

**BÜYÜK YAPILI ROKET LANÇERLERİNİN MODELLENMESİ VE
KONTROLÜ**

SERDAR SERT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2015

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Osman EROĞUL

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı

Serdar SERT tarafından hazırlanan BÜYÜK YAPILI ROKET LANÇERLERİNİN MODELLENMESİ VE KONTROLÜ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yiğit YAZICIOĞLU _____

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Serdar SERT

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Mart 2015

Serdar SERT

BÜYÜK YAPILI ROKET LANÇERLERİNİN MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

ÖZET

Roket lançerleri, üzerine roket yerleştirilerek roketlerin istenilen hedefe ulaşabilmesi için gereken dönüş ve yükseliş açısını verebilen sistemlerdir. İstenilen dönüş ve yükseliş açısını verebilmek için çeşitli tahrik sistemleri kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında elektromekanik tahrik sistemine sahip roket lançerlerinin modellenerek buna uygun olan oransal integral ve türevsel (PID) kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Roket lançerleri daha çok savunma sanayii firmaları tarafından üretildiği için gizlilik sebebiyle sistemlerin nasıl modellendiğine dair bilgilere literatürden ulaşmak mümkün olmamaktadır. Ancak, bilindiği kadarıyla bu tip sistemlerin kontrolcü parametreleri gerçek sistem üzerinde ampirik yöntemlerle belirlenmektedir. Bu tür çalışmalarda kontrolcü parametrelerini belirlemek için kabaca sistem geometrisi ve sistem performansı belirlenmektedir. Ancak bu bilgilerin gerçek sistem ile farklılık göstermesi sebebiyle kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi için yeterince fayda sağlamadığı görülmüştür. Ayrıca, büyük yapılı roket lançerleri üzerinde çalışmak çalışma alanı ve güvenlik açısından kolay olmamaktadır. Bu çalışma kapsamında, roket lançer modellemesi ve kontrolü yazılım ortamında yapılmıştır. Lançeri benzetebilen test düzeneği tasarlanarak kontrolcü parametrelerinin bu test düzeneği ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Modelleme yapılırken Roketsan A.Ş. firması tarafından daha önce üretilen sistemlerden alınan veriler ile yazılım kullanılarak modellenen sistem arasında kıyaslama yapılarak sistemdeki sürtünme kayıpları modele dahil edilmiştir. Gerçek sistem üzerindeki çalışmalarda sadece hassas kontrol işlemleri yapılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Roket lançeri, PID, kontrolcü parametreleri, sistem modellemesi

University : TOBB Economics and Technology University
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Mechanical Engineering
Supervisor : Associate Professor Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU
Degree Awarded and Date : M.Sc. – March 2015

Serdar SERT

**MODELLING AND CONTROL OF ROCKET LAUNCHER HAVING BIG
STRUCTURE**

ABSTRACT

Rocket launchers on which rocket are placed are used for aiming at the desired angle for azimuth and elevation axes. In order to aim, several kinds of actuation systems are used on azimuth and elevation axes. In this thesis, rocket launchers with electromechanical actuation system are modelled and determination of the correct proportional integral ve derivative (PID) controller parameters for this system is aimed. Since rocket launcher are produced by defence industrial companies, in literature, about the modelling method of the other rocket launchers there is limited information due to security. As far as known, the controller parameters of this kind of systems are determined by applying experimental method on real systems. In these kinds of workouts, system geometry and performance values are determined roughly in order to specify the controller parameters. However, these rough values differ from the real system. Therefore, they are not very useful for setting up the controller parameters. Also, working on rocket launchers having big structure is not efficient from the perspective of workshop and security. By this thesis, modelling and controlling of the rocket launcher is done on software. Test setup which simulates launcher is designed and used for determining the controller parameters. During modelling, friction losses are included in the system. These friction values are determined by comparing the values obtained from the real rocket launcher produced by Roketsan A.Ş. and values obtained from the modelled system on software. By this method, fine tuning of the controller will be performed on the real system.

Keywords: Rocket launcher, PID, controller parameters, system modelling

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, çalışma hayatının yanında akademik hayata dair bilgiler öğrendiğim hocam Yrd.Doç.Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tezin aynı zamanda “Teknoloji Geliştirme Projesi” olarak yürütülmesini sağlayan ROKETSAN'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne sağladığı araştırma bursu için teşekkür ederim.

ROKETSAN'da yürütülen “Teknoloji Geliştirme Projesi” nde büyük bir özveri ile çalışarak bu tez çalışmasına katkıda bulunan arkadaşlarım ÜmitYERLİKAYA ve Muhammed YÜKSEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Lisans hayatımdan sonra ara verdiğim eğitim hayatıma yüksek lisans ile devam etmeme teşvik eden ve çalışma hayatım boyunca bana hep destek veren, beni yönlendiren ve kendimi geliştirebilmem için bana bütün olanakları sağlayan birim (BLS-Sistem Mekanik Tasarım Birimi) amirim Aslı AKGÖZ BİNGÖL'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Eğitim konusunda elinden gelen bütün imkânları bana sunan, sürekli maddi ve manevi destek veren anneme, babama ve kardeşime minnettarım.

Son olarak tez çalışmalarım sırasında bana destek veren ve anlayış gösteren sevgili eşim Şahika AKKUŞ SERT'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tezi, 8 Ağustos 2014 tarihinde dünyaya gelerek hayatımıza renk katan oğlum Teoman SERT'e ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
KISALTMALAR.....	xviii
SEMBOL LİSTESİ.....	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Envanterdeki Çok Namlulu Roket Lançerleri.....	4
1.1.1 Uluslararası Envanterdeki Çok Namlulu Roket Lançerleri.....	4
1.1.2 Türkiye’de Üretilen Çok Namlulu Roket Lançerleri.....	9
1.2 Çok Namlulu Roket Lançerlerin Genel Özellikleri	10
1.3 Roket Lançerine Benzer Hareket Eden Sistemlerin Modellenmesi.....	13
2. ROKET LANÇERİ	21
2.1 Roket Lançeri Genel Özellikleri	21
<u>Kalkar Tabla:</u>	22
<u>Döner Tabla:</u>	23
<u>Sabit Tabla:</u>	23
<u>Cember Dişli:</u>	24
<u>Dönüş Mekanizması:</u>	24
<u>Yükseliş Mekanizması:</u>	26
2.2 Roket Lançeri Modellenmesi	27

2.2.1	Yükseliş Ekseni	28
2.2.2	Dönüş Ekseni.....	33
3.	SÜRTÜNME MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	38
3.1	Statik Sürtünme Modelleri	38
3.1.1	Coulomb Sürtünme Modeli	38
3.1.2	Coulomb+Viskoz Sürtünme Modeli.....	39
3.1.3	Coulomb + Viskoz + Kalkış Sürtünme Modeli	40
3.1.4	Stribeck Sürtünme Modeli.....	41
3.2	Dinamik Sürtünme Modelleri	42
3.2.1	Dahl Sürtünme Modeli	43
3.2.2	Bristle Sürtünme Modeli	44
3.2.3	Bliman Sorine Sürtünme Modeli	45
3.2.4	LuGre Sürtünme Modeli	45
3.3	Sürtünme Gecikmesi	47
3.4	Sürtünmede Histerezis	48
4.	FARKLI SÜRTÜNME MODELLERİNİN UYGULANMASI	50
4.1	Dönüş Ekseninin Modellenmesi	51
4.1.1	Dönüş Eksenine Coulomb Sürtünme Modelinin Uygulanması.....	57
4.1.2	Dönüş Sistemine Coulomb+Viskoz Sürtünme Modelinin Uygulanması	58
4.1.3	Dönüş Sistemine Coulomb+Viskoz+Kalkış Sürtünme Modelinin Uygulanması. 59	
4.1.4	Stribeck Sürtünme Modelinin Uygulanması	60
4.1.5	Dahl Sürtünme Modelinin Uygulanması	61
4.1.6	Bristle (Kıl) Tipi Sürtünme Modellerinin Uygulanması	62
4.1.7	Uygun Sürtünme Modelinin Belirlenmesi.....	63
5.	LANÇER MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	67
6.	ADAMS+SİMULİNK İLE MODELLEME	69
6.1	Lançerin Kinematik Olarak ADAMS Programında Modellenmesi.....	69
6.2	Aktarma Oranlarının ve Sürtünmelerin Simulink Programında Modellenmesi 74	
6.2.1	Dönüş Ekseni Modeli	74
6.2.2	Yükseliş Ekseni Modeli.....	77

6.3	Simulink ile Elektrik Motoru Modellenmesi	80
7.	ADAMS VE SIMULINK PROGRAMLARI İLE LANÇER KONTROLÜ	86
7.1	Yükseliş Ekseni.....	86
7.1.1	Yükseliş Ekseni Hız Kontrolü	86
7.1.2	Yükseliş Ekseni Konum Kontrolü.....	90
7.2	Dönüş Ekseni	94
7.2.1	Dönüş Ekseni Hız Kontrolü.....	95
7.2.2	Dönüş Ekseni Konum Kontrolü	99
8.	ROKET LANÇERİ ÜZERİNDE YAPILAN TESTLER	105
8.1	Alt Sistem Testleri	105
8.1.1	Yükseliş Ekseni Alt Sistem Testleri	105
8.1.2	Dönüş Mekanizması Alt Sistem Testleri	107
8.2	Sistem Seviyesi Testler	109
8.2.1	Yükseliş Ekseni Testleri	110
8.2.2	Dönüş Ekseni Testleri.....	111
9.	TEST DÜZENEĞİ ALTERNATİFLERİNİN BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ	113
9.1	Test Düzeneği Alternatifleri.....	113
9.1.1	Dönüş Ekseni Hareketi	114
9.1.2	Yükseliş Ekseni	116
9.1.3	Dönüş ve Yükseliş Ekseni	119
9.2	Alternatiflerin Değerlendirilmesi	120
10.	TEST DÜZENEĞİNİN MODELLENMESİ	122
11.	TEST DÜZENEĞİ ÜZERİNDE YAPILAN TESTLER	125
12.	SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE DEĞERLENDİRMELER	129
12.1	Sonuçların Karşılaştırılması	129
12.2	Değerlendirmeler ve Sonuç.....	138

KAYNAKLAR.....	143
ÖZGEÇMİŞ.....	145

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Sürtünme Modellerinin Coulomb Modeline Göre Hata Seviyesi.....	65
Çizelge 6.1. Modellemede Kullanılan Mafsal Türleri ve Adetleri.....	71

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. BM-13 Katyusha Lançeri [1].....	5
Şekil 1.2. BM-21 Grad Lançeri [2].....	6
Şekil 1.3. BM-30 Smerch Lançeri [3].....	7
Şekil 1.4. M270 MLRS Lançeri.....	8
Şekil 1.5. WS-2 Lançeri [5].....	8
Şekil 1.6. T-122 ÇNRA, 122 mm lik Çok Namlulu Roketatar [6].....	9
Şekil 1.7. T-300, ÇNRA Çok Namlulu Roketatar[7].....	10
Şekil 1.8. WS-2 Lançeri Üzerinden Genel Görünüş.....	12
Şekil 1.9. Kütle Stabilizasyonu [8].....	13
Şekil 1.10. Çubuğun Bükme ve Burulma Modu [8].....	15
Şekil 1.11. Sistemin Cevabı [8].....	15
Şekil 1.12. Sisteme Bükme Momentinin Etkisi [8].....	16
Şekil 1.13. Atış Çizgisini Etkileyen Faktörler [8].....	17
Şekil 1.14. Lançerin Fiziksel Olarak Modellenmesi [13].....	19
Şekil 1.15. Lançerin Modellemesinde Kullanılan Elemanlar [14].....	19
Şekil 2.1. Lançerin Genel Görünümü.....	21
Şekil 2.2. Döner Tabla Yerleşimi.....	22
Şekil 2.3. Pod Yüklü Lançer.....	23
Şekil 2.4. Çember Dişli Örneği [21].....	24
Şekil 2.5. a) Dönüş Eyleyicisi Şematik Görünümü b) Dönüş Freni Şematik Görünümü.....	25
Şekil 2.6. Dönüş Eyleyicisi Yerleşimi.....	25
Şekil 2.7. Yükseliş Eyleyicinin Şematik Görünümü.....	26

Şekil 2.8. Yükseliş Eyleyicilerinin Lançer Üzerinde Yerleşimi	27
Şekil 2.9. Yükseliş Ekseni Sistem Geometrisi	29
Şekil 2.10. Dönüş Ekseni Sistem Geometrisi	34
Şekil 3.1. Coulomb Sürtünmesi	39
Şekil 3.2. Coulomb Sürtünmesi + Viskoz Sürtünme	40
Şekil 3.3. Coulomb Sürtünmesi +Viskoz Sürtünme + Kalkış Sürtünmesi	41
Şekil 3.4. Stribeck Sürtünme.....	42
Şekil 3.5. Sürtünme Kuvvetinin Yer Değiştirmeye Göre Değişimi [17].....	43
Şekil 3.6. Bristle Sürtünme Modeli[18]	44
Şekil 3.7. LuGre Modelinin Gösterimi [18].....	46
Şekil 3.8. Stribeck Sürtünme Profili [26].....	47
Şekil 3.9. Sürtünmenin Gecikme Olmadan Gerçekleşmesi [19]	47
Şekil 3.10. Sürtünmede Gecikme Durumu	48
Şekil 3.11. Histerezis Döngüsü [19]	48
Şekil 3.12. Sürtünme-Hız Grafiği [17].....	49
Şekil 4.1. Dönüş Ekseni Taban Modeli.....	52
Şekil 4.2. Çember Dişli Pinyon Eşleşmesi.....	54
Şekil 4.3. Dönüş Eyleyicisi Modeli.....	55
Şekil 4.4. Lançer Dönüş Açısı vs Zaman.....	56
Şekil 4.5. Lançer Dönüş Hızı vs Zaman	57
Şekil 4.6. Coulomb Sürtünme Torkunun Zamana Göre Değişimi.....	58
Şekil 4.7. Coulomb+Viskoziteden Kaynaklanan Sürtünmenin Zamana Göre Değişimi	59
Şekil 4.8. Coulomb+Viskoz+Kalkış Sürtünmesinin Zamana Göre Değişimi	60
Şekil 4.9. Stribeck Modelinin Zamana Bağlı Değişimi	61
Şekil 4.10. Dahl Sürtünme Modelinin Zamana Göre Değişimi	62
Şekil 4.11. LuGre Sürtünme Modelinin Zaman Göre Değişimi	63

Şekil 4.12. a) Farklı Sürtünme Modellerinin Karşılaştırılması b) Sürtünme Modellerinin Hata Yüzdeleri.....	64
Şekil 6.1. ADAMS’da Modellenen Parçalar	70
Şekil 6.2: Modellemede Kullanılan Bağlantı Elemanlarının Numaralandırılması	71
Şekil 6.3. Lançer ADAMS Modeli	72
Şekil 6.4. Modellenen Sistemin Simulink Bloğu [Girdiler ve Çıktılar].....	73
Şekil 6.5. Dönüş Eksenindeki Aktarımların Modeli	75
Şekil 6.6. Konik Dişli Kutusunun Modellenmesi	75
Şekil 6.7. Sikloid Dişli Kutusunun Modellenmesi.....	76
Şekil 6.8. Çember-Pinyon Dişli Eşleşmesinin ve Fren Komplexinin Modellenmesi	76
Şekil 6.9. Yükseliş Eksenindeki Dişli Kutularının Modeli	78
Şekil 6.10. Merkez Dişli Kutusu Modeli	79
Şekil 6.11. Köşe Dişli Kutusunun ve Yükseliş Eyleyicisindeki Sürtünmelerin Modellenmesi.....	79
Şekil 6.12. DC Motor Devresi ve Şeması[20].....	80
Şekil 6.13. DC Servo Motorun Simulink Programında Modellenmesi	83
Şekil 6.14. ADAMS Control Kullanılarak Alınan Motorun Simulink Bloğu	84
Şekil 6.15. DC Servo Motorun Simulink ve ADAMS Programlarında Modellenmesi	85
Şekil 7.1. Lançer Hız Kontrolü Modeli [Yükseliş Ekseni]	87
Şekil 7.2. Kontrolcü Performansı ve Gürbüzlüğü.....	88
Şekil 7.3. Kontrolcü Parametreleri [Lançer Hız Kontrolü İçin].....	88
Şekil 7.4. Lançer Hız Kontrolü [Yükseliş Ekseni].....	89
Şekil 7.5. Motorun Zamana Bağlı a) Voltaj, b) Akım, c) Tork ve d) Hız Değişimleri	90
Şekil 7.6. Lançer Pozisyon Kontrolü Modeli [Yükseliş Ekseni]	91
Şekil 7.7. Kontrolcü Performansı ve Gürbüzlüğü.....	92
Şekil 7.8. Kontrolcü Parametreleri [Lançer Pozisyon Kontrolü İçin].....	92

Şekil 7.9. Lançer Pozisyon Kontrolü [Yükseliş Ekseni].....	93
Şekil 7.10. Motorun Zamana Bağlı a) Voltaj, b) Akım, c) Tork ve d) Hız Değişimleri	94
Şekil 7.11. Lançer Hız Kontrolü Modeli [Dönüş Ekseni].....	96
Şekil 7.12. Kontrolcü Performansı ve Gürbüzlüğü [Dönüş Ekseni].....	97
Şekil 7.13. Kontrolcü Parametreleri [Lançer Hız Kontrolü İçin].....	97
Şekil 7.14. Lançer Hız Kontrolü [Dönüş Ekseni]	98
Şekil 7.15. Motorun Zaman Bağlı a) Voltaj,b) Akım, c) Tork ve d) Hız Değişimleri	99
Şekil 7.16. Lançer Pozisyon Kontrolü Modeli [Dönüş Ekseni].....	100
Şekil 7.17. Kontrolcü Performansı ve Gürbüzlüğü [Dönüş Ekseni].....	101
Şekil 7.18. Kontrolcü Parametreleri [Lançer Pozisyon Kontrolü İçin].....	101
Şekil 7.19. Lançer Pozisyon Kontrolü [Dönüş Ekseni]	102
Şekil 7.20. Lançer Dönüş Açısız Hız Değişimi	103
Şekil 7.21. Motorun Zamana Bağlı a) Voltaj, b) Akım, c) Tork ve d) Hız Değişimleri	104
Şekil 8.1. a) Merkez Dişli Kutusu Sürtünmesinin Hıza Göre Değişimi b) Köşe dişli kutusuyükseliş eyleyicisi Sürtünmesinin Hıza Göre Değişimi	106
Şekil 8.2. a) Konik Dişli Kutusunun Sürtünmesinin Hıza Göre Değişimi b) Sikloid Dişli Kutusunun Hıza Göre Değişimi	108
Şekil 8.3. Yükseliş Ekseni Zamana Bağlı a) Motor Torku b) Lançer Hızı c) Konum Değişimleri.....	111
Şekil 8.4. Dönüş Ekseni Zamana Bağlı a) Motor Torku b) Lançer Hızı c) Konum Değişimleri.....	112
Şekil 9.1. Test Düzeneği Dönüş Ekseni 1. Alternatif	114
Şekil 9.2. Test Düzeneği Dönüş Ekseni 2. Alternatif.	115
Şekil 9.3. Portatif Lançer Kalkar Tablasının Üstten Görünümü	116
Şekil 9.4. Ayarlanabilir Kalkar Tabla-Döner Tabla Bağlantısı.....	117
Şekil 9.5. Test Düzeneği Yükseliş Ekseni Alternatif 2	118

Şekil 9.6. Test Düzeneği Yükseliş Eksenini Alternatif 3	118
Şekil 9.7. 4 Bağ Mekanizması	119
Şekil 9.8. Dönüş ve Yükseliş Eksenini Benzeten Test Düzeneği	120
Şekil 10.1. Test Düzeneğinin ADAMS Programında Modellenmesi	122
Şekil 10.2. Yük Motorunun Lançer Kontrol Motoruna Yüklediği Yükün Değişimi	123
Şekil 10.3. Lançer Kontrol Motorunun Hız Girdisi ve Girdiye Olan Cevabının Karşılaştırılması	124
Şekil 11.1. Test Düzeneği Mekanik Bağlantılar	125
Şekil 11.2. Test Düzeneğinin Elektriksel Bağlantıları	126
Şekil 11.3. Test Düzeneği Şeması.....	127
Şekil 11.4. Test Düzeneğinden Yükseliş Ekseninde Zamana Bağlı a) Motor Torku b) Lançer Yükseliş Açısız Hızı c) Lançer Yükseliş Açısı Değişimi	128
Şekil 12.1. Gerçek Sistem ile Lançer Benzetimi için Motor Tork Değerleri.....	129
Şekil 12.2. Gerçek Sistem ile Lançer Benzetimi için Hız Profili.....	130
Şekil 12.3. Gerçek Sistem ile Lançer Benzetimi için Pozisyon Profili.....	130
Şekil 12.4. Lançer Matematiksel Modeli ile Test Düzeneği Modeli Motor Tork Değerleri.....	131
Şekil 12.5. Lançer Matematiksel Modeli ile Test Düzeneği Modeli Hız Grafiği	132
Şekil 12.6. Lançer Matematiksel Modeli ile Test Düzeneği Modeli Pozisyon Grafiği	132
Şekil 12.7. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Simulasyon Motor Tork Grafiği.....	133
Şekil 12.8. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Simulasyon Hız Profili	134
Şekil 12.9. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Simulasyon Konum Profili.....	134
Şekil 12.10. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Lançer Simulasyon Motor Tork Grafiği	135
Şekil 12.11. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Lançer Simulasyon Hız Profili.....	135
Şekil 12.12. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Lançer Simulasyon Pozisyon Profili	136
Şekil 12.13. Gerçek Lançer ile Test Düzeneği Motor Tork Grafiği	136

Şekil 12.14. Gerçek Lançer ile Test Düzeneği Hız Profili.....	137
Şekil 12.15. Gerçek Lançer ile Test Düzeneği Pozisyon Profili.....	137
Şekil 12.16. Motor Torkunun Farklı Durumlar için Değişimi.....	140
Şekil 12.17. Hız Profilinin Farklı Durumlar için Değişimi.....	140
Şekil 12.18. Konum Profilinin Farklı Durumlar için Değişimi	141

KISALTMALAR

Kısaltmalar Açıklama

DC	Doğru Akım
Nm	Newton-metre
rpm	Devir/dakika
°/s	Derece/saniye
SY	Saat Yönü
SYT	Saat Yönü Tersi
PID	Oransal, Integral ve Türev

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
F	Kuvvet
sgn	Signum
δ_v	Deneysel katsayı
V	Voltaj
R	Direnç
I	Akım
L	Endüktans
K_e	Geri elektromotor kuvveti katsayısı
Θ	Açı
$\frac{d\theta}{dt}$	Açısal hız
$\frac{d^2\theta}{dt^2}$	Açısal ivme
T	Tork
K_t	Tork katsayısı
J	Dönme ataleti
K_{dv}	Viskoz sürtünme katsayısı
T_s	Yükten gelen tork değeri
G	Yerçekimi ivmesi
m	Kütle
M	Moment

İndisler	Açıklama
m	Motor
pod	Pod
kalkar	Kalkar tabla
doner	Döner tabla
cd	Çember dişli
yuk	Yükseliş eyleyici
kose	Köşe dişli kutusu
merkez	Merkez dişli kutusu grubu
ye	Yükseliş eyleyici
sikloid	Sikloid dişli kutusu
konik	Konik dişli kutusu
mek	Mekanik
lancer	Lañer

1. GİRİŞ

Roket veya füze lançerleri ile tanklar savunma sanayiinin vazgeçilmez ürünlerindedir. Orduların envanterlerinde çok çeşitli lançerler ve tanklar bulunmaktadır. Her bir sistemin kendine özgü özellikleri vardır. İhtiyaca göre kullanım yerleri farklılık göstermektedir. Lançerler ve tankların ortak özellikleri ise istenilen hedefi vurabilmek için belirli hassasiyette dönüş ve yükseliş ekseninde yönelmesidir. Roket lançerleri, füze lançerleri ve tanklar birbirinden farklı amaçlar için kullanılmaktadır.

Roket lançeri, genellikle herhangi bir kontrolcüsü olmayan roketler için kullanılır. Roket lançerleri, bazı füze lançerleri gibi sabit veya sadece belirli açılardan atış yapmak yerine balistik hesaplamalara göre belirlenen farklı açılara yönelerek atış yaparlar. Roketin kontrolcüsü olmadığı için ve uçuşu sırasında herhangi bir geri besleme olmadığından dolayı uçuş sırasında herhangi bir düzeltme mümkün değildir. İstenilen hedefi vurabilmek için uçuş sırasında etkiyecek hava şartları dâhil edilerek gereken dönüş ve yükseliş açısı hesaplanarak lançere yönelim verilir. Bu noktadan sonra roketin hesaplanan yörüngeyi izlemesi beklenmektedir. Uçuş sırasında roketi etkileyebilecek bütün etkenleri hesaplamaya katmak mümkün değildir. Roketin uçuş yörüngesini etkileyebilecek etkenlerden en önemli ikisi de lançerin hassas yönelimi ve lançerin yeterli seviyede direngenliğe sahip olmasıdır. Aksi takdirde, roketlerin istenilen alan içerisine düşürülmesi mümkün olmamaktadır. Roketler genellikle belirli zaman aralıklarıyla artarda (salvo) atılır. Roketin amacı, nokta hedefi vurmak yerine belirli bir alanı etkisiz hale getirmektir. Roket lançerlerinde, ataletsel ölçüm birimi veya manuel kullanım için topçu dürbünü ve hassas açölçer kullanılır.

Füze lançeri ise kendi içerisinde kontrolcüye sahip akıllı roketler olan füzelerin fırlatılmasında kullanılır. Füzenin içerisindeki algılayıcılar vasıtasıyla füzenin hareketi ile ilgili bilgiler değerlendirilip füzenin içerisindeki kontrolcüye aktararak kontrol tahrik sistemi ile uçuş sırasında füzenin uçuşu düzeltilmektedir. Bazı füze lançerlerinde sadece belirli açılar verilerek füzenin istenen hedefi vurması için

izlemesi gereken yörünge füze tarafından sağlanır. Örneğin; hava savunma sistemlerinde lançer yükseliş ekseninde yere 90° lik açıyla yönelim yapar. Füze bu şekilde ateşlenir ancak daha sonra izlemesi gereken yörüngeye üzerindeki kontrol tahrik sistemi sayesinde oturur. Diğer füze lançerlerinde füzenin özelliklerine bağlı olarak füze lançeri roket lançerindeki kadar hassas olmayacak şekilde yönelir. Roket lançerinde bir milyem (1 milyem=360/6400 derece) gibi hassas bir yönelim değeri beklenebilirken füze lançerinde çok daha kaba değerler yeterli olur. Füze lançerlerinde salvo atışlar pek tercih edilmemekle birlikte olduğu durumda salvo aralığı çok uzun süre olduğu için sistemin çok fazla direngen olmasına da ihtiyaç yoktur. Bazı füzeler, özellikle havadan karaya atılan füzeler, herhangi bir yönelim yapmadan hava aracından doğrudan ateşlenmektedir.

Tanklar, hem roket hem de füze lançerleriyle benzerlik göstermektedir. İstenilen hedefi vurabilmek için namlunun gerekli yükseliş ve dönüş açısına getirilmesi gereken tanklar bulunurken, hedefe kilitlenerek etraftan gelen bozucu etkileri telafi edebilen tanklar da vardır. Ancak, tanklarda kullanılan mühimmatta genellikle herhangi bir kontrolcü bulunmadığı için tank namluları için de hassas yönelim gerekmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında bir roket lançerinin sistem dinamiklerini temsil eden bir test düzeneği tasarlanarak roket lançeri üzerinde yapılması gereken testlerin bu test düzeneği üzerinde yapılması için çalışılmıştır. Tez çalışmaları sırasında roket lançerinin matematiksel modeli oluşturulup model gerçek roket lançerinin test verileriyle doğrulanmıştır. Testler ROKETSAN A.Ş. tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen model üzerinde gerçek sistemde olduğu gibi PID kontrolü yapılmıştır. Kontrolcü katsayıları model oluşturularak bulunmuştur. Gerçek lançer modelinin dinamik özelliklerini sergileyen test düzeneği tasarlanıp benzetim yoluyla modelde kullanılan kontrolcü katsayılarıyla bu test düzeneğinin kontrolü yapılmıştır. Test düzeneği modeli doğrulandıktan sonra üretilerek düzener üzerinde alınan veriler ile gerçek sistem üzerinden veriler karşılaştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalara göre

yönelim için etkili iki ana parametre sürtünme ve sistemin yapısal özellikleridir. Bu tez çalışması kapsamında da sürtünmenin ve fiziksel özelliklerin etkisi üzerine çalışılmış olup yapısal özelliklerin yeterince rijit olduğu varsayılmıştır.

Bölüm 2’de incelenecek olan roket lançerinin genel özellikleri anlatılmış olup kontrolün yapılacağı dönüş ve yükseliş eksenlerinin sistem dinamikleri belirlenmiştir.

Bölüm 3’te literatürde en çok kullanılan statik ve dinamik sürtünme modelleri ile ilgili bilgi verilmiştir.

Bölüm 4’de literatürdeki sürtünme modelleri araştırılıp matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Ancak literatürde çok fazla sürtünme modeli olduğu için roket lançerinde sürtünmenin olduğu noktalardaki sürtünme tiplerine ve analizlerde uygulanabilirliğine göre uygun olan sürtünme modelleri seçilip üzerinde çalışılmıştır. Roket lançerinde sistemin kontrol edilmesini en çok zorlaştıran faktör sürtünme olduğu için sürtünmenin olabildiğince doğru modellenmesi hedeflenmiştir.

Bölüm 5’te roket lançerinin matematiksel modelinin oluşturulacağı yazılımlar karşılaştırılmıştır. Uygulanabilirlik ve daha doğru sonuç vermesi bakımından en iyi alternatif seçilerek bu model üzerinden çalışmalara devam edilmiştir.

Bölüm 6’da incelenecek roket lançeri ADAMS ve Simulink yazılımlarında modellenmiştir.

Bölüm 7’de oluşturulan model ADAMS+Simulink programında modellenen lançer modeliyle birleştirilerek lançerin hız ve konum kontrolü yapılmıştır.

Bölüm 8’de gerçek roket lançeri ile gerçekleştirilen testlerin nasıl uygulandığı, elde edilen verilerin hangi şartlar altında elde edildiği ve bu verilerin değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bölüm 9’da roket lançerini benzetebilecek test düzeneği çalışmalarıyla ilgili bilgi verilmiştir. Yapılan çalışmalar sırasında karşılaşılan zorluklardan ve öğrenilen derslerden bahsedilmektedir. Tasarım alternatifleri birbiriyle karşılaştırılarak uygulanacak tasarıma karar verilmiştir.

Bölüm 10’da test düzeneğinin modellenmesinde dikkat edilen değişkenlerden ve test düzeneğinin modellenmesinden ve kontrolünden bahsedilmektedir.

Bölüm 11’de gerçek roket lançerine uygulanan testlerin test düzeneğine uyarlanarak verilerin toplanması ve değerlendirilmesi yapılmıştır.

Son bölümde ise gerçek roket lançerinden alınan veriler ile test düzeneğinden alınan veriler karşılaştırılmıştır. Test düzeneğinin gerçek roket lançerini hangi oranda benzetebildiği yorumlanarak bundan sonra yapılabilecek çalışmalar belirlenmiştir.

1.1 Envanterdeki Çok Namlulu Roket Lançerleri

1.1.1 Uluslararası Envanterdeki Çok Namlulu Roket Lançerleri

Uluslararası envanterde birçok roket tipi ve bu roketleri ateşleyebilmek için çok namlulu roket lançeri vardır. En çok bilinen ve farklı olan çok namlulu roket lançerleri incelenmiştir. Lançerler tekerlekli araç üzerinde olabileceği gibi paletli araç üzerine de yerleştirilebilmektedir.

BM-13 Katyusha:

Kendisinden tahrik edilebilen bilinen ilk çok namlulu roket lançeri BM-13 Katyusha'dır (Şekil 1.1). Bu lançer Sovyetler Birliği tarafından üretilmiş olup 2. Dünya Savaşı sırasında kullanılmıştır.



Şekil 1.1. BM-13 Katyusha Lançeri [1]

Bu lançer o döneme göre çok etkili bir ateş gücüne sahip olmasına rağmen doğruluğu çok iyi olmamakla birlikte roketleri yüklemek için de çok fazla zamana ihtiyaç vardır. Bu lançer üzerinden 180 cm uzunluğunda 132 mm çapında ve 42 kg ağırlığındaki M-13 roketleri ateşlenebilmektedir [1].

BM-21 Grad:

BM-21 Grad, dünya üzerinde en çok kullanılan çok namlulu roket lançerlerinden biridir (Şekil 1.2). Bu lançer de Sovyetler Birliği tarafından üretilmiş olup 1963 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Üzerinden 40 adet 122 mm roket ateşlenebilir [2].



Şekil 1.2. BM-21 Grad Lançeri [2]

BM-30 Smerch:

BM-30 Smerch, dünya üzerindeki en fazla ateş gücüne sahip çok namlulu roket lançerlerinden biridir. Bu lançer de BM-21 Grad ve BM-13 Katyusha gibi Sovyetler Birliği tarafından üretilmiş olup 1980'li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Üzerinden 12 adet 300 mm çapında roket ateşlenebilmektedir [3](Şekil 1.3).



Şekil 1.3. BM-30 Smerch Lançeri [3]

M270 MLRS:

M270 MLRS en çok kullanılan çok namlulu roket lançerlerinden biridir. Bu lançer 1983 yılında Amerika Birleşik Devletleri tarafından üretilmiş olup Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa'da birçok ülkede ve NATO'da kullanılmaktadır. Üzerinden 12 adet 240 mm çapında roket ateşlenebilmektedir [4](Şekil 1.4). Bu lançer üzerinden güdümlü roketler de ateşlenebilmektedir[4]. Ayrıca, daha az sayıda personel ile kullanılabilirdiği için ordular tarafından tercih edilmektedir.



Şekil 1.4. M270 MLRS Lançeri

WS-2:

WS-2 lançeri Çin tarafından üretilmiş uzun menzilli roket lançeridir. Üzerinden 6 adet 400 mm roket ateşlenebilmektedir [5](Şekil 1.5). M270 MLRS ile benzer özelliklere sahiptir.



Şekil 1.5. WS-2 Lançeri [5]

Yukarıda bahsedilen lançerler kendi alanında üretilen ilk lançerlerdir. Daha sonra bu lançerler referans alınıp benzer özelliklerde farklı lançerler üretilmiştir.

1.1.2 Türkiye’de Üretilen Çok Namlulu Roket Lançerleri

Türkiye’de çok namlulu roket lançerlerin çoğunluğu ROKETSAN A.Ş. tarafından üretilmiştir. ROKETSAN A.Ş.’nin ürettiği T-122 ÇNRA, 122 mm’lik Çok Namlulu Roketatar (Şekil 1.6), BM-21 Grad’a benzemekte olup üzerinde 20+20 tüp bulunup 122 mm’lik roket ateşlenebilmektedir.



Şekil 1.6. T-122 ÇNRA, 122 mm lik Çok Namlulu Roketatar [6]

ROKETSAN A.Ş.’nin ürettiği diğer bir ürün ise T-300 ÇNRA, 300 mm lik Çok Namlulu Roketatar (Şekil 1.7), genel olarak WS-2’ye benzemektedir. Bu lançer üzerine 4 adet 300 mm çapında mühimmat yüklenebilmektedir.



Şekil 1.7. T-300, ÇNRA Çok Namlulu Roketatar[7]

Bu lançerler Roketsan'ın ilk ürettiği lançerlerden olup daha sonra gelen talep üzerine hem 122 hem 300 mm lik roket ateşleyebilen lançerler tasarlanıp üretilmiştir.

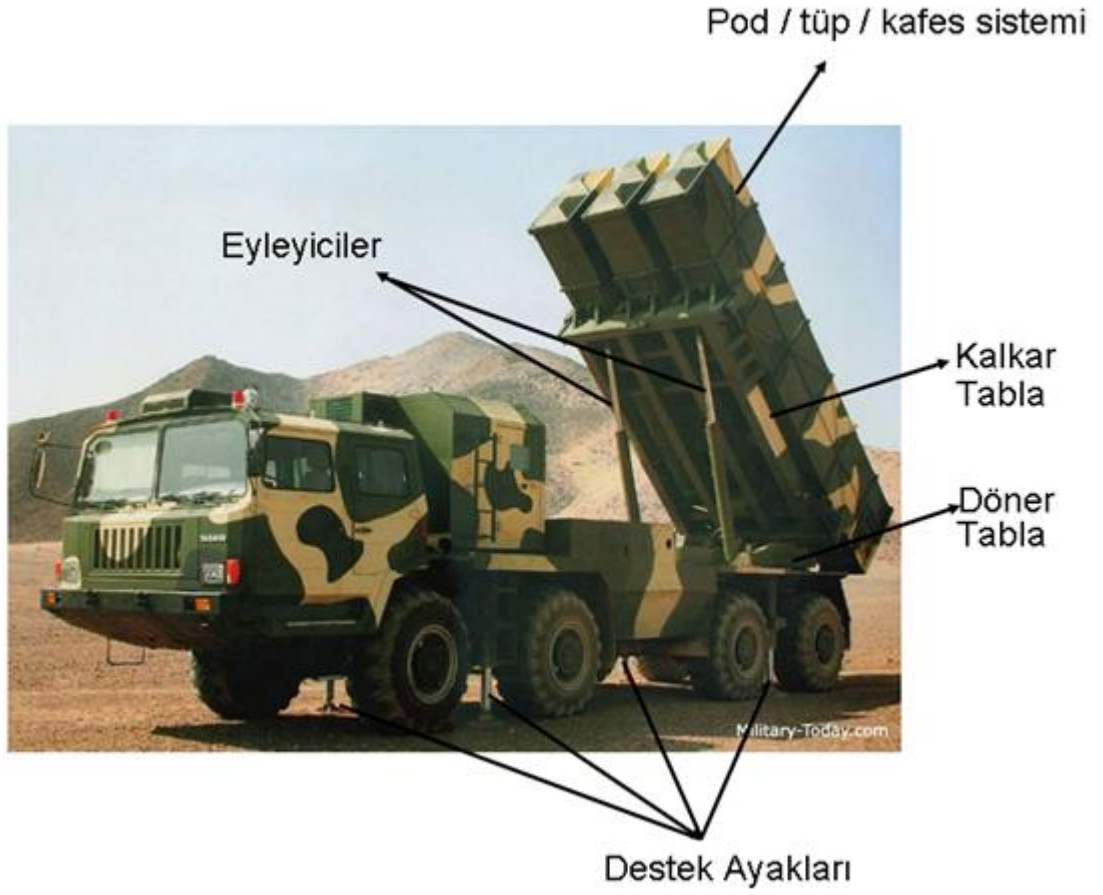
1.2 Çok Namlulu Roket Lançerlerin Genel Özellikleri

Çok namlulu roket lançerlerin tasarımı ihtiyaca göre birbirinden farklılık gösterir. Fakat bazı özellikler genel olarak hepsinde mevcuttur. Lançerler, tekerlekli veya paletli araç üzerine yerleştirilir. Şekil 1.8'de WS-2 lançeri üzerinden bazı özellikler

gösterilmiştir. Roketin itki kuvvetine ve aracın yapısına bağlı olarak atış sırasında aracın devrilmesini önlemek için bazı araçlarda destek ayakları bulunmaktadır.

Eğer lançerin araçtan kolayca sökülüp takılabılme özelliği varsa buna uygun olarak lançerin araç ile ara yüzü olan sabit tablası olmalıdır.

Lançer dönüş ekseninde ve yükseliş ekseninde dönerek roketlere yönelim vermektedir. Dönüş ekseninde dönebilmesi için döner tablaya sahiptir. Kalkar tabla, eyleyiciler, pod/tüp/kafes sistemi de döner tablaya bağlı olup döner tabla ile birlikte dönerler. Döner tablanın dönmesi için çeşitli mekanizmalar vardır. Ancak en çok kullanılan yöntem; araç (varsa sabit tabla) ile döner tabla arasına çember dişli yerleştirilerek pinyon dişli mekanizması ile tahrik edilmesidir.



Şekil 1.8. WS-2 Lançeri Üzerinden Genel Görünüş

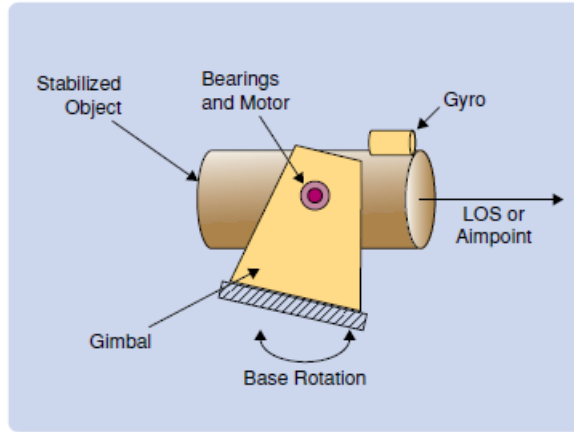
Yükseliş ekseninde hareket kalkar tablanın döndürülmesiyle sağlanır. Kalkar tabla üzerine pod/tüp/kafes sistemi yerleştirilerek roketler istenen yükseliş açısına hareket eder. Kalkar tabla da döner tabla gibi birçok mekanizma ile harekete geçirilebilir. Ancak genellikle pistonlar kullanılarak kalkar tablaya hareket verilir. Pistonların bir ucu döner tablaya diğer ucu kalkar tablaya bağlanarak içerideki mekanizmanın hareketiyle lançere yükseliş ekseninde hareket imkânı sağlamaktadır.

Kalkar tablanın üzerine ise roketin tipine ve yükleme gereksinimlerine göre pod, tüp veya kafes sistemi yerleştirilir. Pod, içerisinde roketler hazır yüklenmiş vaziyette olup pod lançere yerleştirilerek yükleme işlemi tamamlanır. Podlar sökülüp takılabilir. Tüpler ise genellikle kalkar tablaya sabit olup kalkar tablanın bir parçası

gibidir. Roketler tüplere araç üzerindeyken sürülür. Kafes sistemi ise pod ve tüp alternatiflerinin arasında bir yapıya sahip olup kartuş gibi düşünülebilir. Roketler ateşlenip bittiğinde ateşlenen yuvalar sökülerek tekrar doldurulup lançere yüklenir.

1.3 Roket Lançerine Benzer Hareket Eden Sistemlerin Modellenmesi

Savunma sanayii sektöründeki çalışmalar gizli olduğu için çalışmaların detaylarına ulaşamamaktadır. Bu sebeple, literatürdeki roket lançerlerindeki hareketin benzerine sahip sistemler ve roket lançerleri için yapılmış teorik çalışmalar incelenmiştir. Lançerlerin yönelim hareketine benzer olarak ve daha karmaşık bir yapıya sahip olan ataletsel stabilize platformlarda gimballer kullanılmaktadır. Bu sistemlerde atış çizgisi sabit tutulup diğer kısımlar hareketli bırakılarak kütle stabilizasyonu yapılmaktadır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Kütle Stabilizasyonu [8]

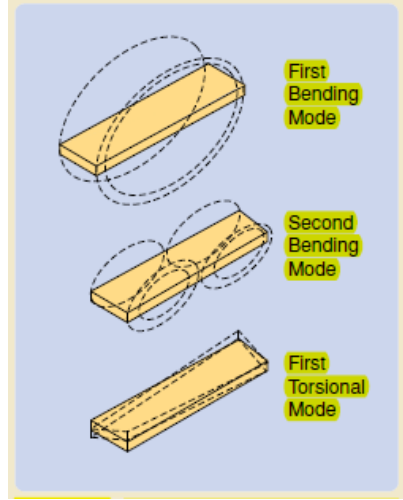
Bu yöntemde Newton'un birinci ve ikinci yasası geçerlidir. Birinci yasa olan tork uygulanmadıkça sistemin ivmelenmemesidir. İkinci yasa olan; J atalete sahip katı bir sisteme net T torku uygulandığında elde edilen ivme aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır:

$$T = J\alpha \quad (1.1)$$

Bu yasalara göre sistemi dengede tutabilmek için sisteme etkiyen kuvvet/tork değeri sıfıra (0) eşit olmalıdır. Sistemde birçok bozucu etki olduğu için jiroskoplar bu etkilerin algılanmasında kullanılmaktadır. Bu etkiye gore sistem net torku sıfırlayacak karşı tork değeri uygular. Sistemin başarılı olması için kütle özellikleri, hareketli parçaların yapısal dinamikleri ve sürtünmeler sistem tasarımı dikkate alınmalıdır.

