

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**SANAL ELEMANLAR YARDIMI İLE ÜST SEVİYE ROBOT
KONTROL SİSTEMİ TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

SABRİ BİÇAKCI

BALIKESİR, EKİM - 2012

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**SANAL ELEMANLAR YARDIMI İLE ÜST SEVİYE ROBOT
KONTROL SİSTEMİ TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

SABRİ BİÇAKCI

BALIKESİR, EKİM - 2012

KABUL VE ONAY SAYFASI

Sabri BİCAKCI tarafından hazırlanan "SANAL ELEMANLAR YARDIMI İLE ÜST SEVİYE ROBOT KONTROL SİSTEMİ TASARIMI" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 31.10.2012 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

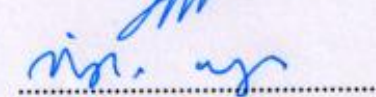
Danışman
Yrd.Doç.Dr.Davut AKDAŞ



Üye
Prof.Dr.Fehmi ERZİNCANLI



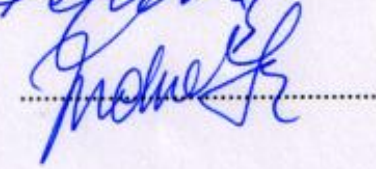
Üye
Doç.Dr.İlyas UYGUR



Üye
Yrd.Doç.Dr.Hayrettin YÜKSEL



Üye
Yrd.Doç.Dr.Mehmet İREN



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Hilmi NAMLI



Bu tez çalışması TÜBİTAK-BİDEP tarafından Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında ve Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2012/47 nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

SANAL ELEMANLAR YARDIMI İLE ÜST SEVİYE ROBOT KONTROL SİSTEMİ TASARIMI

DOKTORA TEZİ

SABRİ BİÇAKCI

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. DAVUT AKDAŞ)

BALIKESİR, EKİM - 2012

Kontrol edilmesi zor, karmaşık ve insan hayatını doğrudan etkileyen, çok pahalı mekanizmaları (uçak, nükleer santrallerde kullanılan robotlar, insansı robotlar vs.) kontrol edebilmek için yapılacak deneylerin gerçek mekanizma yerine mekanizmanın yaklaşık matematik modeli üzerinden benzetim ortamında yapılması daha doğru olacaktır. Bu tip mekanizmaları kontrol etmek için kullanılan geleneksel kontrol sistemleri de oldukça karmaşık, anlaşılması ve uygulanması güç sistemlerdir. Ayrıca mekanizmanın yapması istenen davranışların tamamını tek başlarına sağlamaları da neredeyse imkansızdır. Bu nedenle anlaşılması ve uygulanması daha kolay olan ve mekanizmanın doğal hareketlerini kolayca tanımlayabilecek kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Mekanizmaların hareketlerini sanal makine elemanları ile kontrol ediliyormuş gibi kontrol etmeye yarayan Sanal Eleman Kontrol Yöntemi bu ihtiyaçları sağlayabilecek bir kontrol tekniğidir. Fakat bu yöntemin de, tasarımında kullanılan sanal makine elemanlarının parametrelerinin nasıl belirleneceği konusunda geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada kontrol sistemlerinin test edilmesi için sıklıkla kullanılan tek kademeli bir ters sarkaç mekanizmasının kontrolü için Sanal Eleman Kontrol Yöntemi kullanılmıştır. Ters sarkacın yaklaşık matematik modeli Lagrange yöntemi, mekanizmanın sürtünme modeli ise Karnopp sürtünme modeli kullanılarak elde edilmiştir. Kontrol deneyleri benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Karnopp sürtünme model parametreleri ile ters sarkacın kontrolünde kullanılan sanal elemanların parametreleri Yanıt Yüzeyi Yöntemi diye bilinen deney tasarım tekniği ile optimize edilmiştir. Optimize edilen parametreler ile gerçek mekanizmanın kontrolü de başarı ile gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: sanal eleman kontrolü, yanıt yüzeyi yöntemi, karnopp, ters sarkaç, kontrol, sürtünme, robot

