

**DİSKLİ SARKAÇ DÜZENEĞİNİN DENGİ NOKTASI
KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Erdem BALIK

Anabilim Dalı: Disiplinler Arası
Programı: Mekatronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan TEMELTAŞ

KASIM 2005

**DISKLİ SARKAÇ DÜZENEĞİNİN DENGE NOKTASI
KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS

Müh. Erdem BALIK

518031009

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Ekim 2005

Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Kasım 2005

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Hakan TEMELTAŞ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Leyla GÖREN (İ.T.Ü.)

Doç. Dr. Ata MUĞAN (İ.T.Ü.)

KASIM 2005

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen, olaylara farklı bakış ve yaklaşımı ile bana yön veren ve örnek olan çok kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Hakan TEMELTAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm zor anlarımda beni destekleyen ve yol gösteren değerli hocam Sayın Dr. Murat YEŞİLOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitimim boyunca her zaman yanımda olan ve her şartta maddi, manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Erdem BALIK

Kasım, 2005

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	i
KISALTMALAR	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1 GİRİŞ	1
1.1 Diskli Sarkaç Düzeneği ve Önemi	4
1.2 Eksik Uyarımlı Sistemler	5
1.3 Diskli Sarkaç Düzeneği Hakkında Literatürdeki Çalışmalar	5
1.3.1 Diskli Sarkaç Sisteminin Lineer Olmayan Kontrolü	6
1.3.2 Eksik Uyarımlı Mekanik Sistemlerin Bağlamalı ve Sönümleme Atamalı Kontrol ile Kararlılığı	7
1.3.3 Genelleştirilmiş PI Kontrolü ile Diskli Sarkaç Ssteminin Salınım ve Denge Noktası Kontrolü	7
1.3.4 Diskli Sarkaç Sisteminin Sistmein Global Kararlılığı	7
1.3.5 İki Serbestlik Dereceli ve Simetrik Yapılı Eksik Uyarımlı Sistemin Kontrolü	8
1.4 Tezin Organizasyonu	8
2 MODELLEME	9
2.1 Hareket Denklemleri	9
2.1.1 Motor Denklemleri	9

2.1.2	Sarkaç Denklemleri	10
3	DENEYSEL ÇALIŞMA	12
3.1	Diskli Sarkaç Sisteminin Mekanik Tasarımı	13
3.1.1	I-DEAS Programı ile Sistem Parametrelerinin Elde Edilmesi	15
3.2	Diskli Sarkaç Sistemindeki Sensör Ve Eyleyiciler	17
3.2.1	DC Motor Ve Sürücüsü	17
3.2.2	Takogeneratör	19
3.2.3	Artırımlı Encoder	19
3.2.4	DS1104 ve CP1104	20
3.3	Diskli Sarkaç Sisteminde Kullanılan Yazılımlar	21
3.3.1	MatLAB	21
3.3.2	RTI – Control Desk	24
4	KONTROL	26
4.1	Salınım Kontrolü	27
4.1.1	Deneysel Çalışma	27
4.1.2	Sürtünme Parametrelerinin Elde Edilmesi	28
4.1.3	Matlab – Simulink Ortamında Bir Sonraki Salınımda Erişilecek Maksimum Açısal Konumun Belirlenmesi	29
4.1.4	Matlab – Simulink Ortamında Kontrolörün Kesme Açısının Belirlenmesi	30
4.2	Denge Noktası Kontrolü	32
4.2.1	PID Kontrolü	32
4.2.2	LQ Kontrol	35
4.3	SONUÇ	37
5	SONUÇ	38
	KAYNAKLAR	39
	ÖZGEÇMİŞ	42
	EK A SÜRTÜNME DENEYİ VERİLERİ	43

EK B SİSTEMİN YAYLI HALİNİN HAREKET DENKLEMLERİ	46
EK C KONTOL ALGORİTMALARINA AİT KAZANÇLARIN MATLAB ORTAMINDA HESAPLANMASI	48

KISALTMALAR

IDA-PBC : Interconnection and damping assignment pasivity based control
GPI : Generalized PI
LQR : Lineer Quadratic Regulator

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 : Roket sistemi	1
Şekil 1.2 : Balistik yürüyüş sistemi	2
Şekil 1.3 : Cart-pole sistemi	3
Şekil 1.4 : Furuta sistemi	3
Şekil 1.5 : (a) Acrobot, (b) Pendubot Sistemleri	4
Şekil 1.6 : Diskli sarkaç düzeneği.....	4
Şekil 2.1 : Sistem modeli	11
Şekil 2.2 : Motor modeli.....	12
Şekil 3.1 : Diskli sarkaç sistemi ve sistemde kullanılan diğer araçlar.....	13
Şekil 3.2 : Sistemdeki güç ve sinyal akış diagramı	13
Şekil 3.3 : Sistem elemanları	15
Şekil 3.4 : Diskli sarkaç düzeneği.....	15
Şekil 3.5 : I-DEAS programında kütle merkezi hesabına ilişkin arayüz.....	16
Şekil 3.6 : I-DEAS programında eylemsizlik momenti hesabına ilişkin arayüz	16
Şekil 3.7 : DC motor ve takogeneratör	17
Şekil 3.8 : Sürücü devre şeması	18
Şekil 3.9 : Artırımlı encoder yapısı	19
Şekil 3.10 : Mutlak encoder yapısı	20
Şekil 3.11 : Sistemde kullanılan artırımlı encoder.....	20
Şekil 3.12 : CP1104 kontrol paneline ait giriş çıkışlar	21
Şekil 3.13 : Sisteme kontrolüne ait Matlab-Simulink modeli.....	22
Şekil 3.14 : Matlab – Simulink Ortamında Gerçek Zamanlı Verilerin Alınması.....	22
Şekil 3.15 : Matlab – Simulink Ortamında Motor PWM Cıkışlarının Oluşturulması	23
Şekil 3.16 : Matlab – Simulink Ortamında Gerçek Zamanlı Alınan Verilerin Filtrelenmesi	23
Şekil 3.17 : Matlab – Simulink Ortamında Salınım Kontrolünün Gerçekleştirilmesi	24
Şekil 3.18 : ControlDesk programı ile tasarlanan arayüz	25
Şekil 4.1 : Kontrol şeması.....	26
Şekil 4.2 : Sarkacın açısal pozisyonu ile kontrolör seçimi	27

Şekil 4.3 : Sarkaç açısal pozisyonun gerçek zamanlı ve simülasyondan elde edilen değerleri	28
Şekil 4.4 : Sürtünme modeli eklenmiş sistem modeli.....	29
Şekil 4.5 : Bir sonraki salınımda sarkacın erişeceği maksimum açı değerini hesaplayan model.....	30
Şekil 4.6 : Maksimum açısal konumun nümerik değer için simülasyonu	30
Şekil 4.7 : Kesim açısının belirlendiği model.....	31
Şekil 4.8 : Kesim açısının nümerik değer için simülasyonu.....	32
Şekil 4.9 : $\Theta=0.00016$ radyan için, $K=-340.3 -6035.7 -867.6$	34
Şekil 4.10 : Motor açısal hızı.....	34
Şekil 4.11 : Sarkacın açısal hızı.....	34
Şekil 4.12 : Sarkacın açısal pozisyonu	35
Şekil 4.13 : Kontrol girişi	35
Şekil 4.14 : Motorun açısal hızı.....	36
Şekil 4.15 : Sarkacın açısal hızı.....	36
Şekil 4.16 : Sarkacın açısal konumu.....	36
Şekil 4.17 : Kontrol girişi	36
Şekil 4.18 : Motorun açısal hızı.....	37
Şekil 4.19 : Sarkacın açısal hızı.....	37
Şekil 4.20 : Sarkacın açısal konumu.....	37
Şekil 4.21 : Kontrol girişi	37

TABLO LİSTESİ

Tablo 1	Sistem elemanlarının parametreleri.....	17
Tablo 2	Motor parametreleri	18
Tablo 3	Salınım kontrolü algoritması.....	27

SEMBOL LİSTESİ

i	: Motor terminal akımı
J_w	: Diskin sarkacın dönme eksenine göre eylemsizlik momenti
J_p	: Sarkacın dönme eksenine göre eylemsizlik momenti
k_E	: Motorun ters emf katsayısı
k_T	: Motorun dönme moment katsayısı
k_{pp}	: Sarkacın oransal kontrol kazanç katsayısı
k_{dp}	: Sarkacın türevsel kontrol kazanç katsayısı
k_{dr}	: Diskin türevsel kontrol kazanç katsayısı
L	: Motorun terminal endüktansı
R_T	: Motorun terminal direnci
u	: Kontrol işareti
T_g	: Yerçekiminin sarkaca uyguladığı dönme momenti
T_m	: Motorun oluşturdu döndürme momenti
g	: Yerçekimi ivmesi
φ	: Diskin açısal konumu
θ	: Sarkacın açısal konumu

ÖZET

Sarkaç düzeneği, dinamik ve kontrol problemlerinin basitleştirilmiş halini oluşturması nedeni ile Galileo'dan günümüze kadar çalışıla gelmiş önemli bir sistemdir. Birçok önemli mühendislik probleminin dinamik davranışları sarkaç sistemlerinin dinamik davranışına benzemesi nedeni ile kontrol sistemlerinin tasarımı için önemli rol oynamaktadır.

Eylemsizlik diskli sarkaç düzeneği ilk olarak 1999 yılında University of Illinois at Urbana Champaign'den Prof. Mark Spong tarafından ortaya koyulmuştur. Sistem, sarkaç ucunda motora akuple edilerek yerleştirilmiş olan eylemsizlik diskinden oluşmaktadır. Sistemin kontrolü motor aracılığı ile uyarılan disk ile sağlanmaktadır. Disk DC motor ile uyarılmakta ve diskin açisal ivmesi sarkacın dönme momentini oluşturmaktadır. Sistem her ne kadar Acrobot ve Pendubot sistemlerini anımsatsa da bu iki sistemden farklı olarak diskin sahip olduğu simetrik kütle dağılımı yüksek doğruluklu analitik yaklaşımların yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Düzenek, iki serbestlik dereceli ve tek uyarma elemanlı eksik uyarmalı sistem olması nedeni ile önemli bir yere sahiptir. Aynı zamanda, sistemin lineer olmayan, eksik uyarmalı olması ve gelişmiş kontrol metodolojilerinin (geribesleme lineerleştirme, pasifliğe dayalı, geri adımlama ve hibrid kontrol) uygulanmasına olanak sağlaması açısından da literatürde önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışmanın girişinde sarkaç sistemleri ve eksik uyarmalı sistemler hakkında bilgi verilerek diskli sarkaç sistemi tanıtılacaktır. Sistem hakkında bu güne kadar yapılan çalışmalara değinilecektir. İkinci bölümde sistem modeli çıkarılacaktır. Üçüncü bölümde yapılan deneysel çalışmalar hakkında bilgi verilecek, dördüncü bölümde sistem salınım ve denge noktası için incelenerek kontrolörler tasarlanacaktır. Çalışma sonuçların verilmesi ile tamamlanacaktır.

SUMMARY

The pendulum is one of the most important examples in dynamics and control and has been studied since the time of Galileo. Most important engineering systems can be approximately modeled as pendula in order to gain insight into their dynamic behavior and for control system design.

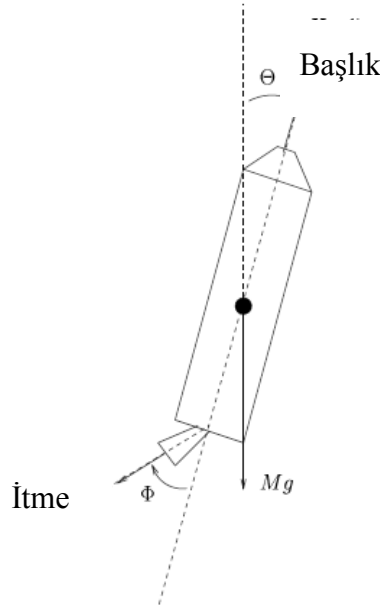
Inertia wheel pendulum was first observed by M.W.Spong. It is a physical pendulum with a symmetric disk attached to the end which is free to swing about an axis to the axis of rotation of the pendulum. The disk is actuated by a DC motor and the coupling torque generated by the angular acceleration of the disk can be used to actively control the system. The control problems for the Inertia Wheel Pendulum are reminiscent for the Acrobot and Pendubot, but are distinct enough to warrant a separate investigation. Because of the symmetric mass distribution of the disk, precise analytic statements are more readily obtainable for the Inertia Wheel Pendulum than for the Acrobot or Pendubot.

From a pedagogical standpoint, the Inertia Wheel Pendulum is one of the simplest nonlinear, underactuated systems that can be used to illustrate advanced control designs (feedback linearization, passivity based method, backstepping and hybrid control) based on recently developed geometric methods.

In introduction of this work, informations about pendulums and underactuated mechanisms will be given, and inertia wheel pendulum system will be introduced. Works in the literature about this system that have been done will be indicated. In the second part of the work, system will be modeled. In the third part, experimental works will be mentioned. In the fourth, part swing-up and balance controllers will be developed. At last, results will be given.

1 GİRİŞ

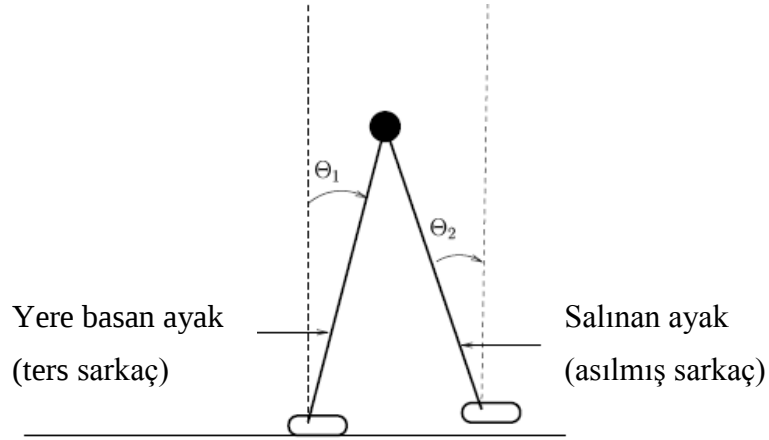
Sarkaç düzeneği, dinamik ve kontrol problemlerinin basitleştirilmiş halini oluşturması nedeni ile Galileo'dan günümüze kadar çalışıla gelmiş önemli bir sistemdir. Birçok önemli mühendislik problemi, dinamik davranışlarındaki benzerlikten ötürü sarkaç sistemi esas alınarak incelenmekte ve kontrolörler tasarlanmaktadır. Özellikle gelişmiş sarkaç sistemleri ile sisteme eksik uyarımlılık özelliği yaratılarak incelemeler gerçekleştirilmektedir. [3],[6],[7],[9],[11] ve [15]'de eksik uyarımlı gelişmiş sarkaç sistemleri incelenmiştir. Şekil 1.1'deki roket sisteminde, yatıklık açısı yükselme esnasında itme vektörünün değiştirilmesi ile kontrol edilmektedir. Roket, ters sarkacın dengelenme durumu ile aynı davranışı göstermektedir.[2]



Şekil 1.1 : Roket sistemi

Biyomekanikte, sarkaç sistemi genellikle bipedal yürüyüş sisteminin modellenmesinde kullanılmaktadır. Şekil 1.2'deki balistik yürüyüş sisteminde yere

basan ayak sarkacın kararsız denge noktasındaki, diğer ayak ise kararlı denge noktasındaki davranışı ile modellenenmektedir.