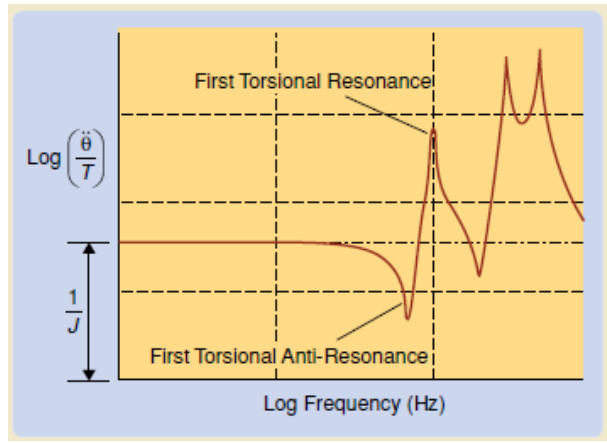
Sistemlerin yapısal tasarımı dinamik parçalarından daha fazla performansı etkileyebilir. Sistem rezonansa girdiğinde sistemin sahip olduğu şekle ve frekansa yapısal mod denilmektedir. şekil ve frekans; yapısal rijitlik, sönümleme ve kütle dağılımının bir fonksiyonudur. Sisteme etkiyen giriş veya kuvvete gore sistem buna cevap vermektedir.

rnek olarak şekil 1.10'da bir çubuğun eğilme ve burulma modunda yaptığı hareketler verilmiştir. Bir parçanın veya sistemin sayısız modu bulunmaktadır. Modun cevabı kuvvetin şiddetine, frekansına ve uygulandığı yere gore değişmektedir. Kuvvetin veya torkun uygulanışına gore aynı anda tek bir mod oluşabildiği gibi aynı anda birçok mod da açığa çıkabilir.



Şekil 1.10. Çubuğun Bükme ve Burulma Modu [8]

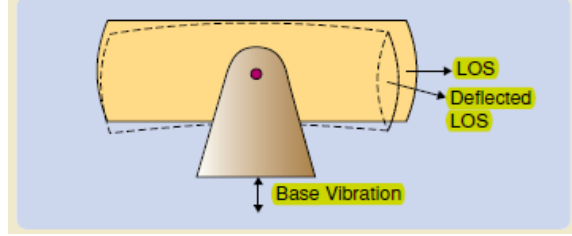
Şekil 1.11’de görüleceği üzere grafikte tepeler ve çukurlar bulunmaktadır. Tepeler rezonans frekanslarını, çukurlar ise hiç bir cevabın olmadığı anti rezonans bölgelerini göstermektedir. Frekans değeri sistemdeki sönülemeye bağlı olarak değişmektedir. Yapının hareketi sonlu elemanlar analizi ile belirlenebilmektedir.



Şekil 1.11. Sistemin Cevabı [8]

Sistemi etkileyen olaylardan biri de eğilme momentidir. Eğilme momentinden dolayı sistem esnediği için yöneldiği açı değişebilmektedir (Şekil 1.12) [8]. Eğilme

momentini dışarıdan gelen titreşimler veya sistem içerisindeki titreşimler oluşturmaktadır.



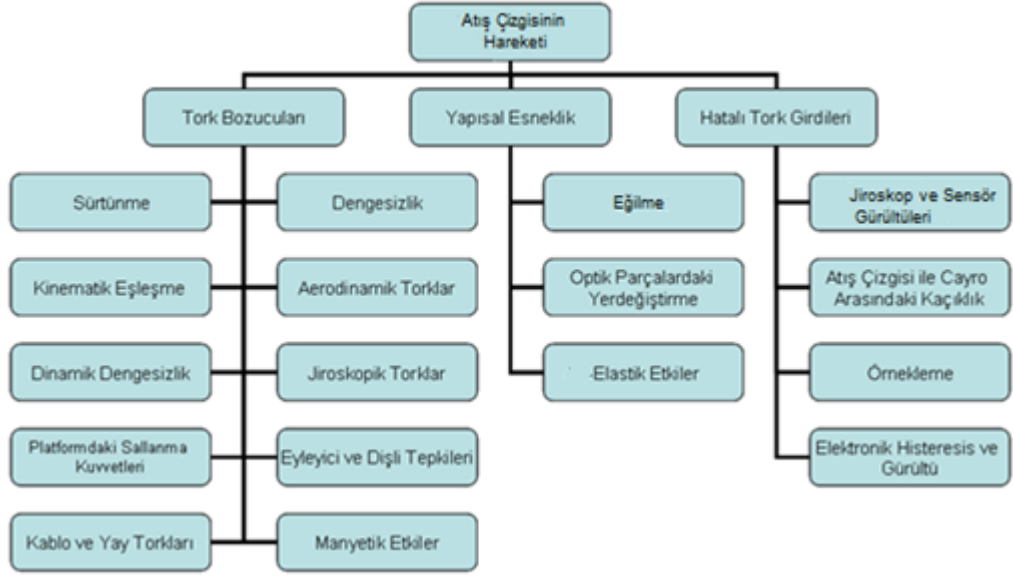
Şekil 1.12. Sisteme Bükme Momentinin Etkisi [8]

Genelde bu tip bir hareket olduğunda sistem daha rijit hale getirilir. Çok hassas yönelimlerde farklı optik yöntemler kullanılarak yönelim düzeltilebilmektedir. Yönelim sırasında titreşim meydana getiren iki ana faktör eyleyiciler ve tabandan gelen titreşimlerdir.

Sistemi etkileyen diğer önemli nokta ise burulma momentidir. Eğilme momentinde olduğu gibi burulma momentinde de sistem daha rijit hale getirilir. Yeterli derecede rijit yapmak çoğu zaman mümkün olmadığı için yönelimdeki kaybın kontrol sisteminden telafi edilmesi gerekmektedir.

Sistemi etkileyen son önemli nokta ise gimbal eyleyicilerinin bağlantısıdır. Eyleyicilerin bağlantısından gelen esnemeler ve titreşimler sistemi etkilemektedir. Sistem üzerindeki çözücü (resolver), enkoder gibi algılayıcılar sistemden etkileşerek kontrolde kararsızlığa yol açabilirler. Bu durumda gimbal yapısının bağlandığı bölge güçlendirilmeli veya ilave kütle koyulmalıdır.

Gimbal kullanılan sistemlerde bozucu etkinin oluşmasına sebep olan bazı etkenler Şekil 1.13'te verilmiştir.



Şekil 1.13. Atış Çizgisini Etkileyen Faktörler [8]

Bu etkenlerden en temel olanları tork bozucu etkisi, yapısal esneklik veya hatalı tork girişidir. Gimbal kullanılan sistemlerde sürtünme ve yapısal rijitlik önemli olup iki parametre arasında uygun değeri sağlamak gerekmektedir. Bu sistemlerde kullanılan motor ve eyleyiciler oluşabilecek bozucu tork değerlerini de telafi edebilecek kapasitede olmalıdırlar.

Sistemde belirli bir aktarma oranına ulaşmak için dişli yapılar kullanılır. Dişli yapılarda oluşabilecek boşluklar genelde önemsenmemektedir. Dişli yapıların kullanıldığı sistemlerde bozucu tork etkisi meydana gelebilir. Ayrıca, burulma rezonansı ve sürtünme, sistemi etkilemektedir. Bu sebeple, eğer mümkünse arada dişli kutusu olmadan sistem doğrudan tahrik edilir. [8]

Küçük gimballerin kullanıldığı sistemlerde sürtünmenin önemli bir etkisi vardır. Bu sürtünmeyi potansiyometreler, motorlar ve sarımlar oluşturmaktadır. Viskoz sürtünme katsayıları benzetimle gerçek değerler kıyaslanarak bulunmaktadır.

Yükseliş eksenindeki rezonans frekansları bozucu tork etkileri ile tetiklenebilir. Bu etkiler kontrolcü tarafından kontrol edilebilmelidir. Kontrolcünün bu etkilere cevap verebilmesi için örnekleme frekansı rezonans frekansının iki katından büyük olmalıdır. Ayrıca, ölçümlerde daha az gürültü olması daha gürbüz kontrolcü tasarımına olanak sağlar. [9]

Literatürdeki bazı çalışmalara göre roket ve lançerlerin dinamik karakterlerini benzetebilmek için üç konuya dikkat edilmektedir:

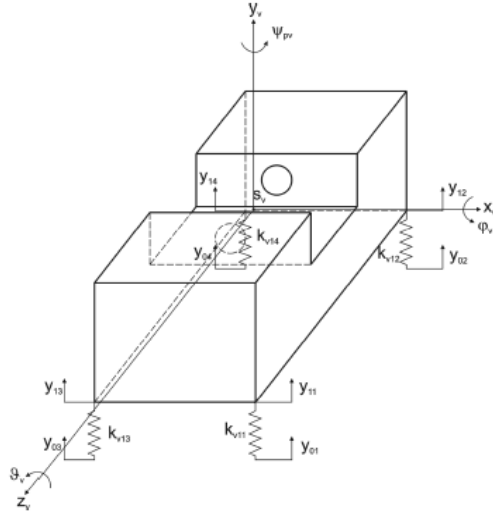
- Tüpün (kanisterin) veya roketin rijitliği veya esnekliği
- Roket ve tüpün birbiriyle teması
- Yapının elastik olması

Referans [10] tüpün veya roketin esnekliği ile roket ve tüpün birbiriyle temasını değerlendirmektedir. Roket ve tüpün teması iki yönlü bir yay ile modellenmiş ve roket ile tüp arasındaki boşluk dikkate alınmıştır. Bu modelde tüp elastik bar olarak modellenmiştir. Referans [11] roket ile tüp arasındaki boşluğu dikkate almaktadır. Bu sebeple roketin tüp içerisindeki hareketi için üç durumu değerlendirmiştir:

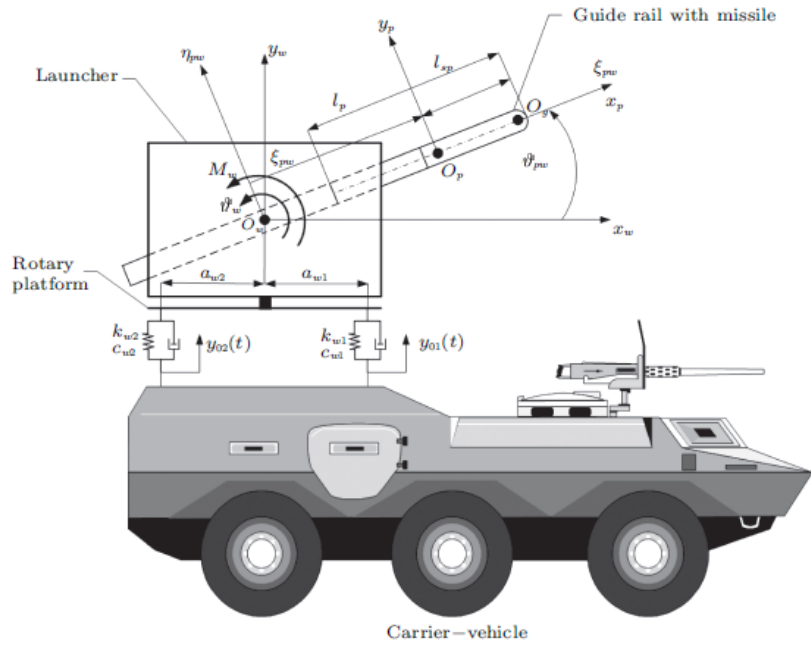
- Roketin havada asılı kalması,
- Tüp ile anlık olarak teması
- Roketin tüp üzerinde kayması[12]

Referans [10] ve [11] daha çok atış sırasında meydana gelecek sistem dinamiklerini benzetmek istediği için bu kısımları detaylı olarak modellemiştir.

Lançerlerin yönelim sırasındaki dinamiği modellenirken kütlelerin değişmediği varsayılarak sistemin rijit olduğu varsayılmaktadır. Lançerlerin ataletsel özellikleri, bağlı olduğu platformdaki konumuna göre değişmektedir [13]. Lançerler ve bağlantıları genellikle yay ve benzeri elemanlar kullanılarak modellenmektedir (Şekil 1.14 ve Şekil 1.15).



Şekil 1.14. Lançerin Fiziksel Olarak Modellenmesi [13]



Şekil 1.15. Lançerin Modellemesinde Kullanılan Elemanlar [14]

Bu modeller genellikle sistemin atış yükü altındaki davranışını belirlemek için kullanılmaktadır. Roket çıktıktan sonra gerçekleşen salınımlar lançer üzerindeki ataletsel ölçüm birimi tarafından değerlendirilerek en kısa sürede sönümlenmektedir.

Aynı zamanda sistemden roket ateşlendiğinde sistemin kütlelerinde değişme olacağı için sistemin bir sonraki roket çıkışına karşı davranışı değişecektir.

Lançerlerde olduğu gibi arazide çalışan robotlara araziden kaynaklı çeşitli frekanslarda titreşimler etkir. Bunun için damper yay sistemleri kullanılmaktadır. Ancak bu önlemler de bir noktaya kadar etkili olur. Daha etkili olması için aktif kontrol yapılması gerekir.[15]

Roket lançerlerinin bağlandığı platformdan gelen bozulmalardan dolayı roket lançerinin stabilizasyonunu sağlamak için modelin doğru oluşturulması daha fazla önem taşımaktadır. Bu durumlarda;

- Beklenmeyen bozulmaları önlemek için düzeltici kontrol uygulanmalı [16],
- Optimum kontrol yapılmalıdır [16]

Etkili parametrelerden biri olan sürtünmenin gerçeğe yakın modellenmesi sistemin kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Sürtünmeyi teorik olarak modellemek genellikle pek mümkün olmadığından, model deneysel verilerle doğrulanmalıdır.

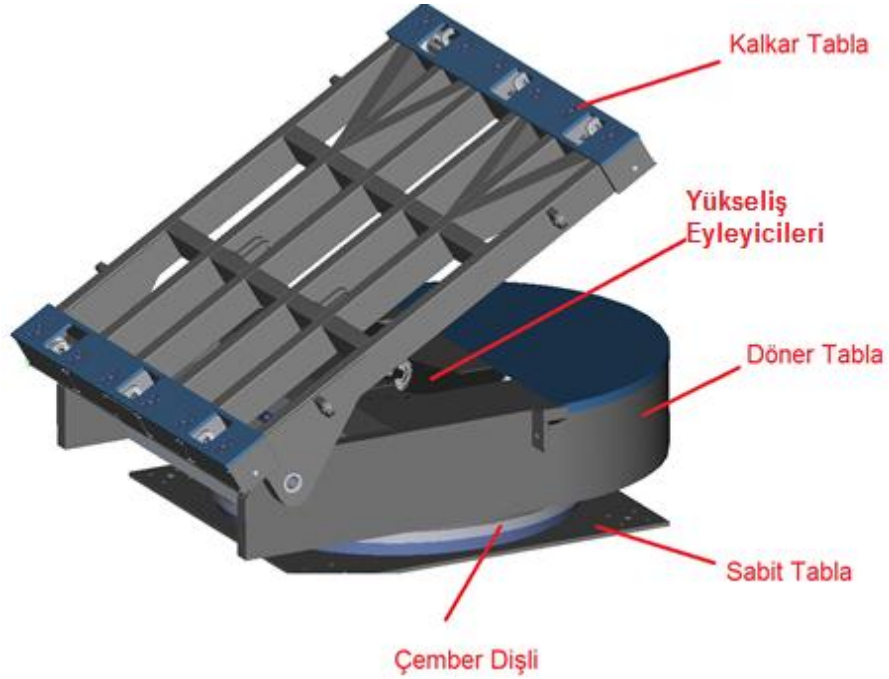
Lançer sistemlerine yükseliş ekseninde hareket verebilmek için genellikle doğrusal eyleyiciler kullanılmaktadır. Sistemlerdeki sürtünmenin en büyük kaynağı bu doğrusal eyleyicilerdir. Doğrusal eyleyicilerin olabildiğince gerçeğe yakın modellenmesi kontrolü kolaylaştıracaktır.

2. ROKET LANÇERİ

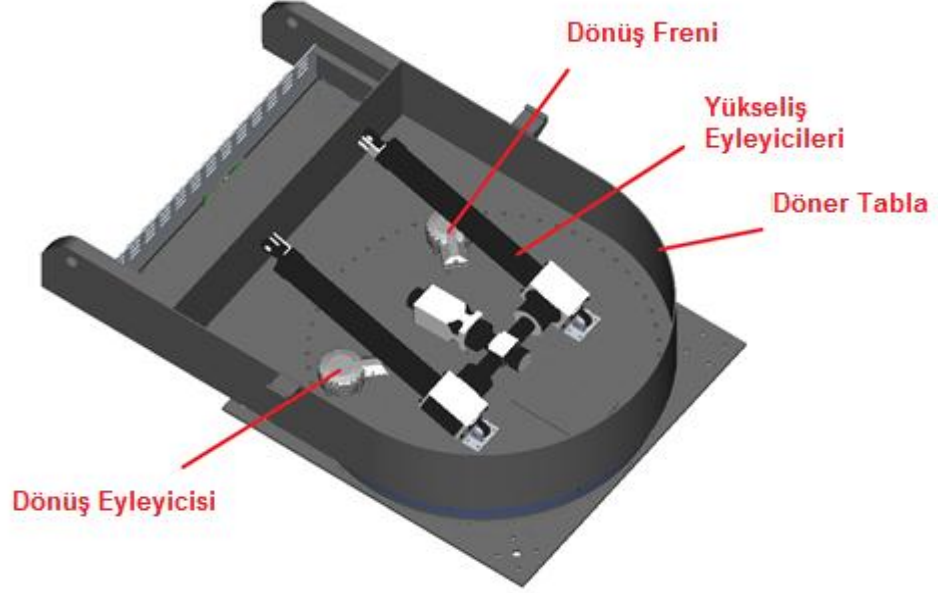
2.1 Roket Lançeri Genel Özellikleri

Roket lançeri, üzerine roket yerleştirilerek roketlerin istenilen hedefe gidebilmesi için gereken dönüş ve yükseliş açısını verebilen silah sistemidir. Lançerler yükseliş ekseninde hareket verebilmek için çeşitli tahrik sistemleri kullanmakla beraber genellikle pistonlar (hidrolik veya elektromekanik) sayesinde gerekli yükseliş açısı verilmektedir. Dönüş ekseninde de benzer şekilde çeşitli tahrik sistemleri kullanmakla beraber genellikle dişliler vasıtasıyla dönüş ekseninde hareket sağlanmaktadır.

Bu tez kapsamında incelenecek roket lançerinin temel parçaları ve bu parçaların yerleşimi Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Lançerin Genel Görünümü



Şekil 2.2. Döner Tabla Yerleşimi

Lançerlerde kullanılan ana parçaların tanımları ve işlevleri aşağıdaki bölümlerde anlatılmıştır.

Kalkar Tabla:

Üzerine podların yerleştirildiği, yükseliş ekseninde açı verilerek istenilen hedefe yönlendirilen yapıdır (Şekil 2.3). Pod, roketlerin içerisine yerleştirildiği, roketlerin düzgün bir şekilde çıkmasını sağlayan yapıdır. Kalkar tabla üzerinde podların yerleştirilebilmesi ve atış sırasında sabit bir şekilde tutabilmek için kilit mekanizması bulunmaktadır. Aynı zamanda kalkar tabla üzerinde çok hassas yönelim sağlayan ataletsel ölçüm birimi bulunmaktadır.



Şekil 2.3. Pod Yüklü Lançer

Döner Tabla:

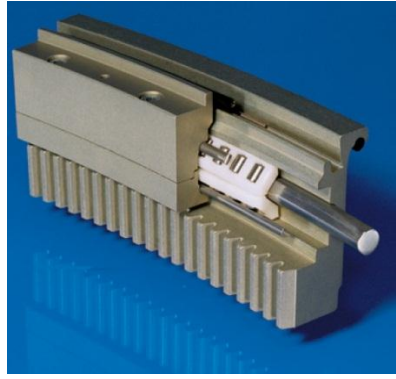
Kalkar tablanın bağlı olduğu, dönüş ekseninde açı verilerek istenilen hedefe yönlendirilen yapıdır. Bu yapı üzerinde lançerin yönelimi için gerekli olan mekanik ve elektronik elemanlar bulunmaktadır.

Sabit Tabla:

Sabit bir şekilde araca bağlanan, lançerin sabit parçasıdır. Döner tabla ile sabit tabla arasında dönmeyi sağlayan eleman olan çember dişli bulunmaktadır.

Çember Dişli:

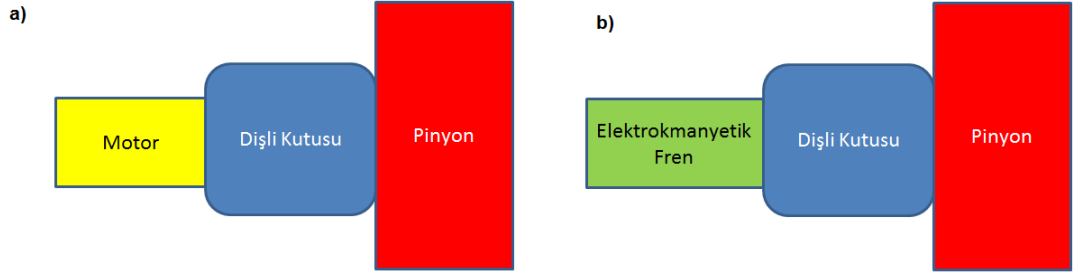
Sabit tabla ile döner tabla arasındaki dönme hareketini sağlayan bir tarafı dişli olan iki halkadan oluşan yapıdır (Şekil 2.4). Halkalar arasındaki yük aktarımı bilyalar ve/veya masuralar ile sağlanır. Çember dişlilerde bilyalar ve halkalar arasındaki temastan kaynaklanan sürtünme oluşmaktadır.



Şekil 2.4. Çember Dişli Örneği [21]

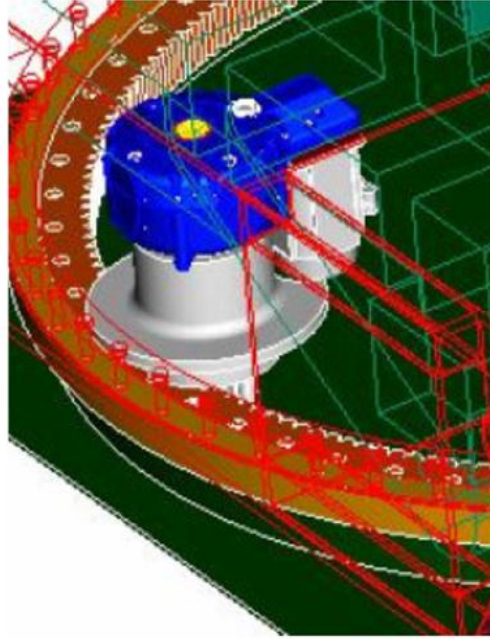
Dönüş Mekanizması:

Dönüş mekanizması, dönüş eyleyicisi (Şekil 2.5a) ve dönüş freni (Şekil 2.5b) bileşenlerinden oluşmaktadır. Dönüş eyleyicisinde elektrik motoru, dönüş freninde ise elektromanyetik fren bulunur. İki bileşen de redüktörler ve pinyonlar vasıtasıyla dişlerden lançere dönüş ekseninde hareket sağlayan çember dişli ile temas etmektedir. Dönüş eyleyicisi sistemi tahrik etmekte, dönüş freni ise atış anında sistemi kilitlemektedir. Dönüş freninde kullanılan dişli kutusunun geri dönüş (backdriving) torku çok yüksek olduğu için çok fazla miktarda sürtünme meydana gelmektedir.



Şekil 2.5. a) Dönüş Eyleyicisi Şematik Görünümü b) Dönüş Freni Şematik Görünümü

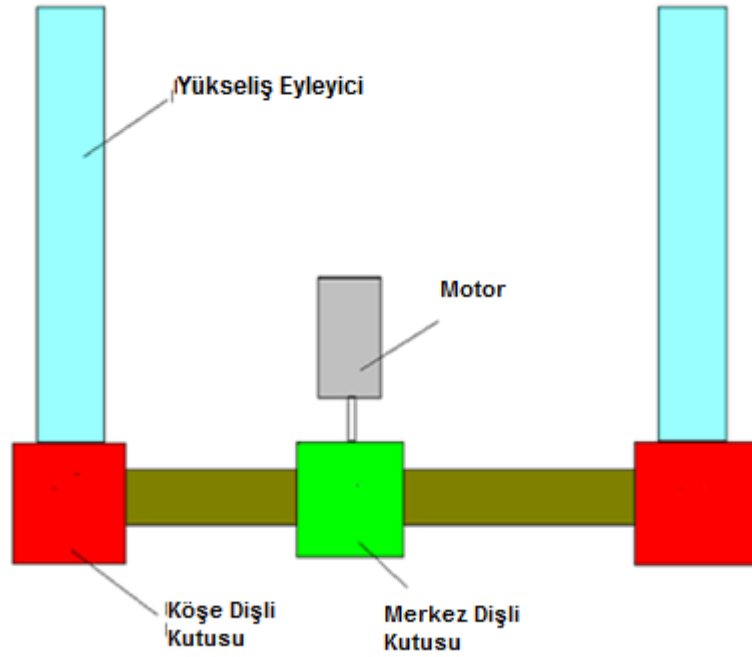
Dönüş mekanizması döner tablaya sabitlenmiş olup pinyonlar çember dişli ile temas halindedir. Çember dişli döndürülerek lançerin dönüş ekseninde dönmesi sağlanır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Dönüş Eyleyicisi Yerleşimi

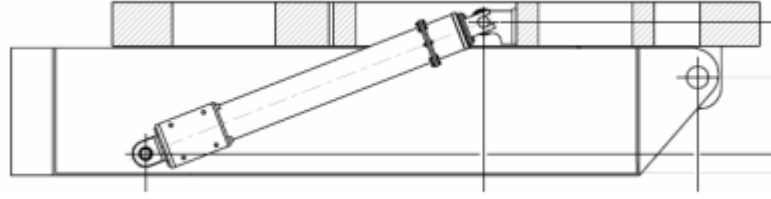
Yükseliş Mekanizması:

Yükseliş mekanizması temel olarak, iki adet yükseliş eyleyici, köşe dişli kutusu, merkez dişli kutusu ve elektrik motorundan meydana gelmektedir. Elektrik motorundan tahrik verilerek dişli kutuları döndürülmekte ve hareket buradan yükseliş eyleyicilere aktarılmaktadır. Yükseliş eyleyicilerinin ileri-geri hareketi ile sisteme yükseliş verilebilmektedir. Yükseliş mekanizmasının şematik görünümü Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Yükseliş Eyleyicinin Şematik Görünümü

Yükseliş eyleyicileri bir ucu döner tablada, hareket eden diğer ucu kalkar tablada olacak şekilde yerleştirilmiştir. Motordan tahrik verilerek kalkar tabla kaldırılmaktadır. Yükseliş eyleyiciler minimum yük gelecek şekilde ve en az hacmi kaplayacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Yükseliş Eyleyicilerinin Lançer Üzerinde Yerleşimi
(Şematik Gösterim)

2.2 Roket Lançeri Modellenmesi

Modelleme sırasında lançerdeki çok ince detaylar ve sistem dinamiğine etki etmeyen parçalar çıkarılmıştır. Ya da bu küçük parçaların ağırlıkları, ataletleri ve sürtünmeleri birleştirilerek tek parça olarak modellenmiştir. Lançerin dinamiğine etkiyen ana parçalar aşağıda verilmiştir:

- Pod
- Kalkar tabla
- Döner tabla
- Sabit tabla
- Çember dişli
- Dönüş mekanizması
- Yükseliş mekanizması

Bu parçaların her birinin geometrik, fiziksel ve mekanik özellikleri modele eklenmiştir. Lançerin bu özellikleri üç boyutlu katı modelden alınmıştır. Daha önce farklı lançerlerde yapılan ölçümlerde ağırlık ve atalet gibi özelliklerin üç boyutlu katı modelle uyduğu belirlenmiştir. Bu sebeple tekrar test veya ölçüm yapılmamıştır.


Modellerde sabit tabla hareketsiz olduğu için sabit tablanın ağırlığı ve ataleti ihmal edilmiştir. Lançerin dönüş eksenindeki koordinat sistemi sabit tablanın geometrik

merkezine yerleştirilmiştir. Sabit tablanın esnekliğinin modele etkisinin çok fazla olmadığı değerlendirilerek rijit olarak modellenmiştir.

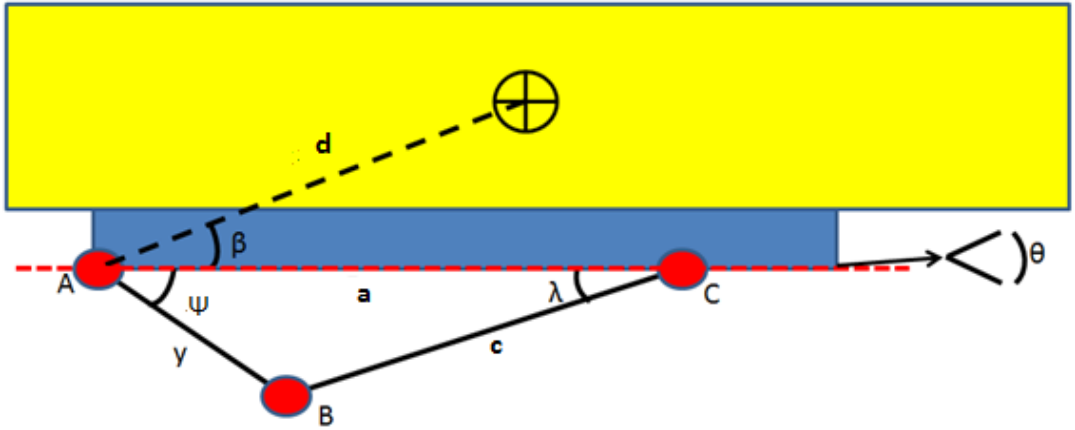
Sabit tablanın üzerine çember dişli yerleştirilerek lançere dönüş ekseninde hareket kazandırılmıştır. Çember dişlinin rulmana benzer yapısı sebebiyle sürtünme meydana gelmektedir. Çember dişlinin iç ile dış halkası arasındaki ve halkalar ile bilyalar arasındaki boşluklar lançere göre önemsenmeyecek derecede küçük olduğu için ihmal edilmiştir. Sabit tablada olduğu gibi çember dişlide de esneme çok az olduğu için çember dişli rijit varsayılmıştır.

Çember dişlinin üst yüzeyine döner tablanın alt yüzeyi yerleştirilerek dönme eksenleri çakıştırılmıştır. Döner tablanın üzerinde dönüş mekanizmasının, yükseliş mekanizmasının ve kalkar tablanın takılacağı ara yüzler bulunmaktadır. Dönüş mekanizmasının döner tabla üzerindeki konumu belirlenerek dönüş eyleyicisinin pinyonu çember dişlinin dişleri ile temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Dönüş mekanizması döner tablaya göre sabittir. Dönüş eyleyicisindeki pinyon rulmanlar ile yataklanarak dönüş eyleyicisinin merkezine göre dönel hareket yapmaktadır. Yükseliş eyleyicisinin döner tabla üzerindeki bağlantı noktalarında dönel eklemler bulunmaktadır. Kalkar tablanın bağlantı noktalarında da dönel eklemler yerleştirilerek kalkar tablanın döner tablaya göre dönel hareket etmesi sağlanır.

2.2.1 Yükseliş Ekseni

Bölüm 2.2’de belirtildiği gibi yükseliş eksenindeki hareket kalkar tablanın döner tablaya bağlantı noktasından gerçekleşmektedir. Bu hareketi sağlayan ise bir ucu kalkar tablaya diğer ucu döner tablaya bağlı olan yükseliş mekanizmasıdır. Şekil 2.9’da yükseliş eksenindeki harekete etkisi bulunan elemanların yerleşimi verilmiştir. Sarı ile gösterilen parça podu, mavi ile gösterilen parça ise kalkar tablayı göstermektedir. Sarı parça üzerindeki  işareti ise pod ve kalkar tablanın ağırlık

merkezini göstermektedir. A ile gösterilen eklem kalkar tablanın dönme noktasını, B ile gösterilen eklem yükseliş eyleyicisinin döner tabla üzerindeki dönme noktasını ve C ile gösterilen eklem ise yükseliş eyleyicisinin kalkar tabla üzerindeki dönme noktasını göstermektedir. A,B ve C noktaları dönel eklemdir. a uzunluğu A noktası ile C noktası arasındaki mesafe olup sabittir. y uzunluğu A noktası ile B noktası arasındaki mesafe olup sabittir. c uzunluğu ise B noktası ile C noktası arasındaki mesafe olup yükseliş eyleyicisinin uzunluğunu göstermektedir. c yükseliş eyleyicisinin uzunluğunu gösterdiği için değişkendir. Kırmızı kesikli çizgi referans çizgisi olup aynı zamanda 0° yükseliş açısında kalkar tablanın bulunduğu çizgidir. θ açısı yükseliş açısı olup kalkar tabla ile referans çizgisi arasındaki açıdır. β açısı, pod ve kalkar tablanın ağırlık merkezi ile A noktasından geçen çizginin (d) kalkar tabla ile yaptığı açı olup sabit bir açıdır. ψ açısı A ve B noktalarından geçen çizginin referans çizgi ile yaptığı sabit açıdır. λ açısı B ve C noktalarından geçen çizginin a uzunluğu ile yaptığı değişken açıdır.



Şekil 2.9. Yükseliş Ekseni Sistem Geometrisi

θ açısı 0° ile 60° arasında değişmektedir. θ açısına göre yükseliş eyleyicinin vermesi gereken tork değeri değişmektedir. A dönme noktasına göre moment alındığında;

$$m_{kalkar+pod} = \text{Podların ve kalkar tablanın ağırlığı}$$

$$F_{yük} = \text{Yükseliş eyleyicisine etkiyen yük}$$

$$m_{kalkar+pod} \cdot g \cdot d \cdot \cos(\beta + \theta) = F_{yuk} \cdot a \cdot \sin(\lambda) \quad (2.1)$$

$$F_{yuk} = \frac{m_{kalkar+pod} \cdot g \cdot d \cdot \cos(\beta + \theta)}{a \cdot \sin(\lambda)} \quad (2.2)$$

(2.2)'de yükseliş eyleycisine etkiyen kuvvetin denklemi bulunmakta olup F_{yuk} değeri θ ve λ açılarına bağlı olarak değişmektedir. λ açısını kontrol etmek zor olduğu için bu açıyı kontrol edilebilen değişkenler olan θ ve c cinsinden yazmak gerekmektedir.

$$y \cdot \sin(\psi + \theta) = c \cdot \sin \lambda \quad (2.3)$$

$$\sin \lambda = \frac{y \cdot \sin(\psi + \theta)}{c} \quad (2.4)$$

(2.4) numaralı denklem (2.2) numaralı denkleme yerleştirildiğinde;

$$F_{yuk} = \frac{m_{kalkar+pod} \cdot g \cdot d \cdot \cos(\beta + \theta) \cdot c}{a \cdot y \cdot \sin(\psi + \theta)} \quad (2.5)$$

elde edilmektedir.

A,B ve C noktalarının oluşturduğu üçgene kosinüs teoreminden denklem yazıldığında;

$$c^2 = y^2 + a^2 - (2 \cdot y \cdot a \cdot \cos(\psi + \theta)) \quad (2.6)$$

$$c = \sqrt{(y^2 + a^2 - (2 \cdot y \cdot a \cdot \cos(\psi + \theta)))} \quad (2.7)$$

piston boyunun (c) yükseliş açısına (θ) göre değişimi bulunmaktadır. (2.7) numaralı denklem (2.5) numaralı denkleme yerleştirildiğinde (2.8) elde edilerek yükseliş eyleyicisine etkiyen kuvvetin açığa göre değişimi elde edilebilmektedir.

$$F_{yuk} = \frac{m_{kalkar+pod} \cdot g \cdot d \cdot \cos(\beta+\theta) \cdot \sqrt{y^2+a^2-(2 \cdot y \cdot a \cdot \cos(\psi+\theta))}}{a \cdot y \cdot \sin(\psi+\theta)} \quad (2.8)$$

$$F_{yuk} \cdot p = T_m \cdot n_{kose} \cdot n_{merkez} \cdot 2 \cdot \pi i \cdot \eta_{kose} \cdot \eta_{merkez} \cdot \eta_{de} \quad (2.9)$$

(2.9) numaralı denklemdeki T_m yükten kaynaklanan motor şaftındaki tork değerini, n_{kose} köşe dişli kutusunun aktarma oranını, n_{merkez} merkez dişli kutusunun aktarma oranını, p yükseliş eyleyicisinin diş adımını, η_{kose} köşe dişli kutusundaki verimi, η_{merkez} merkez dişli kutusundaki verimi, η_{ye} ise yükseliş eyleyicisindeki verimi göstermektedir. Böylece T_m motor torku;

$$T_m = \frac{m_{kalkar+pod} \cdot g \cdot d \cdot \cos(\beta+\theta) \cdot \sqrt{y^2+a^2-(2 \cdot y \cdot a \cdot \cos(\psi+\theta))} \cdot p}{a \cdot y \cdot \sin(\psi+\theta) \cdot n_{kose} \cdot n_{merkez} \cdot 2 \cdot \pi i \cdot \eta_{kose} \cdot \eta_{merkez} \cdot \eta_{ye}} \quad (2.10)$$

T_m değeri genel olarak sabit değerlere bağlı olmakla birlikte θ yükseliş açısı değişkenine, η_{kose} , η_{merkez} ve η_{ye} değişkenlerine bağlı olarak değişmektedir.

Motor açısal hızını ve ivmesini bulmak için denklem (2.6)'nın zamana göre türevi alındığında;

$$2 \cdot c \cdot \frac{dc}{dt} = 2 \cdot y \cdot a \cdot \sin(\psi + \theta) \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.11)$$

Eyleyici hızının ($\frac{dc}{dt}$) motor mili hızı ile arasındaki bağıntı yazılırsa;

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d\theta_m}{dt} \cdot \frac{1}{n_{kose}} \cdot \frac{1}{n_{merkez}} \cdot \frac{p}{2 \cdot \pi i} \quad (2.12)$$

Denklem (2.12), denklem (2.11)'e koyulduğunda;

$$2 \cdot c \cdot \frac{d\theta_m}{dt} \cdot \frac{1}{n_{kose}} \cdot \frac{1}{n_{merkez}} \cdot \frac{p}{2 \cdot \pi i} = 2 \cdot y \cdot a \cdot \sin(\psi + \theta) \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.13)$$

Denklem (2.7), (2.13) e yerleştirildiğinde;

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{n_{kose} \cdot n_{merkez} \cdot 2 \cdot \pi i \cdot y \cdot a \cdot \sin(\psi + \theta)}{p \cdot \sqrt{y^2 + a^2 - 2 \cdot y \cdot a \cdot \cos(\psi + \theta)}} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.14)$$

elde edilir. Denklemleri daha sade yazabilmek için şu kısaltmalar yapılacaktır:

$$A = \frac{n_{kose} \cdot n_{merkez} \cdot 2 \cdot \pi i \cdot y \cdot a}{p} \quad (2.15)$$

$$B = y^2 + a^2 - 2 \cdot y \cdot a \cdot \cos(\psi + \theta) \quad (2.16)$$

$$C = y \cdot a \cdot \sin^2(\psi + \theta) \quad (2.17)$$

İvmelenme değerini bulmak için denklem (2.14)'ün türevi alınarak sadeleştirildiğinde;

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{A}{\sqrt{B}} \cdot \left\{ \cos(\psi + \theta) \cdot \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 - \frac{C}{B} \cdot \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 - \sin(\psi + \theta) \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \right\} \quad (2.18)$$

elde edilmektedir.

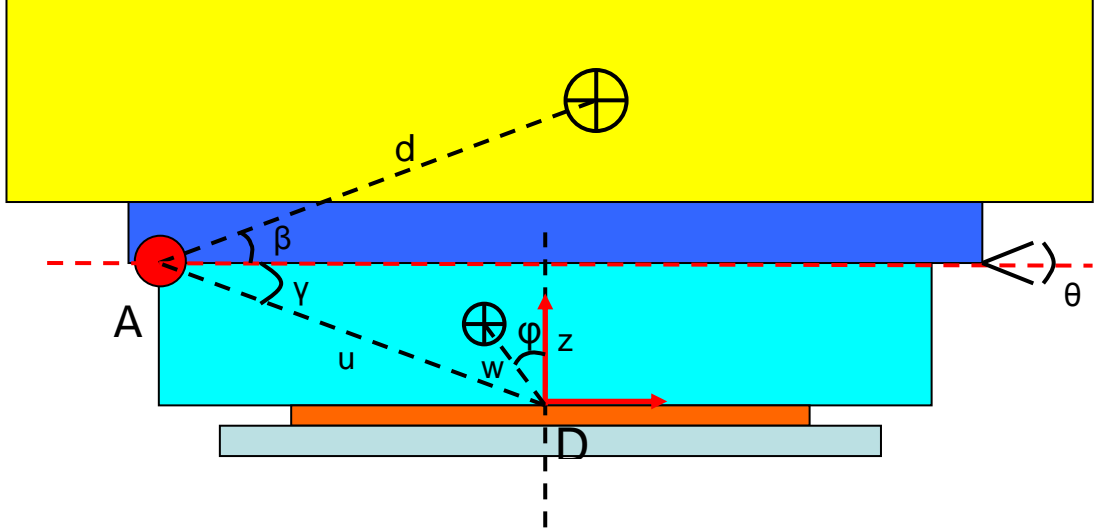
Denklem (2.14) şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{A \cdot \sin(\psi + \theta)}{\sqrt{B}} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.19)$$

Modellemeye motor ve sürücü dahil edilmediği durumda yukarıdaki denklemler kullanılarak model oluşturulmuştur.

2.2.2 Dönüş Ekseni

2.1 bölümünde de belirtildiği gibi dönüş eksenindeki hareket döner tablanın sabit tablaya bağlantı noktası olan çember dişli sayesinde gerçekleşmektedir. Bu hareketi sağlayan ise dönüş eyleyici mekanizmasıdır. Şekil 2.10'da dönüş eksenindeki harekete etkisi bulunan elemanların yerleşimi verilmiştir. Sarı ile gösterilen parça podu, mavi ile gösterilen parça ise kalkar tablayı göstermektedir. Sarı parça üzerindeki \oplus işareti ise pod ve kalkar tablanın ağırlık merkezini göstermektedir. A ile gösterilen eklem kalkar tablanın dönme noktasını, D ile gösterilen eklem döner tablanın dönme noktasını göstermektedir. A ve D noktaları dönül eklemdir. u uzunluğu A noktası ile D noktası arasındaki mesafe olup sabittir. w uzunluğu D noktası ile \oplus noktası (döner tablanın ağırlık merkezini göstermektedir) arasındaki mesafe olup sabittir. Kırmızı kesikli çizgi referans çizgisi olup aynı zamanda 0° yükseliş açısında kalkar tablanın bulunduğu çizgidir. θ açısı yükseliş açısı olup kalkar tabla ile referans çizgisi arasındaki açıdır. β açısı, pod ve kalkar tablanın ağırlık merkezi ile A noktasından geçen çizginin (d) kalkar tabla ile yaptığı açı olup sabit bir açıdır. γ açısı A ve D noktalarından geçen çizginin referans çizgi ile yaptığı sabit açıdır. φ açısı D ve döner tablanın ağırlık merkezi noktalarından geçen çizginin z ekseni ile yaptığı sabit açıdır. Koordinat sistemi çember dişlinin üzerine yerleştirilmiş olup z dönme eksenini göstermektedir.



Şekil 2.10. Dönüş Ekseni Sistem Geometrisi

θ açısı 0° ile 60° arasında değişmektedir. θ açısına göre dönüş eyleyicisinin vermesi gereken tork değeri değişmektedir. Sistemde çember dişli ile pinyon arasında aktarma oranı, pinyon üzerinde belirli aktarma oranına sahip iki adet dişli kutusu bulunmaktadır. Çember dişliden kaynaklanan sürtünme torkunun en fazla değeri kalkar tabla maksimum açıdayken elde edilen değerdir. Bu sebeple yükseliş açısının en fazla olduğu noktadaki sürtünme torku hesaplanmıştır. Çember dişliden kaynaklanan sürtünme kuvvetini bulmak için çember dişli merkezine etkiyen kuvvet ile çember dişli merkezine etkiyen moment hesaplanmıştır.