ABSTRACT

DESIGN OF A HIGHER CONTROL SYSTEM USING VIRTUAL COMPONENTS

PH.D THESIS

SABRİ BİÇAKCI

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. DAVUT AKDAŞ)

BALIKESİR, OCTOBER 2012

It is desirable that to simulate complex mechanisms and life threatening experiments such as control of a plane, nuclear plant robots and humanoid robots in order to cut costs and save lives. Conventional control systems that are used to control such mechanisms are also quite complicated and it is difficult to understand and implement on such systems. Furthermore, it is virtually impossible for such mechanisms to care out intended performances alone. Therefore, methods which are easier to understand and implement and are able to identify the natural movements of the mechanism are needed. Virtual Model Control method, a control technique which is used to control the movements of the mechanisms with virtual machine elements, can satisfy these requirements. However, this technique requires improvements on determining the parameters of the virtual machine elements.

In the present work, Virtual Model Control method is implemented in order to control an inverted pendulum mechanism which is often used to test the control systems. The approximate mathematical model and the friction model of the inverted pendulum are obtained by using Lagrange method and Karnopp friction model, respectively. The control experiments are performed in a simulation environment. The parameters of the Karnopp friction model and the virtual elements are optimised by using an experimental design technique called Response Surface Methodology. The real mechanism is successfully controlled by the optimised parameters.

KEYWORDS: virtual model control, response surface methodology, karnopp, inverted pendulum, control, friction, robot