Şekil 1.2 : Balistik yürüyüş sistemi

Gerçekte de insan duruşunun ve hareketinin dinamiği incelendiğinde sarkaç dinamiği ile birçok benzerlik gösterdiği görülmektedir. Ayak kaslarının yürüme esnasında hareketleri incelendiğinde, kasların salınım hareketinin başlangıcında aktif oldukları, daha sonra serbest salınım hareketine geçtikleri görülmektedir ki bu da yürüyüş esnasındaki kısmi enerji verimliliği ile ilişkilendirilmektedir. Benzer şekilde, sadece ayakta durma işlemi denge kontrolü problemine eşdeğerdir.

Sarkaç sisteminin dinamiğinin incelenmesi ve kontrolünün gerçekleştirilmesi için birçok deney düzenekleri kurulmuştur. Bu sistemlerin en eskilerinden biri Şekil 1.3'deki “cart-pole” sistemidir.



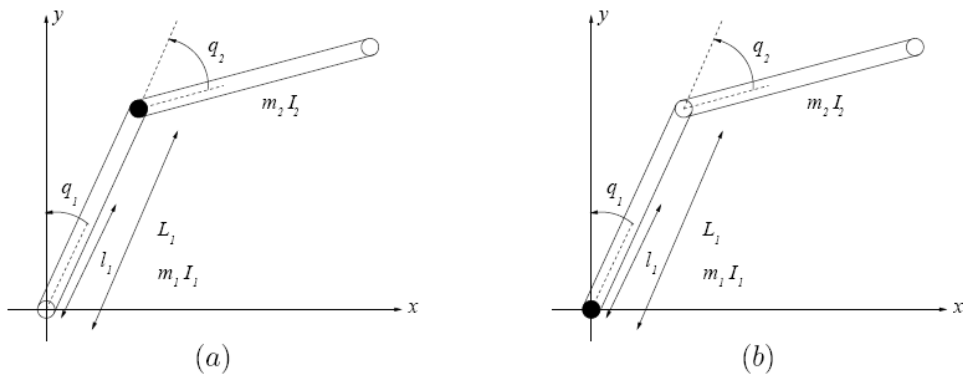
Şekil 1.3 : Cart-pole sistemi

Sistemde sarkacın bağlı bulunduğu motorun aksiyel hareketi ile sarkacın kontrolü gerçekleştirilmektedir. Aksiyel hareket eden motorun yaratmış olduğu ivme sarkaca uygulanan dönme momentini oluşturmaktadır.



Şekil 1.4 : Furuta sistemi

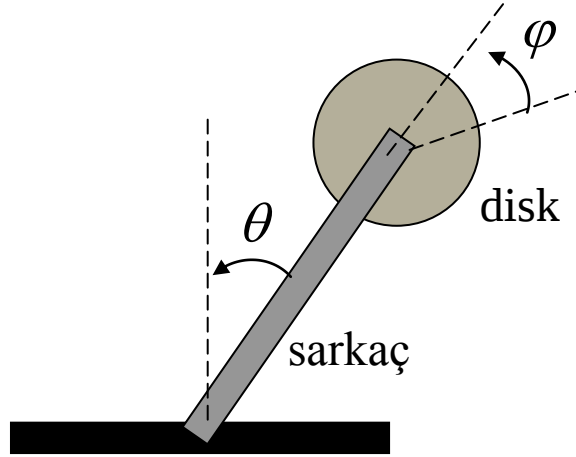
Bu sistemin bir aşama ilerisinde ise Acrobot [14],[17], Pendubot[19] ve Furuta [18] sistemleri yer almaktadır. Pendubot ve Furuta sistemlerinde ikinci “link”, birinci “link” in dönme hareketi ile kontrol edilen basit sarkaçlardır. Pendubot düzeneğinde iki “link” in dönme eksenleri birbirlerine paralel iken Furuta (Şekil 1.4) sisteminde diktir. Acrobot (Şekil 1.5(a)) sisteminde ise Pendubot (Şekil 1.5(b)) sisteminden farklı olarak birinci link yerine ikinci link uyarılmaktadır.



Şekil 1.5 : (a) Acrobot, (b) Pendubot Sistemleri

1.1 Diskli Sarkaç Düzenegi ve Önemi

Eylemsizlik diskli sarkaç düzenegi ilk olarak M.W.Spong tarafından [1],[2]'de ortaya koyulmuştur. Şekil 1.6'da görüldüğü üzere sistem, sarkaç ucunda motora akuple edilerek yerleştirilmiş olan eylemsizlik diskinden oluşmaktadır.



Şekil 1.6 : Diskli sarkaç düzenegi

Sistemin kontrolü motor aracılığı ile uyarılan disk ile sağlanmaktadır. Disk DC motor ile uyarılmakta ve diskin açısal ivmesi sarkacın dönme momentini oluşturmaktadır. Sistem her ne kadar Acrobot ve Pendubot sistemlerini anımsatsa da bu iki sistemden farklı olarak diskin sahip olduğu simetrik kütle dağılımı yüksek doğruluklu analitik yaklaşımların yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Düzenek, iki serbestlik dereceli ve tek uyarma elemanlı eksik uyarmalı sistem olması nedeni ile önemli bir yere sahiptir. Aynı zamanda, sistemin doğrusal olmayan, eksik uyarmalı olması ve gelişmiş kontrol metodolojilerinin (geribesleme ile lineerleştirme, pasifliğe dayalı kontrol, ve hibrid kontrol) uygulanmasına olanak sağlaması açısından da literatürde önemli bir yere sahiptir.

1.2 Eksik Uyarımlı Sistemler

Genel olarak eksik uyarımlı mekanik sistemler, kontrol giriş sayısının yapısal değişken sayılarından daha az olduğu sistemler olarak tanımlanabilir.(ya da serbestlik derecesinden daha az sayıda uyarıcıya sahip sistemler olarak tanımlanabilirler.) Eksik uyarımlı sistemler robotik, uzay sistemleri, mobil ve esnek sistemler başta olmak üzere birçok alanda yer almaktadırlar. Eksik uyarımlı sistemin “eksik uyarım” özelliği

- sistemin dinamikleri ile (aircraft, spacecraft, helikopter, su altı araçları),
- maliyet düşürme veya bazı pratik amaçlar için tasarım ile (esnek linkli robotlar),
- uyarım elemanlarının arızası ile,
- yapay olarak, yüksek mertebeden eksik uyarımlı sistemlerin kontrolü hakkında bilgi edinebilmek amacıyla düşük mertebeden kompleks lineer olmayan sistemler oluşturulması ile, (Acrobot, Pendubot, TORA).

sıralanabilecek dört sebepten oluşabilmektedir. Eksik uyarımlı sistemler literatürde önemli bir yere sahiptir.([3],[6],[7],[8],[9],[11],[15])

1.3 Diskli Sarkaç Düzeneği Hakkında Literatürdeki Çalışmalar

Literatürde eylemsizlik diskli sarkaç düzeneği ile ilgili başlıca çalışmalar uygulanan kontrol yöntemlerine göre aşağıdaki gibi gruplandırılabilir,

- Doğrusal olmayan kontrol, [1]
- Birbirine bağlı ve sönümleme atamalı kontrol, [3]
- Geniş çaplı kararlılık, [8]
- Enerji tabanlı kontrol,([10],[12],[13])
- Çıkış geribesleme geriadımlama kontrolü,[5]
- Genelleştirilmiş PI kontrol [4]

1.3.1 Diskli Sarkaç Sisteminin Lineer Olmayan Kontrolü

Bu çalışmada, salınım ve denge noktası için geribesleme lineerleştirme ve pasifliğe dayalı olmak üzere iki farklı kontrol yöntemi önerilmiş ve Diskli Sarkaç sistemine yerel geribesleme lineerleştirmenin yapılabildiği gösterilmiştir. Denge noktası kontrolü için geribesleme lineerleştirme ile lineer kutup atama kontrol yöntemleri karşılaştırılmıştır. Salınma problemi için sıralı geribesleme ile lineerleştirme ve pasifliğe dayalı enerji tabanlı yaklaşımlar incelenmiştir. İki bölgedeki (salınım ve denge noktası) kontrol yöntemleri arasındaki geçiş anahtarlama ile gerçekleştirilmiştir.

Diskli Sarkaç sisteminde lineer olmayan kontrol algoritması uygulaması salınma bölgesinde pasifliğe dayalı ve denge bölgesinde yerel kontrolörler olmak üzere iki bölgede incelenecek, farklı bölgeler için tasarlanmış kontrol algoritmaları arasında geçiş yapılacaktır. Lineer olmayan salınım kontrolörü, sarkacın denge durumunda asimtotik kararlı olması için tasarlanan denge kontrolör bölgesine yörüngeler sonucunda girmesi garanti olacak şekilde tasarlanmıştır. Denetçi, salınım ve denge kontrolörleri arasındaki geçişleri denge kontrolörünün bölgesini tahmin etmek suretiyle karar verecektir.

Denge kontrolörü için, ters sarkaç sisteminin lineer olmayan dinamiklerinin lineerleştirilmiş yaklaşımına dayanan lineer kutup atama tasarımı ve tam durum nonlineer geribesleme kontrolör olmak üzere iki farklı kontrolör yaklaşımı incelenecektir. Ayrıca Acrobot, Pendubot ve cart-pole sistemlerinin aksine sistem dinamiklerinin geribesleme lineerleştirilebilmesi de ele alınmaktadır.

Salınım kontrolörünün tasarımı eksik uyarımlı sistemlerin kısmi geribesleme doğrusallaştırılmasına dayanmaktadır. Diskin ivmelenmesi ve sonucunda oluşan sarkaç hızının pasifliğinden kaynaklanan sıfır dinamikleri, sarkacın enerjisi ve diskin kinetik enerjisi mutlak pozitif olan Lyapunov fonksiyonunun tasarımı için kullanılacaktır. Kontrol algoritması daha sonra sarkacın enerjisini ve diskin hızını sıfıra götürecektir.

Bu çalışmada iki ayrı kontrol yöntemi arasında anahtarlama yapmak suretiyle dengeleme gerçekleştirilmiştir. Literatürde tek kontrol yöntemine dayalı geniş çaplı denge kontrolörle ilgili çalışmalar mevcuttur. Ancak bu kontrol yöntemlerinde

dengeyi birdenbire sağlama eğilimi ve bunun için de aşırı derecede yüksek dönme momenti girişine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu nedenle bu kontrolörlerin gerçek fiziksel sistemler üzerinde çalışıp çalışmayacağı açık değildir.

1.3.2 Eksik Uyarımlı Mekanik Sistemlerin Bağlamalı ve Sönümleme Atamalı Kontrol ile Kararlılığı

Pasifliğe dayalı kontrol yöntemi Euler-Lagrange denklemleri ile tanımlanmış fiziksel sistemlerde dayanıklı kontrolörler tasarlamak için iyi kurulmuş, yapısal korunumlu güçlü bir metodolojidir. Bu yaklaşım, mekanik sistemlerin ayarlama problemleri için potansiyel enerjinin şekillendirilmesi gibi doğal bir yöntem sağlar. Ancak, bazı eksik uyarımlı sistemlerin denge problemlerinin çözümü için potansiyel enerjinin yanı sıra kinetik enerjinin de şekillendirilmesi gerektiği bilinmektedir. Diğer yandan, pasifliğe dayalı kontrol yönteminin elektromekanik ve kütle-denge uygulamaları gibi tüm enerjinin şekillendirilmesini gerektiren sistemlere uyarlanabilmesi için birbirine bağlı ve sönümleme atamalı pasifliğe dayalı kontrol uygulanmaktadır. Bu çalışmada eksik uyarımlı diskli sarkaç sistemine IDA-PBC yöntemi uygulanmış ve kararsız denge noktası için anahtarlama yapılmadan ve hız bilgisinden bağımsız olarak global olarak denge sağlanmıştır.

1.3.3 Genelleştirilmiş PI Kontrolü ile Diskli Sarkaç Ssteminin Salınım ve Denge Noktası Kontrolü

Bu çalışmada genelleştirilmiş PI kontrolünün eylemsizlik diskli sarkaç sisteminde salınım ve denge noktası kontrolüne uygulaması ele alınmıştır. Salınım ve denge noktası kontrollerinde uygulanan iki farklı kontrol yöntemi arasında anahtarlama, genelleştirilmiş PI yaklaşımında tek kontrolör ile başarılabilmektedir. Bu yaklaşımda sarkaç açısız pozisyonu ölçülen tek giriş değişkenidir. Biri kayma mod tabanlı diğeri ise saf olmak üzere iki farklı GPI kontrolü stratejisi tasarlanmış ve bu yöntemlerin dönme momenti-yük bozucusuna göre daha dayanıklı olduğu gösterilmiştir.

1.3.4 Diskli Sarkaç Sisteminin Global Kararlılığı

Bu çalışmada eylemsizlik diskli sarkaç sisteminin dinamikleri açık formdaki koordinatlarının global olarak değiştirilmesi ile tam geribesleme formunda kaskat

lineer olmayan sistem haline dönüştürülmüş daha sonra geriadımlama prosedürü kullanılarak sistemin global asimtotik kararlılığı sağlanmıştır.

1.3.5 İki Serbestlik Dereceli ve Simetrik Yapılı Eksik Uyarımlı Sistemin Kontrolü

Bu çalışmada iki serbestlik dereceli eksik uyarımlı ve simetrik mekanik sistem göz önüne alınmıştır. Simetrikten kasıt; eylemsizlik momenti matrisinin uyarılmayan serbestlik derecesinden bağımsız olmasıdır. Sistemin sahip olduğu simetrik yapı, sistem dinamiklerini global olarak bir tam geribesleme formundaki kısmi linner kaskat nonlinear sistem haline dönüştüren sistemin Lagrange'ının doğal olarak sistemin koordinatlarını değiştirmesini sağlar. Eğer doğrusal olmayan yapı için global olarak denge kontrol kuralı mevcut ise standart geriadım prosedürü kullanılarak tüm sistem için global olarak denge kontrol kuralı elde edilir. [1] de genel eksik uyarımlı sistemlerin en azından uyarılan kısmın kontrol girişinin değiştirilmesi ile lineerleştirilerek kısmi lineerleştirilmenin yapılabildiği gösterilmiştir. Ancak yeni kontrolün hem uyarılan hem de uyarılmayan kısımlarında belirmesi bu tür sistemler için kontrolör tasarımını güçleştirmektedir. Bunun tersine Lagrange bundan sakınır ve uyarılan ve uyarılmayan kısımların ayrışmasını sağlar.

1.4 Tezin Organizasyonu

Bu çalışmanın ikinci bölümde sistemin matematiksel modeli çıkarılacak, yapılan deneylerle sürtünme parametreleri elde edilerek sistem modeline eklenecektir. Tezin dördüncü bölümünde sistemin mekanik tasarımı, sistemdeki sensör ve eyleyiciler ve kullanılan yazılımlar hakkında bilgi verilecektir. Dördüncü bölümde kontrol algoritmaları salınım ve kararsız denge noktası için geliştirilecek, yapılan deneysel çalışmalara yer verilecektir. Denge noktası kontrolü için PID ve LQR kontrol algoritmaları geliştirilecektir. Son bölümde sonuçlara, sistemde karşılaşılan sorunlara ve daha sonraki çalışmalarda yapılacak çalışmalara ilişkin bilgi verilecektir.

