluğu gereksinimi belirlenmelidir. Görüntüleme sisteminin işaretleme doğruluğu kardanda kullanılacak olan dedektörün anlık görüş açısı (Instantaneous Field of

View, IFOV) ile doğrudan ilişkilidir. Dedektörün anlık görüş açısı (3.57) numaralı denklem ile hesaplanabilmektedir.

$$IFOV = \frac{d}{f_{\text{optic}}} \quad (3.57)$$

(3.57) numaralı denklemde yer alan d dedektör piksel boyutunu, f_{optic} ise optik bütünü odak uzunluğunu ifade etmektedir. Bu parametreler tez kapsamında Tablo 3.13'te verildiği şekilde olduğu kabul edilmektedir.

Tablo 3.13. Optik sistem parametreleri

Parametre	Değeri
d [μm]	15
f_{optic} [mm]	50

Tablo 3.13'te verilen parametreler ışığında dedektörün IFOV değeri (3.58) numaralı denklemdeki gibi elde edilebilmektedir.

$$IFOV = \frac{15 \times 10^{-3}}{50} = 3 \times 10^{-4} \text{ [rad]} = 0,3 \text{ [mrad]} \quad (3.58)$$

Sistemin IFOV değeri 0,3 [mrad] olarak hesaplanmaktadır. Literature göre doğrusal hareketler sebebiyle IFOV'da meydana gelecek %20'lik bir değişimin sistem performansındaki etkisi ihmal edilebilecek kadar düşük seviyelerde olduğu görülmektedir [8]. Bu durumda IFOV değeri 0,36 [mrad] olarak alınabilir. Bu değer de birim dönüşümleri ile 1,24 [arcmin] değerine karşılık gelir. Bu durumda 1 [arcmin] doğruluk sağlayan bir çözücü yeterli olacaktır.

1 kutup çiftine sahip çözücülerde elektriksel tur ile mekanik tur birbirine eşittir ve bu çözücüler 360° derece ölçüm aralığına sahiptir. Çözücülerde kutup çifti sayısı arttıkça ölçüm aralığı azalmakta ve ölçüm doğruluğu artmaktadır. Çözücülerdeki ölçüm aralığı (3.59) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\text{Ölçüm Aralığı} = \frac{360^\circ}{\text{kutup çifti sayısı}} \quad (3.59)$$

Kardanın limit açılarla çalıştığı düşünülünce 90° ölçüm aralığı olan bir çözücünün yeterli olacağı değerlendirilmektedir. Bu da 4 kutup çifti olan bir çözücü kullanılması

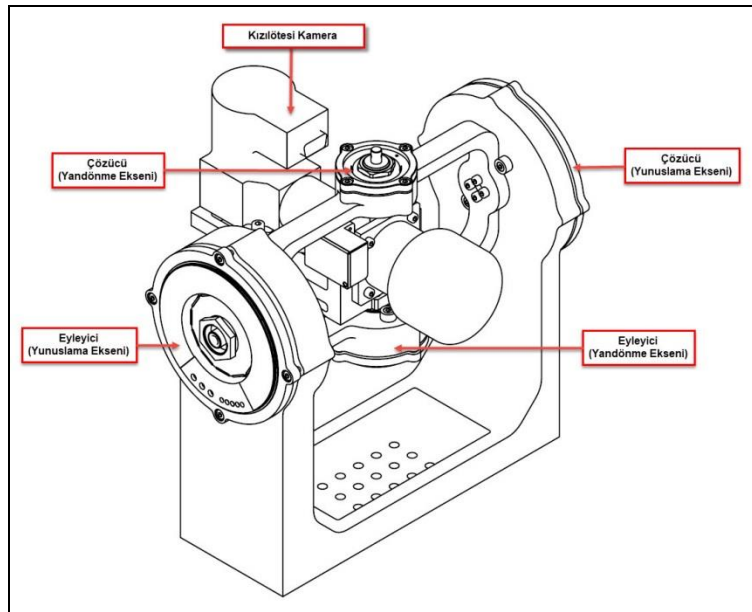
anlamına gelmektedir. Tez kapsamında kullanılmak üzere seçilen çözücüye ait özellikler Tablo 3.14’te özetlenmektedir.

Tablo 3.14. Seçilen çözücünün özellikleri

Parametre	Değeri
Kutup Çifti Sayısı (Hızı)	4
Doğruluk [arcmin]	1
Besleme Gerilimi [Vrms]	5
Besleme Akımı [mA]	17
Besleme Frekansı [Hz]	2000

3.4. Test Düzeneği

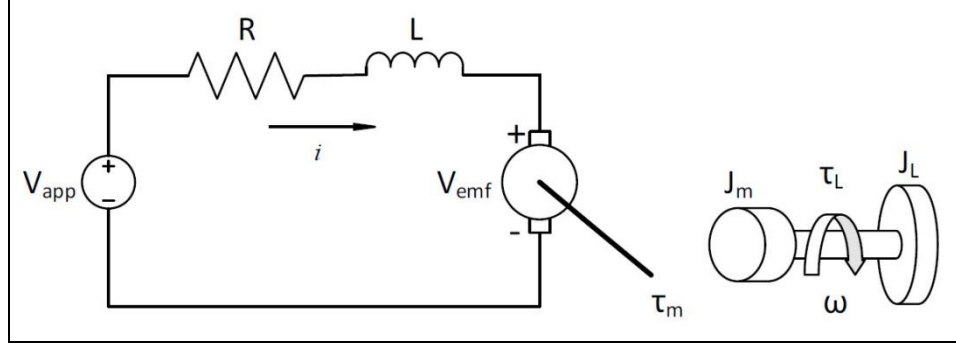
Tez kapsamında bu aşamaya kadar kinematik analizler ve bileşen seçimi işlemleri gerçekleştirildi. Elde edilen sonuçlara göre Şekil 3.49’da verilen iki eksenli kardan tasarımı yapıldı. Test düzeneğinde her iki eksen için de birer adet eyleyici ve konum algılayıcısı kullanılmaktadır. Kızılötesi kamera bütünü için bu test düzeneğinde kütle eşdeğer bir mekanik hazırlanarak kullanılmaktadır. Kızılötesi kamera için hazırlanan eşdeğer tasarım kütle olarak gerçeği ile eşdeğer olmasına rağmen atalet olarak geometrisi ve malzeme yoğunluğu değişimi sebebi ile gerçeğine eşit değil ancak yaklaşıktır.



Şekil 3.49. İki eksenli test kardanı tasarımı

3.5. DC Motor Dinamik Modeli

Şekil 3.51’de bir DC motorun eşdeğer modeli verilmektedir.



Şekil 3.51. Eşdeğer motor modeli [18]

Motorun ürettiği tork değeri, motorun çektiği akıma ve motor tork sabitine bağlı olarak (3.60) numaralı denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$\tau_m = K_t i \quad (3.60)$$

(3.60) numaralı denklem motorun elektriksel olarak tork ifadesidir. Buna karşın motorun hareket vereceği sistemin mekanik tork denklemi ise (3.61) numaralı denklemdeki gibi verilmektedir.

$$\tau = J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta \quad (3.61)$$

(3.61) numaralı denklemde yer alan J ifadesi toplam atalet değerini ifade ederken (3.62) numaralı denklemdeki gibi motorun ve yükün torkları toplamıdır.

$$J = J_m + J_L \quad (3.62)$$

(3.61) numaralı denklemde yer alan τ ifadesi ise motorun sisteme uyguladığı toplam torku ifade etmektedir. Bu durumda (3.60) ve (3.61) numaralı denklemler birbirine eşitlenerek Laplace dönüşümü yapılırsa sistemin modeli (3.63) numaralı denklemdeki gibi yer almaktadır.

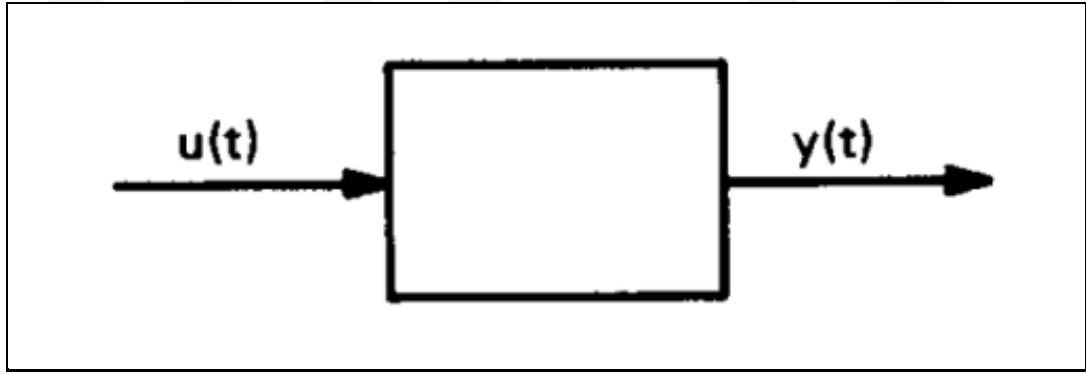
$$\frac{\theta(s)}{I(s)} = \frac{K_t}{Js^2 + Bs + K} \quad (3.63)$$

4. SİSTEM TANIMLAMA

Kontrolcü tasarımında ve benzetimlerde sistemin bir modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bir sistemin modellenin elde edilmesi için iki temel yöntem vardır; ilki fizik kuralları kullanılması ve bazı matematiksel işlemler ile analitik bir ifadenin elde edilmesi, ikincisi ise deneysel olarak gerekli ilişkinin tanımlanmasıdır. Fizik kurallarıyla elde edilen model bir ön görüşe de gerçek parametrelerin elde edilmesi zordur. Bu sebeple deneysel sistem tanımlama gerçek zamanlı uygulamalarda oldukça önemli bir husustur.

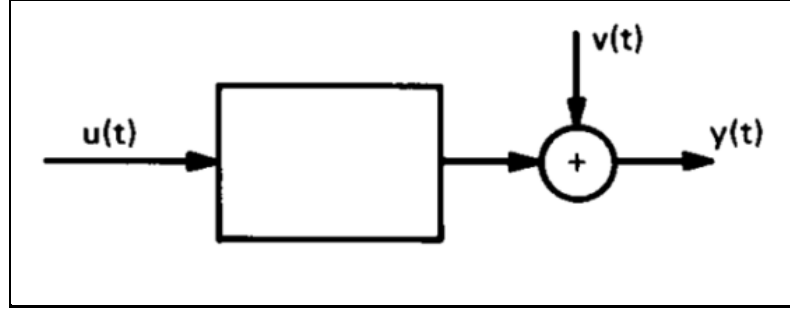
4.1. Deneysel Sistem Tanımlamanın Temelleri

Deneysel olarak sistem tanımlama (System Identification) işleminde sisteme bir giriş uygulanmakta ve sistemin çıkışından veri toplanmaktadır. Şekil 4.1’de sistem tanımlama işlemine ait temel blok şeması verilmektedir.



Şekil 4.1. Sistem tanımlama yapısı [19]

Şekil 4.1’de verilen blok şeması teorik olarak doğru olsa da hiçbir gerçek zamanlı çalışmada sistem tanımlama bu şekilde yapılamamaktadır; zira dış bozucular her koşulda sistem tanımlama işlemine etki etmektedir [20]. Şekil 4.2’de sistem tanımlanması için bozucu giriş eklenmiş daha doğru bir blok şeması verilmektedir.



Şekil 4.2. Bozucu gürültü eklenmiş sistem tanımlama yapısı [19]

Sistem tanımlama işleminde kullanılan girişler genellikle farklı frekanslarda rastgele emirlerden oluşturulmaktadır. Bu şekilde, tasarlanan bir giriş ile dinamik sistemin mümkün olan en fazla mod şekli görülebilmektedir [21].

Sistem tanımlama işleminde tanımlanan sistemde doğrusal olmayan karakteristiğe sahip durumlar görülebilmektedir. Bu durum özellikle sürtünme veya sönümleme katsayında ortaya çıkmaktadır. Her ne kadar sistem doğasında doğrusal olmayan özellikler ortaya çıksa da tasarlanacak gürbüz özellikte bir kontrolcü ile doğrusal özelliklere sahip olarak tanımlanan bir sistem kullanılabilir.

Sistem tanımlama işleminin en önemli adımlarından birisi giriş sinyalinin belirlenmesi veya tasarlanmasıdır. Bu kapsamda literatürde bazı standart fonksiyonlar tanımlanmaktadır; darbe fonksiyonu (Impulse Function), basamak fonksiyonu (Step Function), beyaz gürültü (White Noise), chirp fonksiyonu (Chirp Function) ve PRBS sinyali (Pseudo Random Binary Sequence).

Darbe fonksiyonu, $t=0$ anında teorik olarak sonsuz büyüklükteki sinyali tanımlamaktadır. Darbe fonksiyonu içerisinde bütün frekansları barındırdığı için önemli bir sinyaldir; ancak bu sinyal uygulamada elde edilemez. Bu sebeple uygulamalarda buna yakın davranışlardaki sinyaller kullanılmaktadır; fakat yine de bu sinyalin elektriksel olarak oluşturulması mümkün değildir. Darbe fonksiyonu genellikle sistemlerin yapısal modellerin oluşturulmasında kullanılmaktadır.

Basamak fonksiyonu, en yoğun kullanılan fonksiyonlardan birisidir. Basamak fonksiyonunda, yüksek frekans bandında sinyal gürültü oranı (Signal to Noise Ratio, SNR) düşüktür. Bu sebeple basamak fonksiyonu yavaş süreçleri veya sistemleri uyarmak için kullanılmaktadır [18].

Beyaz gürültü sinyali, rastgele (Random) bir sinyaldir ve büyüklüğü rastgele olarak değişmektedir. Bu sinyalin önemli özelliği belirli bir aralıkta sistemin bütün modlarını tetiklemesidir. Bu sinyal türü de genellikle elektronik devre ve kartların tanımlamasında kullanılmaktadır [18].

Chirp sinyali, frekansı değişken bir sinüs sinyalini tanımlamaktadır. Bu sinyal özellikle frekans cevabı gerekliliği durumlarında kullanılmaktadır [18].

PRBS sinyali, rastgele olarak iki değer arasında değişen rastgele olarak genişliği değişen PWM (Pulse Width Modulation) sinyallerine benzemektedir. Bu sinyaller sınırlı aralıkta darbe fonksiyonuna da yakınsayabilmektedir.

Sistem tanımlama işleminde kullanılan sinyalin tipinin yanı sıra sinyalin tanımlandığı frekans bandının da önemi büyüktür. Frekans bandı sistemin çalışacağı bandı kapsamalı; ancak bu bandın dışına mümkünse taşmamalıdır. Örnek olarak en fazla 200 Hz'e cevap verebilecek bir sistem ele alalım. Eğer sistem tanımlama işlemindeki giriş sinyali bu değerin üzerinde bir bandı işaret ederse sistemin istese de çalışmayacağı bir bölgede tanımlama yapılmaya çalışılmaktadır ki bu sistem tanımlama işlemi uygun olmayacaktır. Genelde sistem kapalı çevrim bant genişliğinin en fazla 3 katına kadar bir frekans bandında tanımlama yapılması uygun kabul edilmektedir.

Sistem tanımlama işlemine başlamadan eyleyiciye birim basamak emri verilerek bazı incelemeler yapılabilir. Birim basamak giriş uygulanan sistemden konum ve hız değişimleri elde edilebilir. Hız değişim grafiğinden ise sistemin zaman sabiti elde edilebilir; zira hız modeli birinci mertebeden bir sistem olarak tanımlanabilir. Bu işlemler ile sistemin maksimum efektif bant genişliği de elde edilmiş olacaktır.

Giriş sinyalin frekans aralığının yanında örnekleme zamanı da önem arz etmektedir. Örnekleme zamanı efektif bant genişliğinin en az 10-20 katı olarak seçilmesi önerilmektedir [20].

4.2. Giriş Sinyalleri

Sistem tanımlama işleminde giriş sinyalinin hazırlanması doğru bir tanımlama için önem arz etmektedir. Giriş sinyali ile sistem hareket edebileceği alanı büyük ölçüde

taramalı ancak hiçbir zaman sınırlara ulaşmamalıdır; zira sınır bölgelerde sistem tasarımına bağlı olarak istenmeyen veriler toplanabilir. Örneğin tasarlanan kardan sistemi bir eksen etrafında $\pm 30^\circ$ dönebilme kabiliyeti ile tasarlanmaktadır. İlgili sınır değerlerinde sistem yazılım yardımı ile ve donanımsal olarak sınırlandırılmaktadır. Aksi durumda eksen hareketi ile o eksen (yandönme eksen) sistemin yapısındaki diğer mekaniklere çarpmaktadır.

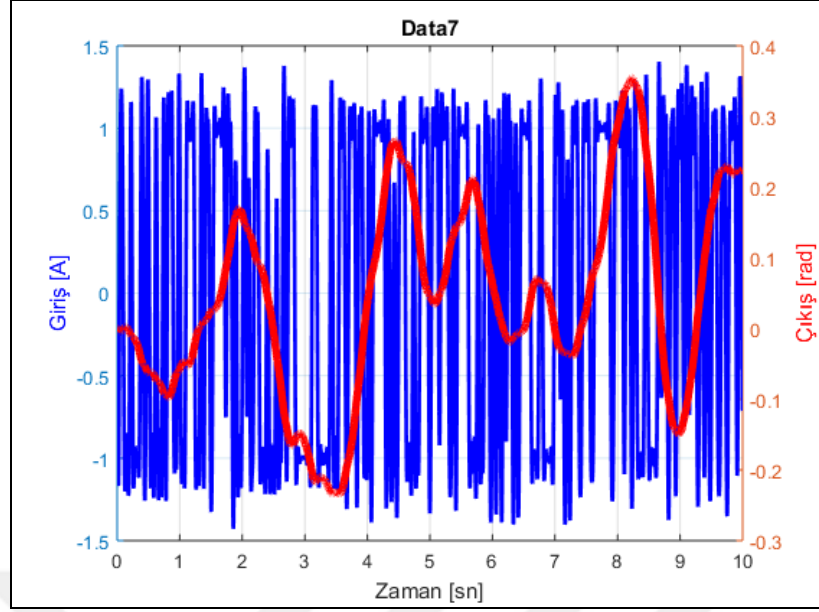
Giriş sinyali ile ilgili olarak dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise giriş sinyalinin frekans tanımıdır. Uygulanacak olan giriş sinyali sistemin veya eyleyicinin yapamayacağı yüksek frekanslarda tanımlanmamalıdır; zira yüksek frekanslarda sistem cevap veremeyebilir. Bu durumda toplanacak veriler sistemin cevap vermediği verilere uyarlanacak şekilde sistem tanımlama işleminde kullanılır ve bu durum doğru değildir.

4.3. Sistem Tanımlama

Sistem tanımlama işlemi, sisteme giriş sinyali olarak akım sinyali verilerek ve çıkış sinyali olarak açı sinyali toplanarak gerçekleştirilmektedir. Giriş sinyali eyleyiciyi süren kartın “akım görüntüleme çıkışı” (Current Monitor Out, CMO) kanalından alınmaktadır. Çıkış sinyali ise çözücü okuma kartı kullanılarak veri toplama kartı üzerinden alınmaktadır.

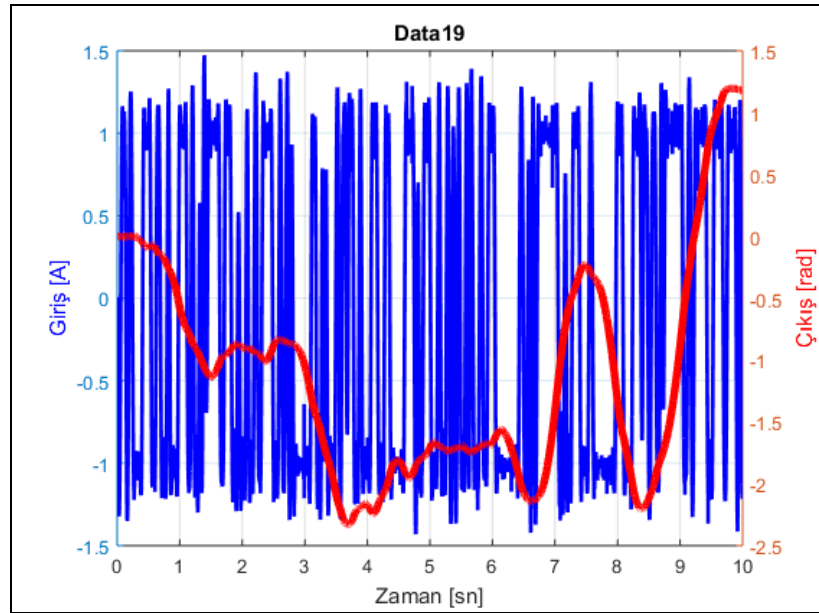
Giriş sinyali olarak sisteme gönderilen akımın birimi [A], çıkış sinyali olarak sistemden toplanan açının birimi ise [rad] olarak ele alınmaktadır.

Sistem tanımlama işleminde yandönme eksen için kullanılan giriş sinyallerinin genliği 0,5 [A], 1,0 [A] ve 1,5 [A] olarak değişmektedir. Aynı sinyallerin frekansları ise 10 [Hz], 20 [Hz], 30 [Hz], 40 [Hz] ve 50 [Hz] olacak şekilde filtrelenerek 15 farklı giriş sinyali kullanılmaktadır. Şekil 4.3’te yandönme eksen için uygulanan ve en yüksek eşleşme yüzdesi elde edilen Data7 verilmektedir.



Şekil 4.3. Sistem tanımlama giriş-çıkış sinyalleri (Data7, yandönme eksen)

Sistem tanımlama işleminde yunuslama eksen için kullanılan giriş sinyallerinin genliği ise 0,8 [A], 1,0 [A], 1,2 [A] ve 1,5 [A] olarak değişmektedir. Aynı sinyallerin frekansları ise 5 [Hz], 10 [Hz], 20 [Hz], 30 [Hz], 40 [Hz] ve 50 [Hz] olacak şekilde filtrelenerek 21 farklı giriş sinyali kullanılmaktadır. Şekil 4.4'te yunuslama eksen için uygulanan ve en yüksek eşleşme yüzdesi elde edilen Data19 verilmektedir.



Şekil 4.4. Sistem tanımlama giriş-çıkış sinyalleri (Data19, yunuslama eksen)

Yandönme ve yunuslama eksenlerinin sistem tanımlama işlemlerinde kullanılan 36 farklı sinyale ait giriş sinyallerinin frekans tanım bölgesindeki ifadeleri ile giriş çıkış sinyallerinin verileri ekler bölümünde verilmektedir.

Sistemin modeli 3.5 numaralı bölümde ifade edildiği üzere ikinci dereceden bir transfer fonksiyonu olarak modellenmektedir. Sistem tanımlama işlemi her iki eksen için de MATLAB® yazılımının sistem tanımlama arayüzü (“ident”) [22] aracılığı ile bu model kullanılarak yapılmaktadır.

(4.1) numaralı eşitlik ile sistemin gerçek atalet verisi, sönüm katsayısı ve yay sabiti hesaplanabilmektedir.

$$\frac{\theta(s)}{I(s)} = \frac{K}{s^2 + t_{p1}s + t_{p2}} = \frac{K_t}{Js^2 + Bs + K} \quad (4.1)$$

(4.1) numaralı denklemde yer alan sistemin atalet verisi, sönüm katsayısı ve yay sabiti sırasıyla (4.2), (4.3) ve (4.4) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$J = \frac{K_t}{K} \quad (4.2)$$

$$B = Jt_{p1} \quad (4.3)$$

$$K = Jt_{p2} \quad (4.4)$$

Sistem tanımlama işleminin ilk olarak doğruluğu kontrol edilmelidir. Bu işlem içinde motor tork sabiti kullanılarak deneysel sistem tanımlamadan atalet verisi hesaplanmaktadır. Hesaplanan atalet verisi ile tasarımı yapılan katı modelden ilgili atalet değeri ölçülerek karşılaştırılır. Karşılaştırılan değerleri belirli bir derecede birbirine yakın ise sistem tanımlama işleminin süreci temel olarak uygun şekilde yapıldığı kabul edilebilir. Sistem tanımlamanın süreç olarak doğru yapıldığı kabul edildikten sonra giriş çıkış sinyallerinin eşleşme oranları tanımlanmalıdır.

Sistem tanımlama işleminde eşleşme yüzdesini ifade eden bir yöntem 1998 yılında Babuska tarafından önerilmektedir. Bu metod VAF (Variance Accounting For) ismi ile bilinmektedir [23]. VAF metodu iki sinyal arasındaki varyans değişimi üzerinden eşleşme yüzdesini vermektedir. VAF değerinin %100 olması karşılaştırması yapılan

iki sinyalin aynı olduğunu ifade etmektedir. Bu sebeple sistem tanımla işleminin temel amacı, VAF değeri %100'e en yakın olan uygun modeli bulmaktır.

İki sinyal arasındaki eşleşme yüzdesi VAF metodu kullanılarak (4.5) numaralı denklemdeki gibi hesaplanmaktadır. (4.5) numaralı denklemde yer alan y sistem tanımlama işlemi ile toplanan çıkış sinyalini ifade ederken y_m ise elde edilen model ile teorik olarak aynı giriş sinyali için oluşacak olan çıkış sinyalini ifade etmektedir.

$$VAF=100\left(1-\frac{\text{var}(y-y_m)}{\text{var}(y)}\right) \quad (4.5)$$

Sistem tanımlama işleminde yandönme eksenini için elde edilen transfer fonksiyonu katsayıları ve eşleşme yüzdeleri Tablo 4.1'de verilmektedir. Tablo 4.1'de verilen eşleşme yüzdeleri dikkate alındığında yandönme eksenini için Data7 isimli giriş sinyali ile toplanan veriler ile %95 oranında bir eşleşme elde edildiği görülmektedir. Data7 ile hesaplanan atalet değeri ile Tablo 3.5'te verilen atalet değeri birbirine yakın olduğu için yandönme eksenini için Data7 ile elde edilen transfer fonksiyonu doğru kabul edilmektedir.

Tablo 4.1. Sistem tanımlama verileri – yandönme eksenini

Veri	K	T_{p1}	T_{p2}	K_t	J	B	K	VAF
-	-	-	-	$\left[\frac{Nm}{A}\right]$	$[kgm^2]$	$\left[\frac{kgm^2}{s}\right]$	$\left[\frac{kgm^2}{s^2}\right]$	$[\%]$
Data1	8,566	15,63	16,28	0,032	0,00374	0,058389	0,060817	67,8776
Data2	5,186	6,877	16,01	0,032	0,00617	0,042434	0,098789	79,0576
Data3	5,015	5,699	16,79	0,032	0,00638	0,036365	0,107135	85,1939
Data4	5,401	9,557	19,30	0,032	0,00592	0,056624	0,114349	84,2700
Data5	5,904	8,528	15,03	0,032	0,00542	0,046222	0,081463	77,8041
Data6	5,685	3,100	10,46	0,032	0,00563	0,017449	0,058878	93,3811
Data7	5,161	2,591	10,95	0,032	0,00620	0,016065	0,067894	95,1655
Data8	5,752	2,558	9,604	0,032	0,00556	0,014231	0,053430	88,6005
Data9	5,600	2,599	9,892	0,032	0,00571	0,014851	0,056526	92,0632
Data10	5,403	2,497	9,318	0,032	0,00592	0,014789	0,055187	88,1603
Data11	5,030	1,894	9,413	0,032	0,00636	0,012049	0,059884	93,5064
Data12	5,712	2,425	8,322	0,032	0,00560	0,013585	0,046622	93,8318

Tablo 4.1 (Devam) Sistem tanımlama verileri – yandönme eksen

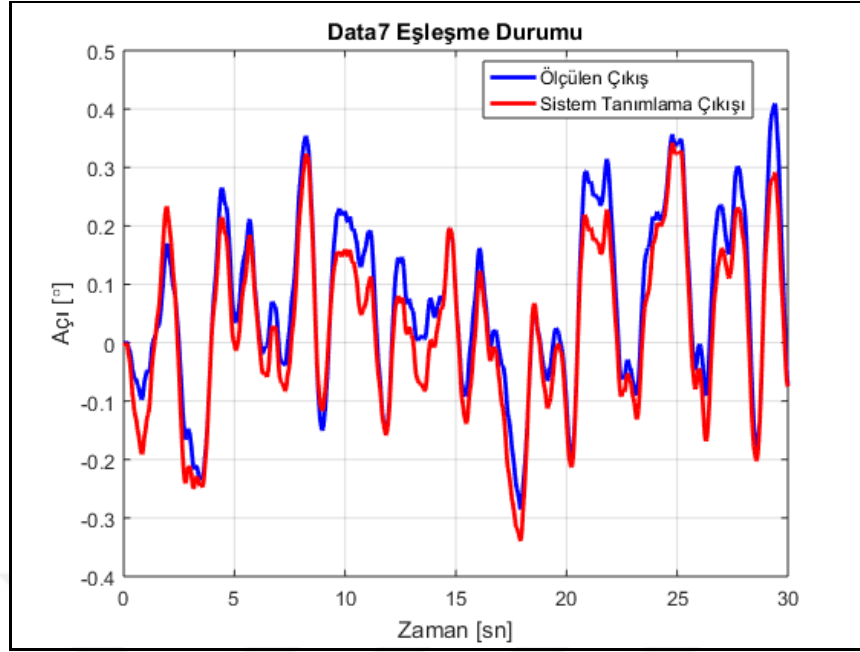
Veri	K	T _{p1}	T _{p2}	K _t	J	B	K	VAF
-	-	-	-	$[\frac{Nm}{A}]$	$[kgm^2]$	$[\frac{kgm^2}{s}]$	$[\frac{kgm^2}{s^2}]$	$[%]$
Data13	5,214	2,126	9,338	0,032	0,00614	0,013048	0,057310	94,5076
Data14	5,062	2,126	9,280	0,032	0,00632	0,013389	0,058665	91,2589
Data15	5,316	2,316	9,487	0,032	0,00602	0,013941	0,057108	94,3988

Tablo 4.1’de elde edilen en yüksek dört eşleşme gerçekleşen modeller birbirleri arasında modellerin tutarlılığı açısından Tablo 4.2’de verildiği şekilde çapraz doğrulama yapılabilir. Bu işlemde modellerin diğer giriş sinyallerinde de tutarlı sonuçlar verip vermediği kontrol edilmektedir.

Tablo 4.2. Yandönme eksen çapraz doğrulama matrisi

Veri	Data7	Data12	Data13	Data15
Data7	95,1655	77,2366	88,7619	90,6181
Data12	85,1981	93,8318	91,7997	91,6134
Data13	89,8112	91,3286	94,5076	94,2632
Data15	91,1047	91,1470	94,1344	94,3988

Tablo 4.2’de verilen çapraz doğrulamalarda eşleşme yüzdelerinde çok değişimler olmadığı için yandönme eksen için yapılan sistem tanımlama işlemi doğru kabul edilebilir. Gerçek sistemden toplanan çıkış sinyali ile sistem tanımlama ile elde edilen modele verilen aynı giriş sinyali için elde edilen çıkış sinyali arasındaki eşleşme Şekil 4.5’te görselleştirilmektedir.



Şekil 4.5. Sistem üzerinden ölçülen çıkış ile sistem tanımlama ile elde edilen modelin çıkışı (yandönme eksen, Data7)

Sistem tanımlama işleminde yunuslama eksenini için elde edilen transfer fonksiyonu katsayıları ve eşleşme yüzdeleri Tablo 4.3'te verilmektedir. Tablo 4.3'te verilen eşleşme yüzdeleri dikkate alındığında yunuslama eksenini için Data19 isimli giriş sinyali ile toplanan veriler ile %88 oranında bir eşleşme elde edildiği görülmektedir. Data19 ile hesaplanan atalet değeri ile Tablo 3.5'te verilen atalet değeri birbirine yakın olduğu için yunuslama eksenini için Data19 ile elde edilen transfer fonksiyonu doğru kabul edilmektedir.

Tablo 4.3. Sistem tanımlama verileri – yunuslama eksenini

Veri	K	T _{p1}	T _{p2}	K _t	J	B	K	VAF
-	-	-	-	$\left[\frac{\text{Nm}}{\text{A}}\right]$	$[\text{kgm}^2]$	$\left[\frac{\text{kgm}^2}{\text{s}}\right]$	$\left[\frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2}\right]$	[%]
Data1	15,51	3,333	5,650	0,165	0,01064	0,035457	0,060106	74,0497
Data2	13,56	2,786	3,942	0,165	0,01217	0,033900	0,047967	62,3373
Data3	14,49	3,553	4,938	0,165	0,01139	0,040459	0,056230	65,6068
Data4	14,74	2,106	6,379	0,165	0,01119	0,023575	0,071407	85,9664
Data5	13,69	3,709	4,373	0,165	0,01205	0,044703	0,052706	67,7515
Data6	19,73	2,635	3,996	0,165	0,00836	0,022036	0,033418	81,3683
Data7	21,36	4,298	3,610	0,165	0,00772	0,033201	0,027886	80,1980

Tablo 4.3. (Devam) Sistem tanımlama verileri – yunuslama ekseni

Veri	K	T _{p1}	T _{p2}	K _t	J	B	K	VAF
-	-	-	-	$[\frac{Nm}{A}]$	$[kgm^2]$	$[\frac{kgm^2}{s}]$	$[\frac{kgm^2}{s^2}]$	$[%]$
Data8	16,88	3,249	3,597	0,165	0,00977	0,031759	0,035160	79,6275
Data9	15,71	4,649	4,862	0,165	0,01050	0,048828	0,051065	63,0389
Data10	20,95	6,068	2,086	0,165	0,00788	0,047791	0,016429	67,8115
Data11	14,17	2,218	5,423	0,165	0,01164	0,025827	0,063147	75,3482
Data12	14,88	2,826	5,103	0,165	0,01109	0,031337	0,056586	57,0418
Data13	15,67	2,397	4,574	0,165	0,01053	0,025240	0,048163	75,2897
Data14	13,69	3,088	4,465	0,165	0,01205	0,037218	0,053815	72,7344
Data15	17,98	2,769	4,699	0,165	0,00918	0,025411	0,043122	82,6565
Data16	12,36	2,280	4,848	0,165	0,01335	0,030437	0,064718	79,4682
Data17	16,33	3,408	5,101	0,165	0,01010	0,034435	0,051541	70,7414
Data18	32,43	7,346	2,380	0,165	0,00509	0,037376	0,012109	75,3027
Data19	12,93	2,084	2,730	0,165	0,01276	0,026594	0,034838	88,6685
Data20	14,49	2,252	4,376	0,165	0,01139	0,025644	0,049830	72,0932
Data21	11,68	1,967	3,399	0,165	0,01413	0,027787	0,048017	84,9124

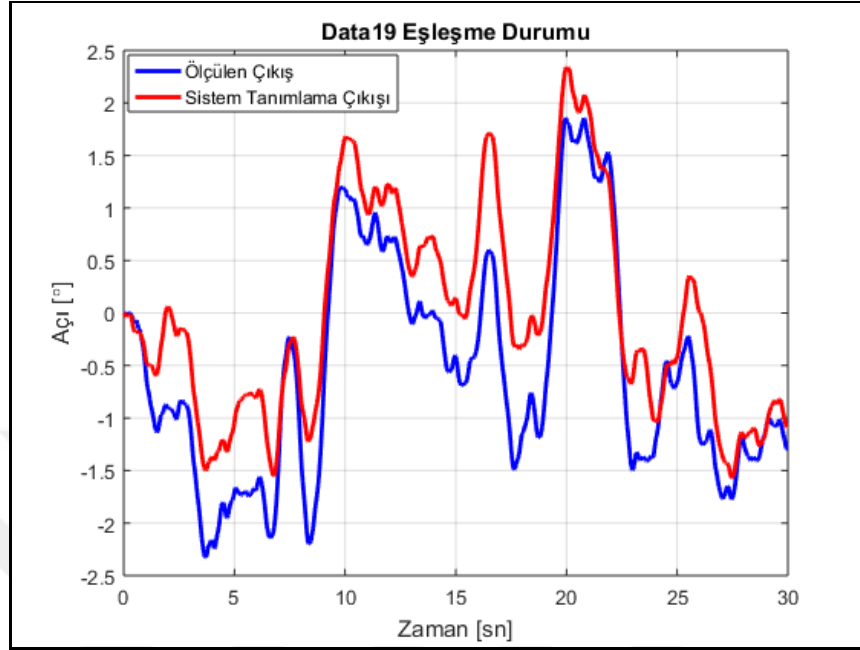
Tablo 4.3'te elde edilen en yüksek dört eşleşme gerçekleşen modeller birbirleri arasında modellerin tutarlılığı açısından Tablo 4.4'te verildiği şekilde çapraz doğrulama yapılabilir. Bu işlemde modellerin diğer giriş sinyallerinde de tutarlı sonuçlar verip vermediği kontrol edilmektedir.

Tablo 4.4. Yunuslama ekseni çapraz doğrulama matrisi

Veri	Data4	Data15	Data19	Data21
Data4	85,9664	65,7827	19,9053	58,4491
Data15	73,2536	82,6565	71,7776	79,1180
Data19	60,2929	82,0792	88,6685	82,4835
Data21	63,5405	81,5992	81,0250	84,9124

Tablo 4.4'te verilen çapraz doğrulamalarda eşleşme yüzdelerinde Data19 için çok değişimler olmadığı için yunuslama ekseni için yapılan sistem tanımlama işlemi doğru kabul edilebilir. Gerçek sistemden toplanan çıkış sinyali ile sistem tanımlama

ile elde edilen modele verilen aynı giriş sinyali için elde edilen çıkış sinyali arasındaki eşleşme Şekil 4.6’da görselleştirilmektedir.



Şekil 4.6. Sistem üzerinden ölçülen çıkış ile sistem tanımlama ile elde edilen modelin çıkışı (yunuslama eksen, Data19)

Sistem tanımlama işlemleri sonucunda yandönme ve yunuslama eksenlerine ait transfer fonksiyonları sırasıyla (4.6) ve (4.7) numaralı denklemlerdeki gibi elde edilmektedir.

$$TF_{ic_{eksen}} = \frac{0.032}{0.00620s^2 + 0.016065s + 0.067894} \quad (4.6)$$

$$TF_{dis_{eksen}} = \frac{0.165}{0.01276s^2 + 0.026594s + 0.034838} \quad (4.7)$$

Yandönme eksen için elde edilen sistemin durum uzayındaki sistem matrisleri sırasıyla (4.8)-(4.11) numaralı denklemler ile verilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} -2.591 & -10.9506 \\ 1.000 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$C = [0 \quad 5.1613] \quad (4.10)$$

$$D = 0 \quad (4.11)$$

Yunuslama eksenini için elde edilen sistemin durum uzayındaki sistem matrisleri sırasıyla (4.12)-(4.15) numaralı denklemler ile verilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} -2.0940 & -2.7431 \\ 1.000 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$C = [0 \quad 12.9921] \quad (4.14)$$

$$D = 0 \quad (4.15)$$

5. KONTROLCÜ TASARIMI

Bu bölümde kontrolcü tasarımı çalışmaları anlatılmaktadır. Kardan sistemine tasarlanacak kontrolcünün dış bozucu etkilere karşı dayanıklı olması gerekmektedir; zira gerek uçuş sırasındaki atmosferik etkiler gerek mühimmatın kendi hareketleri gerekse Stirling soğutucudan gelen bozucu torklar kontrolcü tarafından bastırılmalıdır. Bozucu torkların bastırılması sırasında eyleyiciler normal çalışma durumundan daha çok akım çekeceklerdir ve kontrolcü tasarımında da bu noktalarda eyleyicinin doyuma ulaşmamasına dikkat edilmelidir. Bu tez kapsamında tasarımı yapılan kardan sistemine PID ve gürbüz kontrolcü tasarımları yapılmaktadır. Kontrolcü tasarımları yapılırken referans başarımlar kriterleri olan akım limiti (Current Limit), maksimum aşım (Maximum Overshoot), oturma zamanı (Settling Time), kalıcı durum hatası (Steady State Error) ve bant genişliği (Bandwidth) değerleri Tablo 5.1’de verildiği gibi kabul edilmektedir.

Tablo 5.1. Kontrolcü tasarım kriterleri

Tasarım Parametreleri	Tasarım Değeri
Akım Limiti [A]	10
Maksimum Aşım [%]	≤ 15
Oturma Zamanı [sn]	$\leq 0,3$
Kalıcı Durum Hatası [°]	$\leq 0,1$
Bant genişliği [Hz]	≥ 10

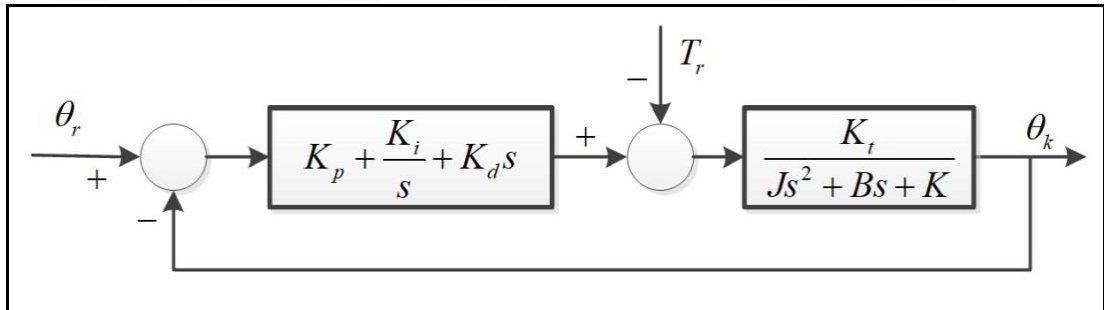
5.1. PID Kontrolcü Tasarımı

Geleneksel kontrol yöntemlerinden biri olan PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrol uygulamalarında sıklıkla tercih edilen metotlardan birisidir. Bu metodun tercih edilme sebebi basit bir yapısının olması ve kullanımının kolay olmasıdır.

PID kontrolcü (5.1) numaralı denklemde verildiği gibi 3 katsayıdan oluşmaktadır. (5.1) numaralı denklemde yer alan K_p PID kontrolcünün oransal katsayısını, K_i PID kontrolcünün integral katsayısını ve K_d ise PID kontrolcünün türevsel katsayısını ifade etmektedir.

$$K(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (5.1)$$

PID kontrolcüsü, hata sinyalini çarpma, integral alma ve türev alma gibi üç temel işlemden geçirerek sıfıra indirmeye çalışmaktadır. Kontrolcü yapısında yer alan integral işlemi sistemde oluşabilecek kalıcı durum hatasını sıfırlamak için kullanılmaktadır; ancak integral alma işlemi salınımlı bir cevaba veya sinyal büyüklüğünün (Amplitude) artırılması veya düşürülmesi yönünde davranış sergileyebilir. İntegral alma işlemi aynı zamanda bozucu etkilere karşı direniş (Disturbance Rejection) göstermek üzere kullanılabilir. Yüksek integral katsayısı aynı zamanda sistemi kararsız hale getirebilmektedir. Bu sebeple integral işlemi kontrollü bir şekilde kullanılmalıdır. Kontrolcü yapısındaki türev işlemi ise sistemde gerçekleşecek aşımaları azaltmak için kullanılmaktadır [24].



Şekil 5.1. Temel PID kontrol blok yapısı

PID kontrolcü kullanılarak konum kontrolü yapılan temel kontrol blok şeması Şekil 5.1’de verilmektedir. PID kontrolcü yardımı ile kapalı çevrim köklerinin istenen davranışı verecek yerlere yerleştirilmesi gerekmektedir. Köklerin bu yerleri PID yapısındaki kontrolcü katsayıları ile ayarlanmaktadır.

Şekil 5.1’de verilen temel blok şeması kullanılarak konum kontrolü için kapalı çevrim transfer fonksiyonu küçük matematiksel işlemler ile (5.2) numaralı denklemdeki gibi elde edilmektedir.

$$G(s) = \frac{\theta_r(s)}{\theta_k(s)} = \frac{\left[\frac{K_d}{K_i}\right] s^2 + \left[\frac{K_p}{K_i}\right] s + 1}{\left[\frac{J}{K_i K_t}\right] s^3 + \left[\frac{B + K_d K_t}{K_i K_t}\right] s^2 + \left[\frac{K + K_p K_t}{K_i K_t}\right] s + 1} \quad (5.2)$$

Kapalı çevrim transfer fonksiyonunun köklerini yerleştirmek için kullanılan yöntemlerden birisi Butterworth ve Chebyshev polinomlarını kullanmaktır [25]. (5.2) numaralı denklemin karakteristik denklemi üçüncü dereceden olduğu için bu sistemin köklerini yerleştirmek üzere (5.3) numaralı denklemdeki gibi üçüncü dereceden bir Butterworth polinomu kullanılmaktadır. [26]

$$B_3(s) = \frac{s^3}{\omega_c^3} + \frac{2s^2}{\omega_c^2} + \frac{2s}{\omega_c} + 1 \quad (5.3)$$

(5.3) numaralı denklemde yer alan ω_c , (5.4) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilir.

$$\omega_c = 2\pi f_c \quad (5.4)$$

(5.4) numaralı denklemde yer alan f_c köşe frekansını ifade etmektedir. Bu frekans arzu edilen kapalı çevrim sistemin bant genişliğine (Band-width) göre seçilmektedir. (5.3) numaralı denklemde verilen ifadeye göre sistemin sönüm oranı ise 0,707 kabul edilmektedir.

(5.2) numaralı denklemin karakteristik denklemi (5.3) numaralı denklemdeki üçüncü dereceden Butterworth fonksiyonuna eşitlenirse PID kontrolcünün K_p , K_i ve K_d katsayıları sırasıyla (5.5), (5.6) ve (5.7) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$K_p = \frac{2K_i K_t - K\omega_c}{K_t \omega_c} \quad (5.5)$$

$$K_i = \frac{J\omega_c^3}{K_t} \quad (5.6)$$

$$K_d = \frac{2K_i K_t - B\omega_c^2}{K_t \omega_c^2} \quad (5.7)$$

PID kontrolcünün gerçek zamanda çalıştırılabilmesi için kontrolcünün ayrık zamanda (Discrete Time) ifade edilmesi gerekmektedir; zira gerçek zamanlı bütün sistemler

ayrık zamanlı olarak çalışmaktadır. PID kontrolcü ayrık zamanda (5.8) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilir [18].

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5.8)$$

(5.8) numaralı denklemde yer alan $e(t)$ hata sinyalini (PID kontrolcünün girişi), $u(t)$ ise kontrol sinyalini (PID kontrolcünün çıkışı) ifade etmektedir.

$$u(kT_s) = K \left\{ e(kT_s) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T_s) + e(hT_s)}{2} + \frac{T_d}{T_s} [e(kT_s) - e((k-1)T_s)] \right\} \quad (5.9)$$

(5.9) numaralı denklemde yer alan toplam ifadesi (5.10) numaralı denklemdeki gibi yazılabilmektedir.

$$\sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T_s) + e(hT_s)}{2} = \sum_{h=1}^k f(hT_s) \quad , f(0)=0 \quad (5.10)$$

(5.10) numaralı denklemin z dönüşü yapılırsa (5.11) numaralı denklem elde edilebilir.

$$Z \left[\sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T_s) + e(hT_s)}{2} \right] = Z \left[\sum_{h=1}^k f(hT_s) \right] = \frac{1}{1-z^{-1}} [F(z) - f(0)] = \frac{1}{1-z^{-1}} F(z) \quad (5.11)$$

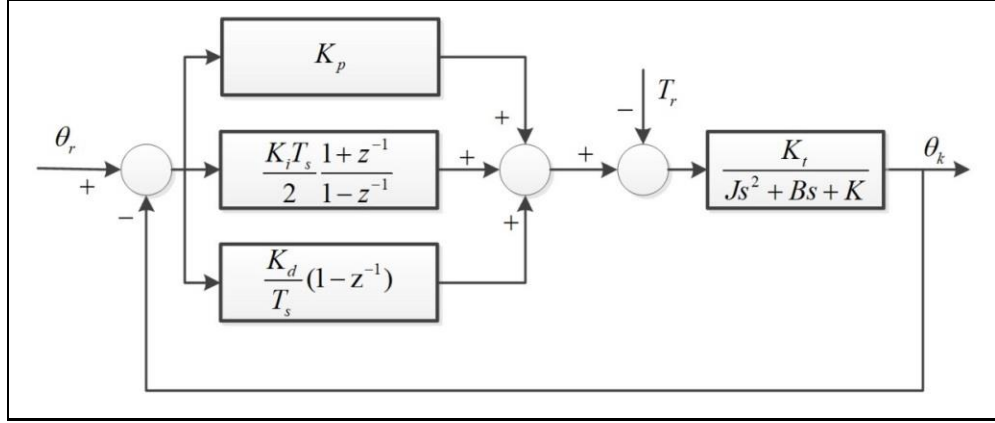
(5.11) numaralı denklemde yer alan $F(z)$ dönüşümü (5.12) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$F(z) = Z[f(hT_s)] = \frac{1+z^{-1}}{2} E(z) \quad (5.12)$$

Bu durumda (5.9) numaralı denklemde verilen ifadenin z dönüşümü (5.13) numaralı denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$U(z) = K \left[1 + \frac{T_s}{2T_i} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} + \frac{T_d}{T_s} (1-z^{-1}) \right] E(z) \quad (5.13)$$

(5.13) numaralı denklemdeki ifadeleri kullanılarak ayrık zamanlı PID kontrol yapısı Şekil 5.2'deki gibi modellenenmektedir.



Şekil 5.2. Ayırık zamanlı temel PID kontrol blok yapısı

Uygulamalarda PID kontrolcünün küçük değişikliklere de tepki vermesi durumu gerçekleşebilir. PID kontrolcüsünün türev alma işlemi (5.1) numaralı denklemdeki gibi mükemmel bir türev alma işlemi ile uygulamada gerçekleştirilemez. Bunun sebebi mükemmel bir türev alma işleminde basamak emri gibi bir sinyal geldiğinde bu sinyalin bir noktada türevi teorik olarak sonsuz olmaktadır. Bu matematiksel duruma engel olmak için (5.14) numaralı denklemdeki gibi türev alma işlemine alçak geçiren bir filtre eklenmelidir. Eklenen bu filtre aynı zamanda sensör gürültülerinin yükseltilmesini engellemektedir.

$$K_f(s) = \text{PID}_f = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{T_f s + 1} \quad (5.14)$$

Gerçek zamanlı kontrolcü çalışmaları yapılmadan önce 4.3 numaralı bölümde elde edilen sistem transfer fonksiyonları kullanılarak bilgisayar ile kontrolcü benzetimleri yapılmalıdır. Benzetimler gerçek zamanlı vukuu bulabilecek sorunları görerek gerekli önlemleri almak adına önemli bir tasarım adımıdır.