$F_{eks_çd}$ = Çember dişli üzerine etkiyen dik kuvvetler

$F_{döner}$ = Döner tabla ve içerisindeki ekipmanların ağırlığından dolayı etkiyen dik kuvvet

F_{kalkar} = Kalkar tabla ve içerisindeki ekipmanların ağırlığından dolayı etkiyen dik kuvvet

F_{pod} = Podların ağırlığından dolayı etkiyen dik kuvvet

M_{cd} = Çember dişli merkezine göre etkiyen moment

M_{cd_s} = Çember dişliden kaynaklanan sürtünme momenti

D_L = Çember dişlideki bilya yataklarının bulunduğu çap

μ_{cd} = Çember dişli için coulomb sürtünme katsayısı

$$F_{eks_cd} = F_{döner} + F_{kalkar} + F_{pod} \quad (2.20)$$

$$M_{cd} = (F_{kalkar} + F_{pod}) \cdot (u \cdot \cos \gamma - d \cdot \cos \beta) + F_{doner} \cdot (w \cdot \sin \varphi) \quad (2.21)$$

$$M_{cd_s} = \left(\frac{\mu_{cd}}{2}\right) \cdot (4.4 \cdot M_{cd} - F_{eks_cd} \cdot D_L) \quad [21] \quad (2.22)$$

Lançeri döndürmek için gereken tork hesaplanırken lançerin ataleti hesaba katılmamıştır. Çünkü lançer çok yavaş döndüğü için ataletten kaynaklanan tork değeri ihmal edilebilir seviyelerdedir. Çember dişli sürtünme hesaplamaları çok fazla faktörden etkilendiği için çember dişli firmaları sürtünme hesaplamalarında $\pm\%25$ hata payı öngörmektedir. Ayrıca, çember dişli düzgün bir yüzeye bağlanmalıdır. Yüzeydeki düzlemsellik bozuldukça oluşan sürtünme değeri de artmaktadır. Gerçek sistemde çember dişlinin 1 mm lik düzlemsellik hatası olan bir yüzeye bağlanmasına izin verilmektedir. Çember dişli firmalarının yaptığı testlere göre 1500 mm çapındaki çember dişli 1 mm düzlemsellik hatasına sahip yüzeye bağlandığında sürtünme değeri yaklaşık olarak %75 artmaktadır. Yine aynı şekilde, çember dişli - 40° sıcaklıkta test edildiğinde sürtünme değeri yaklaşık olarak %75 artmaktadır. Hesaplamalarda en kötü durumun oluştuğu varsayılarak;

$$M_{cd_sk} = M_{cd_s} \cdot 1,25 \cdot 1,75 \cdot 1,75 \quad (2.23)$$

elde edilmektedir. Dönüş ekseninde çember dişliye hareketi veren dönüş eyleyicisi ve atış sırasında kilitlemek için kullanılan dönüş freninden kaynaklanan sürtünme

değerleri oluşmaktadır. Dönüş eyleyicisi lançeri döndürürken dönüş freninden kaynaklanan sürtünmeyi de yenmek durumundadır. Dönüş freninde kullanılan sikloid dişli kutusundan dolayı meydana gelen sabit bir geri dönüş torku vardır. Dönüş eyleyici üzerindeki sikloid dişli kutusu, konik dişli kutusu ve mekanik parçalar arasındaki verimlerin her biri için bir katsayı (sırasıyla $\eta_{sikloid}$, η_{konik} , η_{mek}) verilmiştir.

Lançer yüklü iken ve maksimum yükseliş açısında iken lançeri döndürmek için gereken tork değeri;

M_{geri} = Dönüş freninden kaynaklı sürtünme

n_{cd_pinyon} = Çember dişli pinyon arasındaki aktarma oranı

$\eta_{sikloid}$ = Sikloid dişli kutusunun verimi

η_{konik} = Konik dişli kutusunun verimi

η_{mek} = Mekanik parçaların verimi

$n_{sikloid}$ = Sikloid dişli kutusunun aktarma oranı

n_{konik} = Konik dişli kutusunun aktarma oranı

T_m = Lançeri döndürmek için motora indirgenmiş tork değeri

$$T_m = \frac{\left(\frac{M_{cd_sürtünme_katsayı}}{n_{cd_pinyon}} + M_{geri} \right)}{n_{konik} \cdot n_{sikloid} \cdot \eta_{mek} \cdot \eta_{sikloid} \cdot \eta_{konik}} \quad (2.24)$$

olarak elde edilmiştir.

Dönüş motoru için gereken hız ise;

$$\frac{d\theta}{dt_m} = \frac{d\theta}{dt_{lan\c{c}er}} \cdot n_{cd_pinyon} \cdot n_{sikloid} \cdot n_{konik} \quad (2.25)$$

elde edilmektedir.

3. SÜRTÜNME MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Mevcut roket lançerlerinin modellerinde basitliği ve uygulanabilirliği sebebiyle Coulomb sürtünme modeli kullanılmaktaydı. Ancak daha doğru benzetim yaparak daha doğru sonuçlar elde edebilmek için literatürdeki diğer sürtünme modelleri incelenmiştir.

Roket lançeri modellenirken lançerin yapısına ve kullanım yerine göre uygun sürtünme modelleri kullanılmaktadır. Bu bölümde de literatürde bulunan sürtünme modelleri anlatılmaktadır. Bütün mekanik sistemlerde (rulman, dişliler, makaralar, frenler, hidrolik, vb) sürtünme meydana gelmektedir. Sürtünme çok fazla değişkenden etkilenen bir olgudur. Sürtünme, iki yüzeyin temas ettiği noktalarda ortaya çıkmaktadır. Sürtünmeyi azaltmak için önlemler alınmasına karşın, tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir. Sürtünme etkisi kontrolcülerle telafi edilebilmektedir. Sürtünmenin karakteristiği iyi bilinmeden dinamik sistemlerin kontrolü zordur. Bu nedenle, matematiksel sürtünme modelleri kullanılır.

3.1 Statik Sürtünme Modelleri

Sürtünme, iki yüzey arasında oluşan ve bu yüzeylere teğet olan tepki kuvvetidir. Bu tepki kuvveti temas yüzeyinin geometrisi ve topolojisine, cisimlerin yüzeylerine, cisimlerin birbirine göre hızlarına, yağlama miktarına, kirliliğe, sıcaklığa, vb. bağlı olarak değişmektedir.

3.1.1 Coulomb Sürtünme Modeli

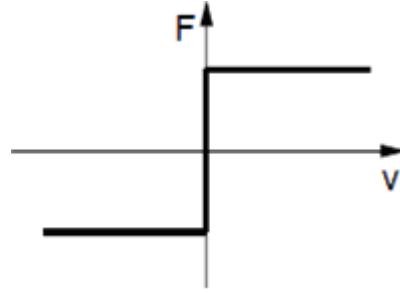
Coulomb sürtünme modelinde sürtünme kuvveti (F_c), sürtünme katsayısına (μ) ve etkiyen dik kuvvete (F_d) bağlıdır.

$$F_c = \mu \cdot F_d \quad (3.1)$$

Sürtünme kuvvetinin büyüklüğü hızdan ve temas alanından bağımsızdır.

$$F = F_c \cdot \text{sgn}(v) \quad (3.2)$$

Coulomb sürtünme kuvveti hız sıfır olduğunda uygulanan dış kuvvete bağlı olarak değişmektedir (Şekil 3.1).



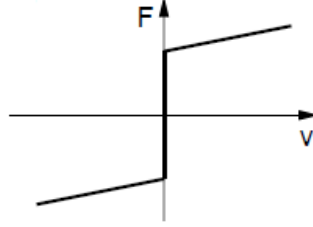
Şekil 3.1. Coulomb Sürtünmesi

3.1.2 Coulomb+Viskoz Sürtünme Modeli

Bu modelde, Coulomb sürtünmesine ek olarak viskoz sürtünme dâhil edilmiştir. Cisimler arasındaki yağlayıcı maddelerden kaynaklanan viskoz sürtünme teorik olarak (3.3) ile tarif edilebilmektedir. F_v viskoz sürtünme katsayısı olup v ise hızı göstermektedir.

$$F = F_v \cdot v \quad (3.3)$$

Şekil 3.2 viskoz sürtünme ile Coulomb sürtünmenin birleşik halini gösterir.



Şekil 3.2. Coulomb Sürtünmesi + Viskoz Sürtünme

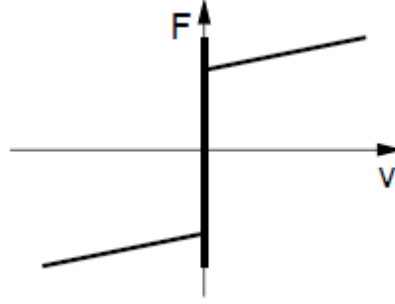
Ampirik verilere göre bu sürtünme modeli ile hız arasında (3.4) ile gösterildiği gibi doğrusal olmayan bir bağlantı vardır.

$$F = F_v \cdot |v|^{\delta_v} \cdot \text{sgn}(v) \quad (3.4)$$

δ_v uygulanan geometriye göre değişmektedir.

3.1.3 Coulomb + Viskoz + Kalkış Sürtünme Modeli

3.1.2’de bahsedilen modele ek olarak, hız sıfır olduğunda sistemi harekete geçirmek için gereken sürtünmenin daha fazla olduğu varsayılmaktadır. Kalkış sürtünme değerinin Coulomb sürtünmesinden daha büyük olduğu düşünülmektedir (Şekil 3.3) [17].



Şekil 3.3. Coulomb Sürtünmesi +Viskoz Sürtünme + Kalkış Sürtünmesi

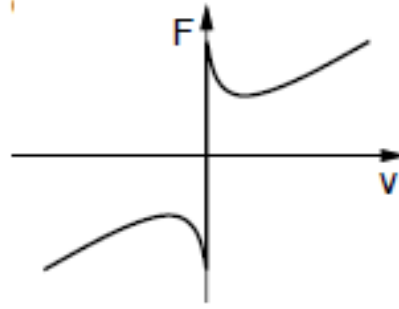
Bu model için tanımlama aşağıda verilmiş olup F_e dıştan etkiyen kuvveti F_s kalkış kuvvetini göstermektedir.

$$F = \begin{cases} F_e & v = 0 \quad ve \quad |F_e| < F_s \\ F_s \operatorname{sgn}(F_e) & v = 0 \quad ve \quad |F_e| \geq F_s \end{cases} \quad (3.5)$$

Yukarıda da görüldüğü gibi hızın girdi kuvvetin ise çıktı olarak değerlendirilmesi tam olarak doğru değildir. Bu şekilde modelleme yapıldığı takdirde, hızın sıfır olduğu durumda statik sürtünme için $-F$ ile F arasında dış kuvvete bağlı olarak herhangi bir değer olabilir.

3.1.4 Stribeck Sürtünme Modeli

Stribeck sürtünme modelinde 3.1.3'te bahsedilen sürtünme modelinden farklı olarak hızın sıfır olduğu noktada süreksizlik olmadığı varsayılmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Stribeck Sürtünme

Stribeck sürtünme modeli aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$F = \begin{cases} F_C + (F_S - F_C)e^{-\frac{|v|}{v_s}} + F_v v & v \neq 0 \\ F_e & v = 0 \text{ ve } |F_e| < F_s \\ F_s \operatorname{sgn}(F_e) & v = 0 \text{ ve } |F_e| \geq F_s \end{cases} \quad (3.6)$$

Bu denklemlerde verilen v_s Stribeck hızı olarak bilinmektedir.

3.2 Dinamik Sürtünme Modelleri

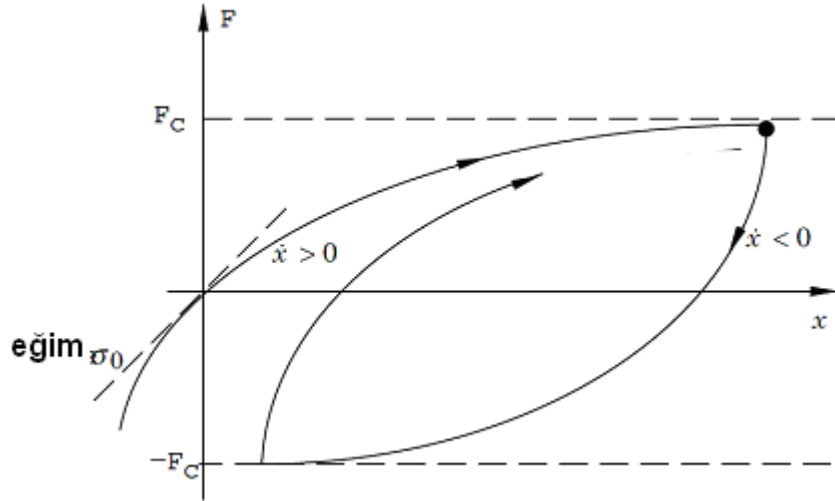
Statik sürtünme modelleri sürtünmeyi hızın fonksiyonu olarak belirler. Bu modellerin bir dezavantajı hızın sıfır olduğu noktada süreksizlik olmasıdır. Bu da gerçek sürtünme davranışını gösterememektedir. Dinamik sürtünme modellerinde statik sürtünme modellerinden farklı olarak harekete başlamadan önceki yer değiştirme, sürtünme gecikmesi ve değişken kalkış torku modellenebilir. Bu bölümde literatürdeki çeşitli dinamik sürtünme modelleri incelenmiştir.

3.2.1 Dahl Sürtünme Modeli

Dahl modeli, rulmanlı servo sistemlerde sürtünmeyi adaptif olarak telafi etmek için geliştirilmiştir. Rulman sürtünmesi Coulomb sürtünmesine çok benzemektedir. Dahl modeli gerilim-gerinim eğrisi üzerine oturtulmuştur. Bu modele göre, sistem gerilime maruz kaldığında kopma gerçekleşene kadar sürtünme artar (Şekil 3.5). Sürtünmenin modeli (3.7) de verilmiştir.

$$\frac{dF}{dx} = \sigma \left(1 - \frac{F}{F_c} \operatorname{sgn}(v)\right)^\alpha \quad (3.7)$$

F sürtünme kuvvetini, F_c Coulomb sürtünme kuvvetini, σ direngenlik katsayısını ve α ise gerilim-gerinim eğrisinin şeklini belirleyen faktördür (Genellikle 1 olarak kullanılır).



Şekil 3.5. Sürtünme Kuvvetinin Yer Değiştirmeye Göre Değişimi [17]

Dahl modeli basit bir dinamik model olarak bilinmektedir. Kalkış torkunu kapsamamaktadır. Dahl modeli sadece konuma bağlı olup hıza bağlı değildir. Bu

sebeple hareketin sonunda ani bir düşüş yapmaktadır. Dahl modeli daha çok sürtünmelerde histerezisi modellemek için kullanılmaktadır.

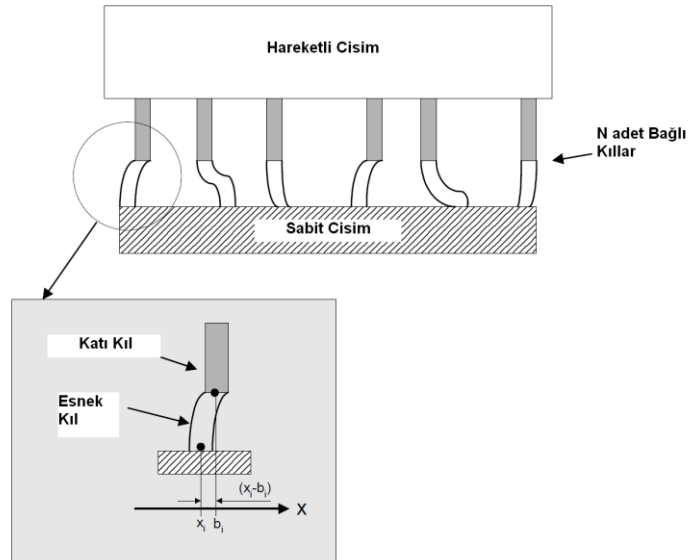
Zaman tanımlı kümede Dahl modeli oluşturulduğunda;

$$\frac{dF}{dt} = \frac{dF}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dF}{dx} v = \sigma \left(1 - \frac{F}{F_c} \operatorname{sgn}(v)\right)^\alpha v \quad (3.8)$$

elde edilir.

3.2.2 Bristle Sürtünme Modeli

Bu modelde cisimler mikroskobik seviyede incelenip cisim yüzeylerinde olan düzensizliklere ve bu noktaların konumlarına göre sürtünme değerlendirilmektedir. Her cisimde kıla (bristle) benzeyen sürtünme yaratan yapılar olduğu varsayılmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Bristle Sürtünme Modeli[18]

Bu kıla benzeyen yapılar birbirine sürtüp yay gibi görev yaparak sürtünme yaratmaktadır. Bu sayede elde edilen kuvvet (3.9) da verilmiştir.

$$F = \sum_{i=1}^N \sigma_0 (x_i - b_i) \quad (3.9)$$

N Temas eden kıl (bristle) sayısını; σ_0 kılların direngenliğini, x_i esnek kılın konumunu ve b_i ise temasın olduğu noktayı belirtmektedir.

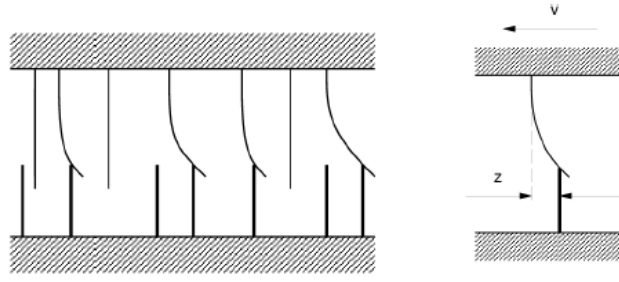
3.2.3 Bliman Sorine Sürtünme Modeli

Bu sürtünme modeli Dahl modelinden esinlenilerek türetilmiştir. Bu modelde, sürtünme sadece izlenecek yolun bir fonksiyonu olup hızdan bağımsızdır. Hız değişimlerine cevap olarak statik sürtünme, kuvvet aşımı olarak modellenmiştir. Bu model hareket yönü değişiminden sonra Stribeck etkisini yansıtmakta olup durağan haldeki hız ve sürtünme kuvveti arasındaki ilişkide Stribeck etkisi bulunmamaktadır.

3.2.4 LuGre Sürtünme Modeli

LuGre modeli Bristle modeline benzemektedir. Bu modelde de cisimlerde kıl (bristle) tipi yapılar bulunduğu varsayılp Bristle modelinden farkı sürtünme modeli rastgele davranış göstermeyip ortalama bir karakteristik göstermesidir[18].

LuGre modelinde sistem durağan haldeyken sürtünme kuvveti elastik yayların teğet mikroskobik yer değiştirmelerde uyguladığı kuvvetlerin ortalaması olarak değerlendirilmektedir. Bu elastik yaylar Şekil 3.7 'de gösterildiği gibi düşünülebilir.



Şekil 3.7. LuGre Modelinin Gösterimi [18]

Ortalama kıl(bristle) yer değiştirmesini modellemek için kıl (bristle) direngenliği ve mikroskobik sönümlene değeri belirlenmektedir. z , ortalama kıl(bristle) deplasmanını, σ_0 kılların direngenliğini, v hızı, $g(v)$ Stribeck etkisinin fonksiyonunu, σ_1 mikroskobik sönümlenmeyi, σ_2 viskoz sürtünme katsayısını göstermektedir.

$$\dot{z} = v - \frac{\sigma_0}{g(v)} z|v| \quad (3.10)$$

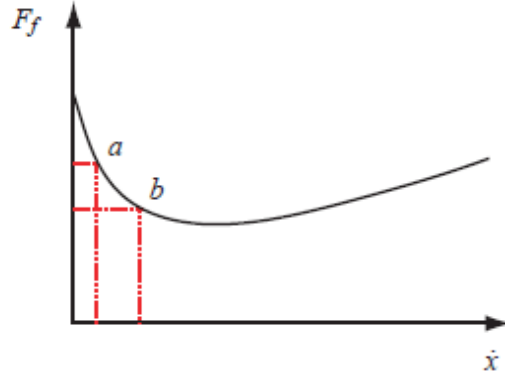
$$g(v) = F_C + (F_S - F_C)e^{-(v/v_s)^2} \quad (3.11)$$

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v \quad (3.12)$$

LuGre modeli sürtünmenin birçok karakterini kapsadığı için servo sistemlerde kullanılmaktadır. Ancak bu model harekete başlamadan önceki durumu modellememektedir.

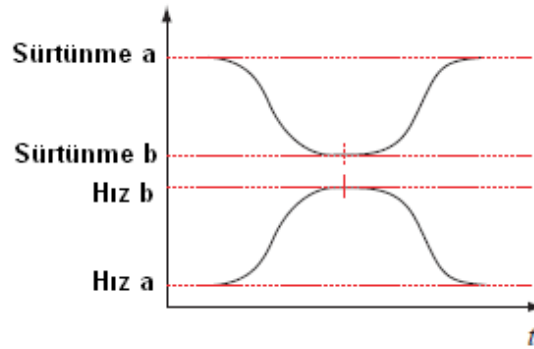
3.3 Sürtünme Gecikmesi

Sisteme uygulanan hızda veya kuvvette değişiklik olduğu durumda sürtünmede bir gecikme olabilmektedir. Bu gecikme sisteme göre milisaniyeler veya saniyeler seviyesinde meydana gelmektedir. Bu gecikmeyi tarif edebilmek için Şekil 3.8’de verilen Stribeck profilindeki a ve b noktaları kullanılacaktır.



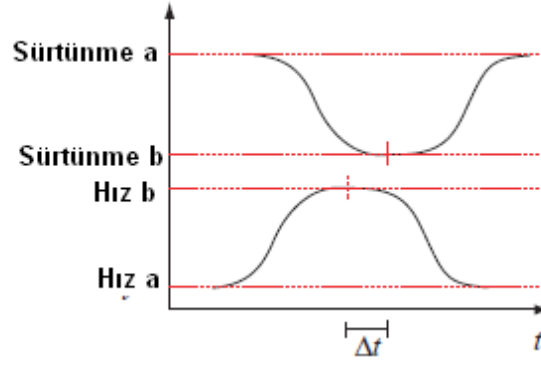
Şekil 3.8. Stribeck Sürtünme Profili [26]

Şekil 3.9’da verilen grafikte sürtünmede gecikme olmadan hızın sürtünmeyle olan ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Sürtünmenin Gecikme Olmadan Gerçekleşmesi [19]

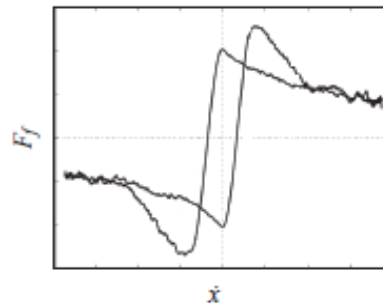
Şekil 3.10'da görüleceği gibi sürtünmede gecikme hız değişiminin olduğu anda gerçekleşmektedir. Bu gecikmenin yeni film kalınlığının oluşması için gereken süre olduğu varsayılmaktadır. Bu film kalınlığı, sistemin hızlanmasıyla birlikte yavaşça artarken sistemin yavaşlamasıyla birlikte hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu sebeple, hızlanma ve yavaşlama sırasında sürtünmede farklı gecikmeler olmaktadır.



Şekil 3.10. Sürtünmede Gecikme Durumu

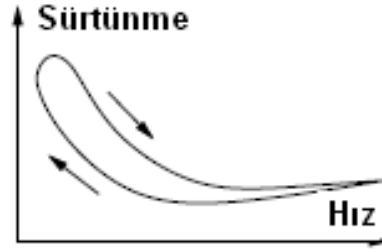
3.4 Sürtünmede Histerezis

Histerezis hıza ve/veya yer değiştirmeye bağlı olarak değişmektedir. Sürtünmede histerezis, sürtünmede gecikmeden ve uygulanan kuvvet ile hıza bağlı olarak film tabakasının değişme hızından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.11. Histerezis Döngüsü [19]

Şekil 3.11’de sürtünme kuvvetinin hıza göre değişimi gösterilmiştir. Bu histerezis döngüsü sistemin özelliklerine göre değişim göstermektedir. Şekil 3.12’de görüldüğü gibi hız değişimi arttıkça histerezis döngüsü büyümektedir.



Şekil 3.12. Sürtünme-Hız Grafığı [17]

4. FARKLI SÜRTÜNME MODELLERİNİN UYGULANMASI

Literatürde birçok sürtünme teorisi ve modeli bulunmaktadır. Ancak bu modellerin hepsini incelemek mümkün olmadığı için en çok bilinen ve kullanılan sürtünme modelleri/teorileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, modeller değerlendirilirken mevcut sistem ile ilgili elde olan verilerin yeterli olacağı sürtünme modelleri seçilmiştir. Çok fazla deneysel veriye ihtiyaç duyulan sürtünme modelleri de değerlendirmeye katılmamıştır. Ancak bu tip sürtünme modelleriyle ilgili bilgi verilmiştir. Ayrıca, histerezis ve sürtünme gecikmesi (“friction lag”) için elde veri olmadığı için bu konular değerlendirilememiştir. Lançer üzerindeki dişli kutularıyla ilgili detay bilgi olmadığı (modül, dişli yarıçapı, diş sayısı, vb) için dişlilere özel sürtünme modelleri yapılamamıştır. Çember dişli ve pinyonun teknik bilgileri olduğu için bu eşleşme modellenip oluşan sürtünme gözlenmiştir.

Lançerde sürtünmeden kaynaklanan kayıpları bulabilmek için benzer geometriye sahip başka bir lançer matematiksel modellenip test verileriyle karşılaştırılmıştır. Gerçek sistemde dönüş ve yükseliş ekseninde aynı anda hareket yapılmadığı için alınan veriler yükseliş olmadığı durumda sadece dönüş eksenine ait verilerdir. Bu sebeple, dönüş eksenindeki veriler için yükseliş ekseni sabitlenmiştir. Dönüş ekseninde ivmelenmeler sırasındaki hareket hariç yük değişmemektedir. Bu sebeple sürtünmenin etkisi incelenebilmektedir. Ancak yükseliş ekseninde dengesizlik momenti çok fazla olduğu için ve yük hareket boyunca değiştiği için farklı sürtünme modellerinin etkisini incelemek pek mümkün olmamaktadır. Sürtünme kuvveti dengesizlik momentinin yarattığı tork ihtiyacına göre önemsiz seviyede kalmaktadır. SimMechanics yazılımı ile sistemin ana parçaları Simscape yazılımı ile tahrik sistemi (dönüş eyleyicisi) modellenmiştir. Sistemden yapması beklenen hareket Simulink yazılımı ile hız verisi olarak verilerek herhangi bir kontrol yapılmamıştır. Bu model taban model olarak kullanılmıştır. Bu modele sürtünme dâhil edilmemiş sadece atalet verileri kullanılmıştır. Buradan elde edilen veriler kullanılarak (kuvvet, hız, konum, vb.) oluşacak sürtünme değerleri hesaplanmıştır.

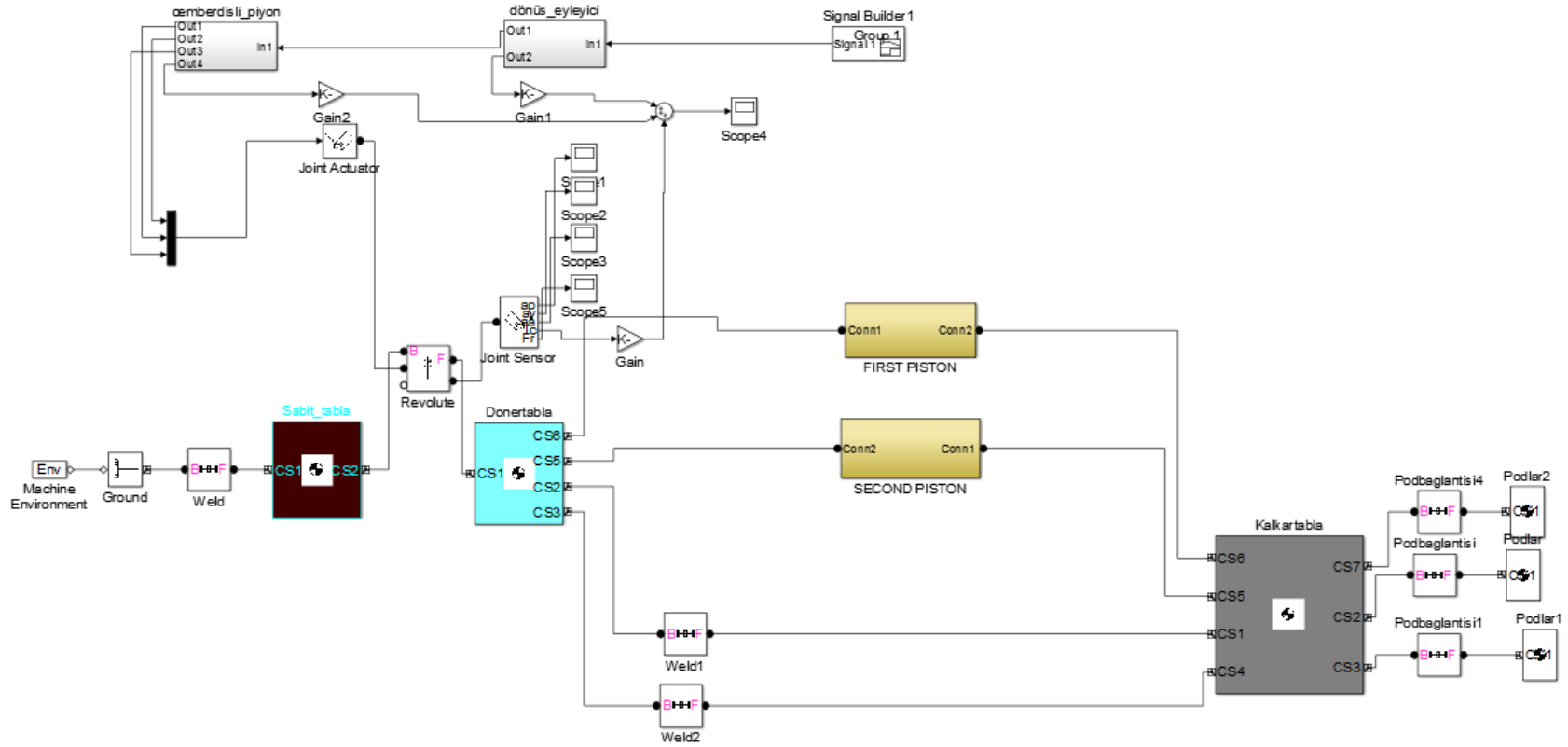
4.1 Dönüş Ekseninin Modellenmesi

Dönüş ekseninde sürtünmenin olduğu noktalar aşağıda verilmiştir:

- Çember dişlinin iç halkası, bilyalar ve dış halkası arasında oluşan sürtünme
- Çember dişli ile pinyon arasındaki sürtünme
- Dönüş eyleyicisindeki dişli kutusundan kaynaklanan sürtünme
- Dönüş freninden kaynaklanan sürtünme

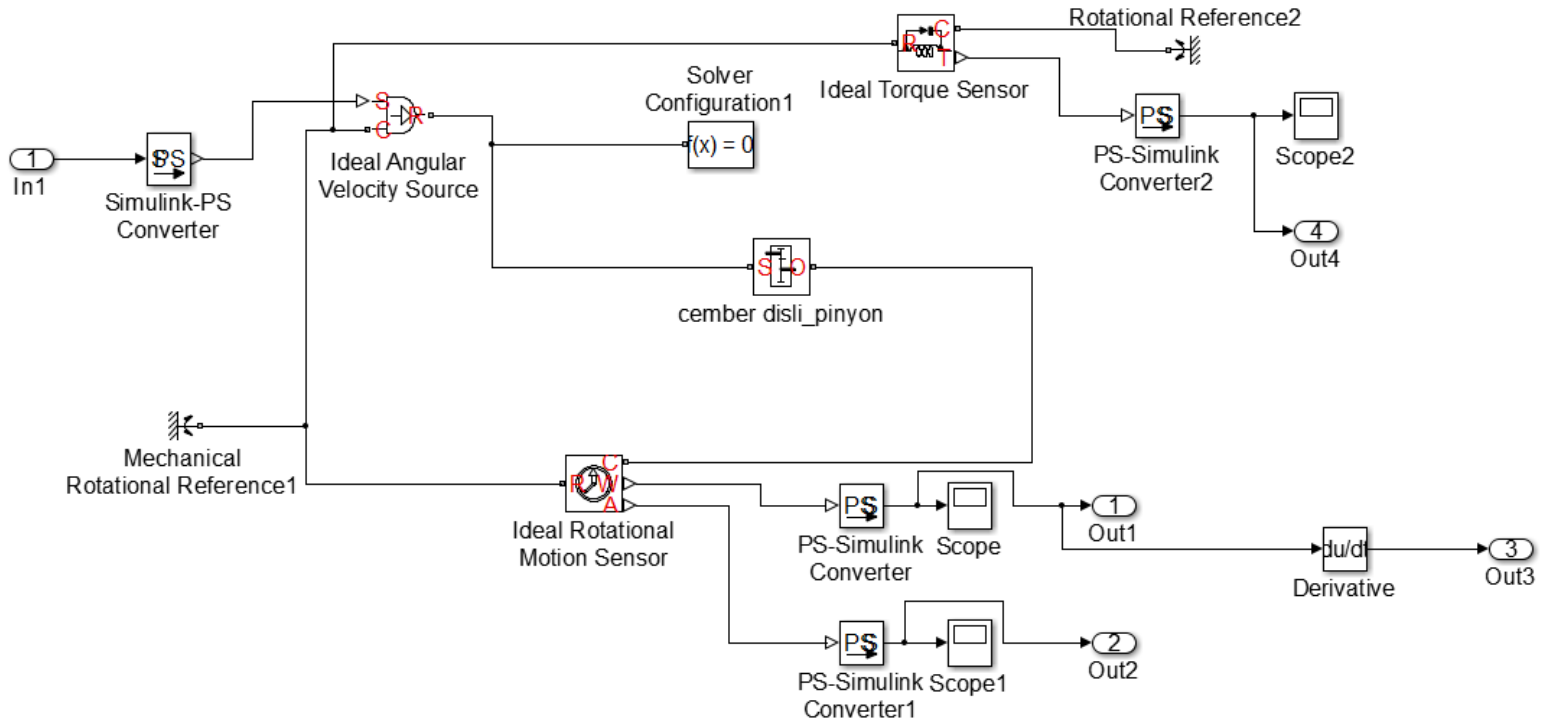
Farklı sürtünme modellerinin yerleştirilebileceği taban lançer modeli Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu modelde roket lançerinin ana parçaları olan sabit tabla, döner tabla, kalkar tabla, podlar ile dönüş ve yükseliş eyleyiciler (“first piston” ve “second piston”) modellenmiştir. Modellemede parçalar arasında şu şekilde eklemler bulunmaktadır:

- Sabit tabla yere sabit bağlantı
- Döner tabla ile sabit tabla arasına dönel (revolute) eklem
- Döner tabla ile kalkar tabla arasına sabit bağlantı (eyleyiciler arasında doğrusal hareket olmasına rağmen sabitlendiği için önemi yoktur)
- Podlar ile kalkar tabla arasına sabit bağlantı

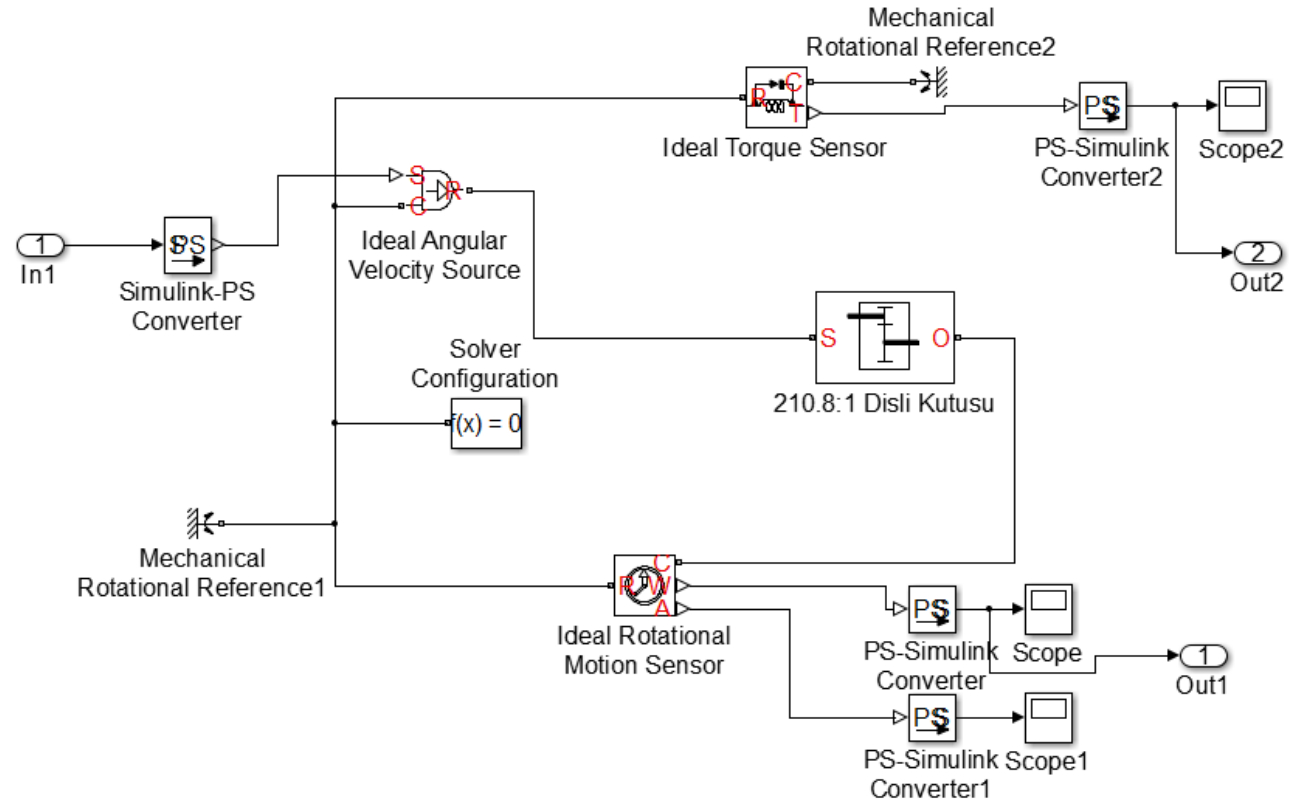


Şekil 4.1. Dönüş Ekseni Taban Modeli

Yukarıda belirtilen sürtünme noktalarından “joint sensor” ile ölçüm yapılarak sürtünmeyi oluşturan hız ve tork/kuvvet değerleri ölçülerek çeşitli sürtünmeler hesaplanmaktadır. Ölçüm yapılan noktalardaki sürtünmeler motora gelene kadar çeşitli aktarma organlarından geçtiği için bu sürtünmeler “gain” ler ile çarpılarak bu oranda arttırılıp/azaltılmaktadır. Çember dişli pinyon eşleşmesi “cemberdisli_pinyon” bloğuyla oluşturulmuştur (Şekil 4.2). Bu modelde ivmelenme için hızın türevi alındığında süreksizliklerden dolayı 10^{-17} sn de gerçekçi değerler çıkmadığı için ivme değeri “Signal Builder” ile verilmiştir. Dönüş eyleyicinin kendi içerisindeki aktarım modeli ise “dönüs_eyleyici” bloğuyla oluşturulmuştur (Şekil 4.3).

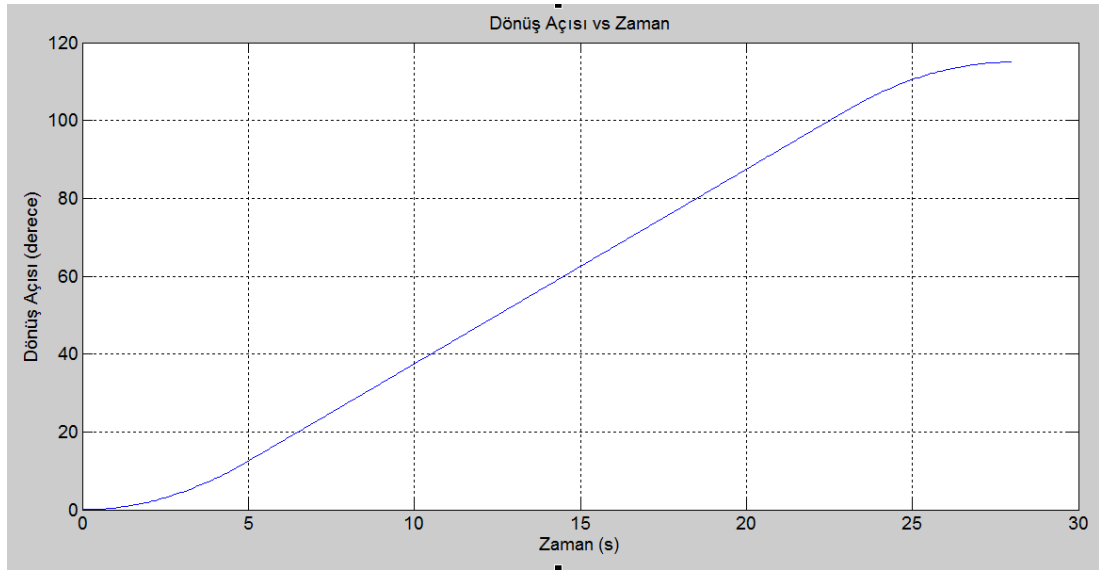


Şekil 4.2. Çember Dişli Pinyon Eşleşmesi

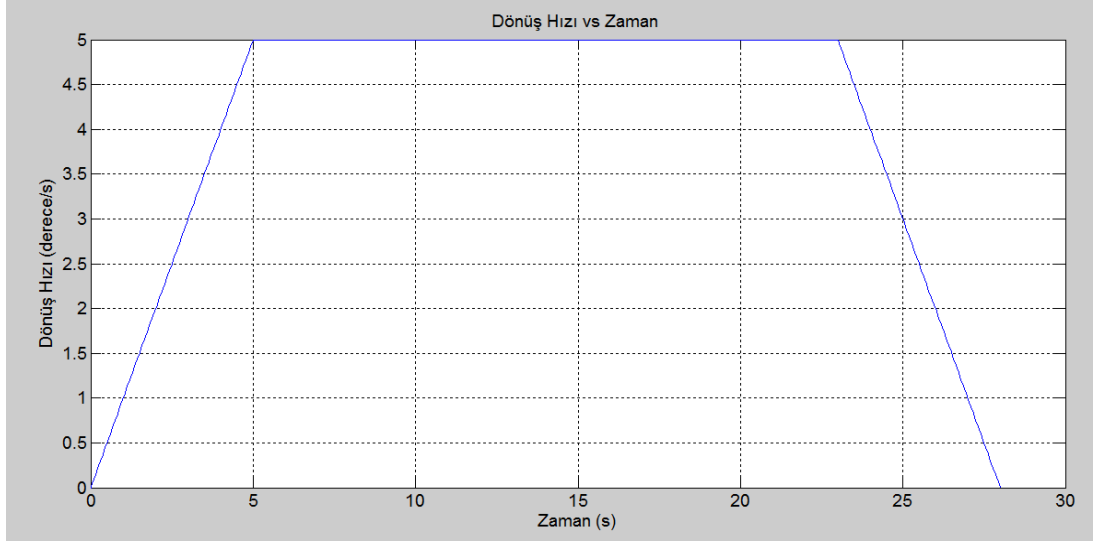


Şekil 4.3. Dönüş Eyleyicisi Modeli

Taban lançer modeli üzerinde kontrol yapılmayıp sadece gerçek sistemde yaptığı hız profili girilerek taban model oluşturulmuştur. Bu hız profili uygulanıp sistemde hiç sürtünme olmadığı varsayılarak ataleti harekete geçirmek için gereken tork hesaplanmaktadır. Bu tork değeri, sürtünme hesaplamalarında ataleti harekete geçirmek için gereken tork miktarına dâhil edilmemiştir. Bu tork miktarı, gerçek sistemden alınan verilerden çıkarılarak sadece sürtünmelerin karşılaştırılması yapılmıştır. Lançerin izlemesi gereken yol ve hız grafikleri ve Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Lançer hareketini 28 sn de tamamlayıp 115° açığa ulaşmaktadır.