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ | iv |
| TABLO LİSTESİ | vi |
| SEMBOL LİSTESİ | vii |
| ÖNSÖZ | ix |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. DENEY DÜZENEGİ | 7 |
| 2.1 Ters Sarkaç | 7 |
| 2.1.1 Ters Sarkacın Matematik Modeli..... | 12 |
| 2.2 Kontrol Sistemi | 16 |
| 2.3 Benzetim Sistemi | 21 |
| 3. YÖNTEMLER | 27 |
| 3.1 Karnopp Sürtünme Modeli | 27 |
| 3.2 Yanıt Yüzeyi Yöntemi | 30 |
| 3.3 Oransal Kontrol | 31 |
| 3.4 Sanal Eleman Kontrolü..... | 36 |
| 4. DENEYLER | 40 |
| 4.1 Sarkacın Karnopp Sürtünme Parametrelerinin Belirlenmesi..... | 40 |
| 4.2 Arabanın Karnopp Sürtünme Parametrelerinin Belirlenmesi..... | 54 |
| 4.3 Oransal Kontrol Kazanç Değerlerinin Belirlenmesi..... | 65 |
| 4.4 Sanal Elemanların Parametrelerinin Değerlerinin Belirlenmesi..... | 80 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER | 98 |
| 5.1 Sonuç | 98 |
| 5.2 Öneriler | 99 |
| 6. KAYNAKLAR | 100 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1: Deney düzeneğinin sembolik şeması..... | 7 |
| Şekil 2.2: İkinci sarkaç kademesinin taşıyıcısı | 8 |
| Şekil 2.3: Tasarlanan ters sarkaç sistemi | 9 |
| Şekil 2.4: İmalatı tamamlanmış ters sarkaç mekanizması | 11 |
| Şekil 2.5: Ters sarkaçtaki koordinat yerleşimleri | 13 |
| Şekil 2.6: Ters sarkaç kontrol sisteminin şeması | 17 |
| Şekil 2.7: 40Hz kesim frekanslı bant geçirgen filtre devresi | 18 |
| Şekil 2.8: Enkoder ara yüz devresi | 19 |
| Şekil 2.9: Güç kuvvetlendirici devresi açık şeması | 21 |
| Şekil 2.10: Güç kuvvetlendirici devresi | 21 |
| Şekil 2.11: Görsel ters sarkaç gösterimi | 26 |
| Şekil 2.12: Sarkacın Konum - Zaman Grafiği | 26 |
| Şekil 3.1: Sürtünme parametrelerinin sürtünme kuvvetine etkileri | 28 |
| Şekil 3.2: Karnopp sürtünme modeli | 29 |
| Şekil 3.3: Oransal kontrol | 32 |
| Şekil 3.4: Sönümlenme çeşitleri | 33 |
| Şekil 3.5: Birim basamak yanıtı | 35 |
| Şekil 3.6: İnsansı robotun sanal yaylar ile yürütülmesi | 37 |
| Şekil 4.1: Gerçek sarkacın konum - zaman grafiği..... | 41 |
| Şekil 4.2: Sarkaç optimizasyonu için değerlendirme kıstasları | 42 |
| Şekil 4.3: İlk tasarım için optimizasyon aracının grafiksel sonuçları..... | 44 |
| Şekil 4.4: Gerçek kayıt ile benzetim sonucunun karşılaştırılması | 45 |
| Şekil 4.5: İkinci tasarım için optimizasyon aracının grafiksel sonuçları | 47 |
| Şekil 4.6: İkinci tasarım için gerçek kayıt ile benzetim sonucunun karşılaştırılması | 48 |
| Şekil 4.7: Üçüncü tasarım için optimizasyon aracının grafiksel sonuçları | 51 |
| Şekil 4.8: Üçüncü tasarım için gerçek kayıt ile benzetim sonucunun karşılaştırılması | 52 |
| Şekil 4.9: Gerçek arabanın birim basamak yanıtı | 55 |
| Şekil 4.10: İlk tasarım için optimizasyon aracının çıktıları | 57 |
| Şekil 4.11: İlk tasarım için benzetim ile gerçek sistemin karşılaştırılması..... | 58 |
| Şekil 4.12: İkinci tasarım için optimizasyon aracının çıktıları | 62 |
| Şekil 4.13: İkinci tasarım için benzetim ile gerçek sistemin karşılaştırılması.. | 63 |
| Şekil 4.14: Kontrol sisteminin blok diyagramı | 66 |
| Şekil 4.15: Her kazanç parametresi için Root-Locus analiz grafikleri | 68 |
| Şekil 4.16: Birinci tasarım için optimizasyon aracının çıktıları | 70 |
| Şekil 4.17: Birinci tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri | 71 |
| Şekil 4.18: İkinci tasarım için optimizasyon aracının çıktıları | 73 |
| Şekil 4.19: İkinci tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri | 74 |
| Şekil 4.20: Üçüncü tasarım için optimizasyon aracının çıktıları | 77 |
| Şekil 4.21: Üçüncü tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri | 78 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.22: Üçüncü tasarımda bulunan optimum değerleri için hız - konum grafikleri | 78 |
| Şekil 4.23: Gerçek sistemde yapılan deney ile elde edilen konumlar..... | 79 |
| Şekil 4.24: Çizgisel yay ve sönümleyici yaklaşımı | 80 |
| Şekil 4.25: Burulma yayı ve sönümleyicisi yaklaşımı..... | 80 |
| Şekil 4.26: Normal yay ve sönümleyicinin oluşturduğu kuvvetler..... | 83 |
| Şekil 4.27: Burulma yayı ve sönümleyicisinin oluşturduğu kuvvetler | 84 |
| Şekil 4.28: Sanal eleman kontrolörü | 85 |
| Şekil 4.29: Birinci tasarım için optimizasyon aracının çıktıları | 88 |
| Şekil 4.30: Birinci tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri | 89 |
| Şekil 4.31: İkinci tasarım için optimizasyon aracının çıktıları | 91 |
| Şekil 4.32: İkinci tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri | 92 |
| Şekil 4.33: Üçüncü tasarım için optimizasyon aracının çıktıları | 95 |
| Şekil 4.34: Üçüncü tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri | 96 |
| Şekil 4.35: Üçüncü tasarımda bulunan optimum değerleri için hız - konum grafikleri | 96 |
| Şekil 4.36: Gerçek sistemde yapılan deney ile elde edilen konumlar..... | 97 |