2 MODELLEME

Bu bölümde kontrolü yapılacak olan eylemsizlik diskli sarkaç sisteminin matematiksel modeli çıkarılacak, çıkarılan model ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler karşılaştırılarak sistemin sürtünme parametreleri çıkarılacaktır. Sistem modelinin çıkarılmasını takiben sistemin sahip olduğu lineer olmayan yapısı denge noktaları için lineerleştirilerek incelenecektir.

2.1 Hareket Denklemleri

Bu bölümde hareket denklemleri, motor ve sarkaç denklemleri olmak üzere ayrı ayrı ele alınacaktır. Motor denklemlerinden elde edilecek olan diskin açısal ivmesi sarkacın hareket denklemlerinde kullanılarak sistemin tümüne ait hareket denklemi elde edilecektir.

2.1.1 Motor Denklemleri

DC motor denklemi;

$$v = R_T i + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.1)$$

zıt emk gerilimi disk hızına ve sarkaç hızına bağlı olarak,

$$e = k_E (\dot{\varphi} - \dot{\theta}) \quad (2.2)$$

motorun sahip olduğu mH büyüklüğündeki endüktans değeri ihmal edilir ve zıt emk gerilimi (2.1) de verilen motor denkleminde yerine konulursa,

$$v = R_T i + k_E (\dot{\varphi} - \dot{\theta}) \quad (2.3)$$

denkleminde akım değeri çekilirse,

$$i = \frac{1}{R_T} (v - k_E (\dot{\varphi} - \dot{\theta})) = \frac{1}{R_T} v - \frac{k_E}{R_T} (\dot{\varphi} - \dot{\theta}) \quad (2.4)$$

Motorun diske uyguladığı dönme momenti akım denkleminin yerine konulması ile,

$$T_m = -k_T i = -\frac{k_T}{R_T} v + \frac{k_T k_E}{R_T} (\varphi^g - \dot{\theta}^g) \quad (2.5)$$

2.1.2 Sarkaç Denklemleri

Yerçekiminin sarkaçta oluşturduğu dönme momenti,

$$T_g = mgl \sin \theta \quad (2.6)$$

Motor tarafından diskte oluşturulan dönme momenti,

$$J_w \ddot{\varphi} = -T_m = \frac{k_T}{R_T} v - \frac{k_T k_E}{R_T} (\varphi^g - \dot{\theta}^g) \quad (2.7)$$

Motorun ve yerçekiminin sarkaçta oluşturdukları dönme momenti,

$$J_p \ddot{\theta} = T_m - T_g = -\frac{k_T}{R_T} v + \frac{k_T k_E}{R_T} (\varphi^g - \dot{\theta}^g) - mgl \sin \theta \quad (2.8)$$

Disklin açısal ivmesi,

$$\ddot{\varphi} = -\frac{k_E k_T}{J_w R_T} \varphi^g + \frac{k_E k_T}{J_w R_T} \dot{\theta}^g + \frac{k_T}{J_w R_T} v \quad (2.9)$$

Sarkacın açısal ivmesi, sistem denkleminde disklin açısal ivmesi yerine konularak,

$$\ddot{\theta} = -\frac{mgl}{J_p} \sin \theta + \frac{J_w}{J_p} \ddot{\varphi} = -\frac{mgl}{J_p} \sin \theta + \frac{J_w}{J_p} \left(-\frac{k_E k_T}{J_w R_T} \varphi^g + \frac{k_E k_T}{J_w R_T} \dot{\theta}^g + \frac{k_T}{J_w R_T} v \right) \quad (2.10)$$

(2.10) düzenlenirse,

$$\ddot{\theta} = -\frac{mgl}{J_p} \sin \theta + \frac{k_E k_T}{J_p R_T} \varphi^g - \frac{k_E k_T}{J_p R_T} \dot{\theta}^g - \frac{k_T}{J_p R_T} v \quad (2.11)$$

şeklinde bulunur.

Sistemin durum değişkenleri $x_a = (\varphi^g, \theta^g, \dot{\theta}^g)^T$ olarak seçilirse, durum denklemi

$$\dot{x}_a = A_a x_a + B_a v \rightarrow (\dot{\varphi}^g, \dot{\theta}^g, \ddot{\theta}^g)^T = A_a (\varphi^g, \theta^g, \dot{\theta}^g)^T + B_a v \text{ şeklinde olacaktır.}$$

Sistem $\theta : 0$ civarında lineerleştirilirse, $\sin \theta : \theta$ ve,

$$A_a = \begin{pmatrix} -\frac{k_E k_T}{J_w R_T} & 0 & \frac{k_E k_T}{J_w R_T} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_E k_T}{J_p R_T} & -\frac{img}{J_p} & -\frac{k_E k_T}{J_p R_T} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -30.55 \cdot 10^{-4} & 0 & 30.55 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 0 & 1 \\ 23.45 \cdot 10^{-4} & -48.3928 & -23.45 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

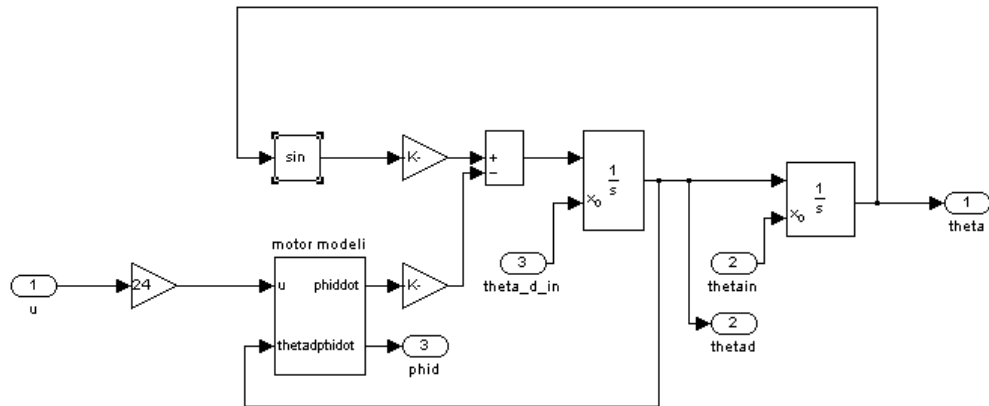
Sistem $\theta : 0$ civarında lineerleştirilirse, $\sin \theta : -\theta$ ve,

$$A_a = \begin{pmatrix} -\frac{k_E k_T}{J_w R_T} & 0 & \frac{k_E k_T}{J_w R_T} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_E k_T}{J_p R_T} & \frac{img}{J_p} & -\frac{k_E k_T}{J_p R_T} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -30.55 \cdot 10^{-4} & 0 & 30.55 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 0 & 1 \\ 23.45 \cdot 10^{-4} & 48.3928 & -23.45 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$B_a = \begin{pmatrix} \frac{k_T}{J_w R_T} \\ 0 \\ -\frac{k_T}{J_p R_T} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 94.212 \cdot 10^{-3} \\ 0 \\ -72.3 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

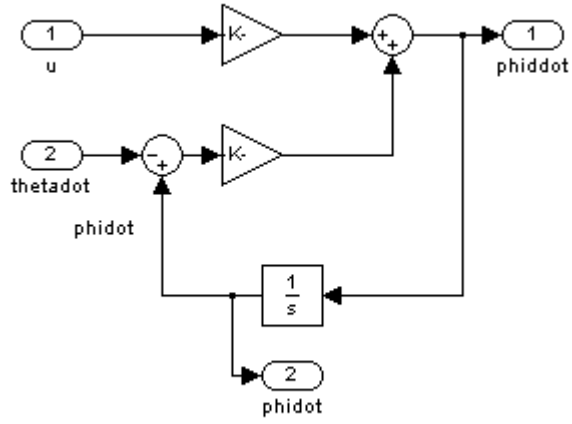
şeklinde olacaktır.

Sistemin Matlab-Simulink ortamındaki modeli Şekil 2.1 deki gibidir.



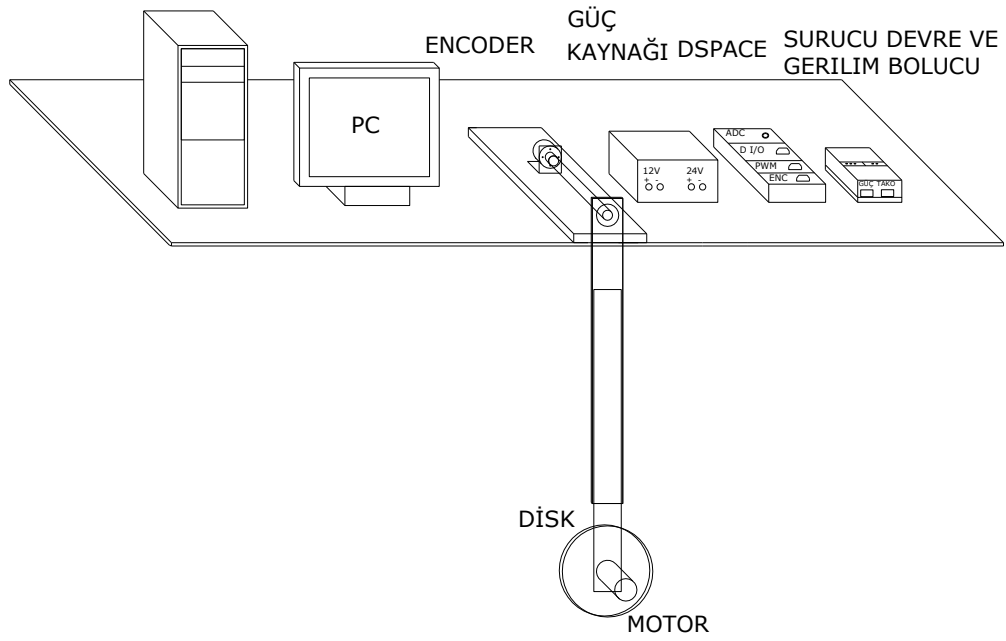
Şekil 2.1 : Sistem modeli

Sistemdeki motor modeli Şekil 2.2 de gösterilmiştir.



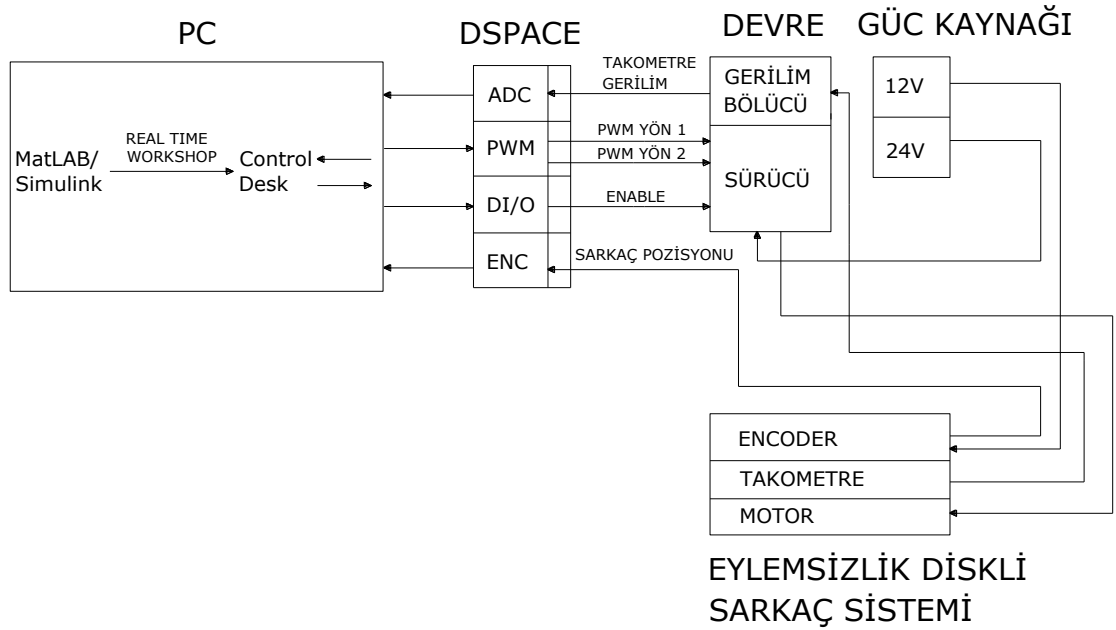
Şekil 2.2 : Motor modeli

3 DENEYSEL ÇALIŞMA



Şekil 3.1 : Diskli sarkaç sistemi ve sistemde kullanılan diğer araçlar

Tezin bu bölümünde deneysel çalışmayı oluşturan sistemin her bir elemanı hakkında bilgi verilecektir. Bölümde sırası ile; diskli sarkaç mekanizmasının mekanik aksamı, sistemin uyarılmasını ve geribesleme verilerinin alınılmasını sağlayan elemanlar, PC ile sistem elemanları arasındaki veri iletişimini sağlayan DSPACE DS1104 kontrol kartı ve CP1104 bağlantı paneli, MatLAB ve Control Desk programları hakkında ayrıntılı bilgi verilecektir.



Şekil 3.2 : Sistemdeki güç ve sinyal akış diagramı

3.1 Diskli Sarkaç Sisteminin Mekanik Tasarımı

Sistemin mekanik aksamını oluşturan temel elemanlar aşağıda sıralanmıştır,

- Encoder
- İki rulmanlı mil: sarkacın ağırlığını taşır ve encoder kaplini üzerinden encoderla bağlantı sağlar
- sarkaç,
- disk kaplini: motor ile diskin bağlantısını sağlar ve iki elemanın dönme eksenleri arasındaki kaymayı kompanze eder

- rulman gömülü silindirik eleman: motor miline düşey ekseninde yük gelmemesini sağlar ve kapline yataklık yapar.
- disk

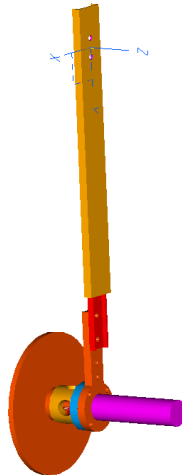
Encoder ile sarkaç düzeneğini birbirine bağlayan mil iki ayrı noktadan rulmanlarla yataklanan sistemlerden geçirilmiştir. Mil iki ayrı noktadan yataklanarak encoder'a etkiyecek dikey kuvvetler minimuma indirgenmiştir. Ayrıca mil ile encoder arasındaki bağlantı esnek kaplin ile yapılarak miller arasında oluşabilecek yatay ve dikey eksenindeki hiza kaçıklığının önlenmesi gözetilmiştir. Sarkaç aynı düzeneğin üzerinde daha sonra yapılacak olan çalışmalara (radyal esnek linkli diskli sarkaç düzeneğine) olanak sağlaması amacı ile raylı sistem olarak yapılmıştır. Böylece sistem üzerinde yapılacak sonraki çalışmalara olanak sağlanacaktır. Motor ile eylemsizlik diski arasındaki bağlantı, sistemin maruz kalacağı maksimum kuvvet hesaplanarak seçilmiş olan kaplin aracılığı ile yapılmıştır. (Şekil 3.2). Ayrıca motor milini diskin ağırlığından ve salınım esnasında etkiyecek kuvvetlerden korumak amacı ile Şekil 3.2 deki rulman ile yataklanmış silindirik sistem tasarlanmıştır. Böylece diskten kaynaklanan herhangi bir kuvvetin motor milini etkilememesi sağlanmıştır. Son olarak sistemin açısız momentini oluşturan disk, rulman ile yataklanmış silindirden geçirilerek kaplin ile motora akuple edilmiştir.