PID kontrolcünün katsayıları (5.5), (5.6) ve (5.7) numaralı denklemler kullanılarak Tablo 5.2’de verildiği şekilde hesaplanabilmektedir. Elde edilen değerler Tablo 5.2’de verilen doğal frekans ve sönüm oranları içindir. Yandönme eksenini için doğal frekans 4 [Hz] olarak belirlenmektedir. Kontrolcü tasarımı yapılırken 15 [Hz] bant genişliği hedeflense de yandönme eksenini 0,707 sönüm oranında 4 [Hz] değerinden sonra kararsız olmaktadır. Bu sebeple yandönme eksenindeki tasarım bozcucu etkiler de gözönüne alınarak 4 [Hz] değerine göre yapılmaktadır.

Tablo 5.2. PID kontrolcü parametreleri

	Yandönme Ekseni	Yunuslama Ekseni
K_p	242,6445	152,4387
K_i	3,0758e+03	2,3978e+03
K_d	9,2369	4,6978
N	250	250
f_n	4	15
ζ	0,707	0,707

PID kontrolcünün katsayıları önceki bölümde anlatıldığı gibi Butterworth polinomu ile elde edilebileceği gibi MATLAB® yazılımının “pidtool” komutu da kullanılabilir.

5.2. Gürbüz Kontrolcü Tasarımı

PID gibi geleneksel kontrolcüler birçok kontrol uygulamasında sıklıkla kullanılmasına rağmen bazı durumlarda kontrolcü başarımları yeterli olmamaktadır. Bunun sebebi sistemde bulunan model belirsizlikleri, bilinmeyen dinamikler veya bozucu etkilere dir. Bu etkiler altında da kontrol sisteminin istenen başarımlar özelliklerini sağlayarak çalışması için gürbüz kontrol yöntemleri tercih edilmektedir.

Gürbüz kontrol yöntemlerinde norm ifadeleri ve tanımları önemli bir yere sahiptir; zira kontrol kuralları sinyallerin normları üzerinden tanımlanmaktadır. Norm ifadeleri bir vektör uzayından başka bir vektör uzayına eşleştirme veya haritalama işlemi olarak görülebilmektedir [27]. En yaygın norm kullanımına örnek olarak 2-normunun özel durumu verilebilir; bir vektörün 2-normu o vektörün uzunluğu olarak ifade edilebilmektedir.

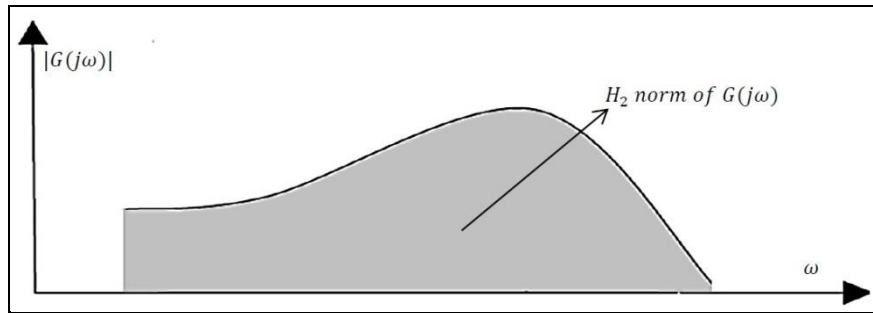
Sinyallerin normları hesaplanırken transfer fonksiyonlarının da normları hesaplanabilmektedir. Tablo 5.3'te sinyallerin ve transfer fonksiyonlarının normları verilmektedir.

Tablo 5.3. Sinyaller ve sistemler için normların tanımı [28]

	u(t) Sinyalinin Zaman Uzaklındaki Normu	G_{zw}(s) Sisteminin Kompleks Frekans Uzaklındaki Normu
1-Normu	$\ u\ _1 = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) .dt$	-
2-Normu	$\ u\ _2 = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} u(t)^2 .dt \right)^{1/2}$	$\ G\ _2 = \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G(j\omega) ^2 .d\omega \right)^{1/2}$
∞ -Normu	$\ u\ _{\infty} = \sup_t u(t) $	$\ G\ _{\infty} = \sup_t G(j\omega) $

Transfer fonksiyonunun normundan bahsedilirken aslında transfer fonksiyonunun sinyallerdeki işlevini daha iyi anlamak gerekir. Bir transfer fonksiyonu bir giriş sinyalini ya faz (Phase) olarak ya da genlik (Amplitude) olarak değiştirmektedir. Bu sebeple bir transfer fonksiyonunun ∞ -normu aslında o transfer fonksiyonunun giriş sinyalinin genliğini ne kadar artıracakğı veya azaltacağını belirlemektedir. Bu genlik değişimini belirli sınırlar altında tutarak sistemin kararlı bir şekilde çalışması sağlanabilmektedir.

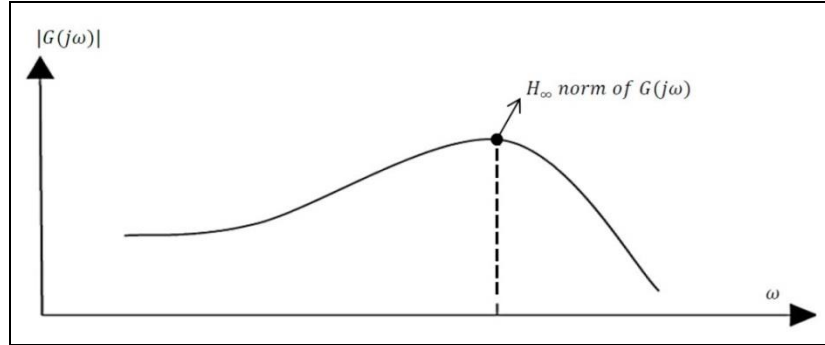
Şekil 5.3'te bir sistemin 2-normunun ne anlama geldiği anlatılmaktadır. Bir sistemin 2-normu Şekil 5.3'te verilen grafiğın altında kalan alanı ifade etmektedir. Bu ifade de enerjiyi ifade etmektedir. Özet olarak 2-normu ile tasarlanan kontrolcüler ile aslında sistemin enerjisi belirli limitler altında sınırlandırılmaktadır.



Şekil 5.3. Bir sistemin 2-normunun Bode grafiğı (genlik) [21]

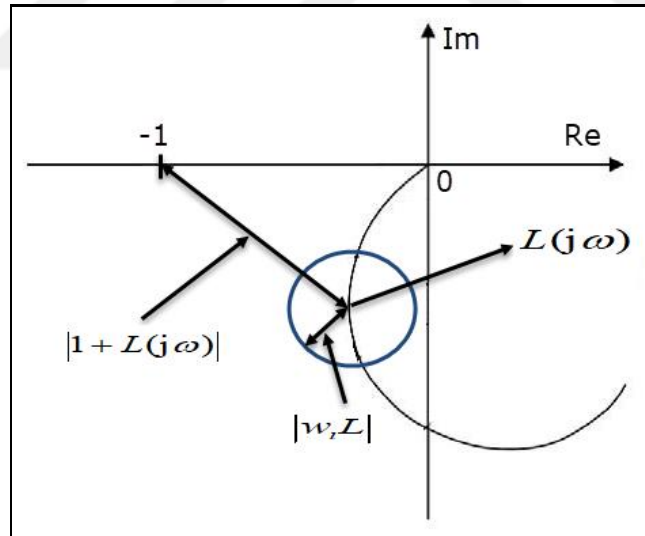
Şekil 5.4'te bir sistemin ∞ -normunun ne anlama geldiği anlatılmaktadır. Bir sistemin ∞ -normu Şekil 5.4'te verilen grafiğın maksimum genliğini ifade etmektedir. Bu ifade de bir giriş sinyalinin bu transfer fonksiyonu üzerinden en fazla hangi değere kadar çıkarak çıkış oluşturacağını ifade etmektedir. Özet olarak ∞ -normu ile tasarlanan

kontrolcüler ile aslında sistemin maksimum çıkış değeri belirli limitler altında sınırlandırılmaktadır.



Şekil 5.4. Bir sistemin ∞ -normunun Bode grafiği (genlik) [21]

Gülbüz kontrol sistemlerinde belirsizlikler ve performans değerleri ağırlık fonksiyonları (Weighting Functions) ile modellenmektedir. Bu ağırlık fonksiyonlarının tanımlamaları ve gerçek anlamları Şekil 5.5'teki gibi Nyquist grafiklerinden anlatılabilmektedir.

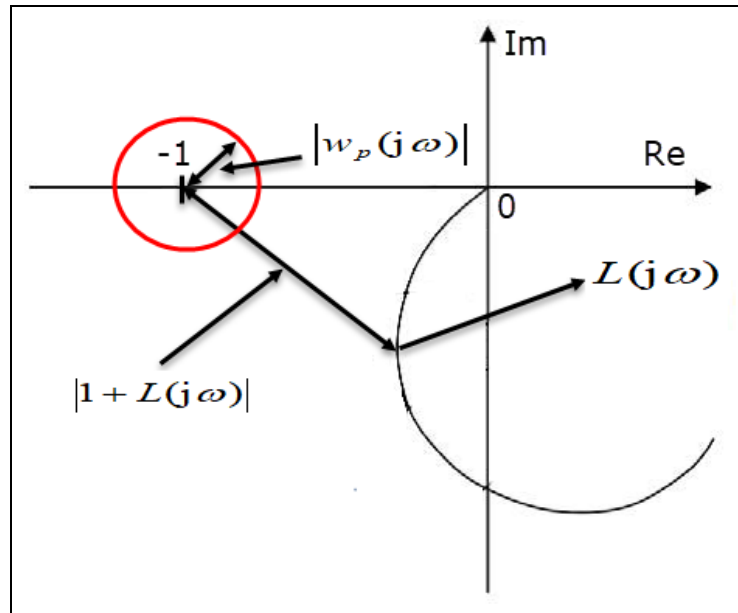


Şekil 5.5. Gülbüz kararlılık (RS) için çevrim kazancının Nyquist çizimi

Kontrol sistemlerinde çevrim kazancı L 'nin Nyquist grafiğinde -1 noktasını kapsaması durumunda sistemin kararsız olduğu kabul edilmektedir. Şekil 5.5'te verilen w_1 belirsizlikleri tanımlayan ağırlık fonksiyonu ifade etmektedir. Belirsizlikleri tanımlayan w_1 ağırlık fonksiyonunun daire şeklinde olmasının sebebi belirsizliklerin frekans uzayında bütün frekanslarda aynı genlikte olacak şekilde

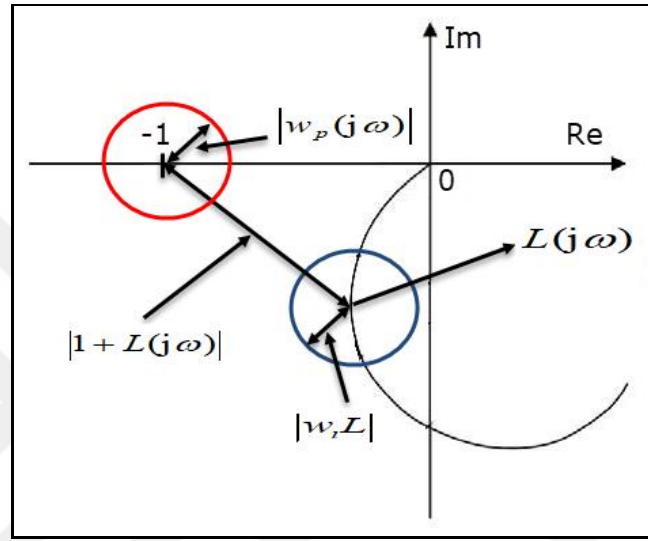
tanımlanmasıdır. Ağırlık fonksiyonları Şekil 5.5'teki gösterimin aksine daha özel olarak belirli bir frekans aralığında tanımlanabilmektedir. Bu durumda ağırlık fonksiyonu Nyquist grafiğinde yay veya eğri şekli şeklinde olduğu görülecektir. Bunun yanısıra doğrudan belirli bir frekansta ağırlık fonksiyonunun tanımlanması durumunda ise ağırlık fonksiyonu Nyquist grafiğinde sadece bir vektör şeklinde çizilecektir. Şekil 5.5'teki ağırlık fonksiyonu her frekansta aynı genlikte olmaması durumunda çizim daire şeklinde değil eğri şeklinde olacaktır. Belirsizlikler gürbüz kontrol tasarımında çevrim kazancı ile Nyquist grafiğinde -1 noktasını kesmeyecek şekilde farklı büyüklük ve formlarda tanımlanabilir. Şekil 5.5'te anlatılan durum gürbüz kararlılık (Robust Stability, RS) olarak tanımlanmaktadır. Bunun anlamı sistem tanımlanan belirsizliklere rağmen kararlı yani bu belirsizliklere karşı gürbüz demektir.

Şekil 5.6'da verilen çizimde ise çevrim kazancı L 'nin yanında w_p ağırlık fonksiyonu görülmektedir. w_p ağırlık fonksiyonu ise sistemin performansını belirleyen ağırlık fonksiyonu olarak tanımlanabilmektedir. $|w_p(j\omega)|$ büyüklüğü ne kadar büyükse sistem kararsızlık noktasından o kadar uzak ve iyi performans gösterebileceği anlamına gelmektedir. Şekil 5.6'da verilen durum nominal performans (Nominal Performace, NP) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 5.6. Nominal performans (NP) için çevrim kazancının Nyquist çizimi

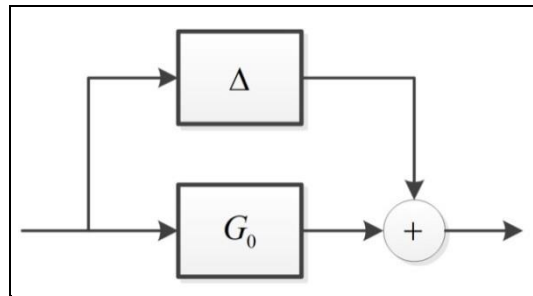
Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da tanımlanan gürbüz kararlılık ve nominal performans durumlarının her ikisinin de aynı anda olması istenirse Şekil 5.7’deki Nyquist çizimi verilen gürbüz performans (Robust Performance, RP) ortaya çıkmaktadır. Bu durum tanımlanan belirsizlikler ve istenen performans sınırlarının sağlandığı en genel durumlardan birisidir.



Şekil 5.7. Gürbüz performans (RP) için çevrim kazancının Nyquist çizimi

Belirsizlik modellemek üzere literatürde temel iki model bulunmaktadır. Bunlar çarpımsal belirsizlik (Multiplicative Uncertainty) ve toplamsal belirsizlik (Additive Uncertainty) olarak tanımlanmaktadır.

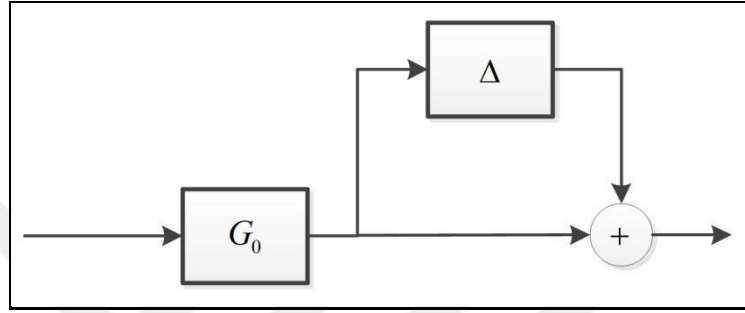
Toplamsal belirsizlik blok diyagramlarında Şekil 5.8’deki gibi modellenmektedir. Toplamsal belirsizlik aynı zamanda matematiksel olarak (5.15) numaralı denklemden gibi ifade edilebilmektedir.



Şekil 5.8. Toplamsal belirsizlik

$$G_p(s) = G_0(s) + \Delta(s) \quad (5.15)$$

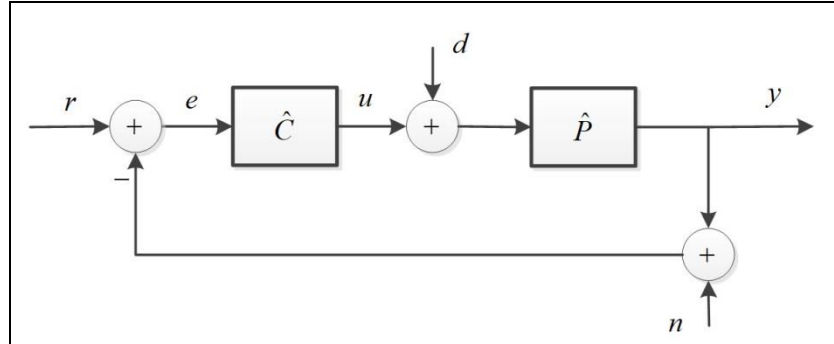
Çarpımsal belirsizlik blok diyagramlarında Şekil 5.9'deki gibi modellenmektedir. Çarpımsal belirsizlik aynı zamanda matematiksel olarak (5.16) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir. Şekil 5.9'deki blok diyagramına belirsizlik sistem çıkışında tanımlanmıştır; ancak bu belirsizlik sistem girişinde de tanımlanabilir.



Şekil 5.9. Çarpımsal belirsizlik

$$G_p(s) = [I + \Delta(s)]G_0(s) \quad (5.16)$$

Kontrol sistemi tasarımından önce Şekil 5.10'da verilen birim geribeslemeli kontrol yapısının üzerinden bazı tanımlamalar yapmak gerekir.



Şekil 5.10. Birim geri beslemeli kontrol yapısı

Şekil 5.10'da verilen birim geri beslemeli kontrol bloğu için çevrim kazancı (5.7) numaralı denklemdeki gibi elde edilebilir. Sistemin çevrim kazancının Nyquist çizimi bize sistem hakkında birçok bilgi vermektedir. Belirsizliklerin sisteme etkileri ve performans değerlendirilmesi hususunda temelde çevrim kazancı kullanılmaktadır.

$$\hat{L} = \hat{P}\hat{C} \quad (5.17)$$

(5.18) numaralı denklemde verilen $\hat{S}$ ifadesi duyarlılık fonksiyonu (Sensitivity Function) olarak tanımlanmaktadır. Duyarlılık fonksiyonu bozucu giriş ile sistem çıkışı arasındaki transfer fonksiyonu ($\hat{S}=Y(s)/D(s)$) olarak veya referans giriş ile hata arasındaki transfer fonksiyonu ($\hat{S}=E(s)/R(s)$) olarak tanımlanabilmektedir. Dolayısı ile duyarlılık fonksiyonu referans girişe karşı hata oluşumunu ve bozucu girişlere karşı sistem davranışını tanımlayan önemli bir kavramdır [29].

$$\hat{S} = \frac{1}{1+\hat{L}} \quad (5.18)$$

(5.19) numaralı denklemde verilen $\hat{T}$ ifadesi tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonu (Complementary Sensitivity Function) olarak tanımlanmaktadır. Tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonu referans giriş ile sistem çıkışı arasındaki transfer fonksiyonu ($\hat{T}=Y(s)/R(s)$) olarak veya sensör gürültüsü ile çıkış arasındaki transfer fonksiyonu ($\hat{T}=Y(s)/N(s)$) olarak tanımlanabilmektedir. Dolayısı ile tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonu referans girişi takip etme ve sensör gürültülerinden sistem çıkışının nasıl etkilendiğini tanımlayan önemli bir kavramdır. [29]

$$\hat{T} = \frac{\hat{L}}{1+\hat{L}} \quad (5.19)$$

Tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonu ile duyarlılık fonksiyonunun toplamaları (5.20) numaralı denklemdeki gibi bire eşittir.

$$\hat{T} + \hat{S} = 1 \quad (5.20)$$

(5.20) numaralı denkleme göre hem referans giriş takibini hem de bozucu girişlere karşı dayanımı çok iyi şekilde yapmak pek mümkün değildir. Bu aşamada bir getir-götür (trade-off) ilişkisi mevcuttur. Dolayısıyla gürbüz kontrol tasarımını yaparken duyarlılık ve tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonlarının şekli önemlidir.

İyi bir referans takibi için hata sinyalinin sıfır olması gerekir bunun anlamı da duyarlılık fonksiyonunun sıfır veya sıfıra yakın olması demektir. Bu durumda tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonu bir veya bire yakın olurken çevrim kazancı yüksek olacaktır [29].

Bozucu girişlere karşı dayanım hususunda da duyarlılık fonksiyonu sıfır veya sıfıra yakın olmalıdır. Bu durumda da çevrim kazancı aynı şekilde yüksek olacaktır [29].

Sensör gürültülerinden daha az etkilenen bir sistem tasarlanmak istenirse tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonu sıfır veya sıfıra yakın olmalıdır. Bu durumda ise çevrim kazancı düşük olacaktır [29].

Duyarlılık fonksiyonu ve tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonlarının toplamı bire eşit olduğu için bir sinyal düşük veya sıfıra yakın ise diğer sinyal yüksek veya bire yakın olacaktır. O halde bu sinyallerin hangi frekans bölgelerinde düşük veya yüksek olması gerektiği belirlenmelidir.

Uygulamalarda sistemin çalışma frekansı genelde düşük frekans bölgesinde, sensör gürültüleri ise yüksek frekanslarda gerçekleşmektedir. Bu sebeple duyarlılık fonksiyonu düşük frekanslarda düşük olup yüksek frekanslarda ise tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonunun düşük olması arzu edilmektedir. Buna karşın çevrim kazancının bu bakış açısı ile integral cevabı gibi düşük frekanslardan yüksek frekanslara doğru azalan bir eğri şeklinde olmalıdır.

5.2.1. H_∞ kontrolcü tasarımı

Tez kapsamında H_∞ kontrolcü tasarımı yapılmaktadır. Kontrolcü tasarım yapısı Şekil 5.12’de verildiği şekilde oluşturulmaktadır. Bu kontrol yapısında yer alan sistem modeli 4 numaralı bölümde elde edilen sistem modeli kullanılarak oluşturulmaktadır. Şekil 5.11’de verilen kontrol yapısında Tablo 5.4’te tanımlanan sinyal ve belirsizlikler kullanılmaktadır.

Tablo 5.4. H_∞ kontrolcü tasarımında kullanılan ağırlık fonksiyonları

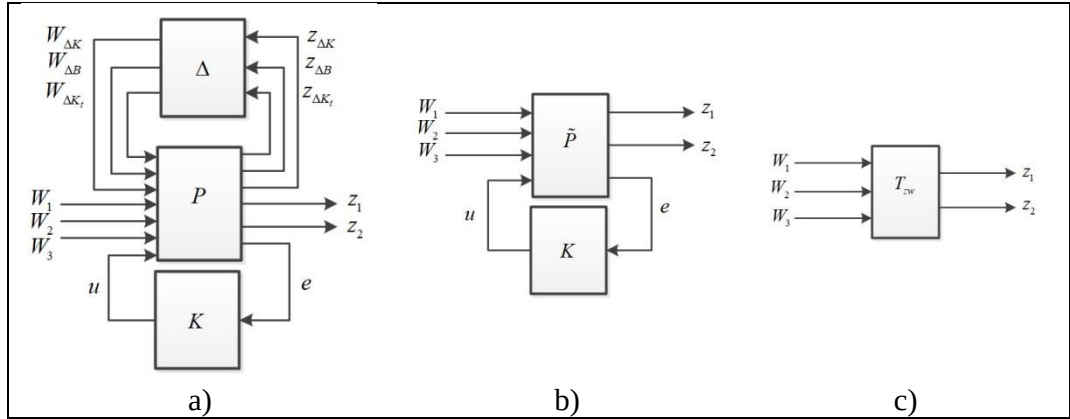
Ağırlık	Açıklama
Fonksiyonu	
W_r	Referans girişi tanımlayan ağırlık fonksiyonu
W_e	Hata sinyalini tanımlayan ağırlık fonksiyonu (ceza fonksiyonu)
W_u	Kontrol sinyalini tanımlayan ağırlık fonksiyonu (Eyleyici doyumunu tanımlamaktadır)

Tablo 5.4. (Devam) H_∞ kontrolcü tasarımında kullanılan ağırlık fonksiyonları

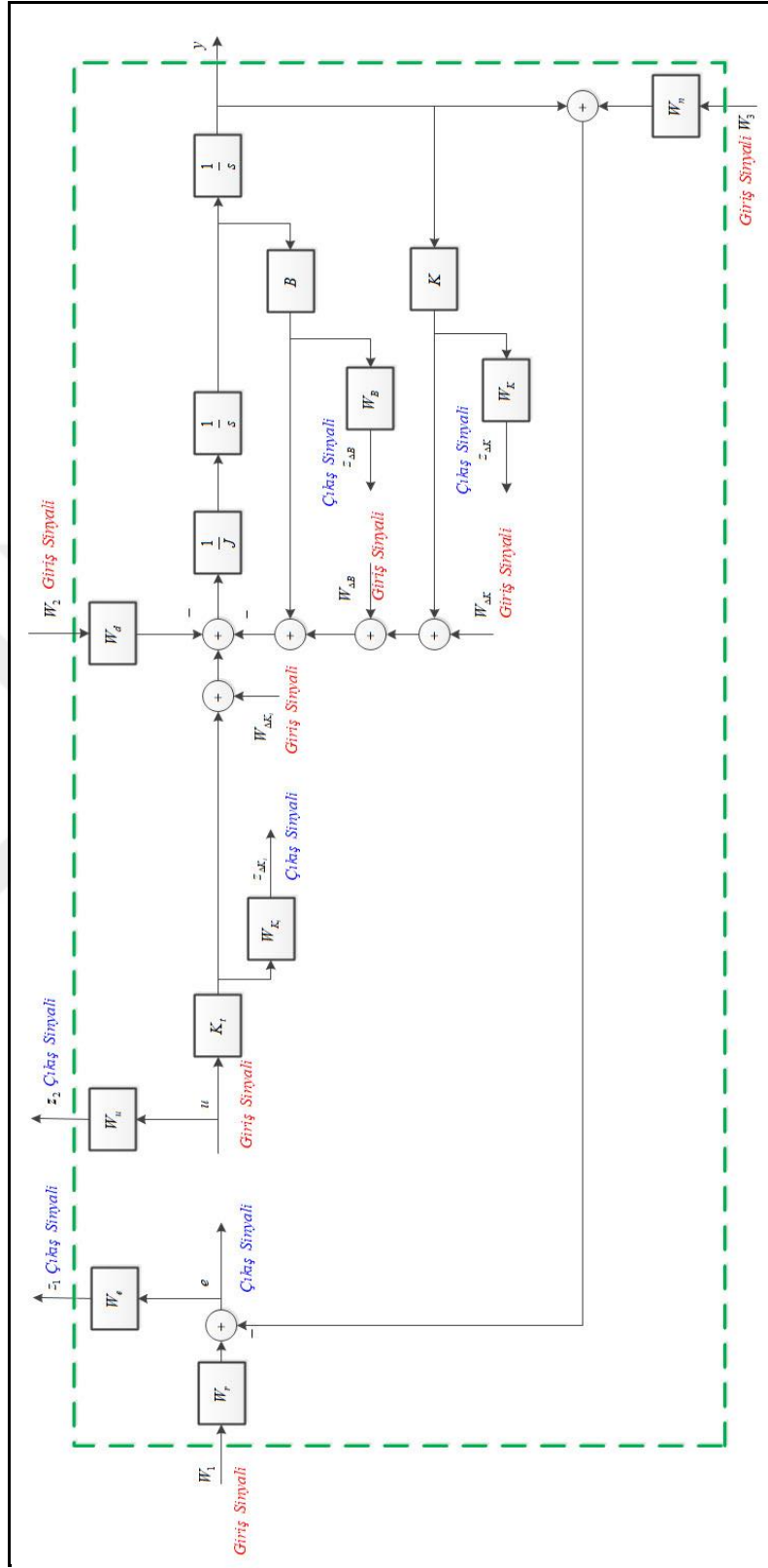
Ağırlık Fonksiyonu	Açıklama
W_d	Bozucu giriş sinyalini tanımlayan ağırlık fonksiyonu
W_n	Sensör gürültüsünü tanımlayan ağırlık fonksiyonu
W_{K_t}	Motor tork sabitinin belirsizliğini tanımlayan ağırlık fonksiyonu
W_B	Sönüm katsayısının belirsizliğini tanımlayan ağırlık fonksiyonu
W_K	Yay sabitinin belirsizliğini tanımlayan ağırlık fonksiyonu

Şekil 5.11'de kontrolcü transfer fonksiyonu kırmızı ile belirsizliklerin yönlerini tanımlayan transfer fonksiyonları ise mavi çizgiler ile taranmaktadır. Kontrolcü tasarımı yapılırken bu bloklar blok şemasından çıkarılarak Şekil 5.12'deki gibi bütün giriş çıkış sinyalleri sınıflandırılmaktadır.

Şekil 5.12'de verilen kontrol blok şeması Şekil 5.11-a'daki gibi daha kompakt bir şekilde modellenebilmektedir.



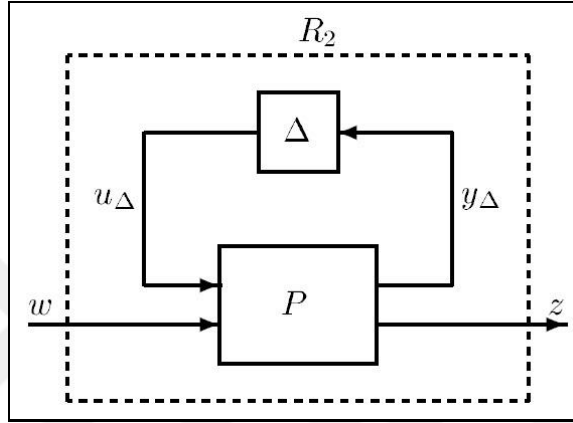
Şekil 5.11. H_∞ kontrolcü tasarım aşamaları



Şekil 5.13. H_∞ kontrolcü yapısı (giriş-çıkış sinyallerinin sınıflandırılması)

Gülbüz kontrol tasarımının bu aşamasında doğrusal kesirsel dönüşüm (DKD, Linear Fractional Transform, LFT) işlemleri önemlidir. DKD, çok-girişli-çok-çıkışlı (Multi-Input-Multi-Output, MIMO) sistemlerde bir bloğun diğer blok yapısına matematiksel olarak nasıl dâhil edildiğini anlatmaktadır. DKD işlemi alt DKD (lower LFT) ve üst DKD (upper LFT) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

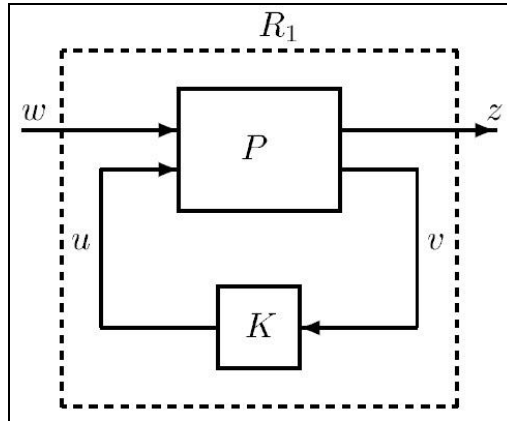
$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$



Şekil 5.14. Üst doğrusal kesirsel dönüşüm

Üst DKD işlemi için Şekil 5.14'teki blok şeması (5.21) numaralı denklem ile ele alınmalıdır. Şekil 5.14'teki Δ bloğu P sistemine üst DKD işlemi ile (5.22) numaralı denklemdeki gibi dâhil edilebilir.

$$F_u(P, K) \triangleq P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \quad (5.22)$$



Şekil 5.15. Alt doğrusal kesirsel dönüşüm

Alt DKD işlemi için Şekil 5.15'daki blok şeması (5.21) numaralı denklem ile ele alınmalıdır. Şekil 5.15'daki K bloğu P sistemine alt DKD işlemi ile (5.23) numaralı denklemdeki gibi dâhil edilebilir.

$$F_1(P, \Delta) \triangleq P_{22} + P_{21} \Delta (I - P_{11} \Delta)^{-1} P_{12} \quad (5.23)$$

Gürbüz kontrolcü tasarımının bu adımında da Şekil 5.11-a'da verilen P nominal sistem matrisinin Şekil 5.12 kullanılarak elde edilmesi gerekmektedir.

$$\begin{bmatrix} z_{\Delta K_t} \\ z_{\Delta B} \\ z_{\Delta K} \\ z_1 \\ z_2 \\ e \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{P}_{11} & \bar{P}_{12} & \bar{P}_{13} & \bar{P}_{14} & \bar{P}_{15} & \bar{P}_{16} & \bar{P}_{17} \\ \bar{P}_{21} & \bar{P}_{22} & \bar{P}_{23} & \bar{P}_{24} & \bar{P}_{25} & \bar{P}_{26} & \bar{P}_{27} \\ \bar{P}_{31} & \bar{P}_{32} & \bar{P}_{33} & \bar{P}_{34} & \bar{P}_{35} & \bar{P}_{36} & \bar{P}_{37} \\ \bar{P}_{41} & \bar{P}_{42} & \bar{P}_{43} & \bar{P}_{44} & \bar{P}_{45} & \bar{P}_{46} & \bar{P}_{47} \\ \bar{P}_{51} & \bar{P}_{52} & \bar{P}_{53} & \bar{P}_{54} & \bar{P}_{55} & \bar{P}_{56} & \bar{P}_{57} \\ \bar{P}_{61} & \bar{P}_{62} & \bar{P}_{63} & \bar{P}_{64} & \bar{P}_{65} & \bar{P}_{66} & \bar{P}_{67} \end{bmatrix}}_P \begin{bmatrix} W_{\Delta K_t} \\ W_{\Delta B} \\ W_{\Delta K} \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ u \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

Nominal sistem matrisi elemanları Şekil 5.13'de verilen ilgili girişlerden çıkışlara olan çevrim kazançlarıdır. Nominal sistem matrisi elde edildikten sonra Şekil 5.11-a'daki yapı oluşturulabilir. Üst DKD işlemi ile Şekil 5.11-a'da yer alan yapı Δ bloğu P nominal sistemine dahil edilir. Üst DKD işlemi için (5.22) numaralı yapı (5.24) numaralı denklemdeki nominal sisteme dâhil edilecek olan belirsizlik giriş ve çıkışlarını ($W_{\Delta K_t}$, $W_{\Delta B}$, $W_{\Delta K}$, $z_{\Delta K_t}$, $z_{\Delta B}$, $z_{\Delta K}$) yokedecek şekilde üçüncü satır ve üçüncü sütundan ayrılarak elde edilebilir. Bu üst DKD işlemi sonrasında (5.25) numaralı denklem formunda elde edilen $\tilde{P}$ matrisi genelleştirilmiş sistem matrisi olarak ifade edilir ve nominal sisteme belirsizliklerin dahil edildiği bir sistem matrisidir. Alt DKD işlemi ile Şekil 5.11-b'da yer alan yapı, K bloğu $\tilde{P}$ genelleştirilmiş sistem matrisine dâhil edilir. Alt DKD işlemi için (5.23) numaralı yapı (5.25) numaralı denklemdeki genelleştirilmiş sisteme dâhil edilecek olan hata ve kontrol sinyallerini (e ve u) yokedecek şekilde ikinci satır ve üçüncü sütundan ayrılarak elde edilebilir. Elde edilen T_{zw} giriş çıkış sinyalleri arasındaki bütün ilişkileri tanımlayan bir matris olarak (5.26) numaralı matris formundadır.

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ e \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{P}_{11} & \tilde{P}_{12} & \tilde{P}_{13} & \tilde{P}_{14} \\ \tilde{P}_{21} & \tilde{P}_{22} & \tilde{P}_{23} & \tilde{P}_{24} \\ \tilde{P}_{31} & \tilde{P}_{32} & \tilde{P}_{33} & \tilde{P}_{34} \end{bmatrix}}_{\tilde{P}} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ u \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \end{bmatrix}}_{T_{zw}} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Gürbüz kontrol probleminin tanımı bu noktada (5.27) numaralı denklemde gösterildiği gibi T_{zw} matrisinin ∞ -normunu 1 değerinin altında tutacak K kontrolcüsünü bulmak olarak ifade edilebilir.

$$\|T_{zw}\|_{\infty} \leq 1 \quad (5.27)$$

Gürbüz kontrolcü tasarımı (5.27) numaralı denklemin çözümü çözücü Riccati denklemleri kullanılarak, LMI (Linear Matrix Inequality) çözümü kullanılarak veya maksimum entropi çözümü kullanılarak yapılabilmektedir.

(5.27) numaralı denklemin çözüm noktasında MATLAB[®] yazılımın “hinfyn” [30] komutu kullanılabilir. (5.27) numaralı denklemde T_{zw} olarak belirtilen matris “hinfyn” komutunda P matrisi olarak (5.28) numaralı denklemdeki formda durum uzayında bir sistem matrisi olarak tanımlanmaktadır.

$$P = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

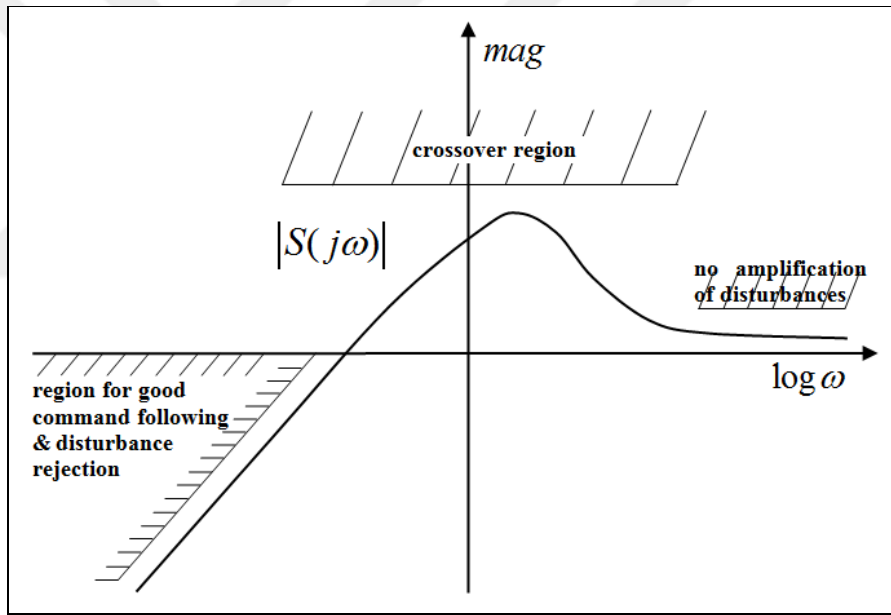
(5.27) numaralı denklemin çözümü için (5.28) numaralı denklemdeki P matrisi aşağıdaki özellikleri taşımalıdır [21]:

- i. (A, B_2) kararlılaştırılabilir (stabilizable) ve (C_2, A) tespit edilebilir (detectable) olmalıdır.
- ii. $D_{12}^T D_{12}$ ve $D_{21}^T D_{21}$ matrisleri tam ranka (full rank) sahip olmalıdır.
- iii. $\begin{bmatrix} A - j\omega I & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{bmatrix}$ matrisi tam ranka sahip olmalıdır. ($\forall \omega \in \mathbb{R}$)
- iv. $\begin{bmatrix} A - j\omega I & B_1 \\ C_2 & D_{21} \end{bmatrix}$ matrisi tam ranka sahip olmalıdır. ($\forall \omega \in \mathbb{R}$)

(5.27) numaralı denklemin çözümü yapılırken tekil değer ayrıştırma (Singular Value Decomposition, SVD) metodu kullanılarak (5.14)-c numaralı çok-girişli-çok-çıkışlı sistemin giriş çıkış kanalları arasındaki ilişki tanımlanmaktadır.

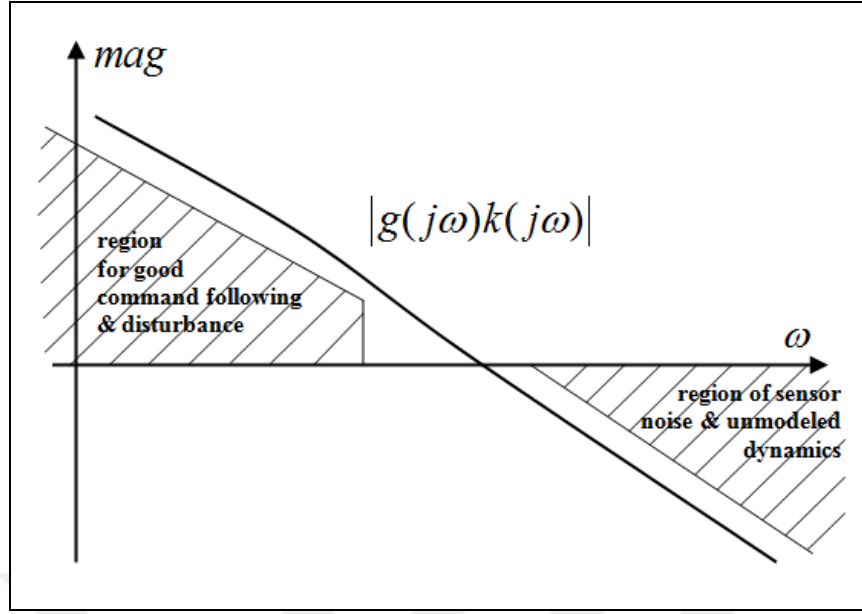
Tasarım parametreleri tam olarak olgunlaşmamış bir sistem için ağırlık fonksiyonlarının belirlenmesi oldukça zor olabilmektedir [31]. Gürbüz kontrol tasarımında önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere ağırlık fonksiyonları doğrudan kontrolcü performansını etkilemektedir. Bir başka deyişle ağırlık fonksiyonları kontrolcü tasarımındaki ayar düğmeleri (tuning knobs) olarak değerlendirilmektedir. Ağırlık fonksiyonları frekans uzayında tanımlanmaktadır. Bu sebeple kapalı çevrim kontrol sisteminin çalışma frekansına göre ağırlık fonksiyonları şekillendirilmelidir.

Şekil 5.16'da tipik bir duyarlılık fonksiyonunun Bode diyagramında genlik olarak şekli verilmektedir. Şekil 5.16'da da görüldüğü üzere düşük frekanslarda duyarlılık fonksiyonunun genliği bozucu girişlere karşı dayanımı artırmak ve referans takibini iyileştirmek için düşük tutulmaktadır.



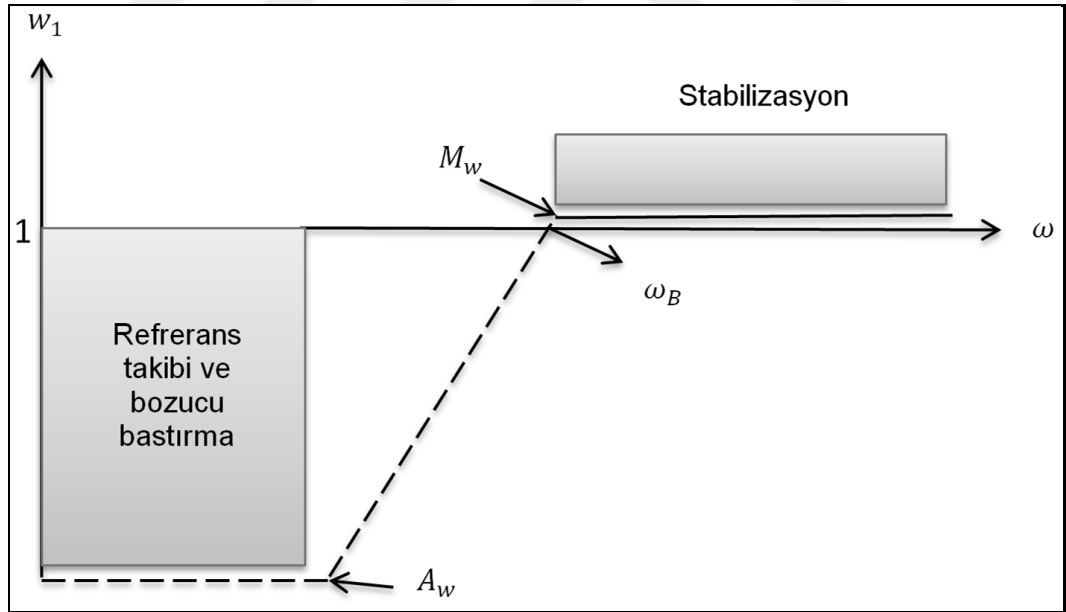
Şekil 5.16. Tipik duyarlılık fonksiyonu [29]

Şekil 5.17'de tipik bir çevrim kazancı fonksiyonunun Bode diyagramında genlik olarak şekli verilmektedir. Şekil 5.17'de de görüldüğü üzere düşük frekanslarda çevrim kazancı fonksiyonunun genliği bozucu girişlere karşı dayanımı artırmak ve referans takibini iyileştirmek için yüksektir tutulmaktadır. Çevrim kazancı fonksiyonunun genliği yüksek frekanslarda ise sensör gürültülerinden etkilenmemek için düşük tutulmaktadır.



Şekil 5.17. Tipik çevrim kazancı fonksiyonu [29]

Ağırlık fonksiyonlarının seçimi için Şekil 5.18’de verilen form kullanılabilmektedir. Şekil 5.18’de birinci dereceden bir ağırlık fonksiyonu şekli verilmektedir.



Şekil 5.18. Ağırlık fonksiyonlarının seçim kriterlerinin gösterimi [25]

Şekil 5.18’de verilen ağırlık fonksiyonu şeklinin matematiksel ifadesi (5.29) numaralı denklemdeki gibi ifade edilmektedir [25].

$$W_g(s) = \frac{\frac{s}{M_w} + \omega_B}{s + \omega_B A_w} \quad (5.29)$$

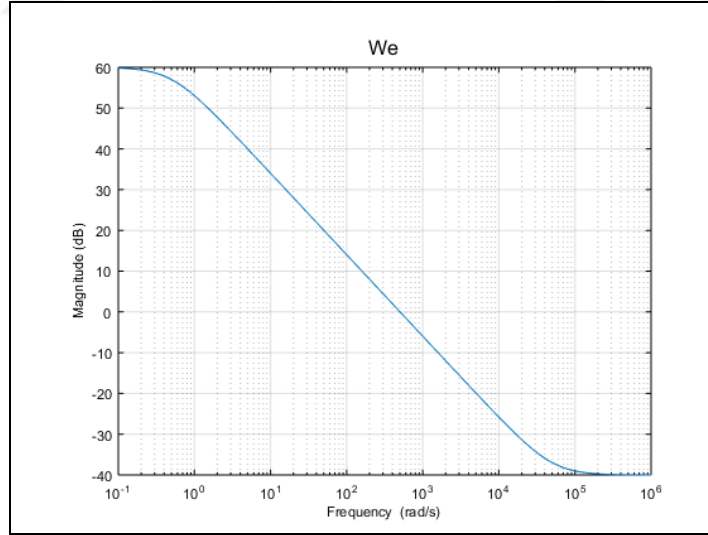
(5.29) numaralı denklemde yer alan A_w kalıcı durum hatasını, M_w duyarlılık kazancını ve ω_B de bant genişliğini temsil etmektedir [25].

Bazı kontrol yapılarında ağırlık fonksiyonlarının daha yüksek derecelerden tanımlanması gerekmektedir. Bu durum için de (5.30) numaralı denklem kullanılabilir [25].

$$W_g(s) = \frac{\left(\frac{s}{M_w^{1/n}} + \omega_B\right)^n}{(s + \omega_B A_w^{1/n})^n} \quad (5.30)$$

(5.29) numaralı denklem kullanılarak hata ağırlık fonksiyonu (5.31) numaralı denklemdeki gibi seçilmektedir. Hata ağırlık fonksiyonunun genlik Bode çizimi Şekil 5.19'da verilmektedir.

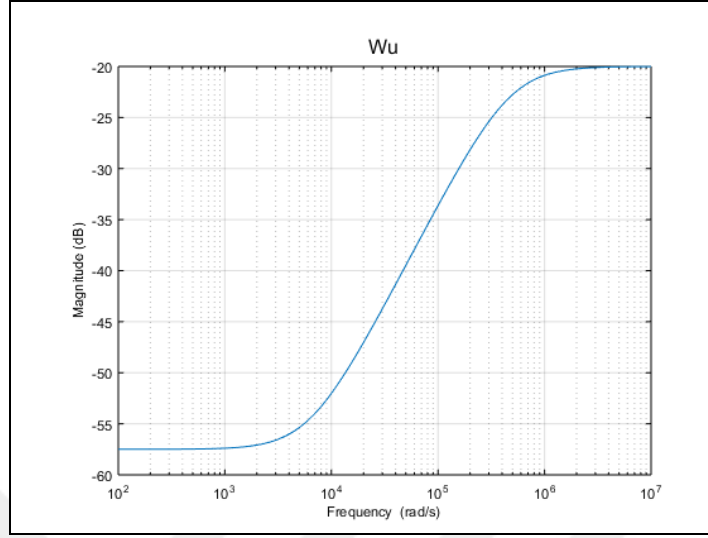
$$W_e = \frac{0,01s + 502,7}{s + 0,5027} \quad (5.31)$$



Şekil 5.19. Hata ağırlık fonksiyonu (W_e)

(5.29) numaralı denklem kullanılarak kontrol sinyali ağırlık fonksiyonu (5.32) numaralı denklemdeki gibi seçilmektedir. Kontrol sinyali ağırlık fonksiyonunun genlik Bode çizimi Şekil 5.20'de verilmektedir.

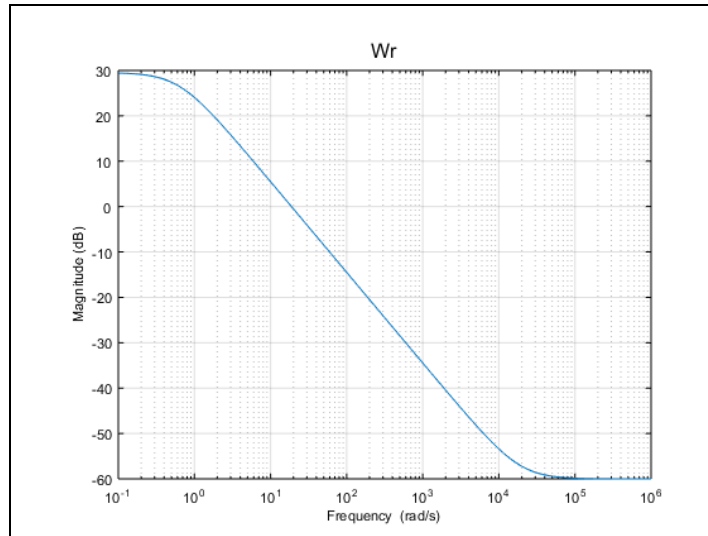
$$W_u = \frac{0,1s+628,3}{s+4,712e05} \quad (5.32)$$



Şekil 5.20. Kontrol sinyali ağırlık fonksiyonu (W_u)

(5.29) numaralı denklem kullanılarak referans sinyali ağırlık fonksiyonu (5.33) numaralı denklemdeki gibi seçilmektedir. Referans sinyali ağırlık fonksiyonunun genlik Bode çizimi Şekil 5.21’de verilmektedir.