Şekil 4.4. Lançer Dönüş Açısı vs Zaman

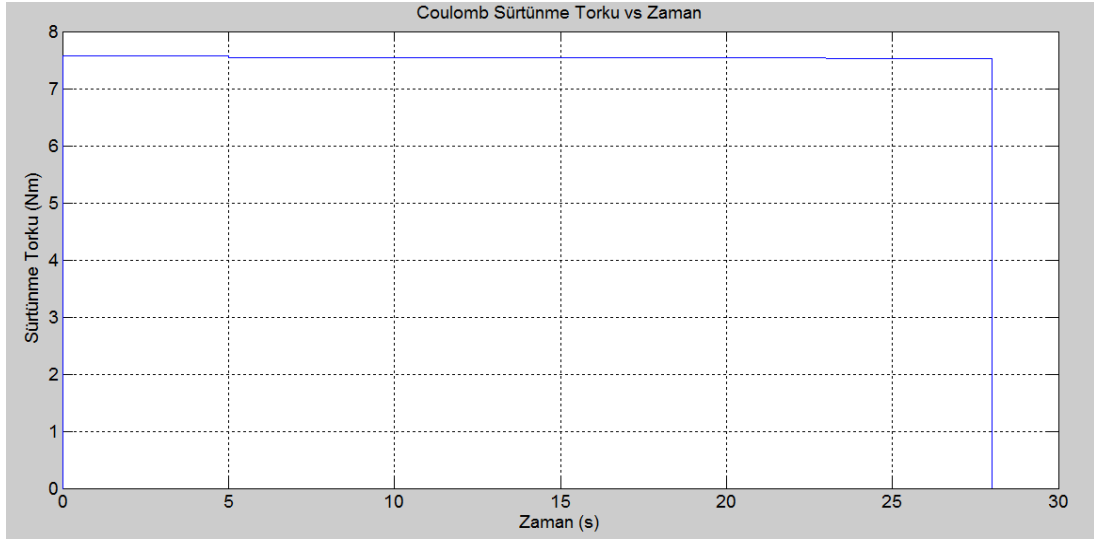


Şekil 4.5. Lançer Dönüş Hızı vs Zaman

Dönüş eksenine çeşitli sürtünme modelleri uygulanırken lançer modeli oluşturulup eklem yerlerinden veri olarak bunları gerekli aktarma oranlarıyla çarparak motora etkileyen sürtünme profili hesaplanmıştır.

4.1.1 Dönüş Eksenine Coulomb Sürtünme Modelinin Uygulanması

Bu sürtünme modelinde çember dişliyi harekete geçirmek için gereken tork değeri eklenmiştir. Bu tork değeri çember dişliye yapılan yük testi sonucu elde edilmiştir. Bu testte çember dişli üzerine lançerin ağırlık ve ağırlık merkezini benzeteabilen yük koyularak çember dişlide oluşan sürtünme değeri ölçülmektedir. Bu test sonucu elde edilen değer 1900 Nm ölçülmüştür. Dönüş freni sisteminden kaynaklanan sürtünme değeri üretici firma tarafından verilmiştir. Bu değerlerin Coulomb sürtünmesinden kaynaklandığı varsayılp modele bu şekilde girilmiştir. Coulomb sürtünme modeline göre gereken motor torkunun zamana göre değişimi Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Coulomb Sürtünme Torkunun Zamana Göre Değişimi

4.1.2 Dönüş Sistemine Coulomb+Viskoz Sürtünme Modelinin Uygulanması

Bu sürtünme modelinde Coulomb sürtünme modelinde hesaplanan sürtünmeye ek olarak viskoz sürtünme de eklenmektedir. Sürtünme modelinde kullanılan katsayılar denenerak test verilerine en yakın sonuç elde edecek şekilde seçilmiştir. Test verileri ile ilgili detaylı bilgi 8.1.2’de verilmiştir. En yakın sonucu elde etmek için kullanılan katsayılar şunlardır:

$$F_v = 0.01 \text{ Nm/(rad/s)}$$

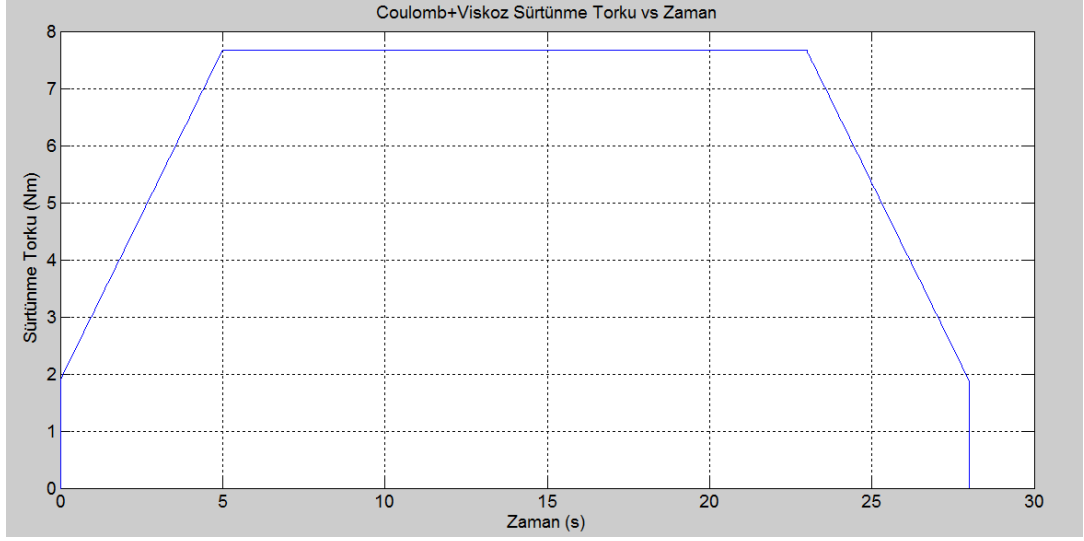
$$\delta_v = 1$$

$$\mu = 0.02$$

Dönüş freni sürtünmesi = 175 Nm

Dişli kutusu sürtünmesi = 0,5 Nm

Elde edilen sürtünmenin zamana göre değişimi Şekil 4.7’de verilmiştir.



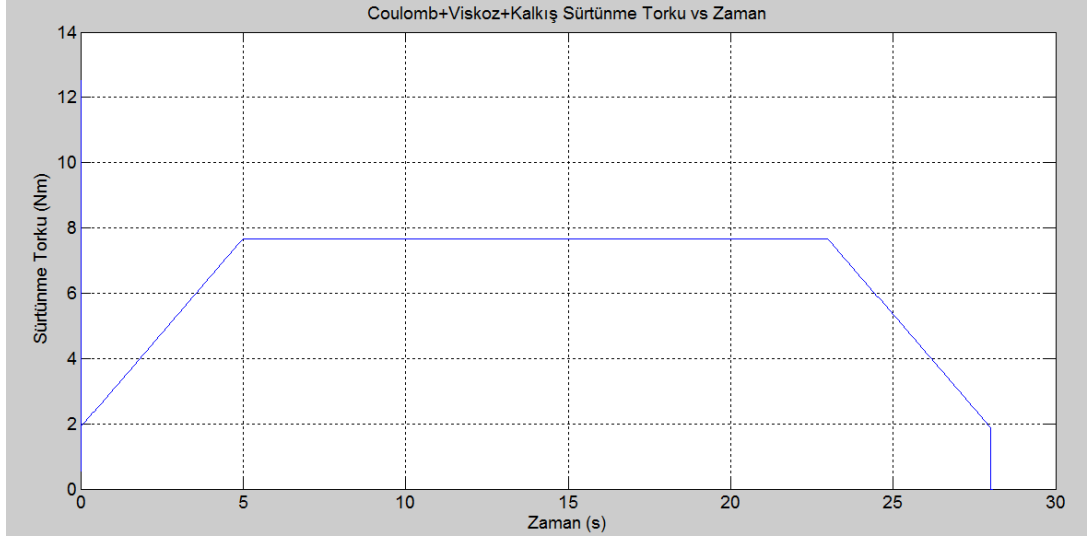
Şekil 4.7. Coulomb+Viskoziteden Kaynaklanan Sürtünmenin Zamana Göre Değişimi

Grafik incelendiğinde hareketin başındaki ve sonundaki dik çıkış ve inişler Coulomb sürtünmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer bölgede ise Coulomb ve Viskoz sürtünmenin toplamından kaynaklanmaktadır.

4.1.3 Dönüş Sistemine Coulomb+Viskoz+Kalkış Sürtünme Modelinin Uygulanması

Bu modelde 4.1.2’de belirtilen modele ek olarak statik sürtünmeyi yenmek için gerekli olan kalkış torku dahil edilmiştir. Bu tork katalog verilerden ve/veya yine katalog verilerindeki formüller [21] kullanılarak ile hesaplanmıştır. Aynı şekilde pinyonun harekete geçmesi için gereken tork değeri üretici firma tarafından verilmiştir. Dönüş eyleyici üzerindeki dişli kutusunun kalkış torku test verilerinden elde edilmiştir. Bu testlerle ilgili detaylı bilgi 8.1.2’de verilmiştir. Diğer değerler Coulomb+Viskoz modelinde kullanılan verilerdir.

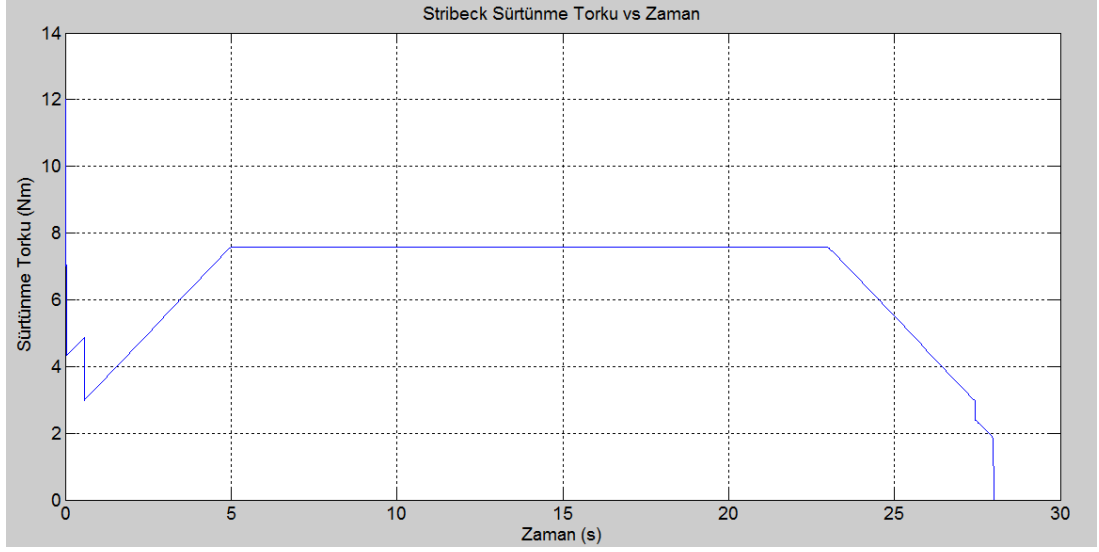
Kalkış sürtünme torku da sistem hareket edene kadar geçerli olduğu için (anlık olduğu için) sabit olarak uygulanmıştır. Bu modelin zamana göre değişimi Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Coulomb+Viskoz+Kalkış Sürtünmesinin Zamana Göre Değişimi

4.1.4 Stribeck Sürtünme Modelinin Uygulanması

Stribeck sürtünme modelinde Coulomb sürtünmesi gerekli olduğu için Coulomb bloğu kullanılmıştır. Coulomb modelinde coulomb+viskoz modelinde kullanılan sürtünme katsayısı kullanılmıştır. Viskoz sürtünme katsayısı ise deneysel olarak 0.009 Nm/(rad/s) olarak belirlenmiştir. v_s stribeck hızı ise literatürden 0.0004 olarak belirlenmiştir. Stribeck sürtünme modeli uygulandığında elde edilen grafik Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Stribeck Modelinin Zamana Bağlı Değişimi

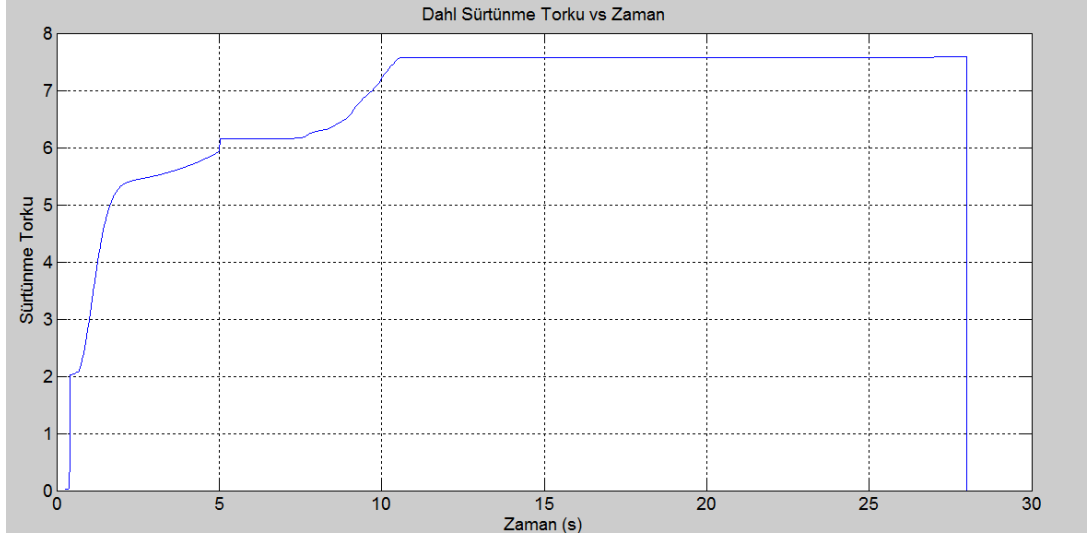
4.1.5 Dahl Sürtünme Modelinin Uygulanması

Dahl sürtünme modelinin uygulanması için Coulomb sürtünme kuvveti gerektiği için Coulomb sürtünme blokları yerleştirilmiştir. Coulomb sürtünme bloğu için

$$\mu = 0.04$$

Dönüş freni sürtünmesi = 700 Nm

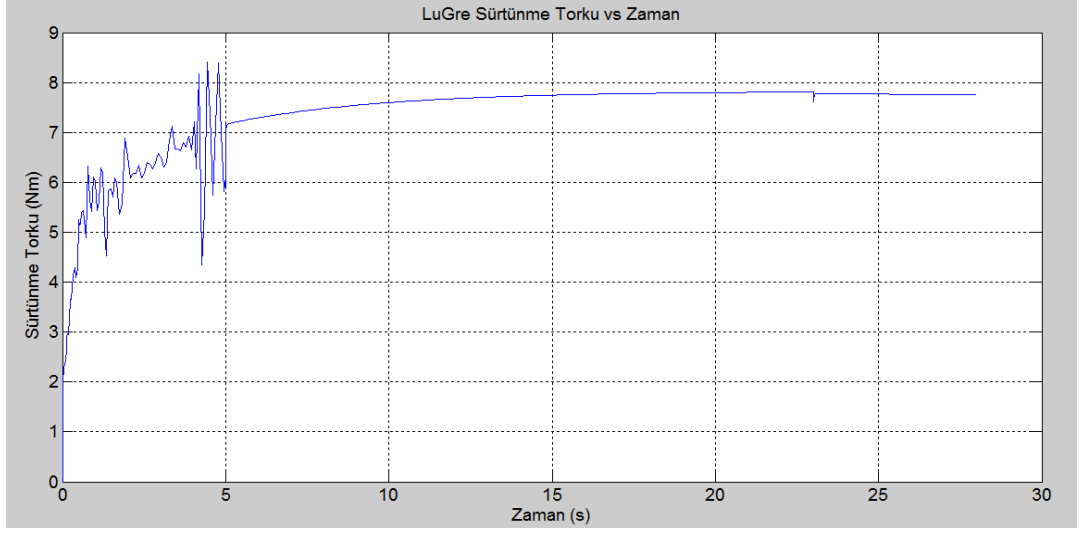
Dişli kutusu sürtünmesi = 2 Nm Coulomb sürtünme torku belirlenmiştir. Dahl sürtünme modelinin Coulomb sürtünme kuvveti girdisine bu değerler koyulmuştur. σ yerine ise sistemin çok katı olduğu varsayılarak çok büyük bir sayı yazılmıştır. Ancak çözümde zorlanıldığı için 10000 değeri ile sınırlandırılmıştır. α değeri genellikle 1 olarak alındığı için burada da 1 olarak kullanılmıştır. Dahl modelinde doyma noktaları koyulmuştur. Çünkü Dahl sürtünme değeri Coulomb sürtünmesinin üzerine çıkamamaktadır. Dahl sürtünme modeli uygulandığında elde edilen sürtünme grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Dahl Sürtünme Modelinin Zamana Göre Değişimi

4.1.6 Bristle (Kıl) Tipi Sürtünme Modellerinin Uygulanması

Brsitle ile Bliman ve Sorine sürtünme modelleri için mikroskobik seviye çalışma yapılması gerekmektedir. Test yaparak da bir profil çıkarılabilir ancak çok doğru olmayacaktır. Bu modellerin doğru bir MATLAB modelini oluşturmak mümkün değildir. Ancak bu modellere benzeyen LuGre sürtünme modeli diğerlerinden farklı olarak ortalama değer kullandığı için bu sürtünme modellenmiştir. Sürtünmeler sonucu elde edilen grafik Şekil 4.11’de verilmiştir.

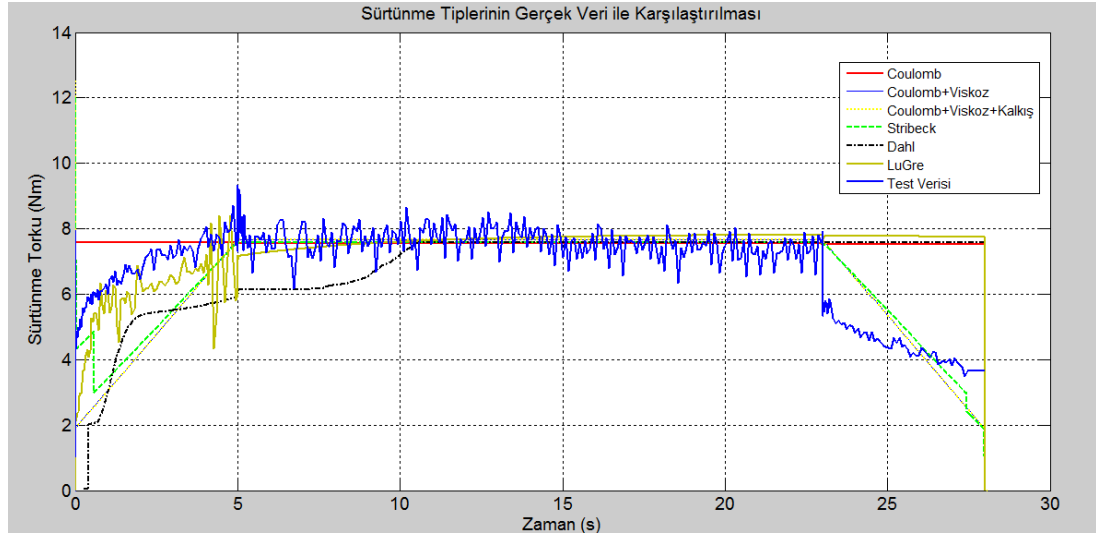


Şekil 4.11. LuGre Sürtünme Modelinin Zaman Göre Değişimi

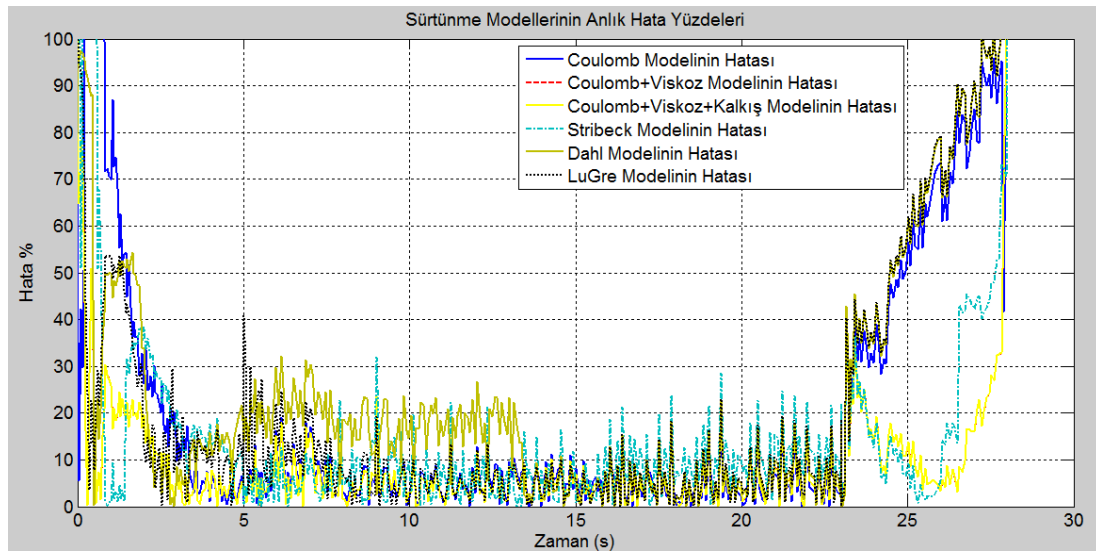
4.1.7 Uygun Sürtünme Modelinin Belirlenmesi

Bu çalışma öncesinde Coulomb sürtünme modelinde olduğu gibi tek katsayıya bağlı bir sürtünme modellenmekteydi. Gereken tork değeri sabit bir katsayı ile çarpılarak hesaplanmaktaydı. Bu çalışma kapsamında gerçek verilerle örtüşen sürtünme modellerinin oluşturulabildiği görülmüştür. Şekil 4.12’de farklı sürtünme modellerinin izlediği yol gösterilmiştir.

a)



b)



Şekil 4.12. a) Farklı Sürtünme Modellerinin Karşılaştırılması b) Sürtünme Modellerinin Hata Yüzdeleri

Şekil 4.12.a'da görülebileceği gibi gerçek sistemde ilk kalkış anında bir tork artışı vardır. Daha sonra bu değer düşüp sabit hıza ulaşana kadar tekrar artmaktadır. Sabit hız boyunca tork değişmemektedir. Hareketin son kısmında sistem yavaşladığı sırada sürtünme torku da azalmaktadır. İlk kalkış anında gereken tork hareketi Coulomb+Viskoz+Kalkış ile Stribeck sürtünme modelleri tarafından yakalanmıştır.

İvmelendiği kısımda Coulomb hariç diğer bütün modeller benzer eğilime sahiptir. Son kısımda sistemin yavaşladığı süreçte Coulomb, Dahl ve LuGre hariç diğer sürtünme modelleri bu kısımda benzer bir davranış sergilemektedir. Bu durumda Coulomb+Viskoz+Kalkış ve Stribeck modelleri hareketin tamamında benzer davranışı yakalamaktadır.

Sürtünme modelleri ile test verisi arasındaki hata yüzdesi Şekil 4.12.b'de verilmiştir. Hareketin başındaki kalkış torqları Coulomb+Viskoz+Kalkış ile Stribeck modellerinde yüksek olduğu için hareketin başında hata değeri yüksek çıkmaktadır. Bu şekilde hatalar görüntülendiğinde hareketin geri kalanı net bir şekilde takip edilememektedir. Bu sebeple Şekil 4.12.b'de hata oranı üst limiti 100 ile sınırlandırılmıştır.

Bu çalışma yapılana kadar basit bir model olan Coulomb modeli kullanılmıştır. Bu sebeple Coulomb modeli referans alınarak diğer modellerin IAE (Integral Absolute Error) ile ITAE (Integral Time-weighted Absolute Error) hesaplamaları yapılmış olup Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Sürtünme Modellerinin Coulomb Modeline Göre Hata Seviyesi

	Coulomb+Viskoz	Coulomb+Viskoz+Kalkış	Stribeck	Dahl	LuGre
IAE	0,50	0,50	0,82	1,01	1,04
ITAE	0,40	0,40	0,67	1,12	1,12

Bu tabloya göre en uygun sürtünme modeli Coulomb+Viskoz veya Coulomb+Viskoz+Kalkış sürtünme modeli olmaktadır. Şekil 4.12'de viskoz+coulomb ile viskoz+coulomb+kalkış modeli çakışmaktadır. Şekil 4.12 incelendiğinde, Coulomb+Viskoz sürtünme modeli hareketin başındaki kalkış

torkunu yakalayamamaktadır. Coulomb+Viskoz+Kalkış sürtünme modelinde ise bu kalkış torku gerçek değerden daha fazla olmasına rağmen modellenmektedir. Bu tip sistemlerde ilk kalkış anındaki tork ihtiyacı motorlar için kritik olduğu için güvenli tarafta kalmak için Coulomb+Viskoz+Kalkış sürtünme modelinin kullanılması uygun olacaktır. Dönüş eksenindeki harekette kullanılan makine elemanları ve sistem mimarisi çok benzer olduğu için yükseliş ekseninde de aynı sürtünme modelinin kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Yükseliş ekseninde, yükseliş açısına göre etkiyen yk değişmektedir. Bu noktadan sonra Coulomb+Viskoz+Kalkış sürtünme modeli lançer modeline dahil edilecektir. Modellemeye geçmeden önce hangi modelleme yazılımının daha uygun olduğuna karar verilecektir.

5. LANÇER MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Modelleme çalışmaları kapsamında öncelikle hiçbir modelde motor ve sürücü dahil edilmemiştir. Çünkü motor ve sürücüyü sisteme katmak modeli daha da karmaşık hale getirmektedir. Öncelikle mekanik modellemenin yapılarak modelin hangi yöntemle yapılacağına karar verilerek daha sonra kontrolünün yapılması değerlendirilmiştir.

Lançerin modellenmesi için üç farklı yöntem kullanılmıştır:

- Analitik hesaplamalar yapılarak denklemler çıkarılıp Simulink blokları kullanılarak modelleme,
- Simmechanics ve Simscape programı kullanılarak mekanik parçaların modellemesi ve kinematiğinin oluşturulması,
- ADAMS programında ana mekanik parçaların modellenmesi ve bağlantı noktalarının oluşturulması ve tahrik sisteminin Simulink ile modellenmesi

Analitik hesaplamalar yaparak Simulink blokları ile modeli oluşturmak için çok fazla blok gerektiği için modeli karmaşık hale getirmektedir. Karmaşıklık seviyesi arttıkça kontrol etmek daha zor olmaktadır. Bu modellemede herhangi bir animasyon oluşmamaktadır. Bunun için ayrıca çalışma yapılması gerekmektedir. Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında modellenmesi gereken en önemli noktalardan biri de yükseliş eksenindeki rejeneratif enerjinin modellenmesidir. Yükseliş ekseninde yukarıdan aşağıya hareket ederken motor üzerinde rejeneratif enerji oluşmaktadır. Bu modelleme yönteminde rejeneratif enerjiyi modellemek için iki ayrı model oluşturulması gerekmektedir.

Simmechanics ve Simscape programlarını kullanarak modelleme yapıldığında ana mekanik parçaların fiziksel özellikleri ve bağlantı noktaları bloğa girilmektedir. Simscape programında tahrik sistemi modellenmektedir. Simscape ve Simmechanics programları arasında geçişi sağlayan elemanlar bulunmaktadır. Bu modellemede bu

geçişini sağlayan elemanların kullanımında yazılımsal problemler olmaktadır. Ayrıca, bağlantı noktalarının konumları girilirken hata olduğunda ve eklemlerin tanımları doğru yapılmadığında düzeltmek zor olmaktadır. Parçalar arası bağlantı yapılırken boşluk kaldığında süreksizliğe sebep olarak model çözülememektedir. Bu modelleme yöntemi görsel açıdan bir animasyon oluşturmaktadır. Ayrıca, bu modelde rejeneratif enerji için tek bir model yeterlidir.

ADAMS ve Simulink programları kullanılarak yapılan modellemede ana parçalar katı modelden doğrudan alınabildiği gibi ayrıca ADAMS programında da fiziksel özellikler tanımlanabilmektedir. Bu modelde tahrik sistemi Simulink programı ile modellenmiştir. Çünkü sürtünme verilerini Simulink programında modellemek ADAMS programına göre daha kolaydır. Simmechanics+Simmechanics modelinde olduğu gibi bu modellemede de animasyon oluşturulmakta ve yine bu modelde rejeneratif enerji modellenabilmektedir.

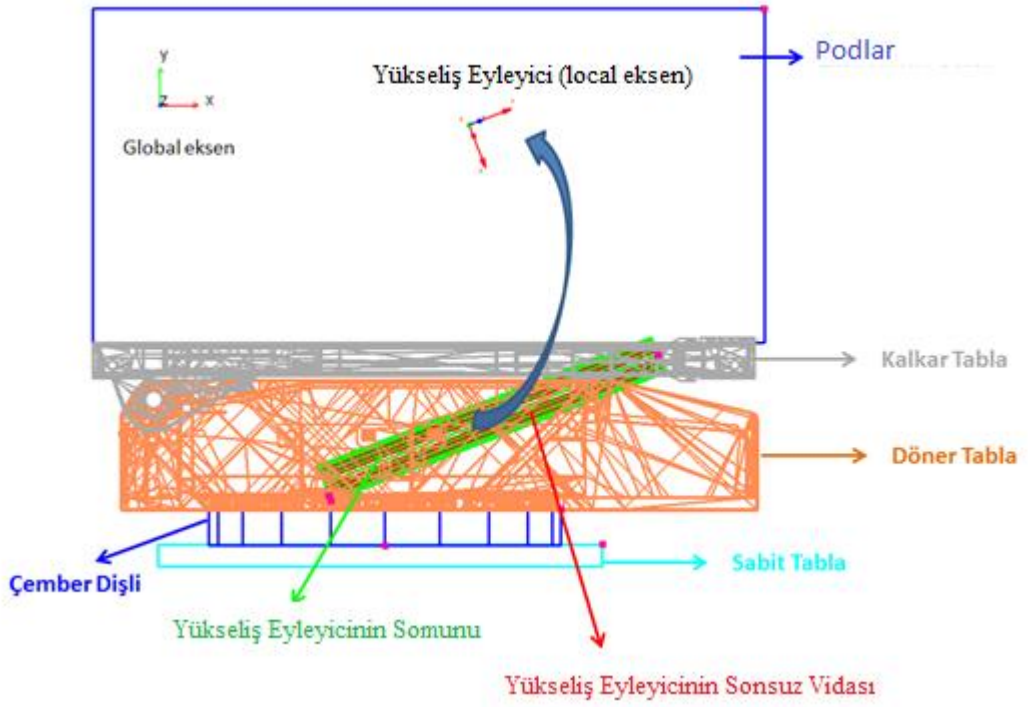
Modelleme kolaylığı, en az hata ile modelleme, görsellik ve model karmaşıklığı açısından değerlendirildiğinde en iyi modelleme yönteminin ADAMS+Simulink programlarıyla modellemek olduğu belirlenmiştir.

6. ADAMS+SİMULİNK İLE MODELLEME

Lançer modeli ADAMS (ADAMS view, ADAMS-Control) ve MATLAB-Simulink programlarıyla oluşturulmuştur. Lançerin modellenmesi iki ayrı modelin ayrı ayrı oluşturularak daha sonra bu modellerin birleştirilmesiyle elde edilmiştir. İlk olarak lançer aktarma oranları olmadan kinematik olarak ADAMS programında modellenmiş ve modele herhangi bir sürtünme ilave edilmemiştir. İkinci olarak aktarma oranları ve sürtünmeler MATLAB-Simulink programında modellenmiştir. Daha sonra ise bu iki model birleştirilerek kundağın tüm modeli MATLAB-Simulink programı altında oluşturulmuştur. İki ayrı modelin detayları aşağıda anlatılmıştır.

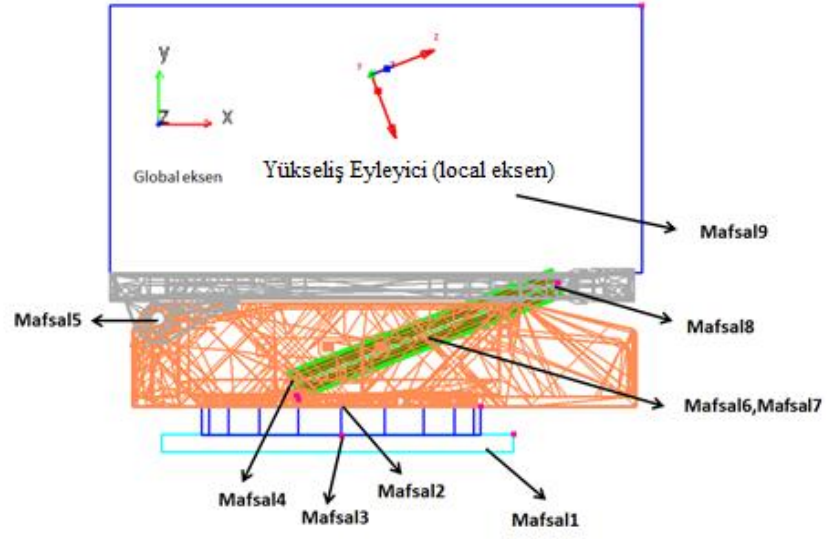
6.1 Lançerin Kinematik Olarak ADAMS Programında Modellenmesi

Modelin bu kısmında sürtünmeler önemsenmeden sistemin ana karakteristiğini belirleyen kısımlar modellenmiştir. Döner tabla ve kalkar tablanın katı modeli ADAMS programına yüklenerek model oluşturulmuştur. Analizi daha hızlı koşturmak ve ADAMS programının zorlanmasını önleyip daha doğru sonuçlar almak için sistemin kinematiğini belirleyen kalkar ve döner tabla haricindeki diğer parçalar (pod, eyleyiciler, çember dişli ve sabit tabla) ADAMS programında modellenip sisteme bağlanmıştır. Modelde kullanılan parçaların adları Şekil 6.1'de verilmiştir. Ayrıca modele iki adet dolu podun bilgileri eklenmiştir. Tüm benzetimler bu podlar yüklüken yapılmıştır.



Şekil 6.1. ADAMS’da Modellenen Parçalar

Parçaların kütleleri, dönme ataletleri, ağırlık merkezlerinin konumları katı model referans alınarak modele eklenmiş olup bağlantı elemanları ADAMS programında denk gelen mafsallarla modellenmiştir. Kullanılan mafsalların türleri, adetleri, hangi ekseninde çalıştıkları ve hangi parçalar arasındaki bağlantıyı sağladıkları hakkında görseller Şekil 6.2, detaylı bilgiler ise Çizelge 6.1’de verilmiştir.

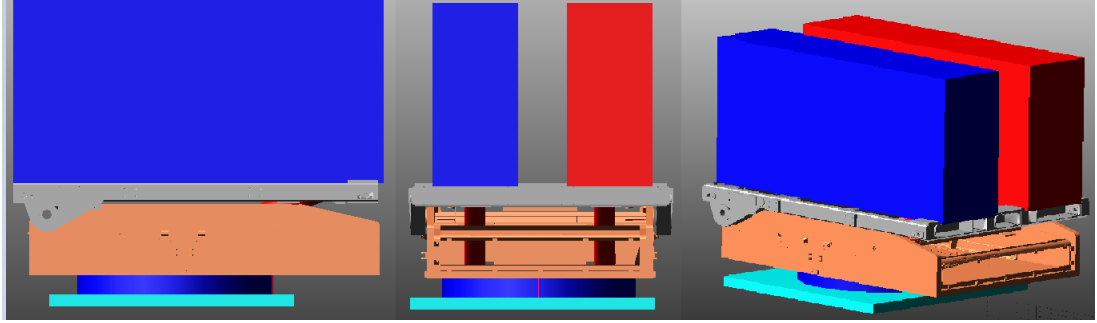


Şekil 6.2: Modellemede Kullanılan Bağlantı Elemanlarının Numaralandırılması

Çizelge 6.1. Modellemede Kullanılan Mafsal Türleri ve Adetleri

Mafsal Numarası	Mafsal Türü	Kullanım Adedi	Hareket(dönme) Ekseni	Bağlantısını Yaptığı Parçalar	
Mafsal1	Sabit mafsal	1	Yok	Sabit Tabla	Yer
Mafsal2	Sabit mafsal	1	Yok	Çember dişli	Döner Tabla
Mafsal3	Tek eksende dönen mafsal	1	Global y ekseni	Çember dişli	Sabit Tabla
Mafsal4	Tek eksende dönen mafsal	2	Global z ekseni	Yükseliş eyleyicinin somunu	Döner Tabla
Mafsal5	Tek eksende dönen mafsal	1	Global z ekseni	Kalkar Tabla	Döner Tabla
Mafsal6	Silindirik Mafsal	2	Yükseliş Eyleyici z ekseni	Yükseliş eyleyicinin somunu	Yükseliş eyleyicinin vidası
Mafsal7	Vidalı Mafsal	2	Yükseliş Eyleyici z ekseni	Yükseliş eyleyicinin somunu	Yükseliş eyleyicinin vidası
Mafsal8	Küresel mafsal	2	Yükseliş Eyleyici z ekseni	Yükseliş eyleyicinin vidası	Kalkar Tabla
Mafsal9	Sabit mafsal	2	Yok	Kalkar Tabla	Podlar

Lançerin ADAMS modeli Şekil 6.3'deki gibidir.

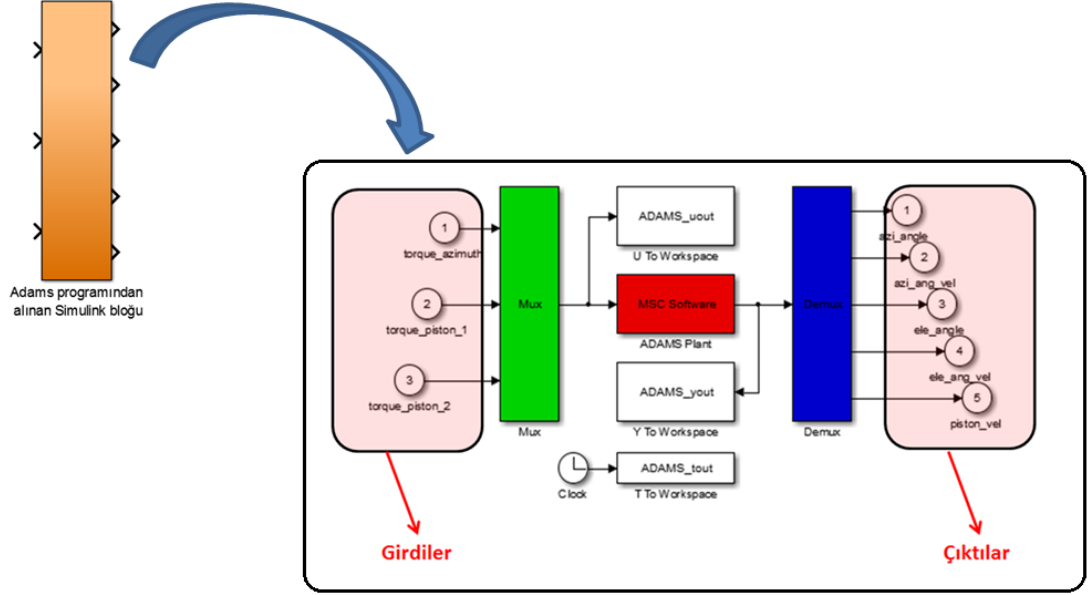


Şekil 6.3. Lançer ADAMS Modeli

Lançer hareketi yükseliş ve dönüş olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

- Dönüş hareketi, dişli kutularından geçerek çember dişliye bağlanan dönüş motoru yardımıyla gerçekleşmektedir. Fakat ADAMS modelinde dişli kutuları modellenmemiştir. Dişli kutuları ikinci model olan MATLAB-Simulink programında modellenmiştir. Dolayısıyla modellemede dönüş hareketi, çember dişli ve sabit tabla arasında bulunan döner mafsaldan (Çizelge 6.1, Mafsal3) tork girdisi verilerek sağlanmaktadır.
- Yükseliş hareketi ise dişli kutularından geçerek yükseliş eyleyiciye bağlanan yükseliş motoru yardımıyla gerçekleşmektedir. Fakat ADAMS modelinde dönüş ekseninde olduğu gibi bu ekseninde de dişli kutuları modellenmemiştir. Dişli kutuları ADAMS programında modellenmemesinin nedeni statik ve dinamik sürtünmelerin MATLAB-Simulink programında daha kolay modellenebilmesidir. Dolayısıyla modellemede yükseliş hareketi, yükseliş eyleyicinin somun kısımları ile vida kısımları arasında tanımlanan silindirik mafsallara (Çizelge 6.1, Mafsal6) verilen tork girdileriyle gerçekleşmektedir. Verilen tork girdisine göre yükseliş eyleyicinin vida dönmeye başlayacaktır. Dönen parça ise tanımlı olan yükseliş eyleyicinin vida adımı kadar ilerleyecektir. Böylece kalkar tabla yükselmeye başlayacaktır.

Tüm bu modeller tamamlandıktan sonra sistemin girdi ve çıktıları belirlenip, sistemin MATLAB-Simulink bloğu ADAMS-Control yardımıyla alınır (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. Modellenen Sistemin Simulink Bloğu [Girdiler ve Çıktılar]

Lançerin, ADAMS Control kullanılarak alınan MATLAB-Simulink bloğunun 3 girdisi ve 5 çıktısı bulunmaktadır.

Girdiler :

- 1.yükseliş eyleyici vida tork girişi (torque_piston_1)
- 2.yükseliş eyleyici vida tork girişi (torque_piston_2)
- Dönüş eksenini çember dişli tork girişi (torque_azimuth)

Yükseliş eyleyicilere tanımlı olan silindirik mafsallara (Çizelge 6.1, Mafsal6) ve 3 numaralı mafsala (Çizelge 6.1, Mafsal3) birer adet tork girdisi tanımlanmıştır.

Çıktılar :

- Kalkar tabla yükseliş açısı (ele_angle)
- Kalkar tabla yükseliş açısal hız (ele_ang_vel)
- Döner tabla dönüş açısı (azi_angle)
- Döner tabla dönüş açısal hız (azi_ang_vel)
- Yükseliş eyleyici açısal hız (piston_vel)

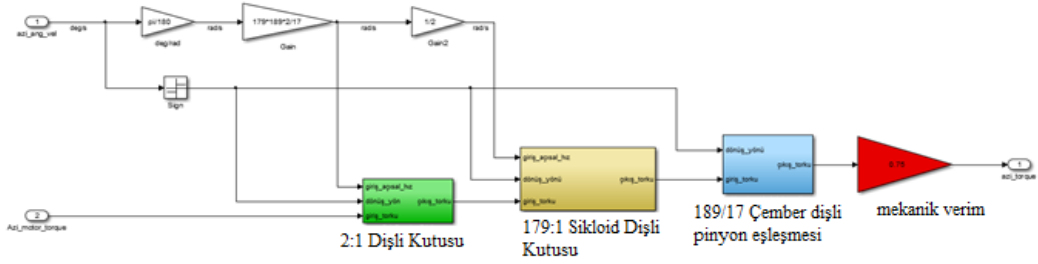
Kalkar tablanın yükseliş açısı ve yükseliş açısal hızı 5 numaralı mafsala (Çizelge 6.1, Mafsal5) yerleştirilen ADAMS algılayıcısından okunmaktadır. Aynı şekilde döner tablanın dönüş açısı ve dönüş açısal hızı 3 numaralı mafsala (Çizelge 6.1,Mafsal3) yerleştirilen ADAMS algılayıcısından okunmaktadır. Yükseliş eyleyici açısal hızı ise yükseliş eyleyicilere tanımlı olan silindirik mafsallardan (Çizelge 6.1,Mafsal6) okunmaktadır.

6.2 Aktarma Oranlarının ve Sürtünmelerin Simulink Programında Modellenmesi

Sürtünmeleri MATLAB-Simulink programında modellemek ADAMS programına göre daha kolaydır. Çünkü ADAMS programı yüklerin (sürtünme vs.) sinyallerle verilmesine Simulink kadar esneklik tanımamaktadır. Dolayısıyla dişli kutuları ve ilgili dişli kutusuna ait kalkış torku ve dinamik sürtünme katsayıları MATLAB-Simulink programında modellenmiştir.