Şekil 3.3 : Sistem elemanları

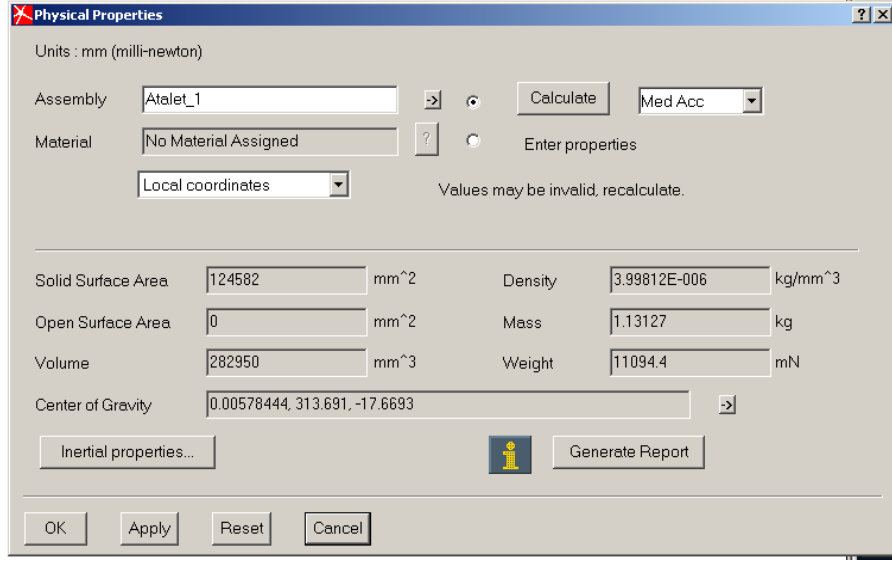
3.1.1 I-DEAS Programı ile Sistem Parametrelerinin Elde Edilmesi

Sistem elemanlarının her biri I-DEAS programında çizilip modellenmiştir. Şekil 3.3 de sistemin I-DEAS programındaki çizimi verilmiştir.



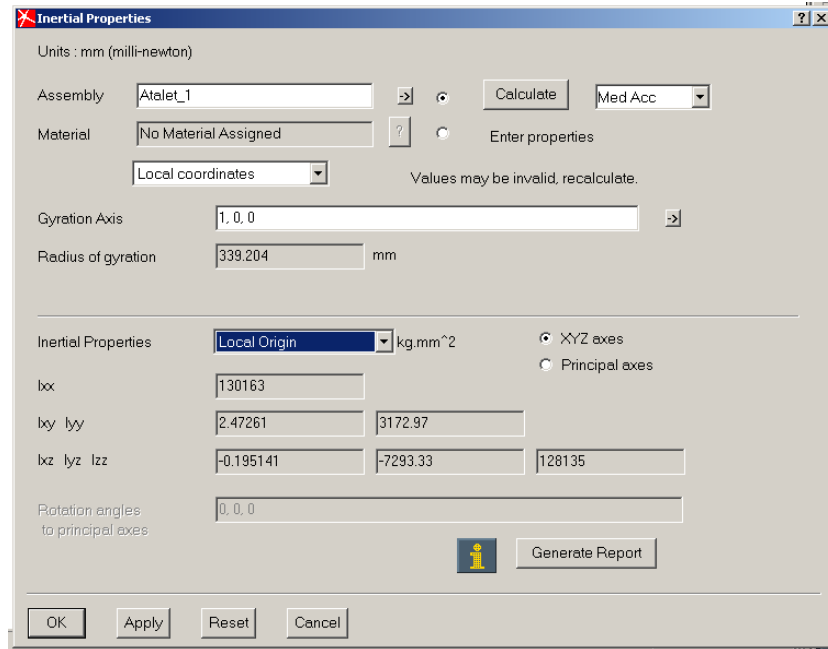
Şekil 3.4 : Eylemsizlik diskli sarkaç düzeneği

Sistemin toplam kütlesi ve kütle merkezi I-DEAS programı ile hesaplanmıştır. Şekil 3.4 de programın sistem parametrelerini hesaplayan arayüzü görülmektedir.



Şekil 3.5 : I-DEAS programında kütle merkezi hesabına ilişkin arayüz

Ayrıca her bir elemanın kendi kütle merkezine ve sarkacın dönme noktasına göre eylemsizlik momentleri program aracılığı ile elde edilmiştir. Şekil 4.5 de bu hesaplara ilişkin arayüz görülmektedir.



Şekil 3.6 : I-DEAS programında eylemsizlik momenti hesabına ilişkin arayüz

Program aracılığı ile edilen her bir sistem elemanının parametreleri Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1 Sistem elemanlarının parametreleri

PARÇA	EYLEMSİZLİK MOMENTİ	KÜTLE
	(kgmm ²)	(gram)
Silindir	15165	104
Disk	55640	376
Birleşme	8733	70
Ray	7930	300
Motor	40667	280
TOPLAM	128135	1130

3.2 Diskli Sarkaç Sistemindeki Sensör ve Eyleyiciler

3.2.1 DC Motor ve Sürücüsü

Sistemde eylemsizlik diskini çevirebilmesi ve dolayısı ile sarkaca dönme momentini oluşturabilmesi için Şekil 4.3 deki 24V DC motor kullanılmıştır. Kullanılan motorun parametreleri Tablo 1 de verilmiştir.

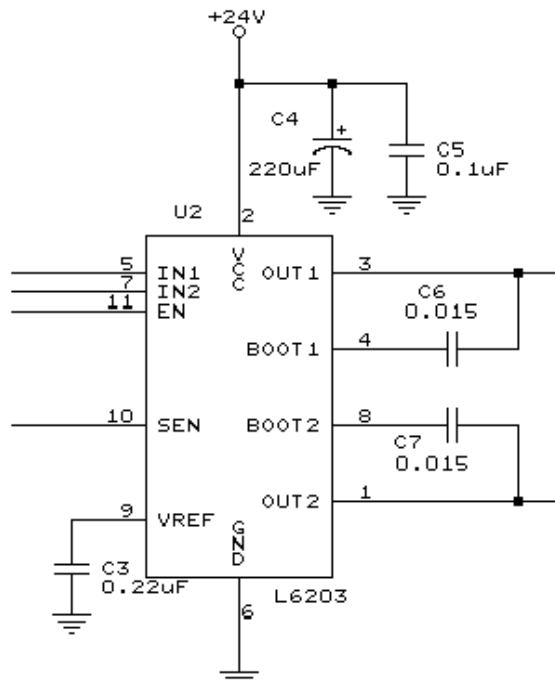


Şekil 3.7 : DC motor ve takogeneratör

Tablo 2 Motor parametreleri

Yüksüz Hız	6900	rpm
Yüksüz Ortalama Akım	110	mA
Sürekli Maksimum Akım	1,40	A
Sürekli Maksimum Moment	41	mNm
Terminal Direnç	6,2	ohm
Rotor Endüktans	0.75	mH
Rotor Eylemsizlik	20	kgm210-7
Tork sabiti	32,5	mNm/A
Zıt emk sabiti	3,4	V/1000

Motorun sürücü devresi, H köprüsü içeren L6203 entegre devresi ile gerçekleştirilmiştir. Entegrenin ihtiyaç duyduğu PWM sinyalleri DSPACE kontrol kartının PWM çıkışlarından, “enable” sinyali digital I/O çıkışlarından sağlanmıştır.



Şekil 3.8 : Sürücü devre şeması

3.2.2 Takogeneratör

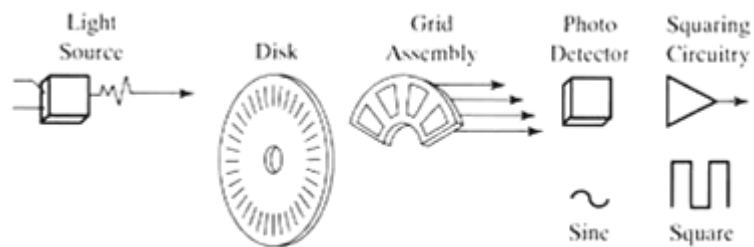
Takogeneratörler genel olarak akupile edildikleri sistemlerin hızı ile orantılı olarak gerilim üreten DC generatörlerdir. Uygulamalarda direkt olarak sisteme akupile edilebildikleri gibi(sürekli mıknatıslı dc generatörler), aynı zamanda bu uygulamada olduğu gibi uyarma elemanının arkasına akupile edilerek milin hızı ile orantılı olarak da gerilim üretebilirler.

Bu uygulamada, motorun arkasına akupile edilmiş olan takogeneratörün çıkış gerilimi DSPACE kartının analog-digital girişine 1/5 gerilim bölücüden geçirilip kontrol kartına uygun gerilim düzeyine(+10V) indirilerek bağlanmıştır. Nominal hızda elde edilen gerilim okunarak takogeneratörün kazancı hesaplanmıştır. Böylece motorun herhangi bir andaki hız bilgisi elde edilmiştir.

3.2.3 Artırımlı Encoder

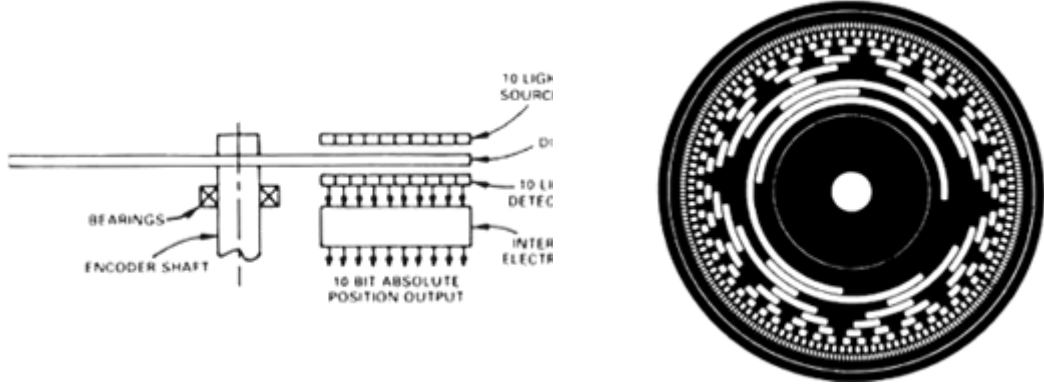
Encoder genel olarak pozisyonu denetlemek için kullanılan elektriksel mekanik bir ölçüm aletidir. Tipik bir enkoder, hareket, pozisyon veya yönü tanımlamak için üretilen bir seri pulse üretmek için optik sensörler içerirler. Çalışma prensibi, ışık kaynağının (LED) bu kaynağa duyarlı foto-tranzistörleri bir delikli disk arkasından uyarması esasına dayanmaktadır.

Dönel enkoderlar artırımlı ve mutlak olmak üzere yapısal olarak ikiye ayrılırlar. Artırımlı enkoderların çalışma prensibi ışık kaynağından gelen ve foto-taranzistörü uyarması ile oluşan kare dalgaların sayılması esasına dayanır. Disk üzerine açılacak delik sayısı yapısal olarak sınırlı olduğu için çok yüksek çözünürlüklerin elde edilmesi için çok katmanlı ve algılayıcı sistem oluşturulması zorunluluğu vardır. Şekil 4.4 de artırımlı enkoder ın çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.9 : Artırımlı encoder yapısı

Mutlak encoder'da ise disk, eşmerkezli çok sayıda ve farklı çözünürlükteki bölümlerden oluşan çemberlerden meydana gelmiştir



Şekil 3.10 : Mutlak encoder yapısı

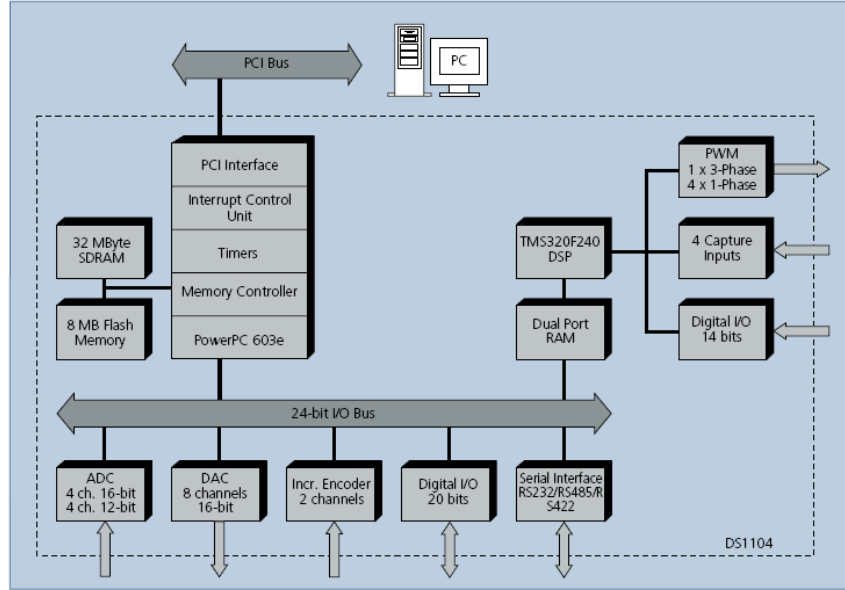
Bu uygulamada, sarkacın konumu 2500 pulse/tur'luk artırımlı encoder ile 0.144 derece çözünürlükte DSPACE kartı yardımı ile okunmuştur. Encoder 12V güç kaynağından beslenmiş, çıkışı DSPACE kartının Encoder1 girişine bağlanmıştır.



Şekil 3.11 : Sistemde kullanılan artırımlı encoder

3.2.4 DS1104 ve CP1104

DSPACE DS1104 araştırma-geliştirme kartı ve CP1104 bağlantı paneli ile motor sürücü devresine gerekli olan “enable” ve PWM sinyalleri sırası ile “Analog-Digital I/O” ve PWM1 portlarından üretilmiştir. Encoderdan gelen sarkacın açısal konumu Inc.Encoder1 girişinden okunmuş, ADC5 kanalından takogeneratörden gelen motorun hız bilgisi bilgisayara aktarılmıştır. Şekil 4.10 de kartın ve panelin sahip olduğu tüm giriş ve çıkışlar gösterilmiştir.