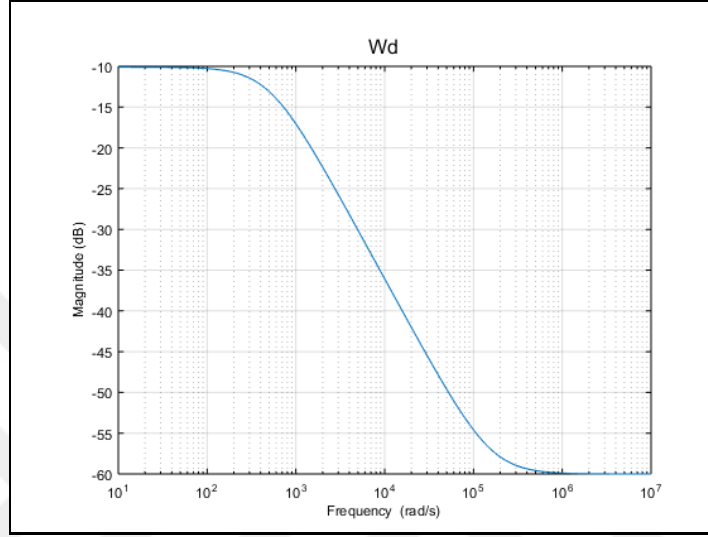
$$W_r = \frac{0,001s+18,85}{s+0,6283} \quad (5.33)$$



Şekil 5.21. Referans ağırlık fonksiyonu (W_r)

(5.29) numaralı denklem kullanılarak bozucu sinyalin ağırlık fonksiyonu (5.34) numaralı denklemdeki gibi seçilmektedir. Bozucu sinyalin ağırlık fonksiyonunun genlik Bode çizimi Şekil 5.22’de verilmektedir.

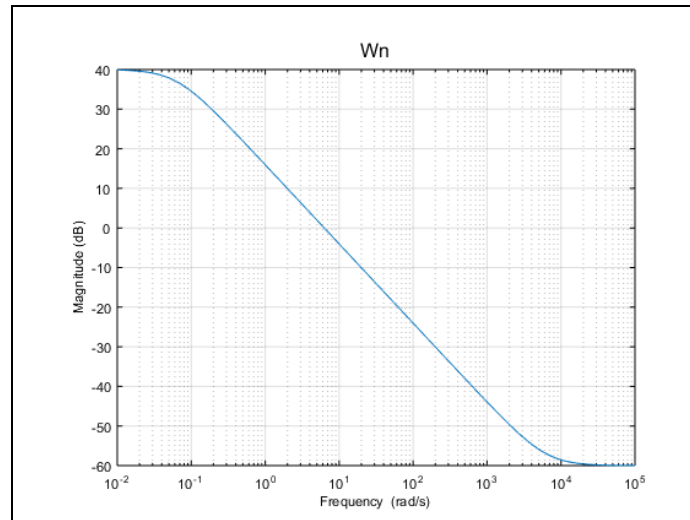
$$W_d = \frac{0,001s+157,1}{s+502,7} \quad (5.34)$$



Şekil 5.22. Bozucu ağırlık Fonksiyonu (W_d)

(5.29) numaralı denklem kullanılarak sensör gürültüsü sinyalinin ağırlık fonksiyonu (5.35) numaralı denklemdeki gibi seçilmektedir. Sensör gürültüsü sinyalinin ağırlık fonksiyonunun genlik Bode çizimi Şekil 5.23’te verilmektedir.

$$W_n = \frac{0,001s+6,283}{s+0,06283} \quad (5.35)$$



Şekil 5.23. Gürültü ağırlık fonksiyonu (W_n)

H_∞ kontrolcü tasarımı yapılırken Şekil 5.12’de verilen belirsizlikler Tablo 5.5’te verildiği şekilde frekanstan bağımsız sabit bir katsayı olarak tanımlanmaktadır. MATLAB® yazılımında belirsizlikler “ureal” komutu ile oluşturulmaktadır.

Tablo 5.5. Gürbüz kontrolcü tasarımında tanımlanan belirsizlikler

	Nominal Değer (Yandönme Eksen)	Nominal Değer (Yunuslama Eksen)	Değişim [%]
Motor Tork Sabit (K_t)	0,0320	0,1650	20
Sönüm Katsayısı (B)	0,0160	0,0266	50
Yay Katsayısı (K)	0,0679	0,0348	50

Şekil 5.11’de verilen kontrol yapısında tasarımı yapılan kontrolcünün derecenin kabaca nasıl tayin edildiğini bilmek gerekir. Kontrolcünün derecesi (5.36) numaralı denklemdeki gibi yedinci dereceden gerçekleşmektedir.

$$7 = \underbrace{5}_{\text{Performans ve ceza ağırlık fonksiyonları için transfer fonksiyonlarının dereceleri toplamı}} + \underbrace{0}_{\text{Belirsizlik ağırlık fonksiyonları için transfer fonksiyonları dereceleri toplamı}} + \underbrace{2}_{\text{Sistem transfer fonksiyonunun dereci}} \quad (5.36)$$

Belirsizlikler için tanımlanan ağırlık fonksiyonları diğer ağırlık fonksiyonları gibi bir transfer fonksiyonu formunda değil frekanstan bağımsız doğrudan bir sabit katsayı olarak seçildiği için kontrolcü derecesini artırmamaktadır. Belirsizlik ağırlık fonksiyonlarında diğer ağırlık fonksiyonları şeklinde seçilmesi durumunda kontrolcü derecesi on olacaktır.

İlgili kabuller ile yandönme eksen (iç eksen) için tasarımı yapılan kontrolcünün transfer fonksiyonu (K_{f_ic}), $\gamma=0,908$ olarak (5.39) numaralı denklemdeki gibi elde edilebilir. (5.39) numaralı denklemde yer alan $K_{f_ic_num}$ ve $K_{f_ic_denum}$ ifadeleri sırasıyla (5.37) ve (5.38) numaralı denklemlerde verilmektedir.

$$Kf_{ic_num} = 2.422e07s^6 + 1.143e13s^5 + 6.564e15s^4 + 4.184e17s^3 + 1.595e18s^2 + 4.657e18s + 8.941e17 \quad (5.37)$$

$$Kf_{ic_denum} = s^7 + 2.481e04s^6 + 1.819e08s^5 + 4.494e11s^4 + 1.834e14s^3 + 2.174e14s^2 + 6.98e13s + 3.428e12 \quad (5.38)$$

$$K_{f_ic} = \frac{Kf_{ic_num}}{Kf_{ic_denum}} \quad (5.39)$$

Aynı ağırlık fonksiyonları ve kabuller ile yunuslama eksenini (dış eksen) için tasarımı yapılan kontrolcünün transfer fonksiyonu (K_{f_dis}), $\gamma=0,908$ olarak (5.42) numaralı denklemdeki gibi elde edilebilir. (5.42) numaralı denklemde yer alan Kf_{dis_num} ve Kf_{dis_denum} ifadeleri sırasıyla (5.40) ve (5.41) numaralı denklemlerde verilmektedir.

$$Kf_{dis_num} = 1.188e06s^6 + 5.607e11s^5 + 3.312e14s^4 + 2.511e16s^3 + 6.562e16s^2 + 8.07e16s + 1.377e16 \quad (5.40)$$

$$Kf_{dis_denum} = s^7 + 2.128e04s^6 + 1.078e08s^5 + 8.974e10s^4 + 2.055e13s^3 + 2.444e13s^2 + 7.911e12s + 4.055e11 \quad (5.41)$$

$$K_{f_dis} = \frac{Kf_{dis_num}}{Kf_{dis_denum}} \quad (5.42)$$

Gerçek zamanlı gömülü sistemler için elde edilen kontrolcü derecesi sisteme göre uygulanabilir olmayabilir. Bu durumda da kontrolcü derecesinin indirgenmesi gerekmektedir. Kontrolcü indirgeme işleminde kontrolcünün Hankel tekil değerleri (Hankel Singular Values) incelenebilmektedir.

(5.39) ve (5.42) numaralı denklem ile tanımlanan kontrolcü transfer fonksiyonunun Hankel tekil değerleri Tablo 5.6'da verilmektedir. Tablo 5.6'daki değerler incelenirse kontrolcülerin sadece 7. derecesindeki tekil değer diğerlerine göre düşük olduğu görülmektedir. Bunun anlamı kontrolcünün diğer kökleri sanal eksene yakın olup baskın (dominant) köklerdir. Bu sebeple (5.39) ve (5.42) numaralı denklem ile verilen kontrolcülerin dereceleri en fazla 6. dereceye indirgenebilir. İlk altı derecede elde edilen Hankel tekil değerlerinin yüksek olması tasarımı yapılan kontrolcünün yüksek kazançlı bir kontrolcü olduğu anlamına gelmektedir.

Tablo 5.6. Kontrolcü tekil değerleri

Derece	Tekil Değer (İç Eksen)	Tekil Değer (Dış Eksen)
1	1,2644e+05	1,5710e+04
2	4,4851e+04	3,4717e+03
3	3,6340e+04	2,3540e+03
4	8,4100e+03	1,1172e+03
5	7,4099e+03	521,5044
6	5,5400e+03	439,2987
7	0,0275	5,8111e-04

İlgili indirgeme işlemi yapılırsa (5.39) ve (5.42) numaralı denklem ile verilen kontrolcü transfer fonksiyonlarının indirgenmiş halleri sırasıyla (5.45) ve (5.48) numaralı denklemlerdeki gibi elde edilebilir. (5.45) numaralı denklemde yer alan $K_{fr_ic_num}$ ve $K_{fr_ic_denum}$ ifadeleri sırasıyla (5.43) ve (5.44) numaralı denklemlerde verilmektedir. Benzer şekilde (5.48) numaralı denklemde yer alan $K_{fr_dis_num}$ ve $K_{fr_dis_denum}$ ifadeleri sırasıyla (5.46) ve (5.47) numaralı denklemlerde verilmektedir.

$$K_{fr_ic_num} = 2.422e07s^5 + 1.414e13s^4 + 8.261e14s^3 + 3.154e15s^2 + 9.261e15s + 1.779e15 \quad (5.43)$$

$$K_{fr_ic_denum} = s^6 + 2.431e04s^5 + 1.697e08s^4 + 3.641e11s^3 + 4.322e11s^2 + 1.389e11s + 6.82e09 \quad (5.44)$$

$$K_{fr_ic} = \frac{K_{fr_ic_num}}{K_{fr_ic_denum}} \quad (5.45)$$

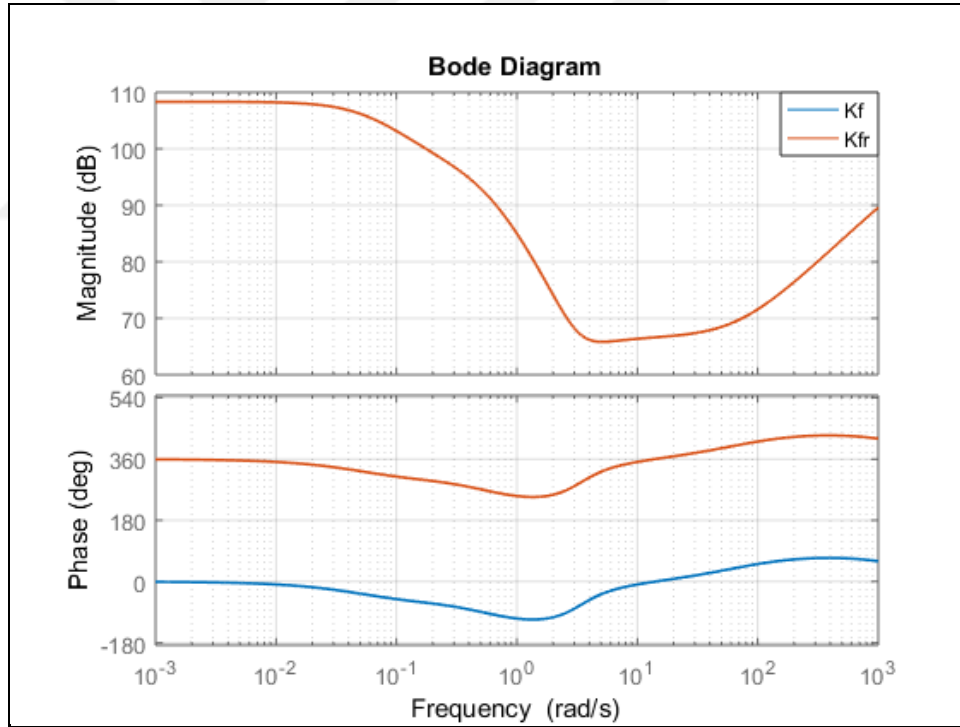
$$K_{fr_dis_num} = 1.188e06s^5 + 5.601e11s^4 + 4.97e13s^3 + 1.302e14s^2 + 1.605e14s + 2.74e13 \quad (5.46)$$

$$K_{fr_dis_denum} = s^6 + 2.078e04s^5 + 9.738e07s^4 + 4.079e10s^3 + 4.859e10s^2 + 1.574e10s + 8.067e08 \quad (5.47)$$

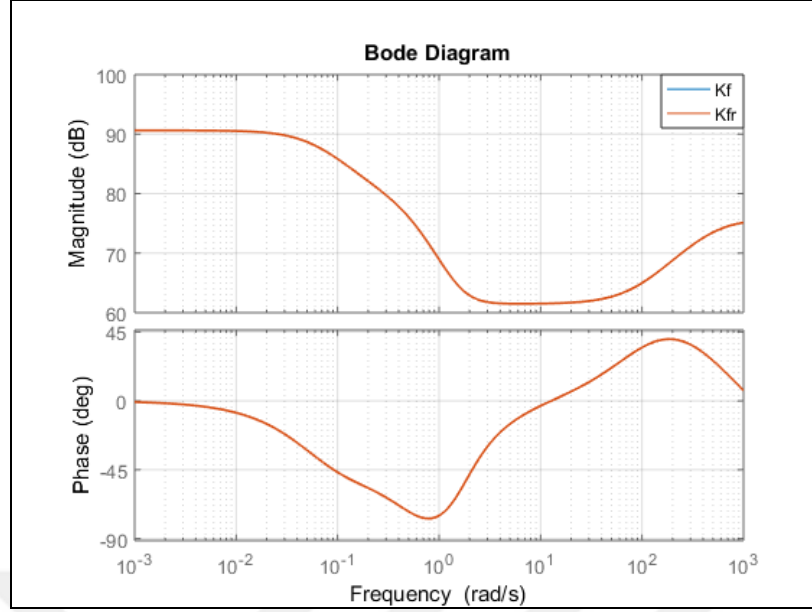
$$K_{fr_dis} = \frac{K_{fr_dis_num}}{K_{fr_dis_denum}} \quad (5.48)$$

(5.39) ve (5.42) numaralı transfer fonksiyonlarının doğrudan indirgeme işlemi sırasında pay kısımlarında altıncı dereceden bir bileşen görülmektedir. Bu değer oldukça küçük olması sebebi ile ihmal edilmektedir.

Transfer fonksiyonlarının indirgemesi sırasından orijinal transfer fonksiyonlarına göre ne kadar farklı olduğu ilgili transfer fonksiyonlarının Bode diyagramları incelenerek değerlendirilebilir. Yandönme ve yunuslama eksenleri için tasarımı yapılan ve indirgeme işlemine tabi tutulan transfer fonksiyonlarına ait Bode diyagramları sırasıyla Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te verilmektedir. Tasarımı yapılan ve indirgenmiş kontrolcülerin Bode grafiklerine göre her iki kontrolcü arasında frekans uzayında çok bir fark yoktur. Bu sebeple uygulamada gömülü sistemlerde indirgenmiş kontrolcü kullanılabilir. Aksi belirtilmedikçe tez kapsamında (5.39) ve (5.42) numaralı denklemler kullanılmaktadır.

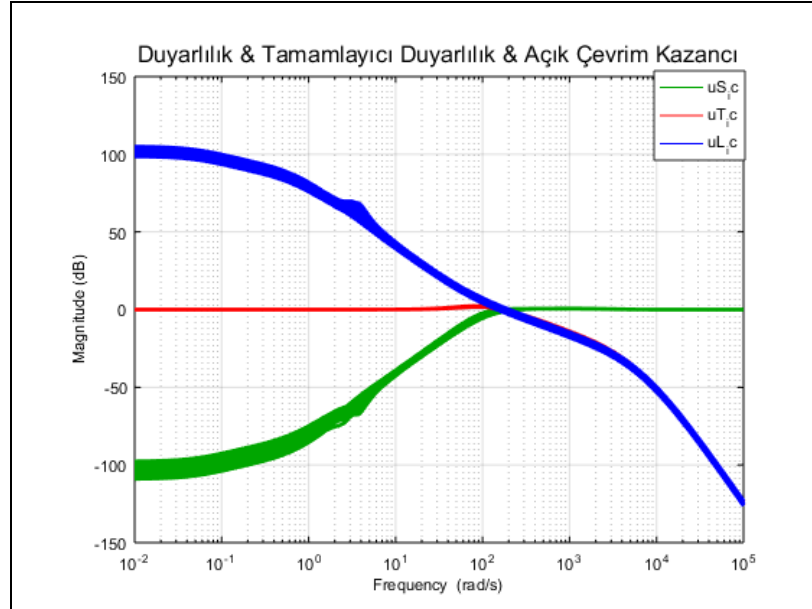


Şekil 5.24. Yandönme eksenini için tasarımı yapılan ve indirgeme işlemi yapılan transfer fonksiyonlarının Bode diyagramları



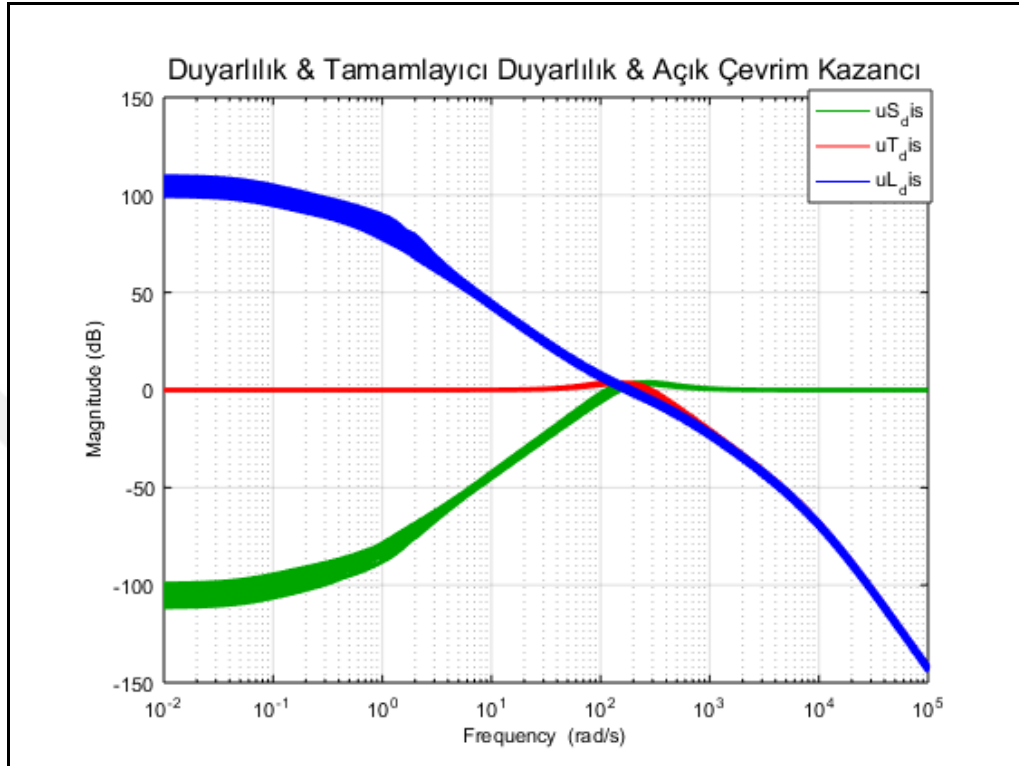
Şekil 5.25. Yunuslama eksenini için tasarımı yapılan ve indirgeme işlemi yapılan transfer fonksiyonlarının Bode diyagramları

(5.39) numaralı denklem ile yandönme eksenini için tasarlanan kontrolcü ile belirsiz sistemin duyarlılık fonksiyonu, tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonu ve sistemin çevrim kazancının Bode diyagramı Şekil 5.26’da verilmektedir.



Şekil 5.26. Belirsizlikler ile modellenen sistemin duyarlılık, tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonları ve çevrim kazancı (yandönme eksenini)

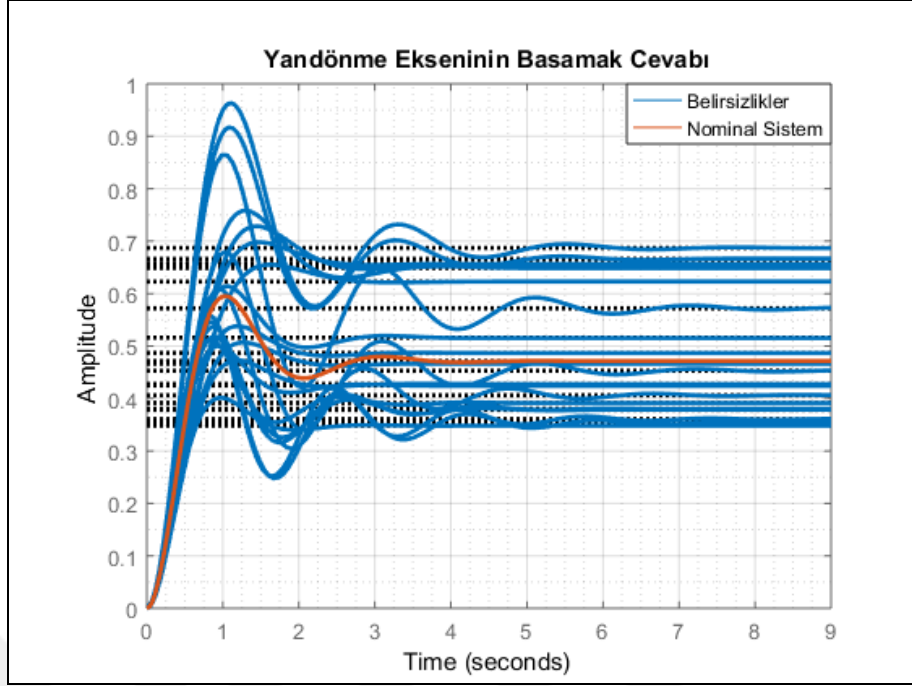
(5.42) numaralı denklem ile yunuslama eksenini için tasarlanan kontrolcü ile belirsiz sistemin duyarlılık fonksiyonu, tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonu ve sistemin çevrim kazancının Bode diyagramı Şekil 5.27’de verilmektedir.



Şekil 5.27. Belirsizlikler ile modellenen sistemin duyarlılık, tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonları ve çevrim kazancı (yunuslama eksenini)

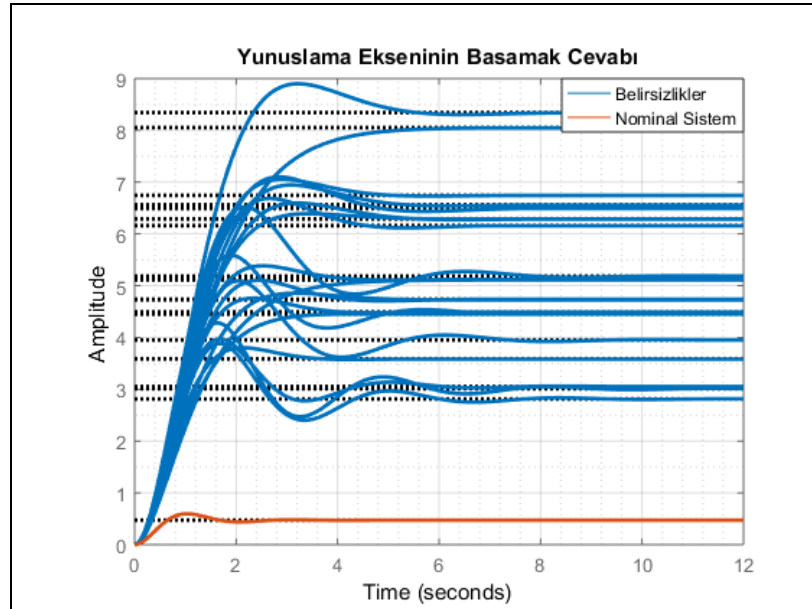
Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de verilen duyarlılık fonksiyonları incelenirse daha önce bahsedildiği üzere düşük frekanslarda düşük genliğe sahip olup yüksek frekanslarda yüksek genliğe sahiptir. Tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonu da düşük frekanslarda yüksek genliğe yüksek frekanslarda ise düşük genliğe sahiptir. Çevrim kazançları incelenirse belirsiz sistemlerin hepsi integral işlemine benzer bir davranış göstermektedirler.

Tablo 5.5’teki gibi modellenen belirsizlikler ile kontrol edilmek istenen yandönme eksenine ait sistemin basamak emre karşı cevabı Şekil 5.28’de verilmektedir.



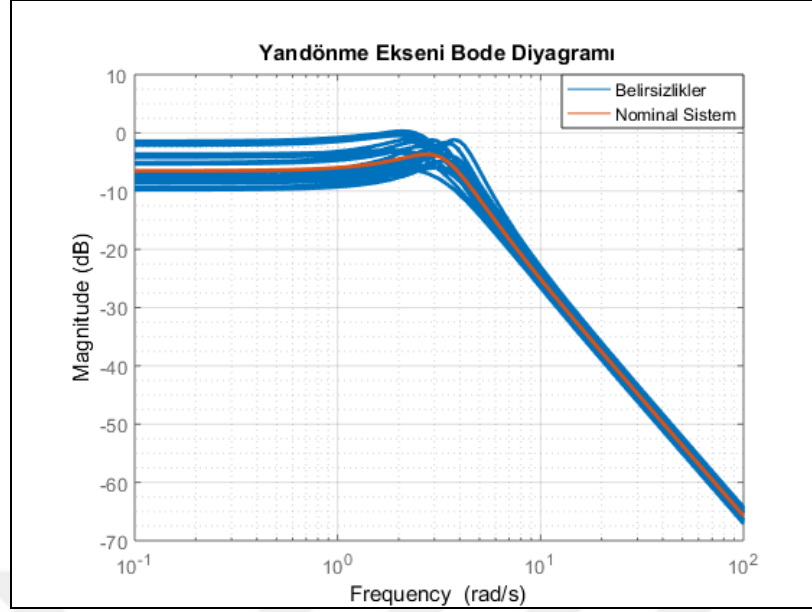
Şekil 5.28. Belirsizlikler ile modellenen sistemin basamak cevabı (yandönme eksenı)

Tablo 5.5'teki gibi modellenen belirsizlikler ile kontrol edilmek istenen yunuslama eksenine ait sistemin basamak emre karşı cevabı Şekil 5.29'da verilmektedir.



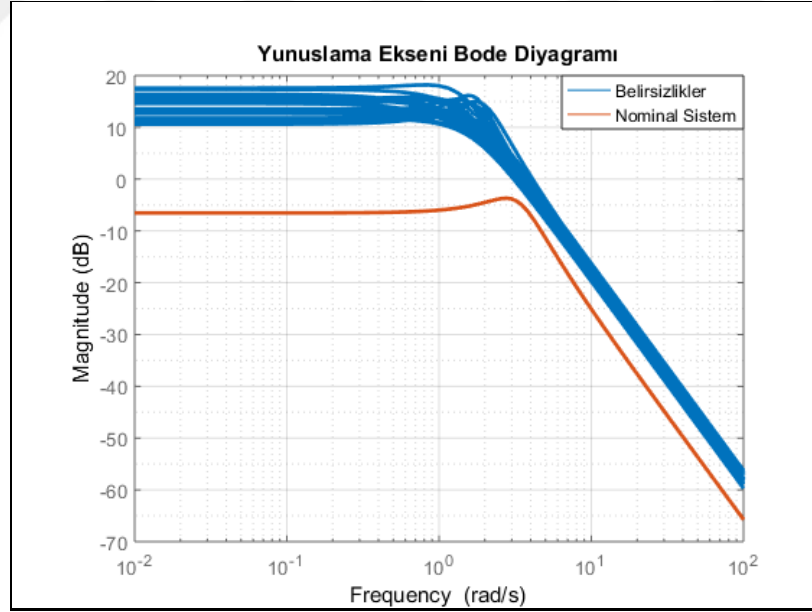
Şekil 5.29. Belirsizlikler ile modellenen sistemin basamak cevabı (yunuslama eksenı)

Tablo 5.5'teki gibi modellenen belirsizlikler ile kontrol edilmek istenen yandönme eksenine ait sistemin Bode genlik diyagramı Şekil 5.30'da verilmektedir.



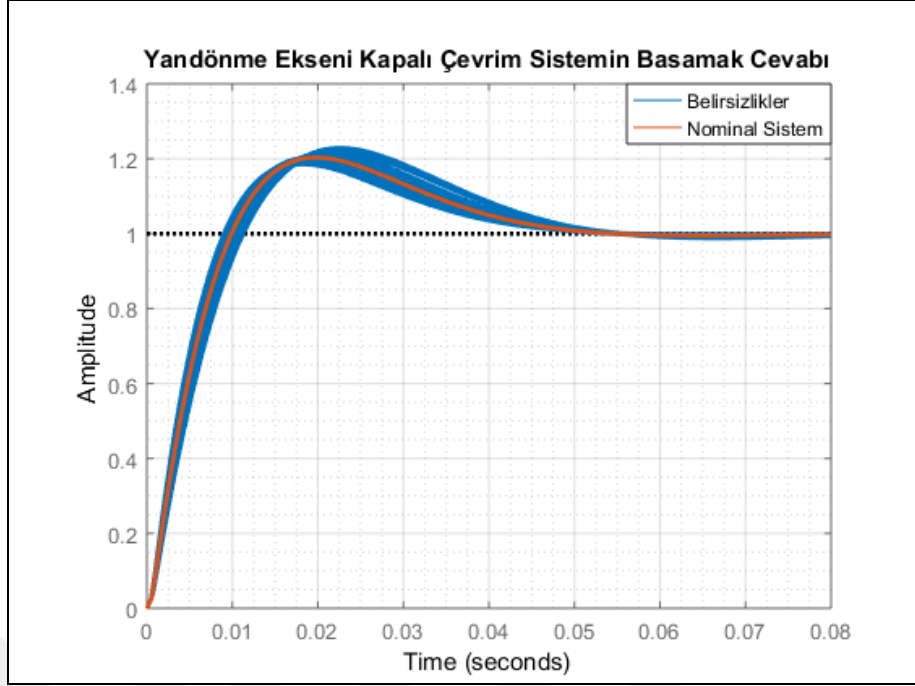
Şekil 5.30. Belirsizlikler ile modellenen sistemin Bode diyagramı (yandönme eksenini)

Tablo 5.5'teki gibi modellenen belirsizlikler ile kontrol edilmek istenen yunuslama eksenine ait sistemin Bode genlik diyagramı Şekil 5.31'de verilmektedir.



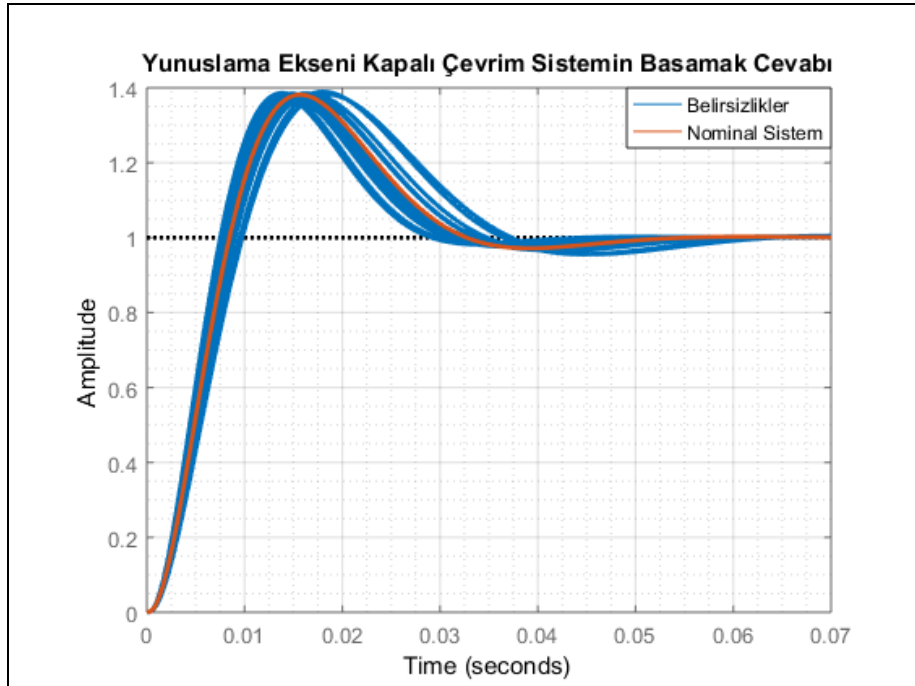
Şekil 5.31. Belirsizlikler ile modellenen sistemin Bode diyagramı (yunuslama eksenini)

Tablo 5.5'teki gibi modellenen belirsizlikler ile kontrol edilmek istenen yandönme eksenine ait kapalı çevrim sistemin basamak emir cevabı Şekil 5.32'de verilmektedir.



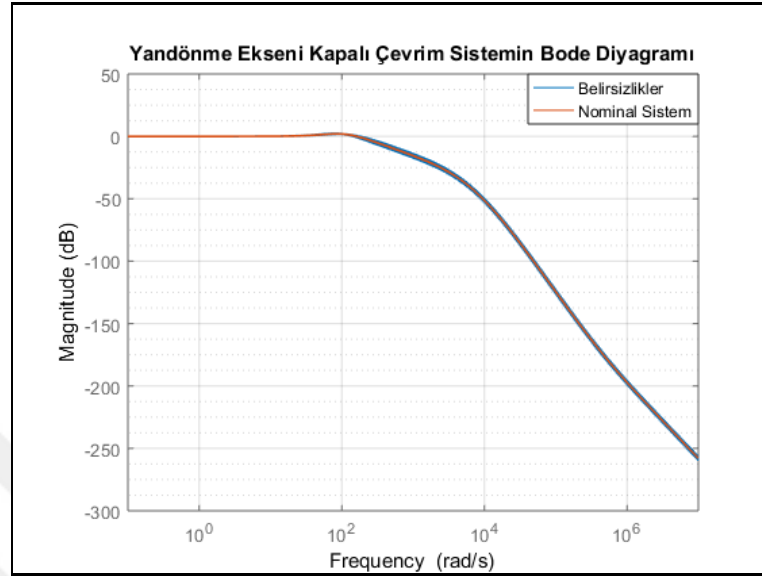
Şekil 5.32. Belirsizlikler ile modellenen kapalı çevrim sistemin basamak cevabı (yandönme eksenı)

Tablo 5.5'teki gibi modellenen belirsizlikler ile kontrol edilmek istenen yunuslama eksenine ait kapalı çevrim sistemin basamak emir cevabı Şekil 5.33'te verilmektedir.



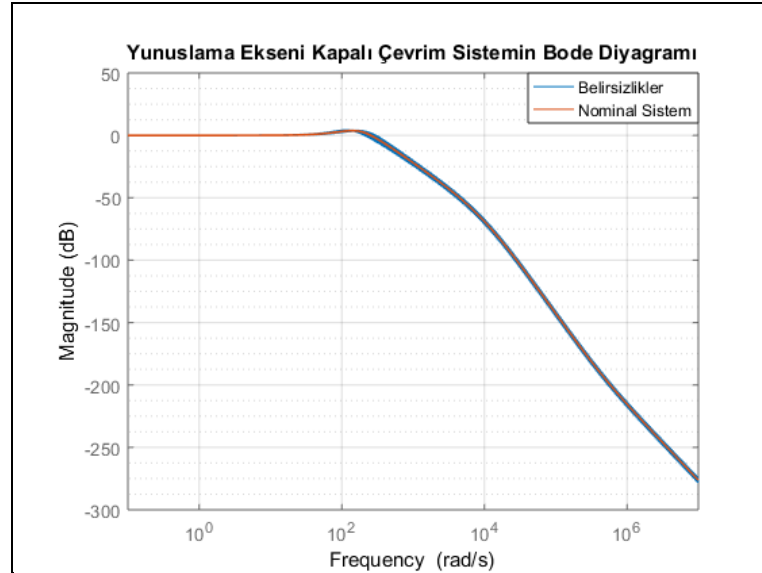
Şekil 5.33. Belirsizlikler ile modellenen kapalı çevrim sistemin basamak cevabı (yunuslama eksenı)

Tablo 5.5'teki gibi modellenen belirsizlikler ile kontrol edilmek istenen yandönme eksenine ait kapalı çevrim sistemin Bode genlik grafiği Şekil 5.34'te verilmektedir.



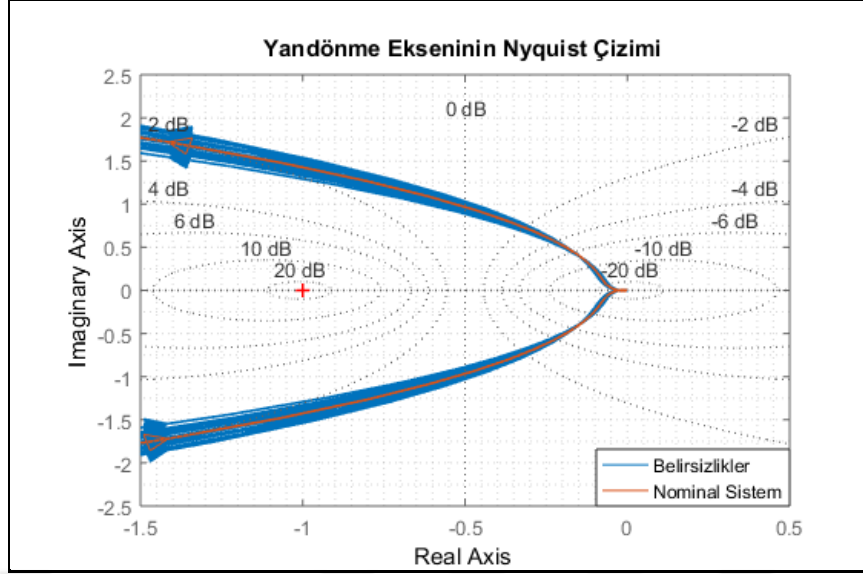
Şekil 5.34. Belirsizlikler ile modellenen kapalı çevrim sistemin Bode diyagramı (yandönme eksen)

Tablo 5.5'teki gibi modellenen belirsizlikler ile kontrol edilmek istenen yunuslama eksenine ait kapalı çevrim sistemin Bode genlik grafiği Şekil 5.35'te verilmektedir.



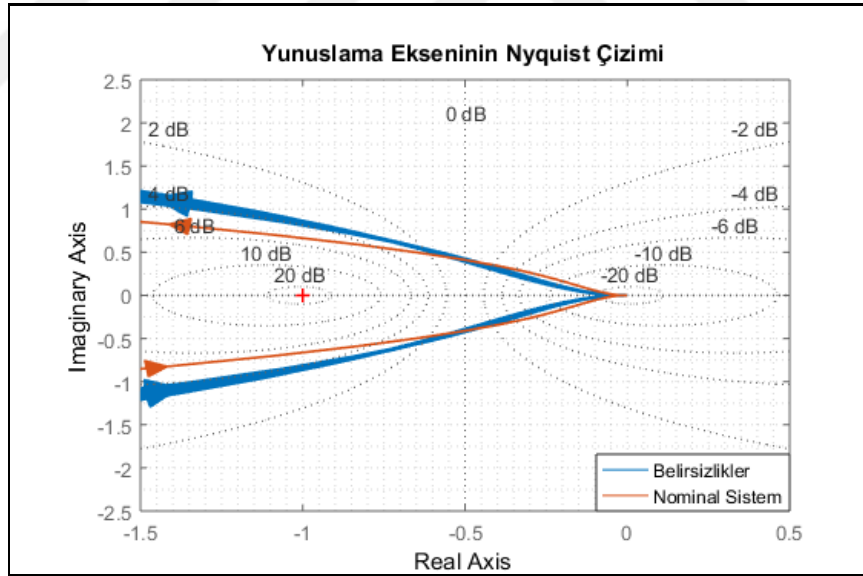
Şekil 5.35. Belirsizlikler ile modellenen kapalı çevrim sistemin Bode diyagramı (yunuslama eksen)

Tablo 5.5'teki gibi modellenen belirsizlikler ile kontrol edilmek istenen yandönme eksenine ait sistemin Nyquist çizimi Şekil 5.36'da verilmektedir.



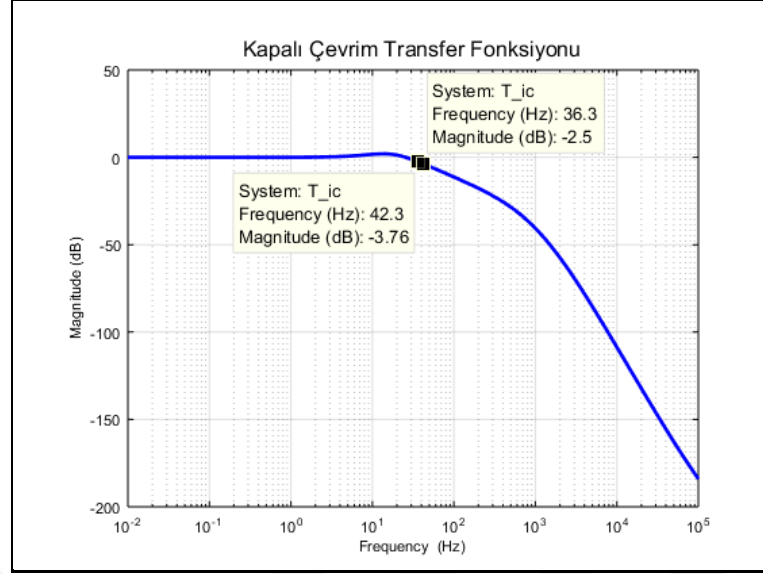
Şekil 5.36. Belirsizlikler ile modellenen sistemin Nyquist çizimi (yandönme eksenini)

Tablo 5.5'teki gibi modellenen belirsizlikler ile kontrol edilmek istenen yunuslama eksenine ait sistemin Nyquist çizimi Şekil 5.37'de verilmektedir.



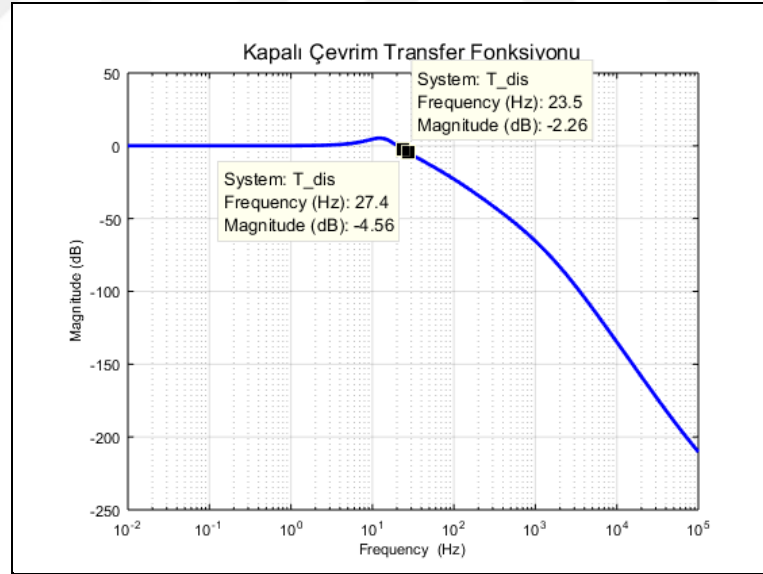
Şekil 5.37. Belirsizlikler ile modellenen sistemin Nyquist çizimi (yunuslama eksenini)

Yandönme eksenini için belirsizlik olmayan nominal kapalı çevrim incelenecek olursa bant genişliği Şekil 5.38'de de görülebileceği gibi yaklaşık 38 [Hz] olarak elde edilmektedir.



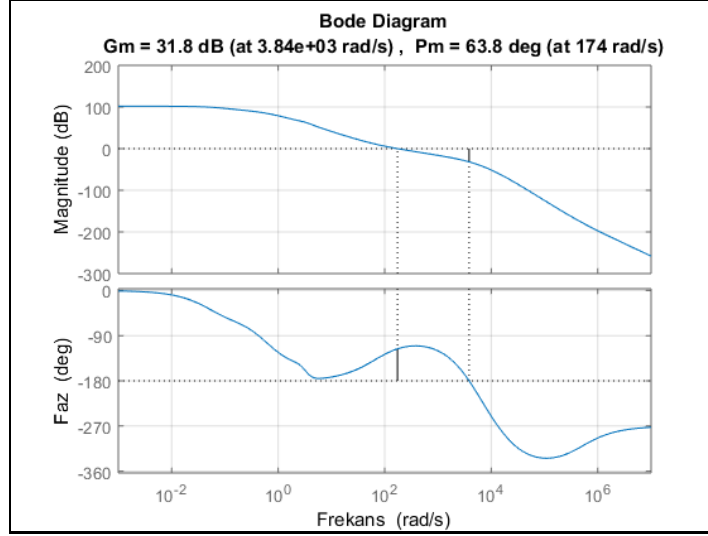
Şekil 5.38. Yandönme eksen genlik Bode diyagramı

Yunuslama eksen için belirsizlik olmayan nominal kapalı çevrim incelenecek olursa bant genişliği Şekil 5.39’da da görülebileceği gibi yaklaşık 24 [Hz] olarak elde edilmektedir.



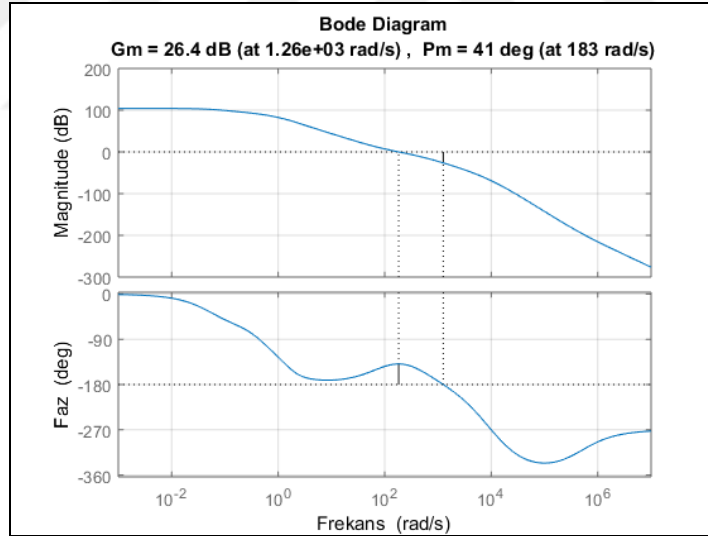
Şekil 5.39. Yunuslama eksen genlik Bode diyagramı

Şekil 5.40’da yandönme eksen için tasarımı yapılan H_∞ kontrolcü ile elde edilen genlik ve faz kazançları verilmektedir. Yandönme eksen için 31,8 [dB] genlik ve 63,8 [°] faz kazancı elde edilmektedir.



Şekil 5.40. Yandönme eksen genlik ve faz marjini

Şekil 5.40’da ise yunuslama eksen için tasarımı yapılan H_{∞} kontrolcü ile elde edilen genlik ve faz kazançları verilmektedir. Yunuslama eksen için 26,4 [dB] genlik ve 41 [°] faz kazancı elde edilmektedir.



Şekil 5.41. Yunuslama eksen genlik ve faz marjini

Tasarımı yapılan kapalı çevrim sistemin faz kazancının 45 ± 15 [°] olması arzu edilir. Bu değerlerde sistem yeterli görülebilecek hızlarda çalışmaktadır. Faz kazancı arttıkça sistem yavaşlamaktadır; ancak buna rağmen kararlı şekilde çalışabilir.

Gülbüz kararlılık (Robust Stability, RS) analizi MATLAB® yazılımının “robuststab” komutu ile yapılabilmektedir. “robuststab” komutu (5.49) numaralı denklemde verildiği şekilde kullanılmaktadır.

$$[\text{starbmarg}, \text{destabunc}, \text{Report}] = \text{robuststab}(\text{sys}) \quad (5.49)$$

“robuststab” komutundaki “starbmag” alanının çıktıları Tablo 5.7’de açıklanmaktadır.

Tablo 5.7. “starbmag” alanının açıklaması [21]

Alan	Açıklama
Alt Sınır (Lower Bound)	Kararlılık marjinde alt sınır pozitif ve tek boyutludur (scalar). Eğer alt sınırın değeri 1’den büyükse modellenen belirsizliklerin her değeri için belirsiz sistem kararlıdır.
Üst Sınır (Upper Bound)	Kararlılık marjinde üst sınır pozitif ve tek boyutludur. Eğer alt sınırın değeri 1’de küçük ise modellenen belirsizliklerin her değeri için belirsiz sistem kararsızdır.
Kararsızlık Frekansı (Destabilizing Frequency)	Kararsızlık frekansı, modellenen belirsizlikler için kararsızlığın görüldüğü kritik frekans değeridir. Belirsizliklerin belirli değerlerinde (bkz. destabunc) sitem kökleri kararsızlık bölgesine (sürekli sistemler için sanal eksen, ayrık zamanlı sistemler için birim çember) geçmektedir.

Gülbüz kararlılık (robust stability) için her iki eksen için tasarlanan kontrolcü ve belirsizlik modelleri kullanılarak MATLAB® yazılımının “robuststab” kullanılmaktadır. İlgili çıktılar Tablo 5.8’de verilmektedir. Her iki eksen için elde edilen alt sınır ve üst sınır değerleri birden büyük olduğu için her iki sistem de modellenen belirsizliklerin her frekansında kararlıdır.