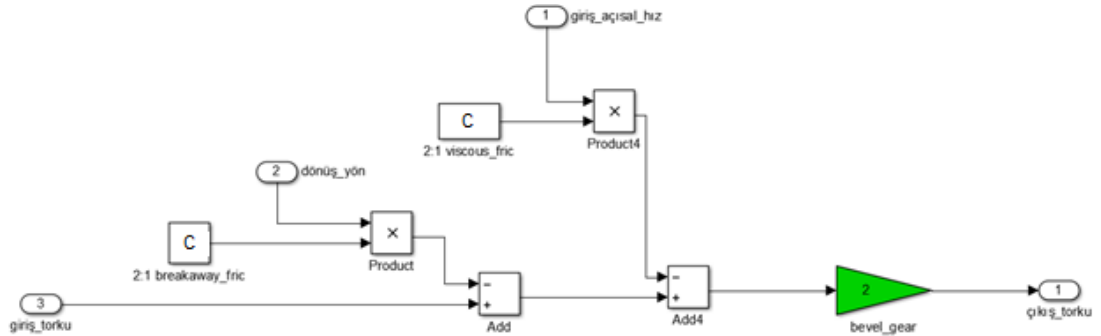
6.2.1 Dönüş Ekseni Modeli

Dönüş ekseninde dişli kutuları, çember-pinyon dişli eşleşmesi Simulink programında Şekil 6.5'teki gibi modellenmiştir. Motor çıkış torku bahsedilen aktarma oranlarından ve sürtünmelerden geçip Şekil 6.4'deki ADAMS programından alınan Simulink bloğu girdisi olan "Dönüş eksen çember dişli tork girişi" ne bağlanır. Dönüş ekseninde kullanılan dişli kutularının statik ve dinamik sürtünme değerleri ise ilgili bloklara girilmiştir.



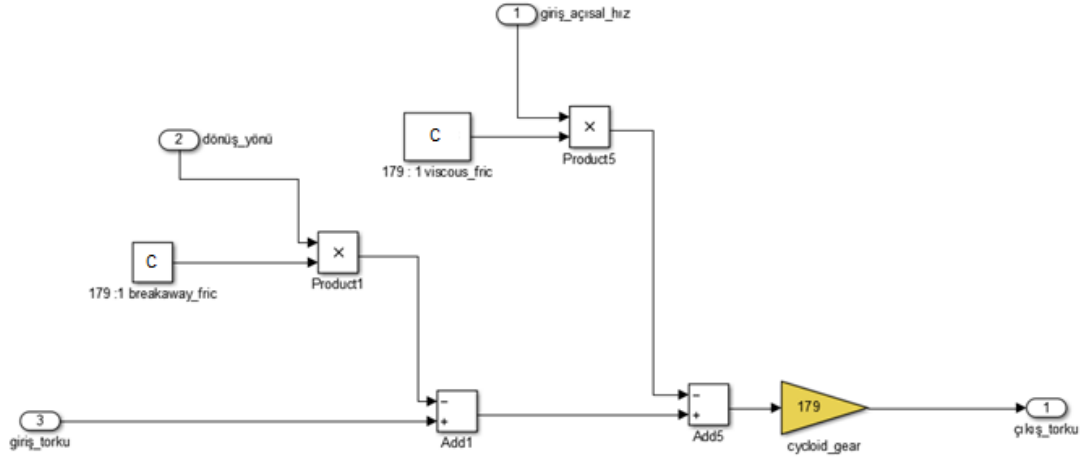
Şekil 6.5. Dönüş Eksenindeki Aktarımların Modeli

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi kalkış sürtünme torku hareket yönüne (\pm) göre, viskoz sürtünme torku ise dönüş hızı oranında sisteme etki etmektedir.



Şekil 6.6. Konik Dişli Kutusunun Modellenmesi

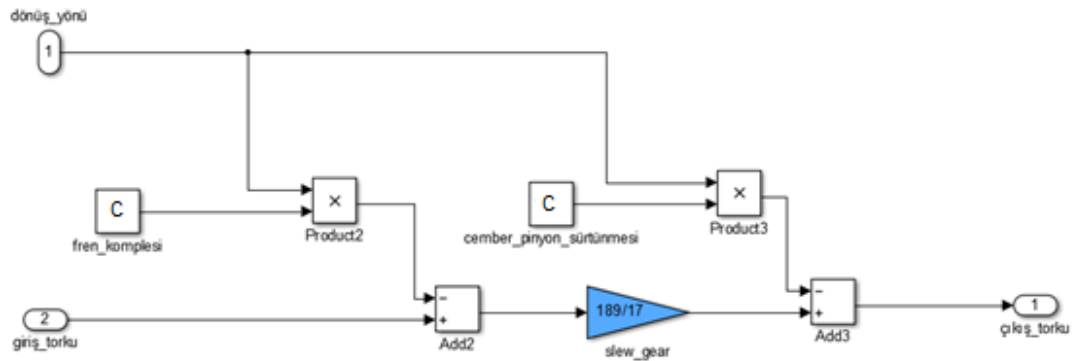
Şekil 6.7'de sikloid dişli kutusunun modellenmesi verilmiştir.



Şekil 6.7. Sikloid Dişli Kutusunun Modellenmesi

Dönüş freninden kaynaklanan statik sürtünme torku çember-pinyon dişli eşleşmesinden geçmeden sadece dişli kutularından geçerek dönüş motoruna etki etmektedir ve bu yüzden modelde pinyondan önce bağlanmıştır.

Çember dişli - pinyon eşleşmesi arasındaki temas dolayısıyla oluşan sürtünme ise tüm dişli kutularından geçerek motora ulaşır. Bu yüzden bu sürtünme torku çember dişli - pinyon dişli eşleşmesinden sonra bağlanmıştır (Şekil 6.8).

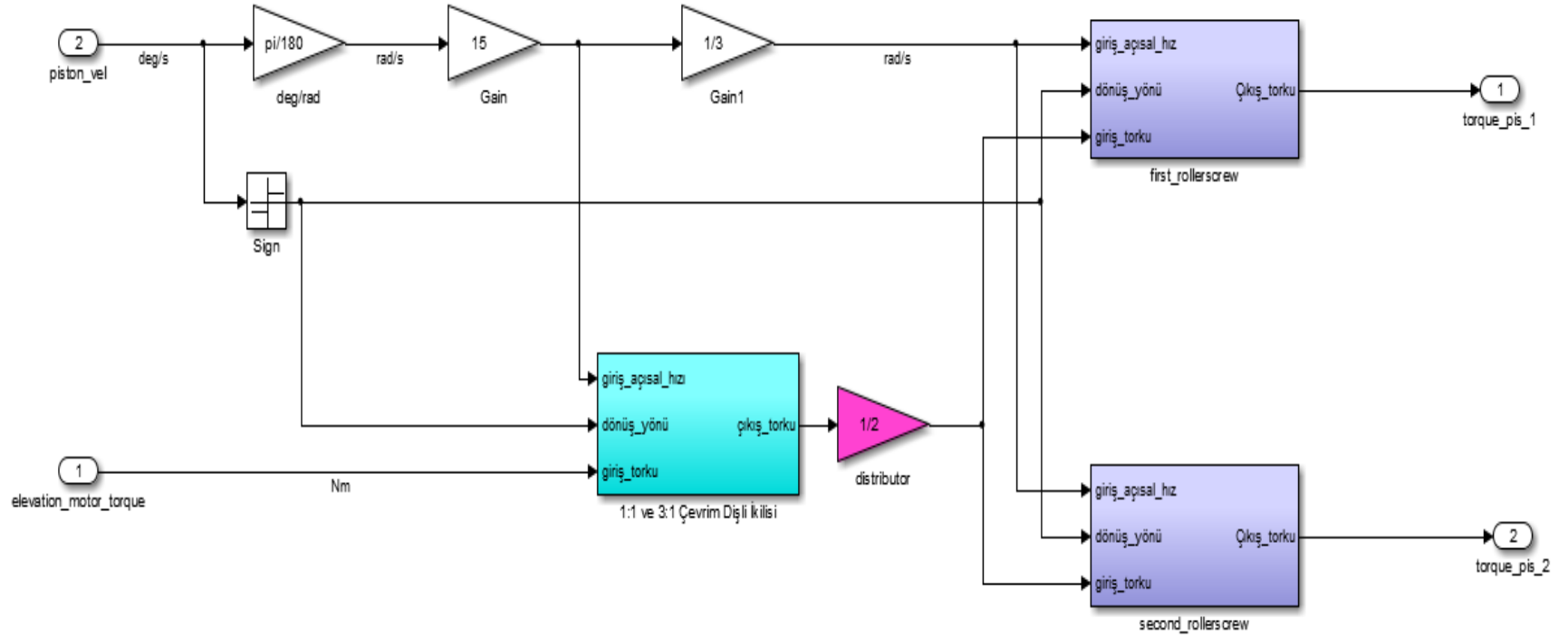


Şekil 6.8. Çember-Pinyon Dişli Eşleşmesinin ve Fren Kompleksinin Modellenmesi

6.2.2 Yükseliş Ekseni Modeli

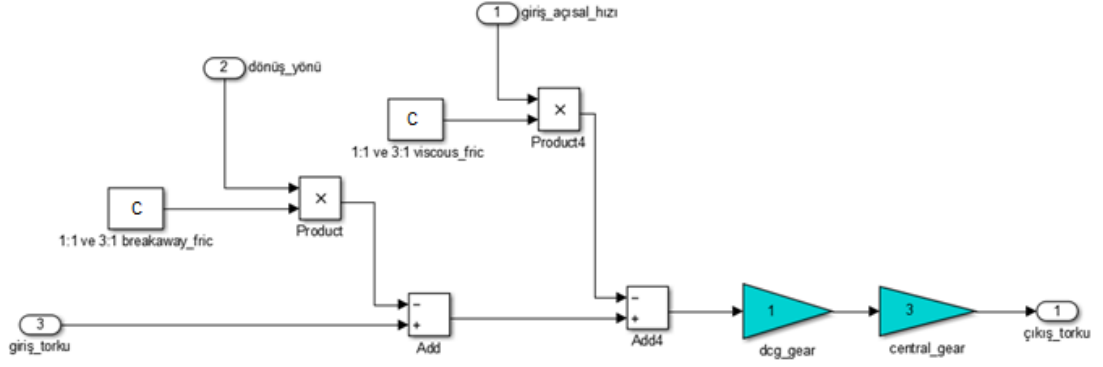
Yükseliş eksenindeki dişli kutuları ve yükseliş eyleyiciler MATLAB-Simulink programında

Şekil 6.9'daki gibi modellenmiştir. Yükseliş motorunun çıkış torku belirtilen aktarma oranlarından ve sürtünmelerden geçip daha sonra iki eşit parçaya bölünerek her iki yükseliş eyleyici tork girişine bağlanmaktadır. Bunun için Şekil 6.4'teki ADAMS programından alınan Simulink bloğu girdileri olan "1.Yükseliş eyleyici tork girişi" (torque_piston_1)ve "2.Yükseliş eyleyici tork girişi"ne (torque_piston_2) bağlanmıştır. Yükseliş ekseninde kullanılan dişli kutularının ve yükseliş eyleyicilerin kalkış torkları ve dinamik sürtünme katsayıları aşağıdaki gibi bloklara girilmiştir.



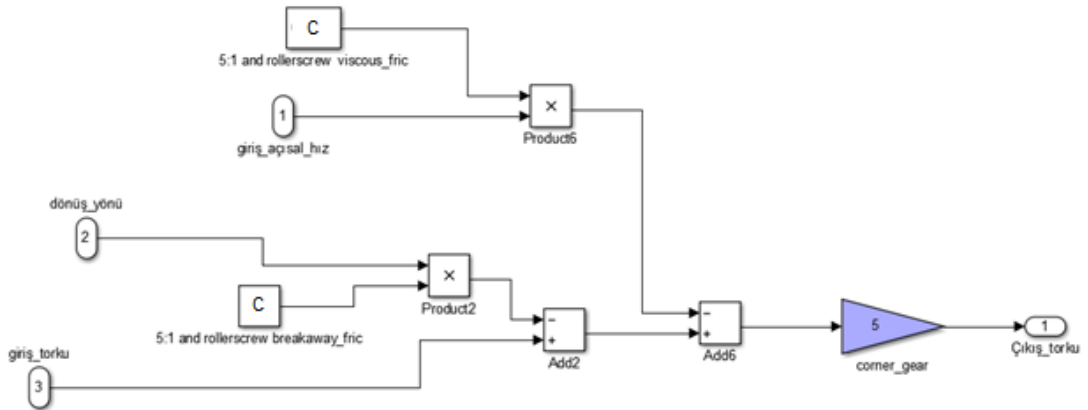
Şekil 6.9. Yükseliş Eksenindeki Dişli Kutularının Modeli

Şekil 6.10'da görüldüğü gibi kalkış sürtünme torku hareket yönüne (\pm) göre, viskoz sürtünme torku ise dönüş hızı oranında sisteme etki etmektedir.



Şekil 6.10. Merkez Dişli Kutusu Modeli

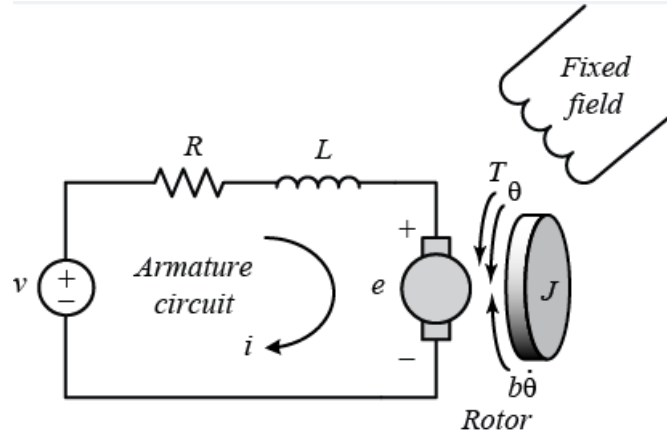
Köşe dişli kutusunun ve yükseliş eyleyicisinin beraber modellenmesinin nedeni, gerçek zamanlı testler yapılırken bu bileşenlerin birlikte edilmesindedir.



Şekil 6.11. Köşe Dişli Kutusunun ve Yükseliş Eyleyicisindeki Sürtünmelerin Modellenmesi

6.3 Simulink ile Elektrik Motoru Modellenmesi

Dönüş ve yükseliş mekanizmalarına tahrik vermek için Doğru Akım (DC) Motoru kullanılmaktadır. Yükseliş mekanizmasında motordaki dönme hareketi bilyalı vida sayesinde doğrusal harekete dönüşürken dönüş ekseninde dönme hareketi olarak kalmaktadır. Şekil 6.12’de DC motor devresi ve rotorun serbest cisim diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.12. DC Motor Devresi ve Şeması[20]

Motorda hız kontrolü yapılacağı için giriş olarak voltaj kaynağı çıkış olarak ise motor mili hızı olacaktır. Modelde rotor ve mil rijit olarak varsayılmıştır. Viskoz sürtünme modeli referans alındığı için motor milinin hızı arttıkça sürtünme kuvveti de artacaktır. Motor modeli oluşturulurken manyetik alanın sabit olduğu bu sebeple elde edilen tork değerinin verilen armatür akımıyla doğru orantılı olduğu varsayılmıştır. Geri elektromotor kuvvet (back emf) değeri mil hızıyla doğru orantılıdır. Newton’un 2. kanunuyla Kirchhoff voltaj kanunu kullanılarak motor için 6.1 ve 6.2’deki gibi bir sistem denklemleri yazılmıştır.

$$V_m = (R \cdot I) + (L \cdot \frac{dI}{dt}) + (K_e \cdot \frac{d\theta_m}{dt}) \quad (6.1)$$

$$T_m = (K_t \cdot I) = (J_m \cdot \frac{d^2\theta_m}{dt^2}) + (K_{dv} \cdot \frac{d\theta_m}{dt}) + (T_s) \quad (6.2)$$

Denklem 6.1 ve 6.2'de verilen değişkenlerin çoğu motor kataloglarında verilmektedir. Bu denklemleri tamamlamak için motor açısal hızı, motor ivmesi ve yükten gelen tork değerine ihtiyaç vardır. 6.1 denklemin laplasının (laplace) alınması sonucu;

$$V_m(s) = R \cdot I(s) + L \cdot I(s) \cdot s$$

$$\frac{I(s)}{V_m(s)} = \frac{1}{L \cdot s + R} \quad (6.3)$$

elde edilir. 6.2 denklemin laplasının (laplace) alınması sonucu;

$$T_m(s) = K_t \cdot I(s)$$

$$\frac{T_m(s)}{I(s)} = K_t \quad (6.4)$$

olarak hesaplanır. 6.2 denkleminde sistemden gelen tork değeri çıkarılarak sadece motor düşünülerek laplasının (laplace) alınması durumunda;

$$T_m(s) = J_m \cdot \frac{d\theta}{dt_m}(s) \cdot s + K_{dv} \cdot \frac{d\theta}{dt_m}(s)$$

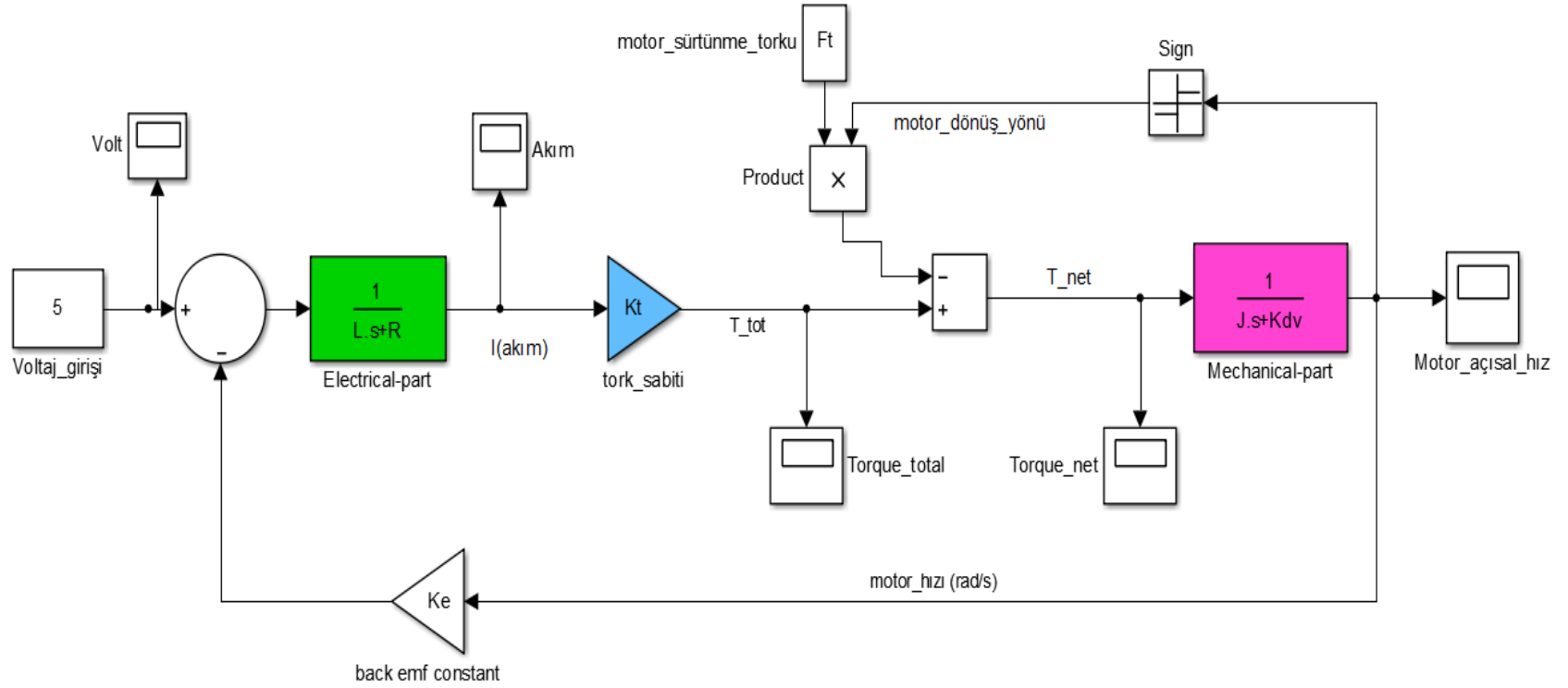
$$\frac{\frac{d\theta}{dt_m}(s)}{T_m(s)} = \frac{1}{J_m \cdot s + K_{dv}} \quad (6.5)$$

elde edilir.

6.3, 6.4 ve 6.5 te belirtilen transfer fonksiyonları çarpıldığında 6.6 daki gibi girdisi voltaj, çıktısı ise motor açısal hızı olan bir transfer fonksiyonu elde edilir.

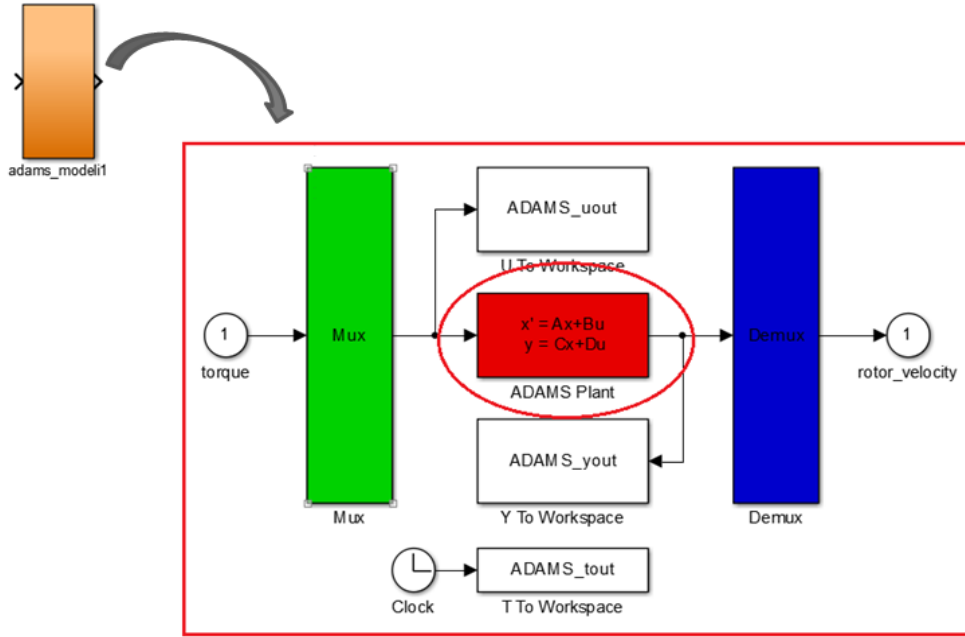
$$\frac{\frac{d\theta}{dt}_m(s)}{V_m(s)} = \frac{1}{L \cdot s + R} \cdot K_t \cdot \frac{1}{J_m \cdot s + K_{dv}} \quad (6.6)$$

DC servo motor hem elektriksel hem de mekanik olarak Simulink programında yukarıda bulunan transfer fonksiyonları kullanılarak Şekil 6.13'teki gibi modellenmiştir.



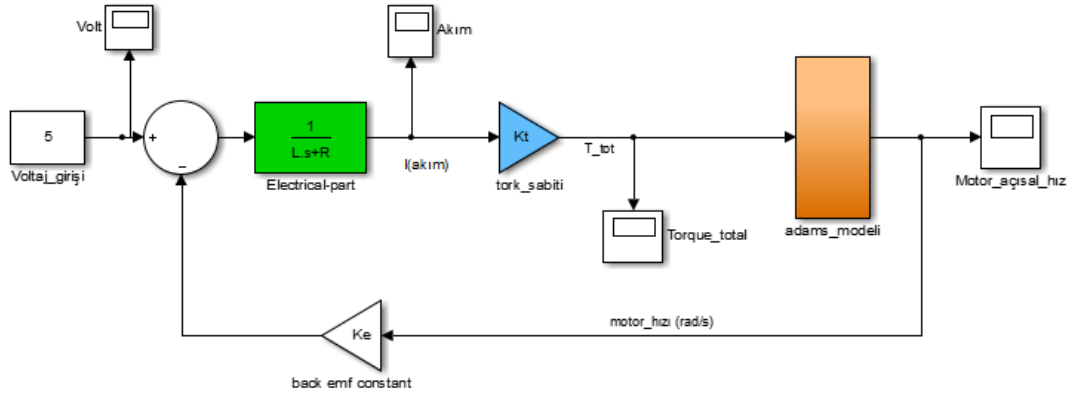
Şekil 6.13. DC Servo Motorun Simulink Programında Modellenmesi

Bunun haricinde ayrıca motorun mekanik kısmı (rotor, yük dönme ataleti, sürtünme torku, viskoz sürtünme kuvveti) ADAMS programında modellenip daha sonra ADAMS Control kullanılarak alınan doğrusal Simulink bloğu (Şekil 6.14) eklenerek oluşturulan motor modeli Şekil 6.15'teki gibidir.



Şekil 6.14. ADAMS Control Kullanılarak Alınan Motorun Simulink Bloğu

ADAMS programında modellenen motorun doğrusal Simulink bloğu Şekil 6.14'teki gibidir. Bu bloğun içerisinde görüldüğü gibi durum-uzay bloğu [A, B, C ve D matrisleri] bulunmaktadır. ADAMS programından motorun doğrusal Simulink bloğu alınmıştır.



Şekil 6.15. DC Servo Motorun Simulink ve ADAMS Programlarında Modellenmesi

7. ADAMS ve SIMULINK PROGRAMLARI İLE LANÇER KONTROLÜ

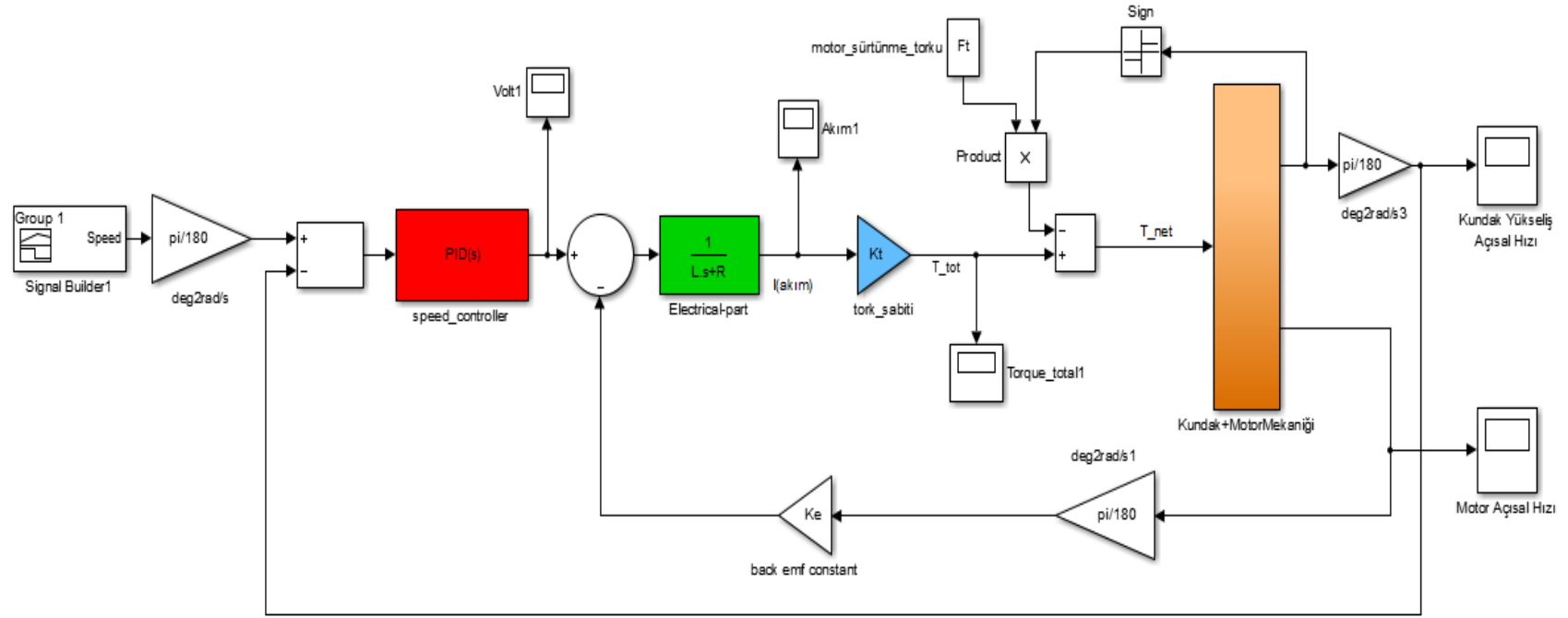
ADAMS programında modellenen lançer modeline, ADAMS programında modellenen motorun mekanik aksamı (şaft, motor dönme ataleti, viskoz sürtünme katsayısı) eklenerek model oluşturulmuştur.

7.1 Yükseliş Ekseni

Modellenen yükseliş mekanizmasına, motorun ADAMS programında modellenen mekanik aksamı yine ADAMS programında bağlanmıştır. Motor bağlanarak oluşturulan kundağın ADAMS modelinin ADAMS Control yardımıyla doğrusal ve doğrusal olmayan (nonlinear) Simulink blokları alınmıştır. Doğrusal bloğun alınma sebebi kontrolcü parametrelerinin bulunabilmesi ve en iyilenmesi için (PID-Tune) blokların doğrusal olması gereksinimidir. Doğrusal blok kullanılarak bulunan kontrolcü parametreleri daha sonra doğrusal olmayan blok üzerinde denenip kabul edilebilir seviyede hata ile doğrulanmıştır.

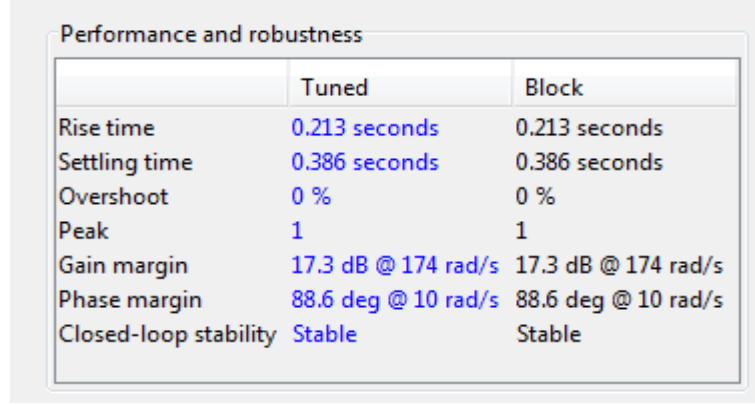
7.1.1 Yükseliş Ekseni Hız Kontrolü

Motorun mekanik kısmını ifade eden transfer fonksiyonun çıkarılarak yerine ADAMS programından alınan, lançer ve motorun mekanik kısmını simgeleyen Simulink bloğunu eklenerek oluşturulan lançer hız kontrolü modeli Şekil 7.1'deki gibidir.



Şekil 7.1. Lançer Hız Kontrolü Modeli [Yükseliş Ekseni]

Eklenen PID kontrolcü bloğunun "tune" özelliği kullanılarak Şekil 7.2'de verilen performans ve gürbüzlüğün sağlandığı (bu değerler rastgele belirlenmiştir) kontrolcü parametreleri Şekil 7.3'de verilmiştir. (Doğrusal blok kullanılarak kontrolcü katsayıları bulunmuştur)



	Tuned	Block
Rise time	0.213 seconds	0.213 seconds
Settling time	0.386 seconds	0.386 seconds
Overshoot	0 %	0 %
Peak	1	1
Gain margin	17.3 dB @ 174 rad/s	17.3 dB @ 174 rad/s
Phase margin	88.6 deg @ 10 rad/s	88.6 deg @ 10 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

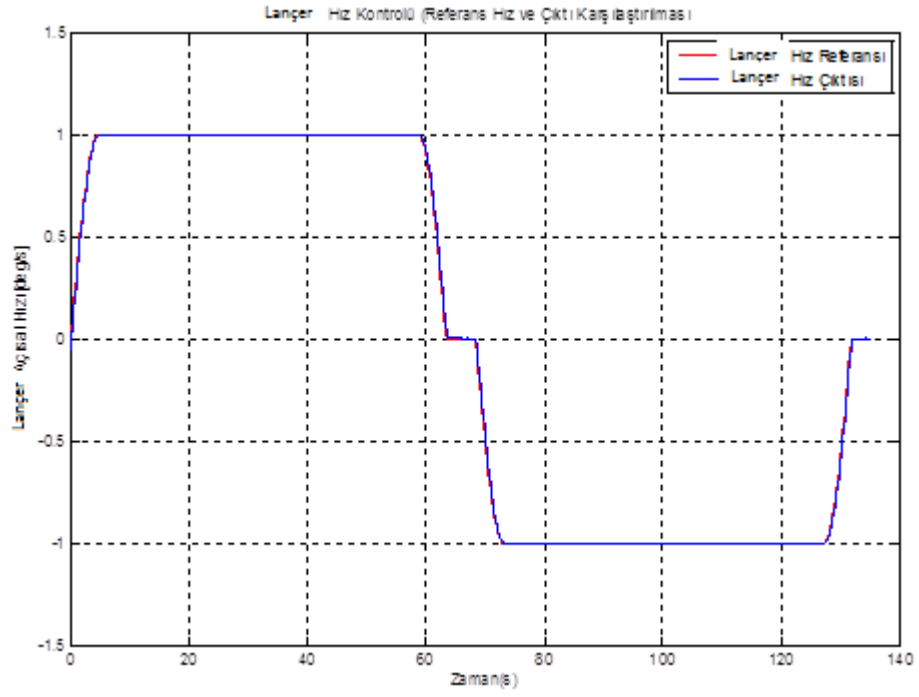
Şekil 7.2. Kontrolcü Performansı ve Gürbüzlüğü



Controller parameters	
Proportional (P):	0
Integral (I):	76488
Derivative (D):	0
Filter coefficient (N):	100

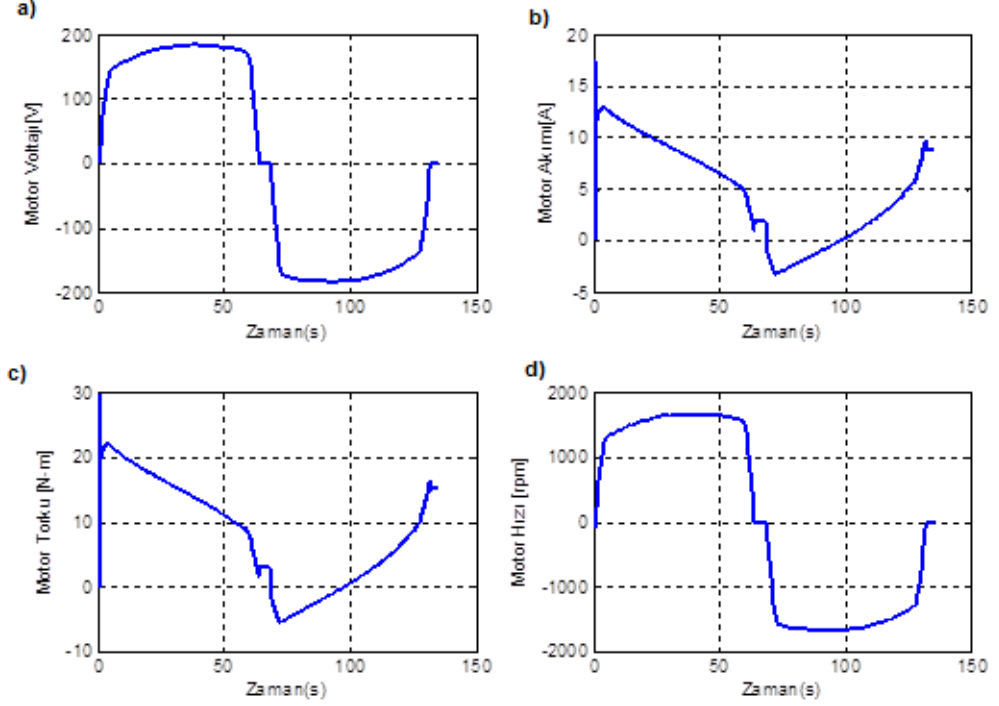
Şekil 7.3. Kontrolcü Parametreleri [Lançer Hız Kontrolü İçin]

Şekil 7.3'deki kontrolcü parametreleri kullanılarak lançer hız kontrolü sağlanmıştır. Verilen hız referansına kontrolcünün tepkisi Şekil 7.4'teki gibidir. Hız referansı ile, kontrolcünün verdiği hız tepkisinin kabul edilebilir seviyede bir hata ile örtüştüğü görülmektedir. Yükseliş eksenindeki tüm bu hareketler gerçekleşirken yan eksen hareketin olmadığı varsayılmıştır. Ayrıca lançer yüklükten benzetim oluşturulmuştur.



Şekil 7.4. Lançer Hız Kontrolü [Yükseliş Ekseni]

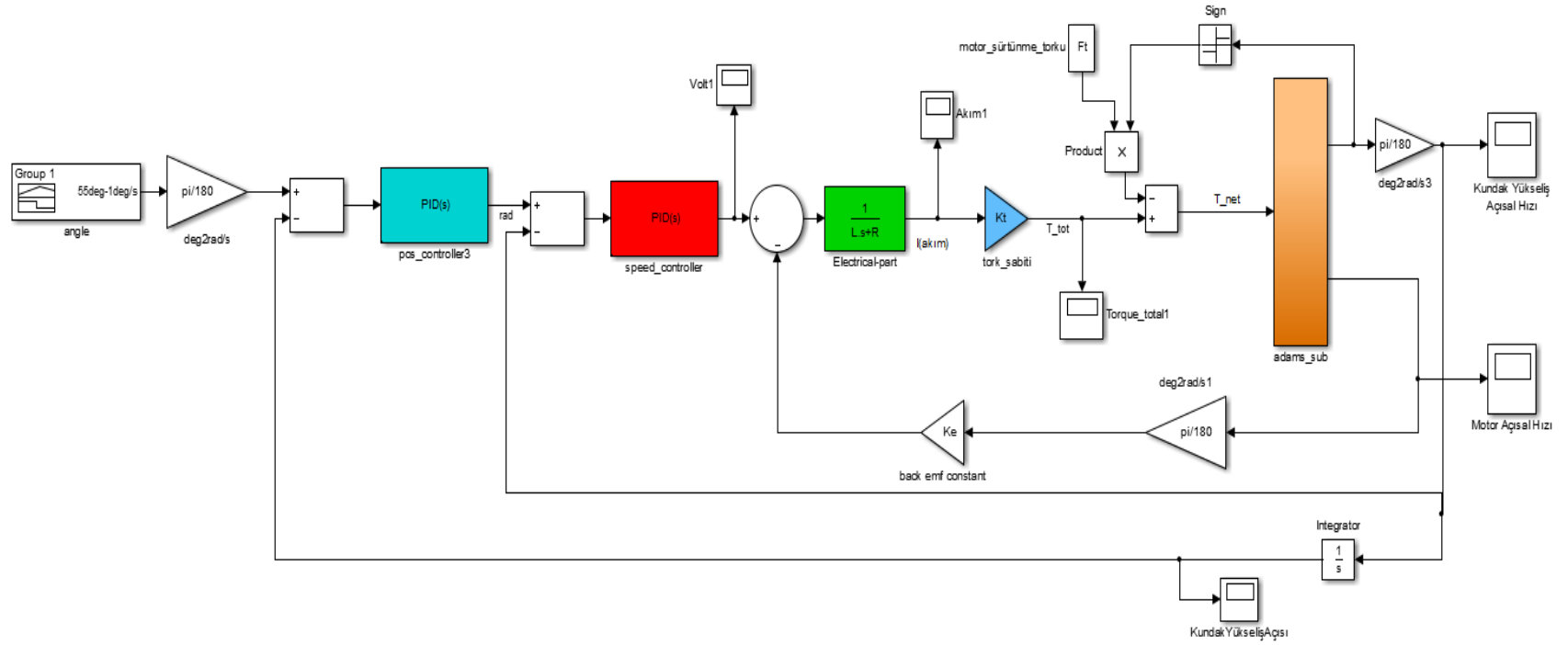
Bu koşulda motorun voltaj, akım, tork ve hız değişimi Şekil 7.5'teki gibidir.



Şekil 7.5. Motorun Zamana Bağlı a) Voltaj, b) Akım, c) Tork ve d) Hız Değişimleri

7.1.2 Yükseliş Ekseni Konum Kontrolü

Şekil 7.1'deki lançer hız kontrolü modeline pozisyon kontrolcüsü ve pozisyon geri bildirimini eklenerek Şekil 7.6'daki gibi pozisyon kontrolü modeli elde edilmiştir.



Şekil 7.6. Lançer Pozisyon Kontrolü Modeli [Yükseliş Ekseni]

Eklenen PID kontrolcü bloğunun "tune" özelliği kullanılarak Şekil 7.7'te verilen performans ve gürbüzlüğün sağlandığı (bu değerler rastgele belirlenmiştir) kontrolcü parametreleri Şekil 7.8'te verilmiştir.

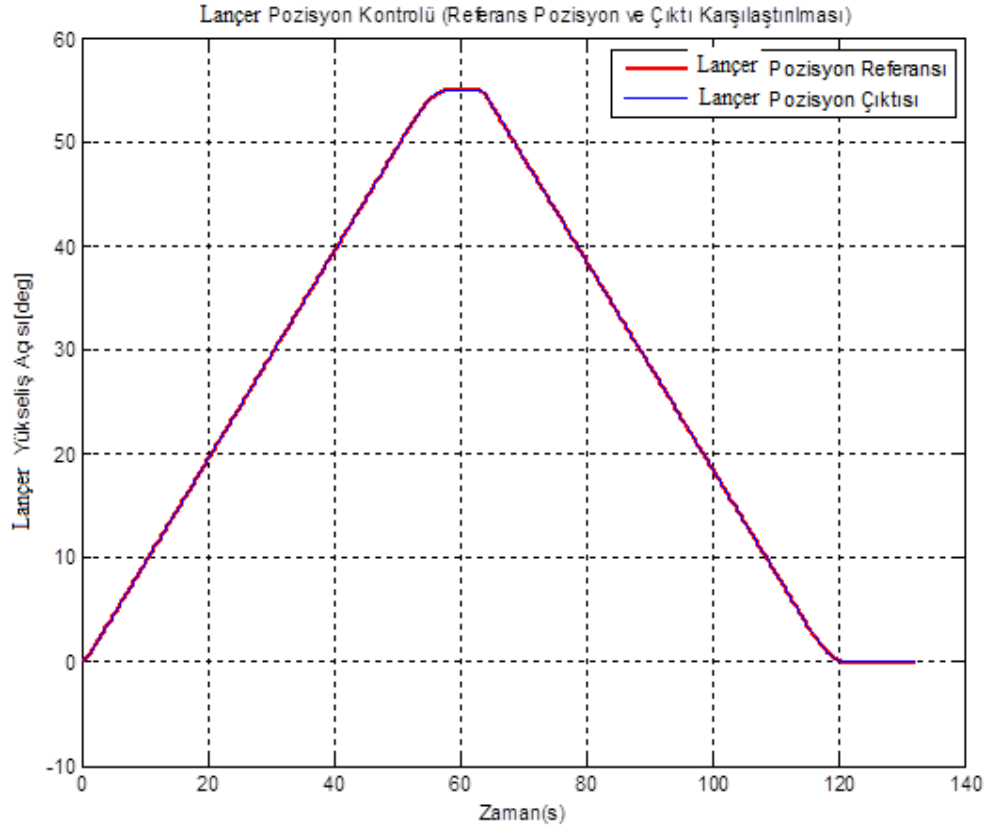
Performance and robustness	
	Tuned
Rise time	0.0439 seconds
Settling time	0.209 seconds
Overshoot	0.000916 %
Peak	1.01
Gain margin	10.2 dB @ 133 rad/s
Phase margin	69 deg @ 33.9 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Şekil 7.7. Kontrolcü Performansı ve Gürbüzlüğü

Controller parameters	
Proportional (P):	27.5
Integral (I):	7.87
Derivative (D):	3.18
Filter coefficient (N):	91.7

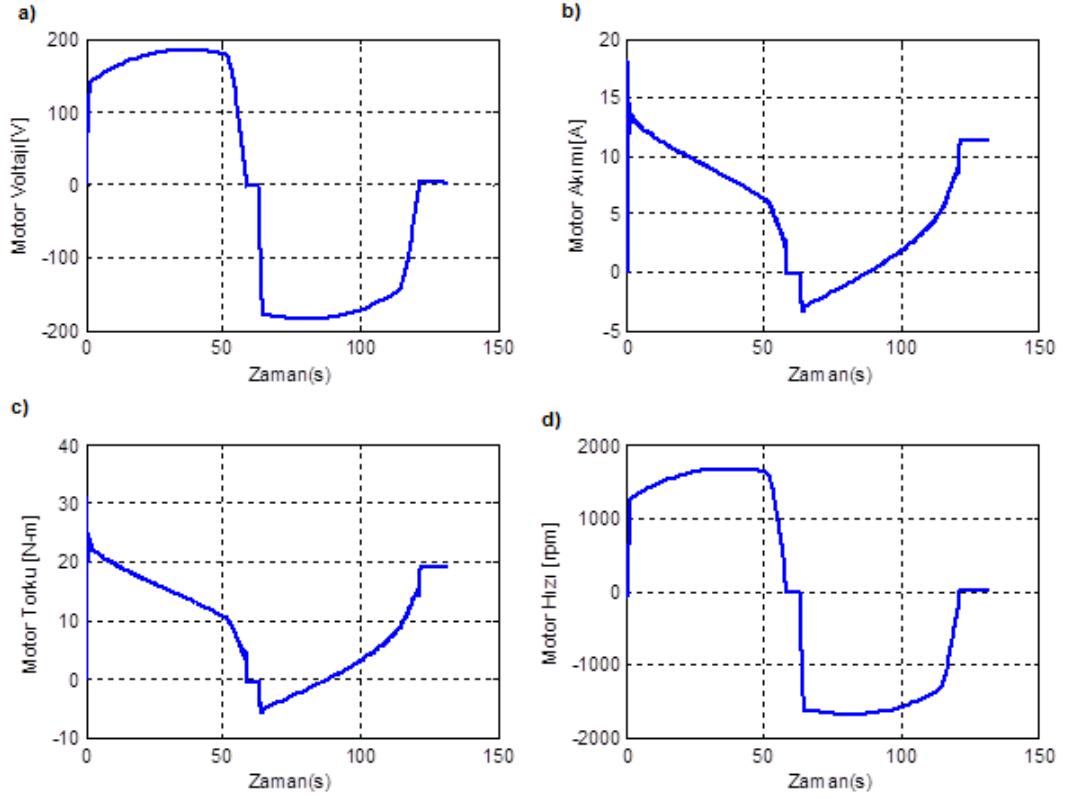
Şekil 7.8. Kontrolcü Parametreleri [Lançer Pozisyon Kontrolü İçin]

Şekil 7.9'da görüldüğü gibi lançer pozisyon kontrolü % 0.1 hata ile sağlanmıştır. Bu pozisyon kontrolü esnasında lançerin yükseliş açısız hız değişimi Şekil 7.4'te verilmiştir.