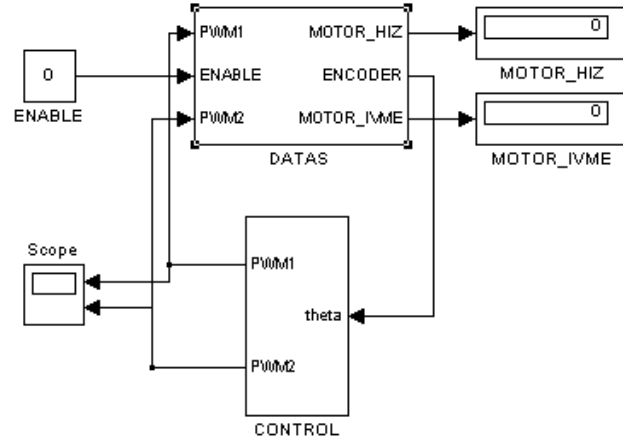
Şekil 3.12 : CP1104 kontrol paneline ait giriş çıkışlar

3.3 Diskli Sarkaç Sisteminde Kullanılan Yazılımlar

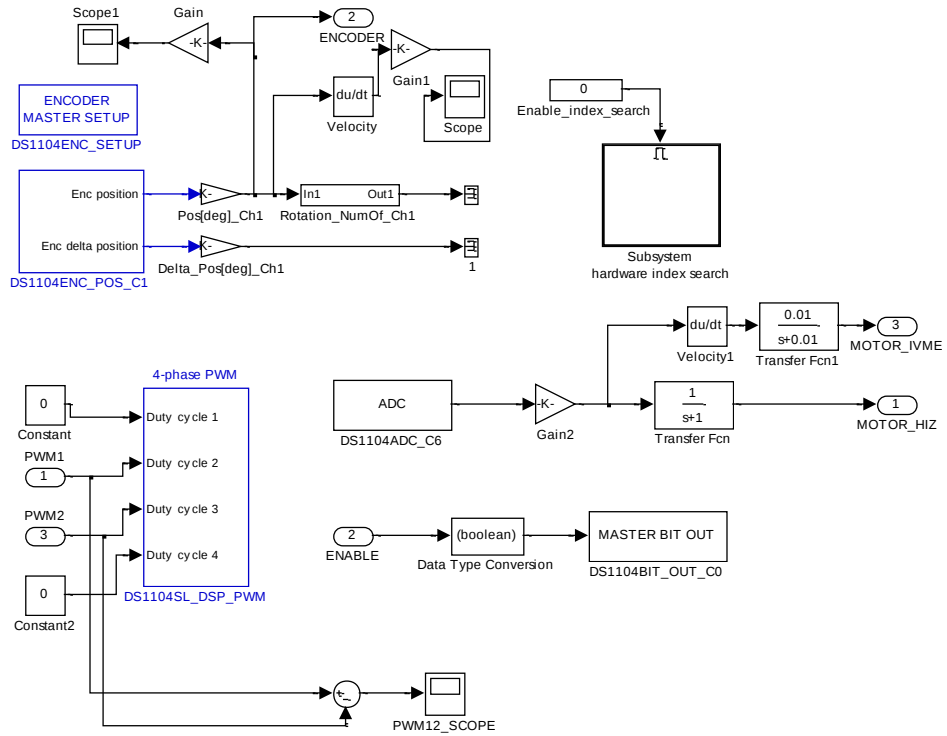
Bu bölümde sistemde kullanılan MATLAB ve ControlDesk programları hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca sistemde yapılan çalışmalar ve programların arayüzlerinden örnekler verilecektir.

3.3.1 MatLAB

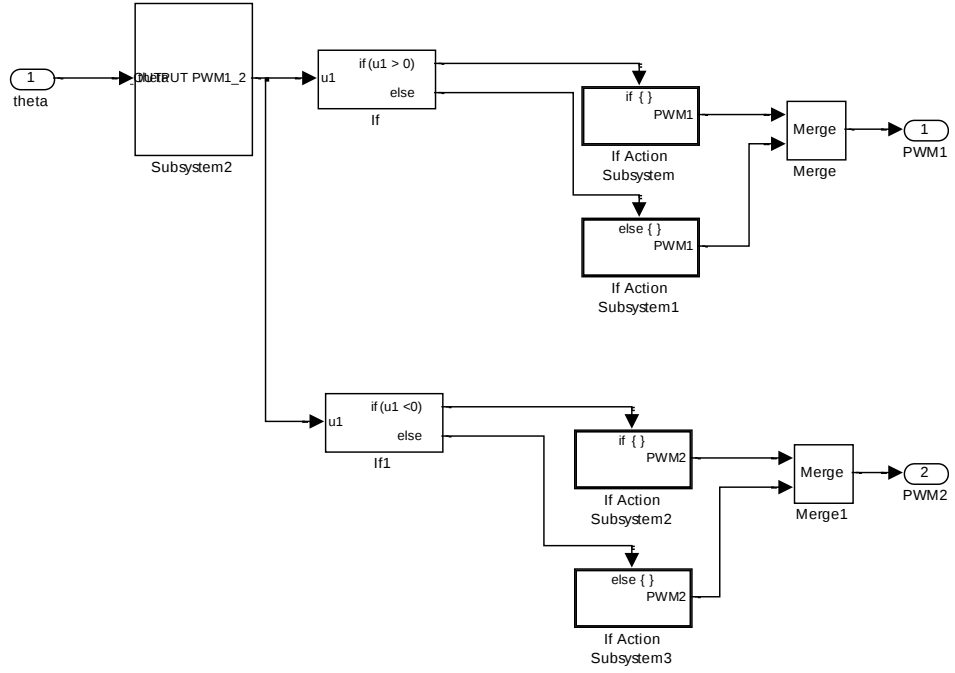
Sistemin kontrol algoritmaları ve modelleme çalışmaları MatLAB - Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Simulink in sunmuş olduğu blokların yanı sıra DSPACE kontrol kartından gelen bilgilerin okunmasını sağlayan DSPACE “Gerçek Zamanlı Arayüz” bloklarından da faydalanılmıştır. Bu bloklarla encoderdan sarkacın açısal konum bilgisi elde edilirken, DC motor sürücüsünün “enable” ve PWM sinyalleri üretilmiş, ADC5 kanalından da motorun hız bilgisi okunmuştur.



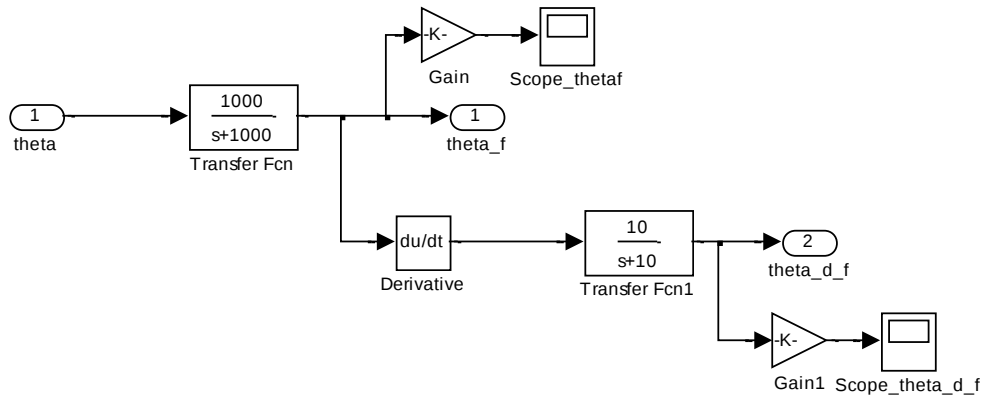
Şekil 3.13 : Sistemin kontrolüne ait Matlab-Simulink modeli



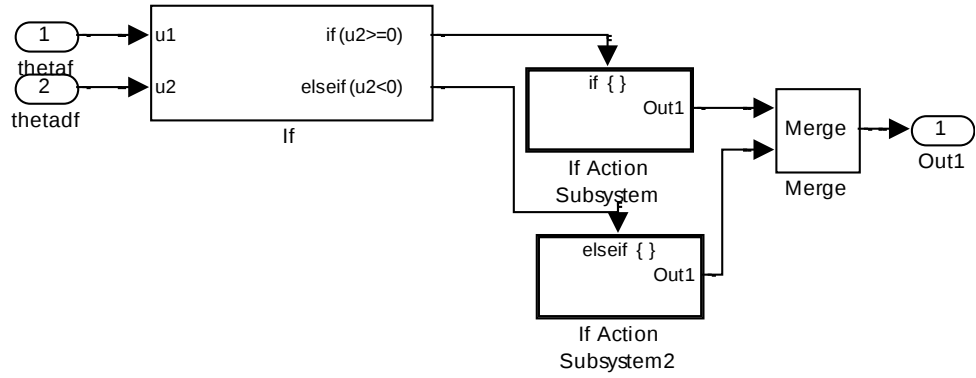
Şekil 3.14 : Matlab – Simulink Ortamında Gerçek Zamanlı Verilerin Alınması



Şekil 3.15 : Matlab – Simulink Ortamında Motor PWM Cıksılarının Oluşturulması



Şekil 3.16 : Matlab – Simulink Ortamında Gerçek Zamanlı Alınan Verilerin Filtrelmesi

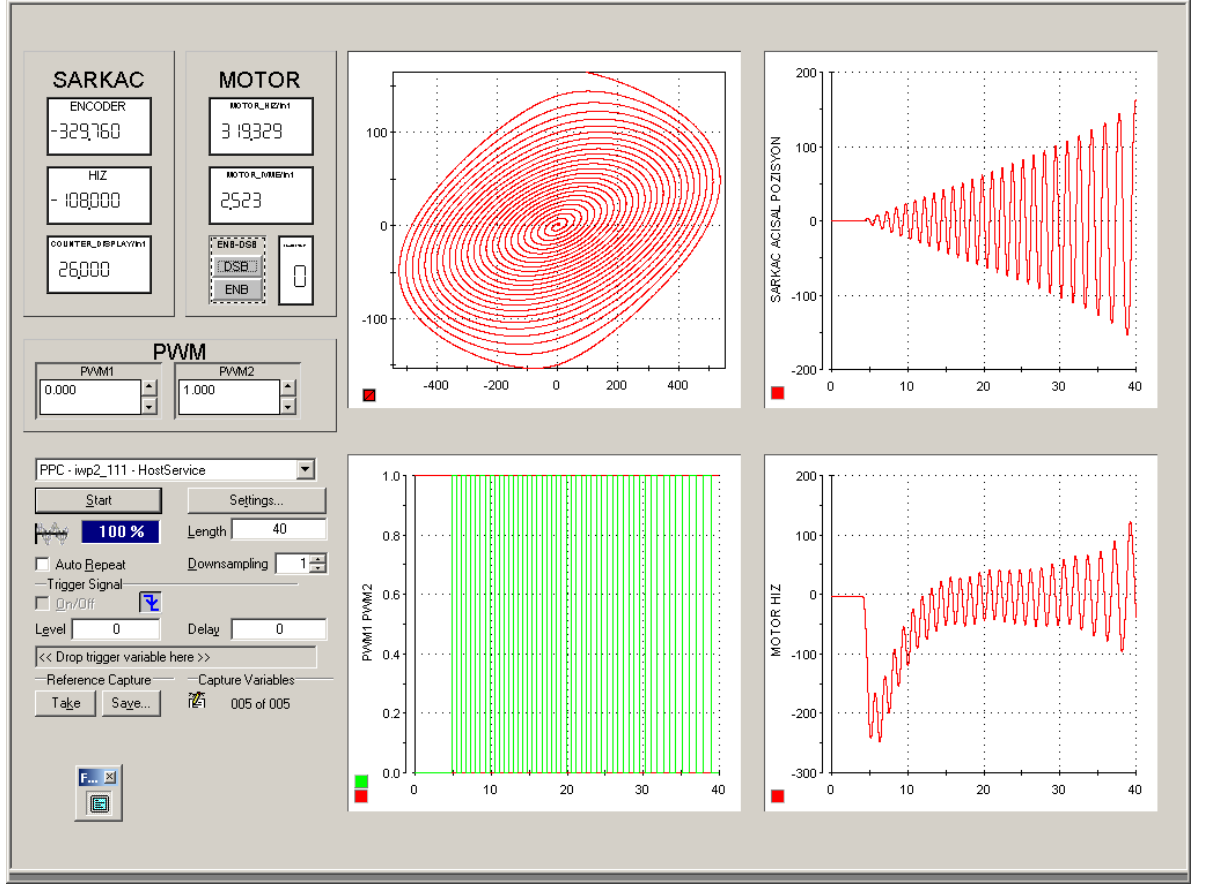


Şekil 3.17 : Matlab – Simulink Ortamında Salınım Kontrolünün Gerçekleştirilmesi

3.3.2 RTI – Control Desk

ControlDesk programı genel olarak DSPACE kartı ile gerçek zamanlı kontrol edilmesi gereken sistemlerin parametrelerinin kontrolüne (değiştirilmesine ve okunmasına) olanak sağlamaktadır.

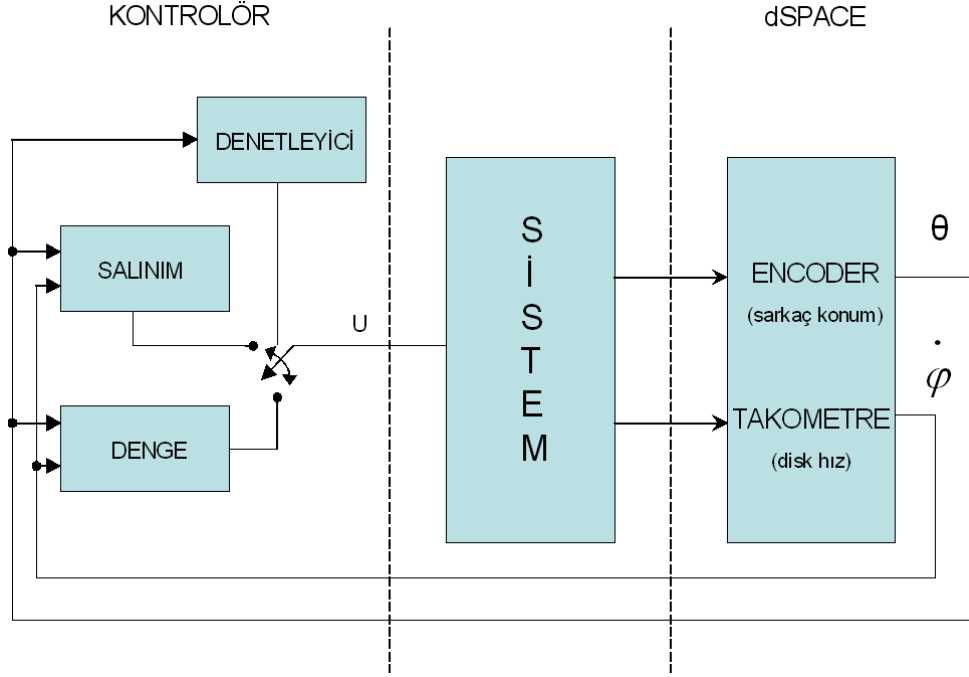
Matlab – Simulink de oluşturulan kontrol algoritmaları ve DSPACE kartından gerçek zamanlı arayüz blokları ile alınan ve gönderilen bilgiler yapılandırılarak “sdf” uzantılı olarak DSPACE kontrol kartına ControlDesk programı aracılığı ile yüklenmektedir. Kontrol edilmesi gereken veriler, programın sağlamış olduğu araçlarla yapılandırılabilir arayüz sayesinde görüntülenebilmektedir. Şekil 3.16 de sistemin sahip olduğu arayüz görülmektedir.