Yandönme eksenini için kapalı çevrim sistem belirsizlikleri % 477’e kadar telafi edebilmektedir. Yunuslama ekseninde ise kapalı çevrim sistem belirsizlikleri % 480’e kadar telafi edebilmektedir.

Tablo 5.8. “robuststab” çıktıları

Parametre	Yandönme Eksen	Yunuslama Eksen
Alt Sınır	4,7702	4,7995
Üst Sınır	4,8454	4,8840
Kararsızlık Frekansı [rad/s]	19,5072	19,2305
Kararsızlık Frekansındaki Belirsizlikler	$uB = -0,0143$	$uB = -0,0234$
	$uK = 0,1925$	$uK = 0,0976$
	$uKt = 9,8946e-04$	$uKt = 0,0038$

Yunuslama ekseninde 19,5 [rad/s] frekansında belirsizliklerin %485’unda kararsızlık görülmektedir. Yunuslama ekseninde ise 19,2 [rad/s] frekansında belirsizliklerin %488’inde kararsızlık görülmektedir.

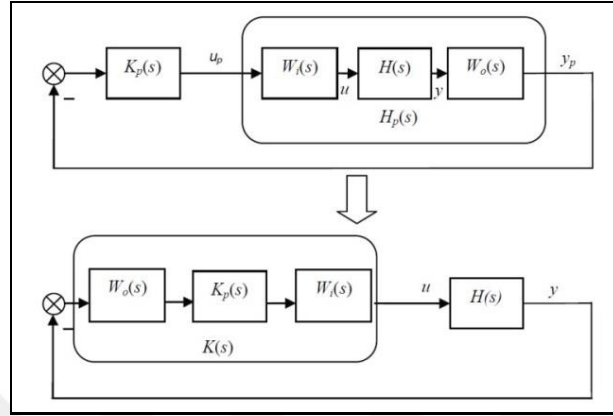
Yandönme ekseninde duyarlılık sönüm katsayısına %38, yay sabitine %1 ve motor tork sabitine %100 bağımlıdır. Sönüm katsayısındaki %25 değişim marjinin %10 azalmasına sebep olmaktadır. Yay sabitindeki %25 değişim marjinin %0 azalmasına sebep olmaktadır. Motor tork sabitindeki %25 değişim marjinin %25 azalmasına sebep olmaktadır.

Yunuslama ekseninde duyarlılık sönüm katsayısına %33, yay sabitine %2 ve motor tork sabitine %100 bağımlıdır. Sönüm katsayısındaki %25 değişim marjinin %8 azalmasına sebep olmaktadır. Yay sabitindeki %25 değişim marjinin %1 azalmasına sebep olmaktadır. Motor tork sabitindeki %25 değişim marjinin %25 azalmasına sebep olmaktadır.

5.2.2. Çevrim şekillendiren kontrolcü

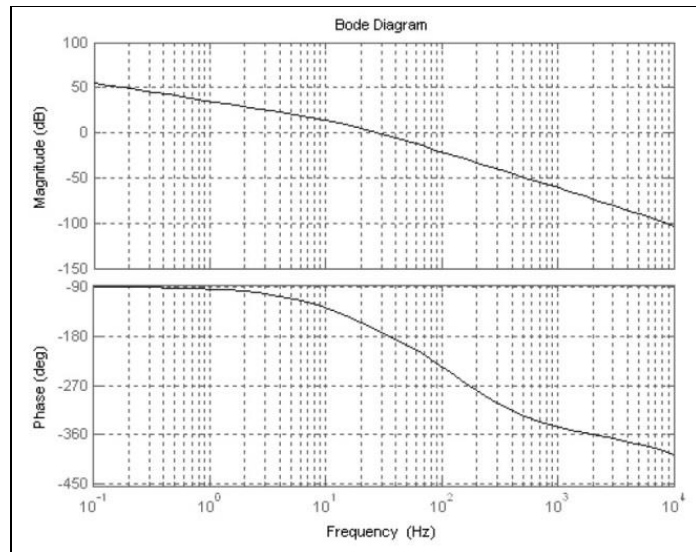
Çevrim kazancının şekillendirilmesi (Loop-shaping) ile kapalı çevrim sistem cevabının kontrol edilmesi amaçlanmaktadır. H_∞ kontrolcü tasarımı da duyarlılık ve tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonların belirli şekillerde olması amacı ile ağırlık fonksiyonları şekillendirildi. Duyarlılık ve tamamlayıcı duyarlılık fonksiyonlarını (5.18) ve (5.19) numaralı denklemler ile doğrudan çevrim kazancına bağlı olduğu ifade edilmektedir. Dolayısı ile çevrim kazancının istenen şekilde olması en temel kontrolcü tasarım yöntemidir.

Çevrim kazancı şekillendirilirken Şekil 5.42’de verilen temel blok şeması esas alınmaktadır. Kontrol edilecek sistem öncelikle giriş ve çıkış ağırlık fonksiyonları olarak da ifade edilebilen $W_i(s)$ ve $W_o(s)$ transfer fonksiyonlarına ayrıştırılır. Bu işlem asal ayrıştırma (coprime factorization) olarak adlandırılmaktadır.



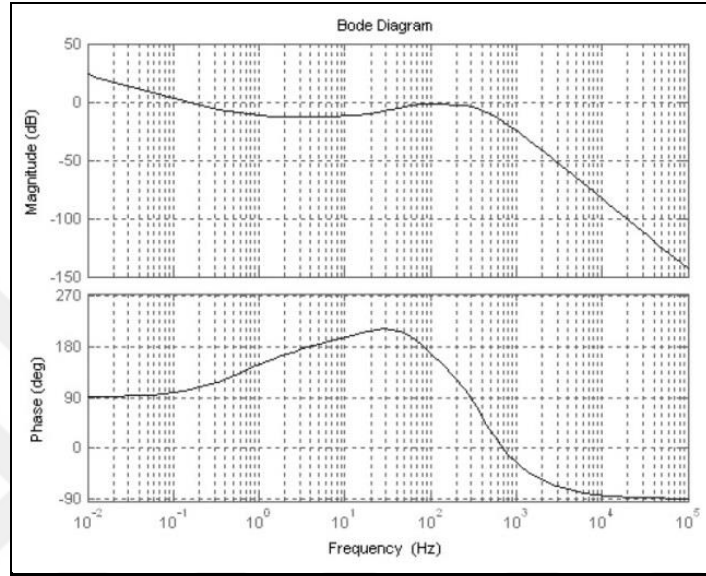
Şekil 5.42. Çevrim kazancının şekillendirilmesi için blok şeması [32]

İdeal bir çevrim kazancı integral işleminin frekans cevabına benzemektedir. İdeal bir integral işlemi frekans uzayında $\frac{1}{s}$ ifadesi ile tanımlanmaktadır. Bu transfer fonksiyonunun Bode grafiği de belirli bir kazanç değerinde başlayıp 20 [dB/dec] olacak şekilde azalmaktadır. Uygulamada hiçbir sistem mükemmel bir integral yapısına sahip olmasa da o şekilde davranmaya yaklaşabilir. Şekil 5.43’te örnek bir çevrim kazancının Bode grafiği görülmektedir.



Şekil 5.43. Kontrol edilmemiş örnek bir çevrim kazancı [32]

Şekil 5.44'te ise kontrolcü tasarımı yapılmış örnek bir çevrim kazancına yer verilmektedir. Şekil 5.44'te verilen Bode grafiği incelenirse çevrim kazancının yaklaşık 10^2 - 10^3 [Hz] civarında bir frekans değerinde büküldüğü görülmektedir. Bu da sisteme faz kazancı olarak olarak yansımaktadır. Bu bölümdeki kontrolcü tasarımı da bu şekilde uygulanacaktır.



Şekil 5.44. Kontrolcüsü optimize edilmiş örnek bir çevrim kazancı [32]

Çevrim kazancını şekillendirirken 4 farklı frekans noktasında ideal çevrim kazancını bükülmeye çalışılacaktır. Bu işlemler bize bozucu girişlere karşı dayanım, düşük kalıcı durum hatası ve faz kazancı kazancı sağlamaktadır. Kontrolcü tasarım parametreleri Tablo 5.9'da verilmektedir.

Tablo 5.9. Kontrolcü tasarım parametreleri

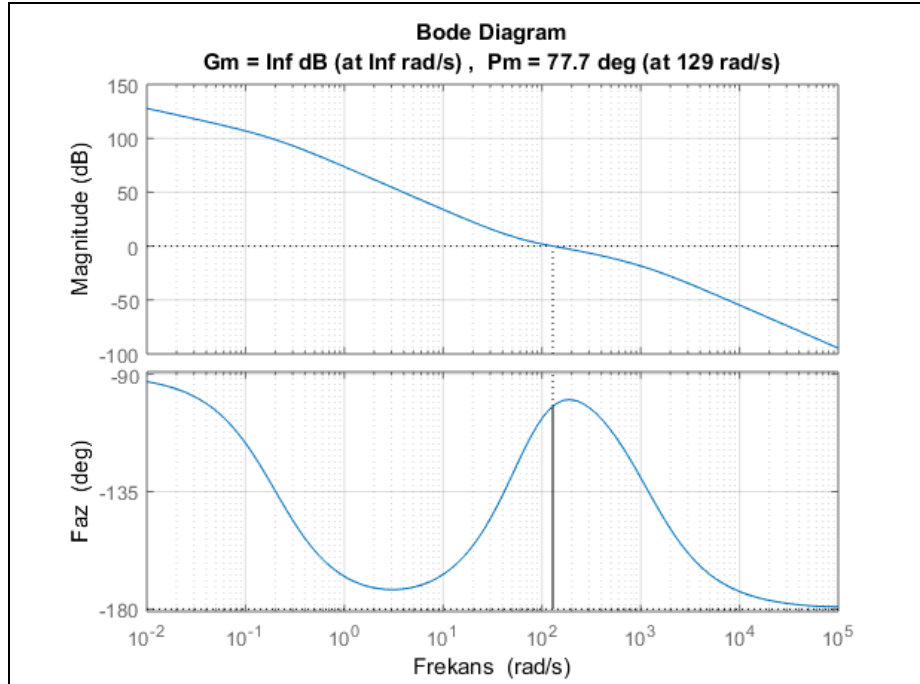
Parametre	Yandönme Eksen	Yunuslama Eksen
ω_0	0,2	0,2
ω_1	70	70
ω_c	400	250
ω_2	430	300
ω_n	15	15
ξ	0,707	0,707

Tablo 5.9’da verilen ω_0 frekans değeri kalıcı durum hatasını sınırlamak için, ω_1 frekans değeri ω_0 ve ω_c frekansları arasında çevrim kazancının yumuşak bir geçiş yapması için kullanılmakta olup zorunlu değildir, ω_c frekans değeri bant genişliğini ayarlamak için ω_2 frekans değeri ise faz kazancı sağlamak için kullanılmaktadır. İdeal bir çevrim kazancı integral fonksiyonun gibidir. Çevrim kazancı şekillendirilirken Tablo 5.9’da verildiği gibi bant genişliği 15 [Hz] ve sönüm oranı 0,707 olan bir sistemin çevrim kazancı kullanılmaktadır. Bu sistemin çevrim kazancı ilgili 4 noktadan bükülerek kontrolcü başarımı artırılmaya çalışılmaktadır.

Tablo 5.9’da verilen değerler göz önüne alınarak yandönme eksenini için çevrim kazancı Şekil 5.45’teki gibi yeniden şekillendirilmektedir.

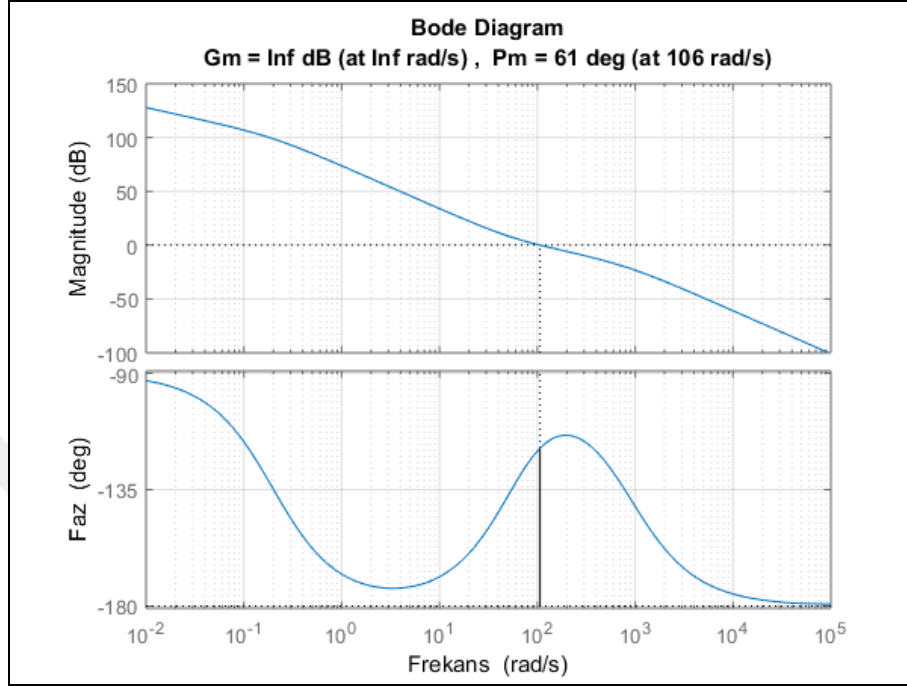
Yunuslama eksenini için çevrim kazancı ise Tablo 5.9’da verilen değerler göz önüne alınarak Şekil 5.46’daki gibi yeniden şekillendirilmektedir.

Şekil 5.45 ve Şekil 5.46 verilen G_m genlik kazancını, P_m ise faz kazancını ifade etmektedir. Grafikler incelenirse çevrim kazançlarının fazlarının -180 [°] değerini kesmediği görülmektedir. Bu sebeple de teorik olarak genlik kazancının sonsuz olduğu ifade edilmektedir.



Şekil 5.45. Yandönme eksenine ait çevrim kazancının Bode diyagramı

Şekil 5.45 ve Şekil 5.46 incelendiğinde yandönme ekseninde 77,7 [°] ve yunuslama ekseninde ise 61 [°] faz kazancı elde edilmektedir. H_∞ kontrolcü tasarımı da bahsedildiği üzere faz kazancının yaklaşık 30-60 [°] arasında olması arzu edilir.



Şekil 5.46. Yunuslama eksenine ait çevrim kazancının Bode diyagramı

Tablo 5.9’da verilen tasarım parametreleri ile yandönme eksenini için (5.50) numaralı denklemdeki gibi bir kontrolcü tasarımı yapılmaktadır.

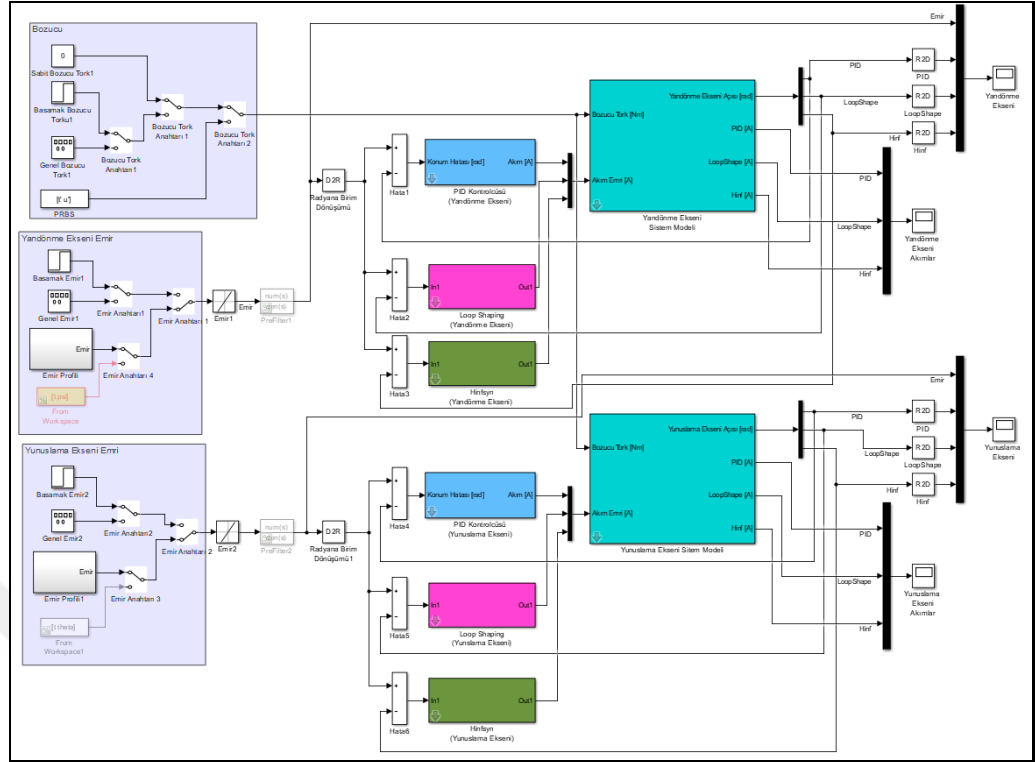
$$K_{L_ic} = \frac{3.582e04s^4 + 5.108e06s^3 + 1.889e08s^2 + 5.098e08s + 1.922e09}{s^4 + 1322s^3 + 1.852e05s^2 + 3.698e04s} \quad (5.50)$$

Yunuslama eksenini için ise Tablo 5.9’da verilen tasarım parametreleri göz önüne alınarak (5.51) numaralı denklemdeki gibi bir kontrolcü tasarımı yapılmaktadır.

$$K_{L_dis} = \frac{4833s^4 + 6.867e05s^3 + 2.511e07s^2 + 5.121e07s + 6.466e07}{s^4 + 812.7s^3 + 6.266e04s^2 + 1.25e04s} \quad (5.51)$$

5.3. Bilgisayar Benzetimlerinin Karşılaştırılması

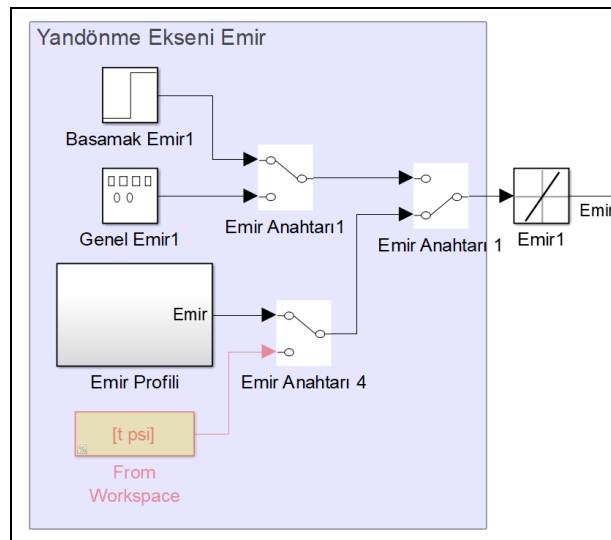
Bilgisayar benzetimleri yapılırken MATLAB® Simulink ortamında Şekil 5.47’de verilen bütün kontrolcülerin çıktılarının aynı anda görülebileceği ortak bir blok şeması oluşturuldu.



Şekil 5.47. Kontrolcü benzetimleri için hazırlanan Simulink yapısı - genel

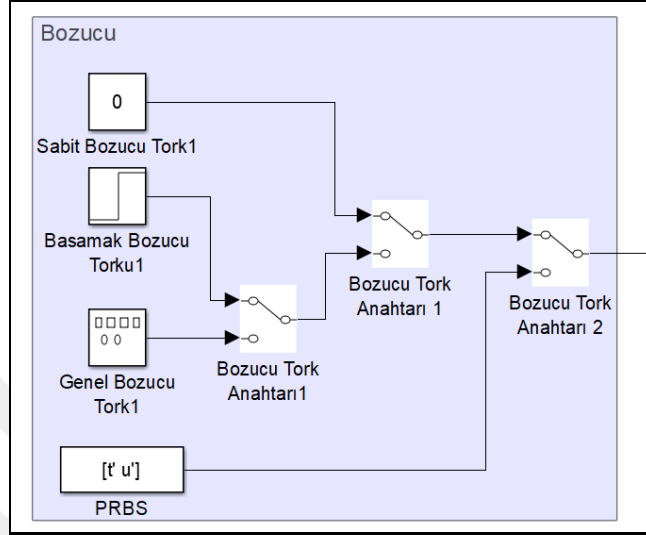
Şekil 5.47’de görülebileceği gibi her iki eksen için de tasarımı yapılan üçer farklı kontrolcü aynı sistemlere uygulanarak aynı koşullarda çıktıları gözlemlenmektedir.

Genel kontrol yapısında farklı emirleri uygulamak ve çıktılarını görmek için Şekil 5.48’deki gibi birkaç blok modele eklenmektedir.



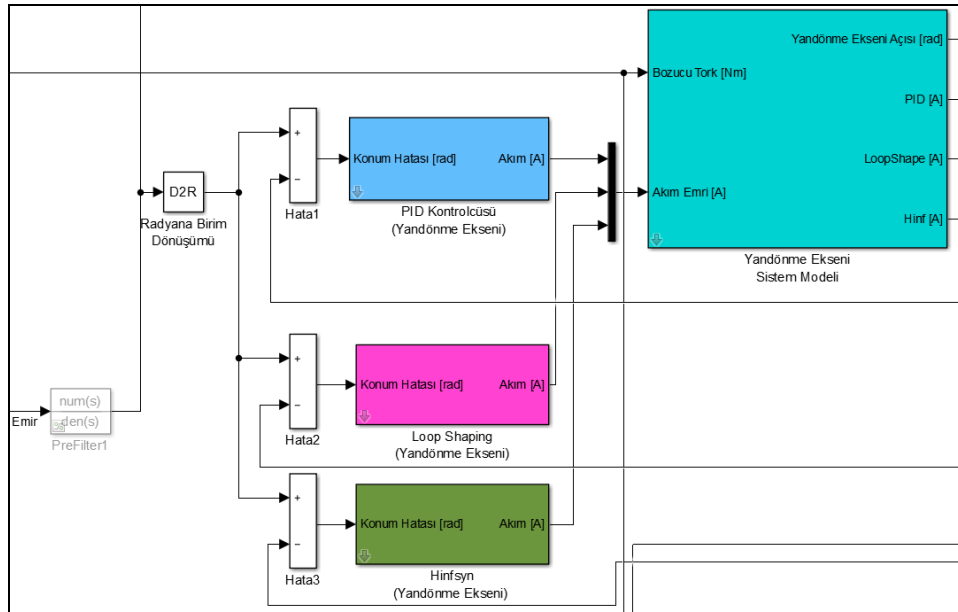
Şekil 5.48. Kontrolcü benzetimleri için hazırlanan Simulink yapısı – emir

Şekil 5.49’da ise bozucu torkların etkisini görebilmek üzere sistem bloklarının ilgili kısımlarına bir bozucu tork girişi eklenmektedir. Bozucu tork etkilerini farklı durumlarda da görebilmek için birkaç kaynak daha blok şemasına bağlı bulunmaktadır.



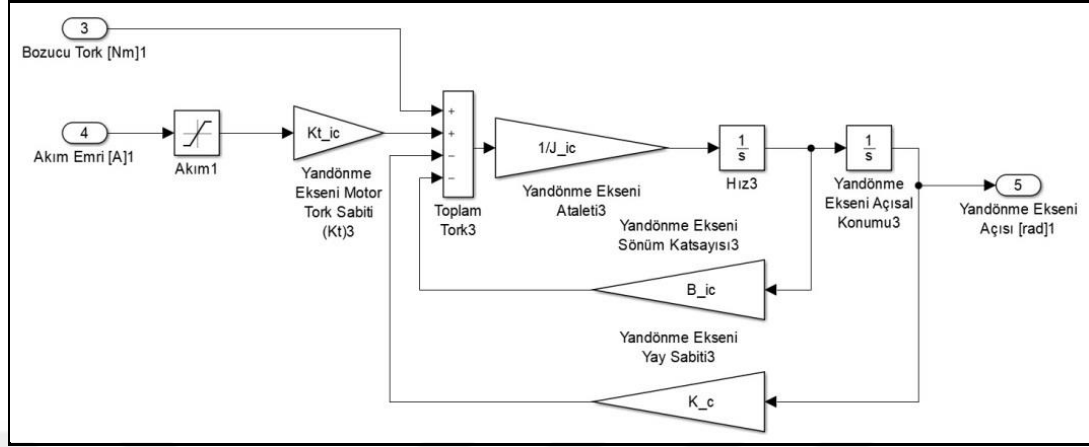
Şekil 5.49. Kontrolcü benzetimleri için hazırlanan Simulink yapısı – bozucu torklar

Şekil 5.50’de ise yandönme eksenini sistem modeli ile yandönme eksenini için tasarımı yapılan kontrolcülerin blok bağlantıları verilmektedir.



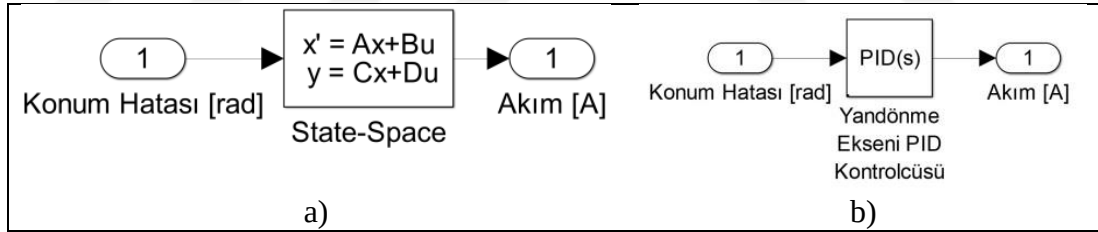
Şekil 5.50. Kontrolcü benzetimleri için hazırlanan Simulink yapısı – yandönme eksenini kontrolcülerini

Şekil 5.51’de yandönme eksenine ait blok şeması verilmektedir. Yunuslama ekseninde benzer şekilde kendi sistem parametreleri kullanılarak oluşturulmaktadır.



Şekil 5.51. Yandönme eksenli sistem modeli

Kontrolcü blokları ise Şekil 5.52’de gösterildiği gibi kullanılmaktadır. H_∞ kontrolcü ve çevrim kazancının şekillendirildiği kontrolcüler uygulanırken Şekil 5.52-a’da görüldüğü gibi durum uzayı gösterimi tercih edilirken PID kontrolcü uygulanırken Şekil 5.52-b’deki gibi hazır PID bloğu kullanılmaktadır.



Şekil 5.52. H_∞ kontrolcü (a) ve PID kontrolcü (b) Simulink blokları

Bu aşamaya kadar PID, H_∞ ve çevrim kazancının şekillendirilmesine dayanan üç farklı tipte kontrolcü tasarlandı. Kontrolcülerin başarımlarını karşılaştırmak için Tablo 5.10’da verilen özelliklerde bir emir profili kullanılmaktadır. Tablo 5.10’da verilen basamak emirlerin Tablo 3.4’te verildiği gibi ± 75 °/s olacak şekilde hızları sınırlandırılmaktadır. Test emiri her iki eksen içinde aynı anda aynı şekilde uygulanmaktadır.

Tablo 5.10. Test emir profili

Zaman (t)	Açı Değeri [°]
[0,0-0,5)	0
[0,5-2,0)	10
[2,0-2,5)	0
[2,5-4,0)	-10
[4,0-5,0)	0
[5,0-7,0)	$10\sin(2\pi)$
[7,0-8,0]	0

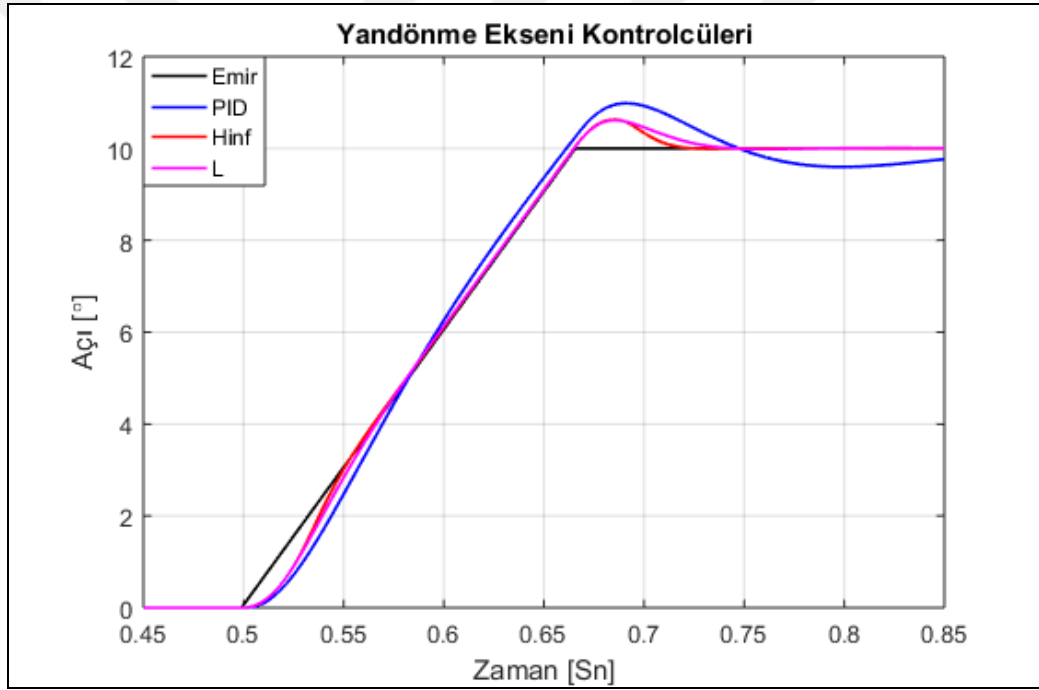
Test emrine karşılık yandönme eksenini için tasarlanan kontrolcülerin cevabı Şekil 5.53'te verilmektedir. Test emrine karşı kontrolcü cevapları incelendiğinde en kötü cevabı PID kontrolcünün verdiği görülmektedir. Bunun en önemli sebebi yandönme eksenini için tasarlanan PID kontrolcünün istenen başarımlarda tasarlanamamasıdır.



Şekil 5.53. Test emrine karşı kontrolcü çıktıları (yandönme eksenini)

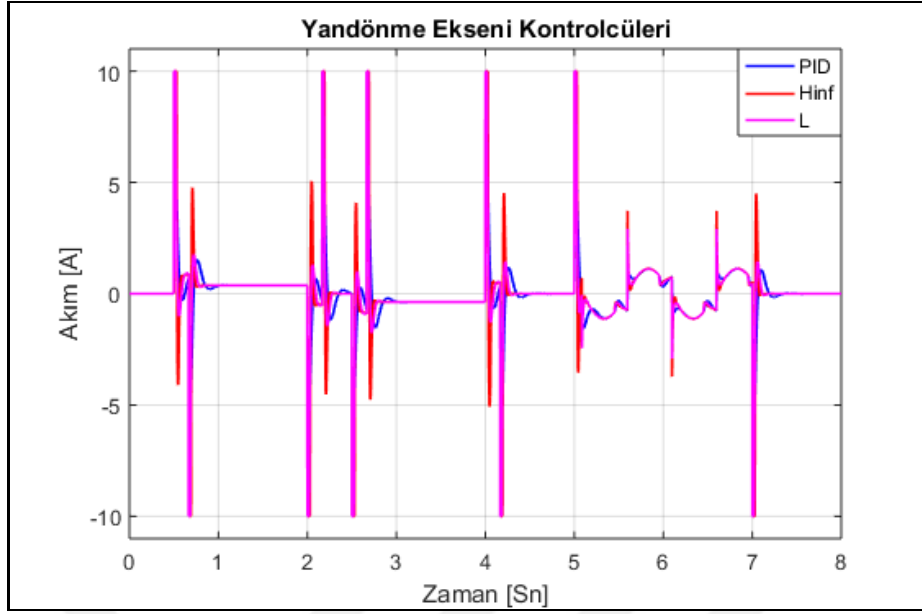
Kontrolcülerin test emirlerine verdiği cevaplar incelenirken özellikle basamak emre karşı davranışları incelenmektedir; zira sinüs emre karşı bozucu etki olmadığı durumda kontrolcülerin hepsinin başarımı iyi olup birbirine çok yakındır. Bu tez kapsamında test emrinde hız limiti olduğu için gönderilen basamak emri rampa halini almaktadır; ancak anlatım kolaylığı açısından bu noktalar için de basamak emir ifadesi kullanılacaktır.

Test emrinin Şekil 5.54'te verilen yakınlaştırılmış bölgesi incelenirse H_∞ kontrolcü ile çevrim şekillendiren kontrolcü birbirine yakın cevaplar vermektedir. Çevrim şekillendiren kontrolcünün çok az da olsa H_∞ kontrolcüsüne göre daha erken emir değerine oturduğu görülmektedir.



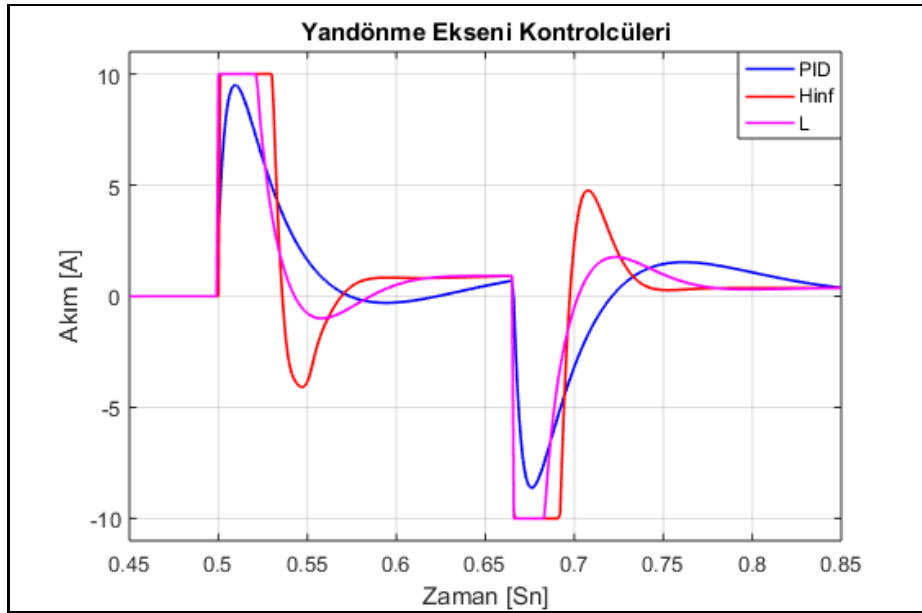
Şekil 5.54. Test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yandönme eksen)

Kontrolcülerin başarımları incelenirken ürettikleri kontrol sinyallerinin de incelenmesi oldukça önemlidir. Şekil 5.55'te kontrolcülerin akım gereksinimleri verilmektedir.



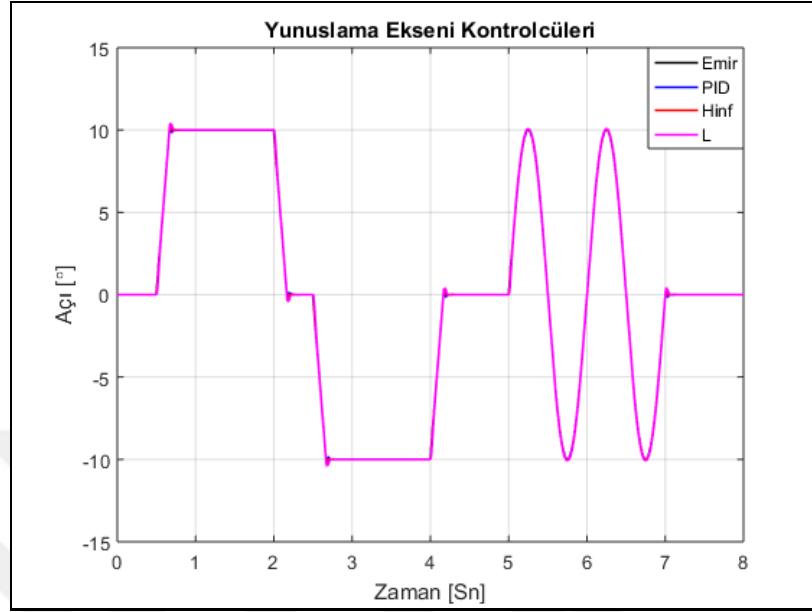
Şekil 5.55. Test emrine karşı akım gereksinimleri (yandönme eksen)

Şekil 5.54’te kontrolcü cevaplarının incelendiği noktada kontrolcülerin ne kadar akıma gerek duyduğu Şekil 5.56’da görülmektedir. Açık emrine H_{∞} ve çevrim şekillendiren kontrolcülerin çok benzer bir cevap verdiği görülmesine rağmen o noktada çevrim şekillendiren kontrolcünün daha kısa süreli olarak maksimum akımı çektiği görülmektedir. Bu da çevrim şekillendiren kontrolcüyü ön plana çıkarmaktadır.



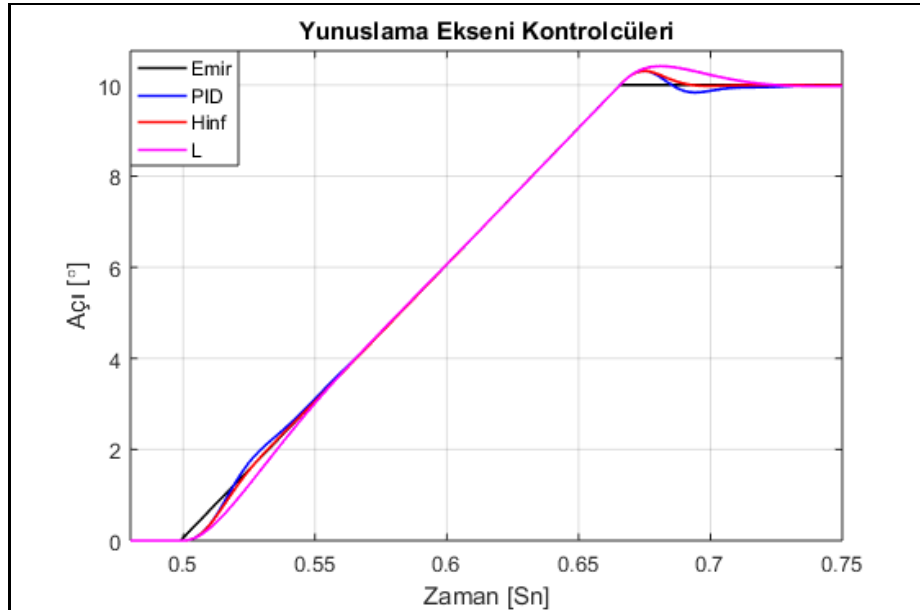
Şekil 5.56. Test emrine karşı akım gereksinimleri (+10 [°] bölgesi yakınlştırılmış) (yandönme eksen)

Test emrine karşılık yunuslama ekseni için tasarlanan kontrolcülerin açı cevabı ise Şekil 5.57’de verilmektedir.



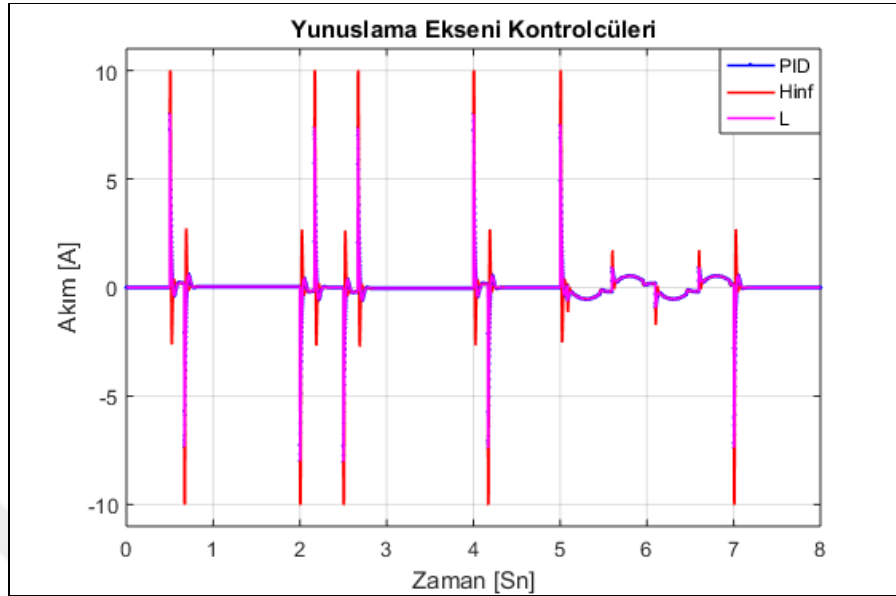
Şekil 5.57. Test emrine karşı kontrolcü çıktıları (yunuslama ekseni)

Kontrolcülerin test emirlerine verdiği cevaplar Şekil 5.58’deki gibi yakından incelenirse en iyi cevabı emre daha kısa sürede oturması sebebi ile H_{∞} kontrolcüsü vermektedir.



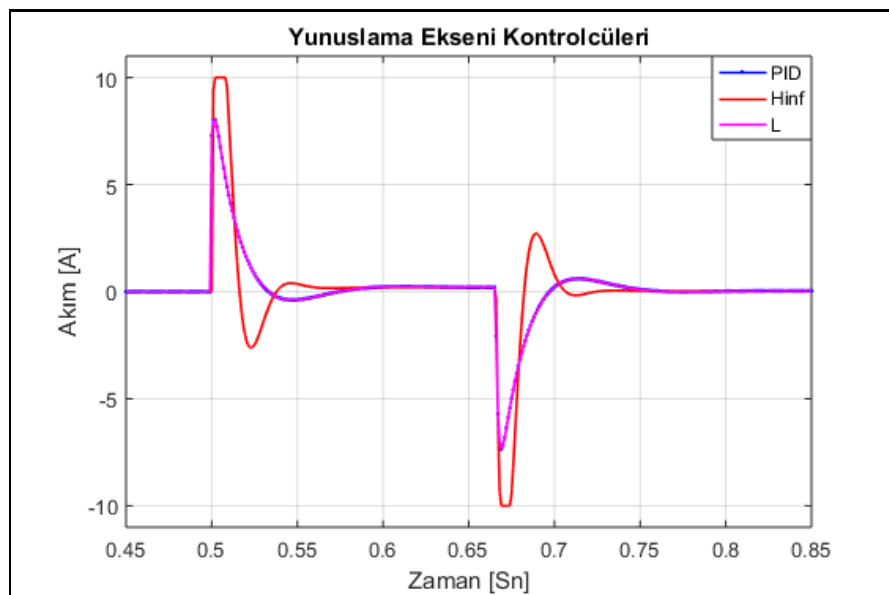
Şekil 5.58. Test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yunuslama ekseni)

Yunuslama eksen kontrolcülerinin test emri boyunca gerektirdiği akımlar Şekil 5.59'da verilmektedir.



Şekil 5.59. Test emrine karşı akım gereksinimleri (yunuslama eksen)

Basamak emrin incelendiği noktadaki kontrolcü akımları Şekil 5.60'daki gibi incelenirse PID kontrolcü ile çevrim şekillendiren kontrolcü için benzer şekildedir. Bu sebeple emre hızlı oturması ve daha kısa süreli maksimum akım çekmesi durumu göz önüne alınırsa yunuslama eksen için en iyi cevabı çevrim şekillendiren kontrolcü sağlamaktadır.



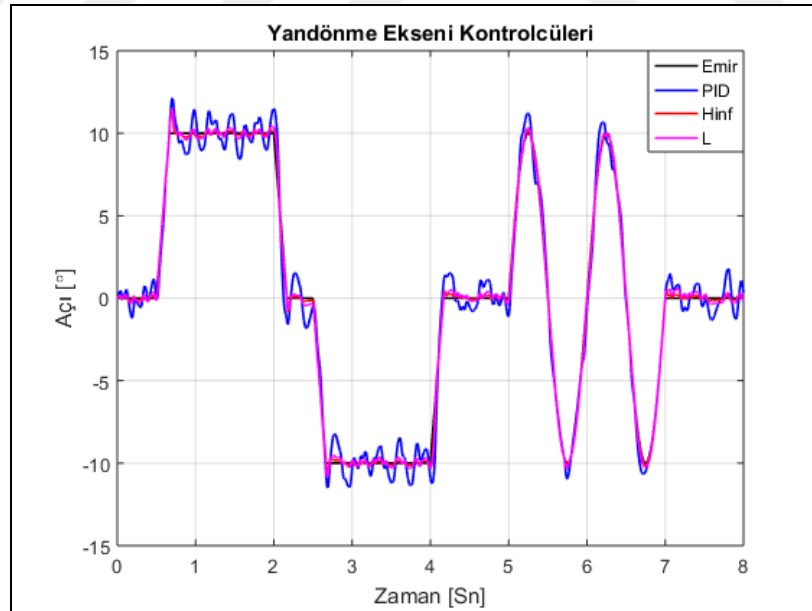
Şekil 5.60. Test emrine karşı akım gereksinimleri (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yunuslama eksen)

Kontrolcü başarımlarının aynı zamanda önceki bölümlerde anlatıldığı üzere bozucu etkiler altında da değerlendirilmelidir. Bozucu torklar yaklaşık olarak 3.1.3.8 numaralı bölümde hesaplanmaktadır. Bu bilgiler ışığında bozucu torklar benzetimde Tablo 5.11’de verilen özelliklerde PRBS sinyali olarak modellenmektedir. Sisteme gelen bozucu etkilerin en fazla 100 [Hz] olacağı kabul edilerek bozucu tork sinyali o frekansta kesilerek uygulanmaktadır.

Tablo 5.11. Bozucu tork modelinin özellikleri

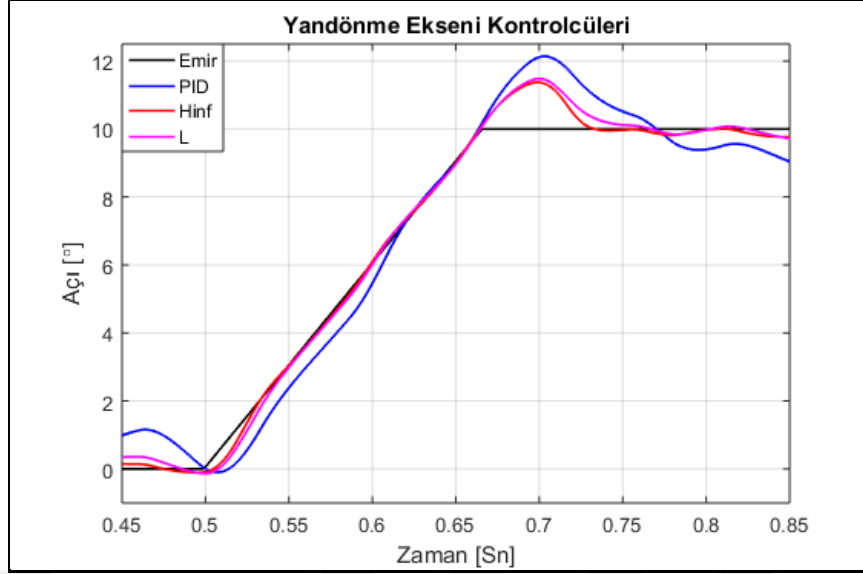
Parametre	Değeri
Genlik [Nm]	0,15
Kesme Frekansı [Hz]	100

Tablo 5.11’de verilen bozucu sisteme uygulandığında yandönme eksenini kontrolcülerin cevapları Şekil 5.61’deki gibi gerçekleşmektedir. Şekil 5.61’de de görüldüğü üzere PID kontrolcüsü bozucu girişe karşı bu tasarım kapsamında gürbüz değildir.



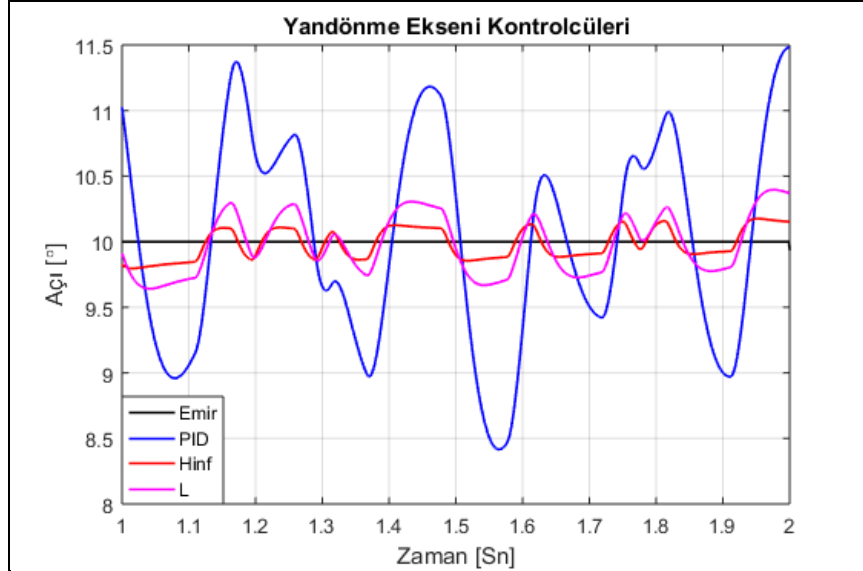
Şekil 5.61. PRBS bozucu etkiler altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (yandönme eksenini)

Basamak emre karşı H_{∞} kontrolcü ve çevrim şekillendiren kontrolcünün Şekil 5.62’de görüldüğü gibi gürbüz olduğu değerlendirilmektedir.