şekil 7.9. Lançer Pozisyon Kontrolü [Yükseliş Ekseni]

Motorun hız, akım, voltaj ve tork değişimleri ise şekil 7.10'daki gibidir.



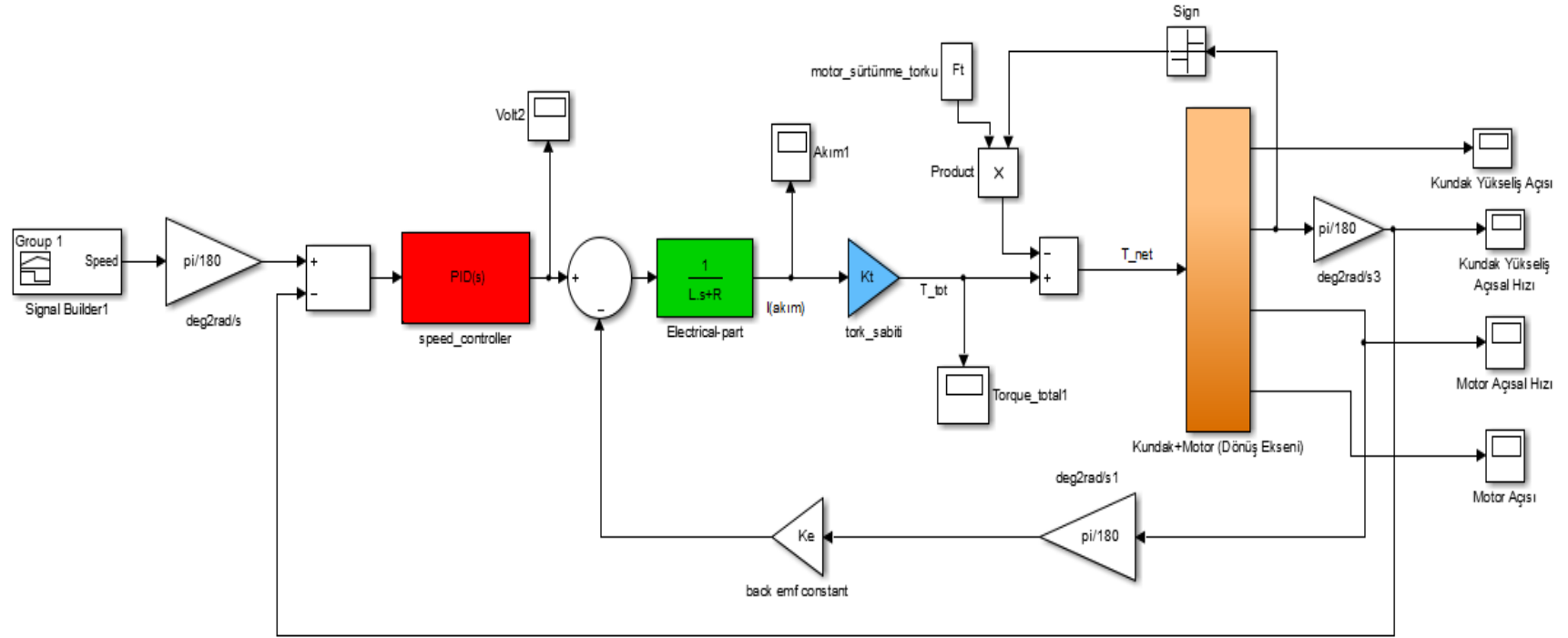
Şekil 7.10. Motorun Zamana Bağlı a) Voltaj, b) Akım, c) Tork ve d) Hız Değişimleri

7.2 Dönüş Ekseni

Modellenen dönüş eksenine, motorun ADAMS programında modellenen mekanik aksamı dişli kutularına bağlanmıştır. Motor bağlanarak oluşturulan lançerin ADAMS modelinin ADAMS Control yardımıyla doğrusal ve doğrusal olmayan (nonlinear) Simulink blokları alınmıştır. Doğrusal bloğun alınma sebebi kontrolcü parametrelerinin bulunabilmesi ve eniyilemesi için (PID-Tune) blokların doğrusal olması gereksinimidir. Doğrusal blok kullanılarak bulunan kontrolcü parametreleri daha sonra doğrusal olmayan blok üzerinde denenip kabul edilebilir seviyede hata ile doğrulanmıştır.

7.2.1 Dönüş Ekseni Hız Kontrolü

Motorun mekanik kısmını ifade eden transfer fonksiyonun çıkarılarak yerine ADAMS programından alınan, lançer ve motorun mekanik kısmını simgeleyen Simulink bloğunun eklenerek oluşturulan lançer hız kontrolü modeli Şekil 7.11'deki gibidir. Eklenen PID kontrolcü bloğunun "tune" özelliği kullanılarak Şekil 7.12'de verilen performans ve gürbüzlüğü sağlandığı (bu değerler rastgele belirlenmiştir) kontrolcü parametreleri Şekil 7.13'te verilmiştir.



Şekil 7.11. Lançer Hız Kontrolü Modeli [Dönüş Eksenli]

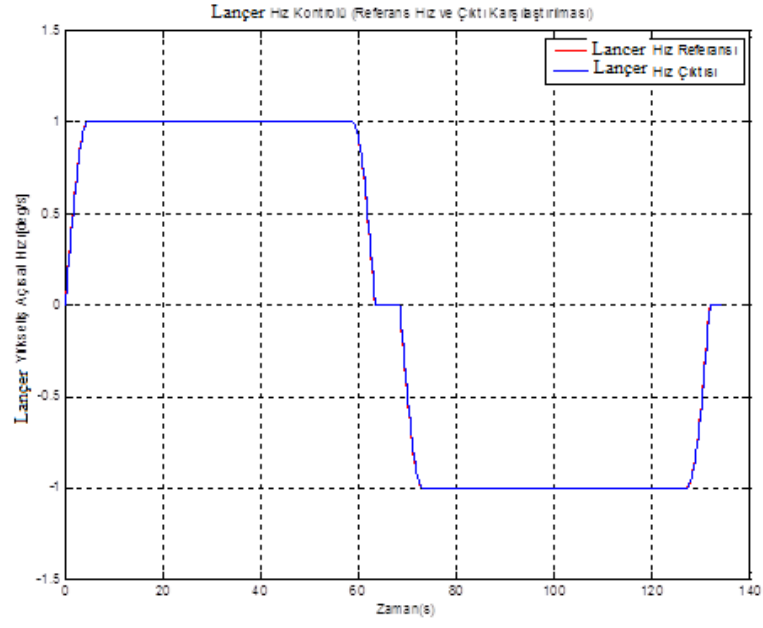
Performance and robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.112 seconds	0.112 seconds
Settling time	0.207 seconds	0.207 seconds
Overshoot	0 %	0 %
Peak	0.998	0.998
Gain margin	12.4 dB @ 175 rad/s	12.4 dB @ 175 rad/s
Phase margin	87.5 deg @ 18.5 ra...	87.5 deg @ 18.5 ra...
Closed-loop stability	Stable	Stable

Şekil 7.12. Kontrolcü Performansı ve Gürbüzlüğü [Dönüş Eksenini]

Controller parameters	
Proportional (P):	0
Integral (I):	76488
Derivative (D):	0
Filter coefficient (N):	100

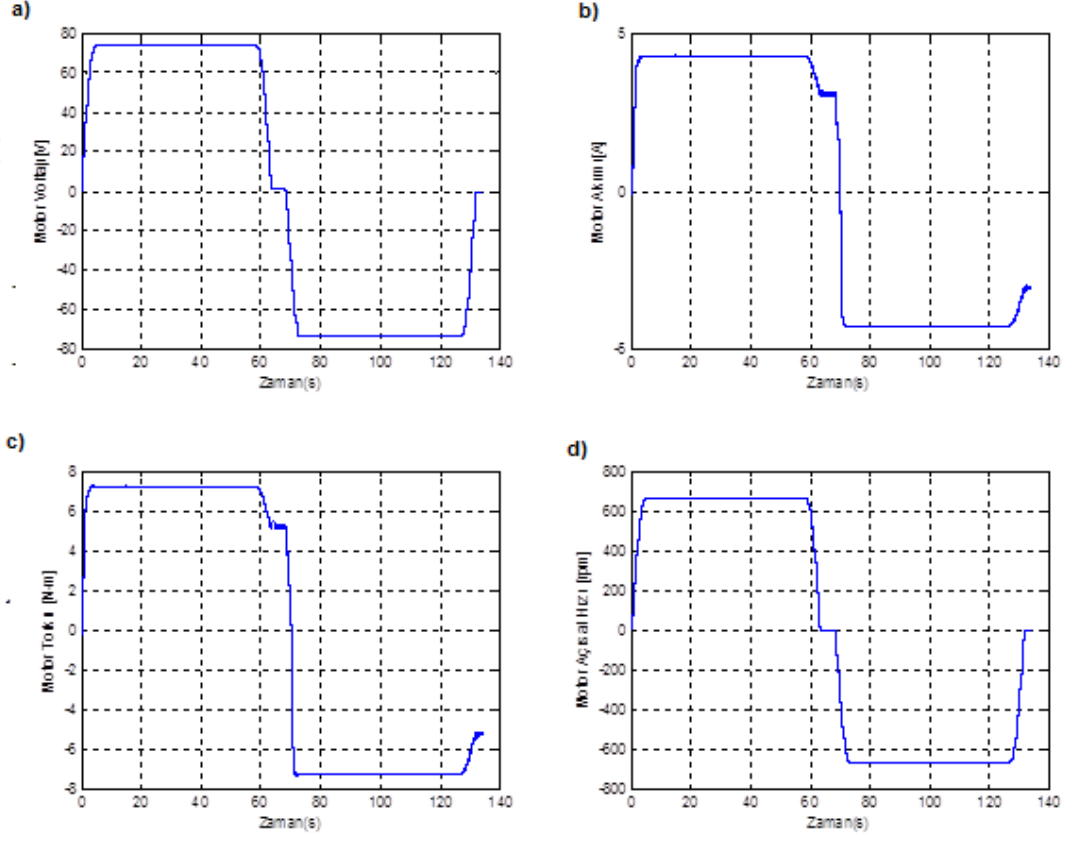
Şekil 7.13. Kontrolcü Parametreleri [Lançer Hız Kontrolü İçin]

Şekil 7.13'deki kontrolcü parametreleri kullanılarak lançer hız kontrolü sağlanmıştır. Verilen hız referansına kontrolcünün tepkisi Şekil 7.14'teki gibidir. Hız referansıyla, kontrolcünün verdiği hız tepkisinin kabul edilebilir seviyede hata ile örtüştüğü görülmektedir. Dönüş eksenindeki tüm bu hareketler gerçekleşirken yükseliş ekseninde hareketin olmadığı varsayılmıştır. Ayrıca lançere yüklükten benzetimler koşturulmuştur.



Şekil 7.14. Lançer Hız Kontrolü [Dönüş Eksen]

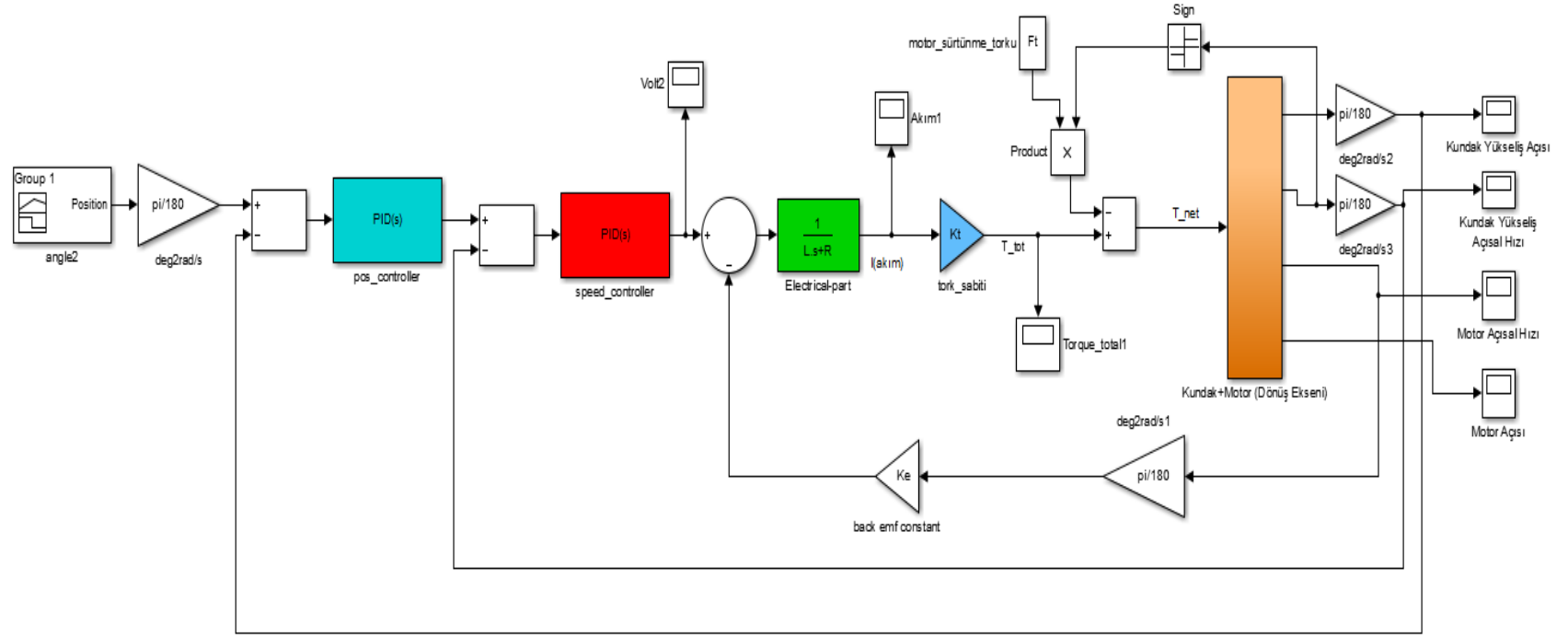
Bu koşulda motorun voltaj, akım, tork ve hız değişimi Şekil 7.15'te verilmiştir.



Şekil 7.15. Motorun Zaman Bağlı a) Voltaj, b) Akım, c) Tork ve d) Hız Değişimleri

7.2.2 Dönüş Ekseni Konum Kontrolü

Şekil 7.11'deki lançer hız kontrolü modeline pozisyon kontrolcüsü ve pozisyon geri bildirimini eklenerek Şekil 7.16 'daki gibi pozisyon kontrolü modeli elde edilmektedir.



Şekil 7.16. Lançer Pozisyon Kontrolü Modeli [Dönüş Eksen]

Eklenen PID kontrolcü bloğunun "tune" özelliği kullanılarak Şekil 7.17'de verilen performans ve gürbüzlüğün sağlandığı (bu değerler geliş güzel belirlenmiştir) kontrolcü parametreleri Şekil 7.18' de verilmiştir.

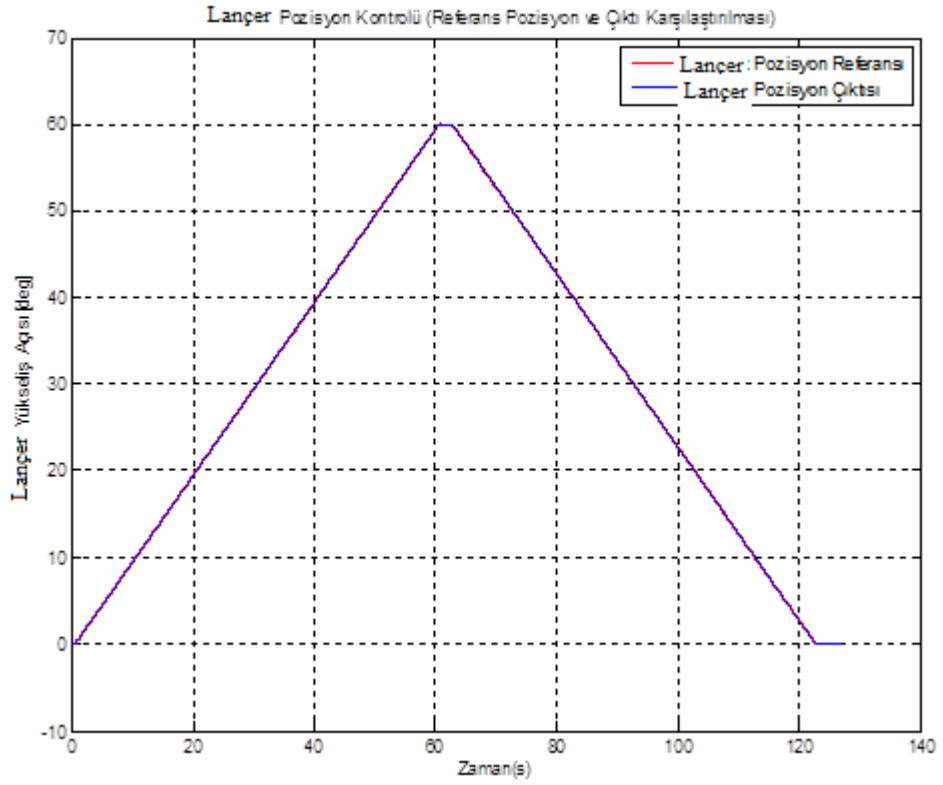
Performance and robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.0259 seconds	0.0259 seconds
Settling time	0.24 seconds	0.24 seconds
Overshoot	0.933 %	0.933 %
Peak	1.01	1.01
Gain margin	9.25 dB @ 132 rad/s	9.25 dB @ 132 rad/s
Phase margin	67 deg @ 40.3 rad/s	67 deg @ 40.3 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Şekil 7.17. Kontrolcü Performansı ve Gürbüzlüğü [Dönüş Ekseni]

Controller parameters	
Proportional (P):	23.9
Integral (I):	8.2
Derivative (D):	2.17
Filter coefficient (N):	69.4

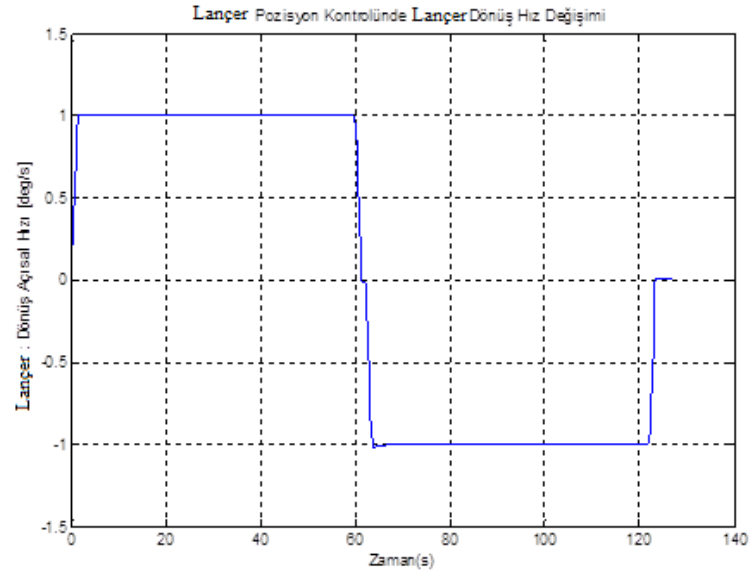
Şekil 7.18. Kontrolcü Parametreleri [Lançer Pozisyon Kontrolü İçin]

Şekil 7.19'da görüldüğü gibi lançer pozisyon kontrolü sağlanmıştır.

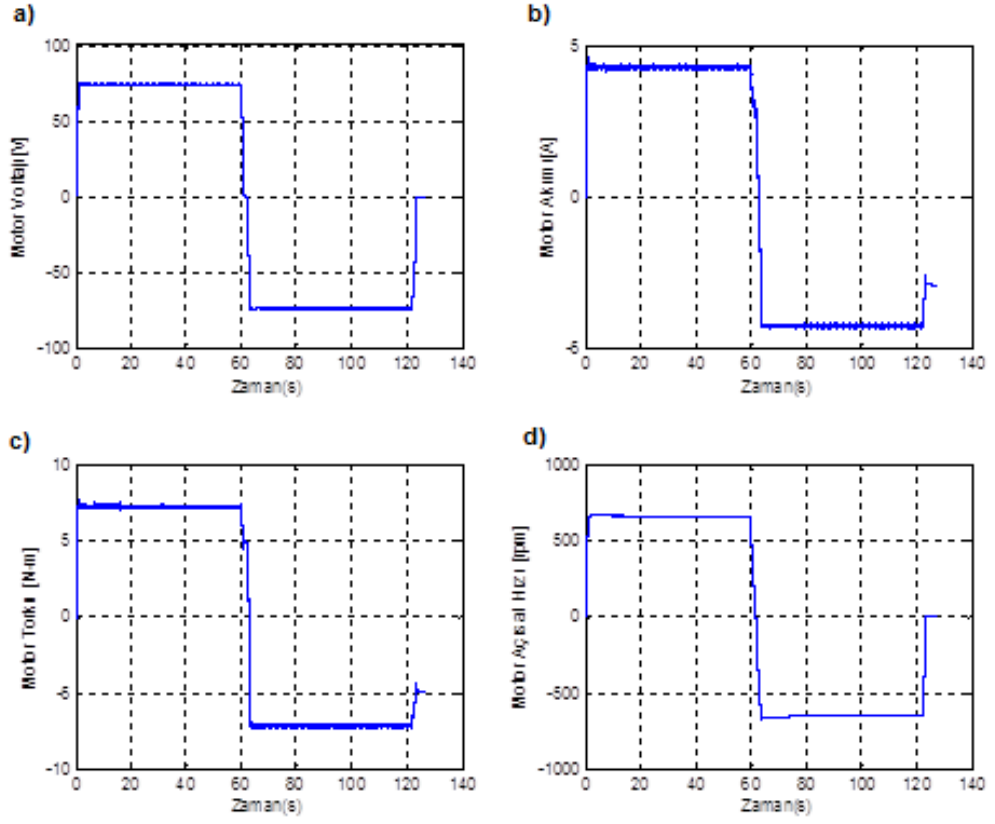


Şekil 7.19. Lançer Pozisyon Kontrolü [Dönüş Eksenı]

Bu pozisyon kontrolü esnasında lançerin dönüş açısıl hız değişimi Şekil 7.20'de, motorun hız, akım, voltaj ve tork değişimleri ise Şekil 7.21'de verilmiştir.



şekil 7.20. Lançer Dönüş Açısal Hız Değişimi



Şekil 7.21. Motorun Zamana Bağlı a) Voltaj, b) Akım, c) Tork ve d) Hız Değişimleri

8. ROKET LANÇERİ ÜZERİNDE YAPILAN TESTLER

Roket lançeri üzerinde sistem seviyesinde ve alt sistem seviyesinde testler gerçekleştirilmiştir. Alt sistem seviyesi olarak yükseliş ve dönüş eksenindeki mekanizmaların testleri gerçekleştirilmiştir.

8.1 Alt Sistem Testleri

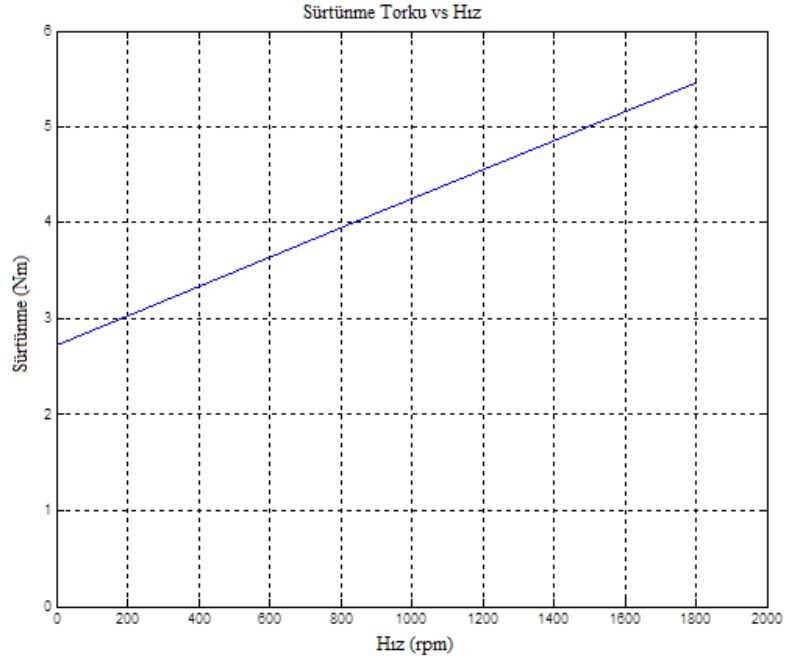
Lançerin daha doğru bir şekilde modellenebilmesi ve sürtünmeden kaynaklı kayıpların bulunması için eyleyici alt sistemleri üzerinde testler yapılmıştır. Bu testler kapsamında alt sistemlerin kalkış torqları (breakaway torque) ve viskoz sürtünme katsayıları bulunmuştur. Bu testler hem dönüş hem de yükseliş mekanizmaları için yapılmıştır.

8.1.1 Yükseliş Ekseni Alt Sistem Testleri

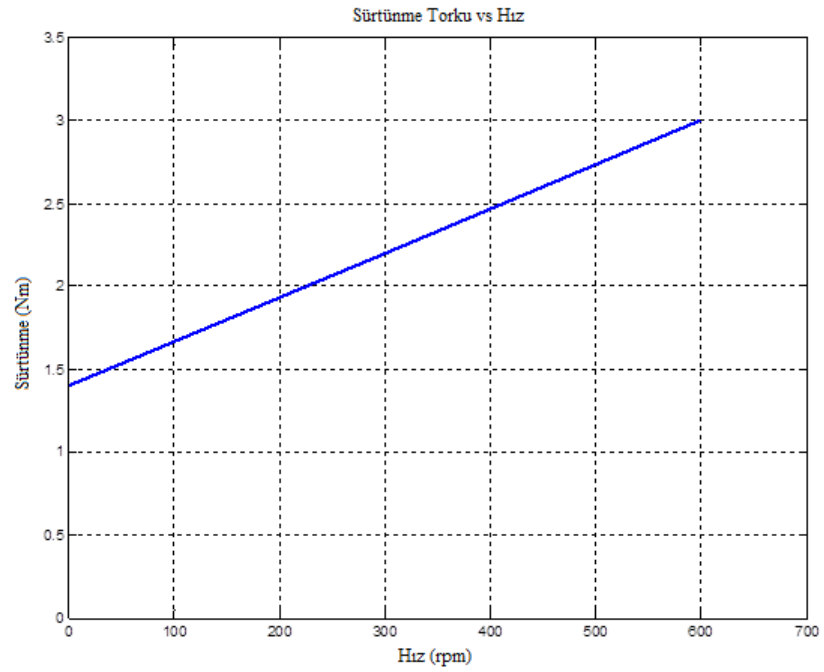
Alt sistem testleri merkez dişli kutusu ve köşe dişli kutusu+yükseliş eyleyici bileşenlerine uygulanmıştır.

Testlerde bileşenlerin sürtünme değerleri ayrı ayrı belirlenmiştir. İlk olarak test merkez dişli kutusuna elektrik motoru kullanılarak bağlanarak oda sıcaklığında yüksüz iken yapılmıştır. Daha sonra motor köşe dişli kutusu+yükseliş eyleyici bileşenlerine direkt motor bağlanarak oda sıcaklığında yüksüz iken test yapılmıştır. Testlerde farklı hız değerlerinde tork ölçümü yapılmıştır. Yapılan testler sonucu alınan hız ve tork verileri kullanılarak bu noktalardan bir eğri geçirilerek Şekil 8.1'deki gibi bir grafik elde edilmiştir.

a)



b)



Şekil 8.1. a) Merkez Dişli Kutusu Sürtünmesinin Hıza Göre Değişimi b) Köşe dişli kutusu+yükseliş eyleyicisi Sürtünmesinin Hıza Göre Değişimi

Şekil 8.1.a'da görüldüğü gibi merkez dişli kutusunu harekete geçirmek için 2,8 Nm kalkış torkuna ihtiyaç vardır. Çizginin eğimi hesaplanarak viskoz sürtünme katsayısı 0.016 Nms/rad olarak bulunmuştur.

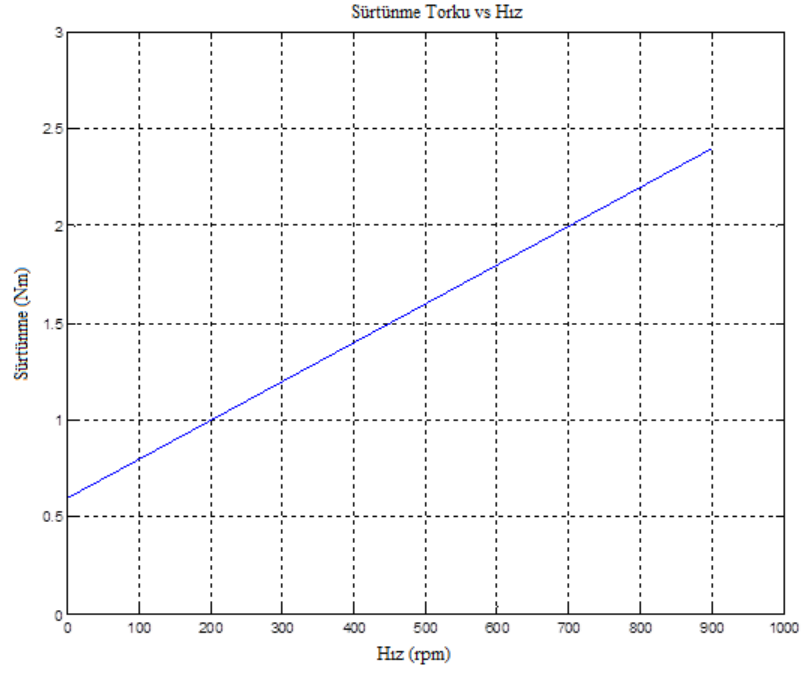
Şekil 8.1.b'de görüldüğü gibi köşe dişli kutus+yükseliş eyleyicisini harekete geçirmek için 1,4 Nm kalkış torkuna ihtiyaç vardır. Bu bileşenler için çizginin eğimi hesaplanarak viskoz sürtünme katsayısı 0.028 Nms/rad olarak bulunmuştur.

8.1.2 Dönüş Mekanizması Alt Sistem Testleri

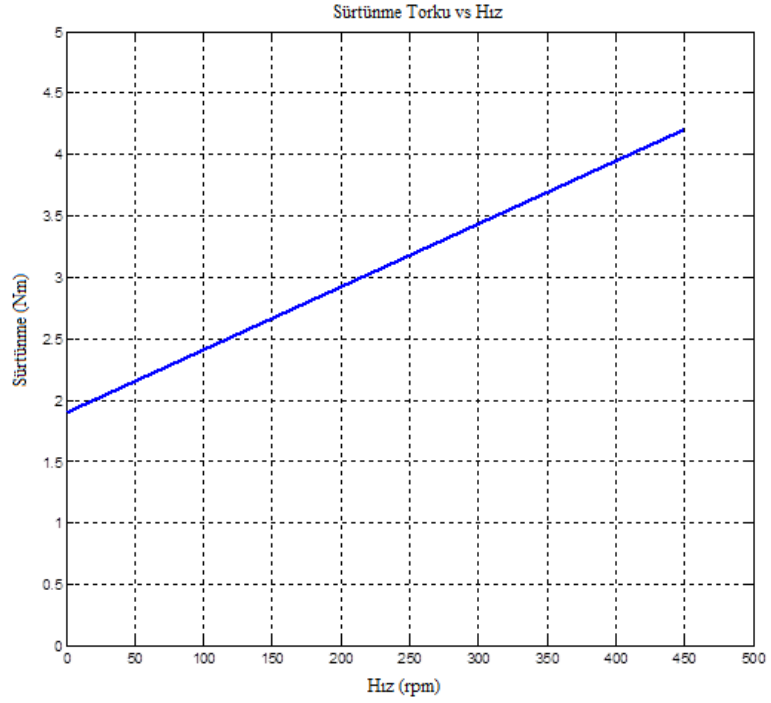
Dönüş eyleyicisi alt sistemi sikloid dişli kutusu ve konik dişli kutusundan oluşmaktadır. Dönüş eyleyicisi çember dişli ile eşleşmektedir. Dönüş eyleyicisi kapsamında kullanılan dişli kutuları ve çember dişlide oluşan sürtünme değerleri yapılan testler sonucu bulunmuştur.

Öncelikle sadece konik dişli kutusuna doğrudan motor bağlanıp yüksüz durumda ve oda sıcaklığında test yapılmıştır. Testlerde farklı devir hızlarında tork değerleri ölçülmüştür. Testler sonucu elde edilen veriler kullanılarak bir eğri üzerinden geçirilerek Şekil 8.2.a'daki bir grafik elde edilmiştir. Sürtünmenin hız ile doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Bu testte ısınmadan kaynaklanan etkiler ihmal edilmiştir. Daha sonra aynı test sikloid dişli kutusuna uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 8.2.b'de verilmiştir

a)



b)



Şekil 8.2. a) Konik Dişli Kutusunun Sürtünmesinin Hıza Göre Değişimi
b) Sikloid Dişli Kutusunun Hıza Göre Değişimi

Şekil 8.2.a'da görüldüğü gibi konik dişli kutusunu harekete geçirmek için 0,7 Nm kalkış torkuna ihtiyaç vardır. Çizginin eğimi hesaplanarak viskoz sürtünme katsayısı 0.021 Nms/rad olarak bulunmuştur.

Şekil 8.2.b'de görüldüğü gibi sikloid dişli kutusunu harekete geçirmek için 1,9 Nm kalkış torkuna ihtiyaç vardır. Çizginin eğimi hesaplanarak viskoz sürtünme katsayısı 0.053 Nms/rad olarak bulunmuştur.

Çember dişlinin üzerine lançerdeki yükü ağırlık ve ağırlık merkezi yönünden benzeten ağırlıklar koyularak sürtünme torku testleri gerçekleştirilmiştir. Çember dişli üzerine yerleştirilen yük, lançer tam yüklü ve en fazla yükseliş açısı verildiği durumu ağırlık ve ağırlık merkezini açısından benzetecek şekilde yerleştirilmektedir. Bu durumda gereken tork ihtiyacı 1900 Nm olmaktadır. Bu test oda sıcaklığında yapılmıştır.

Dönüş freninde pinyondan dolayı kaynaklanan sürtünmenin ise 600 Nm olduğu testler sırasında belirlenmiştir. Bu değerler oda sıcaklığında yapılan testlerle doğrulanmıştır.

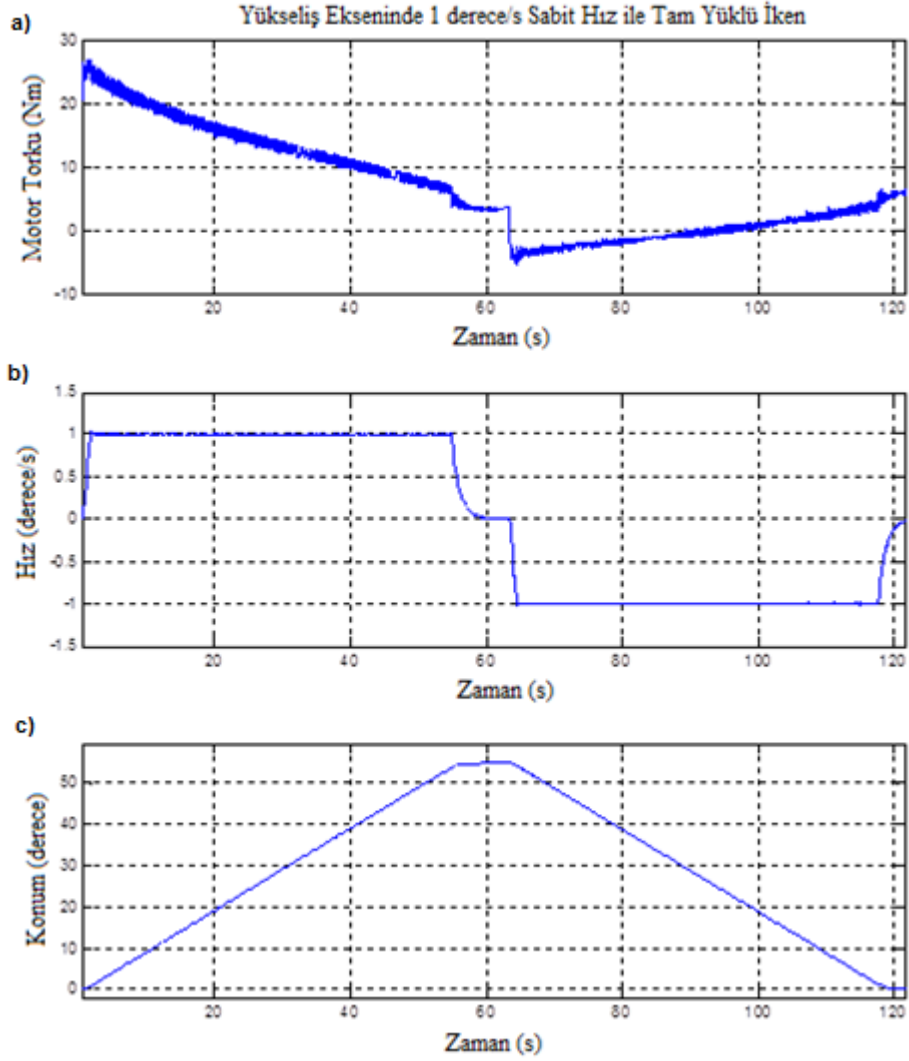
8.2 Sistem Seviyesi Testler

Testlerin gerçekleştirildiği lançerde kullanılan motor ve sürücü başka bir firma tarafından tedarik edilmektedir. Firma, motorun bazı parametreleri ile sürücünün kontrol parametreleri ile ilgili bilgi vermemektedir. Bu sebeple kontrolcü katsayılarının denenmesi ve doğrulanması mümkün değildir. Fakat firmanın sürücüsü ile yapılan test sonuçları paylaşılmıştır. Firmanın yaptığı testlerin grafikleri kullanılarak Simulink üzerinde kontrol yapılarak kontrolcü parametreleri belirlenmiştir. Simulink modelindeki motor modeli test düzeneğinde de kullanılarak

kontrolcü parametreleri doğrulanacaktır. Bu testler yükseliş ve dönüş eksenlerinde lançerin tam yüklü olduğu durum için yapılmıştır.

8.2.1 Yükseliş Ekseni Testleri

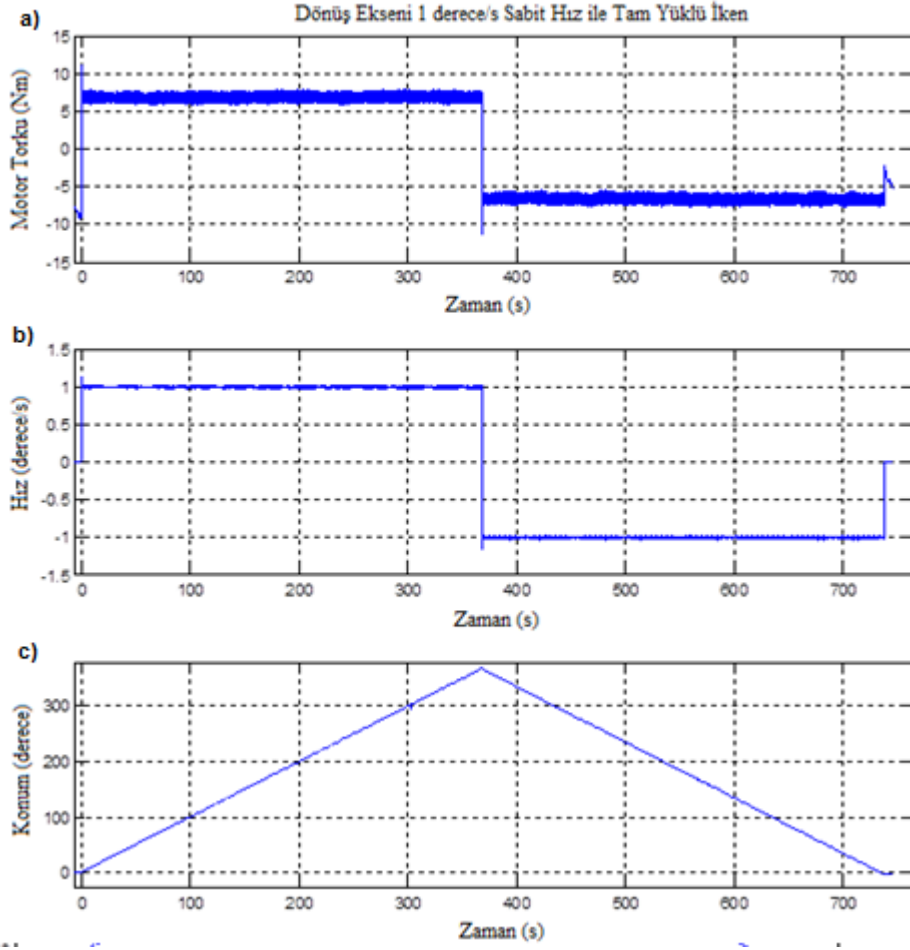
Gerçek zamanlı lançer testlerinde lançer tam yüklüyken, 1°/s yükseliş hızıyla 55° yükselip, belli bir süre (yaklaşık 10s) bu yükseklikte durduktan sonra 0 pozisyonuna iniş hareketinde lançerin yükseliş açısı, yükseliş hızı ve yükseliş ekseni motoru torkunun değişimi Şekil 8.3'te verilmiştir.