Şekil 3.18 : ControlDesk programı ile tasarlanan arayüz

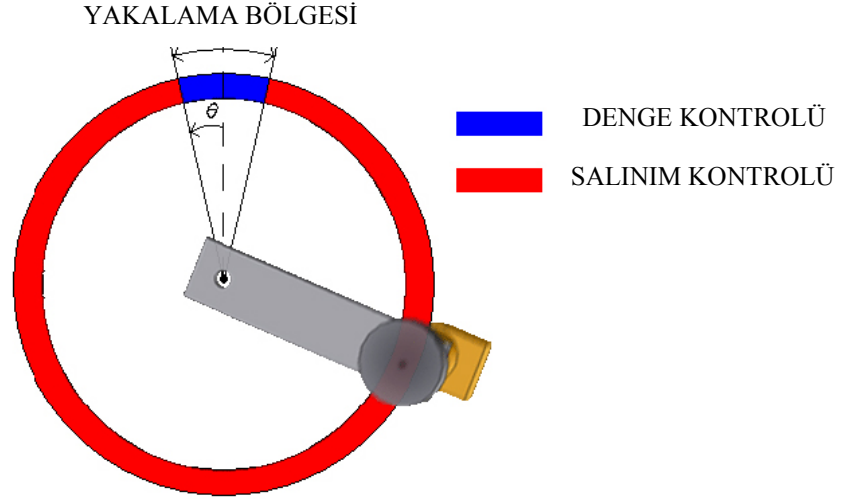
4 KONTROL

Tezin bu bölümünde, hareket denklemleri çıkarılmış olan sistemin kontrolü ele alınacaktır. Sistemin kontrolü iki durum arasında anahtarlama yaparak salınım ve denge noktası kontrolörlerden oluşan hibrid kontrol yöntemi ile gerçekleştirilecektir. Sistemin kontrol şeması Şekil 4.1 de gösterilen biçimdedir



Şekil 4.1 : Kontrol şeması

Şekil 4.2’de de görüldüğü gibi aktif kontrolör sarkacın konumuna göre belirlenecektir. Salınım kontrolü sarkacın başlangıç konumundan yakalama alanına kadar olan bölümde aktif olacaktır. Yakalama alanına giren sarkaca denge noktası kontrolü uygulanacaktır.



Şekil 4.2 : Sarkacın açısal pozisyonu ile kontrolör seçimi

4.1 Salınım Kontrolü

Salınım kontrolü sistemin durma noktasından yakalama alanı olarak bilinen denge noktası kontrolörünün devreye gireceği alana kadar etkili olacak olan kontrolördür. Salınım kontrolöründen amaçlanan, sistemi mümkün olabilecek en kısa sürede yakalama alanına getirmektir. Bu nedenle her salınımda sisteme verilebilecek en büyük dönme momentinin en uzun sürede uygulanması gerekmektedir. Tablo 3 de kontrol algoritması verilmiştir. Buna göre sarkaç hızının sıfır ve daha büyük olduğu değerlerde 1, sıfırdan küçük olduğu durumlarda ise -1 kontrol girişi uygulanacaktır.

Tablo 3 Salınım kontrolü algoritması

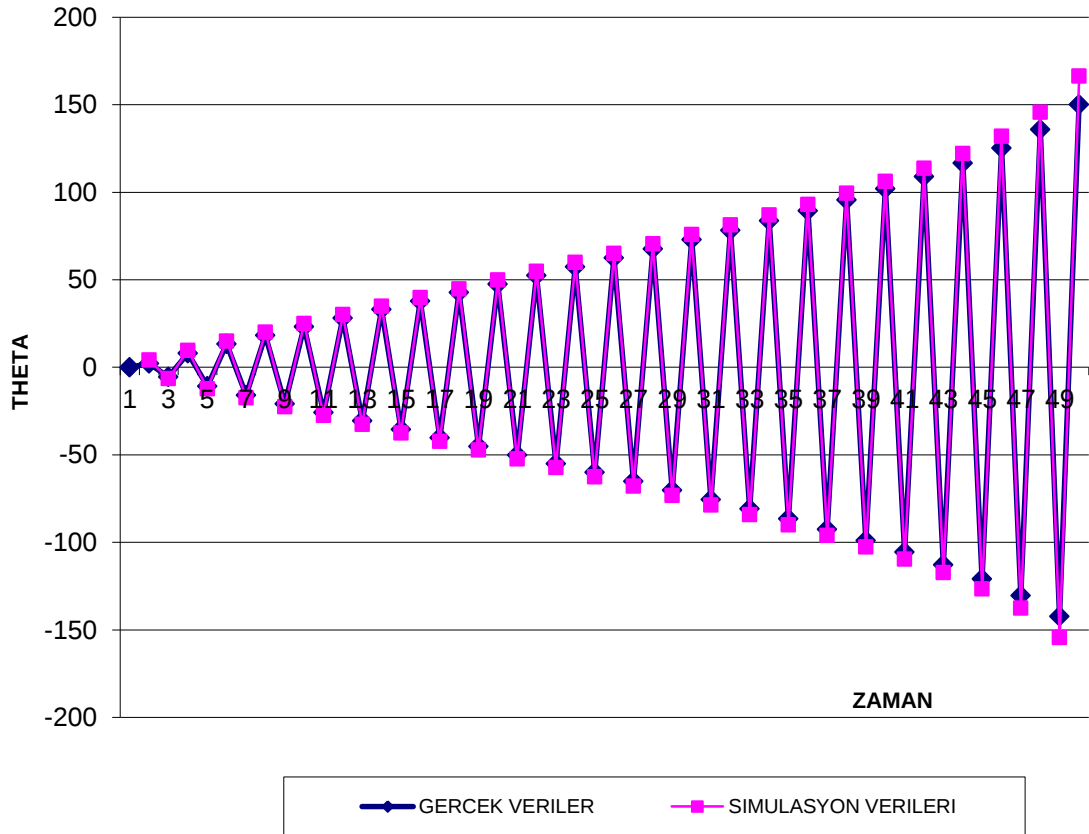
	$\dot{\theta}^g \geq 0$	$\dot{\theta}^g < 0$
u	1	-1

4.1.1 Deneyisel Çalışma

Bir önceki bölümde elde edilen salınım kontrolü algoritması sistem modeline ve gerçek sisteme uygulanarak sistem davranışı incelenecektir.

4.1.2 Sürtünme Parametrelerinin Elde Edilmesi

Sistemin sahip olduğu sürtünme parametrelerini belirlemek amacı ile bir önceki bölümde elde edilen modele kontrol algoritması MatLAB - Simulink ortamındaki sisteme ve DSPACE – ControlDesk programı aracılığı ile gerçek sisteme uygulanmıştır. Şekil 4.3’de iki verinin grafiği görülmektedir.



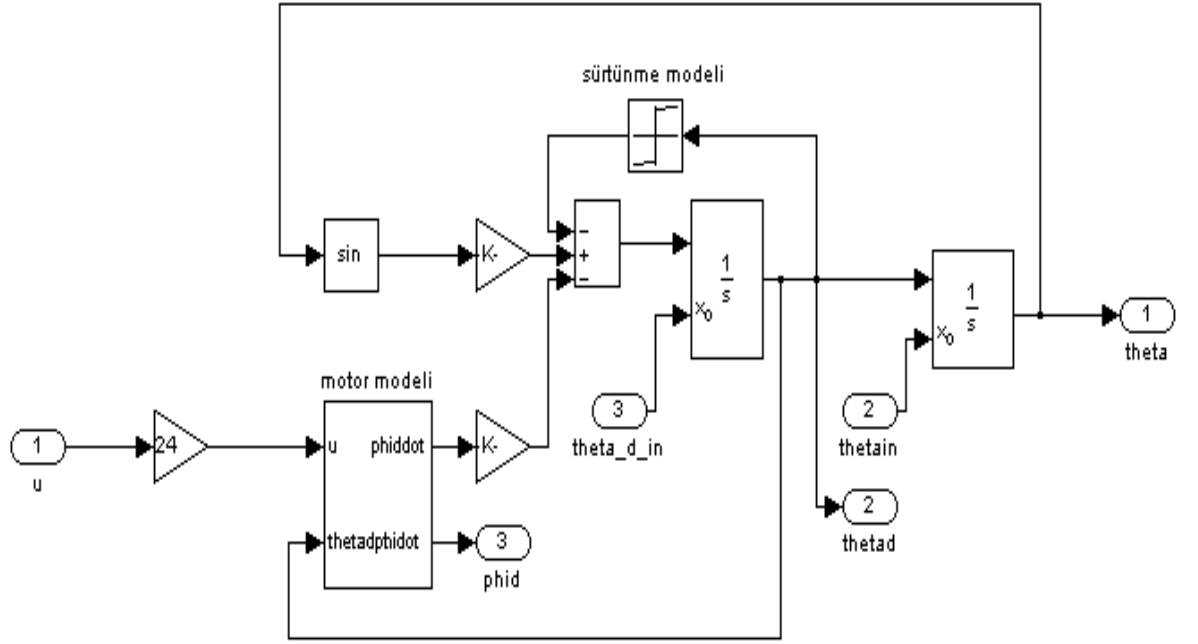
Şekil 4.3 : Sarkaç açısal pozisyonunun gerçek zamanlı ve simulasyondan elde edilen değerleri

Deney sonucunda elde edilen bilgiler yardımı ile sistemdeki sürtünmenin viskoz ve coulomb sürtünme ile modellenebileceği görülmüştür.

$$y = \text{sign}(x) \times ((\text{Viskos_katsayısı}) \times \text{abs}(x) + (\text{Coulomb_katsayısı})) \quad (4.1)$$

Denklem 4.1 deki viskos ve coulomb katsayıları sistem modelinden yararlanarak dene-yanıl yaklaşımı ile elde edilmiştir.

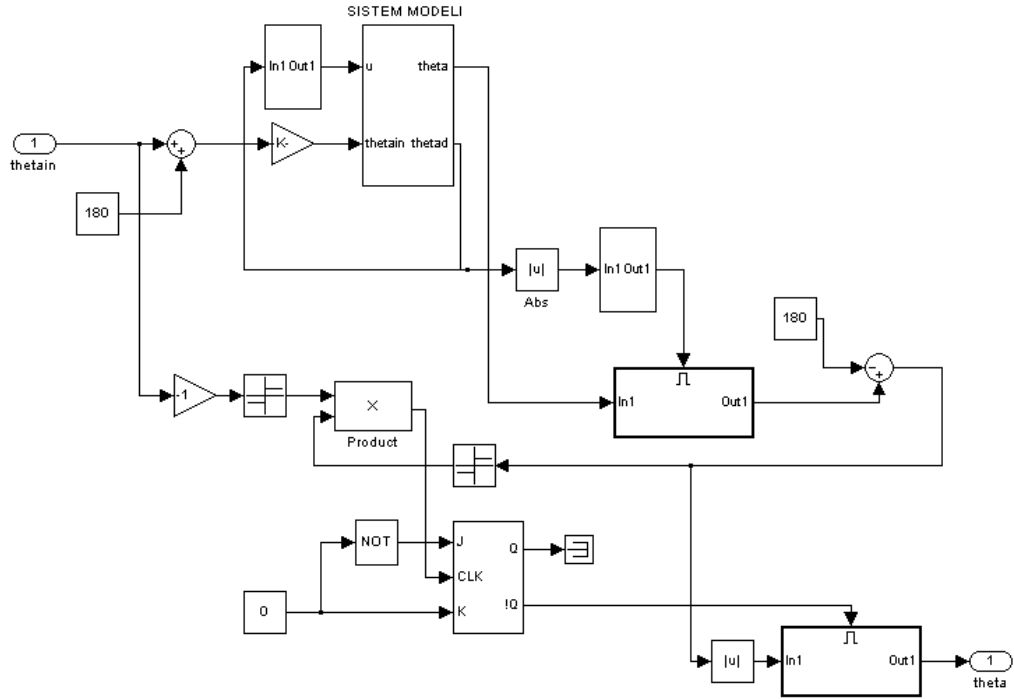
Sistem, modele viskoz-columb sürtünme bloğu eklendikten sonra Şekil 4.4 deki biçime gelmiştir.



Şekil 4.4 : Sürtünme modeli eklenmiş sistem modeli

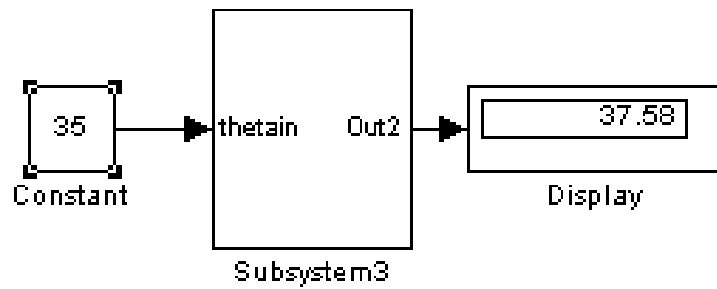
4.1.3 Matlab – Simulink Ortamında Bir Sonraki Salınımda Erişilecek Maksimum Açısal Konumun Belirlenmesi

Salınım kontrolünün uygulandığı sistemin her salınım sonunda eriştiği maksimum açı bilgisini elde etmek için Şekil 3.3 deki model oluşturulmuştur. Böylece sarkacın eriştiği maksimum açıyı vermek suretiyle bir sonraki salınımında erişeceği maksimum açı öngörülmüştür.



Şekil 4.5 : Bir sonraki salınımda sarkacın erişeceği maksimum açı değerini hesaplayan model

Şekil 4.6 da sarkacın 35° için yapılan simülasyon sonucu gösterilmiştir. Sistemin bir sonraki salınımda erişeceği maksimum açısal konum 37.58 olarak görülmüştür,

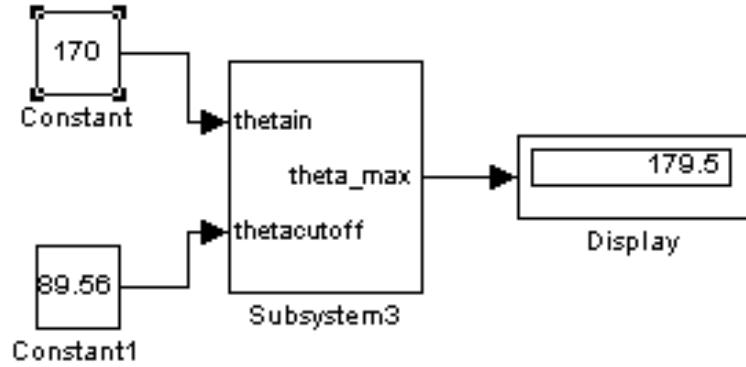


Şekil 4.6 : Maksimum açısal konumun nümerik değeri için simülasyonu

4.1.4 Matlab – Simulink Ortamında Kontrolörün Kesme Açısının Belirlenmesi

Salınım kontrol algoritmasında da belirtildiği gibi kontrol sinyali sarkacın hız sinyalinin işaretine bağlı olarak tüm salınım boyunca uygulanmaktadır. Ancak

170 *deroceras* *malinorum* *causal* *bonorum* *ca*



Şekil 4.8 : Kesim açısının nümerik değeri için simulasyonu

4.2 Denge Noktası Kontrolü

Bu bölümde yakalama bölgesine giren sarkaca uygulanacak kontrol algoritması tasarlanacak, sistemin bu kontrol algoritmalarına göstereceği davranışlar incelenecektir. Elde edilen simülasyon verilerinden faydalanarak yakalama bölgesinin aralığı her bir kontrol algoritması için belirlenecektir.