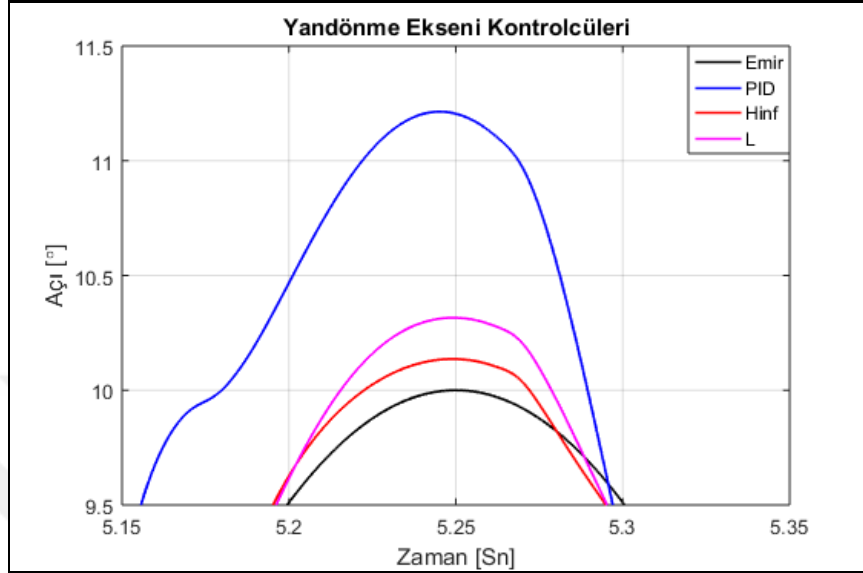
Şekil 5.62. PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yandönme eksenini)

Kontrolcülerin özellikle eksenleri sabit tutarken bozucu girişe karşı verdiği cevabı incelemek kontrolcülerini değerlendirmek hususunda daha fazla bilgi verebilmektedir. Şekil 5.63'te kontrolcülerin belirli bir açıda bozucu girişe verdiği cevapları gösterilmektedir. Şekil 5.63 incelendiğinde H_{∞} kontrolcünün bozucu girişten en az etkilenen kontrolcü olduğu görülmektedir.



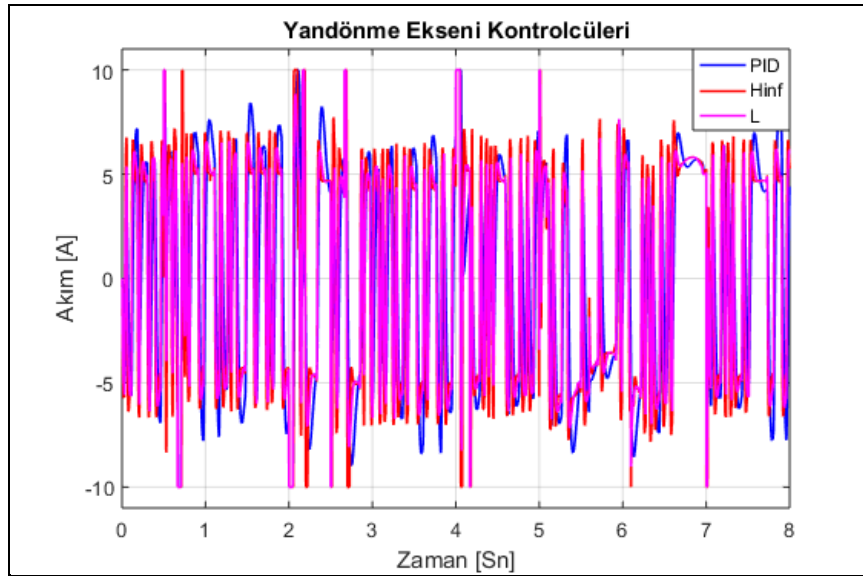
Şekil 5.63. PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] sabit bölgesi yakınlaştırılmış) (yandönme eksenini)

Bozucu girişler altında test emirlerindeki sinüs profillerde yandönme kontrolcülerinin davranışları ise Şekil 5.64'te gösterilmektedir. PID kontrolcünün diğer kontrolcülere göre başarımının biraz daha kötü olduğu görülmektedir.



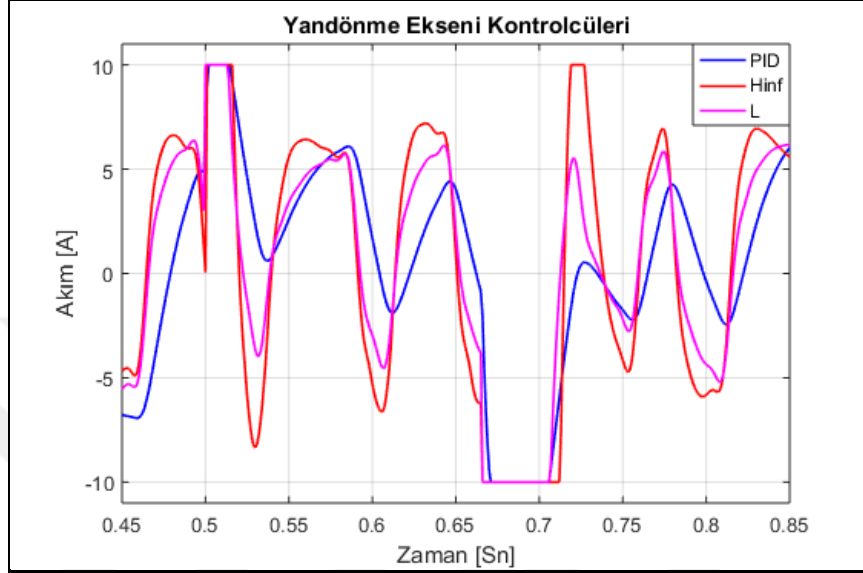
Şekil 5.64. PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (sinüs maksimum bölgesi yakınlaştırılmış) (yandönme eksen)

Yandönme eksen kontrolcülerinin test emri boyunca bozucu girişlere rağmen gerektirdiği akımlar Şekil 5.65'te verildiği gibidir.



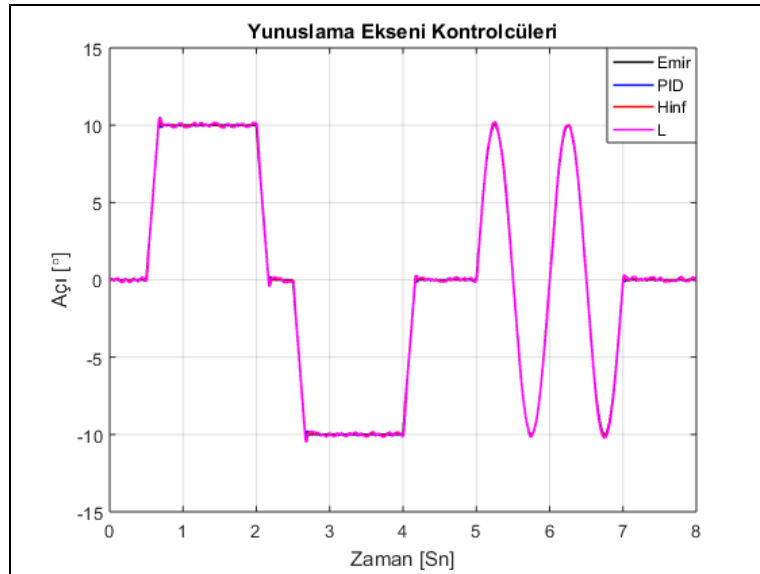
Şekil 5.65. PRBS bozucu altında test emrine karşı akım gereksinimi (yandönme eksen)

Yandönme eksenini kontrolcülerinin bozucu altında basamak emrinin incelendiği noktadaki akımları ise Şekil 5.66'da verilmektedir. PID kontrolcünün ve çevrim şekillendiren kontrolcünün maksimum akımları H_∞ kontrolcüye göre daha kısa gerektirdiği görülmektedir.



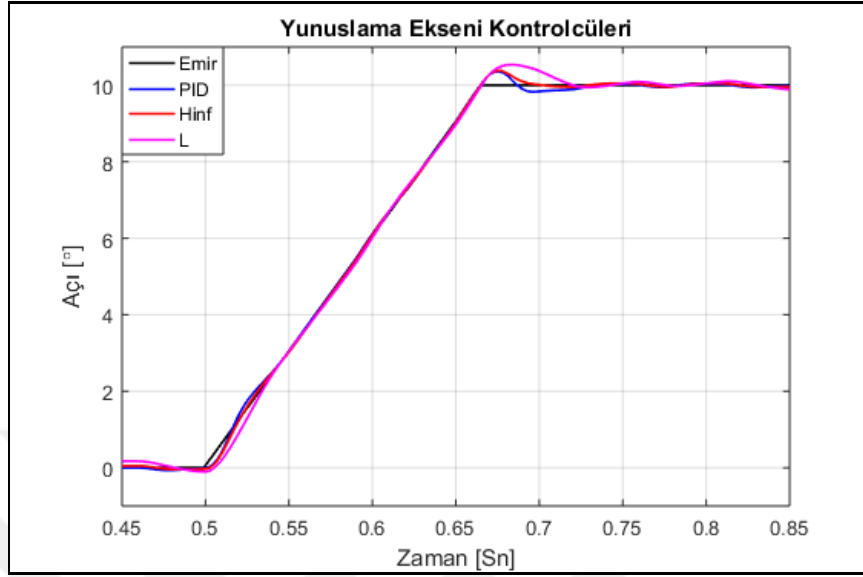
Şekil 5.66. PRBS bozucu altında test emrine karşı akım gereksinimi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırmıştır) (eandönme eksenini)

Tablo 5.11'de verilen bozucu sisteme uygulandığında yunuslama eksenini kontrolcülerinin cevapları Şekil 5.67'deki gibi gerçekleşmektedir.



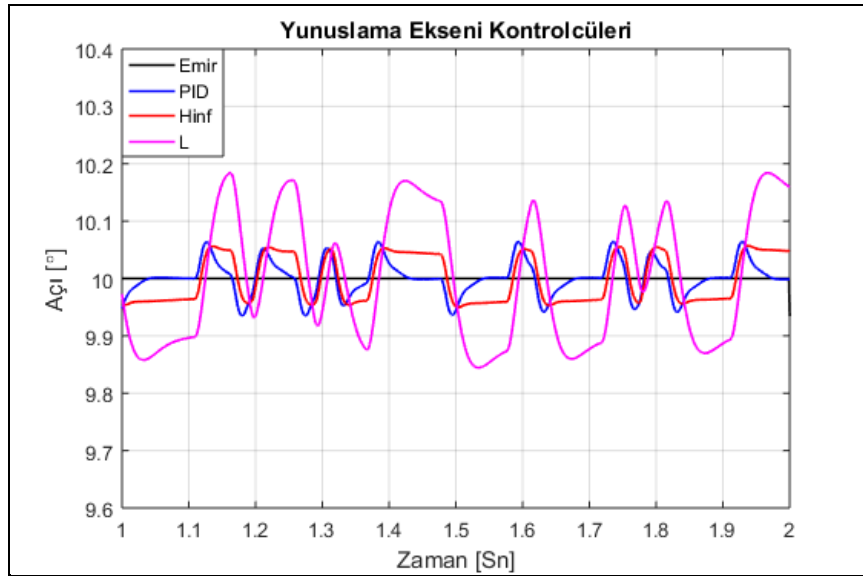
Şekil 5.67. PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (yunuslama eksenini)

Şekil 5.68 incelendiğinde H_∞ kontrolcüsünün diğer kontrolcülere karşı daha kısa oturma süresine sahip olduğu görülmektedir.



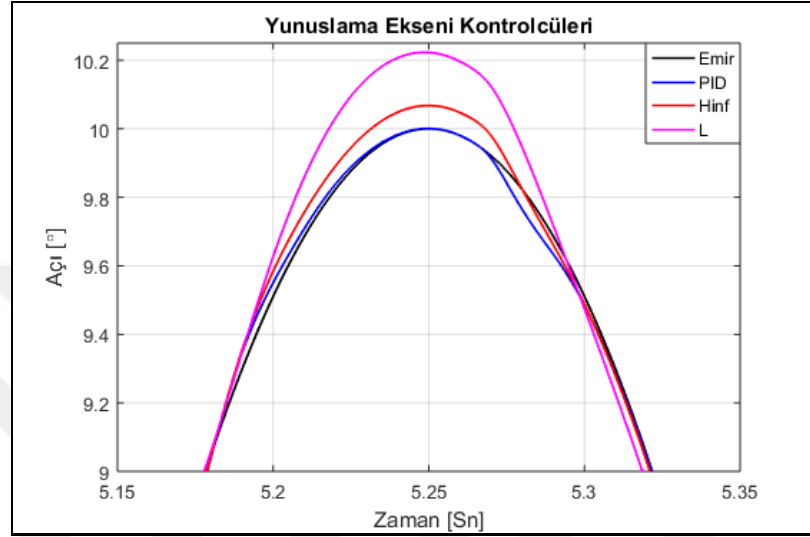
Şekil 5.68. PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış) (yunuslama eksen)

Yandönme eksenine benzer şekilde yunuslama ekseninde de eksenin belirli bir açıda sabit dururken bozucu girişe karşı cevabı Şekil 5.69'da incelenmektedir. H_∞ kontrolcüsünün diğer kontrolcülere göre daha gürbüz olduğu görülmektedir.



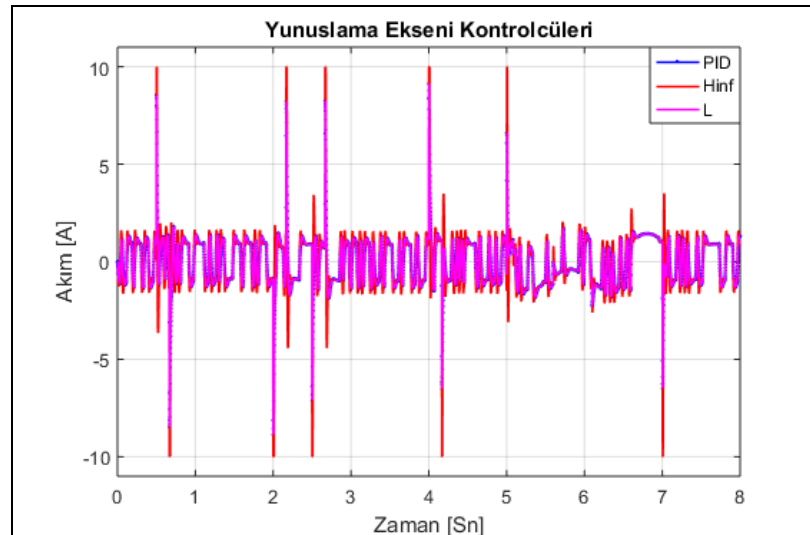
Şekil 5.69. PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (+10 [°] sabit bölgesi yakınlaştırılmış) (yunuslama eksen)

Yunuslama eksenindeki sinüs emri profillerine karşı kontrolcü cevapları Şekil 5.70’de yakınlştırılarak verilmektedir. Bütün kontrolcülerin benzer cevaplar verdiği görölmektedir. Yunuslama eksenini cevapları yandönme eksenini cevaplarına göre daha iyi görölmektedir. Bunun sebebi yunuslama ekseninde kullanılan motorun diğeri eksene göre çok daha güçlü ve daha uygun olmasıdır.



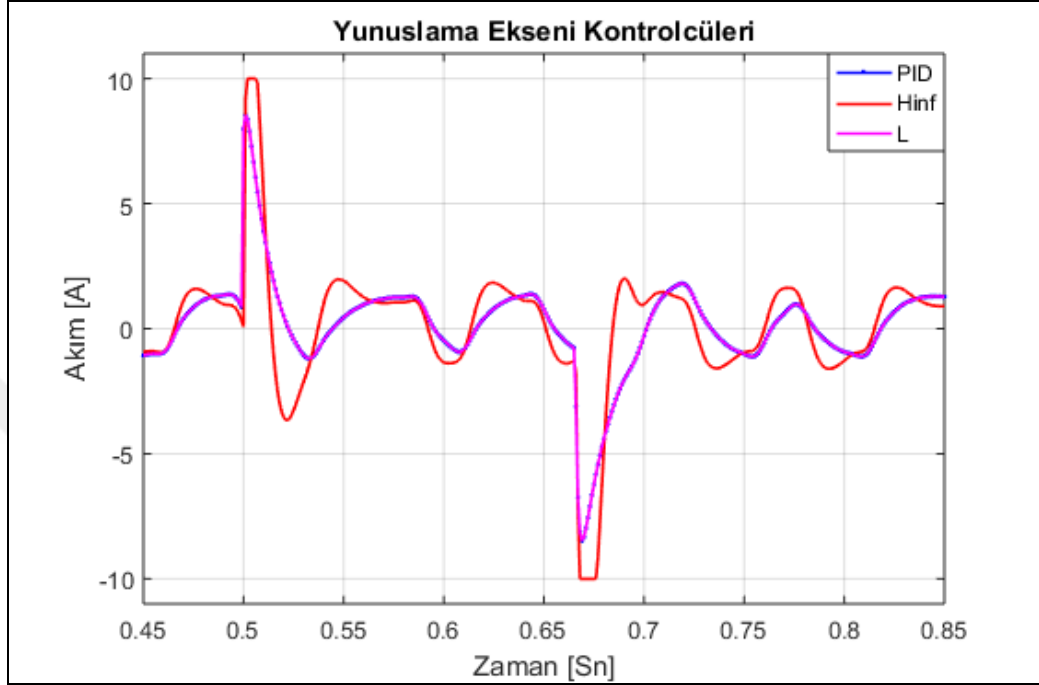
Şekil 5.70. PRBS bozucu altında test emrine karşı kontrolcü çıktıları (sinüs maksimum bölgesi yakınlştırılmış) (yunuslama eksenini)

Şekil 5.71’te yunuslama ekseninin test emri boyunca çektiğı akımlar verilmektedir.



Şekil 5.71. PRBS bozucu altında test emrine karşı akım gereksinimi (yunuslama eksenini)

Yunuslama ekseninde PID ve çevrim şekillendiren kontrolcüler Şekil 5.72'deki gibi maksimum akımları daha kısa süre çekmektedir. H_{∞} kontrolcüsünün maksimum akımları daha uzun süre çekmesine karşın daha gürbüz olduğu görülmektedir.



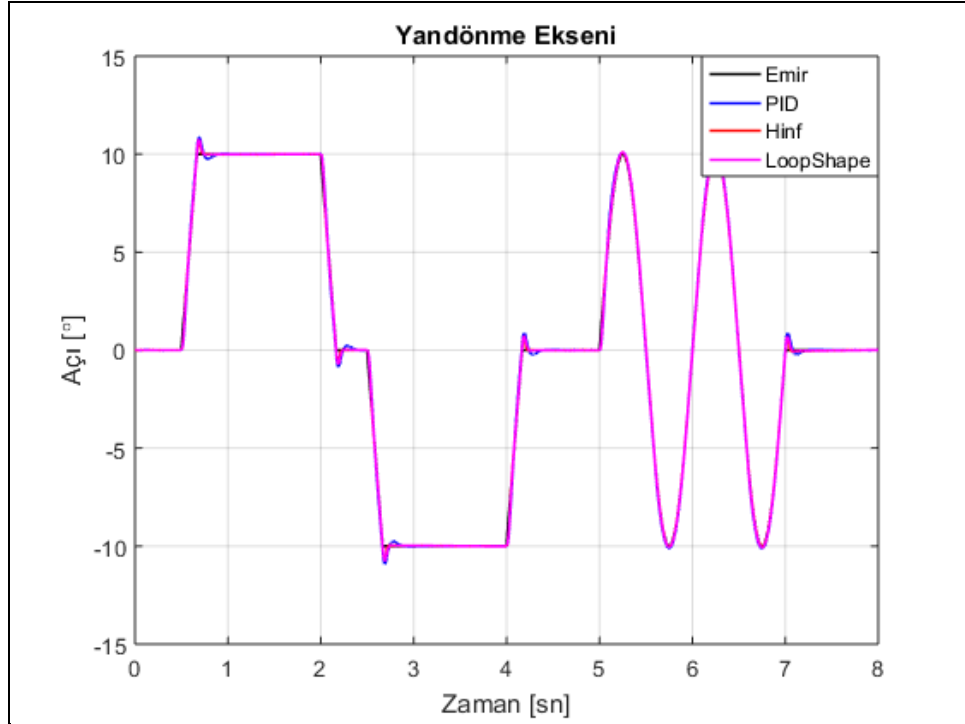
Şekil 5.72. PRBS bozucu altında test emrine karşı akım gereksinimi (+10 [°] bölgesi yakınlştırılmış) (yunuslama eksen)

Benzetimlerde ve masaüstü denemelerde motorlar maksimum akımları kısa süreli çekebilir; ancak gerçek harekât ortamında dışarıdan gelecek bozucular ile motorların daha çok doyumda kalması söz konusu olabilir. Bu sebeple tasarlanan kontrolcüler dış bozucu etkisi altında olmadığı durumlarda maksimum akım değerlerini görmemelidir. Bu tez kapsamında kontrolcü başarımlarının ve eksenlerin kabiliyetlerinin daha iyi görülmesi için kontrolcülerin bir miktar maksimum akımı çekmesine izin verilmektedir.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

Bilgisayar benzetimleri ile gerçek zamanlı kontrol uygulamaları arasında bazı farklılıklar olması kaçınılmazdır. Benzetimlerde sürekli zamanlı sistemler ve kontrolcüler kullanıldı. Buna karşın gerçek zamanlı uygulamalarda ise ayrık zamanlı kontrolcüler kullanıldı. Gerçek zamanlı uygulamalarda motorlar endüstriyel sürücüler ile sürülürken benzetimlerde sürücüler modellenmemektedir. Bu sebeple Motor sürücülerinden gelecek kayıp ve gürültüler mevcuttur. Bunun yanında gerek test düzeneği kablağı gerekse çevresel etmenler sebebi ile de gürültü oluşumu söz konusudur. Benzetimler ile gerçek zamanlı uygulamanın bir diğer farklılığı ise kütle kaçıklığı hususudur. Kontrolcü benzetimlerinde herhangi bir kütle kaçıklığı olmadığı kabul edilirken test düzeneğinde gerek üretim kaynak gerekse bütünlemeden dolayı kütle kaçıklıkları mevcuttur.

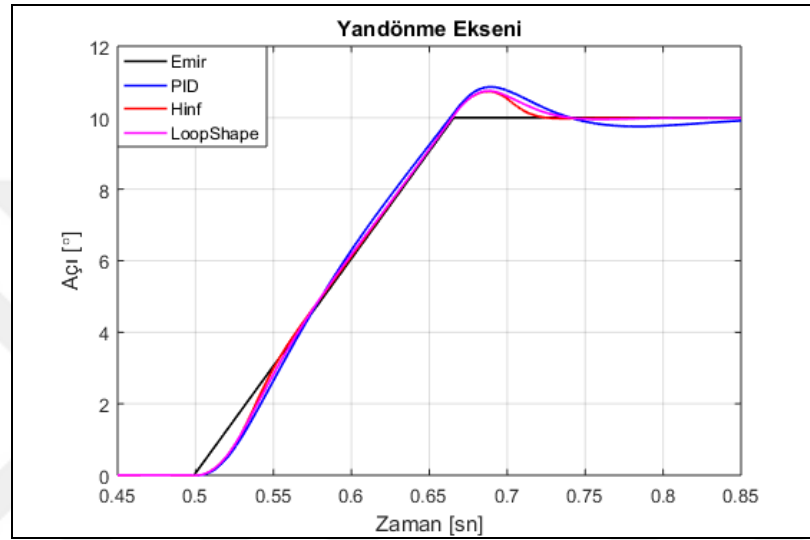
Yandönme eksenini için gerçek zamanlı test emirine karşı kontrolcülerin verdiği açı cevapları Şekil 6.1’de verilmektedir.



Şekil 6.1. Gerçek zamanlı emir takibi

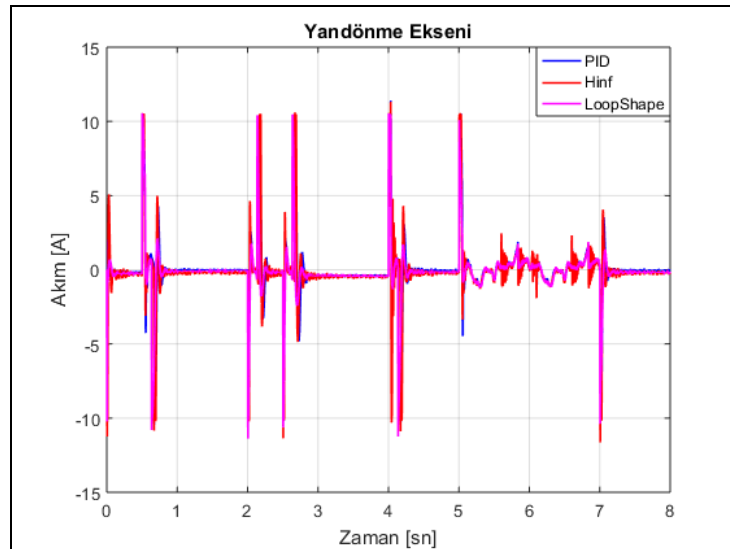
Kontrolcülerin test emrine verdiği cevaplar, benzetimlerde olduğu gibi ilk basamak emrinin gerçekleştiği noktada daha yakından Şekil 6.2’deki gibi incelenebilmektedir.

Şekil 6.2’de görüldüğü üzere iyi cevabı en az salınımla en hızlı şekilde emre oturan H_{∞} kontrolcüsü vermektedir. Çevrim şekillendiren kontrolcü ise bu noktada H_{∞} kontrolcüsüne oldukça yakın bir davranış göstermektedir. PID kontrolcüsü ise emre diğer kontrolcülere göre daha geç bir şekilde oturmaktadır.



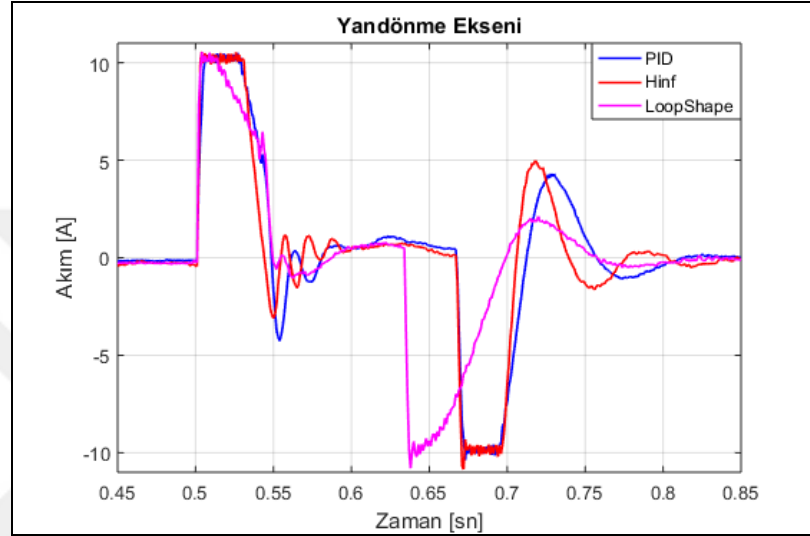
Şekil 6.2. Gerçek zamanlı emir takibi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)

Yandönme eksenini için test emri boyunca kontrolcülerin tükettiği akımlar ise Şekil 6.3’te verilmektedir.



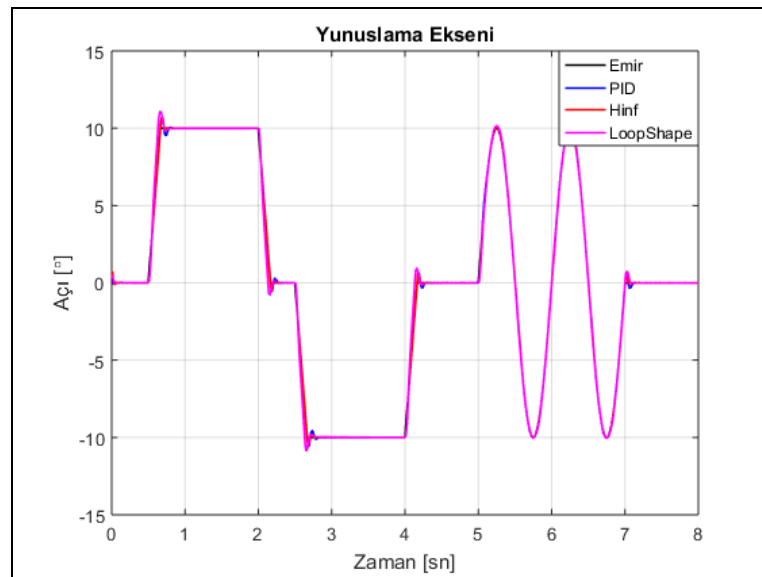
Şekil 6.3. Gerçek zamanlı akım tüketimi

Şekil 6.2’de incelenen basamak emrinin gerçekleştirildiği noktada yandönme ekseni için tasarlanan kontrolcülerin tükettiği akımlar Şekil 6.4’te verilmektedir. Şekil 6.4 göstermektedir ki H_{∞} kontrolcüsü ile PID kontrolcüsü benzer akımlar tüketmektedir. Buna karşın çevrim şekillendiren kontrolcü ise daha az akım tüketmektedir. Ayrıca çevrim şekillendiren kontrolcü ile akım doyumunun da daha kısa süreli olduğu gözlemlenmektedir.



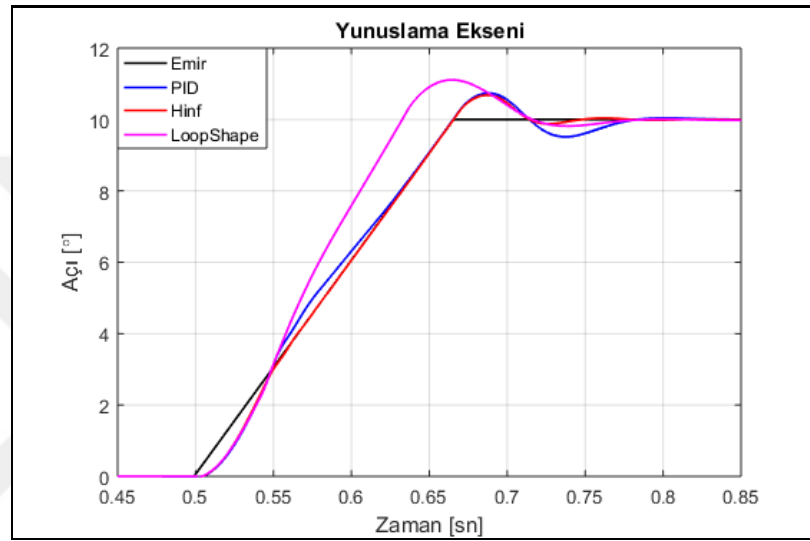
Şekil 6.4. Gerçek zamanlı akım tüketimi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)

Yunuslama ekseni için gerçek zamanlı test emrine karşı kontrolcülerin verdiği açı cevapları Şekil 6.5’te verilmektedir.



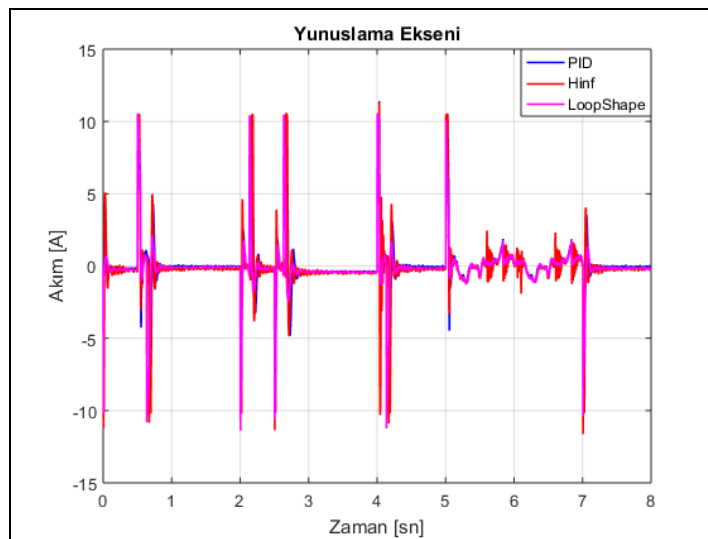
Şekil 6.5. Gerçek zamanlı emir takibi

Yandönme eksenindeki gibi aynı şekilde yunuslama ekseninde de ilk basamak emri noktası Şekil 6.6'daki gibi incelenebilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre PID ve H_{∞} kontrolcüsü daha az üst aşım (overshoot) yaparken çevrim şekillendiren kontrolcü daha fazla üst aşım yapmaktadır. Buna karşın çevrim şekillendiren kontrolcü ve H_{∞} kontrolcüsü emre daha hızlı oturmaktadır. Bu sonuçlarda test emrinin bu noktasında açıcı cevabı olarak H_{∞} kontrolcüsü diğer kontrolcülere göre en uygun cevabı vermektedir.



Şekil 6.6. Gerçek zamanlı emir takibi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)

Yunuslama ekseninde için test emri boyunca kontrolcülerin tükettiği akımlar ise Şekil 6.7'de verilmektedir.



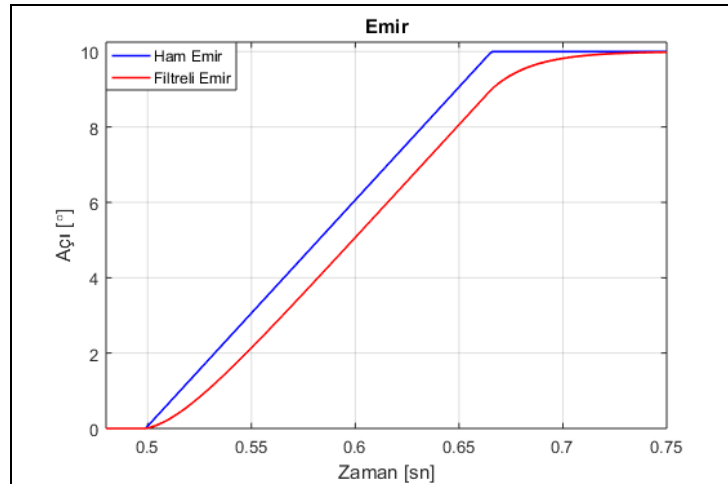
Şekil 6.7. Gerçek zamanlı akım tüketimi

Şekil 6.6’da incelenen basamak emrinin gerçekleştirildiği noktada yandönme eksenini için tasarlanan kontrolcülerin tükettiği akımlar Şekil 6.8’de verilmektedir. Şekil 6.8 göstermektedir ki H_{∞} kontrolcüsü, PID kontrolcüye göre daha iyi açı cevabı vermesine karşın bu ekseninde de daha çok akım tüketimi gerçekleştirmektedir. Buna karşın çevrim şekillendiren kontrolcü ise daha az akım tüketmektedir. Ayrıca çevrim şekillendiren kontrolcü ile akım doyumunun da daha kısa süreli olduğu gözlemlenmektedir.



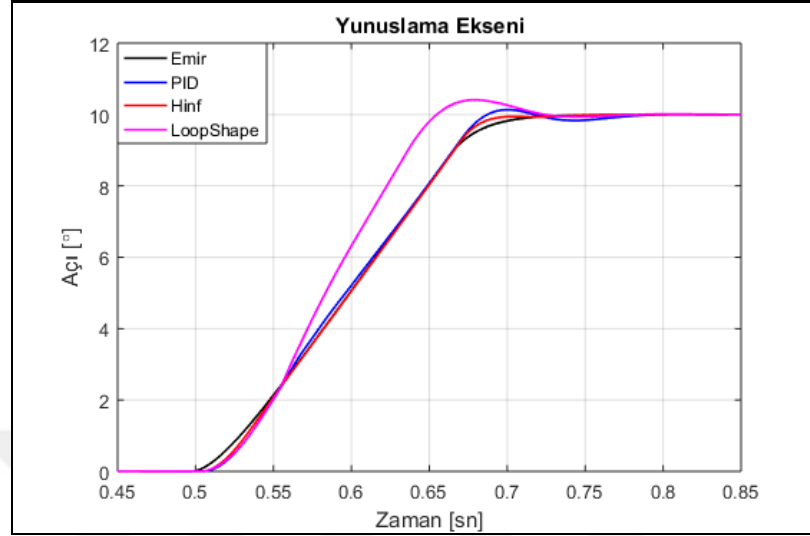
Şekil 6.8. Gerçek zamanlı akım tüketimi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)

Gerçek zamanlı uygulamalarda sisteme gönderilen emirler ile sistemin ani tepkiler vermesi istenmiyorsa test emirlerinin köşe noktaları Şekil 6.9’daki gibi filtrelenerek yumuşatılabilmektedir.



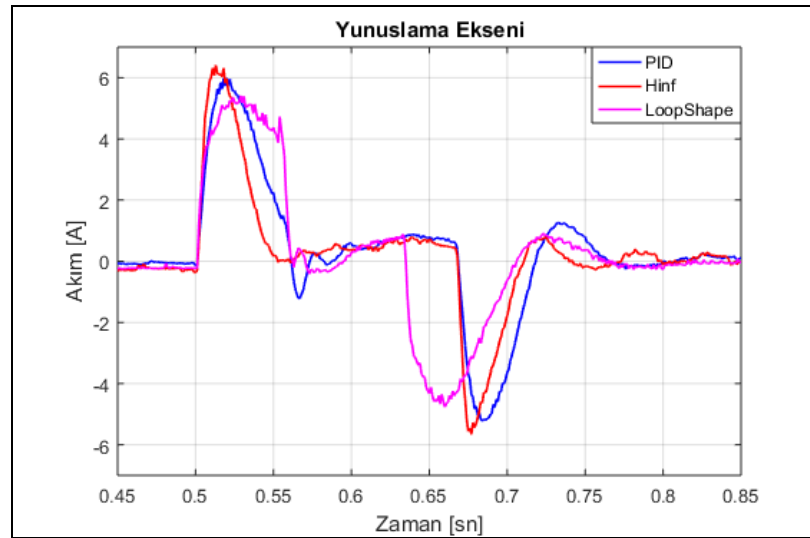
Şekil 6.9. Fitrelenmiş referans emir

Test emrindeki bu filtreleme Şekil 6.10'da da görüldüğü gibi üst aşımları azaltmaktadır.



Şekil 6.10. Gerçek zamanlı filtrelenmiş emir takibi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)

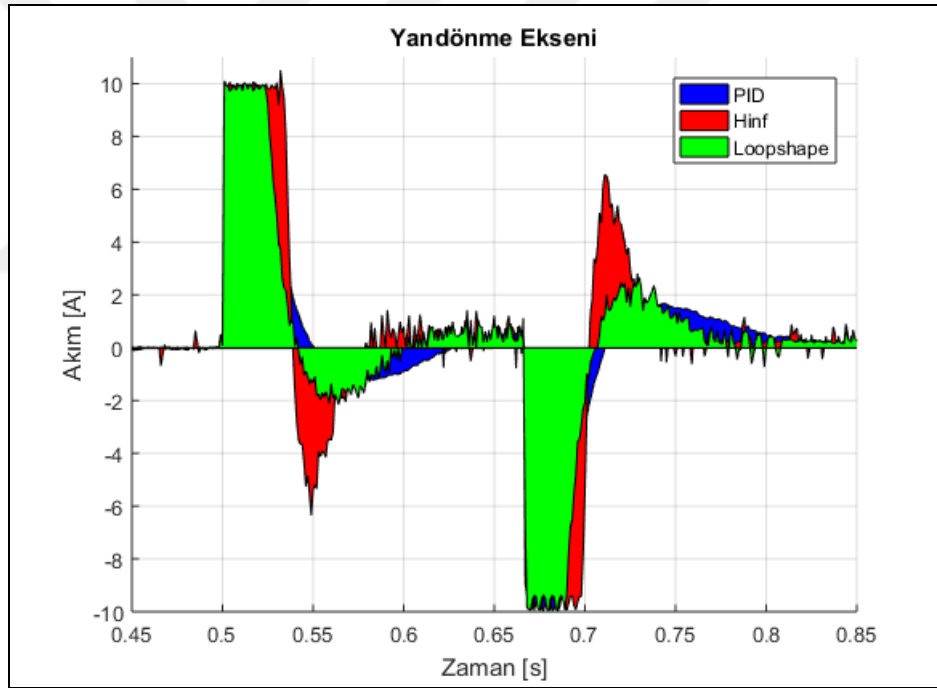
Test emrine uygulanabilecek bu filtreleme açısı cevabını etkilediği kadar akım tüketimini de etkilemektedir. İlgili filtreleme işleminden sonra Şekil 6.8'de gösterilen akım tüketimi Şekil 6.11'teki gibi düşmektedir. Akım tüketimleri tüm kontrolcüler için kayda değer şekilde düşerken H_{∞} kontrolcü akım tüketimleri ise daha ciddi oranda düşmektedir.



Şekil 6.11. Gerçek zamanlı filtrelenmiş emir için akım tüketimi (+10 [°] bölgesi yakınlaştırılmış)

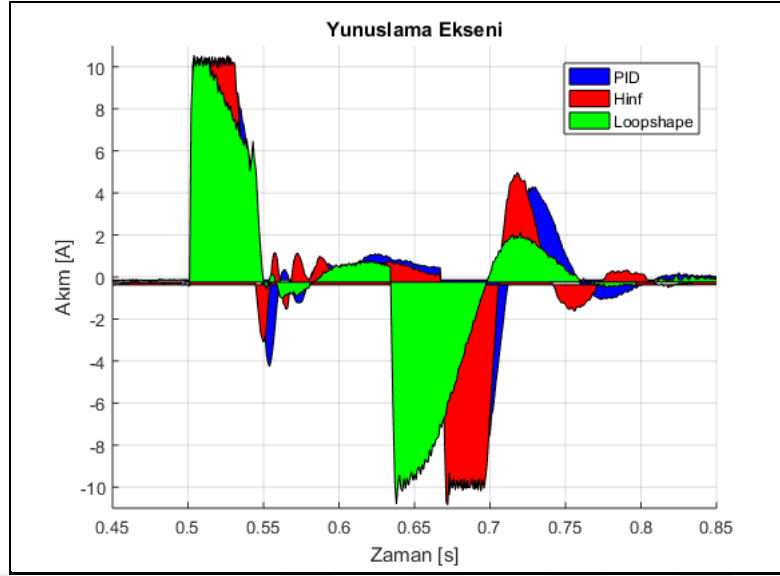
Benzetimler ile gerçek zamanlı uygulama sonuçları incelendiğinde özellikle H_∞ kontrolcü benzetimlerde olduğu üzere daha uzun süre maksimum akım çekmektedir. Bu noktada H_∞ için gerçek zamanlı uygulamalara yönelik eniyileme çalışmalarının yapılarak daha uygun bir H_∞ kontrolcü tasarımı yapılması söz konusudur. Buna karşın bütün kontrolcüler dış bozucu etkisi olmadığı durumda benzetimlerde elde edilen davranışları göstermektedir.

Gerçek zamanlı uygulamalarda kontrolcülere göre tüketilen akımların karşılaştırılması kontrolcü performansları açısından önemli bilgiler vermektedir. Şekil 6.12’de yandönme eksenini için kontrolcülerin tükettiği akım grafiklerinin altında kalan alanlar görselleştirilmektedir. Bu ifade bize genel anlamda enerji tüketimi hakkında bilgiler sunmaktadır.



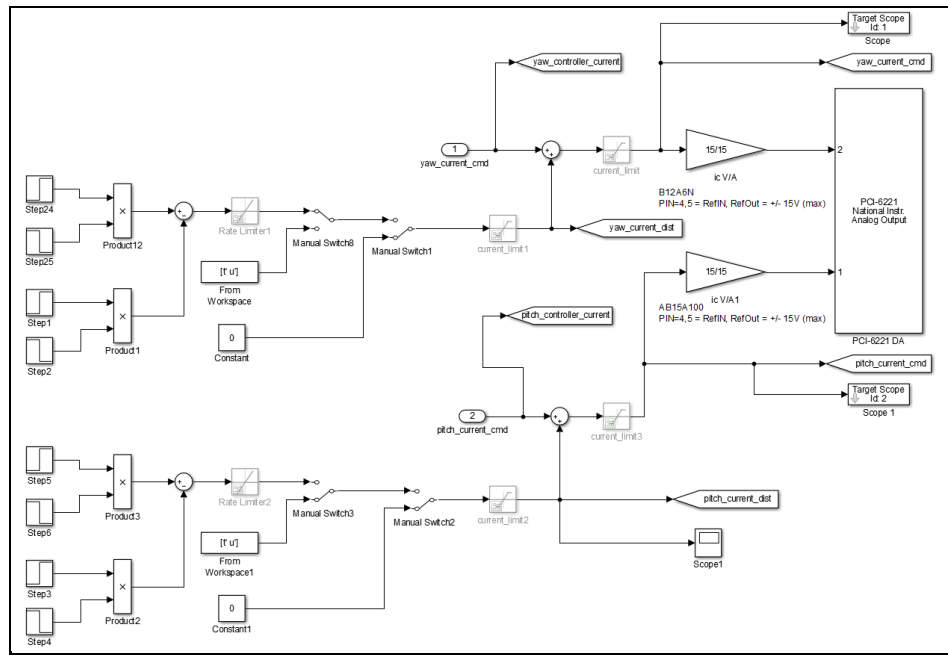
Şekil 6.12. Yandönme eksenini enerji tüketimi

Şekil 6.13’te ise yunuslama eksenini için kontrolcülerin enerji tüketimleri görselleştirilmektedir. Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 incelendiğinde çevrim şekillendiren (Loopshaping) kontrolcünün diğer kontrolcülere karşı daha az enerji tükettiği gözlemlenmektedir.



Şekil 6.13. Yunuslama eksen enerji tüketimi

Gerçek zamanlı uygulamaların sonuçları sadece enerji tüketimi açısından karşılaştırıldığında çevrim şekillendiren kontrolcü ön plana çıkmaktadır. Buna karşın gerçek zamanlı uygulamada bu karşılaştırma kıstasının yanında bozucu etkiler altında kontrolcülerin başarımları da göz önüne alınmalıdır. Bu sebeple Şekil 6.14'te hazırlanan blok yapısı kullanılarak bozucu etkiler altında kontrolcü başarımları değerlendirilmektedir.



Şekil 6.14. Gerçek zamanlı uygulamada akım bozucusu Simulink bloğu

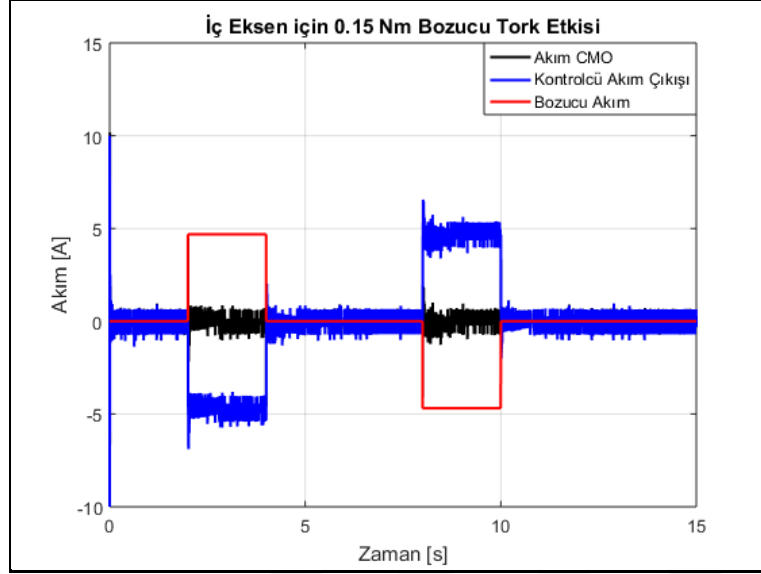
Bozucu etkiler kapsamında 3.1.3.8 numaralı bölümde elde edilen toplam bozucu torklar ilgili eksenlerdeki motor tork sabitlerine bölünerek akım cinsinden bozucular hesaplanmaktadır. Bu sebeple Tablo 6.1’de her iki eksen için de 0.15 [Nm] bozucu tork değeri kullanılmaktadır. Bu bozucu tork değerinin yanında kontrolcü performanslarını daha iyi görebilmek için motorlar biraz zorlanacak şekilde yüksek bozucu etkiler denenmektedir. Zorlu bir bozucu etki olarak yandönme eksenini için bu ekseninde kullanılan motorun maksimum tork değerinin yaklaşık %80 değeri olan 0,25 [Nm] değeri kullanılmaktadır. Yunuslama eksenini için ise bu ekseninde kullanılan motorun maksimum tork değerinin yaklaşık %60 değeri olan 1 [Nm] değeri kullanılmaktadır.

Her iki eksen için kullanılan bozucu akım değerleri Tablo 6.1’de ilgili tork değerlerinden hesaplanarak ayrı ayrı verilmektedir.

Tablo 6.1. Gerçek zamanlı bozucu akım değerleri

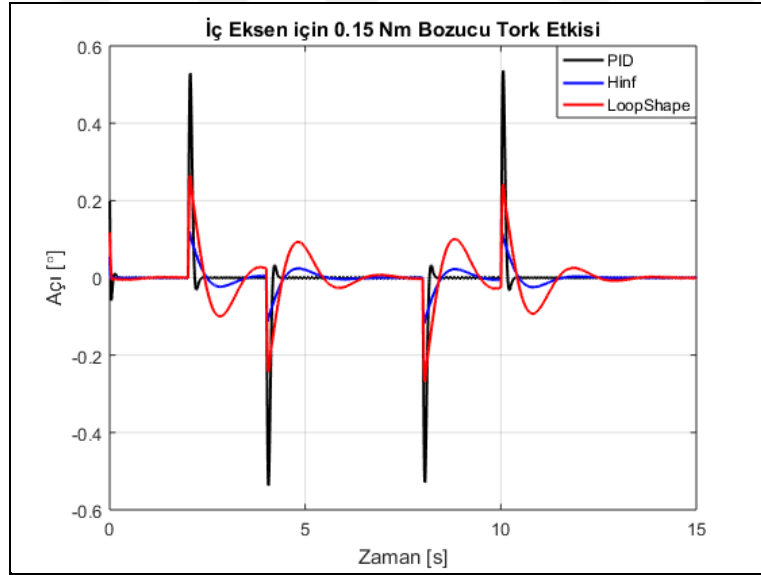
Eksen	Motor Tork Sabiti [Nm/A]	Bozucu Tork Değeri [Nm]	Bozucu Akım Değeri [A]
Yandönme Eksenini	0,032	0,15	4,6875
		0,25	7,8125
Yunuslama Eksenini	0,165	0,15	0,9091
		1,00	6,0606

Tablo 6.1’de verilen bozucu akım değerleri Şekil 6.14’te yapı ile uygulanmaktadır. Bozucu akım değeri sisteme 2 saniye süre ile etkiyen basamak emir gibi modellenmektedir. Bu durumda 2 saniyelik bir basamak bozucu tork geldiğinde sistemin başarımının ne olacağı bozucunun etkilerinin ne kadar bastırılabilirdiği incelenmektedir. Bu kapsamda gerçek zamanlı olarak Şekil 6.15’te verilen “Bozucu Akım” kontrolcünün ürettiği akıma ek olarak verilmektedir. Görülmektedir ki kontrolcü verilen bozucu etkiye karşı ters yönde aynı akımı basarak bozucuyu bastırmaya çalışmaktadır. Kontrolcü akımı ve bozucu akımın toplamını veren sürücü akım görüntüleme çıkışı (Current Monitor Out, CMO) anlık noktalar dışında beklenildiği üzere sıfır etrafında salınmaktadır.