TABLO LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Tablo 2.1: Ters sarkaç sisteminin parametreleri..... | 10 |
| Tablo 4.1: Karnopp sürtünme model parametrelerinin başlangıç değer aralığı..... | 43 |
| Tablo 4.2: Gerçek değerleri ve gözlemlenen sonuçları gösteren deney tasarım matrisi | 43 |
| Tablo 4.3: İlk tasarım için optimum parametre değerleri..... | 44 |
| Tablo 4.4: İkinci tasarım için yeni parametre aralıkları | 45 |
| Tablo 4.5: İkinci tasarım için değerleri ve alınan sonuçları gösteren deney tasarım matrisi | 46 |
| Tablo 4.6: İkinci tasarım için optimum parametre değerleri..... | 46 |
| Tablo 4.7: Üçüncü tasarım için yeni parametre aralıkları | 48 |
| Tablo 4.8: Üçüncü tasarım için gerçek değerleri ve alınan sonuçları gösteren deney tasarım matrisi | 49 |
| Tablo 4.9: Üçüncü tasarım için optimum parametre değerleri..... | 50 |
| Tablo 4.10: (4.1) – (4.5) eşitlikleri kullanılarak hesaplanan kıstas değerleri ile benzetim ortamında yapılan deneylerden elde edilen kıstas değerleri..... | 53 |
| Tablo 4.11: Uyumluluk kıstaslarının hedef değerleri..... | 55 |
| Tablo 4.12: Parametrelerin başlangıç değer aralıkları..... | 56 |
| Tablo 4.13: İlk deney tasarım matrisi ve çıktıları..... | 56 |
| Tablo 4.14: İlk tasarımda elde edilen optimum değerler..... | 57 |
| Tablo 4.15: İkinci tasarımın parametre aralıkları | 59 |
| Tablo 4.16: İkinci deney tasarım matrisi ve çıktıları..... | 59 |
| Tablo 4.17: İkinci tasarımda elde edilen optimum değerler..... | 62 |
| Tablo 4.18: (4.6) – (4.13) eşitlikleri kullanılarak hesaplanan kıstas değerleri ile benzetim ortamında yapılan deneylerden elde edilen kıstas değerleri | 64 |
| Tablo 4.19: Başlangıç tasarımı için parametre değerler aralıkları | 68 |
| Tablo 4.20: Birinci deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları | 69 |
| Tablo 4.21: Birinci tasarımda elde edilen optimum değerler | 69 |
| Tablo 4.22: İkinci tasarım için parametre değerler aralıkları | 71 |
| Tablo 4.23: İkinci deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları | 72 |
| Tablo 4.24: İkinci tasarımda elde edilen optimum değerler..... | 72 |
| Tablo 4.25: Üçüncü tasarım için parametre değerler aralıkları | 74 |
| Tablo 4.26: Üçüncü deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları | 75 |
| Tablo 4.27: Üçüncü tasarımda elde edilen optimum değerler..... | 76 |
| Tablo 4.28: Başlangıç tasarımı için parametre değerler aralıkları | 86 |
| Tablo 4.29: Birinci deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları | 87 |
| Tablo 4.30: Birinci tasarımda elde edilen optimum değerler | 87 |
| Tablo 4.31: İkinci tasarım için parametre değerler aralıkları | 89 |
| Tablo 4.32: İkinci deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları | 90 |
| Tablo 4.33: İkinci tasarımda elde edilen optimum değerler..... | 90 |
| Tablo 4.34: Üçüncü tasarım için parametre değerler aralıkları | 92 |
| Tablo 4.35: Üçüncü deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları..... | 93 |
| Tablo 4.36: Üçüncü tasarımda elde edilen optimum değerler..... | 94 |