4.2.1 PID Kontrolü

Salınım kontrolü ile yakalama alanına kadar getirilen sarkaca denge noktası kontrolü uygulanacaktır. 0 noktası etrafında lineerleştirilmiş modeli

$$\ddot{\theta} = -a\theta - b_p(u - F) \quad (4.2)$$

$$\ddot{\varphi} = b_r(u - F) \quad (4.3)$$

olan ve sürtünmelerin ihmal edildiği sakaç düzeneğine denge noktası için kontrolör tasarlanacaktır. Her ne kadar kontrol edilmesi gerektiği düşünülen büyüklük sadece sarkacın hızı ve açısı olsa da disk hızının da kontrol edilmesi gerekmektedir. Disk hızının yüksek değerlere ulaşması ve dolayısı ile motorun doyuma girmesi sisteme istenilen dönme momentlerinin uygulanamamasına yol açacaktır. Bu nedenle sakaç

hız ve pozisyonunun yanında disk hızının da kontrol edilmesi gerekmektedir. Buna göre kontrol girişi,

$$u = -k_{pp}\theta - k_{dp}\dot{\theta} + k_{dr}(\dot{\varphi}_{ref} - \dot{\varphi}) \quad (4.4)$$

Şeklinde olacaktır. Kontrol giriş denklemini sıfır noktası etrafında lineerleştirilen sistem denkleminde yerine koyarsak,

$$\ddot{\theta} - b_p k_{dp} \dot{\theta} - (a + b_p k_{pp})\theta - b_p k_{dr} \dot{\varphi} = -b_p k_{dr} \dot{\varphi}_{ref} + d \quad (4.5)$$

şeklinde olacaktır. Kapalı çevrim üçüncü dereceden sistemin karakteristik denklemini,

$$A(s) = s^3 + (-b_p k_{dp} + b_r k_{dr})s^2 - (a + b_p k_{pp})s + ab_r k_{dr} \quad (4.6)$$

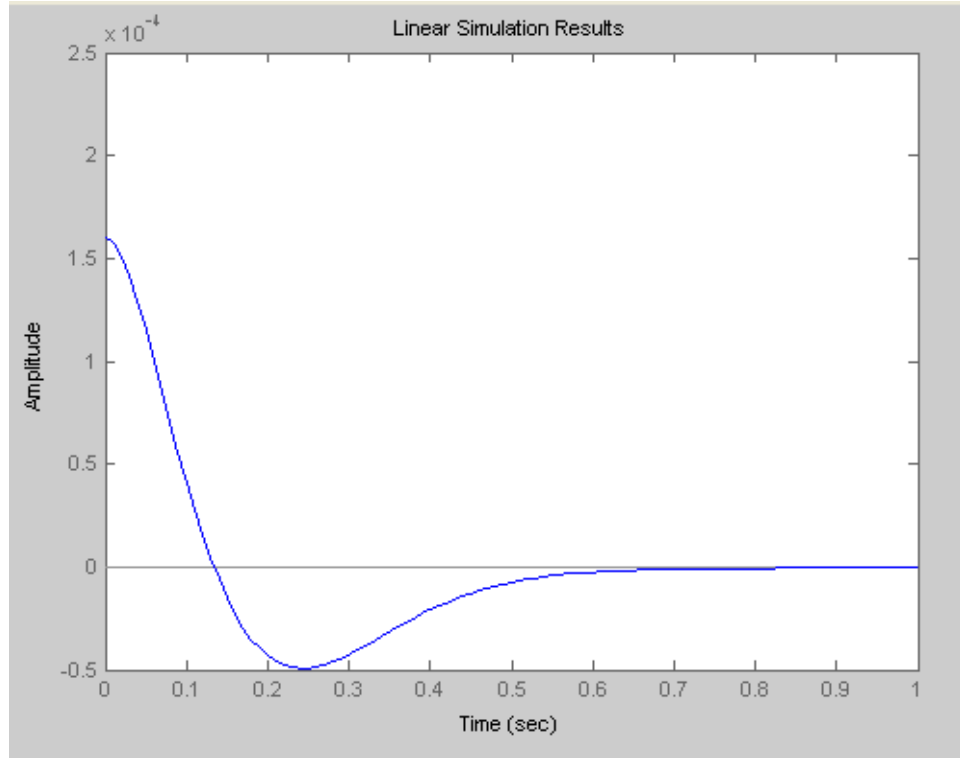
şeklindedir. Buradan kontrolörün kazançları,

$$k_{pp} = -\frac{(1 + 2\alpha\varsigma)w_0^2 + a}{b_p}, \quad (4.7)$$

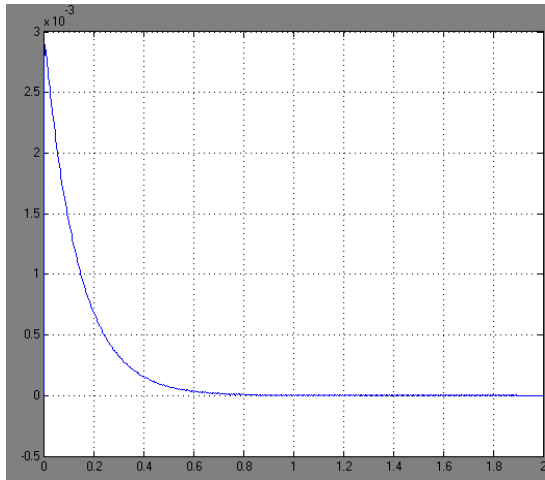
$$k_{dp} = -\frac{(1 + 2\varsigma)w_0 a + \alpha w_0^3}{ab_p}, \quad (4.8)$$

$$k_{dr} = -\frac{\alpha w_0^3}{ab_r} \quad (4.9)$$

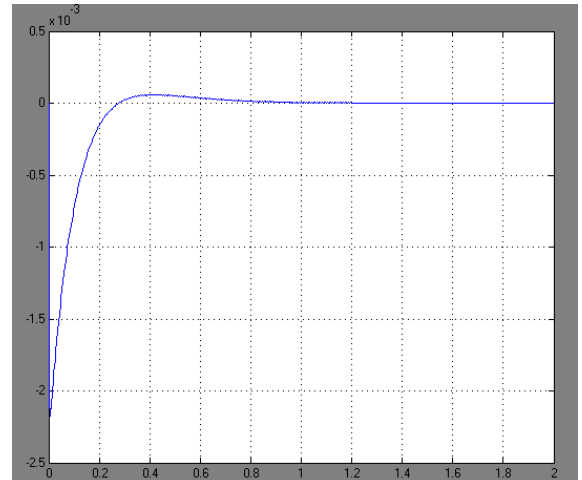
olarak bulunur.



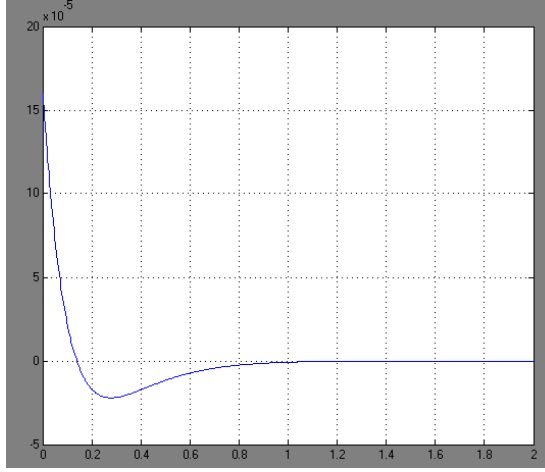
Şekil 4.9 : Theta=0.00016 radyan için, K=-340.3 -6035.7 -867.6



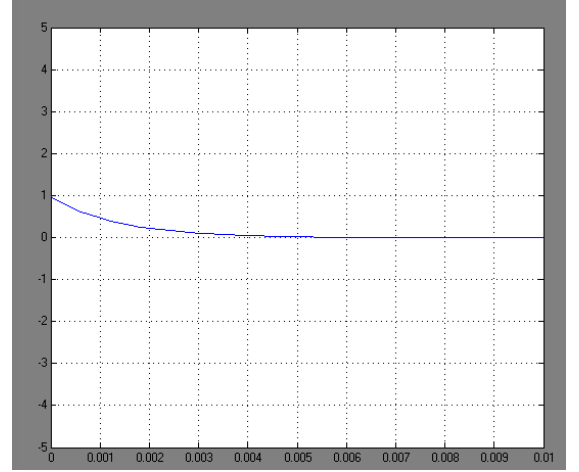
Şekil 4.10 : Motor açısal hızı



Şekil 4.11 : Sarkacın açısal hızı



Şekil 4.12 : Sarkacın açısal pozisyonu



Şekil 4.13 : Kontrol girişi

4.2.2 LQ Kontrol

Bu bölümde önceki bölümde bulunan kontrolör katsayılarının sistemin optimal performansı için tasarımında LQ kontrol kullanılacaktır. Bu kontrol yönteminde v kontrol girişi hesabı J “cost” fonksiyonun minimize edilmesine dayanır.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u) dt$$

x ve u ifadeleri durum denklemlerindeki ifadelerdir. Q ve R değerleri,

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad R=100, \quad N=100$$

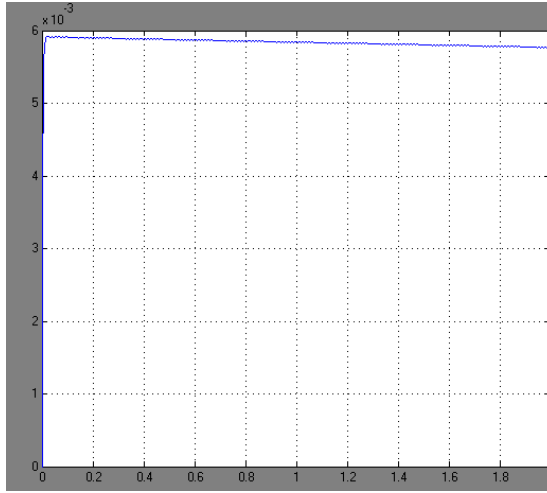
olarak seçildiğinde kontrol kazanç matrisi Matlab ortamında

$$\mathbf{K} = -0.1 \quad -1543.9 \quad -221.9$$

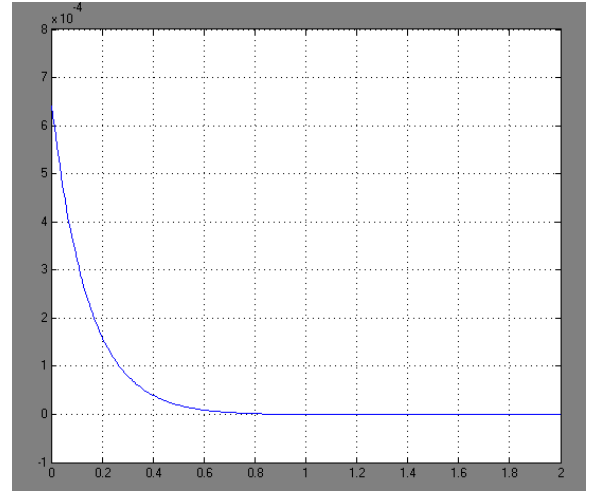
olarak hesaplanır.

Kontrol girişı baz alınarak yapılan ilk simulasyonda Şekil 4.14 - 4.17 şekillerinde sarkacın açısal konumu 0.00064 radyan olarak belirlenmiş ve sistemin davranışı incelenmiştir.

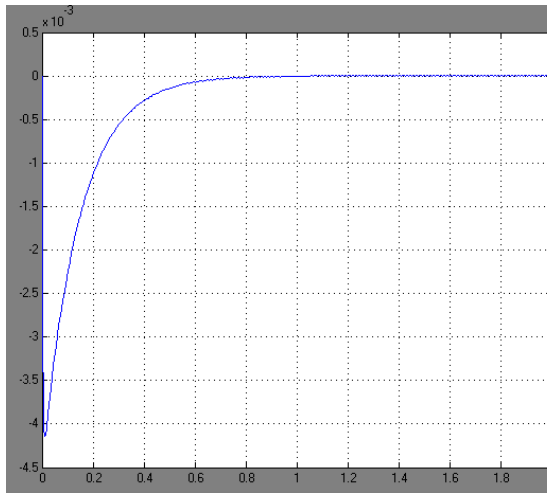
Diğer simulasyonda (Şekil 4.18-21) başlangıç açısal konum 0.00016 radyan seçilmiştir. Böylece bir önceki bölümde tasarlanan kontrolör ile LQR kontrolör sistem davranışlarının karşılaştırılması mümkün olacaktır.



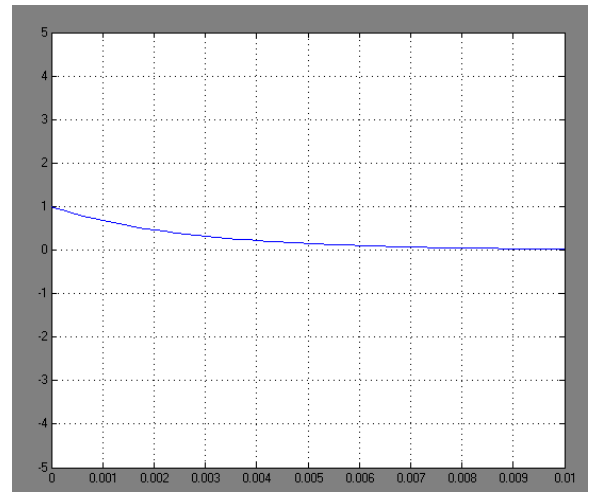
Şekil 4.14 : Motorun açısal hızı



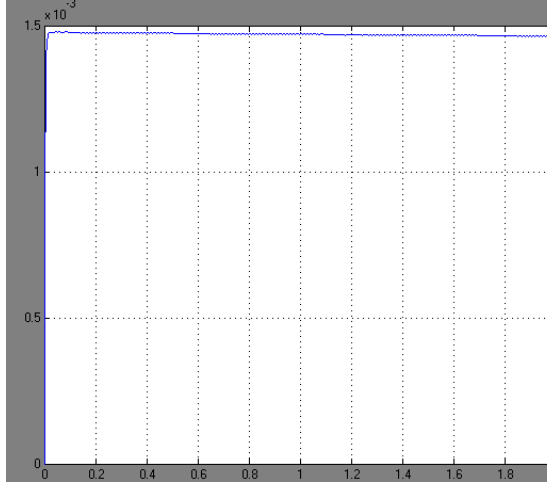
Şekil 4.16 : Sarkacın açısal konumu



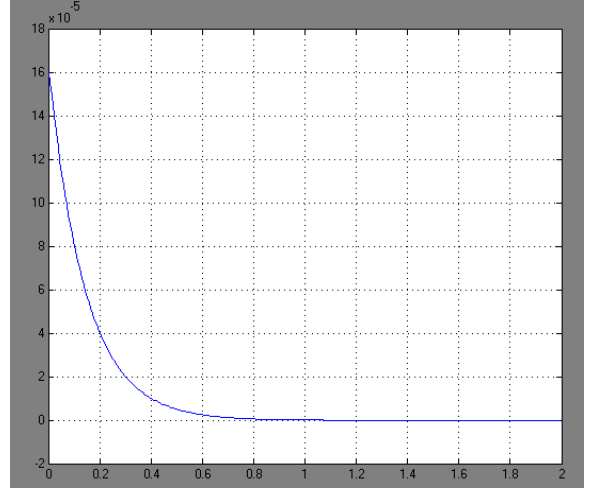
Şekil 4.15 : Sarkacın açısal hızı



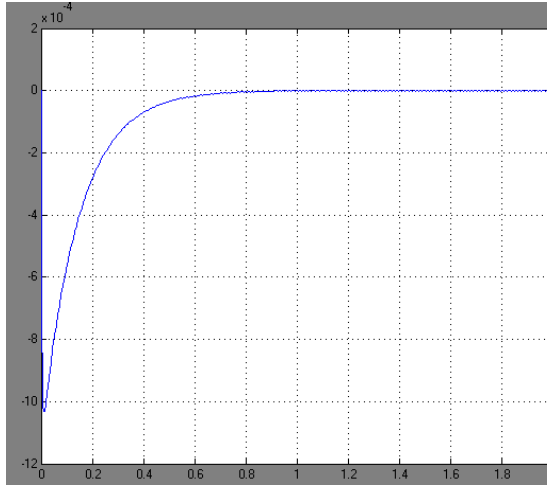
Şekil 4.17 : Kontrol girişı



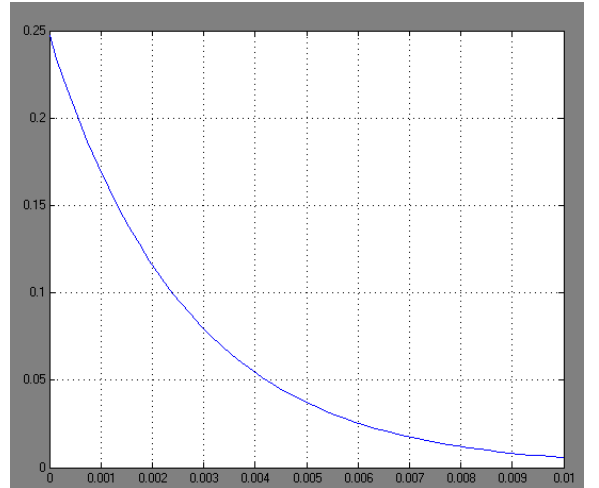
Şekil 4.18 : Motorun açısal hızı



Şekil 4.20 : Sarkacın açısal konumu



Şekil 4.19 : Sarkacın açısal hızı



Şekil 4.21 : Kontrol girişi

4.3 SONUÇ

Simulasyon sonuçlarına bakıldığında motorun ve dolayısı ile diskin açısal hızı PDP kontrolde tam sıfıra oturken LQR kontrolde 10^{-3} değerlerinde kalmaktadır. LQR kontrolde sistem aşım yapmadan sıfır konumuna gelirken PDP kontrolde sistem aşım yaparak aynı sürede denge haline oturmaktadır. Kontrol girişlerine baktığımızda PDP kontrol 1 girişi için 0.00016 radyan için sistemi kontrol edebilirken LQR kontrol 0.00064 radyan için kontrolü gerçekleştirebilmektedir.