Şekil 8.3. Yükseliş Ekseni Zamana Bağlı a) Motor Torku b) Lançer Hızı c) Konum Değişimleri

8.2.2 Dönüş Ekseni Testleri

Gerçek zamanlı lançer testlerinde lançer tam yüklüken, $1^\circ/\text{s}$ dönüş hızıyla 360° dönüp, belli bir süre (yaklaşık 1s) bu açıda durduktan sonra 0 pozisyonuna dönüş hareketinde kundağın dönüş açısı, dönüş hızı ve dönüş motor torkunun değişimi Şekil 8.4'te verilmiştir.



Şekil 8.4. Dönüş Ekseni Zamana Bağlı a) Motor Torku b) Lançer Hızı c) Konum Değişimleri

9. TEST DÜZENEĞİ ALTERNATİFLERİNİN BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ

Bu bölümde lançerlerin dönüş ve yükseliş eksenlerinin benzetildiği ve aynı zamanda sürücü kontrolcü parametrelerinin en iyilenebileceği test düzeneği alternatifleri anlatılmaktadır.

Dönüş ekseninde, dönüş motoruna binen yük dönüş ve/veya yükseliş açısıyla değişmemesine rağmen, yükseliş ekseninde yükseliş motoruna binen yük yükseliş açısıyla değişmektedir.

Test düzeneğinin dinamik özellikleri farklı olan lançerleri benzetilebilmesi için ayarlanabilir olması gereklidir. Ayarlanabilen test düzeneği ile lançere ihtiyaç duyulmaksızın sürücü-kontrolcü eniyilemesine başlanabilecektir. Bu test düzeneğinin sistemin bütün dinamiklerini yansıtmaması mümkün olmamasına rağmen benzetimi büyük bir oranda sağlaması hedeflenmektedir. Dönüş, yükseliş veya her iki eksen için belirlenen test düzeneği alternatifleri avantajları ve dezavantajlarıyla beraber değerlendirilmiştir.

9.1 Test Düzeneği Alternatifleri

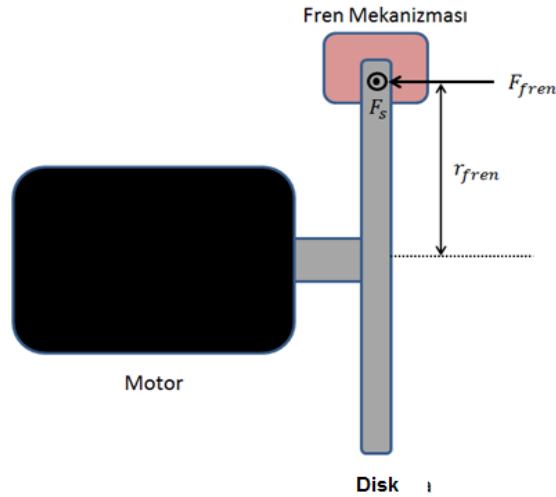
Lançerlerin benzetilebildiği alternatifler belirlenmiş ve her bir alternatifte karşılaşılan eksiklikler diğer alternatifte giderilmiş ve geliştirilmiştir. Dönüş ekseninin benzetildiği sonrasında yükseliş ekseninin benzetildiği ve son olarak ise her iki eksenin de benzetildiği alternatifler anlatılacaktır.

9.1.1 Dönüş Ekseni Hareketi

Lançer dönüş hızı ile motor dönüş hızları arasındaki oran sabit olmakla birlikte, yük zamana ve dönüş eksenine konumuna göre de değişmemektedir. Dönüş motoruna binen yük sürtünmelerden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla dönüş ekseninin benzetimi daha çok sürtünmelerin benzetimi ile ilişkilidir.

9.1.1.1 Alternatif 1

Bu alternatif Şekil 9.1'deki gibi motor, motora bağlanacak disk ve fren mekanizmasından oluşmaktadır. Örneğin lançerin 1°/s hızla dönebilmesi için motorun dönmesi gereken hızın 1000 rpm olduğu varsayalım. Motorun bu durumda vermesi gereken tork değeri fren mekanizmasıyla sağlanacaktır. Dolayısıyla bu yük altında sabit 1000 rpm ile dönen motor, lançer dönüş eksenini benzetebilecektir.

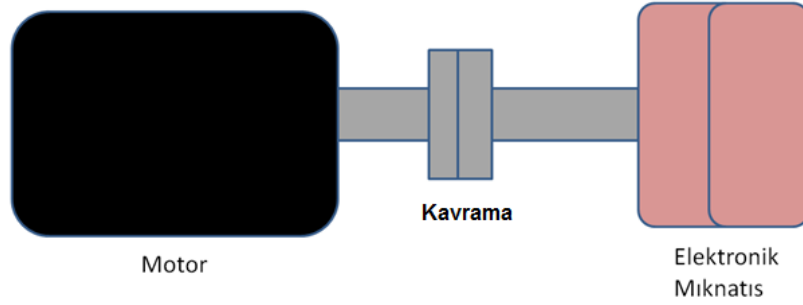


Şekil 9.1. Test Düzenegi Dönüş Ekseni 1. Alternatif

Bu alternatifte hız olmadığında Coulomb, hızlandığı zaman ise viskoz sürtünme modeli uygulanacaktır.

9.1.1.2 Alternatif 2

Bu alternatif Şekil 9.2'deki gibi motor, kavrama ve elektromıknatıstan oluşmaktadır. Sürtünme torqları elektromıknatıs yardımıyla oluşturulmaktadır. Kavrama ise herhangi bir olumsuz durumda motor ile elektromıknatıs arasındaki bağlantıyı ayırmaya yarayan bir tür güvenlik mekanizması olarak düşünülmüştür.



Şekil 9.2. Test Düzeneği Dönüş Ekseni 2. Alternatif.

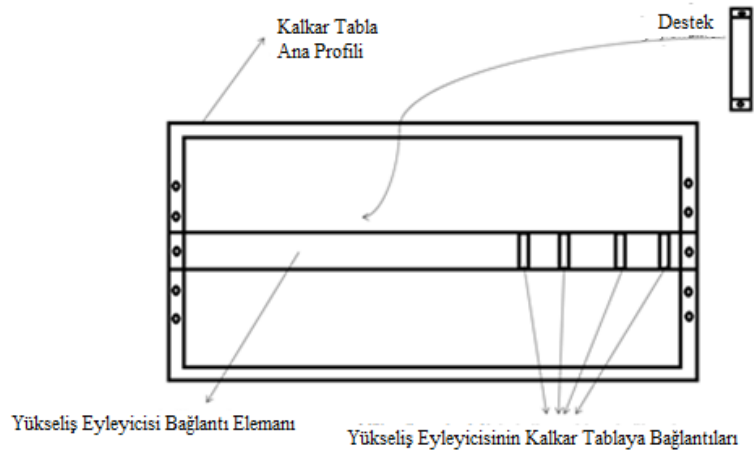
Elektromıknatıslar ile zamana bağlı değişken sürtünme torqları ayarlanabilmektedir. Dolayısıyla lançer dönüş ekseninde oluşan toplam yükün benzetimi bu ürün ile sağlanabilecek olup, motor ise bu yük altında çalıştırılarak kontrolcü eniyilemesi yapılabilecektir.

9.1.2 Yükseliş Ekseni

Yükseliş ekseninde sürtünme ile birlikte lançerin konumu da sistemi etkilemektedir. Ayrıca yükseliş ekseninde yer çekim ivmesinden dolayı rejeneratif enerji oluşmaktadır.

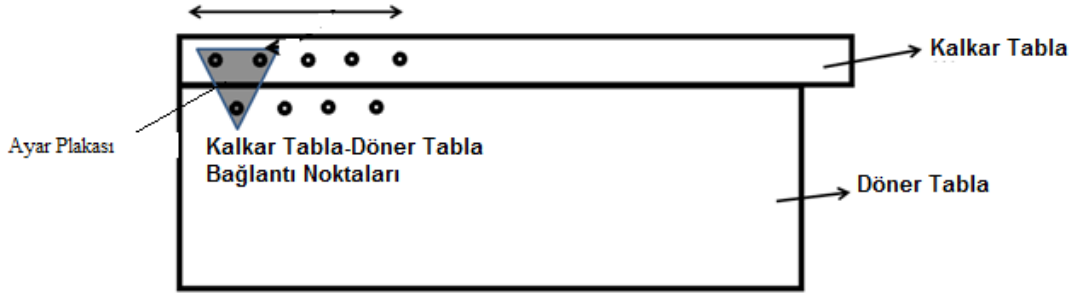
9.1.2.1 Alternatif 1

Bu alternatifte, bağlantı noktalarının yerlerinin değiştirilebildiği taşınabilen bir lançer üretilmesi planlanmaktadır. Farklı lançerler için farklı yükseliş eyleyicisi yerleşimi oluşacağından üretilecek olan taşınabilir lançerin bağlantı noktalarının değiştirilebilir olması gerekecektir. Kalkar tabla ve yükseliş eyleyicisi bağlantı noktası kullanılacak eyleyici sayısına göre birden fazla olabilecektir. Şekil 9.3'te görülen "Yükseliş Eyleyici Bağlantı Elemanı" kullanılma adedi ve montaj konumu kullanılacak eyleyici sayısına göre değişecektir. Şekil 9.3'te örnek olması açısından sadece bir eyleyici kullanılacak şekilde monte edilmiştir. Kalkar tablanın ağırlığı ve ağırlık merkezi lançerden lançere değişmektedir.



Şekil 9.3. Portatif Lançer Kalkar Tablasının Üstten Görünümü

Farklı lançerler için bu değerlerin sağlanabilmesi için Şekil 9.3'teki "Destek" kalkar tabla ana profiline konumlandırılacaktır. Böylece hem ağırlık merkezinin konumu hem de kalkar tabla ağırlığı sağlanabilecektir. Farklı lançerlerin ayarlanabilmesi için kalkar tabla ile döner tablanın bağlantı noktasının ayarlanabilmesi gereklidir (Şekil 9.4).

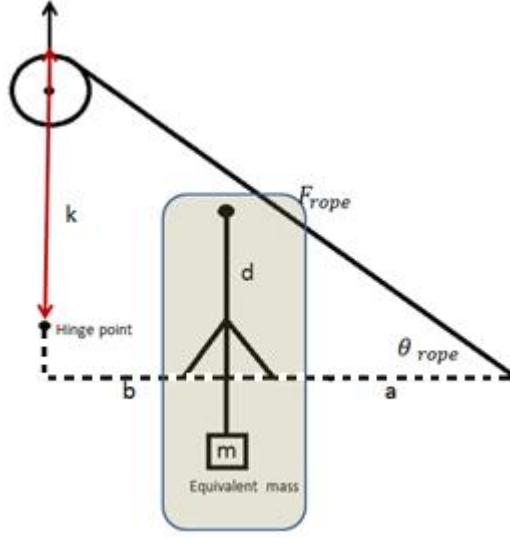


Şekil 9.4. Ayarlanabilir Kalkar Tabla-Döner Tabla Bağlantısı

Döner tablanın yükseliş eyleyicisi ile bağlantı noktası da kalkar tabla bağlantısı gibi ayarlanabilir olacaktır.

9.1.2.2 Alternatif 2

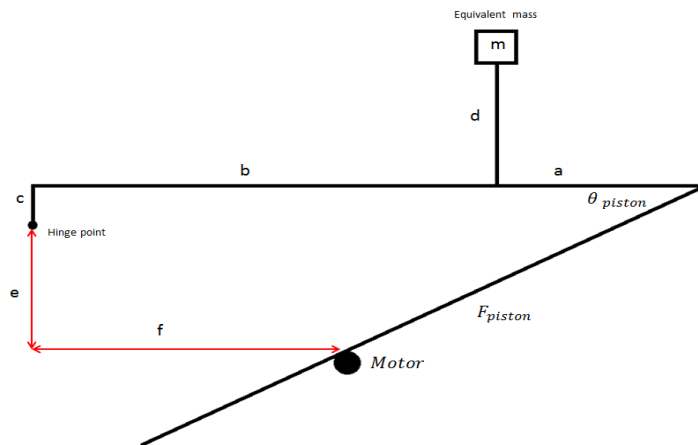
Bu alternatifte L profil, motor, makara ve halat kullanılmıştır. Halat çekildikçe eşdeğer kütlenin hareket noktasına göre oluşturduğu momentin değişmesinden dolayı motora binen yük değişmektedir. Kesikli çizgi ile gösterilen L şeklinde profil kalkar tablayı simgelemektedir. Eşdeğer kütle ve ölçüler lançerden lançere değişebilmektedir. Lançerin benzetimi için Şekil 2.9'daki λ ile açısı ile Şekil 9.5'deki θ_{rope} açılarının hareket boyunca aynı olması gerekmektedir. Bunun için de k mesafesinin değişken olması gerekmektedir. k değeri kontrol edilerek lançer benzetilebilir.



Şekil 9.5. Test Düzeneği Yükseliş Ekseni Alternatif 2

9.1.2.3 Alternatif 3

Alternatif 2'deki "k" mesafesini kontrol etmek yerine ve halat kullanımı sebebiyle itme işlemi yapılamadığı için bu alternatifte rijit bir yapı kullanılmıştır. (Şekil 9.6)

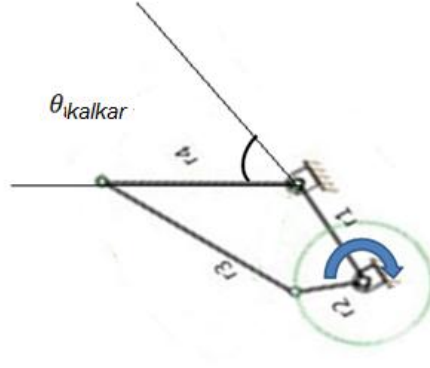


Şekil 9.6. Test Düzeneği Yükseliş Ekseni Alternatif 3

Bu alternatifte, sistemde rijit elemanlar kullanarak ve motor ile sisteme hareket verilerek lançerin benzetilmesi değerlendirilmiştir.

9.1.2.4 Alternatif 4

Bu alternatifte yükseliş eksenli 4 çubuk mekanizması olarak modellenmiştir. Lançerin iniş ve yükseliş hareketini benzetebilen 4 çubuk mekanizması tasarlanmıştır (Şekil 9.7).



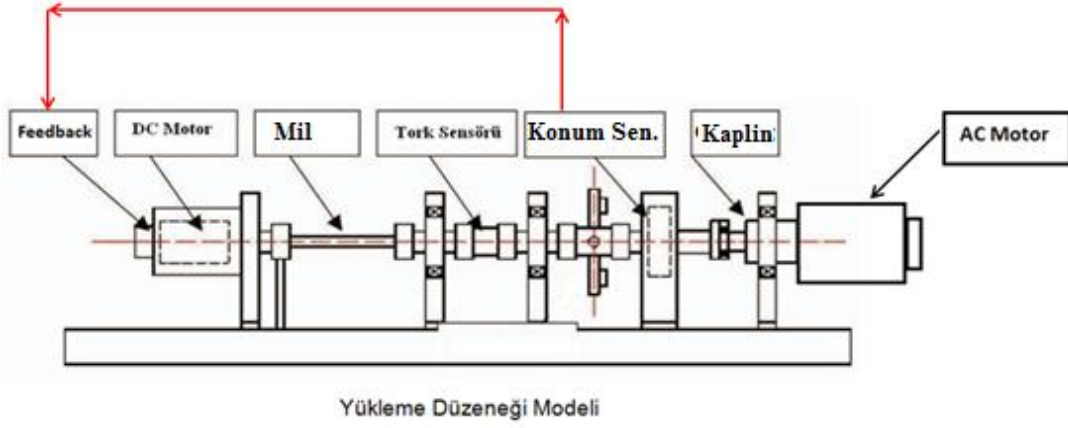
Şekil 9.7. 4 Bağ Mekanizması

Burada r2 uzvu motor tarafından tahrik edilecek ve r4 uzvu kalkar tablanın hareketini benzetecektir. Bağ uzunlukları değiştirilerek kalkar tablanın yapabildiği açı sınırı değiştirilebilecektir.

9.1.3 Dönüş ve Yükseliş Ekseni

Bu bölümde anlatılacak olan test düzeneği diğer alternatiflerden farklı olarak sadece tek eksenle çalışmayacak olup hem yükseliş hem de dönüş eksenini ayrı ayrı benzetebilecektir.

Şekil 9.8'de görüldüğü gibi iki motor karşı karşıya bağlanmıştır. Motorlardan biri yüklemeye yapacaktır diğer motor ise bu yüklemeye altında istenilen konuma istenilen hızla gidecektir. Dolayısıyla istenilen tork profiline istenilen motor hızında erişilecek ve gerçek lançere güç seviyesinde ulaşılmış olacaktır.



Şekil 9.8. Dönüş ve Yükseliş Eksenini Benzeten Test Düzeneği

Test düzeneği yük motoru yük (tork) değişimini sağlarken, diğer konum-hız kontrolünün yapılacağı lançer kontrol motoru ise yük motorunun dönüş yönünün tersi yönünde sürülecektir. Sonuç olarak test düzeneğine bağlanan lançer motoru istenilen yük altında ve hızda çalıştırılmış olup gerçek lançer motorunu benzetebilecektir. Yukarıda anlatılan durum aynı şekilde dönüş eksenine de uygulanabilecektir. Diğer alternatiflerde lançerin konumu veya hızı kontrol edilirken, bu alternatifte lançerin o konuma veya hıza erişmesi için gereken motor konum ve hız kontrolü yapılacaktır.

9.2 Alternatiflerin Değerlendirilmesi

Lançerin dinamik özelliklerini ve karakteristiğini en iyi şekilde gösterebilecek test düzeneği alternatifler belirlenmiştir.

Dönüş Ekseni:

Dönüş ekseninde yerçekiminden dolayı rejeneratif enerji oluşmadığından dolayı anlatılan her iki alternatif de kullanılabilir. Dönüş eksen hareketinin 1.alternatifinde fren pabuçlarının zamanla aşınacak olması ve fren kuvvetinin kontrolünün de sistemi karmaşık hale getireceği değerlendirilmektedir. Ayrıca 1. ve 2.alternatif için kontrol gerektiği için sistem karmaşıklık seviyesi artacaktır.

Yükseliş Ekseni:

Bütün alternatiflerde hız tork grafiklerini benzetebilmek için sistemin çok ağır olması gerekmektedir. Bu da test düzeneği için uygun bir çözüm olmamaktadır. İkinci alternatifte "k" değerinin mesafesi de kontrol edilmesi gerektiği için sistem karmaşıklaşmaktadır. Ayrıca, bu alternatifte halat kullanılması sebebiyle sistem tek yöne çalışabilmektedir.

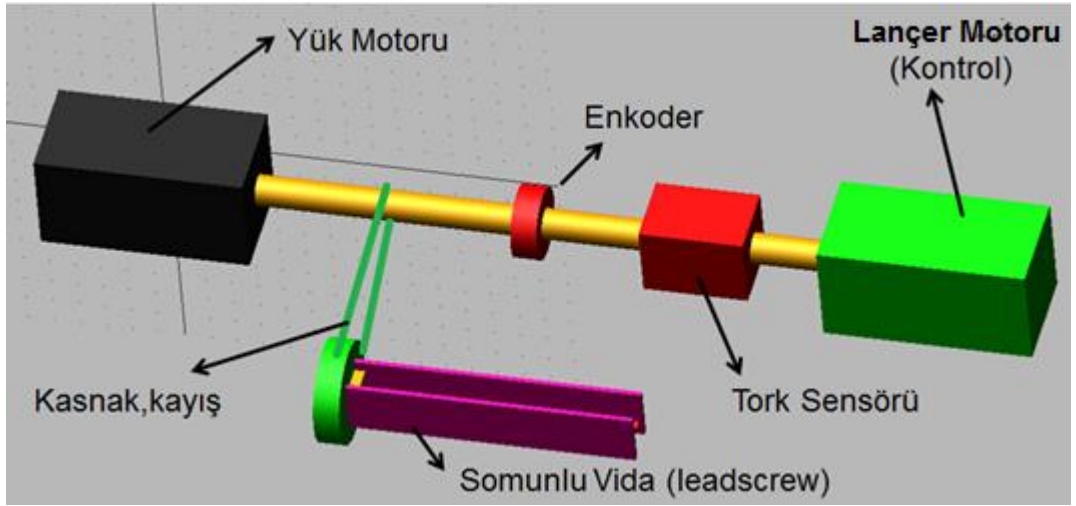
Dönüş ve Yükseliş Ekseni :

Diğer alternatiflerde dönüş ve yükseliş eksenlerinin aynı mekanizmayla benzetilememesine karşın bu alternatifte hem dönüş hem de yükseliş hareketi aynı mekanizmayla benzetilebilmektedir. Ayrıca bu alternatifte statik ve dinamik sürtünmeleri modellemek için ek aparatlara ihtiyaç duyulmayacaktır. Tüm yükler ve sürtünmeler karşılıklı yerleştirilecek olan motorlardan "yük motoru" ile sağlanacaktır.

Dönüş ve yükseliş eksenlerini benzetmek için ayrı ayrı mekanizmalara ihtiyaç duymaması ve gerçek sistemi güç seviyesinde benzetebilmek için en son anlatılan alternatifin uygulanmasına karar verilmiştir.

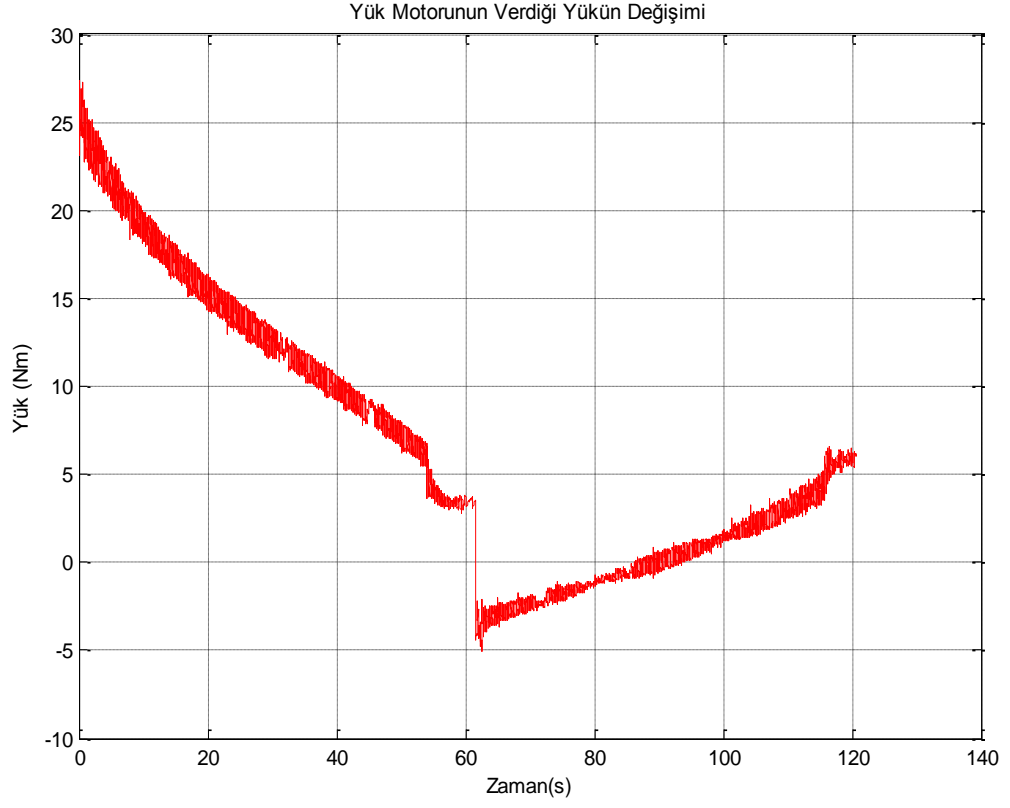
10. TEST DÜZENEĞİNİN MODELLENMESİ

Test düzeneğinin ADAMS programında elde edilen modeli Şekil 10.1'deki gibidir. Kontrol motoruna yerçekiminden ve sürtünmelerden dolayı binen yükleri "yük motoru" benzetmektedir. Bu yükler altında "lançer motoru" ise istenilen hızla istenilen pozisyona sürülecektir. Lançer maksimum 58° yükselebilmektedir. Bu limit aşıldığında lançerde bulunan limit anahtarları (limit switch) hareketi sonlandırmaktadır. Bu durumu benzetmek için test düzeneğinde vidalı mil mekanizması (leadscrew) koyulmuştur.



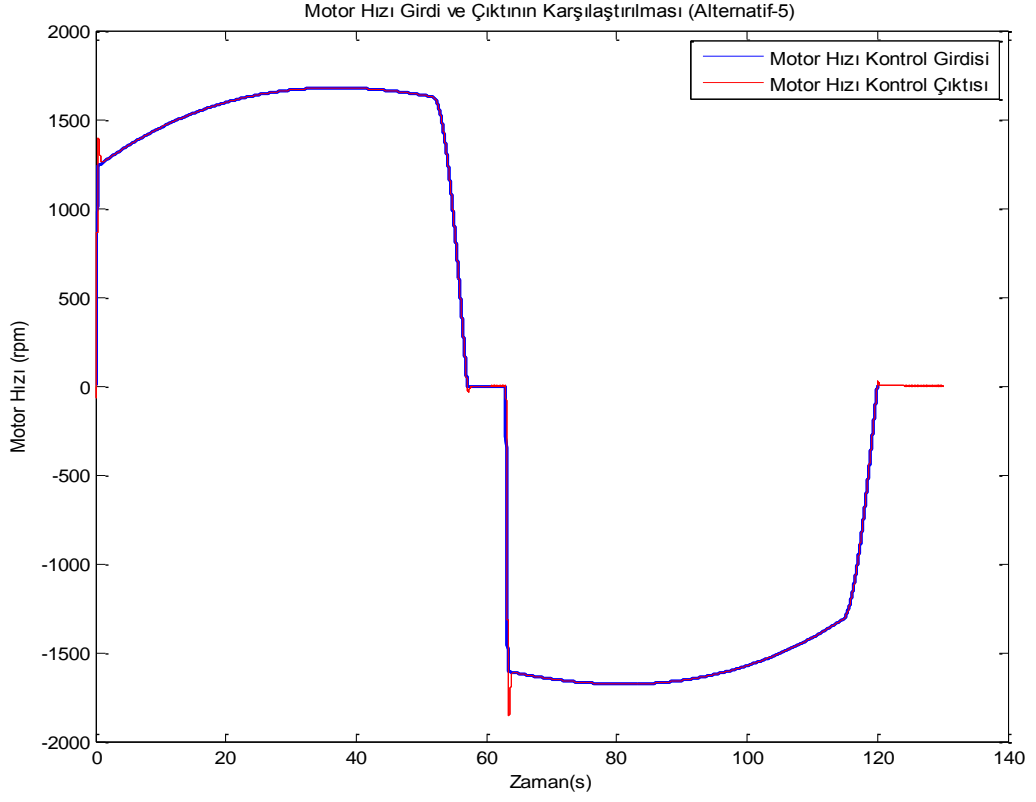
Şekil 10.1. Test Düzeneğinin ADAMS Programında Modellenmesi

Yük motorunun ürettiği yükün değişimi Şekil 10.2'deki gibidir.



Şekil 10.2. Yük Motorunun Lançer Kontrol Motoruna Yüklediği Yükün Değişimi

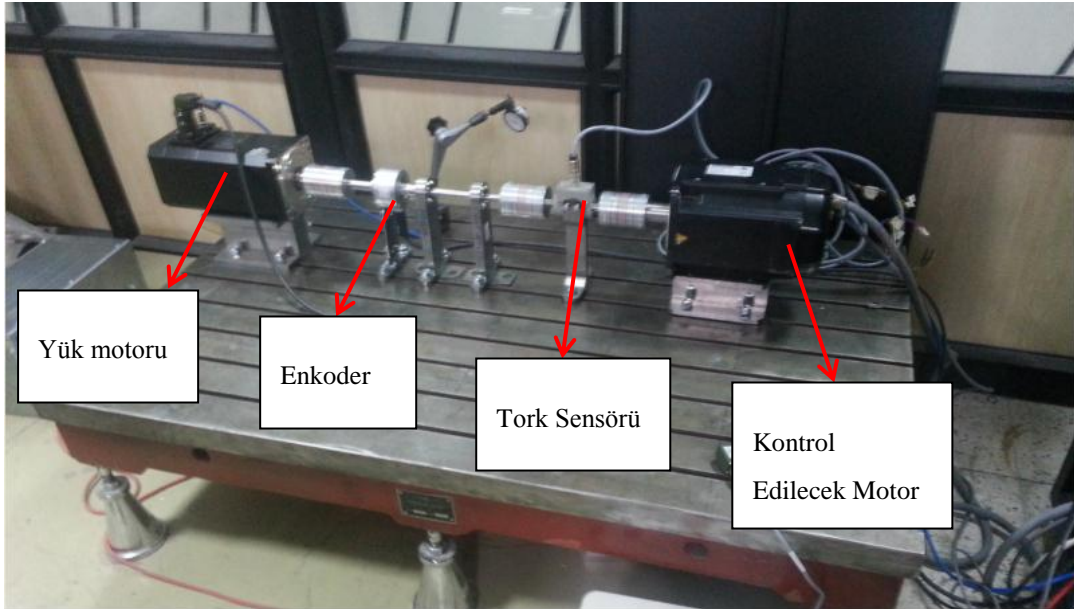
Lançer kontrol motoru Şekil 10.2'deki yükün altında (yükün tersi yönünde) verilen hız girdisini Şekil 10.3'teki gibi takip etmiştir. Lançer kontrol motorunun bu yük altında böylece hareket edebilmesi için aynı veya daha fazla tork üretmesi gerekecektir.



Şekil 10.3. Lançer Kontrol Motorunun Hız Girdisi ve Girdiye Olan Cevabının Karşılaştırılması

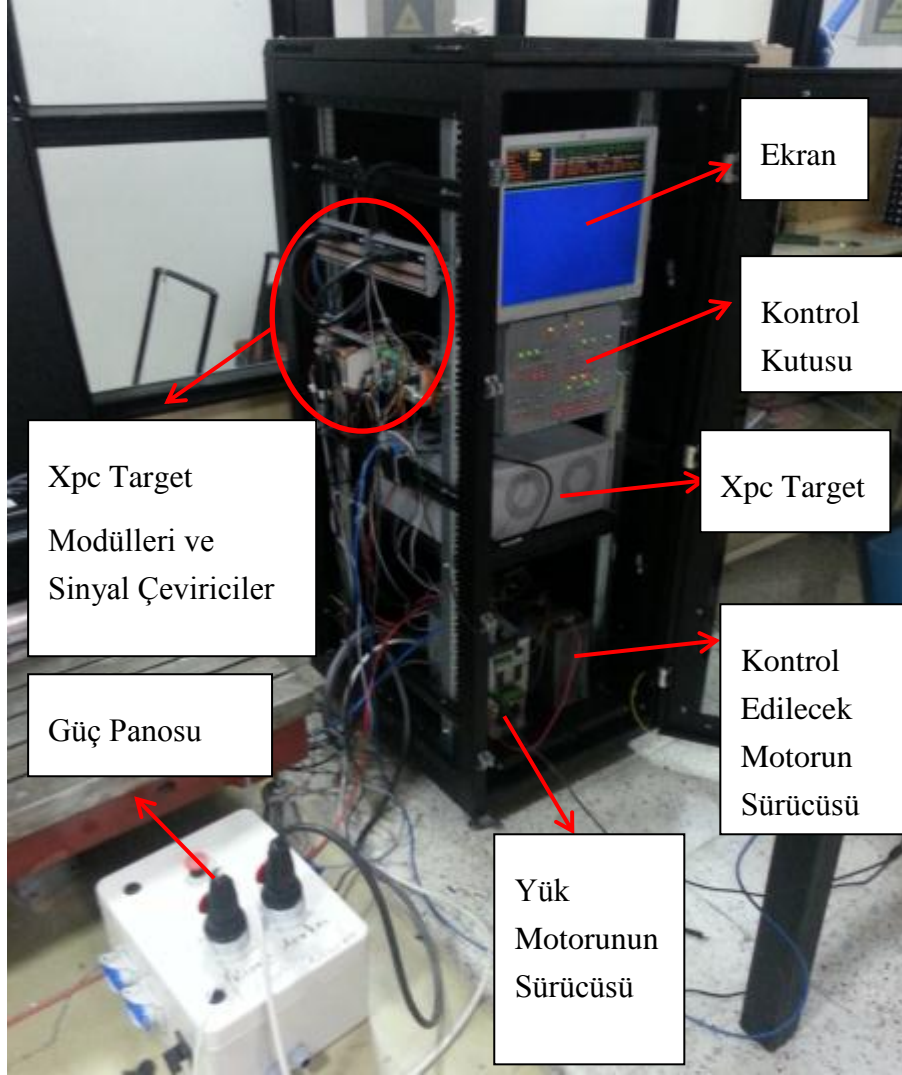
11. TEST DÜZENEĞİ ÜZERİNDE YAPILAN TESTLER

Test düzeneği Şekil 10.1’de görüldüğü gibi modellenip Şekil 11.1’deki gibi oluşturulmuştur. Yük motoruna benzetilecek lançerin tork değişim grafiği girilmektedir. Karşıdaki kontrol edilecek motor ile de yük motoruna karşı istenen hızda istenen konuma gitmesi sağlanacaktır. Aradaki tork algılayıcı ile de oluşan tork değeri ölçülmektedir. Enkoder ile de motorun konumu ve hızı ölçülmekte olup kontrolcüye geri besleme buradan sağlanmaktadır. Ancak enkoderdeki veri doğrudan geri besleme olarak verilmeyip gerçek sistemdeki yerini benzeten bir simulink bloğuna girerek elde edilen çıktı geri besleme olarak kullanılmaktadır.



Şekil 11.1. Test Düzeneği Mekanik Bağlantılar

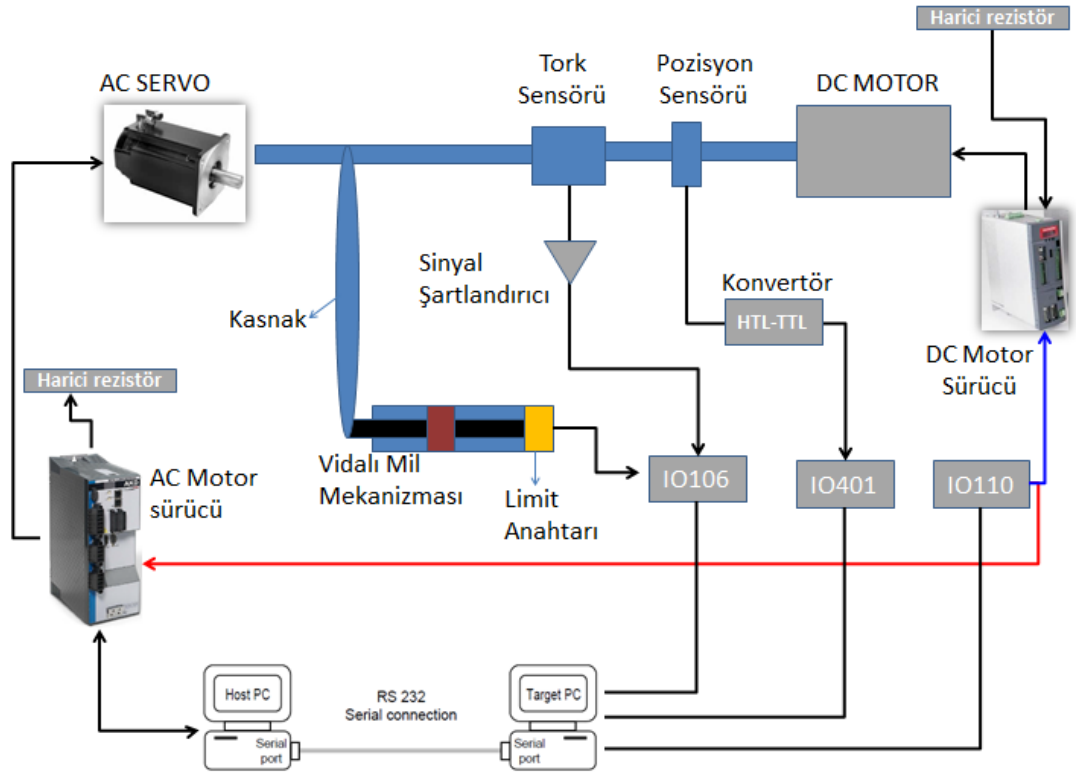
Test düzeneğinde kullanılan kontrolcüler ve elektrikli ekipmanlar Şekil 11.2’de verilmiştir.



Şekil 11.2. Test Düzeninin Elektriksel Bağlantıları

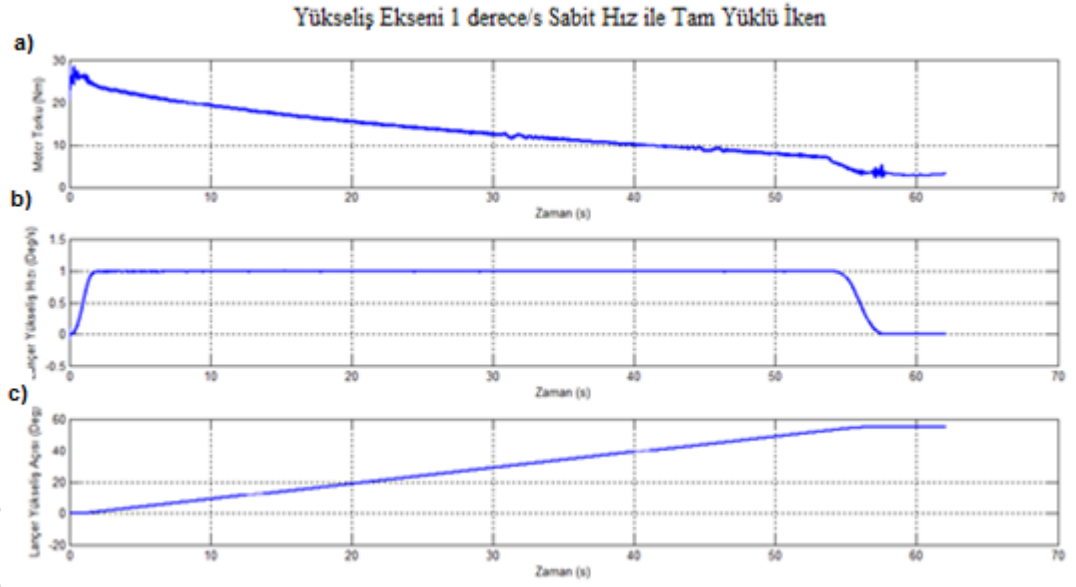
Test düzeninin genel olarak görünüşü Şekil 11.3’de verilmiştir. Bu şemadan da görülebileceği gibi kontrol edilecek AC Servo motor DC motora bağlanmıştır. İki motor arasında hız ve konumu ölçmek için enkoder ve torku ölçmek için tork algılayıcısı bulunmaktadır. DC motor yük motoru olarak çalışacağı için bu motora yükün zaman göre değişimi “DC Motor Sürücü” ye girilmektedir. “DC Motor Sürücü” ye girilmesi için öncelikle “Host PC” de veri oluşturulur. Daha sonra bu veriler “Target PC” ye uygun formata çevrilip buradan uygun modüle (IO 110) gönderilir. Bu modülden çıkıp “DC Motor Sürücü” ye girdi olarak girmektedir. Bu yük profiline göre “Host PC”, “AC Motor Sürücü” ile haberleşip gerekli hız ve konum kontrolü yapılmaktadır. Tork ve pozisyon algılayıcısından çıkan veriler

uygun formata çevrilip modüllere (IO 106 ve IO 401) aktarılmaktadır. Bu modüllerden çıkıp “Target PC” biriminden “Host PC” ye geri besleme olarak girmektedir. “AC Servo” ile tork algılayıcı arasındaki kasnak-vidalı mil mekanizmasına bağlı limit anahtarı ile lançerdeki limit noktası benzetilmektedir. “DC Motor Sürücü” ye bağlı olan harici rezistör “DC Motor” doğrudan lançeri benzettiği için jeneratör gibi çalışıp ürettiği enerjinin aktarılabilmesi için kullanılmaktadır. Lançer yükseliş ekseninde frenleme yaptığı için “AC Servo” da jeneratör gibi çalışmaktadır. Bu sebeple bu motora da daha küçük bir harici rezistör bağlanmaktadır.



Şekil 11.3. Test Düzeneği Şeması

Şekil 8.3 ve Şekil 8.4’da verilen lançer üzerindeki testlerin aynısını test düzeneği üzerinde de uygulanmıştır. Testler sonucu yükseliş eksenini benzetiminde elde edilen veriler Şekil 11.4’te verilmiştir.

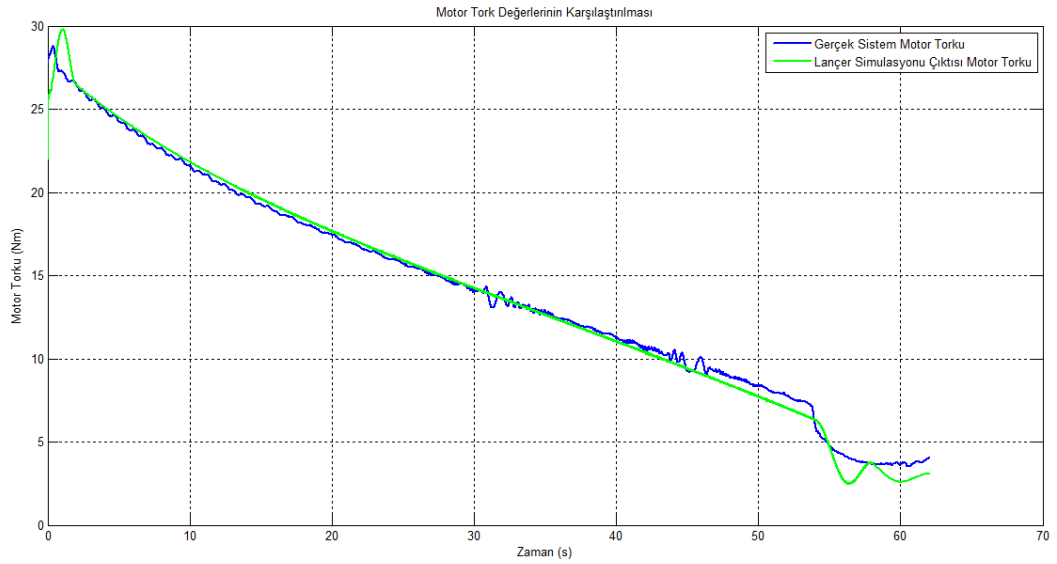


Şekil 11.4. Test Düzeneğinden Yükseliş Ekseninde Zamana Bağlı a) Motor Torku b) Lançer Yükseliş Açıl Hızı c) Lançer Yükseliş Açısı Değişimi

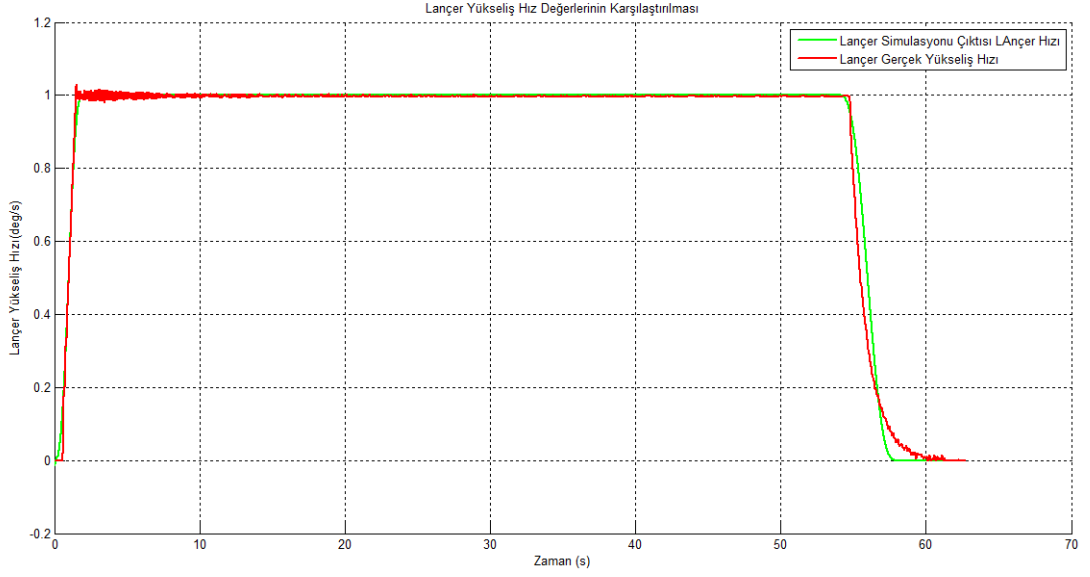
12. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE DEĞERLENDİRMELER

12.1 Sonuçların Karşılaştırılması

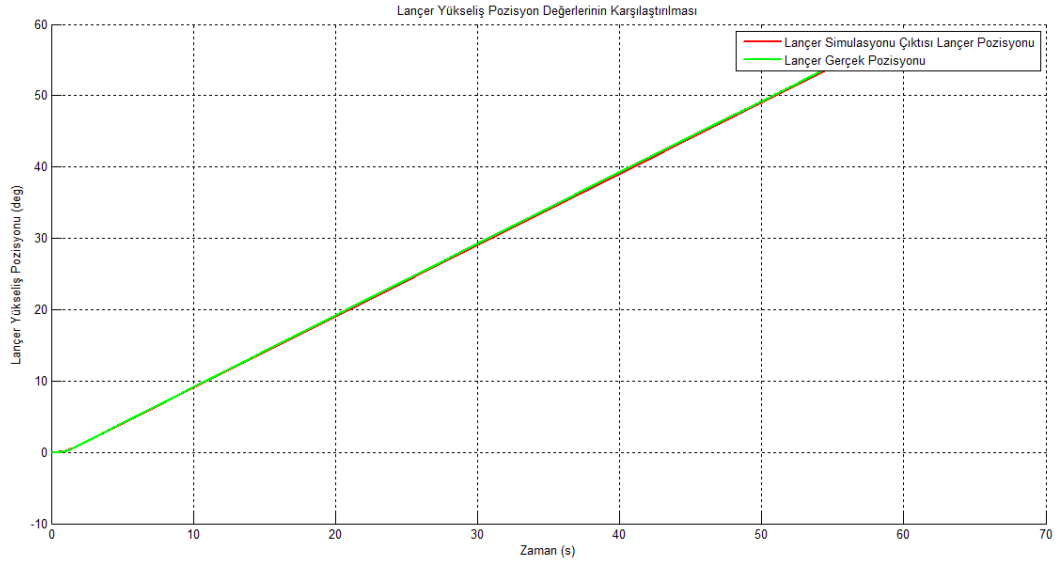
Bu tez çalışması kapsamında ilk olarak lançerin matematiksel modellemesi yapılmıştır. Daha sonra lançerin performans testleri yapıp, lançerin açığa göre hız ve konum grafikleri ile açığa göre torkun değişim grafikleri elde edilmiştir. Benzetim ve gerçek sistem üzerinde uygulanan performans testlerinin karşılaştırılması Şekil 12.1, Şekil 12.2, Şekil 12.3’de verilmiştir.