SEMBOL LİSTESİ

| | |
|--------------|--|
| m | Sarkacın kütlesi |
| M | Arabanın kütlesi |
| r | Kasnak yarı çapı |
| N | Motorun dişli oranı |
| η | Motorun verimi |
| K_t | Motorun tork sabiti |
| K_b | Motorun zıt elektro motor kuvvet sabiti |
| R_a | Motorun armatür direnci |
| J_m | Atalet momenti |
| I | Sarkacın atalet momenti |
| l | Sarkacın kütle merkezinin dönme eksenine olan mesafesi |
| $L_{kızak}$ | Kızak boyu |
| L | Lagrange enerji ifadesi |
| k | Kinetik enerji |
| u | Potansiyel enerji |
| τ | Tork |
| ω | Açısal hız |
| v | Çizgesel hız |
| P | Konum vektörü |
| F_{motor} | Motorun ürettiği kuvvet |
| x | Arabanın konumu |
| θ_m | Motorun açısal konumu |
| θ | Sarkacın açısal konumu |
| g | Yerçekimi ivmesi |
| F_{s_a} | Arabanın sürtünme kuvveti |
| F_{s_s} | Sarkacın sürtünme kuvveti |
| V | Motora uygulanan gerilim |
| t | Zaman |
| h | Adım büyüklüğü |
| F_v | Viskoz sürtünme katsayısı |
| F_c | Coulomb sürtünme katsayısı |
| F_s | Kuru sürtünme sabiti |
| DV | Karnopp sıfır hız bölgesinin sınır değeri |
| $F_e(t)$ | Harici kuvvetler |
| Y | Sistem çıktısı |
| X_i | Sistemin i . giriş değişkeni |
| β_0 | Regresyon denklemi sabiti |
| β_i | Doğrusal terimlerin regresyon katsayısı |
| β_{ii} | Karesel terimlerin regresyon katsayısı |
| β_{ij} | Etkileşim terimlerinin regresyon katsayısı |
| e | Artık deneysel hata |
| e_{zC} | Sıfır geçiş sayıları farkı |
| e_{PM} | Tepe değer sayıları farkı |
| e_{NM} | Dip değer sayıları farkı |

| | |
|---------------------|---|
| mse_A | Açının ortalama karesel hatası |
| mse_V | Hızın ortalama karesel hatası |
| PE | Tahmin hatası |
| $R(s)$ | Sisteme uygulanan referans giriş |
| $G(s)$ | Kontrol edilmek istenen sistemin davranışını ifade eden transfer fonksiyonunu |
| $Y(s)$ | Sistemin çıkış sinyalini |
| $E(s)$ | Referans girişi ile çıkış arasındaki hata |
| ζ | Sistemin sönümlenme oranı |
| ω_n | Sistemin doğal frekansı |
| K_p | Oransal kazanç değerini |
| ess | Kalıcı Durum Hatası |
| t_r | Yükselme Zamanı |
| t_s | Oturma Zamanı |
| S_{max} | Oturma Maksimumu |
| S_{min} | Oturma Minimumu |
| PO | Yüzdellik Maksimum Taşma |
| P | Maksimum Değer |
| t_P | Maksimum Değer Zamanı |
| ${}^E R$ | Etki Koordinat Düzlemi |
| ${}^T R$ | Tepki Koordinat Düzlemi |
| ${}^O R$ | Referans Koordinat Düzlemi |
| x_{ort} | Araba konumunun ortalama değeri |
| θ_{ort} | Sarkaç konumunun ortalama değeri |
| x_{p-p} | Araba konumunun tepeden tepeye değeri |
| θ_{p-p} | Sarkaç konumunun tepeden tepeye değeri |
| K_{yay_araba} | Arabanın yay sabitini |
| $B_{sön_araba}$ | Arabanın sönümleyici sabitini |
| F_{sanal_araba} | Arabanın sanal elemanların oluşturduğu kuvveti |
| K_{yay_sarkac} | Sarkacın yay sabitini |
| $B_{sön_sarkac}$ | Sarkacın sönümleyici sabitini |
| F_{sanal_sarkac} | Sarkacın sanal elemanlarının oluşturduğu kuvveti |
| K_a | Arabanın yay sabiti |
| B_a | Arabanın sönümleyici sabiti |
| K_s | Sarkacın yay sabiti |
| B_s | Sarkacın sönümleyici sabiti |