5 SONUÇ

Bu çalışmada iki serbestlik dereceli ve bir uyarma elemanlı eksik uyarımlı bir sistem olan diskli sarkaç sistemi modellenmiş, deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda modellenen sistemin doğruluğu gerçekleşmiş, sürtünme parametreleri atanmıştır. Bir sonraki bölümde sistem için iki bölgeli kontrolör tasarlanmıştır. Denge noktası için tasarlanan kontrolörler karşılaştırılarak tez çalışması tamamlanmıştır.

Kontrol tasarımı bölümünde salınım kontrolü gerçek sistem üzerinde gerçekleşmiştir. Ancak denge noktası için yapılan simülasyonlar kontrolörlerin sistemin çok küçük bir aralığı için uygulanabilir olduklarını ortaya koymuştur.

Sistemin yapım aşamadasında ve kontrol edilmesi sırasında bir çok sorunlarla karşılaşıldı. Başlangıç konumunda karşılaşılan anahtarlama problemleri encoderdan gelen açısal konum bilgisinin filtrelenmesi ile giderildi.

Motor milinin ucuna akuple edilen diskten dolayı zarar görmesini önlemek için silindirik rulman ile yataklanmış sistem tasarlandı. Ayrıca motor mili ile diskin eş merkezlerinde oluşacak kaçıklıkları engellemek(hareket sırasındaki yalpalamaları önlemek) için uygun karakteristikte kaplin seçilmiştir.

Encoder ile sarkaç arasındaki bağlantı mili iki rulman ile yataklanarak ölçmede oluşabilecek hatalar ve sarkacın hareketi sırasında oluşabilecek istenmeyen hareketleri minimize edilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, yüksek momentli motor kullanılarak kontrol algoritmaları sisteme uygulanacaktır. Ayrıca, sarkaca yay eklenerek radyal esnek sistem oluşturulacak ve kontrol algoritmaları geliştirilerek davranışı incelenecektir. Sistem farklı düzeneklerle birleştirilerek çalışmalar devam ettirilecektir

KAYNAKLAR

- [1] **Spong, M.W., Corke, P., Lozano, R.,** 2001. Nonlinear Control of the Inertia Wheel Pendulum, *Automatica*, Vol. **37**, 1845-1851.
- [2] **Spong, M.W., Block, D.J., Astrom, K.J.,** 2001. The Mechatronics Control Kit for Education and Research, *IEEE Conference on Control Applications*, Mexico City, Sept. 5-7, 105-110.
- [3] **Ortega, R.; Spong, M.W.; Gomez-Estern, F.; Blankenstein, G.;** 2002. Stabilization of Underactuated Mechanical System via Interconnection and Damping Assignment, *Automatic Control, IEEE Transactions*,**4**, 1218 – 1233.
- [4] **Hernandez, V.M.; Sira-Ramirez, H.;** 2003. .Generalized PI control for swinging up and balancing the inertia wheel pendulum, 2003 American Control Conference,. *Proceedings of the 2003* ,**4**, 4-6 June, 2809 – 2814.
- [5] **Afkhami, S.; Yazdanpanah, M.J.; Maralani, P.J.,** 2003 Stabilization of inertia wheel pendulum using output feedback back-stepping, *Control Applications, CCA 2003. Proceedings of 2003 IEEE Conference*, **1**, 23-25 June, 977 – 982.
- [6] **Spong, M.W.,** 1996, Underactuated Mechanical Systems, *International Workshop on Control Problems in Robotics and Automation: Future Directions* Hyatt Regency, San Diego, California, Dec.
- [7] **Spong, M.W.,** 1994. The Control of Underactuated Mechanical System, *Plenary Address at The First International Conference on Mechatronics* , Mexico City, Jan. 26—29.
- [8] **Olfati-Saber, R.,** 2001. Global stabilization of a flat underactuated system: the inertia wheel pendulum, *Decision and Control*, 2001. *Proceedings of the 40th IEEE Conference*, **4**, 4-7 Dec.,:3764 – 3765.

- [9] **Olfati-Saber, R.**, 2000. Control of Underactuated Mechanical Systems with two Degrees of Freedom and Symmetry, Proc. of American Control Conference, Chicago, June.
- [10] **Astrom, K.J; Furuta, K.**, 2000. Swinging up a pendulum by energy control Automatica, 36 pp. 287-295.
- [11] **Spong, M.W., Praly, L.**, 1996. Control of Underactuated Mechanical Systems Using Switching and Saturation, Proc. of the Block Island Workshop on Control Using Logic Based Switching , Springer-Verlag.
- [12] **Fantoni, I., Lozano, R., Spong, M.W.**, 2000. Energy based control of the Pendubot, IEEE Transactions on Automatic Control, AC-45, No. 4 , pp. 725 -729, April.
- [13] **Spong, M.W.**, 1996. Energy Based Control of a Class of Underactuated Mechanical Systems, IFAC World Congress , San Francisco, CA.
- [14] **Spong, M.**, 1995. The Swingup Control Problem for the Acrobot, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 15, No. 1, pp. 49--55, Feb.
- [15] **Spong, M.W.**, 1994. The Control of Underactuated Mechanical System, Plenary Address at The First International Conference on Mechatronics , Mexico City, Jan. 26—29.
- [16] **Spong, M.W., Block, D.J., Astrom, K.J.**, 2001. The Mechatronics Control Kit for Education and Research, IEEE Conference on Control Applications, Mexico City, pp. 105-110, Sept. 5-7.
- [17] **Anup B. Katake, Arun Mahindrakar and R. N Banavar**, 2000. Study of Underactuated Mechanisms in the Presence of Holonomic Constraints pp. 703-706, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, Panjim, Goa, India, Jan.
- [18] **Craig, K., Awtar S.**, 2000. Inverted Pendulum Systems: Rotary and Arm-Driven A Mechatronic System Design Case Study, Presented at: The 7th Mechatronics Forum International Conference, Sep 6-8 .
- [19] **Spong, M.W., and Block, D.J.**, 1995. The Pendubot: A Mechatronic System for Control Research and Education, 34th IEEE CDC, New Orleans, pp. 555-557.

ÖZGEÇMİŞ

Erdem BALIK, 1980 yılında Gaziantep’te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Gaziantep’te tamamladı. 1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde lisans öğrenimine başladı. 2003 yılında lisans derecesini aldıktan sonra İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı.

EK A SÜRTÜNME DENEYİ VERİLERİ

Matematiksel ifadesi çıkarılan sistemin her salınımında eriştiği maksimum açısal konum değerleri simülasyonunundan ve gerçek zamanlı sistemden alınarak sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Tabloda da bu deneye ait açısal konum bilgileri verilmiştir.

GERCEK	SIMULASYON
0	0
2.232	4.106
-5.508	-6.335
8.1	9.6115
-10.872	-12.205
13.248	14.985
-15.912	-17.368
18.288	20.044
-20.88	-22.433
23.256	25.043
-25.776	-27.433
28.152	30.075
-30.6	-32.48
33.012	34.9615
-35.424	-37.416
37.836	39.83
-40.212	-42.295
42.696	44.722
-45.18	-47.267

47.592	49.835
-50.04	-52.33
52.488	54.875
-54.972	-57.31
57.456	59.89
-59.976	-62.467
62.604	65.086
-65.16	-67.822
67.716	70.486
-70.272	-73.17
72.9	75.875
-75.528	-78.655
78.192	81.41
-80.892	-84.218
83.7	87.09
-86.508	-90.033
89.46	93.005
-92.52	-96.083
95.616	99.472
-98.892	-102.633
102.096	106.197
-105.588	-109.586
109.044	113.65
-112.752	-117.294
116.712	122.185
-120.96	-126.54
125.316	131.966
-130.32	-137.6
135.792	145.79
-142.344	-154.335

150.048	166.45
---------	--------

EK B SİSTEMİN YAYLI HALİNİN HAREKET DENKLEMLERİ

$$\tau = \tau_a + l r \times \overset{\text{r}}{f} + l r \times m \overset{\text{u}}{p} + J_p \overset{\text{u}}{\theta} r$$

$$\tau_a = J_w \overset{\text{g}}{\varphi} z$$

$$\overset{\text{u}}{p} = l \overset{\text{r}}{r}$$

$$\overset{\text{u}}{w} = \overset{\text{g}}{\theta} z$$

$$\frac{d \overset{\text{u}}{p}}{dt} = \overset{\text{g}}{l} r + l \overset{\text{u}}{w} \times r = \overset{\text{g}}{l} r + l \overset{\text{g}}{\theta} z \times r = \overset{\text{g}}{l} r + l \overset{\text{g}}{\theta} u$$

$$\frac{d^2 \overset{\text{u}}{p}}{dt^2} = \overset{\text{g}}{l} r + l \overset{\text{g}}{w} \times r + l \overset{\text{g}}{\theta} u + l \overset{\text{g}}{\theta} u + l \overset{\text{g}}{\theta} w \times u$$

$$= \overset{\text{g}}{l} r + l \overset{\text{g}}{\theta} (z \times r) + l \overset{\text{g}}{\theta} u + l \overset{\text{g}}{\theta} u + l \overset{\text{g}^2}{\theta} z \times u$$

$$= \overset{\text{g}}{l} r + l \overset{\text{g}}{\theta} (z \times r) + l \overset{\text{g}}{\theta} u + l \overset{\text{g}}{\theta} u + l \overset{\text{g}^2}{\theta} z \times u$$

$$= (l - l \overset{\text{g}}{\theta}) r + (l \overset{\text{g}}{\theta} + 2l \overset{\text{g}}{\theta}) u$$

$$= (l - l \overset{\text{g}}{\theta}) r + \frac{1}{l} (l^2 \overset{\text{g}}{\theta} + 2l \overset{\text{g}}{\theta}) u$$

$$= (l - l \overset{\text{g}}{\theta}) r + \frac{1}{l} \left[\frac{d}{dt} (l^2 \overset{\text{g}}{\theta}) \right] u$$

$$l \overset{\text{r}}{r} \times \overset{\text{u}}{f} = l m g \overset{\text{r}}{r} \times \overset{\text{u}}{y} = l m g \sin \theta \overset{\text{r}}{z}$$

$$l \overset{\text{r}}{r} \times m \overset{\text{u}}{p} = -m \left[\frac{d}{dt} (l^2 \overset{\text{g}}{\theta}) \right] \overset{\text{r}}{r} \times \overset{\text{r}}{u} = - \left[\frac{d}{dt} (l^2 \overset{\text{g}}{\theta}) \right] \overset{\text{r}}{z}$$

$$\tau = J_w \overset{\text{g}}{\varphi} + l m g \sin \theta - \frac{d}{dt} (l^2 \overset{\text{g}}{\theta}) + J_p \overset{\text{g}}{\theta}$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{lmg}{J_p} \sin \theta - \frac{J_w}{J_p} \ddot{\varphi}$$

$$F = mg(\dot{r} \cos \theta + \dot{u} \sin \theta) + k(l_0 - l)\dot{r}$$

$$= [mg \cos \theta + k(l_0 - l)]\dot{r} + (mg \sin \theta)\dot{u}$$

$$m(l - l\dot{\theta}^2) = mg \cos \theta + k(l_0 - l)$$

$$(l - l\dot{\theta}^2) = g \cos \theta + \frac{k}{m}(l_0 - l)$$

$$\ddot{l} = l\ddot{\theta}^2 + g \cos \theta + \frac{k}{m}(l_0 - l)$$

EK C KONTOL ALGORİTMALARINA AİT KAZANÇLARIN MATLAB ORTAMINDA HESAPLANMASI

```
%controller algorithms

% model(state variables) -> x=[phi_dot theta theta_dot]

a=48.3928;

b_p=0.062763;

b_r=0.081776;

zeta=0.707;

alpha=0.5;

w0=2*6.95646; %2*w_p

A=[0 0 0; 0 0 1; 0 a 0];

B=[b_r;0;-b_p];

C=[0 1 0];

D=[0];

%Root-locus of the system

figure(1)

rlocus(num(1,:),denum)

%starting conditions

x0 = [0 0.00016 0];

t = 0:0.01:2;

u = 0*t;

%controller gains

kdr=-alpha*w0^3/(a*b_r)
```

```

kpp=-((1+2*alpha*zeta)*w0^2+a)/b_p
kdp=-((alpha+2*zeta)*w0*a+alpha*w0^3)/(a*b_p)
kdr = -340.2658, kpp = -6.0357e+003 ,kdp = -867.6275

%roots that satisfies the parameters;w0, alpha, zeta...
P=roots([1 (alpha+2*zeta)*w0 (1+2*alpha*zeta)*w0^2 alpha*w0^3])

%Acherman kutup atama yöntemi kullanılarak kontrol kazanç değerleri;
K=acker(A,B,P)

K = 1.0e+003 *( -0.3403 -6.0357 -0.8676)

K=place(A,B,P)

K = 1.0e+003 *( -0.3403 -6.0357 -0.8676)

%Simulate time response of LTI-> controlled system
figure(2)
lsim(A-B*K,B,C,D,u,t,x0)

%LQR kontrol algoritması
R = 100;

% Get trial diagonal elements for Q --> state-cost matrix
Q = eye(3);

Q11 = input('Enter Q11 : ');
Q22 = input('Enter Q22 : ');e
Q33 = input('Enter Q22 : ');

Q(1,1) = Q11;
Q(2,2) = Q22;
Q(3,3) = Q33;

[K_lqr, P, E] = lqr(A, B, Q, R);

K_lqr

```

```
>>K_lqr = (-0.1 -1543.9 -221.9)
```