Şekil 12.1. Gerçek Sistem ile Lançer Benzetimi için Motor Tork Değerleri



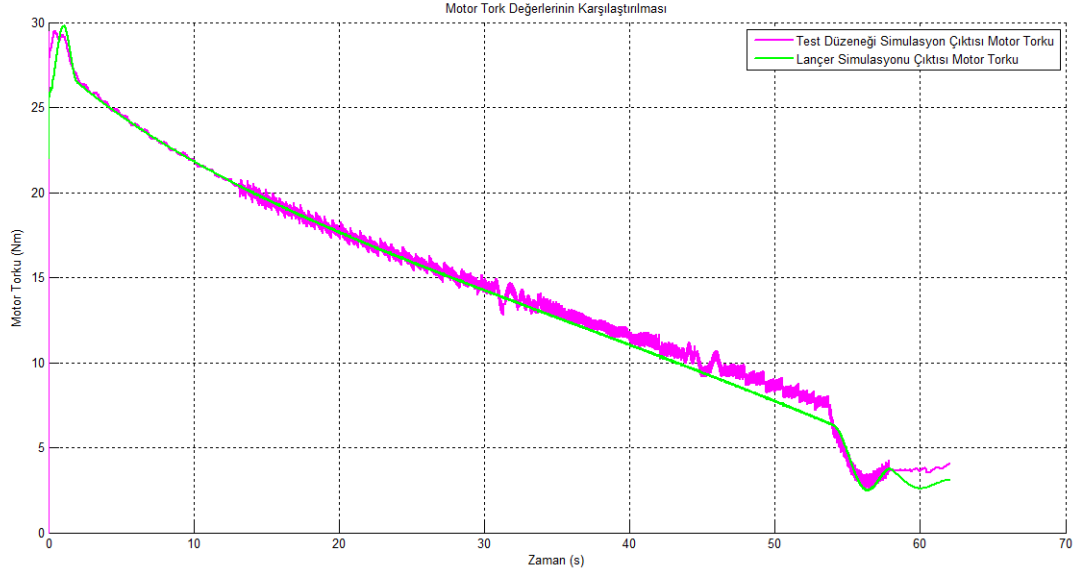
Şekil 12.2. Gerçek Sistem ile Lançer Benzetimi için Hız Profili



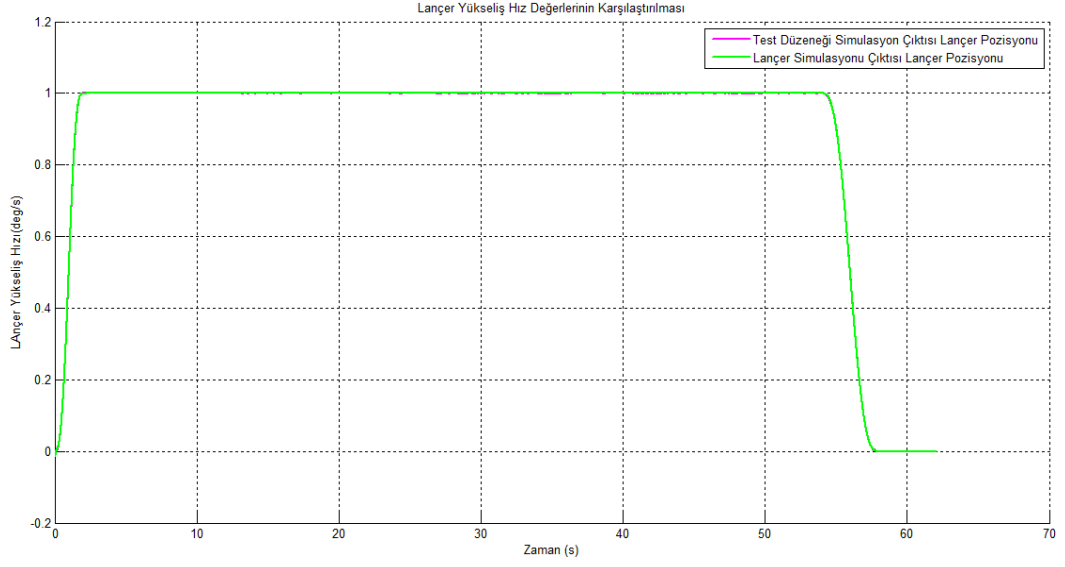
Şekil 12.3. Gerçek Sistem ile Lançer Benzetimi için Pozisyon Profili

Bu sonuçlar değerlendirilerek lançerin matematiksel modeli doğrulanmaktadır. Bu matematiksel model üzerinden PID kontrolü yapılarak lançerin kontrolü için gerekli PID parametreleri belirlenmiştir. Ancak gerçek sistemde kullanılan motor ve sürücünün bilgileri olmadığından parametrelerin karşılaştırması yapılamamaktadır.

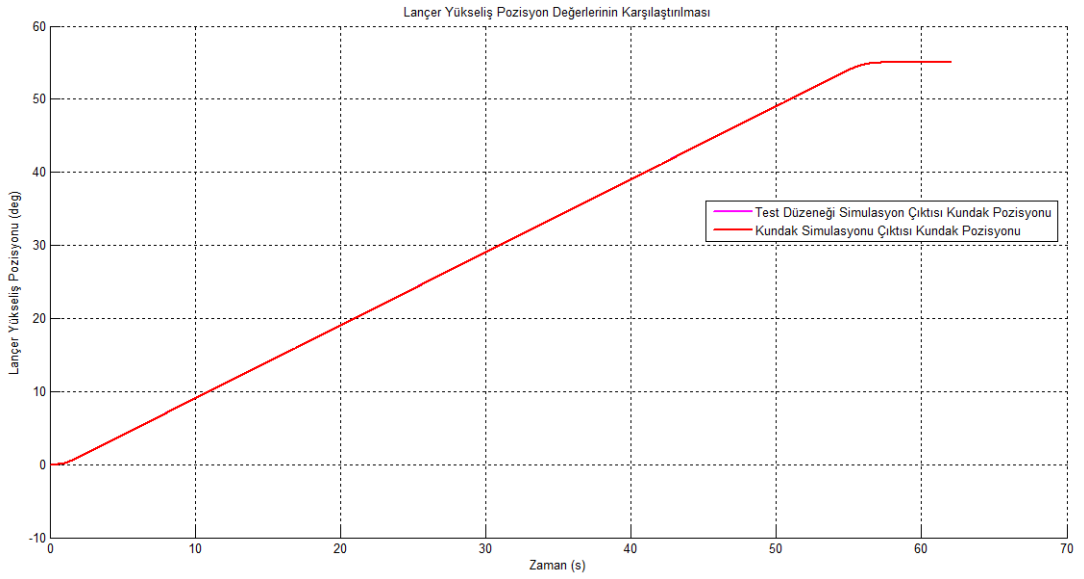
Laeri benzetebilen test düzeneği oluşturularak matematiksel modeli yapılmıştır. Test düzeneğinin matematiksel modeline de laere uygulanan girdiler uygulanarak PID kontrolü uygulanmıştır. Laer matematiksel modeli ile test düzeneği matematiksel modelinin performans karşılaştırılması Şekil 12.4, Şekil 12.5, Şekil 12.6’da verilmiştir.



Şekil 12.4. Laer Matematiksel Modeli ile Test Düzeneği Modeli Motor Tork Değerleri



Şekil 12.5. Lançer Matematiksel Modeli ile Test Düzeneği Modeli Hız Grafiği

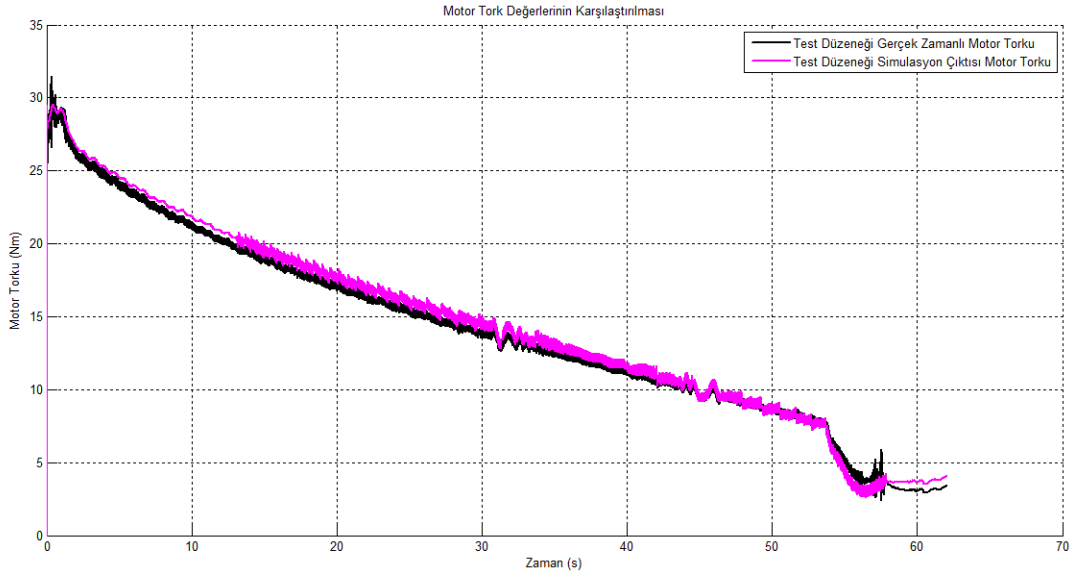


Şekil 12.6. Lançer Matematiksel Modeli ile Test Düzeneği Modeli Pozisyon Grafiği

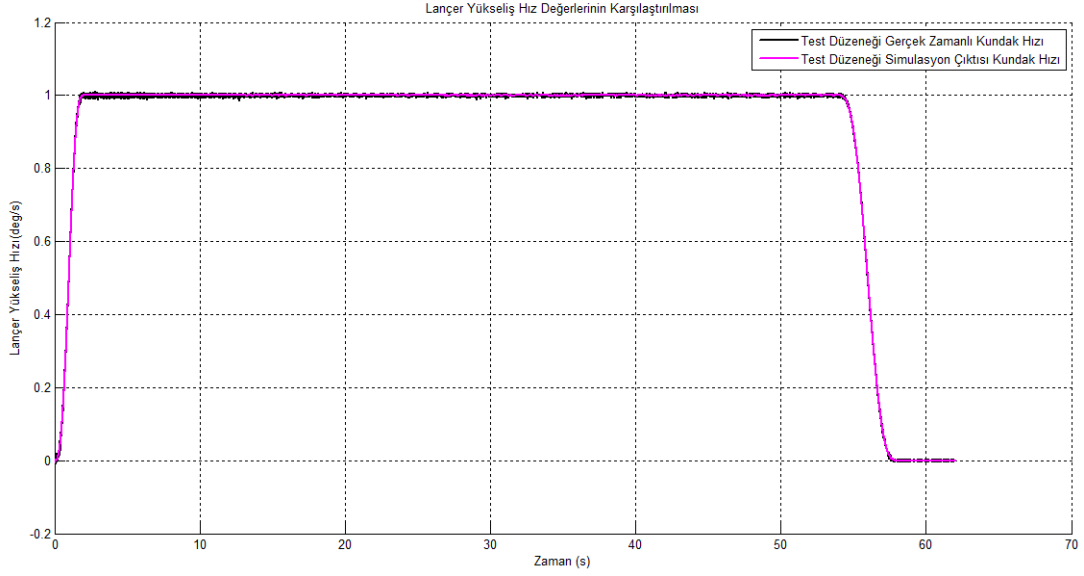
Şekil 12.4, Şekil 12.5, Şekil 12.6’da verilen grafiklere göre test düzeneği matematiksel modeli doğrulanmıştır. Lançer matematiksel modelinin kontrolünde

kullanılan PID değişkenleri ile test düzeneğinin matematiksel modelinin kontrolünde kullanılan PID değişkenleri aynıdır.

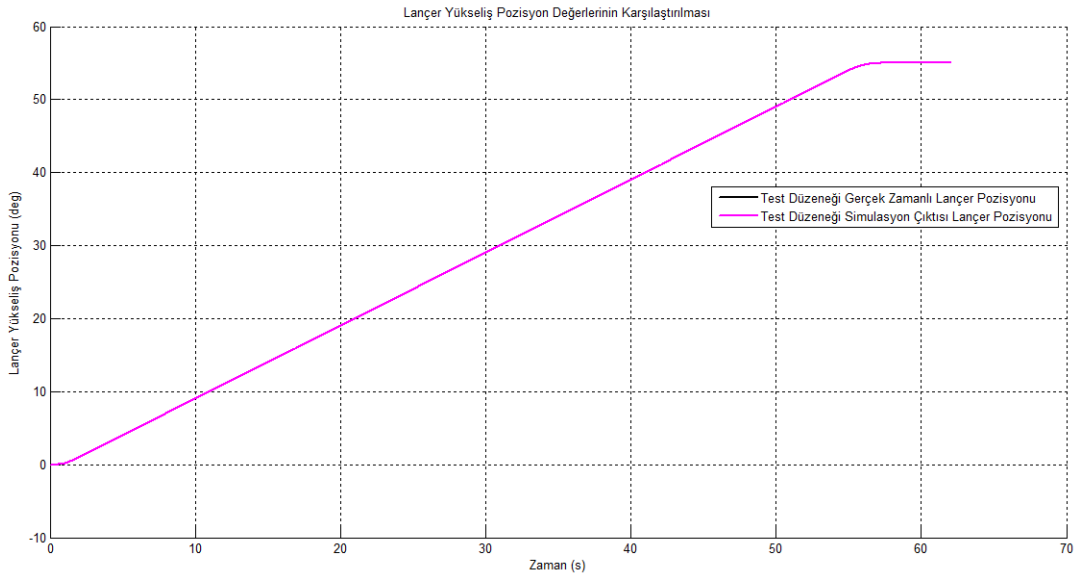
Test düzeneği modeline uygun olarak test düzeneği oluşturulmuştur. Daha sonra test düzeneği matematiksel modeline uygulanan performans testleri uygulanmıştır. Aynı PID değişkenleri kullanılarak yapılan kontrole göre grafikler karşılaştırılmıştır. Test düzeneği matematiksel modeli ile test düzeneği gerçek sisteminin karşılaştırılması Şekil 12.7, Şekil 12.8, Şekil 12.9’ da verilmiştir.



Şekil 12.7. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Simulasyon Motor Tork Grafiği



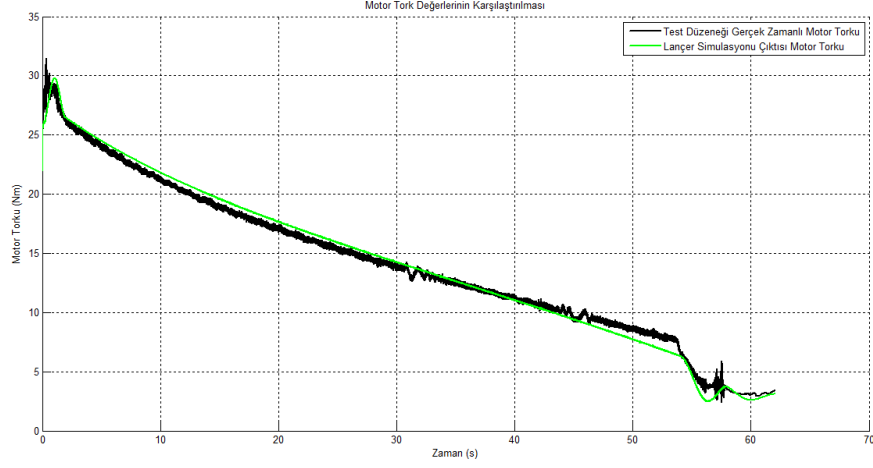
Şekil 12.8. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Simulasyon Hız Profili



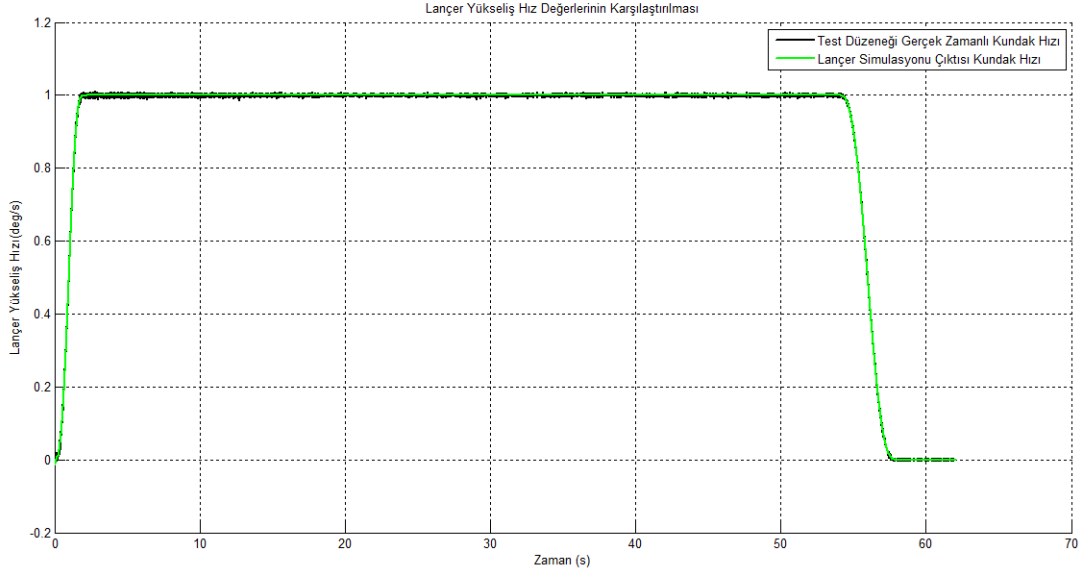
Şekil 12.9. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Simulasyon Konum Profili

Son olarak da test düzeneği gerçek sistemi üzerinde yapılan PID kontrolünde kullanılan değişkenler ile lançer matematiksel modelinin kontrolü yapılmıştır. Bu PID değişkenleri ile yapılan kontrol ile lançer matematiksel modelinde kullanılan

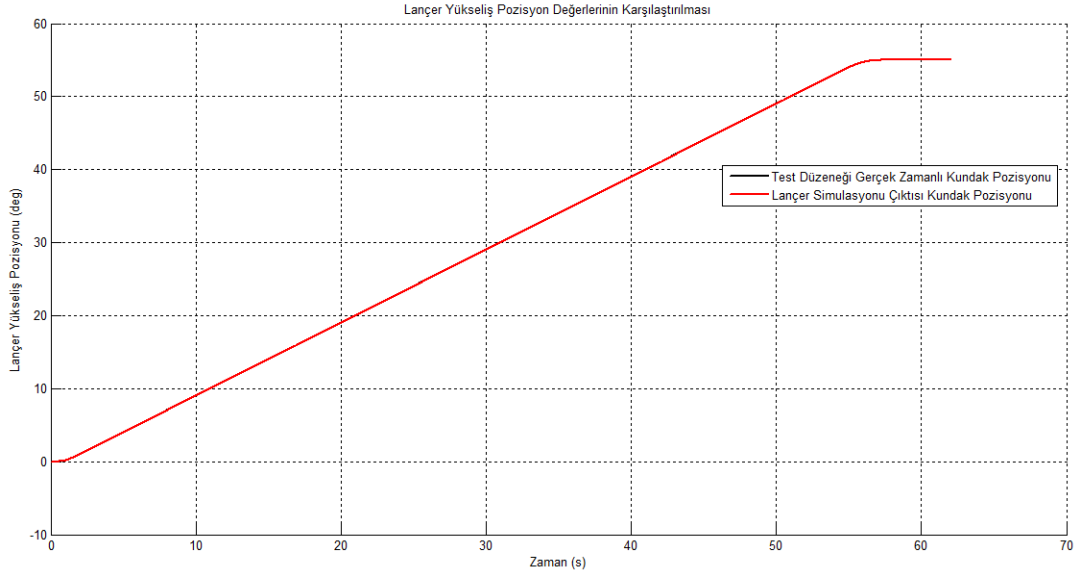
PID değişkenleri ile yapılan kontrol Şekil 12.10, Şekil 12.11, Şekil 12.12’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 12.10. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Lançer Simulasyon Motor Tork Grafiği

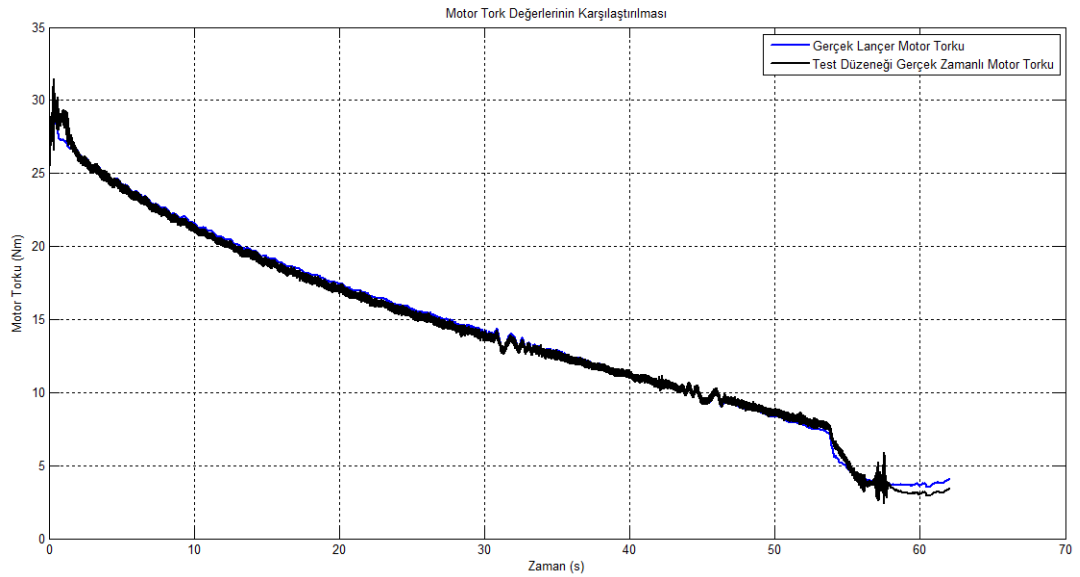


Şekil 12.11. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Lançer Simulasyon Hız Profili

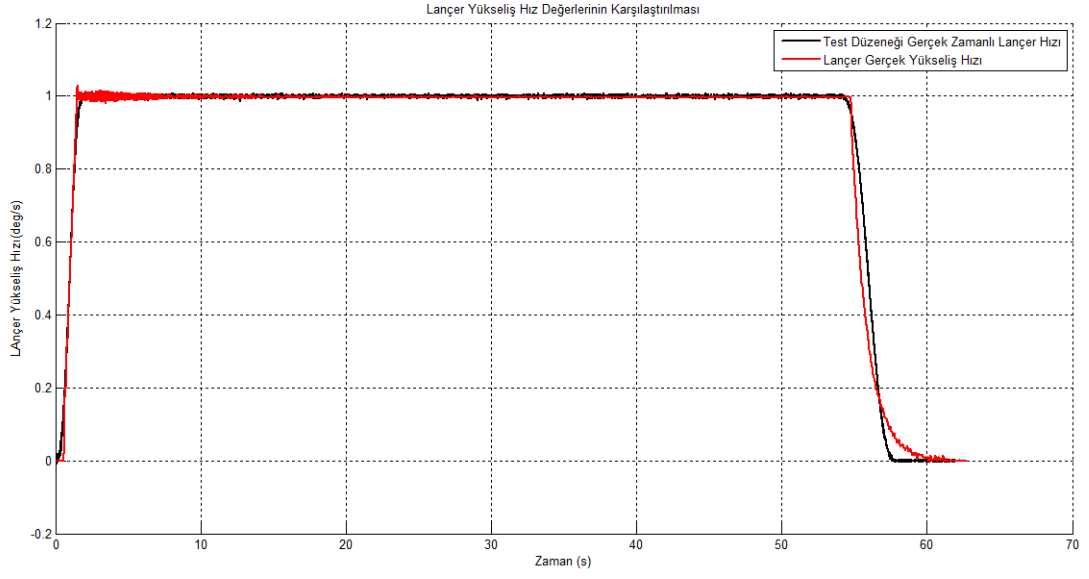


Şekil 12.12. Test Düzeneği Gerçek Sistem ile Lançer Simulasyon Pozisyon Profili

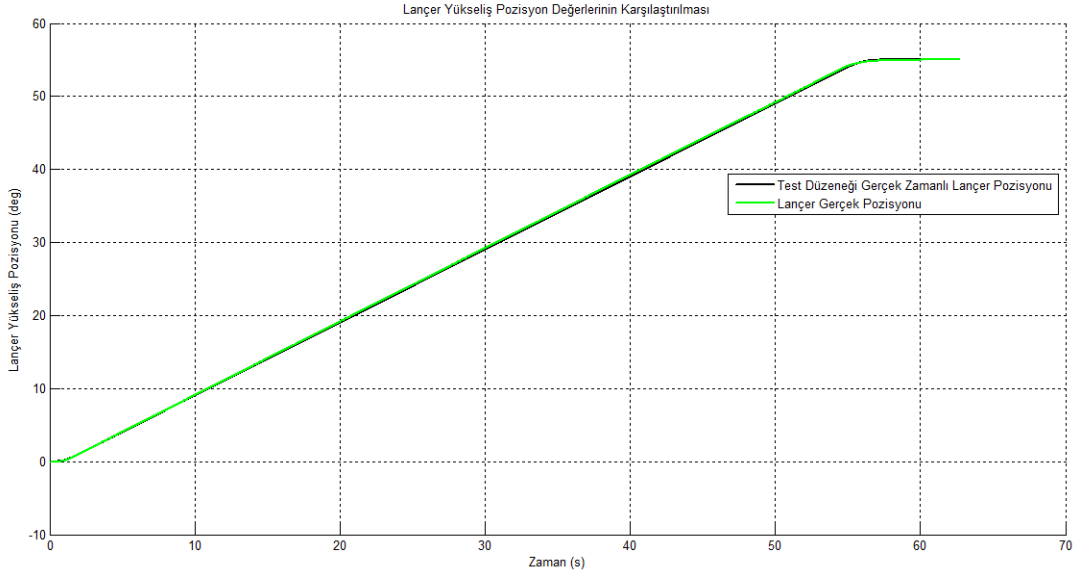
Ayrıca, test düzeneği gerçek sistemi üzerinde yapılan testler sonucu elde edilen grafikler ile gerçek lançer üzerinde yapılan grafikler Şekil 12.13, Şekil 12.14, Şekil 12.15’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 12.13. Gerçek Lançer ile Test Düzeneği Motor Tork Grafiği



Şekil 12.14. Gerçek Lançer ile Test Düzeneği Hız Profili



Şekil 12.15. Gerçek Lançer ile Test Düzeneği Pozisyon Profili

12.2 Değerlendirmeler ve Sonuç

Tez alışması kapsamında lançer üzerinde yapılan testler çıktısı olan tork, hız ve konum grafikleri olmasına rağmen kontrolcü firma tarafından kontrolcünün detay bilgileri verilmemiştir. Bu sebeple kontrolcü detaylı olarak modellenememiştir.

Lançer modellemesi yapılırken sürtünmenin etkisini görebilmek için sadece sürtünmenin etkili olduğu dönüş eksenindeki sistem dinamiği kullanılmıştır. Bu eksenindeki sürtünme noktaları yükseliş eksenindeki ile benzerlik gösterdiği için dönüş ekseninde belirlenen sürtünme modeli kullanılmıştır. Ancak kontroldeki karmaşıklık yükseliş ekseninde daha fazla olduğu için bu tez kapsamında sadece bu eksen kontrolü detaylı anlatılmıştır. Çünkü dönüş ekseninde motor ile lançer arasında sabit bir aktarma oranı bulunmasına rağmen, yükseliş ekseninde farklı bir geometri olduğu için kontrol daha zordur.

Bu tez kapsamında lançer üzerinde alınan veriler, lançer benzetim modelinden alınan veriler, test düzeneğinden alınan veriler, test düzeneği modelinden alınan veriler ile lançerin izlemesi gereken referans profil olmak üzere beş çeşit veri vardır. Lançerin izlemesi gereken referans profil kontrolde herhangi bir hata olmadığı durumda gerçekleşmesi beklenen profildir. Ancak, bu referans profil gerçek lançer testlerinde kullanılmamış olup kontrolcü firma tarafından nasıl bir referans izlendiği belirtilmemiştir. Bu sebeple gerçek sistem üzerinde yapılan testlerde elde edilen verilerden tahmini bir profil çıkarılarak bu referans profil kabul edilmiştir. Bu üç durumda tork, hız ve konum grafikleri elde edilmiştir.

Gerçek lançer ile lançer benzetimi arasındaki grafiklerde (şekil 12.1, şekil 12.2, şekil 12.3) farklılık oluşmasının sebepleri şunlardır:

- Gerçek lançer kontrolünde kullanılan hız ve konum profilinin bilinmemesi,
- Srtnmelerden kaynaklanan hataların tam olarak modellenememesi,
- Gerçek kontrolcünün detaylarının bilinmemesidir.

Hız ve konum grafikleri incelendiğinde ivmelenme kısımlarında farklılıklar olduğu grlmştir.

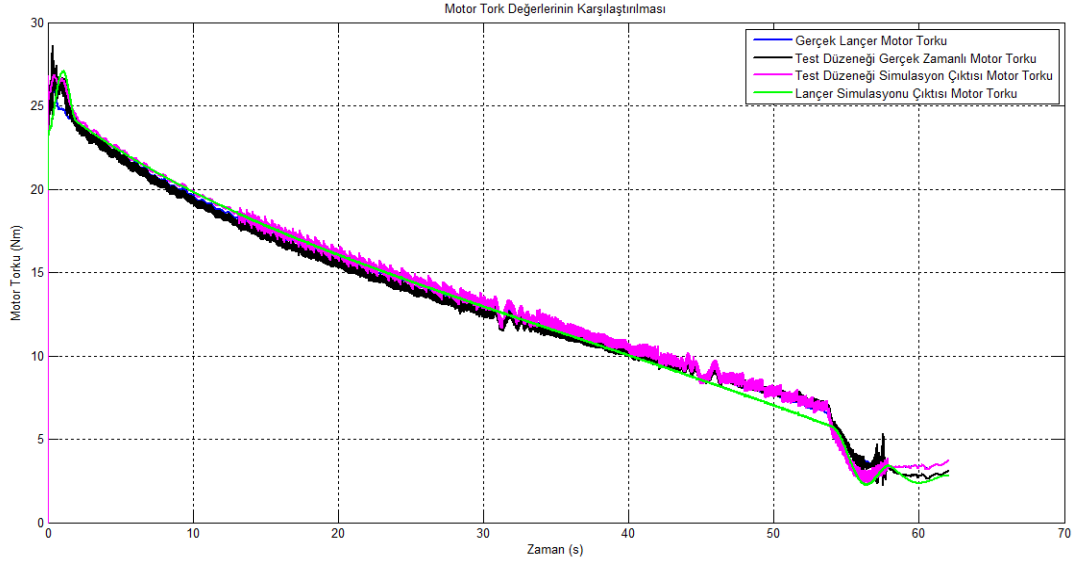
Lançer matematiksel modeli ile test düzeneği modelinin grafikleri (Şekil 12.4, Şekil 12.5, Şekil 12.6) incelendiğinde hız ve konum profilinin sağlandığı sadece tork profilinde farklılık olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi de test düzeneğinin lançer dinamiklerinin tamamını yansıtamamasıdır.

Test düzeneği modeli ile test düzeneği gerçek sistemi grafiklerinde (Şekil 12.7,Şekil 12.8, Şekil 12.9) dikkate değer bir farklılık olmadığı değerlendirilmiştir.

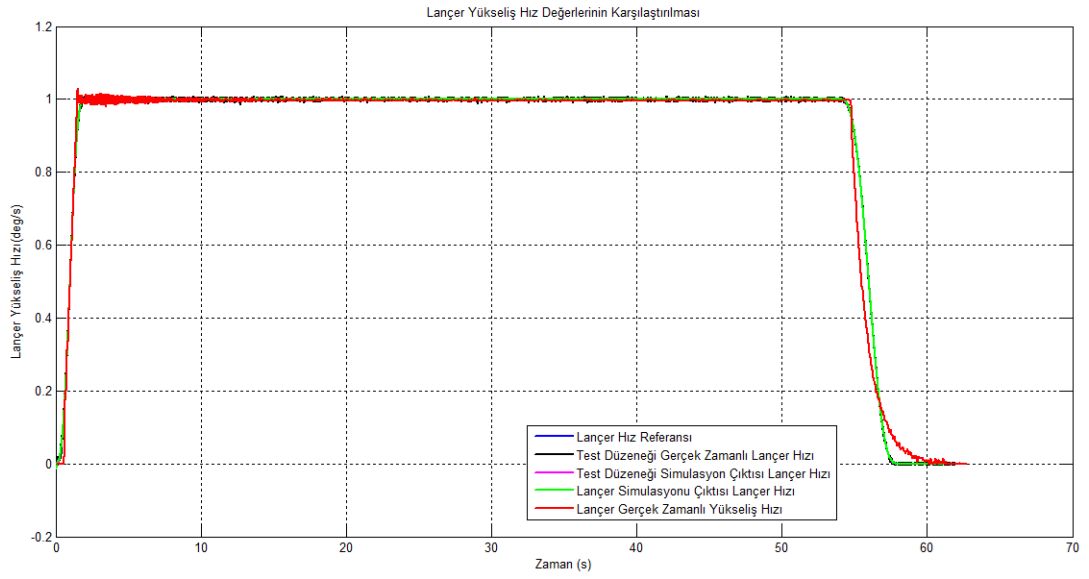
Test düzeneği gerçek sistemi ile lançer benzetim grafikleri (Şekil 12.10, Şekil 12.11, Şekil 12.12) değerlendirildiğinde lançer matematiksel modelinin test düzeneği ile benzetilebildiği görülmüştür. Bu durumda lançerin matematiksel modeli oluşturulduktan sonra test düzeneği ile kontrol edilebileceği değerlendirilmektedir.

Test düzeneği gerçek sistemi ile lançer gerçek sistemini karşılaŐtıran grafikler (Şekil 12.13, Şekil 12.14, Şekil 12.15) incelendiğinde test düzeneği ile lançerin benzetilebildiği görülmektedir. Hız ve konum profillerinde ivmelenme kısımlarında bir farklılık oluşmaktadır. Bunun büyük ölçüde sebebi gerçek lançerin referans profillerinin bilinemesidir.

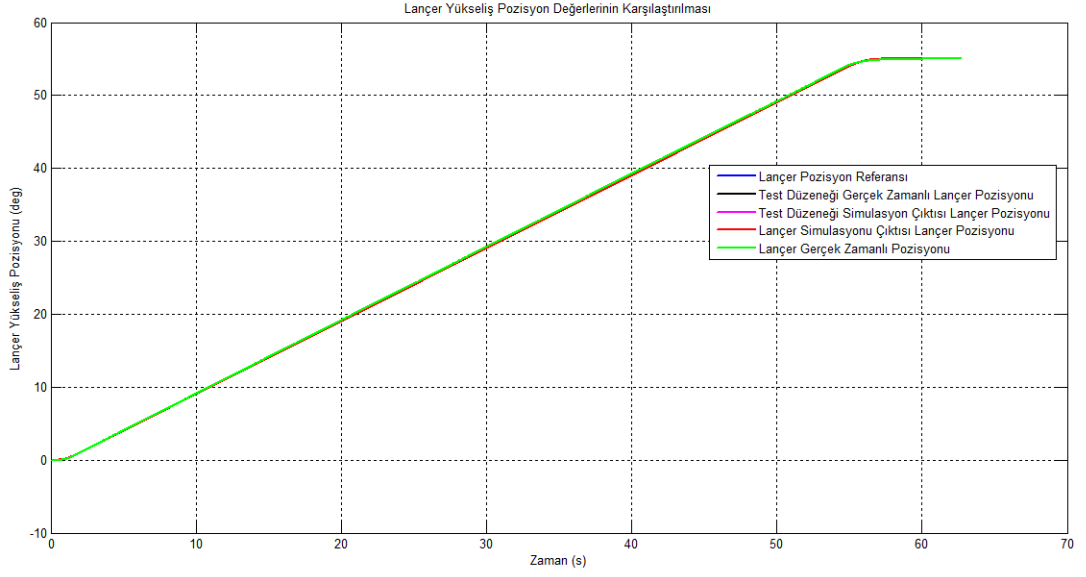
BeŐ adet durumun karşılaŐtırıldıđı üç farklı değerşken için grafikler (Şekil 12.16, Şekil 12.17, Şekil 12.18) verilmiştir.



Şekil 12.16. Motor Torkunun Farklı Durumlar için Değişimi



Şekil 12.17. Hız Profiline Farklı Durumlar için Değişimi



Şekil 12.18. Konum Profilinin Farklı Durumlar için Değişimi

Bu tez çalışmasından sonra kontrolcüsünün detaylarının bilindiği bir lançer üzerinde benzer bir çalışma yürütülecektir.

Sürtünme modellemelerde kullanılan test verilerinin sayısı artırılarak sürtünme modelini oluşturmak için deney tasarımı çalışmasının yürütülmesi planlanmaktadır.

Ayrıca, bu tez kapsamında yapılan çalışmaların stabilize platformlara uygulanması üzerinde çalışılacaktır. Stabilize platformlarda roket lançerinde kabul edilebilir olan hataların önemi daha fazla olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] “Wikipedia” erişim adresi:
http://en.wikipedia.org/wiki/Katyusha_rocket_launcher, erişim tarihi: 11.01.14
- [2] “Military-Today” erişim adresi:
<http://www.military-today.com/artillery/grad.htm>, erişim tarihi: 11.01.14
- [3] “Military-Today” erişim adresi:
<http://www.military-today.com/artillery/smerch.htm>, erişim tarihi: 11.01.14
- [4] “Military-Today” erişim adresi:
http://www.military-today.com/artillery/m270_mlrs.htm, erişim tarihi: 11.01.14
- [5] “Military-Today” erişim adresi:
<http://www.military-today.com/artillery/ws2.htm>, erişim tarihi: 11.01.2014
- [6] “Roketsan” erişim adresi:
<http://www.roketsan.com.tr/urunler-hizmetler/kara-sistemleri/satihtan-satiha-roket-sistemleri/t-122-cnra-122-mm-lik-cok-namlulu-roketatar>, erişim tarihi: 12.01.14
- [7] “Roketsan” erişim adresi:
<http://www.roketsan.com.tr/wp-content/uploads/2012/09/topcu-roket-turkce.pdf>, erişim tarihi: 12.01.14
- [8] Hilkert, J.M, Inertially Stabilized Platform Technology, IEEE Control Systems Magazine, Şubat 2008.
- [9] Bredenkamp, A.F.L., 2007, Development and Control of a 3-axis Stabilised Platform, Yüksek Lisans Tezi, Stellenbosch Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Matieland
- [10] Weeks G.E, Cost T.L. Coupled-interaction launch behaviour of a flexible rocket and flexible launcher [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1980, 17(5): 432-439
- [11] Dingguo, Z., Research of Simulation and Control of Dynamics of Rocket Launching System, Doktora Tezi, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 1998, 5-61
- [12] Dingguo, Z., Jian-giang, X., A Dynamic Model for Rocket Launcher with Coupled Rigid and Flexible Motion, Applied Mathematics and Mechanics, May 2005
- [13] Dziopa, Z., Krzysztofik, I., Koruba, Z., An Analysis of the Dynamics of a Launcher-Missile System on a Moveable Base, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 58, 2010 .

- [14] Krzystofik, I., Koruba, Z., Adaptive Control of a Anti-Aircraft Missile Launcher Mounted on a Mobile Base, Theoretical & Applied Mechanics Letters, July 2012.
- [15] Akgül, E., Mutlu, M., Saranlı, A., Yazıcıoğlu, Y., A Comparative Evaluation of Adaptive and Non-adaptive Sliding Mode, LQR & PID Control for Platform Stabilization, IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 1547-1552, Dubrovnik, Croatia, October 3-5,2012.
- [16] Koruba, Z., Dziopa, Z., Krzystofik, I., Dynamics of a Controlled Anti-Aircraft Missile Launcher Mounted on a Moveable Base, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2, 279-295, 2010.
- [17] Olsson, H., Astrom, K.,J., Caunas de Wit, C., Gafvert, M., Lischinsky, P., Friction Models and Friction Compensation, European Journal of Control, 4(3), 176-195, 1997.
- [18] Iurian, C., Ikhouane, F., Rodellar, J., Grino, R., Identification of a System with Dry Friction, Institut d'Organitzacio i Control de Sistemes Industrials, Universitat Politecnica De Catalunya
- [19] Hvoidal, M., Olesen, C., 2011, Friction Modelling and Parameter Estimation for Hydraulic Asymmetrical Cylinders, Yüksek Lisans Tezi, Aalborg University Electro-Mechanical System Design, Aalborg.
- [20] “Control Tutorials For Matlab and Simulink” erişim adresi:
<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=SystemModeling>, erişim tarihi: 29.06.2014
- [21] Thyssenkrupp Rothe Erde firması çember dişli kataloğu

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SERT Serdar
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 26.08.1984 Çanakkale
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (536) 729 64 11
e-mail : sertserdar@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	ODTÜ/Makine Mühendisliği	2007
Yüksek Lisans	TOBB ETÜ/Makine Mühendisliği	2015

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-Halen	ROKETSAN A.Ş.	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

[1] Sert S., Akgöz Bingöl A., Taşcıoğlu Y., Farklı sürtünme modellerinin çok namlulu roket lançeri üzerinde karşılaştırılması, 25-27 Haziran SAVTEK 2014 Ankara, SAVTEK 2014 için sunuldu.

[2] Sert S., Taşcıoğlu Y., Dynamic Modeling of a Multiple Launch Rocket System, 1-3 Temmuz The 2015 International Conference of Mechanical Engineering (ICME 2015) Londra, ICME 2015 tarafından kabul yazısı gelmiştir.