ÖNSÖZ

Doktora çalışmam boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen, tecrübesi ve engin bilgisi ile çalışmalarımı yönlendiren sevgili hocam ve ağabeyim Yrd. Doç. Dr. Davut AKDAŞ' a minnettarlığımı belirtmek isterim.

Değerli görüş ve önerileri ile çalışmalarımı destekleyen sayın hocam Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI' ya teşekkür ederim.

Görüşlerinden ve katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Hayrettin YÜKSEL' e teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bilgisini ve desteğini hep göstermiş olan değerli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Aslan Deniz KARAOĞLAN' a, maddi ve manevi desteklerinden dolayı kıymetli ağabeyim Yrd. Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ' a, sabır ve desteklerini benden esirgemeyen oda arkadaşım Arş.Gör.Erman KÖYBAŞI ve Elek. - Elektr. Müh. Ozan KARAKULAK' a teşekkür ederim.

Sağladıkları maddi desteklerinden dolayı TÜBİTAK' a ve Balıkesir Üniversitesi' ne teşekkür ederim.

Doktora çalışmam boyunca her türlü desteğini benden esirgemeyen sevgili eşim İlkay BİÇAKCI' ya ve moral ve motivasyonumu sürekli yüksek tutan oğlum Kenan Bilge BİÇAKCI' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Teknoloji ile birlikte gelişen makineler insan hayatında çok önemli role sahiptirler. İnsanın yaşam kalitesini arttırmak ve daha da önemlisi korumak için birçok makine geliştirilmiştir. Bu makinelere Kontrol Bilim Dalı'nın gelişimi ile birlikte uzaktan kontrol ve kumanda, hatta bunun da ötesinde kendi kendilerine hareket edebilme özellikleri kazandırılmaya çalışılmaktadır. Bu tür cihazlara robot denilmektedir. İnsan yaşamını önemli ölçüde etkileyen robotlara örnek olarak sanayi robotları, temizlik robotları, bomba imha robotları, insan için zararlı ortamlarda (kimyasal, nükleer vb.) kullanılan robotlar, cerrahi robotlar (Korb, Marmulla, Raczkowsky, Mühling, & Hassfeld, 2004) ve insansı robotlar (Endo, Nakanishi, Morimoto, & Cheng, 2005), (Sakagami, Watanabe, Aoyama, Matsunaga, Higaki, & Fujimura, 2002), (Akdas & Medrano-Cerda, 2000), (Akdaş & Bicakcı, 2009) verilebilir.

Robotlar ve diğer mekanizmaların geliştirilmesinde karşılaşılan en önemli engellerden birisi nasıl kontrol edilecekleridir. Bunu yapabilmek için birçok kontrol tekniği geliştirilmiştir (Proportional – Integral – Derivative, Linear Quadratic Regulator, Bulanık Mantık, Adaptive Control vs.). Her kontrol tekniğinin kendine has özellikleri ve kontrol edilen sistem üzerinde farklı etkileri vardır. Kontrol edilecek mekanizmanın türüne ve çalışacağı çevre şartlarına göre bir kontrol tekniği diğerine tercih edilebilir. Tercih edilen kontrol tekniğinin kullanılabilmesi için o teknik üzerine uzman olunması gerekir ve bu da genellikle güçlü bir matematiksel alt yapıya sahip olmak anlamına gelir. Mekanizma karmaşıklaştıkça kontrol tekniklerinin uygulanması da o ölçüde zorlaşır. Pratt ve arkadaşları tarafından geliştirilen SEK – Sanal Eleman Kontrolü (Virtual Model Control) isimli kontrol tekniği doğası gereği diğer kontrol tekniklerinden farklı olarak ağır matematiksel işlemlerle uğraşmayı gerektirmez (Pratt J. E., 1995). SEK de mekanizmanın yapmasını istediğimiz davranışları sanal mekanik elemanlar vasıtası ile yaptırılır. Mekanizmanın eklemlerindeki hareket sağlayıcıların üreteceği kuvvetler, sanal elemanlar gerçekten mekanizmaya bağlıymış gibi hesaplanır ve böylece istenilen davranış sağlanmış olur.