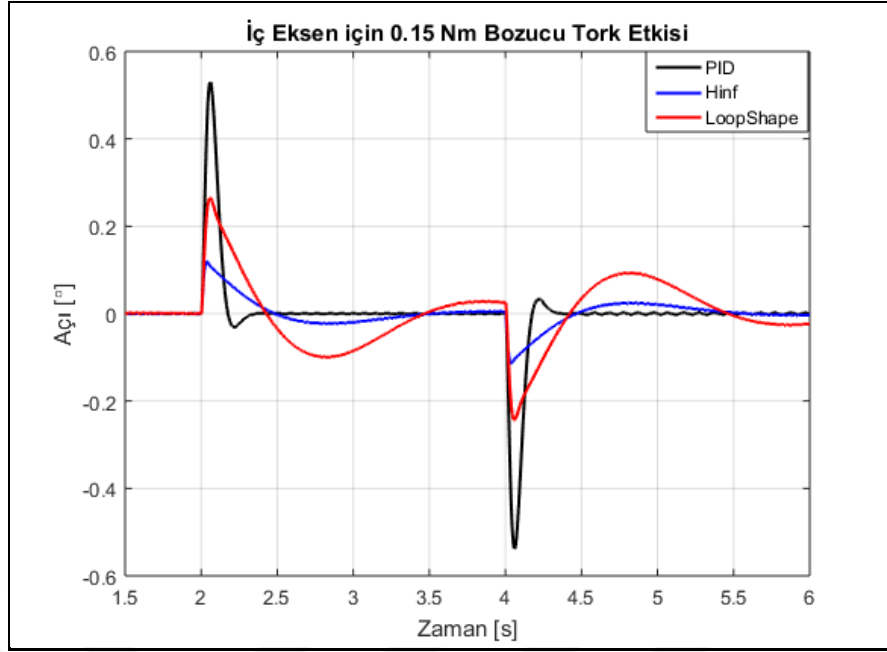
Şekil 6.15. Yandönme eksenini basamak bozucu akım profili

Şekil 6.15'te verilen "Bozucu Akım" uygulandığında sıfır konumunda duran yandönme ekseninin kontrolcülere göre nasıl tepki verdiği Şekil 6.16'da görülmektedir.



Şekil 6.16. Basamak bozucu akım etkisi altında yandönme eksenini açı cevabı

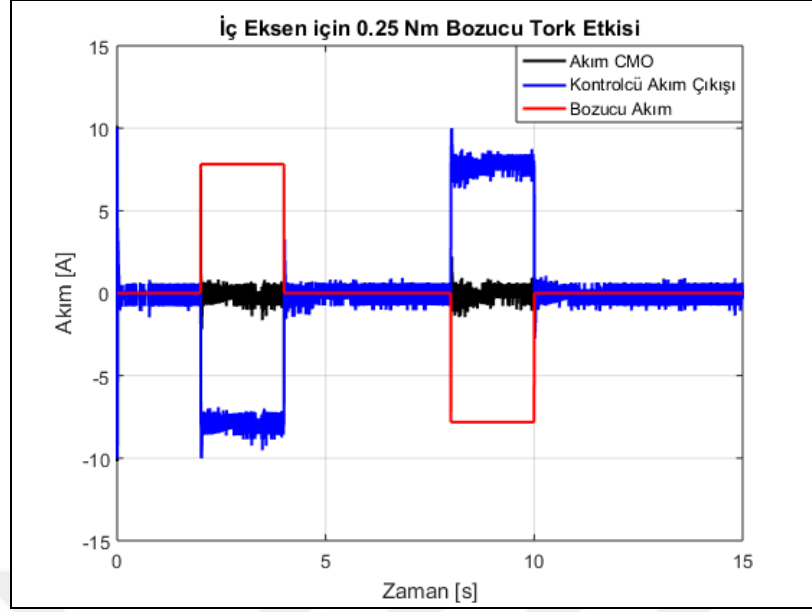
Şekil 6.17'de ise Şekil 6.16'da verilen grafiğin 1.5-6 saniye arasındaki bölümün yakınlaştırılmış bölümü verilmektedir.



Şekil 6.17. Basamak bozucu akım etkisi altında yandönme eksenini açı cevabı (yakınlaştırılmış)

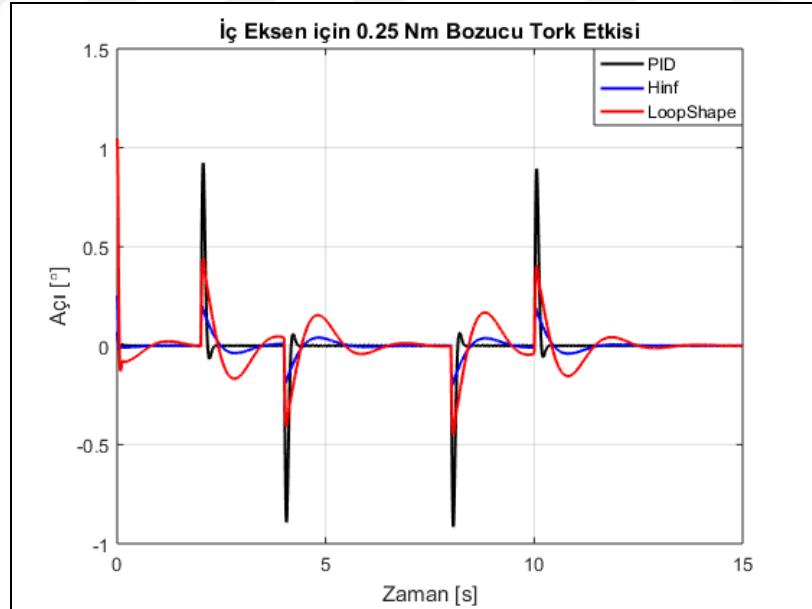
Şekil 6.17 incelenirse 0,15 [Nm] basamak bozucu etki altında yandönme eksenini sıfır konumunda bir miktar sapmaktadır. Sonuçlar göstermektedir ki 0,15 [Nm] basamak bozucu altında PID kontrolcü ile yandönme eksenini 0,538 [°] sapma göstererek en kötü sonucu vermektedir. Buna karşın H_{∞} kontrolcü ise 0,12 [°] sapma ile bozucu girişe karşı en iyi başarımı sağladığı görülmektedir. Ek olarak tasarımları yapılan bütün kontrolcülerin bu bozucu etkiler altında sapmalara rağmen toparlanarak istenen açı değerine ulaştığı gözlemlenmektedir.

Gerçek zamanlı olarak Şekil 6.18’de verilen “Bozucu Akım” kontrolcünün ürettiği akıma ek olarak verilmektedir. Bu bozucu akım değeri 3.1.3.8 numaralı bölümde elde edilen değerden daha yüksek ve zorlayıcıdır. Görülmektedir ki bu durumda da kontrolcü verilen bozucu etkiye karşı ters yönde aynı akımı basarak bozucuyu bastırmaya çalışmaktadır. Kontrolcü akımı ve bozucu akımın toplamını veren sürücü akım görüntüleme çıkışı (Current Monitor Out, CMO) anlık noktalar dışında beklenildiği üzere sıfır etrafında salınmaktadır.



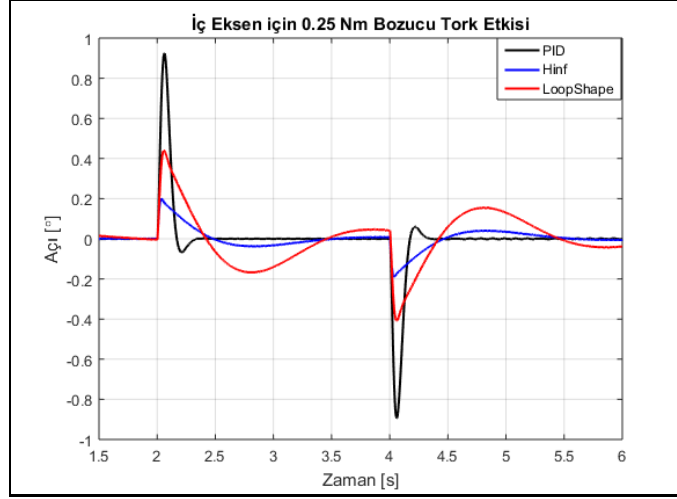
Şekil 6.18. Yandönme eksenini basamak bozucu akım profili

Şekil 6.18’de verilen “Bozucu Akım” uygulandığında sıfır konumunda duran yandönme ekseninin kontrolcülere göre nasıl tepki verdiği Şekil 6.19’da görülmektedir.



Şekil 6.19. Basamak bozucu akım etkisi altında yandönme eksenini açı cevabı

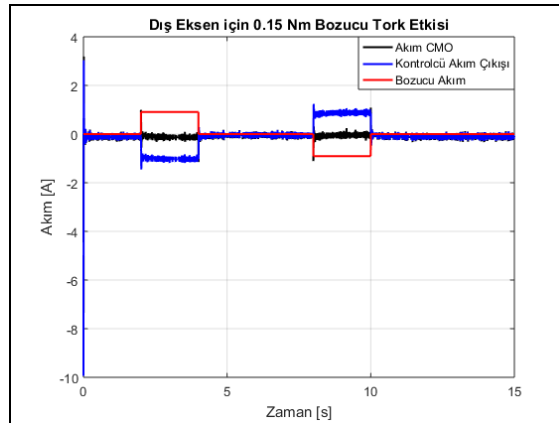
Şekil 6.20’de ise Şekil 6.19’da verilen grafiğin 1.5-6 saniye arasındaki bölümün yakınlaştırılmış bölümü verilmektedir.



Şekil 6.20. Basamak bozucu akım etkisi altında yandönme eksenini açı cevabı (yakınlaştırılmış)

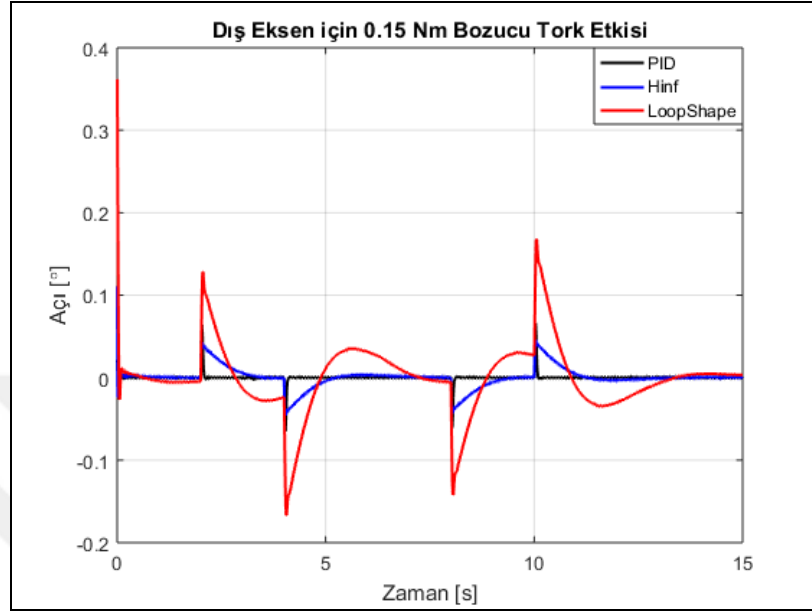
Şekil 6.20 incelenirse 0,25 [Nm] basamak bozucu etki altında yandönme eksenini sıfır konumunda bir miktar sapmaktadır. Sonuçlar göstermektedir ki 0,25 [Nm] basamak bozucu altında PID kontrolcü ile yandönme eksenini 0,9236 [°] sapma göstererek yine en kötü sonucu vermektedir. Buna karşın H_{∞} kontrolcü ise 0,252 [°] sapma ile bozucu girişe karşı yine en iyi başarımı sağladığı görülmektedir.

Yunuslama eksenini için gerçek zamanlı olarak Şekil 6.21’de verilen “Bozucu Akım” kontrolcünün ürettiği akıma ek olarak verilmektedir. Görülmektedir ki kontrolcü verilen bozucu etkiye karşı ters yönde aynı akımı basarak bozucuyu bastırmaya çalışmaktadır. Kontrolcü akımı ve bozucu akımın toplamını veren sürücü akım görüntüleme çıkışı (Current Monitor Out, CMO) anlık noktalar dışında beklenildiği üzere sıfır etrafında salınmaktadır.



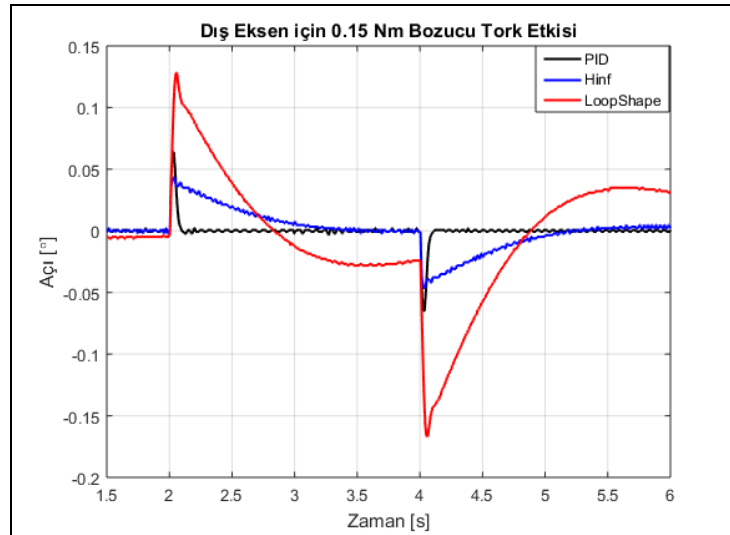
Şekil 6.21. Yunuslama eksenini basamak bozucu akım profili

Şekil 6.21’de verilen “Bozucu Akım” uygulandığında sıfır konumunda duran yunuslama ekseninin kontrolcülere göre nasıl tepki verdiği Şekil 6.22’de görülmektedir.



Şekil 6.22. Basamak bozucu akım etkisi altında yunuslama eksenini açı cevabı

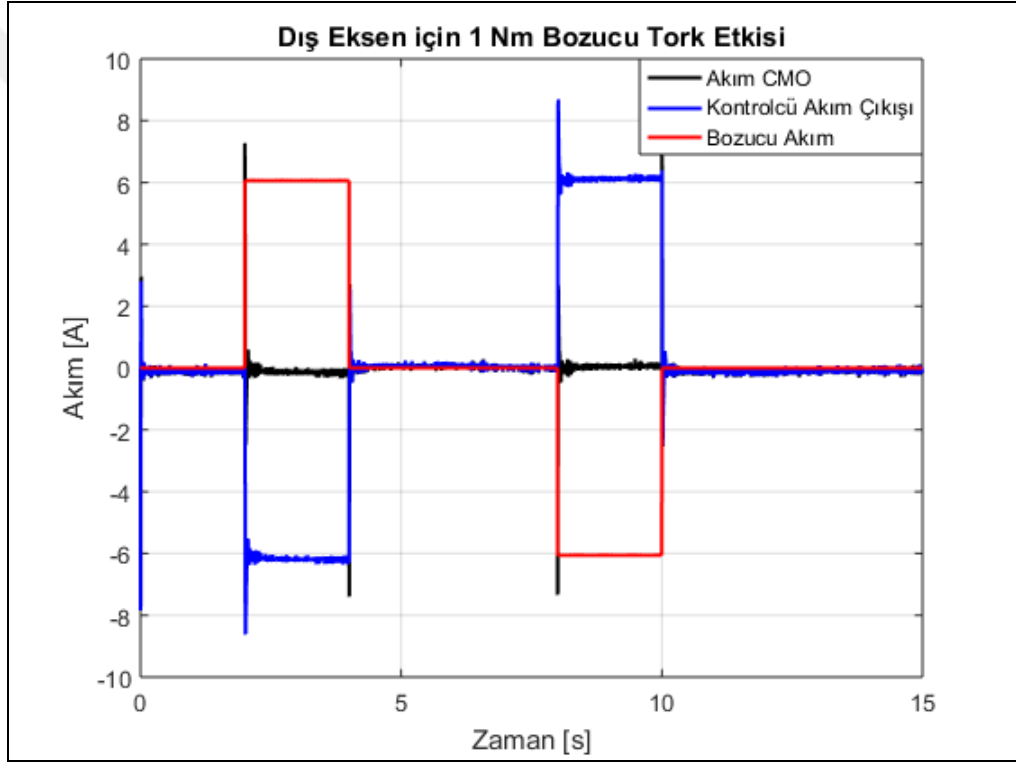
Şekil 6.23’te ise Şekil 6.22’de verilen grafiğin 1.5-6 saniye arasındaki bölümün yakınlştırılmış bölümü verilmektedir.



Şekil 6.23. Basamak bozucu akım etkisi altında yunuslama eksenini açı cevabı (yakınlştırılmış)

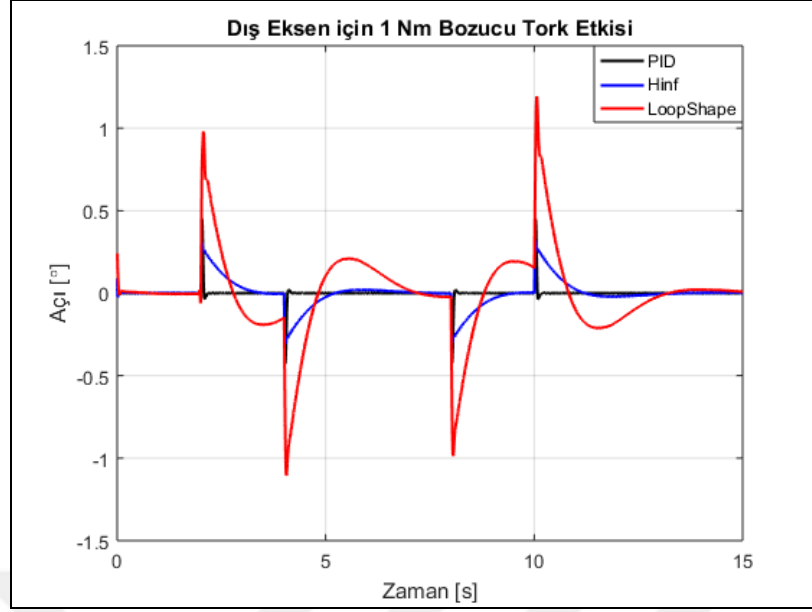
Şekil 6.23 incelenirse 0,15 [Nm] basamak bozucu etki altında yunuslama eksenini sıfır konumunda bir miktar sapmaktadır. Sonuçlar göstermektedir ki 0,15 [Nm] basamak bozucu altında çevrim şekillendiren kontrolcü ile yunuslama eksenini 0,168 [°] sapma göstererek en kötü sonucu vermektedir. Buna karşın H_∞ kontrolcü ise 0,046 [°] sapma ile bozucu girişe karşı en iyi başarımı sağladığı görülmektedir.

Yunuslama eksenini için zorlayıcı bir durumu modelleyen Şekil 6.24'te verilen "Bozucu Akım" verilmektedir ve kontrolcünün ürettiği akıma ek olarak verilmektedir. Görülmektedir ki kontrolcü verilen bozucu etkiye karşı ters yönde aynı akımı basarak bozucuyu bastırmaya çalışmaktadır.



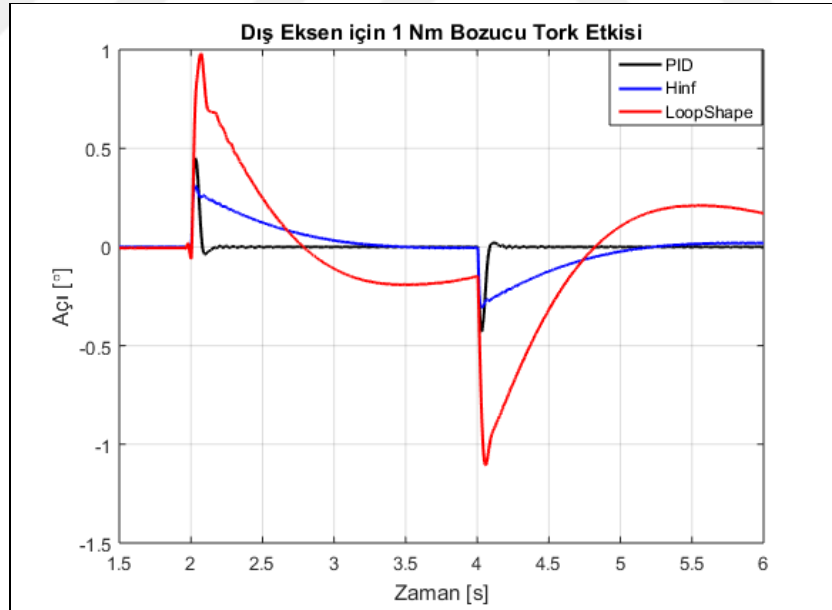
Şekil 6.24. Yunuslama eksenini basamak bozucu akım profili

Şekil 6.24'te verilen "Bozucu Akım" uygulandığında sıfır konumunda duran yunuslama ekseninin kontrolcülere göre nasıl tepki verdiği Şekil 6.25'te görülmektedir.



Şekil 6.25. Basamak bozucu akım etkisi altında yunuslama eksenini açı cevabı

Şekil 6.26’da ise Şekil 6.25’te verilen grafiğin 1.5-6 saniye arasındaki bölümün yakınlaştırılmış bölümü verilmektedir.



Şekil 6.26. Basamak bozucu akım etkisi altında yunuslama eksenini açı cevabı (yakınlaştırılmış)

Şekil 6.26 incelenirse 1 [Nm] basamak bozucu etki altında yunuslama eksenini sıfır konumunda bir miktar sapmaktadır. Sonuçlar göstermektedir ki 1 [Nm] basamak bozucu altında çevrim şekillendiren kontrolcü ile yunuslama eksenini 1,193 [°] sapma

göstererek yine en kötü sonucu vermektedir. Buna karşın H_{∞} kontrolcü ise 0,32 [°] sapma ile bozucu girişe karşı yine en iyi başarımı sağladığı görülmektedir.

Elde edilen teorik ve gerçek zamanlı kontrol uygulaması sonuçları yandönme eksenini için Tablo 6.2’de özetlenmektedir. Tablo 6.2’de verilen oturma zamanları hız limiti sebebi ile gerçek bir basamak emri cevabına göre daha uzun sürelerdir; zira uygulamada gerçek bir basamak emri yerine hızı limitlenmiş bir rampa emri kullanılmaktadır. Tablo 6.2’de tanımlanan sürekli maksimum akım tüketimi süresi ise basamak emri cevabının gerçekleştiği noktadaki maksimum akım çekme süresidir. Tablo 6.2’de verilen genlik kazançları bazı kontrolcüler için ∞ verilmektedir. Bunun sebebi ilgili kapalı çevrim cevapların bode grafiklerinde fazın -180 [°] kesmemesidir.

Kontrolcüler ilk olarak bant genişliği, oturma zamanı ve yüzde aşım değeri ile karşılaştırılmaktadır. Kontrolcü derecelerinin de karşılaştırılması sonrasında kontrolcülerin çektiği akımlara göre başarımlar karşılaştırılmaktadır. Akım tüketimi açısından karşılaştırma iki türlü yapılmaktadır. İlki kontrolcülerin maksimum akım çekme süreleri olup ikincisi ise akım grafiğinin altında kalan alanın hesaplanması ile enerji tüketimleridir. İlgili karşılaştırmalara ek olarak ise kontrolcülerin bozucu etkiler altındaki başarımları da karşılaştırılmaktadır.

Tablo 6.2. Yandönme eksenini kontrolcülerinin başarımlarının karşılaştırılması

Başarım Parametresi	PID	H_{∞}	Çevrim Şekillendiren Kontrolcü
Gamma (γ)	-	0,9008	-
Bant Genişliği [Hz]	4	24	25
Oturma Zamanı (T_s [sn])	0,31	0,2110	0,2210
Aşım [%]	8,6	6,89	6,89
Kontrolcü Derecesi	2	7	4
Sürekli Maksimum Akım Tüketimi Süresi [msn]	22	27	10
Enerji Tüketimi [Asn]	11,9	14,68	12,29
Genlik Kazancı [dB]	-14	31,8	∞
Faz Kazancı [°]	60,9	63,8	77,7

Tablo 6.2. (Devam) Yandönme eksen kontrolcülerinin başarımlarının karşılaştırılması

Başarım Parametresi	PID	H_{∞}	Çevrim Şekillendiren Kontrolcü
Bozucu Giriş Altında Maksimum Açık Değişimi [°] (0,15 [Nm])	0,538	0,120	0,268
Bozucu Giriş Altında Maksimum Açık Değişimi [°] (0,25 [Nm])	0,9236	0,252	0,470

Tablo 6.2’deki sonuçlara göre yandönme eksen için Tablo 5.1’deki isterlere göre H_{∞} ve çevrim şekillendiren kontrolcüler başarı ile uygulanmıştır. Buna karşın PID kontrolcü ise bu eksen için uygun şekilde tasarlanamamaktadır. Bunun sebebi bu sistemde baskın olan yüksek atalet değerine göre sınırlı güce sahip bir motorun kullanılmış olmasıdır. Bu bilgiler ışığında sınırlı güce sahip bir motor ve zorlayıcı başarımlar ile tanımlanan bir sistem için geleneksel bir PID kontrolcü tasarımı yapmak uygun görülmemektedir. Bozucu etkiler altında ise H_{∞} kontrolcü doğrudan başarımları en yüksek olan kontrolcü olarak öne çıkmaktadır.

Elde edilen teorik ve gerçek zamanlı kontrol uygulaması sonuçları yunuslama eksen için ise Tablo 6.3’te özetlenmektedir.

Tablo 6.3. Yunuslama eksen kontrolcülerinin başarımlarının karşılaştırılması

Başarım Parametresi	PID	H_{∞}	Çevrim Şekillendiren Kontrolcü
Gamma (γ)	-	0,9008	-
Bant Genişliği [Hz]	8	38	12
Oturma Zamanı (T_s [sn])	0,2640	0,2070	0,2070
Aşım [%]	7,4	6,89	11,11
Kontrolcü Derecesi	2	7	4
Sürekli Maksimum Akım Tüketimi Süresi [msn]	22	27	12
Enerji Tüketimi [Asn]	11,4	13,04	10,65
Genlik Kazancı	-14	26,4	∞
Faz Kazancı [°]	60,9	41	61

Tablo 6.3. (Devam) Yunuslama eksenini kontrolcülerinin başarımlarının karşılaştırılması

Başarım Parametresi	PID	H_{∞}	Çevrim Şekillendiren Kontrolcü
Bozucu Giriş Altında Maksimum Açık Değişimi [°] (0,15 [Nm])	0,067	0,046	0,168
Bozucu Giriş Altında Maksimum Açık Değişimi [°] (1 [Nm])	0,454	0,320	1,193

Yunuslama eksenini için tasarımı yapılan kontrolcüler bant genişliği gereksinimini sağlasa da en yüksek bant genişliği H_{∞} kontrolcü ile elde edilmektedir. Yunuslama eksenini için tasarımı yapılan H_{∞} kontrolcüsü Tablo 5.1'deki isterleri büyük ölçüde sağlasa da maksimum akımları diğer kontrolcülere göre yaklaşık 7 [ms] daha uzun süre tüketmektedir. PID kontrolcü ise çevrim şekillendiren kontrolcüye yakın bir başarımlar gösterse de bu kontrolcü de çevrim şekillendiren kontrolcüye göre akım tüketimleri açısından daha zayıf gözükmemektedir; ayrıca bant genişliği en düşük kontrolcüdür. Bozucu girişlere karşı başarımlar açısından ise H_{∞} yandönme eksenindeki gibi bariz şekilde ön plana çıkmaktadır. Tablo 6.3'te verilen sonuçlar ayrıca göstermektedir ki yeterli motor kabiliyeti olması durumunda isterlere uygun PID kontrolcü tasarımı da geleneksel yöntemlerle yapılabilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında Stirling soğutuculu ve iki serbestlik dereceli bir kardan mekanizması için gürbüz kontrolcü tasarımları yapıldı. Kardan mekanizması için PID kontrolcü, H_∞ kontrolcü ve çevrim kazancını şekillendirilmesi ile elde edilen bir kontrolcü tasarlandı. Tasarımı yapılan bütün kontrolcüler bilgisayar ortamında modellenerek benzetimleri yapıldı. Benzetim ile elde edilen sonuçlar ışığında kontrolcüler gerçek zamanlı olarak kardan mekanizmasında uygulandı.

Tez sürecinde ilk olarak kardan mekanizmasının kinematik analizleri yapıldı. Kinematik analizlerde rastgele türetilen üç farklı uçuş senaryosuna göre kardanın yere göre ve mühimmata veya bağlı olduğu platforma göre kinematik bileşenleri hesaplandı. Kinematik analizler sonucu elde edilen kardanın mühimmata göre dönüş açıları kardan mekanizmasının mekanik tasarımında girdi olarak kullanıldı. Bu veriler ışığında kardan mekanizması yandönme ekseninde $\pm 30 [^\circ]$ ve yunuslama ekseninde $\pm 45 [^\circ]$ olacak şekilde tasarlandı. Kinematik analiz sonucu olarak elde edilen kardanın mühimmata göre dönme hızları kardan mekanizmasında kullanılacak olan motorun hızını belirlemek için kullanıldı. Kardanın mühimmata göre açısal ivme değerleri ise aynı eyleyicilerin tork gereksinimini belirlemek üzere elde edildi.

Kardan mekanizması tasarımı için bileşen olarak eyleyici, algılayıcı ve rulman seçimi yapıldı. Kinematik analizlerden elde edilen bazı çıktılar eyleyici seçiminde doğrudan kullanıldı. Kinematik analizlerin yanısıra eyleyici seçimi için gerekli diğer tork gereksinimleri de hesaplandı. Tez kapsamında eyleyici tork gereksinimi hesaplanırken eksenlerin ataletleri sebebi ile oluşan torklar, dışarıdan gelen doğrusal ivme ve rastsal titreşimler sebebi ile oluşan torklar, sürtünme ve kablo direngenlikleri sebebi ile oluşan torklar ve Stirling soğutucu yapısındaki hareketli bileşenler sebebi ile oluşan torklar göz önüne alındı. Bütün isterler gözönüne alındığında kardan mekanizmasında doğrudan sürüslü doğru akım motorları kullanılmasının uygun olduğu değerlendirildi. Algılayıcı olarak ise çevresel etmenler

ve görüntüleme sisteminin anlık görüş açısı bilgileri dikkate alınarak çözücü seçildi. Yataklama elemanı olarak ise eğik bilyalı rulmanlar kullanıldı.

Kinematik analizler ve bileşen seçimleri sonunda kardan mekanizmasının mekanik tasarımı yapılarak gerçek zamanlı kontrol uygulaması için test düzeneği kuruldu. Tez kapsamında gerçek zamanlı kontrol uygulaması MATLAB® gerçek zamanlı uygulama aracı kullanılarak gerçekleştirildi.

Kontrolcü tasarımlarının yapılması için kontrol edilecek sisteme ait matematiksel modelin belirlenmesi gerekmektedir. Sistem modeli kurulan gerçek zamanlı test düzeneği aracılığı ile deneysel sistem tanımlama işlemi ile elde edildi.

Sistem tanımlama işleminde giriş sinyali olarak PRBS sinyalleri kullanıldı. PRBS sinyalinin genlik değerleri için sistemin bütün sürtünme etkilerini yenerek rahatça çalıştığı akım değerleri ile belirlendi. Bu değerler de her iki eksen için de 1 [A] olarak kabul edildi. PRBS sinyallerinde genlik değerlerinin yanısıra frekans değerleri de değiştirilerek uygulandı. PRBS sinyalleri en fazla 50 [Hz] değerindeki verileri barındıracak şekilde filtrelenerek kullanıldı. Sistem tanımlama işleminde birçok sistem modeli kullanılmasına rağmen en uygun modelin ikinci dereceden gerçek köklere sahip bir transfer fonksiyonu olduğu tespit edildi. Bu bilgiler ışında her iki eksene ait transfer fonksiyonları hesaplandı.

PID kontrolcü tasarımında kontrolcü katsayılarının bulunması için Butterworth polinomları kullanıldı. PID katsayıları 0,707 sönüm oranı sabit tutularak gerekli bant genişliği isterlerine göre türetildi. Yandönme eksenini diğer bir deyişle iç eksen için tasarlanan PID kontrolcü ile kapalı çevrim sistemin bant genişliği en fazla 4 [Hz] olacak şekilde tasarlanabildi. Bu değerden daha yüksek bant genişliği isterlerinde kapalı çevrim sistem kararsız olmaktadır. Bu durum göstermektedir ki analitik olarak yapılan hesaplamalar ile seçilen yandönme eksenini motoru PID kontrolcü ile gerekli başarımları sağlayacak şekilde tasarlanamamaktadır. Yunuslama eksenini için ise 12 [Hz] bant genişliği için kontrolcü tasarımı yapıldı.

H_{∞} kontrolcü tasarımında performans verisi için 5 farklı ağırlık fonksiyonu kullanıldı. Bu ağırlık fonksiyonlarının yanısıra motor tork sabiti, sönüm katsayısı ve yay sabiti gibi parametrelerin bazı belirsizliklere sahip olduğu kabul edildi. Her iki

eksen için de tasarım işlemleri ile yedinci dereceden bir kontrolcü elde edildi. Elde edilen kontrolcülerin her ikisinin de modellenen belirsizlikler altında gürbüz olarak kararlı olduğu tespit edildi. Gürbüz kararlılık analizi MATLAB® yazılımının “robuststab” komutu kullanılarak yapıldı.

Çevrim kazancının şekillendirilmesi ile her iki eksen için de dördüncü dereceden bir kontrolcü elde edildi. Tasarımı yapılan bu kontrolcüler ile teorik olarak her iki ekseninde de sonsuz genlik kazancı elde edildi. Faz kazancı, yandönme ekseninde 77,7 [°] ve yunuslama ekseninde ise 61 [°] olarak hesaplandı.

Elde edilen kontrolcüler gerçek zamanlı olarak çalıştırılarak benzetim sonuçları ile gerçek zamanlı veriler karşılaştırıldı. Gerçek zamanlı sistemde eksenlerin referans takibi kabiliyetleri benzetimlere göre biraz daha kötü olsa da oldukça yakındır ve sonuçlara göre benzetimler doğrulanabilmektedir. Gerçek zamanlı verilerdeki farklılıklar test düzeneği ve motor sürücülerini ile gerçekleştirebilecek gürültüler sebebi ile olabilmektedir. Bunun yanı sıra benzetimlerde her iki ekseninde de kütle kaçıklığının olmadığı kabul edilerek çalışmalar yapılmış olup gerçek sistemde üretim ve bütünleme faaliyetleri sebebi ile kütle kaçıklıkları mevcuttur.

Sonuç olarak iki eksenli olarak tasarımı yapılan kardan sistemi için H_∞ kontrolcü ve çevrim şekillendiren kazancının şekillendirilmesi ile elde edilen kontrolcüler başarı ile uygulandı. Buna karşın tasarlanan PID kontrolcünün yandönme ekseninde yetersiz kaldığı görüldü. Elde edilen sonuçlara göre yüksek ataletsel değerlere sahip ve belirli zorlayıcı tasarım parametrelerine sahip bir sisteme geleneksel PID kontrolcü tasarımı yapmak oldukça zordur. Buna karşın gürbüz yöntemler ile tasarlanan kontrolcülerin tasarımı daha uygun olurken daha iyi başarımlar da elde edilmektedir. Bozucu etkiler altında en etkili kontrolcü ise H_∞ kontrolcüdür. Bunun yanında bant genişliği, genlik ve faz kazançları açısından da en iyi kontrolcü H_∞ kontrolcü olarak elde edilmektedir.

Bu çalışmanın sonraki aşamalarında en uygun kontrol yapısı seçilerek kontrolcü eniyileme çalışmaları ile kontrolcü başarımları bozucu etkiler altında test edilebilir. Eniyileme çalışmaları sonrasında ise kontrolcü başarımlarının görüntü üzerindeki etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Daniels A., *Infrared Systems*, 9th ed., SPIE PRESS, Washington, 2007.
- [2] Phillips W.J., *Engineering Design Handbook - Infrared Military Systems*, US Army, 1971.
- [3] Wolfe W. L., *Introduction to Infrared System Design*, 2nd ed., SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1996.
- [4] Turgut B. B., Artan G. G., Bek A., MWIR and LWIR Imaging Systems with Regard to Range Performance, *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing XXIX*, DOI: 10.1117/12.2311868.
- [5] Rogalski A., Progress in Focal Plane Array Technologies, *Progress in Quantum Electronics*, 2012, **36** (2-3), 342-473.
- [6] Hilkert J. M., Inertial Stabilized Platform Technology, *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, **28**(1), 26-46.
- [7] Rezac M., Inertial Stabilization, Estimation and Visual Servoing for Aerial Surveillance. Ph.D. Thesis, Czech Technical University in Prague, Prague, 2013.
- [8] Dogan H. Bingul Z., Blur Analysis for Gimballed Imaging Systems in Air Vehicles, *5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, Thessaloniki, Greece, 10-13 April 2018.
- [9] Rzasa J. R., Design and Application of Pan and Tilt Servo Gimbals in Pointing, Acquisition and Tracking, Msc. Thesis, University of Maryland, Baltimore, 2007.
- [10] Saleheen F., Modeling and Statistical Control of a Gimbaled Laser Target System, Msc. Thesis, Temple University, Philadelphia, 2014.
- [11] Baskin M., LQG/LTR, H-Infinity and Mu Robust Controllers Design for Line of Sight Stabilization, Msc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2015, 416525.
- [12] Rosheim M., Sauter G., On a New Seeker Gimbal, *Radar Sensor Technology XIV*, DOI: 10.1117/12.858791.
- [13] Otlowski D.R., Wiener K., Rathbun B.A., Mass Properties Factors in Achieving Stable Imagery from a Gimbal Mounted Camera, *Airbone Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications V*, 2008, **6946**(0B).

- [14] Korkmaz M. T., Kandemir K. D., Ozkan B., Kardan Platformu için Kayan Kipli Kontrol Sistemi Tasarımı ve Uygulaması, 19. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İstanbul, Türkiye, 21-23 Eylül 2017.
- [15] Ozdogan G., System Identification and Modelling of Gyro-Stabilized IR/EO Gimbal System in Frequency Domain, Msc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2014, 385044.
- [16] Meir I., Line of Sight Stabilization Requirements for Target Tracking Systems, SPIE, Acquisition, Tracking and Pointing IV, DOI: 10.1117/12.21557.
- [17] Sahin M., Kendinden Ayarlamalı PID Kontrolör ile İki Eksenli Gimbal Uygulaması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2015, 395756.
- [18] Birinci B. E. and Ozkan B., Görüntüleme Sistemlerinde Kullanılan Çeşitli Kardanlı Yönlendirme Mekanizmalarının Başarım Özelliklerinin Karşılaştırması, 17. Makine Teorisi Sempozyumu, İzmir, Türkiye, 14-17 Haziran 2015.
- [19] Baruh H., *Analytical Dynamics*, 1st ed., WCB/McGraw-Hill, Singapore, 1999.
- [20] Ozkan B., Dynamic Modeling, Guidance and Control of Homing Missiles, PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2005, 167380.
- [21] Ljung L., *System Identification: Theory for the User*, 1st ed., PTR Prentice Hall, New Jersey, 1987.
- [22] Tangirala A. K., *Principles of System Identification*, 1st ed., CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2015.
- [23] Olcer T. U., H₂/H_∞ Mixed Robust Controller Synthesis for a Fin Actuation System, Msc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2013, 341142.
- [24] Celik T., Dynamic Modeling and Control of a Hybrid Fin Actuation System for an Air-to-Air Missile, Msc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2014, 383061.
- [25] Ljung L., *System Identification Toolbox*, 2015a ed., The MathWorks, Massachusetts, 2015.
- [26] Babucka R., *Fuzzy Modeling for Control*, 1st ed. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- [27] Ogata K., *Modern Control Engineering*, 5th ed., Prentice Hall, New Jersey, 2010.
- [28] Das E., GÜdümlü Bir Mühimmat Kanatçık Tahrik Sistemi için İki Döngülü Kontrol Sistemi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014, 353750.

- [29] Zhou K., Doyle J. C., Glover K., *Robust and Optimal Control*, Prentice Hall, New Jersey.
- [30] Doyle J., Francis B., Tannenbaum A., *Feedback Control Theory*, 1st ed., Macmillan Publishing Co., California, 1990.
- [31] Skogestad S., Postlethwaite I., *Multivariable Feedback Control - Analysis and Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1996.
- [32] Gu D. W., Petrov P. H., Konstantinov M. K., *Robust Control Design with MATLAB*, 2nd ed., Springer, New York, 2005.
- [33] Bibel J. E., Malyevac D. S., Guidelines for the Selection of Weighting Functions for H-Infinity Control, *Naval Surface Warfare Center*, NSWCDD/MP-92/43, 1992.
- [34] Balas G., Chiang R., Packard A., Safonov M., *Robust Control Toolbox*, 3rd ed., The MathWorks, Massachusetts , 2005.
- [35] Beaven R. W., Wright M. T., Seaward D. R., Weighting Function Selection in the H-Infinity Design Process, *Control Engineering Practice*, 1996, **4**(5), 625-633.
- [36] Feyel P., *Loop-shaping Robust Control*, 1st ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2013.

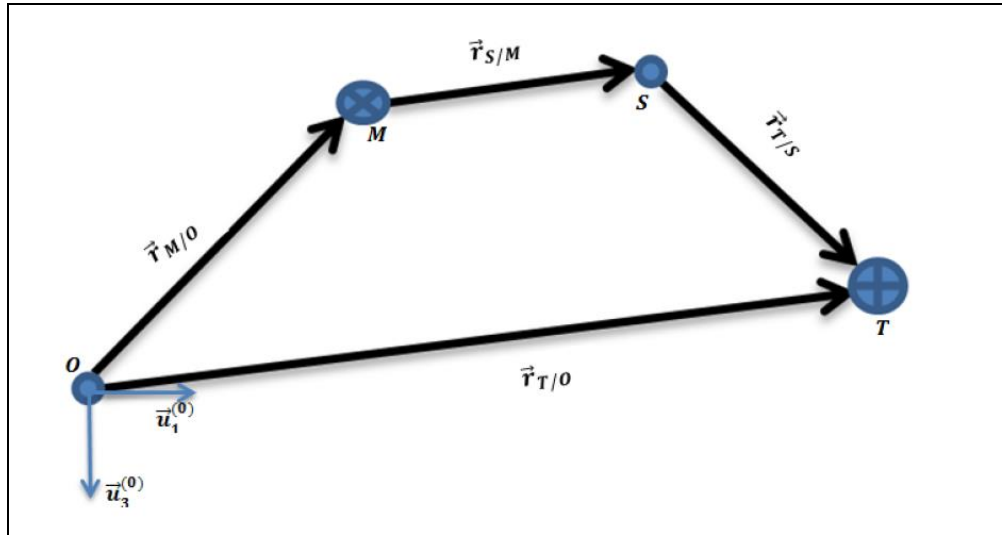


EK-A

İki Serbestlik Dereceli Kardan Mekanizmasının Kinematik Analizi

Tanımlamalar

Mühimmat, Arayıcı ve Hedef arasındaki kinematik model sırasıyla sabit yer eksen takımı merkezi (0), mühimmat gövdesinde tanımlı mühimmat eksen takımı merkezi (M), kardan bakış hattına bağlı Arayıcı eksen takımı merkezi (S) ve hedef eksen takımı merkezi (T) ifadeleri kullanılarak Şekil A.1'deki gibi gösterilebilmektedir. Mühimmat eksen takımının merkezi mühimmat ağırlık merkezi olarak seçilebileceği gibi mühimmat hareketleri hakkında verilerin toplandığı Ataletsel Ölçüm Birimi'nin (Inertial Measurement Unit – IMU, AÖB) ağırlık merkezi olarak da seçilebilmektedir. Gerçek bir harekât esnasında mühimmat ağırlık merkezi harekât süresince değişeceği için hesaplamalarda mühimmat eksen takımının merkezi AÖB üzerinde bir nokta olarak seçilmektedir.



Şekil A.1. Mühimmat – kardan – hedef kinematik ilişkisi [33]

Şekil A.1'de yer alan $\vec{u}_1$ x eksenini üzerindeki birim vektörü, $\vec{u}_2$ y eksenini üzerindeki birim vektörü ve $\vec{u}_3$ ise z eksenini üzerindeki birim vektörü ifade etmek üzere genel dönüşüm matrisleri sırasıyla (A.1), (A.2) ve (A.3) numaralı denklemlerde

verilmektedir. (A.1) numaralı denklem $\vec{u}_1$ birim vektörü etrafındaki dönüşü, (A.2) numaralı denklem $\vec{u}_2$ birim vektörü etrafındaki dönüşü ve (A.3) numaralı denklem $\vec{u}_3$ birim vektörü etrafındaki dönüşü ifade etmektedir [34].

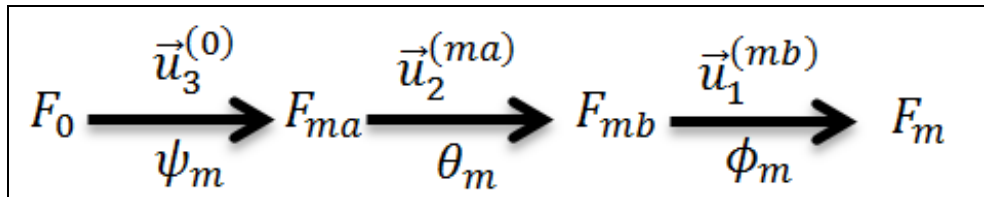
$$\hat{R}_1(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

$$\hat{R}_2(\theta) = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

$$\hat{R}_3(\psi) = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A.3)$$

Trigonometrik eşitliklerde kullanılan “c” ve “s” harfleri sırasıyla kosinüs ve sinüs fonksiyonlarını temsil etmektedir.

Kardan hareketleri genel yaklaşım olarak koordinat eksenleri aralarında açısal farklar olan ardışık dönüşümler ile tanımlanan Euler açıları ile ifade edilebilmektedir. Bu durumda F_m koordinat sisteminde tanımlı mühimmat açısal konumu sırası ile yan dönme, yunuslama ve yuvarlanma hareketlerini ifade eden Euler açıları ile tanımlanabilmektedir. Buna göre mühimmatın yere göre açısal konumunu ifade eden denklem, F_0 sabit yer eksen takımı ve F_m mühimmat eksen takımı arasında 3-2-1 Euler yapısına göre ardışık dönüşler uygulanarak Şekil A.2’deki gibi modellenebilmektedir [26].



Şekil A.2. Mühimmat eksen takımı dönüş sıralaması [33]

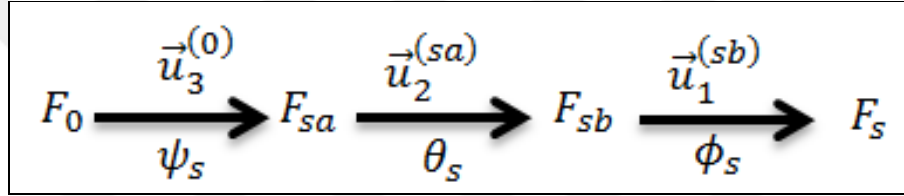
Bu durumda F_0 koordinat eksen takımı ile F_m koordinat eksen takımı arasındaki ilişkiyi tanımlayan dönüşüm matrisi (A.5) numaralı denklem ile ifade edilebilmektedir. İlgili dönüşümün matrisi açıkça F_m koordinat eksen takımındaki kinematik ifadelerin F_0 koordinat eksen takımına göre nasıl ifade edildiğini göstermek için kullanılmaktadır [34].

$$\hat{C}^{(0,m)} = \hat{R}_3(\psi_m) \hat{R}_2(\theta_m) \hat{R}_1(\phi_m) \quad (A.4)$$

$$\hat{C}^{(0,m)} = \begin{bmatrix} c\psi_m c\theta_m & c\psi_m s\theta_m s\phi_m - s\psi_m c\phi_m & c\psi_m s\theta_m c\phi_m + s\psi_m s\phi_m \\ s\psi_m c\theta_m & s\psi_m s\theta_m s\phi_m + c\psi_m c\phi_m & s\psi_m s\theta_m c\phi_m - c\psi_m s\phi_m \\ -s\theta_m & c\theta_m s\phi_m & c\theta_m c\phi_m \end{bmatrix} \quad (A.5)$$

(A.4) ve (A.5) numaralı denklemlerde kullanılan ψ_m , θ_m ve ϕ_m mühimmatın yere göre başka bir deyiş ile sabit yer eksen takımına göre sırası ile yandönme, yunuslama ve yuvarlanma açılarını ifade etmektedir.

Kardanın yere göre açısal konumu da mühimmatla benzer şekilde Şekil A.3'te ifade edildiği gibi modellenenbilmektedir.



Şekil A.3. Kardan eksen takımı dönüş sıralaması [33]

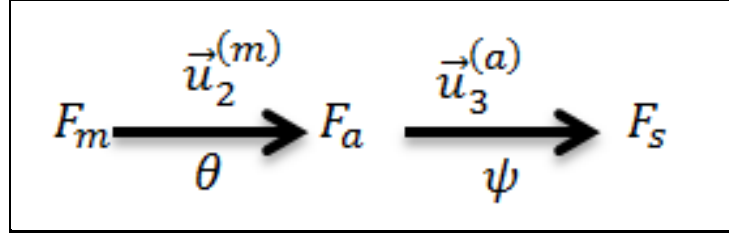
Bu durumda F_0 koordinat eksen takımı ile F_s koordinat eksen takımı arasındaki ilişkiyi tanımlayan dönüşüm matrisi (A.7) numaralı denklem ile ifade edilebilmektedir [34].

$$\hat{C}^{(0,s)} = \hat{R}_3(\psi_s) \hat{R}_2(\theta_s) \hat{R}_1(\phi_s) \quad (A.6)$$

$$\hat{C}^{(0,s)} = \begin{bmatrix} c\psi_s c\theta_s & c\psi_s s\theta_s s\phi_s - s\psi_s c\phi_s & c\psi_s s\theta_s c\phi_s + s\psi_s s\phi_s \\ s\psi_s c\theta_s & s\psi_s s\theta_s s\phi_s + c\psi_s c\phi_s & s\psi_s s\theta_s c\phi_s - c\psi_s s\phi_s \\ -s\theta_s & c\theta_s s\phi_s & c\theta_s c\phi_s \end{bmatrix} \quad (A.7)$$

(A.6) ve (A.7) numaralı denklemlerde kullanılan ψ_s , θ_s ve ϕ_s kardanın yere göre sırası ile yandönme, yunuslama ve yuvarlanma açılarını ifade etmektedir.

2-3 kardan yapısı için kardanın mühimmata göre açısal konumu, F_m mühimmat eksen takımı ile F_s kardan eksen takımının arasındaki ardışık dönüşlerle Şekil A.4'teki gibi modellenenbilmektedir.



Şekil A.4. Kardan eksen takımı dönüş sıralaması [33]

F_m koordinat eksen takımı ile F_s koordinat eksen takımı arasındaki ilişkiyi tanımlayan dönüşüm matrisi, (A.9) numaralı denklem ile ifade edilebilmektedir. Burada mühimmat eksen takımı ile kardan eksen takımı arasında tanımlanan ara eksen takımı (a) sembolüyle gösterilmektedir.

$$\hat{C}^{(m,s)} = \hat{R}_2(\theta) \hat{R}_3(\psi) \quad (A.8)$$

$$\hat{C}^{(m,s)} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\theta s\psi & s\theta \\ s\psi & c\psi & 0 \\ -s\theta c\psi & s\theta s\psi & c\theta \end{bmatrix} \quad (A.9)$$

Konum analizi

Kardan eksenlerinin konum analizi için hedefin kardanı göre bağıl konum vektörünün tanımlanması gerekmektedir. Bu durumda Şekil A.1’de gösterilen kinematik ilişki (A.10) numaralı denklemdeki gibi yazılabilmektedir.

$$\vec{r}_{M/O} + \vec{r}_{S/M} + \vec{r}_{T/S} = \vec{r}_{T/O} \quad (A.10)$$

(A.10) numaralı denklem ile kardanın hedefe göre bağıl konumu (A.11) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\vec{r}_{T/S} = \vec{r}_{T/O} - \vec{r}_{M/O} - \vec{r}_{S/M} \quad (A.11)$$

Kinematik hesaplamalarda kolaylık sağlamak amacıyla kardan dönü merkezi ile mühimmat ağırlık merkezi (ya da uygulamaya göre AÖB) aynı $\vec{u}_1$ birim vektörü eksenini üzerinde olduğunu kabul edilmektedir. Bu kabul ile kardan ile mühimmat arasındaki ilişkiyi tanımlayan $\vec{r}_{S/M}$ (A.12)-(A.15) numaralı denklemlerdeki işlemler ile (A.16) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\vec{r}_{S/M} = d_s \vec{u}_1 \quad (A.12)$$

$$\bar{r}_{S/M} = d_s \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A.13)$$

$$\bar{r}_{S/M} = d_s = s b t. \quad (A.14)$$

$$\bar{r}_{S/M} = \hat{C}^{(0,m)} \bar{r}_{S/M} \quad (A.15)$$

$$\bar{r}_{S/M} = d_s \begin{bmatrix} c \psi_m c \theta_m \\ s \psi_m c \theta_m \\ -s \theta_m \end{bmatrix} \quad (A.16)$$

(A.11) numaralı denklemde yer alan $\vec{r}_{M/O}$, $\vec{r}_{T/O}$ ve $\vec{r}_{T/S}$ vektörleri yer eksenleri birim vektörleri cinsinden sırasıyla (A.17), (A.18) ve (A.19) numaralı denklemlerdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\vec{r}_{M/O} = x_M \vec{u}_1^{(0)} + y_M \vec{u}_2^{(0)} + z_M \vec{u}_3^{(0)} \quad (A.17)$$

$$\vec{r}_{T/O} = x_T \vec{u}_1^{(0)} + y_T \vec{u}_2^{(0)} + z_T \vec{u}_3^{(0)} \quad (A.18)$$

$$\vec{r}_{T/S} = x \vec{u}_1^{(0)} + y \vec{u}_2^{(0)} + z \vec{u}_3^{(0)} \quad (A.19)$$

(A.17), (A.18) ve (A.19) numaralı denklemler (A.11) numaralı denklemde yerine yazılarak $\vec{r}_{T/S}$ vektörü (A.20) numaralı denklemlerdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\bar{r}_{T/S} = \begin{bmatrix} x_T - x_M - d_s [c \psi_m c \theta_m] \\ y_T - y_M - d_s [s \psi_m c \theta_m] \\ z_T - z_M + d_s [s \theta_m] \end{bmatrix} \quad (A.20)$$

Kardanın yere göre açısal konum bileşenleri

Kardanın sürekli olarak hedefe doğru yönleneceği kabul edilirse $\vec{r}_{T/S}$ vektörü sürekli olarak görüntüleme sisteminin $\vec{u}_1$ birim vektör ekseninde olacaktır. Bu durumda $\vec{r}_{T/S}$ vektörünün kardanın yere göre dönüşüm matrisi cinsinden (A.23) numaralı denklemdeki gibi tanımlanabilir.

$$\vec{r}_{T/S} = |\vec{r}_{T/S}| \vec{u}_1^{(s)} \quad (A.21)$$

$$\bar{r}_{T/S} = r \hat{C}^{(0,s)} \bar{u}_1^{s/s} = r \hat{C}^{(0,s)} \bar{u}_1 \quad (A.22)$$

$$\bar{r}_{T/S} = r \begin{bmatrix} c \psi_s c \theta_s \\ s \psi_s c \theta_s \\ -s \theta_s \end{bmatrix} \quad (A.23)$$

Yukarıda elde edilen eşitlikler kullanılarak ψ_s ve θ_s açıları sırasıyla (A.24) ve (A.25) numaralı denklemlerdeki gibi elde edilebilmektedir. Bu açılar sırası ile kardanın yere göre yandönme ve yunuslama açılarını ifade etmektedir.

$$\psi_s = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (A.24)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{-z c \psi_s}{x} \right) \quad (A.25)$$

F_m koordinat sistemi ile F_s koordinat sistemi arasındaki dönüşüm matrisi (A.27) numaralı denklemdeki gibi yazılabilmektedir.

$$\hat{C}_o^{(m,s)} = \hat{C}^{(m,o)} \hat{C}^{(o,s)} \quad (A.26)$$

$$\hat{C}_o^{(m,s)} = \left[\hat{C}^{(o,m)} \right]^T \hat{C}^{(o,s)} \quad (A.27)$$

(A.27) numaralı denklem ile ifade edilen dönüşüm matrisi (A.9) numaralı denklem ile ifade edilen $\hat{C}^{(m,s)}$ dönüşüm matrisine eşitlenerek ϕ_s açısı hesaplanabilir. $\hat{C}^{(m,s)}$ koordinat dönüşüm matrisinin 2. satır 3. sütunundaki eleman “0”dır. Bu durumda $\hat{C}^{(m,s)}(2,3) = \hat{C}_o^{(m,s)}(2,3) = 0$ eşitliğinden yararlanarak (A.28) numaralı denklem elde edilebilmektedir.

$$\phi_s = \tan^{-1} \left(\frac{A}{B} \right) \quad (A.28)$$

(A.28) numaralı denklemde yer alan A ve B ifadeleri sırasıyla (A.29) ve (A.30) numaralı denklemlerde verilmektedir.

$$A = s\theta_s [s\theta_m s\phi_m c(\psi_s - \psi_m) + c\phi_m s(\psi_s - \psi_m)] + c\theta_m s\phi_m c\theta_s \quad (A.29)$$

$$B = -s\theta_m s\phi_m s(\psi_s - \psi_m) + c\phi_m c(\psi_s - \psi_m) \quad (A.30)$$

Kardanın mühimmata göre açısıl konum bileşenleri

ϕ_s açısının bulunma yöntemi ile benzer şekilde kardanın mühimmata göre yandönme ve yunuslama açıları sırasıyla (A.31) ve (A.32) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(\hat{C}_0^{(m,s)}[3,1])^2 + (\hat{C}_0^{(m,s)}[1,1])^2}}{\hat{C}_0^{(m,s)}[2,1]} \right) \quad (A.31)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{-\hat{C}_0^{(m,s)}[3,1]}{\hat{C}_0^{(m,s)}[1,1]} \right) \quad (A.32)$$

Hız analizi

Mühimmatın yere göre açısıl hız bileşenleri

Mühimmatın Euler açılarının zamanla değişimi Şekil A.2’de verilen ardışık eksen dönüşümleri dikkate alınarak (A.33)-(A.35) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\vec{\omega}_{m/0} = \vec{\omega}_{m/mb} + \vec{\omega}_{mb/ma} + \vec{\omega}_{ma/0} \quad (A.33)$$

$$\vec{\omega}_{m/0}^{(m)} = \dot{\phi}_m [\hat{C}^{(mb,m)}]^T \vec{u}_1 + \dot{\theta}_m [\hat{C}^{(ma,m)}]^T \vec{u}_2 + \dot{\psi}_m [\hat{C}^{(0,m)}]^T \vec{u}_3 \quad (A.34)$$

$$\vec{\omega}_{m/0}^{(m)} = \dot{\phi}_m \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\theta}_m \begin{bmatrix} 0 \\ c \phi_m \\ -s \phi_m \end{bmatrix} + \dot{\psi}_m \begin{bmatrix} -s \theta_m \\ c \theta_m s \phi_m \\ c \theta_m c \phi_m \end{bmatrix} \quad (A.35)$$

Mühimmatın yere göre açısıl hızının F_M koordinat sistemindeki ifadesi (A.36) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\vec{\omega}_{m/0}^{(m)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s \theta_m \\ 0 & c \phi_m & c \theta_m s \phi_m \\ 0 & -s \phi_m & c \theta_m c \phi_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_m \\ \dot{\theta}_m \\ \dot{\psi}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (A.36)$$

(A.36) numaralı denklemde yer alan p, q ve r ifadeleri sırası ile mühimmatın kendi koordinat eksenindeki yuvarlanma, yunuslama ve yandönme hızlarıdır. Bu değerler uçuş (harekât) senaryolarından alınmaktadır.

Gerekli ara işlemler ((A.37)-(A.40)) yapılırsa mühimmatın yere göre Euler açılarının zamanla değişimi (A.41), (A.42) ve (A.43) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplabilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta_m \\ 0 & c\phi_m & c\theta_m s\phi_m \\ 0 & -s\phi_m & c\theta_m c\phi_m \end{bmatrix} \quad (A.37)$$

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & s\phi_m \frac{s\theta_m}{c\theta_m} & c\phi_m \frac{s\theta_m}{c\theta_m} \\ 0 & c\phi_m & -s\phi_m \\ 0 & \frac{s\phi_m}{c\theta_m} & \frac{c\phi_m}{c\theta_m} \end{bmatrix} \quad (A.38)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \dot{\phi}_m \\ \dot{\theta}_m \\ \dot{\psi}_m \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{\phi}_m \\ \dot{\theta}_m \\ \dot{\psi}_m \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (A.39)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_m \\ \dot{\theta}_m \\ \dot{\psi}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s\phi_m \frac{s\theta_m}{c\theta_m} & c\phi_m \frac{s\theta_m}{c\theta_m} \\ 0 & c\phi_m & -s\phi_m \\ 0 & \frac{s\phi_m}{c\theta_m} & \frac{c\phi_m}{c\theta_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (A.40)$$

$$\dot{\phi}_m = \dot{p} + s\phi_m \frac{s\theta_m}{c\theta_m} \dot{q} + c\phi_m \frac{s\theta_m}{c\theta_m} \dot{r} \quad (A.41)$$

$$\dot{\theta}_m = c\phi_m \dot{q} - s\phi_m \dot{r} \quad (A.42)$$

$$\dot{\psi}_m = \frac{s\phi_m}{c\theta_m} \dot{q} + \frac{c\phi_m}{c\theta_m} \dot{r} \quad (A.43)$$

Kardanın hedefe göre bağıl hız bileşenleri

(A.11) numaralı denklem ile verilen vektörel ifadenin F_0 koordinat sistemine göre türevi alınır ve görüntüleme sistemi ile hedef arasında bağıl hız bağıntısına (A.47) numaralı denklemdeki gibi ulaşılabilmektedir.

$$\vec{r}_{T/S} = \vec{r}_{T/0} - \vec{r}_{M/0} - \vec{r}_{S/M} \quad (A.44)$$

$$D_0(\vec{r}_{T/S}) = D_0(\vec{r}_{T/0}) - D_0(\vec{r}_{M/0}) - D_0(\vec{r}_{S/M}) \quad (A.45)$$

$$\vec{v}_{T/S} = \vec{v}_{T/0} - \vec{v}_{M/0} - [D_m(\vec{r}_{S/M}) + \vec{\omega}_{M/0} \times \vec{r}_{S/M}] \quad (A.46)$$

$$\vec{v}_{T/S}^{(0)} = \vec{v}_{T/0}^{(0)} - \vec{v}_{M/0}^{(0)} - \hat{C}^{(0,m)} \left[\dot{\vec{r}}_{S/M}^{(m)} + \vec{\omega}_{M/0}^{(m)} \cdot \vec{r}_{S/M}^{(m)} \right] \quad (A.47)$$

Kardan eksen takımı F_s ile mühimmat eksen takımı F_m arasındaki bağıl konum zamanla değişmediği için $\vec{r}_{S/M}$ büyüklüğü sabit bir büyüklüktür ve $\dot{\vec{r}}_{S/M}^{(m)} = 0$ olur ve bu sebeple (A.47) numaralı denklem (A.48) numaralı denklemdeki gibi sadeleştirilebilmektedir.

$$\vec{v}_{T/S}^{(0)} = \vec{v}_{T/0}^{(0)} - \vec{v}_{M/0}^{(0)} - \hat{C}^{(0,m)} \left[\vec{\omega}_{M/0}^{(m)} \cdot \vec{r}_{S/M}^{(m)} \right] \quad (A.48)$$

(A.49) numaralı denklemde yer alan $\vec{v}_{M/0}$ ifadesi mühimmatın yere göre doğrusal hız vektörüdür ve $\vec{r}_{T/0}$ 'nin ((A.18)) türevi alınarak bulunabilmektedir.

$$\vec{v}_{M/0} = \dot{x}_M \vec{u}_1^{(0)} + \dot{y}_M \vec{u}_2^{(0)} + \dot{z}_M \vec{u}_3^{(0)} \quad (A.49)$$

Mühimmatın yere göre doğrusal hız vektörü $\vec{v}_{M/0}$, kendi eksen takımı F_m üzerinde tanımlı doğrusal hızlar cinsinden (A.50) numaralı denklemde verildiği şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\vec{v}_{M/0} = u \vec{u}_1^{(m)} + v \vec{u}_2^{(m)} + w \vec{u}_3^{(m)} \quad (A.50)$$

(A.50) numaralı denklem sabit eksen takımı F_0 üzerinde ifade edilirse (A.52) numaralı denklemdeki gibi yazılabilmektedir.

$$\vec{v}_{M/0}^{(0)} = \hat{C}^{(0,m)} [u \vec{u}_1 + v \vec{u}_2 + w \vec{u}_3] \quad (A.51)$$

$$\vec{v}_{M/0}^{(0)} = \hat{C}^{(0,m)} \left[u \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + v \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + w \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right] = \hat{C}^{(0,m)} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_M \\ \dot{y}_M \\ \dot{z}_M \end{bmatrix} \quad (A.52)$$

(A.52) numaralı denklemde yer alan u, v ve w ifadeleri mühimmatın F_m koordinat sisteminde tanımlı doğrusal hız bileşenleridir. Aynı zamanda $\vec{v}_{M/0}$ hız vektörü, $\vec{r}_{M/0}$ konum vektörünün türevi alınarak da bulunabilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_M = & u(c \psi_m c \theta_m) + v(c \psi_m s \theta_m s \phi_m - s \psi_m c \phi_m) \\ & + w(c \psi_m s \theta_m c \phi_m + s \psi_m s \phi_m) \end{aligned} \quad (A.53)$$

$$\begin{aligned}\dot{y}_M = & u(s\psi_m c\theta_m) + v(s\psi_m s\theta_m s\phi_m + c\psi_m c\phi_m) \\ & + w(s\psi_m s\theta_m c\phi_m - c\psi_m s\phi_m)\end{aligned}\quad (A.54)$$

$$\dot{z}_M = u(-s\theta_m) + v(c\theta_m s\phi_m) + w(c\theta_m c\phi_m) \quad (A.55)$$

$\vec{v}_{T/o}$ hedefin yere göre doğrusal hız vektörü de benzer şekilde (A.56) numaralı denklemdeki gibi yazılabilmektedir.

$$\vec{v}_{T/o} = \dot{x}_T \vec{u}_1^{(0)} + \dot{y}_T \vec{u}_2^{(0)} + \dot{z}_T \vec{u}_3^{(0)} \quad (A.56)$$

Aynı zamanda $\vec{v}_{T/o}$ da hedefin kendi eksenini üzerinde tanımlı doğrusal hızlar cinsinden de (A.57) numaralı denklemdeki gibi yazılabilmektedir.

$$\vec{v}_{T/o} = u_T \vec{u}_1^{(t)} + v_T \vec{u}_2^{(t)} + w_T \vec{u}_3^{(t)} \quad (A.57)$$

$$\vec{v}_{T/o}^{(o)} = \hat{C}^{(o,t)} [u_T \vec{u}_1 + v_T \vec{u}_2 + w_T \vec{u}_3] \quad (A.58)$$

(A.47) numaralı denklem terimlerinden biri olan $\hat{C}^{(o,m)} [\tilde{\omega}_{M/O}^{(m)} \vec{r}_{S/M}^{(m)}]$ bağıntısı ise (A.60) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\hat{C}^{(o,m)} [\tilde{\omega}_{M/O}^{(m)} \vec{r}_{S/M}^{(m)}] = \hat{C}^{(o,m)} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (A.59)$$

$$\begin{aligned}\hat{C}^{(o,m)} [\tilde{\omega}_{M/O}^{(m)} \vec{r}_{S/M}^{(m)}] = & \begin{bmatrix} rd_s [c\psi_m s\theta_m s\phi_m - s\psi_m c\phi_m] - qd_s [c\psi_m s\theta_m c\phi_m + s\psi_m s\phi_m] \\ rd_s [s\psi_m s\theta_m s\phi_m + c\psi_m c\phi_m] - qd_s [s\psi_m s\theta_m c\phi_m - c\psi_m s\phi_m] \\ rd_s [c\theta_m s\phi_m] - qd_s [c\theta_m c\phi_m] \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (A.60)$$

Hedefin kardan göre bağıl hızının F_0 koordinat sistemindeki ifadesi (A.61) numaralı denklemdeki gibi elde edilebilmektedir.

$$\vec{v}_{T/S} = \dot{x} \vec{u}_1^{(0)} + \dot{y} \vec{u}_2^{(0)} + \dot{z} \vec{u}_3^{(0)} \quad (A.61)$$

Hesaplanan tüm terimler (A.47) numaralı denklemdeki hız bağıntısında yerine koyulur ve (A.61) numaralı denkleme eşitlenirse kardan hedefe göre hız bileşenleri (A.63), (A.64) ve (A.65) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\vec{v}_{T/S}^{(0)} = \vec{v}_{T/0}^{(0)} - \vec{v}_{M/0}^{(0)} - \hat{C}^{(0,m)} [\tilde{\omega}_{M/0}^{(m)} \cdot \vec{r}_{S/M}^{(m)}] = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (A.62)$$

$$\dot{x} = \dot{x}_T - \dot{x}_M - rd_s (c \psi_m s \theta_m s \phi_m - s \psi_m c \phi_m) + qd_s (c \psi_m s \theta_m c \phi_m + s \psi_m s \phi_m) \quad (A.63)$$

$$\dot{y} = \dot{y}_T - \dot{y}_M - rd_s (s \psi_m s \theta_m s \phi_m + c \psi_m c \phi_m) + qd_s (s \psi_m s \theta_m c \phi_m - c \psi_m s \phi_m) \quad (A.64)$$

$$\dot{z} = \dot{z}_T - \dot{z}_M - rd_s (c \theta_m s \phi_m) + qd_s (c \theta_m c \phi_m) \quad (A.65)$$

Kardanın yere göre açısal hız bileşenleri

Kardanın yere göre Euler açılarının zamanla değişimi ψ_s , θ_s ve ϕ_s açılarının hesaplandığı (A.24), (A.25) ve (A.28) numaralı denklemlerin zamana göre türevleri alınarak elde edilebilmektedir.

$$\dot{\psi}_s = \frac{\dot{y}x - y\dot{x}}{x^2 + y^2} \quad (A.66)$$

$$\dot{\theta}_s = \frac{\dot{\theta}_{sx}}{\dot{\theta}_{sy}} \quad (A.67)$$

(A.67) numaralı denklemdeki $\dot{\theta}_s$ ifadesinin pay ve paydası olan $\dot{\theta}_{sx}$ ve $\dot{\theta}_{sy}$ ifadeleri sırasıyla (A.68) ve (A.69) numaralı denklemlerdeki gibidir.

$$\dot{\theta}_{sx} = -\dot{z}x c \psi_s + zx \dot{\psi}_s s \psi_s + z\dot{x} c \psi_s \quad (A.68)$$

$$\dot{\theta}_{sy} = x^2 + (-z c \psi_s)^2 \quad (A.69)$$

Kardanın yuvarlanma hızının yere göre açısal hızı olan $\dot{\phi}_s$ ise (A.70) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\dot{\phi}_s = \frac{\dot{A}B + A\dot{B}}{A^2 + B^2} \quad (A.70)$$

(A.70) numaralı ifadede yer alan $\dot{A}$ ifadesi (A.71) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\dot{A} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 \quad (A.71)$$

$$A_1 = s\theta_m s\phi_m c\theta_s [\dot{\theta}_s c(\psi_s - \psi_m) - \dot{\theta}_m] \quad (A.72)$$

$$A_2 = c\theta_s c\phi_m [\dot{\phi}_m c\theta_m + \dot{\theta}_s s(\psi_s - \psi_m)] \quad (A.73)$$

$$A_3 = s\theta_s c\phi_m c(\psi_s - \psi_m) [\dot{\phi}_m s\theta_m + (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m)] \quad (A.74)$$

$$A_4 = s\theta_s s\phi_m s(\psi_s - \psi_m) [(\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s\theta_m + \dot{\phi}_m] \quad (A.75)$$

$$A_5 = s\theta_s c\theta_m s\phi_m [\dot{\theta}_m c(\psi_s - \psi_m) - \dot{\theta}_s] \quad (A.76)$$

(A.70) numaralı ifadede yer alan $\dot{B}$ ifadesi (A.77) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\dot{B} = -(B_1 + B_2 + B_3) \quad (A.77)$$

$$B_1 = s\phi_m c(\psi_s - \psi_m) [(\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s\theta_m + \dot{\phi}_m] \quad (A.78)$$

$$B_2 = c\phi_m s(\psi_s - \psi_m) [\dot{\phi}_m s\theta_m + (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m)] \quad (A.79)$$

$$B_3 = \dot{\theta}_m c\theta_m s\phi_m s(\psi_s - \psi_m) \quad (A.80)$$

Kardanın mühimmata göre açısal hız bileşenleri

Kardanın mühimmata göre açısal hızı (A.81) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\vec{\omega}_{s/m} = \vec{\omega}_{s/0} - \vec{\omega}_{m/0} \quad (A.81)$$

$\vec{\omega}_{s/0}$ kardanın yere göre açısal hız bileşenlerini kardan eksenleri bileşenleri cinsinden (A.84) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\vec{\omega}_{s/0} = \vec{\omega}_{s/sb} + \vec{\omega}_{sb/sa} + \vec{\omega}_{sa/0} \quad (A.82)$$

$$\vec{\omega}_{s/0}^{(s)} = \dot{\phi}_s [\hat{C}^{(sb,s)}]^T \bar{u}_1 + \dot{\theta}_s [\hat{C}^{(sa,s)}]^T \bar{u}_2 + \dot{\psi}_s [\hat{C}^{(0,s)}]^T \bar{u}_3 \quad (A.83)$$

$$\vec{\omega}_{s/0}^{(s)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta_s \\ 0 & c\phi_s & c\theta_s s\phi_s \\ 0 & s\phi_s & c\theta_s c\phi_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_s \\ \dot{\theta}_s \\ \dot{\psi}_s \end{bmatrix} \quad (A.84)$$

$\vec{\omega}_{m/0}$ ve $\vec{\omega}_{s/m}$ hızları sırasıyla (A.87) ve (A.89) numaralı denklemlerdeki gibi elde edilebilmektedir.

$$\vec{\omega}_{m/0} = p\vec{u}_1^{(m)} + q\vec{u}_2^{(m)} + r\vec{u}_3^{(m)} \quad (A.85)$$

$$\bar{\omega}_{m/0}^{(s)} = \hat{C}^{(s,m)} \bar{\omega}_{m/0} = [\hat{C}^{(m,s)}]^T \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (A.86)$$

$$\bar{\omega}_{m/0}^{(s)} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\psi & -s\theta c\psi \\ -c\theta c\psi & c\psi & s\theta c\psi \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (A.87)$$

$$\bar{\omega}_{s/m}^{(s)} = \dot{\psi} [\hat{C}^{(a,s)}]^T \bar{u}_3 + \dot{\theta} [\hat{C}^{(m,s)}]^T \bar{u}_2 \quad (A.88)$$

$$\bar{\omega}_{s/m}^{(s)} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} s\psi \\ \dot{\theta} c\psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (A.89)$$

Elde edilen ifadeler (A.81) numaralı denklemde yerlerine yazılarak kardanın mühimmata göre hız bileşenleri bulunabilmektedir.

$$\bar{\omega}_{s/m}^{(s)} = \bar{\omega}_{s/0}^{(s)} - \bar{\omega}_{m/0}^{(s)} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (A.90)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_s - \dot{\psi}_s s\theta_s - p c\theta c\psi - q s\psi + r s\theta c\psi \\ \dot{\theta}_s c\phi_s + \dot{\psi}_s c\theta_s s\phi_s + p c\theta c\psi - q c\psi - r s\theta c\psi \\ -\dot{\theta}_s s\phi_s + \dot{\psi}_s c\theta_s c\phi_s - p s\theta - r c\theta \end{bmatrix} \quad (A.91)$$

(A.89) ve (A.91) numaralı denklemler eşitlenirse $\dot{\psi}$ ve $\dot{\theta}$ ifadeleri (A.92), (A.93) veya (A.94) numaralı denklemlerdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\dot{\psi} = \omega_3 \quad (A.92)$$

$$\psi = 0 \text{ ise } \dot{\theta} = \frac{\omega_2}{c\psi} \quad (A.93)$$

$$\psi \neq 0 \text{ ise } \dot{\theta} = \frac{\omega_1}{s\psi} \quad (A.94)$$

İvme analizi

Hedefin kardan göre bağıl ivme bileşenleri

(A.62) numaralı denklemin yer eksen takımına göre türevi alınırsa hedefin kardan göre bağıl ivme bileşenleri (A.98) numaralı denklemdeki gibi bulunabilmektedir.

$$D_0(\vec{v}_{T/S}) = D_0(\vec{v}_{T/O}) - D_0(\dot{\vec{r}}_{S/M}) - D_0(\bar{\omega}_{M/O}) \times \vec{r}_{S/M} - \bar{\omega}_{M/O} \times D_0(\vec{r}_{S/M}) - D_0(\vec{v}_{M/O}) \quad (A.95)$$

$$\begin{aligned}\vec{a}_{T/S} = & \vec{a}_{T/O} - D_m(\dot{\vec{r}}_{S/M}) - \vec{\omega}_{M/O} \times \dot{\vec{r}}_{S/M} - \vec{\alpha}_{M/O} \times \vec{r}_{S/M} \\ & - \vec{\omega}_{M/O} \times [D_m(\vec{r}_{S/M}) + \vec{\omega}_{M/O} \times \vec{r}_{S/M}] - \vec{a}_{M/O}\end{aligned}\quad (A.96)$$

$$\vec{a}_{T/S} = \vec{a}_{T/O} - \vec{a}_{M/O} - \ddot{\vec{r}}_{S/M} - \vec{\omega}_{M/O} \times \dot{\vec{r}}_{S/M} - \vec{\alpha}_{M/O} \times \vec{r}_{S/M} - \vec{\omega}_{M/O} \times \dot{\vec{r}}_{S/M} - \vec{\omega}_{M/O} \times \vec{\omega}_{M/O} \times \vec{r}_{S/M} \quad (A.97)$$

$$\vec{a}_{T/S} = \vec{a}_{T/O} - \vec{a}_{M/O} - \ddot{\vec{r}}_{S/M} - 2\vec{\omega}_{M/O} \times \dot{\vec{r}}_{S/M} - \vec{\alpha}_{M/O} \times \vec{r}_{S/M} - \vec{\omega}_{M/O} \times \vec{\omega}_{M/O} \times \vec{r}_{S/M} \quad (A.98)$$

(A.98) numaralı denklemde yer alan $\vec{r}_{S/M}$ büyüklüğü sabit bir büyüklük oluşu için $\dot{\vec{r}}_{S/M} = 0$ ve $\ddot{\vec{r}}_{S/M} = 0$ olur ve (A.98) numaralı denklem (A.99) numaralı denklemdeki gibi sadeleştirilebilmektedir.

$$\vec{a}_{T/S} = \vec{a}_{T/O} - \vec{a}_{M/O} - \vec{\alpha}_{M/O} \times \vec{r}_{S/M} - \vec{\omega}_{M/O} \times \vec{\omega}_{M/O} \times \vec{r}_{S/M} \quad (A.99)$$

Kardanının yere göre ivmesi ise (A.100) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\vec{a}_{S/O} = \vec{a}_{M/O} + \vec{\alpha}_{M/O} \times \vec{r}_{S/M} + \vec{\omega}_{M/O} \times \vec{\omega}_{M/O} \times \vec{r}_{S/M} \quad (A.100)$$

Mühimmatın yere göre doğrusal ivme bileşenleri

Mühimmatın yere göre doğrusal ivme bileşenleri (A.101) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\vec{a}_{M/O} = \ddot{x}_M \vec{u}_1^{(0)} + \ddot{y}_M \vec{u}_2^{(0)} + \ddot{z}_M \vec{u}_3^{(0)} \quad (A.101)$$

(A.101) numaralı denklemde yer alan $\ddot{x}_m$, $\ddot{y}_m$ ve $\ddot{z}_m$ ifadeleri sırasıyla (A.53), (A.54) ve (A.55) numaralı denklemlerin türevleri türevi alınarak hesaplanabilmektedir.

$$\begin{aligned}\ddot{x}_M = & \dot{u}(c\psi_m c\theta_m) + u(-\dot{\psi}_m s\psi_m c\theta_m - \dot{\theta}_m c\psi_m s\theta_m) + \dot{v}(c\psi_m s\theta_m s\phi_m - s\psi_m c\phi_m) \\ & + v \left[\begin{aligned} & (\dot{\phi}_m c\psi_m s\theta_m c\phi_m + \dot{\theta}_m c\psi_m c\theta_m s\phi_m - \dot{\psi}_m s\psi_m s\theta_m s\phi_m) \\ & - (\dot{\psi}_m c\psi_m c\phi_m - \dot{\phi}_m s\psi_m s\phi_m) \end{aligned} \right]\end{aligned}\quad (A.102)$$

$$\begin{aligned}& + w \left[\begin{aligned} & (-\dot{\phi}_m c\psi_m s\theta_m s\phi_m + \dot{\theta}_m c\psi_m c\theta_m c\phi_m - \dot{\psi}_m s\psi_m s\theta_m c\phi_m) \\ & + (\dot{\psi}_m c\psi_m s\phi_m + \dot{\phi}_m s\psi_m c\phi_m) \end{aligned} \right] \\ & + \dot{w}(c\psi_m s\theta_m c\phi_m + s\psi_m s\theta_m)\end{aligned}$$

$$\ddot{y}_M = \dot{u}(s\psi_m c\theta_m) + u(\dot{\psi}_m c\psi_m c\theta_m - \dot{\theta}_m s\psi_m s\theta_m) + \dot{v}(s\psi_m s\theta_m s\phi_m + c\psi_m c\phi_m) \quad (A.103)$$

$$\begin{aligned}
& +v \left[\begin{aligned} & (\dot{\phi}_m s\psi_m s\theta_m c\phi_m + \dot{\theta}_m s\psi_m c\theta_m s\phi_m + \dot{\psi}_m c\psi_m s\theta_m s\phi_m) \\ & + (-\dot{\psi}_m s\psi_m c\phi_m - \dot{\phi}_m c\psi_m s\phi_m) \end{aligned} \right] \\
& +w \left[\begin{aligned} & (-\dot{\phi}_m s\psi_m s\theta_m s\phi_m + \dot{\theta}_m s\psi_m c\theta_m c\phi_m + \dot{\psi}_m c\psi_m s\theta_m c\phi_m) \\ & - (-\dot{\psi}_m s\psi_m s\phi_m + \dot{\phi}_m s\psi_m c\phi_m) \end{aligned} \right] \\
& +\dot{w}(s\psi_m s\theta_m c\phi_m - c\psi_m s\theta_m) \\
\ddot{z}_M = & \dot{u}(-s\theta_m) - u(\dot{\theta}_m c\theta_m) + \dot{v}(c\theta_m s\phi_m) + v(-\dot{\theta}_m s\theta_m s\phi_m + \dot{\phi}_m c\theta_m s\phi_m) \\
& + \dot{w}(c\theta_m c\phi_m) + w(-\dot{\theta}_m s\theta_m c\phi_m - \dot{\phi}_m c\theta_m s\phi_m)
\end{aligned} \tag{A.104}$$

(A.102), (A.103) ve (A.104) numaralı denklemlerde yer alan $\dot{u}$, $\dot{v}$ ve $\dot{w}$ ifadeleri ise (A.105) ve (A.106) numaralı ifadeler türetilerek elde edilebilmektedir.

$$\vec{v}_{M/0} = u\vec{u}_1^{(m)} + v\vec{u}_2^{(m)} + w\vec{u}_3^{(m)} \tag{A.105}$$

$$D_0(\vec{v}_{M/0}) = D_m(\vec{v}_{M/0}) + \vec{\omega}_{M/O} \times \vec{v}_{M/0} \tag{A.106}$$

$$\vec{a}_{M/0}^{(m)} = \dot{\vec{v}}_{M/0}^{(m)} + \vec{\omega}_{M/O}^{(m)} \cdot \vec{v}_{M/0}^{(m)} \tag{A.107}$$

$$\vec{a}_{M/0}^{(m)} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \tag{A.108}$$

$$\vec{a}_{M/0}^{(m)} = \begin{bmatrix} \dot{u} - rv + qw \\ \dot{v} + ru - pw \\ \dot{w} - qu + pv \end{bmatrix} \tag{A.109}$$

(A.109) numaralı denklemde ifade edilen mühimmatın yere göre mühimmat eksen takımındaki ivme bileşenleri (A.110) numaralı denklemdeki gibi de ifade edilebilmektedir.

$$\vec{a}_{M/0} = a_M^x \vec{u}_1^{(m)} + a_M^y \vec{u}_2^{(m)} + a_M^z \vec{u}_3^{(m)} \tag{A.110}$$

(A.110) numaralı denklemde yer alan a_M^x , a_M^y ve a_M^z ifadeleri sırasıyla (A.111), (A.112) ve (A.113) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$a_M^x = \dot{u} - rv + qw \tag{A.111}$$

$$a_M^y = \dot{v} + ru - pw \tag{A.112}$$

$$a_M^z = \dot{w} - qu + pv \quad (A.113)$$

(A.111), (A.112) ve (A.113) numaralı denklemler düzenlenirse $\dot{u}$, $\dot{v}$ ve $\dot{w}$ ifadeleri sırasıyla (A.114), (A.115) ve (A.116) numaralı denklemlerdeki gibi elde edilebilmektedir.

$$\dot{u} = a_M^x + rv - qw \quad (A.114)$$

$$\dot{v} = a_M^y - ru + pw \quad (A.115)$$

$$\dot{w} = a_M^z + qu - pv \quad (A.116)$$

Hedefin kardana göre doğrusal ivme bileşenleri

Hedefin kardana göre doğrusal ivme bileşenleri sırasıyla (A.63), (A.64) ve (A.65) numaralı denklemlerin türevleri alınarak (A.117), (A.118) ve (A.119) numaralı denklemlerdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\begin{aligned} \ddot{x} = & \ddot{x}_T - \ddot{x}_M - \dot{r}d_s (c\psi_m s\theta_m s\phi_m - s\psi_m c\phi_m) \\ & - r\dot{d}_s \left(\begin{aligned} & -\dot{\psi}_m s\psi_m s\theta_m s\phi_m + \dot{\theta}_m c\psi_m c\theta_m s\phi_m + \dot{\phi}_m c\psi_m s\theta_m c\phi_m \\ & -\dot{\psi}_m c\psi_m c\phi_m + \dot{\phi}_m s\psi_m s\phi_m \end{aligned} \right) \\ & + q\dot{d}_s \left(\begin{aligned} & -\dot{\psi}_m s\psi_m s\theta_m c\phi_m + \dot{\theta}_m c\psi_m c\theta_m c\phi_m - \dot{\phi}_m c\psi_m s\theta_m s\phi_m \\ & +\dot{\psi}_m c\psi_m s\phi_m + \dot{\phi}_m s\psi_m c\phi_m \end{aligned} \right) \\ & + \dot{q}d_s (c\psi_m s\theta_m c\phi_m + s\psi_m s\phi_m) \end{aligned} \quad (A.117)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} = & \ddot{y}_T - \ddot{y}_M - \dot{r}d_s (s\psi_m s\theta_m s\phi_m + c\psi_m c\phi_m) \\ & - r\dot{d}_s \left(\begin{aligned} & \dot{\psi}_m c\psi_m s\theta_m s\phi_m + \dot{\theta}_m s\psi_m c\theta_m s\phi_m + \dot{\phi}_m s\psi_m s\theta_m c\phi_m - \dot{\psi}_m s\psi_m c\phi_m \\ & -\dot{\phi}_m c\psi_m s\phi_m \end{aligned} \right) \\ & + q\dot{d}_s \left(\begin{aligned} & \dot{\psi}_m c\psi_m s\theta_m c\phi_m + \dot{\theta}_m s\psi_m c\theta_m c\phi_m - \dot{\phi}_m s\psi_m s\theta_m s\phi_m + \dot{\psi}_m s\psi_m s\phi_m \\ & -\dot{\phi}_m c\psi_m c\phi_m \end{aligned} \right) \\ & + \dot{q}d_s (s\psi_m s\theta_m c\phi_m - c\psi_m s\phi_m) \end{aligned} \quad (A.118)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z} = & \ddot{z}_T - \ddot{z}_M - \dot{r}d_s (c\theta_m s\phi_m) + r\dot{d}_s (\dot{\theta}_m s\theta_m s\phi_m - \dot{\phi}_m c\theta_m c\phi_m) \\ & + \dot{q}d_s (c\theta_m c\phi_m) - q\dot{d}_s (\dot{\theta}_m s\theta_m c\phi_m + \dot{\phi}_m c\theta_m s\phi_m) \end{aligned} \quad (A.119)$$

Mühimmatın yere göre açısal ivme bileşenleri

Mühimmatın yere göre yuvarlanma, yunuslama ve yandönme açısal ivme bileşenlerinin ifaları sırasıyla (A.41), (A.42) ve (A.43) numaralı denklemlerin türevleri alınarak (A.120), (A.121) ve (A.122) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\ddot{\phi}_m = \dot{p} + \dot{q}s\phi_m \frac{s\theta_m}{c\theta_m} + \dot{r}c\phi_m \frac{s\theta_m}{c\theta_m} + \dot{\phi}_m \frac{s\theta_m}{c\theta_m} (qc\phi_m - rs\phi_m) + \dot{\theta}_m \left(\frac{1}{c\theta_m} \right)^2 (qs\phi_m + rc\phi_m) \quad (A.120)$$

$$\ddot{\theta}_m = \dot{q}c\phi_m + \dot{r}s\phi_m + \dot{\phi}_m (rc\phi_m - qs\phi_m) \quad (A.121)$$

$$\ddot{\psi}_m = \dot{q} \frac{s\phi_m}{c\theta_m} + \dot{r} \frac{c\phi_m}{c\theta_m} + \dot{\phi}_m \frac{qc\phi_m - rs\phi_m}{c\theta_m} + \dot{\theta}_m \frac{qs\phi_m s\theta_m + rc\phi_m s\theta_m}{(c\theta_m)^2} \quad (A.122)$$

Kardanın yere göre açısal ivme bileşenleri

Kardanın yere göre açısal ivme bileşenleri ise (A.66) ve (A.67) numaralı denklemlerin türevleri alınarak (A.123) ve (A.124) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\ddot{\psi}_s = \frac{(\ddot{y}x - y\ddot{x})(x^2 + y^2) - (\dot{y}x - y\dot{x})(2x\dot{x} + 2y\dot{y})}{(x^2 + y^2)^2} \quad (A.123)$$

$$\ddot{\theta}_s = \frac{\ddot{\theta}_{sx}\dot{\theta}_{sy} - \dot{\theta}_{sx}\ddot{\theta}_{sy}}{(\dot{\theta}_{sy})^2} \quad (A.124)$$

(A.124) numaralı denklemde yer alan $\ddot{\theta}_{sx}$ ve $\ddot{\theta}_{sy}$ ifadeleri (A.68) ve (A.69) numaralı denklemlerin türevleri alınarak (A.125) ve (A.126) numaralı denklemlerdeki elde edilebilmektedir.

$$\ddot{\theta}_{sx} = -\ddot{z}xc\psi_s + z\ddot{x}c\psi_s + \ddot{\psi}_s zxs\psi_s + 2\dot{z}x\dot{\psi}_s s\psi_s + \dot{\psi}_s^2 zxc\psi_s \quad (A.125)$$

$$\ddot{\theta}_{sy} = 2x\dot{x} - (2zc\psi_s)(\dot{z}c\psi_s + \dot{\psi}_s zs\psi_s) \quad (A.126)$$

Kardanın yere göre yuvarlanma açısal ivmesi (A.70) numaralı ifadenin türevi alınarak (A.127) numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\ddot{\phi}_s = \frac{(\ddot{A}B - A\ddot{B})(A^2 + B^2) - (\dot{A}B - A\dot{B})(2A\dot{A} + 2B\dot{B})}{(A^2 + B^2)^2} \quad (A.127)$$

(A.127) numaralı denklemde yer alan $\ddot{A}$ ifadesi (A.128)-(A.133) numaralı denklemlerdeki gibidir.

$$\ddot{A} = A_1 \dot{A}_1 + A_2 \dot{A}_2 + A_3 \dot{A}_3 + A_4 \dot{A}_4 + A_5 \dot{A}_5 \quad (A.128)$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_1 = & (\dot{\theta}_m c \theta_m s \phi_m c \theta_s + \dot{\phi}_m s \theta_m c \phi_m c \theta_s - \dot{\theta}_s s \theta_m s \phi_m s \theta_s) (\dot{\theta}_s c (\psi_s - \psi_m) - \dot{\theta}_m) \\ & + (s \theta_m s \phi_m c \theta_s) (\ddot{\theta}_s c (\psi_s - \psi_m) - \dot{\theta}_s (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s (\psi_s - \psi_m) - \ddot{\theta}_m) \end{aligned} \quad (A.129)$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_2 = & (-\dot{\theta}_s s \theta_s c \phi_m - \dot{\phi}_m c \theta_s s \phi_m) (\dot{\phi}_m c \theta_m + \dot{\theta}_s s (\psi_s - \psi_m)) \\ & + (c \theta_s c \phi_m) (\ddot{\phi}_m c \theta_m - \dot{\phi}_m \dot{\theta}_m s \theta_m + \ddot{\theta}_s s (\psi_s - \psi_m) + \dot{\theta}_s (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) c (\psi_s - \psi_m)) \end{aligned} \quad (A.130)$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_3 = & (\dot{\theta}_s c \theta_s c \phi_m c (\psi_s - \psi_m) - \dot{\phi}_m s \theta_s s \phi_m c (\psi_s - \psi_m) - (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s \theta_s c \phi_m s (\psi_s - \psi_m)) \\ & \cdot (\dot{\phi}_m s \theta_m + (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m)) + (s \theta_s c \phi_m c (\psi_s - \psi_m)) (\ddot{\phi}_m s \theta_m + \dot{\phi}_m \dot{\theta}_m c \theta_m + (\ddot{\psi}_s - \ddot{\psi}_m)) \end{aligned} \quad (A.131)$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_4 = & \left(\dot{\theta}_s c \theta_s s \phi_m s (\psi_s - \psi_m) + \dot{\phi}_m s \theta_s c \phi_m s (\psi_s - \psi_m) \right) ((\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s \theta_m + \dot{\phi}_m) \\ & + (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s \theta_s s \phi_m c (\psi_s - \psi_m) \\ & + (s \theta_s s \phi_m s (\psi_s - \psi_m)) ((\ddot{\psi}_s - \ddot{\psi}_m) s \theta_m + \dot{\theta}_m (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) c \theta_m + \ddot{\phi}_m) \end{aligned} \quad (A.132)$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_5 = & (\dot{\theta}_s c \theta_s c \theta_m s \phi_m - \dot{\theta}_m s \theta_s s \theta_m s \phi_m + \dot{\phi}_m s \theta_s c \theta_m c \phi_m) (\dot{\theta}_m c (\psi_s - \psi_m) - \dot{\theta}_s) \\ & + (s \theta_s c \theta_m s \phi_m) (\ddot{\theta}_m c (\psi_s - \psi_m) - \dot{\theta}_m (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s (\psi_s - \psi_m) - \ddot{\theta}_s) \end{aligned} \quad (A.133)$$

(A.127) numaralı denklemde yer alan $\ddot{B}$ ifadesi (A.134)-(A.137) numaralı denklemlerdeki gibidir.

$$\ddot{B} = -(B_1 \dot{B}_1 + B_2 \dot{B}_2 + B_3 \dot{B}_3) \quad (A.134)$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_1 = & (\dot{\phi}_m c \phi_m c (\psi_s - \psi_m) - (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s \phi_m s (\psi_s - \psi_m)) ((\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s \theta_m + \dot{\phi}_m) \\ & + (s \phi_m c (\psi_s - \psi_m)) ((\ddot{\psi}_s - \ddot{\psi}_m) s \theta_m + \dot{\theta}_m (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) s \theta_m + \ddot{\phi}_m) \end{aligned} \quad (A.135)$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_2 = & (-\dot{\phi}_m s \phi_m s (\psi_s - \psi_m) + (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) c \phi_m c (\psi_s - \psi_m)) (\dot{\phi}_m s \theta_m + (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m)) \\ & + (c \phi_m s (\psi_s - \psi_m)) (\ddot{\phi}_m s \theta_m + \dot{\theta}_m \dot{\phi}_m c \theta_m + (\ddot{\psi}_s - \ddot{\psi}_m)) \end{aligned} \quad (A.136)$$

$$\begin{aligned}\dot{B}_3 = & \ddot{\theta}_m c\theta_m s\phi_m s(\psi_s - \psi_m) - \dot{\theta}_m^2 s\theta_m s\phi_m s(\psi_s - \psi_m) + \dot{\theta}_m \dot{\phi}_m c\theta_m c\phi_m s(\psi_s - \psi_m) \\ & + \dot{\theta}_m (\dot{\psi}_s - \dot{\psi}_m) c\theta_m s\phi_m c(\psi_s - \psi_m)\end{aligned}\quad (A.137)$$

Kardanın mühimmata göre açısal ivme bileşenleri

(A.92) ve (A.93) **(A.93)** veya (A.94) numaralı denklemlerdeki ifadelerin türevleri alınırsa kardanın mühimmata göre açısal ivme bileşenleri (A.138) ve (A.139) veya (A.140) numaralı denklemlerdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\ddot{\psi} = \dot{\omega}_3 \quad (A.138)$$

$$\psi = 0 \text{ ise } \ddot{\theta} = \frac{\dot{\omega}_2 c\psi + \omega_2 \dot{\psi} s\psi}{(c\psi)^2} \quad (A.139)$$

$$\psi \neq 0 \text{ ise } \ddot{\theta} = \frac{\dot{\omega}_1 s\psi - \omega_1 \dot{\psi} c\psi}{(s\psi)^2} \quad (A.140)$$

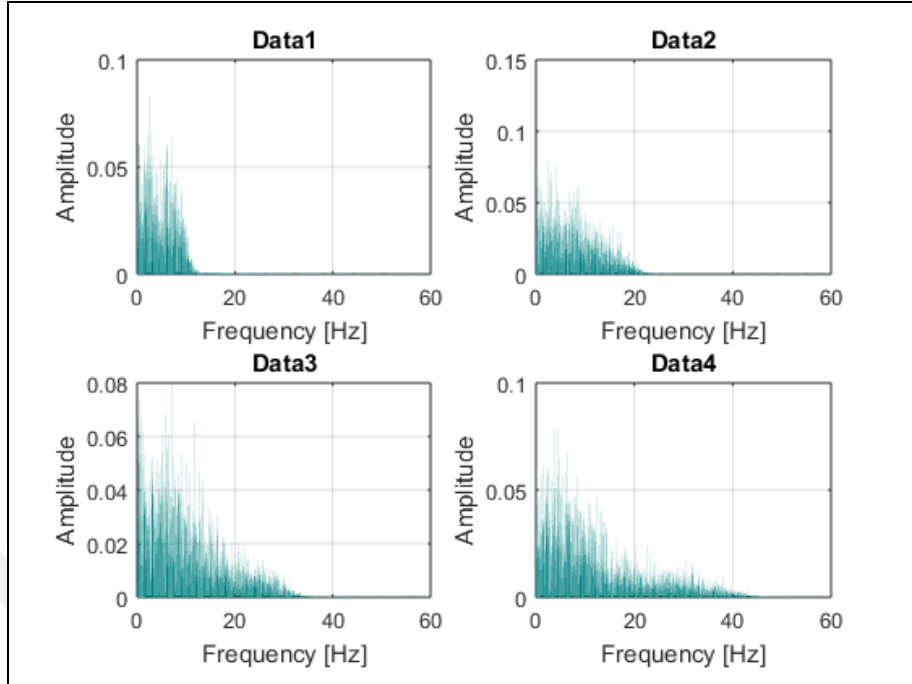
(A.138), (A.139) ve (A.140) numaralı denklemlerde yer alan $\dot{\omega}_1$, $\dot{\omega}_2$ ve $\dot{\omega}_3$ ifadeleri sırasıyla (A.141), (A.142) ve (A.143) numaralı denklemlerdeki gibidir.

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_1 = & \ddot{\phi}_s - \ddot{\psi}_s s\theta_s - \dot{\psi}_s \dot{\theta}_s c\theta_s - \dot{p}c\theta c\psi + p\dot{\theta}s\theta c\psi + p\dot{\psi}c\theta s\psi - \dot{q}s\psi - q\dot{\psi}c\psi + \dot{r}s\theta c\psi \\ & + r\dot{\theta}c\theta c\psi - r\dot{\psi}s\theta s\psi\end{aligned}\quad (A.141)$$

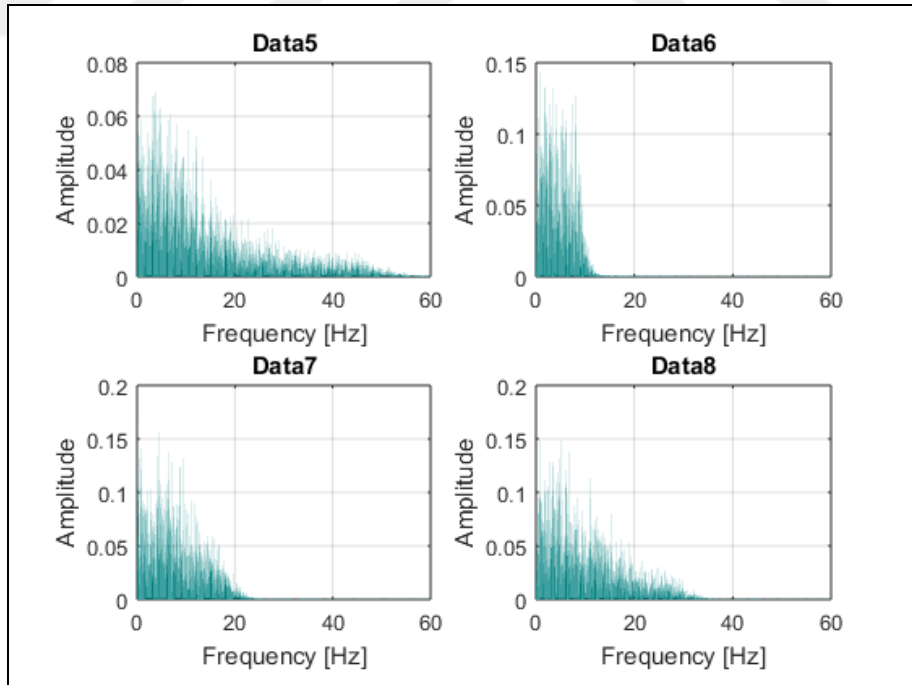
$$\begin{aligned}\dot{\omega}_2 = & \ddot{\theta}_s c\phi_s - \dot{\theta}_s \dot{\phi}_s s\phi_s + \ddot{\psi}_s c\theta_s s\phi_s - \dot{\psi}_s \dot{\theta}_s s\theta_s s\phi_s + \dot{\psi}_s \dot{\phi}_s c\theta_s c\phi_s + \dot{p}c\theta s\psi - p\dot{\theta}s\theta s\psi \\ & + p\dot{\psi}c\theta c\psi - \dot{q}c\psi + q\dot{\psi}s\psi - \dot{r}s\theta c\psi - r\dot{\theta}c\theta c\psi + r\dot{\psi}s\theta s\psi\end{aligned}\quad (A.142)$$

$$\dot{\omega}_3 = -\ddot{\theta}_s s\phi_s - \dot{\theta}_s \dot{\phi}_s c\phi_s + \ddot{\psi}_s c\theta_s c\phi_s - \dot{\psi}_s \dot{\theta}_s s\theta_s c\phi_s - \dot{\psi}_s \dot{\phi}_s c\theta_s s\phi_s - \dot{p}s\theta - p\dot{\theta}c\theta - \dot{r}c\theta + r\dot{\theta}s\theta, \quad (A.143)$$

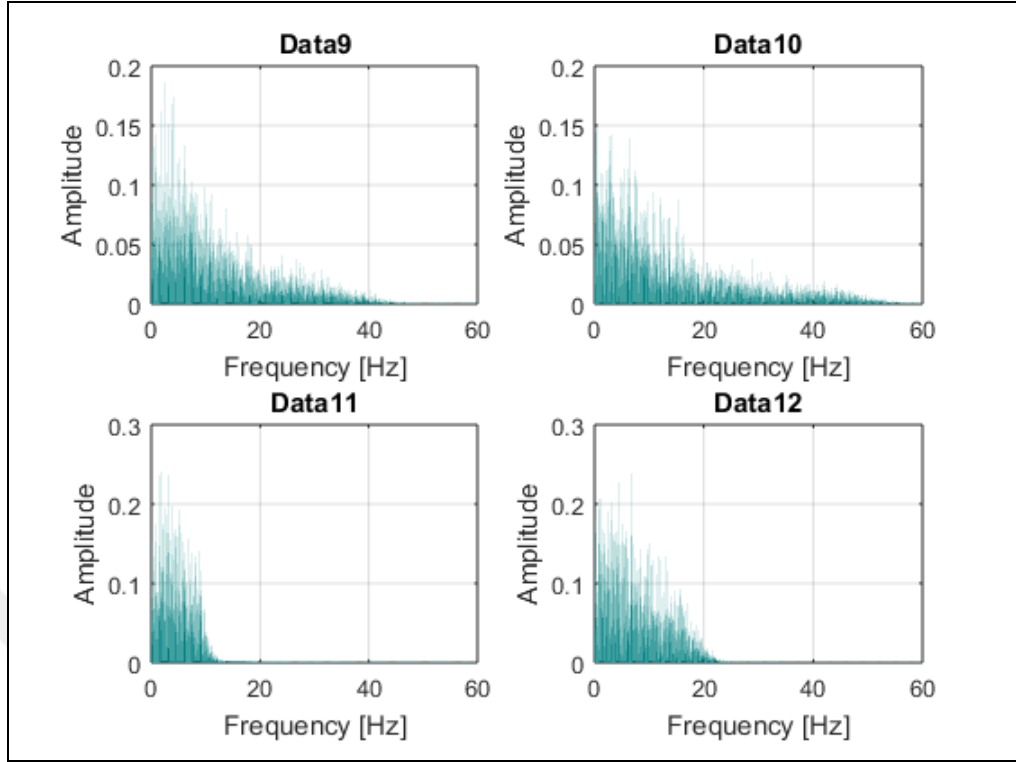
Sistem Tanımlama Giriş Sinyallerinin Frekans Uzaı Gösterimi



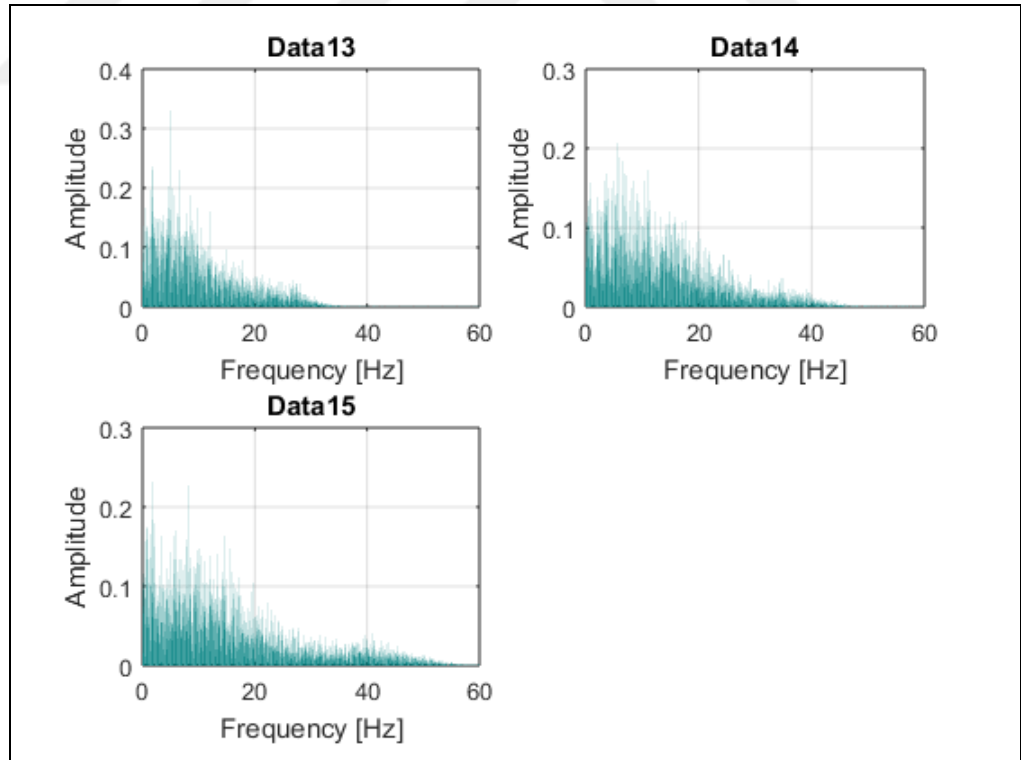
Şekil A.5. Sistem tanımlama PRBS sinyali (yandönme eksen, Data1-Data4)



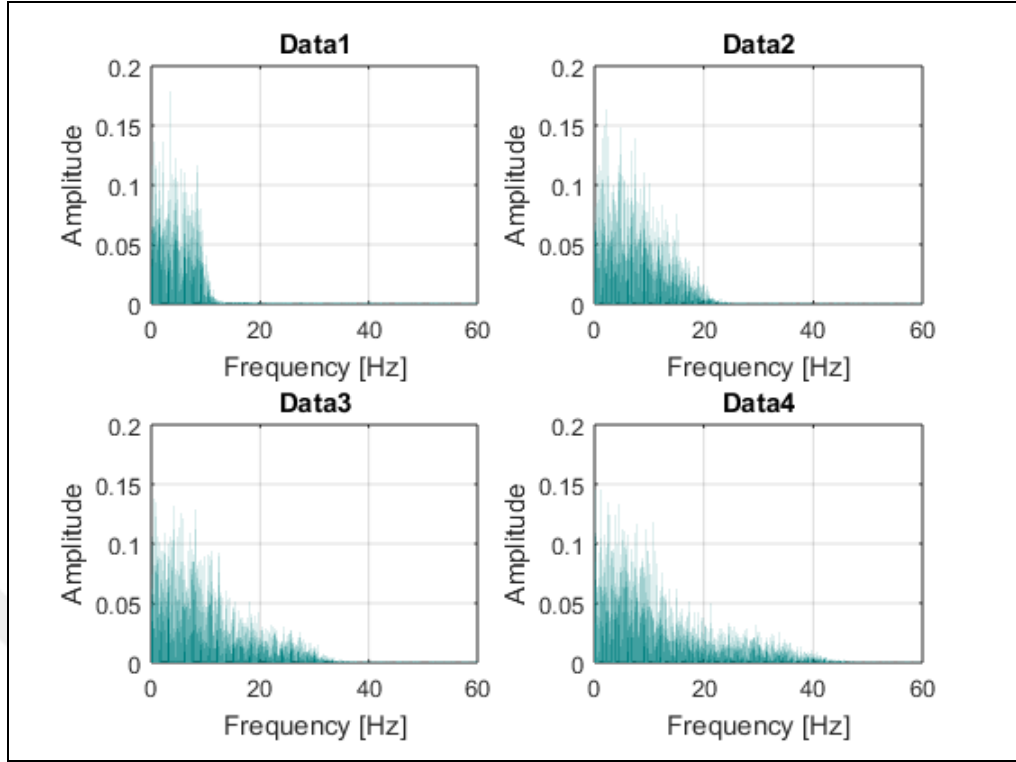
Şekil A.6. Sistem tanımlama PRBS sinyali (yandönme eksen, Data5-Data8)



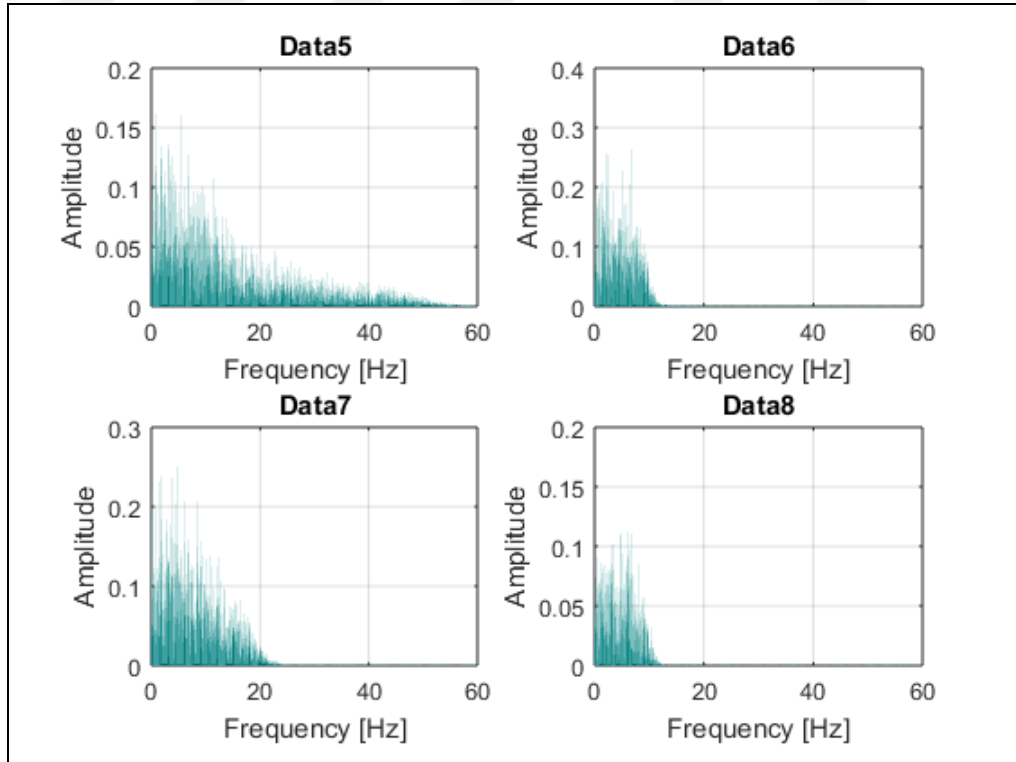
Şekil A.7. Sistem tanımlama PRBS sinyali (yandönme eksen, Data9-Data12)



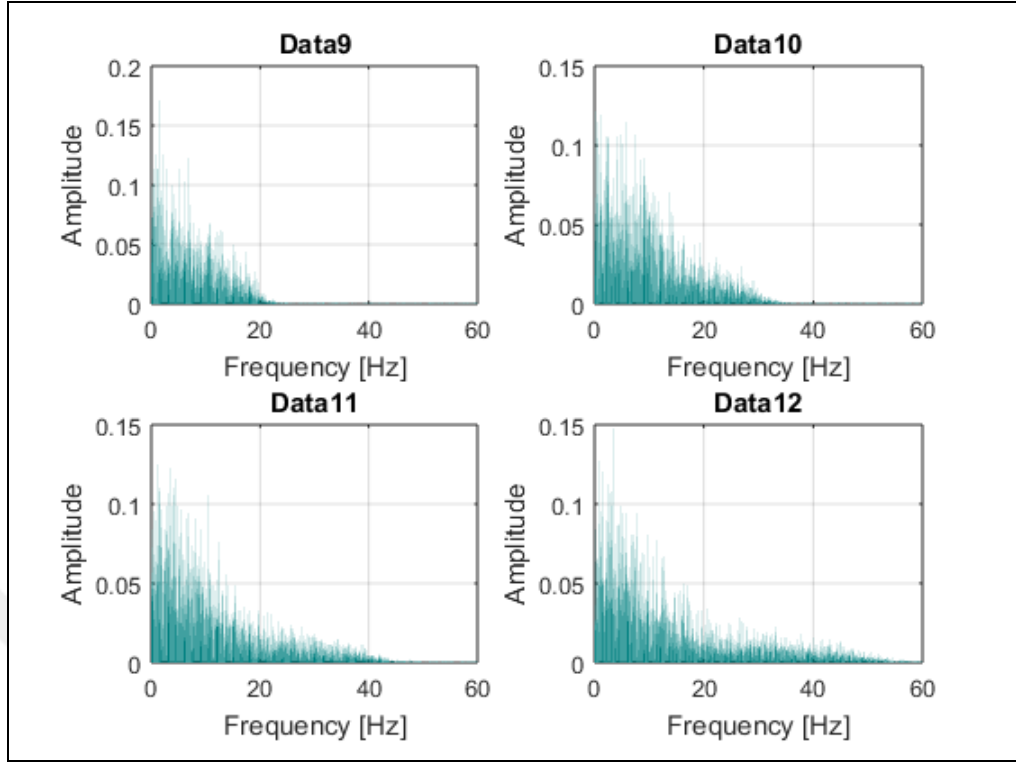
Şekil A.8. Sistem tanımlama PRBS sinyali (yandönme eksen, Data13-Data15)



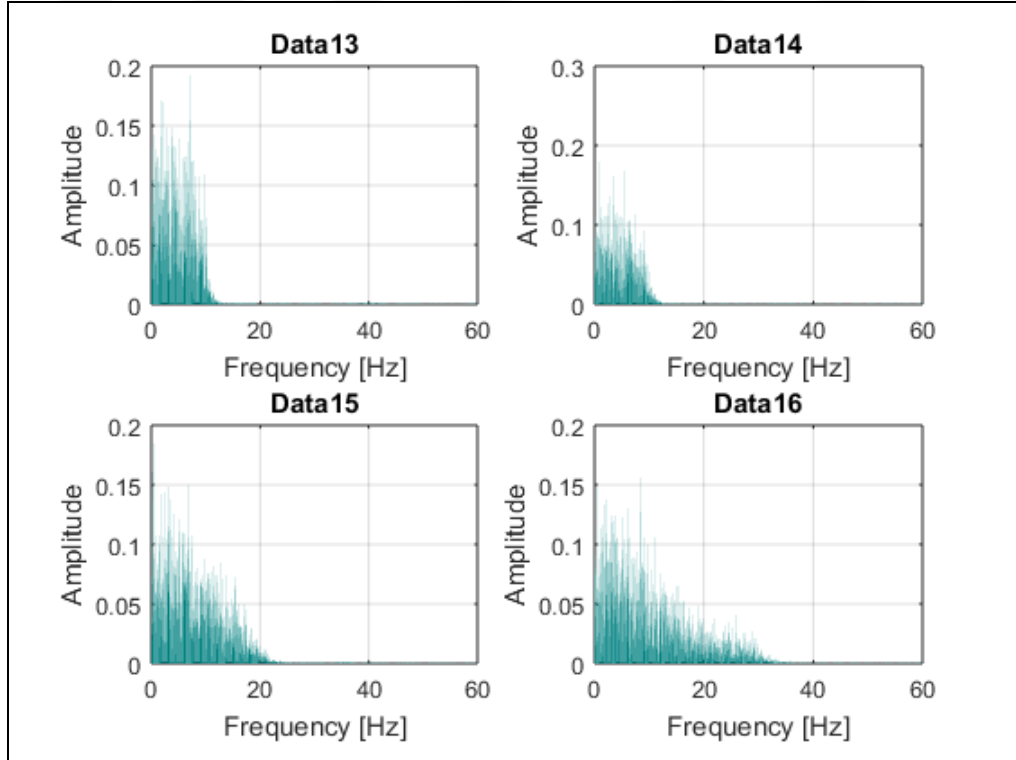
Şekil A.9. Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data1-Data4)



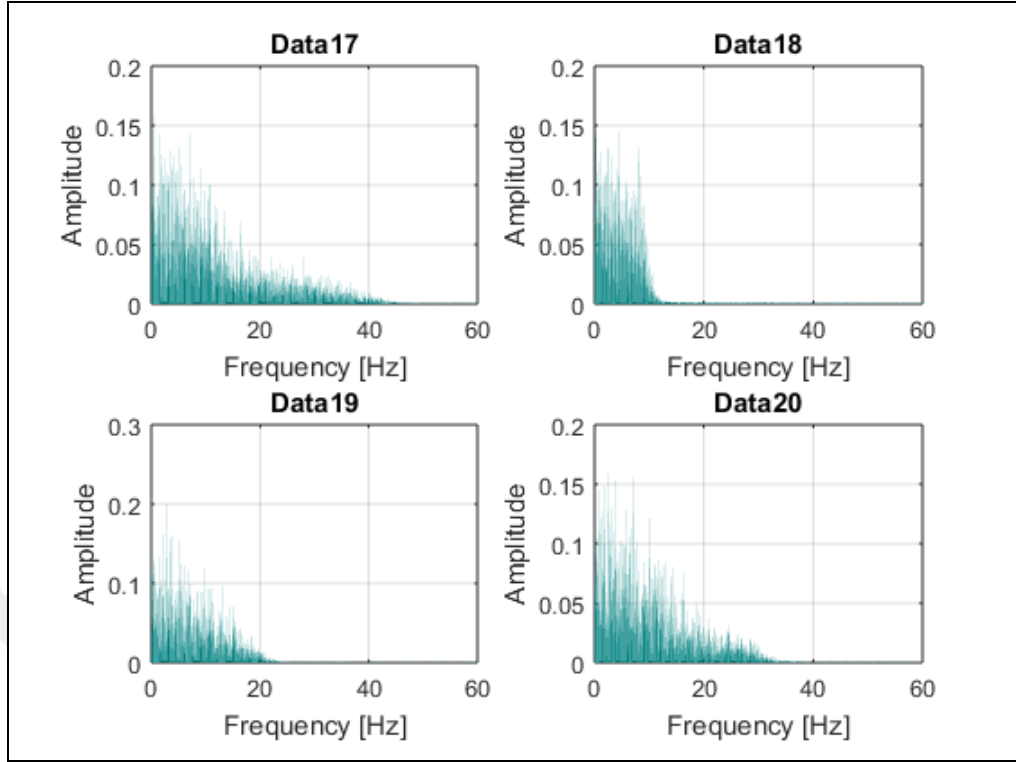
Şekil A.10. Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data5-Data8)



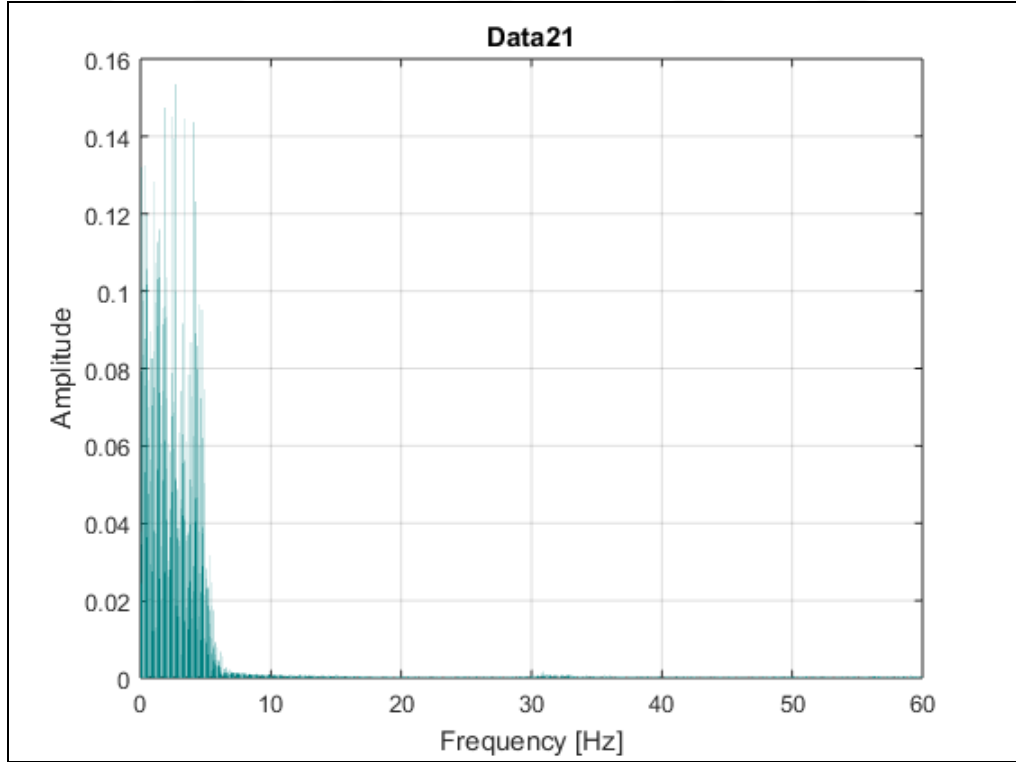
Şekil A.11. Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data9-Data12)



Şekil A.12. Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data13-Data16)

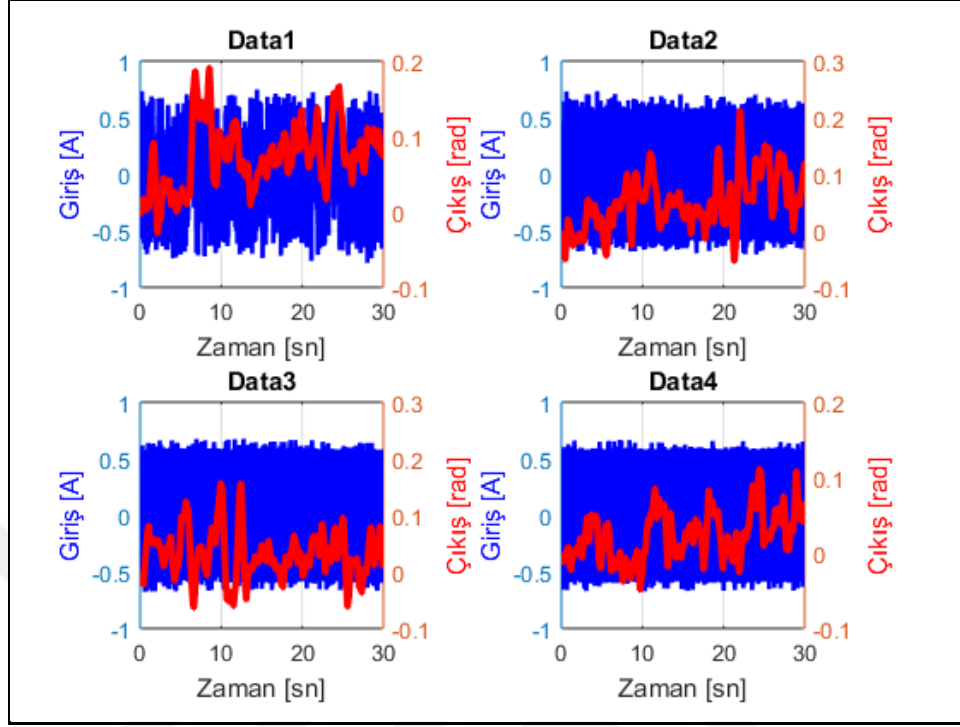


Şekil A.13. Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data17-Data20)

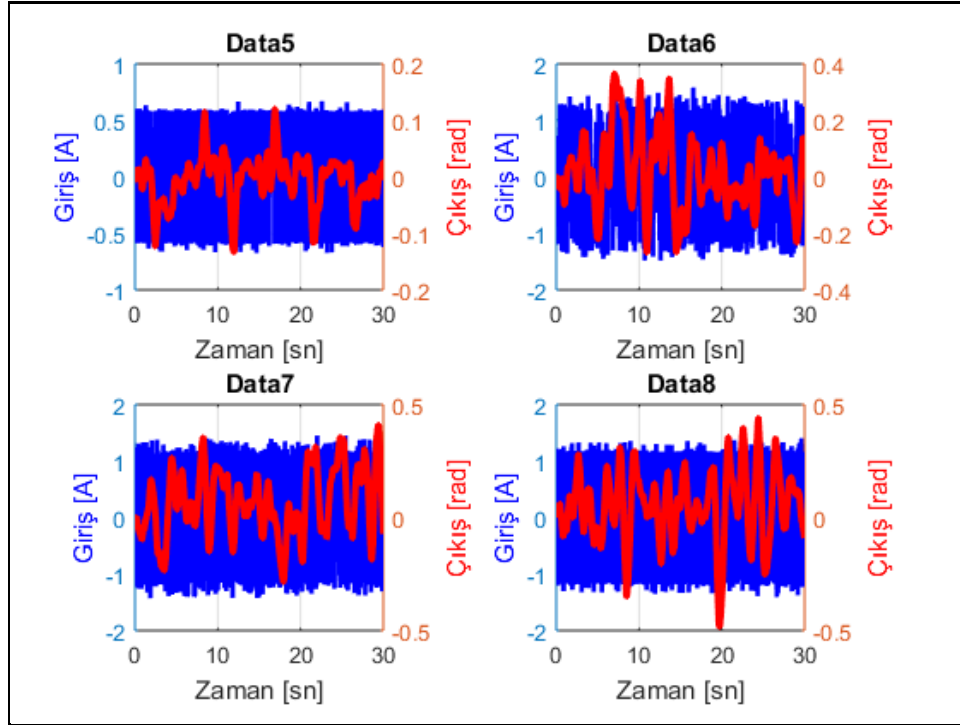


Şekil A.14. Sistem tanımlama PRBS sinyali (yunuslama eksen, Data21)

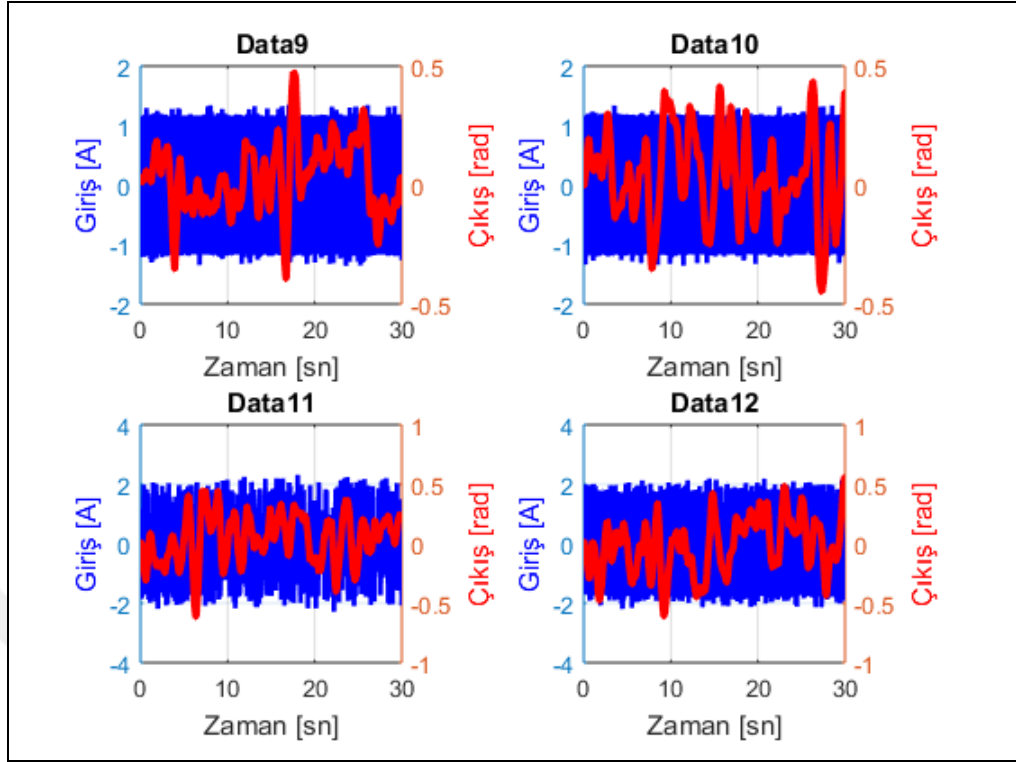
Sistem Tanımlama Giriş ve Çıkış Sinyalleri



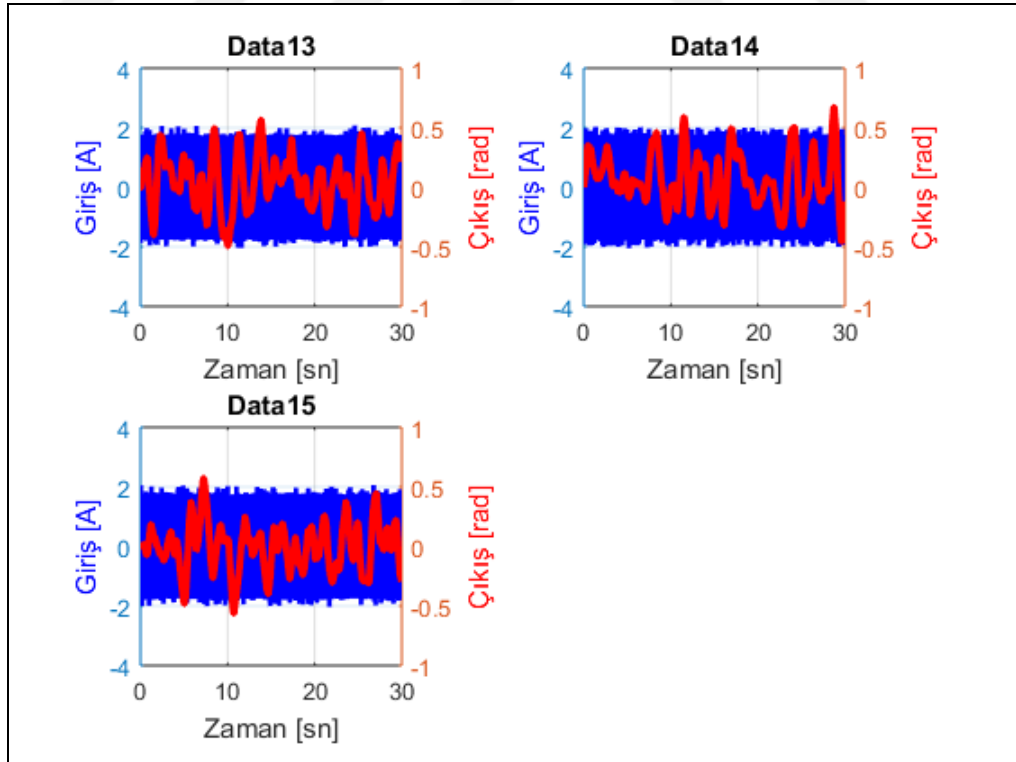
Şekil A.15. Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yandönme eksen, Data1-Data4)



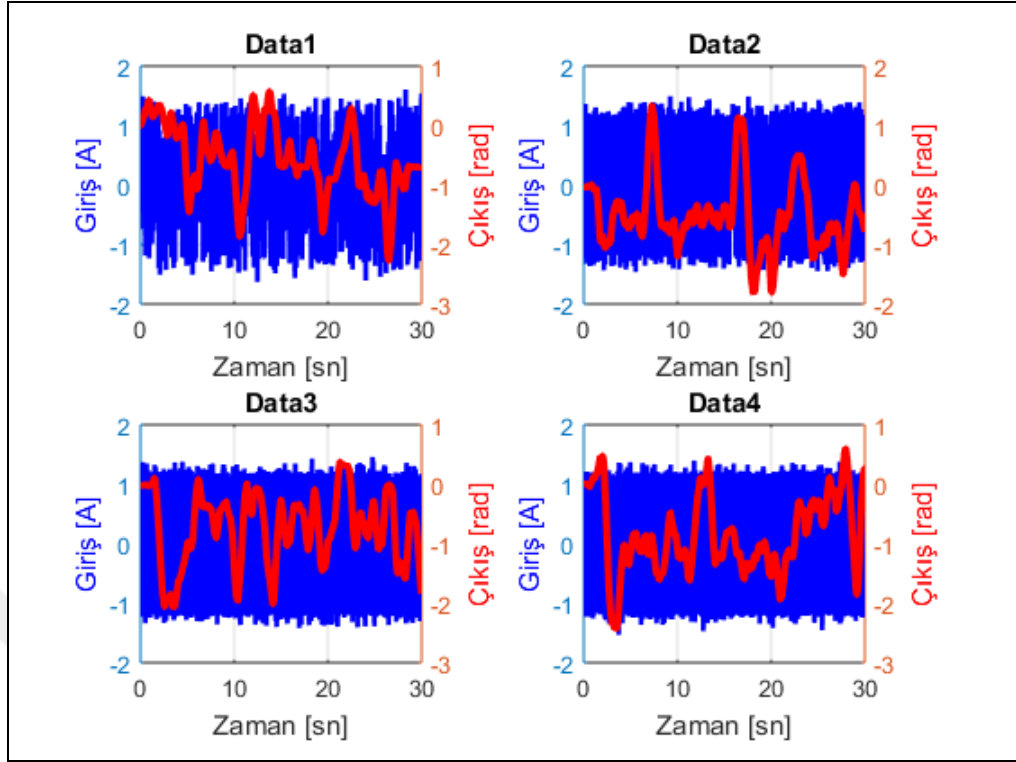
Şekil A.16. Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yandönme eksen, Data5-Data8)



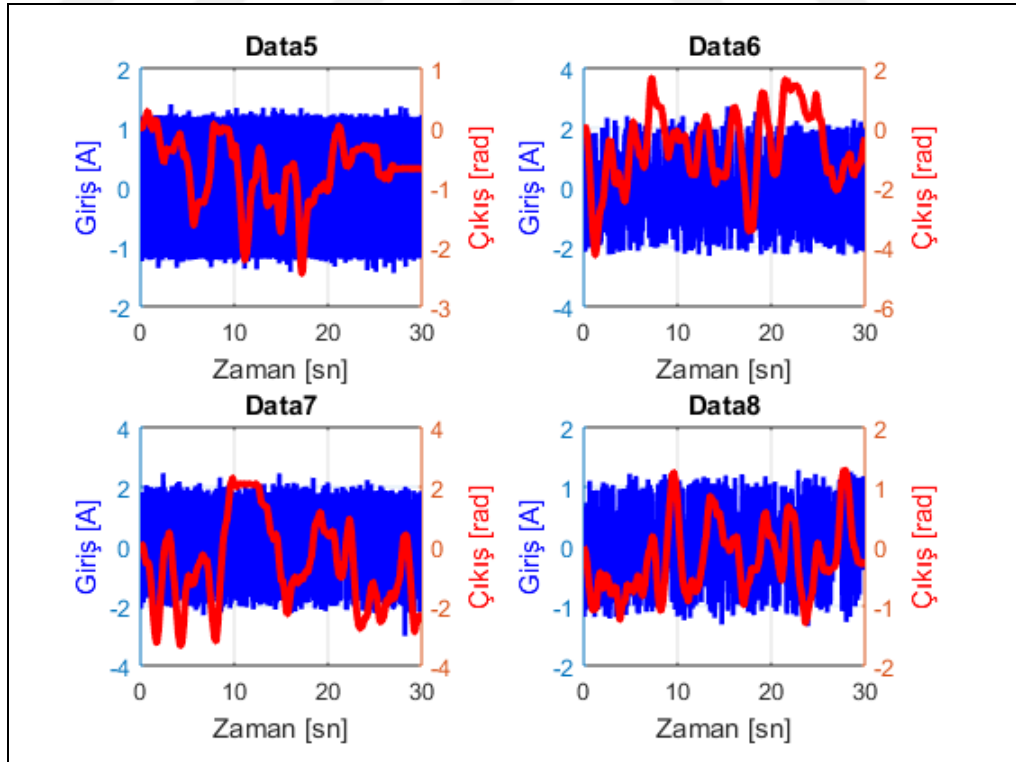
Şekil A.17. Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yandönme eksen, Data9-Data12)



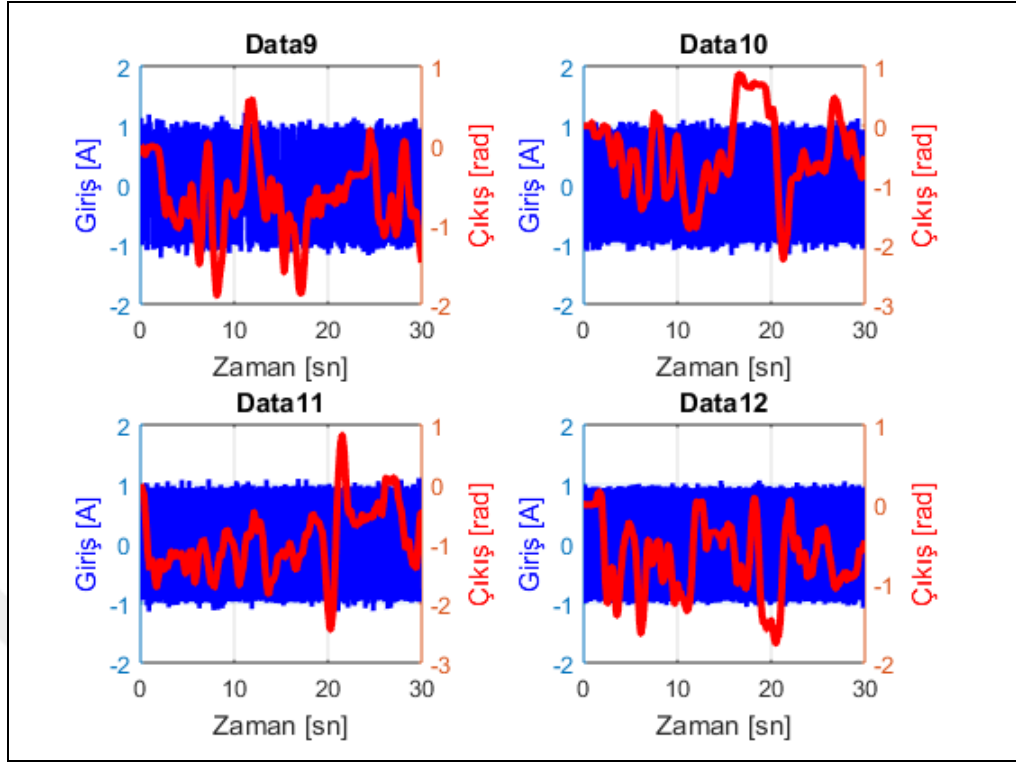
Şekil A.18. Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yandönme eksen, Data13-Data15)



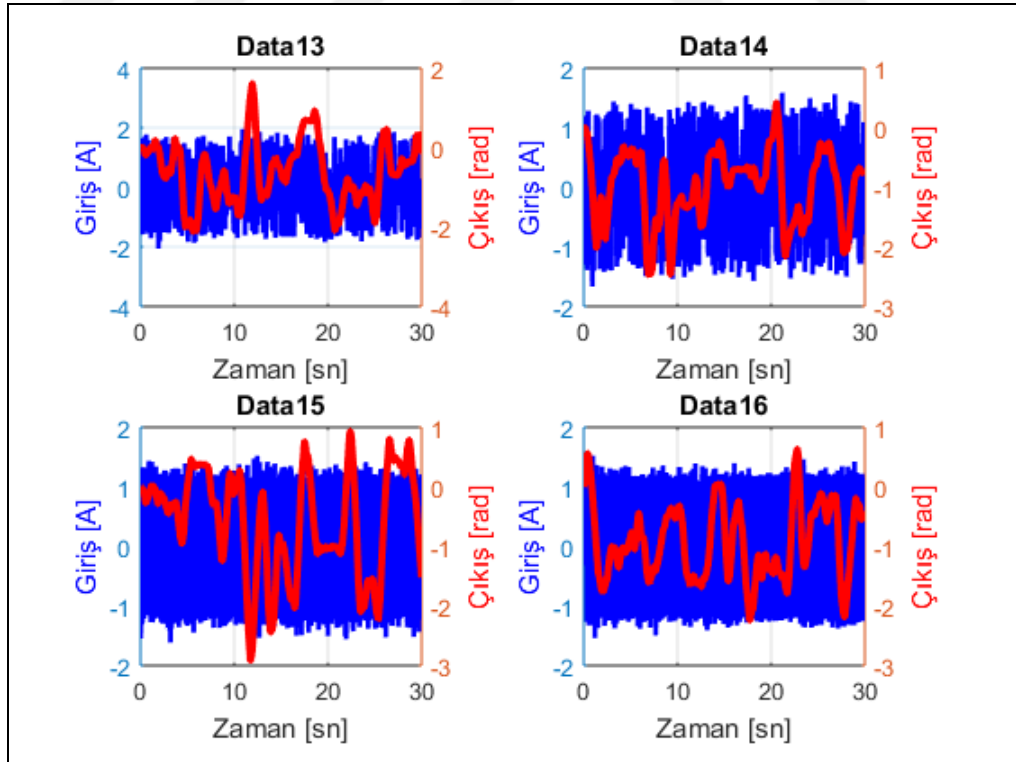
Şekil A.19. Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data1-Data4)



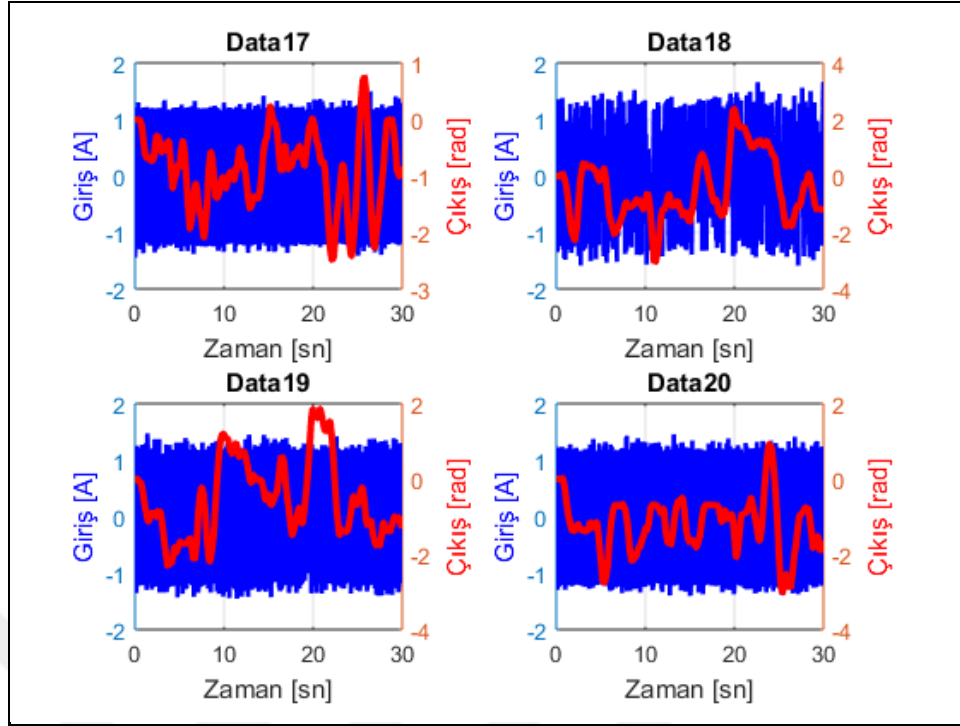
Şekil A.20. Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data5-Data8)



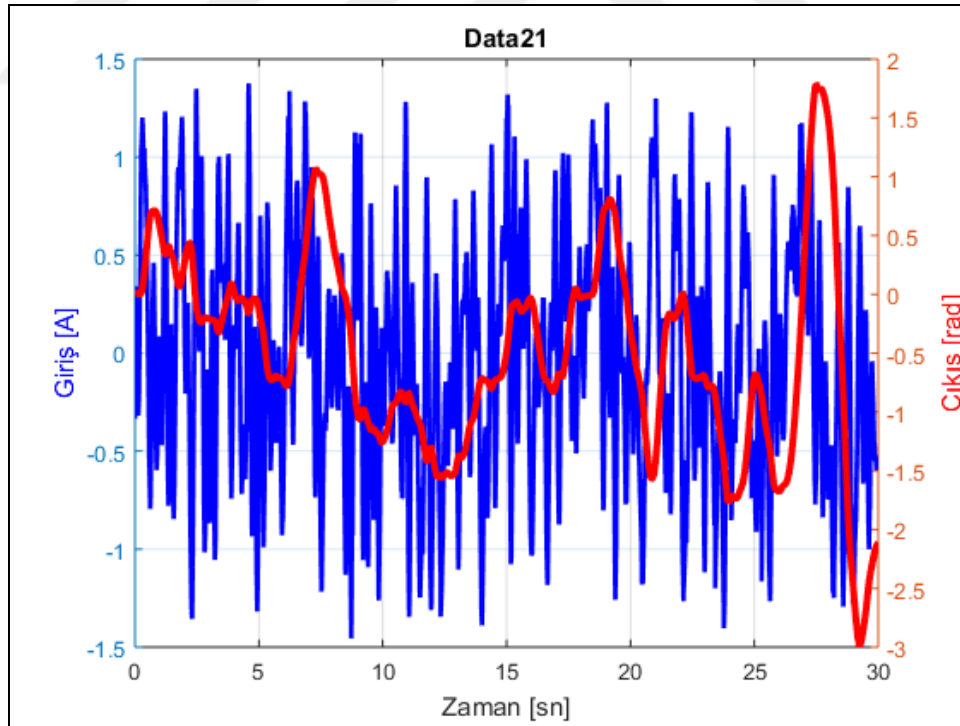
Şekil A.21. Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data9-Data12)



Şekil A.22. Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data13-Data16)



Şekil A.23. Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data17-Data20)



Şekil A.24. Sistem tanımlama giriş & çıkış sinyali (yunuslama eksen, Data21)

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Dogan H.**, Kaplan K., Kuncan M., Ertunc. M. E., Araç Süspansiyon Sistemi Kontrolüne PID ve Bulanık Mantık Yaklaşımları, *17. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Denizli, Türkiye, 10-12 Eylül 2015.
- [2] **Dogan H.**, Kaplan K., Kuncan M., Ertunc. M. E., Fuzzy Logic Approach to Vehicle Suspension System Control in CAE Environment, *3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Valencia, Spain, 3-5 June 2015.
- [3] **Dogan H.**, Bingul Z., Blur Analysis for Gimbaled Imaging System in Air Vehicles, *5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, Thessaloniki, Greece, 10-13 April 2018.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Balıkesir’de doğdu. İlköğretimi Cumhuriyet İlköğretim Okulu’nda, Lise öğrenimini Savaştepe Anadolu Öğretmen Lisesi’nde tamamladıktan sonra 2010 yılında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği bölümünde üniversite eğitimine başladı. 2013-2014 eğitim ve öğretim yılı boyunca ERASMUS değişim programı aracılığı ile Almanya’nın Fachhochschule Bochum Üniversitesi’nde Mechatronik und Maschinenbau bölümüne kaydoldu. 2014 yılında “Simulation Eines Maschinenprüfstandes mittels MATLAB Simulink” başlıklı lisans tezini yazarak Fachhochschule Bochum Üniversitesi’nden lisans diploması almaya hak kazandı. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği bölümünden de mezun oldu. 2016 yılında yüksek lisans eğitimine Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladı. 2015 yılından beri TÜBİTAK SAGE bünyesinde Araştırmacı olarak Kızılötesi Görüntüleme Sistemleri ve Kontrol Sistemleri üzerinde çalışmaktadır.