Kullanılabilecek sanal elemanlar gerçekte var olan makine elemanları ile sınırlı değildir, hayal edebildiğimiz her sistem sanal eleman olarak kullanılabilir. SEK hakkında yapılan literatür taramasında SEK kullanılarak iki ayaklı bir robotun yürütülebildiği (Pratt J. E., 1995), (Pratt, Chew, Torres, Dilworth, & Pratt, 2001), (Pratt & Pratt, Intuitive Control of a Planar Bipedal Walking Robot, 1998), (Pratt, Dilworth, & Pratt, Virtual Model Control of a Bipedial Walking Robot, 1997), (Hu, Pratt, Chew, Herr, & Pratt, 1999), altı ayaklı bir robotun benzetim ortamında kontrol edilebildiği (Pratt, Torres, Dilworth, & Pratt, 1996) ve bir vücut destek mekanizmasının başarı ile çalıştırıldığı (Ekkelenkamp, Veltink, Stramigioli, & Kooij, 2007) görülmüştür fakat sanal elemanların parametrelerinin nasıl seçileceği konusunda herhangi bir sistematik yöneme rastlanmamıştır.

Geliştirilmiş bir kontrol tekniğinin performansının belirlenebilmesi için test edilip diğer kontrol teknikleri ile karşılaştırılması gerekir. Bu işlem için en çok kullanılan mekanizmalardan bir tanesi analitik çözümü kesin olarak belirlenmiş doğrusal olmayan bir yapıya sahip ters sarkaç mekanizmasıdır. Ters sarkaç mekanizması araba üzerine yerleştirilmiş bir sarkaç ve ucunda bir kütlelen meydana gelir. Sarkaç araba üzerinde serbestçe dönebilen bir şafta tutturulmuştur. Araba hareket ettirilerek sarkacın arabaya dik bir şekilde dengede kalması sağlanmaya çalışılır. Bu alanda literatürde çok değişik çalışmalar vardır. Anderson dinamik parametreleri tam olarak bilinmeyen bir ters sarkaç sistemini yapay sinir ağlarını kullanarak sanal ortamda kontrol etmiştir (Anderson, 1989). El-Hawwary ve arkadaşları adaptif bulanık kontrol ile ters sarkacı hem dengede tutmuş hem de arabanın konumunu istenilen pozisyona küçük hatalar ile taşıyabilmişlerdir (El-Hawwary, Elshafei, Emara, & Fattah, 2006). Wang ve arkadaşı kararlı adaptif kontrol ile sarkaç kontrolünü sağlamışlardır (Wang, 1996). Ayrıca Huang ve arkadaşı gri tahmin modelini bazı parametreleri bilinmeyen ters sarkaç sistemine uygulamış, sarkacı düz konumdan ters konuma getirmiş, dengeyi sağlamış ve arabayı merkez noktasına taşıyabilmiştir (Huang & Huang, 2000). Ters sarkaç sistemi doğası gereği doğrusal ve kararlı değildir. Ayrıca iki eklemi olmasına karşın sadece bir hareket sağlayıcısı vardır. Bu tip sistemlere eksik tahrik sağlayıcılı (under actuated) sistem denir. Sarkacın ucuna bir sarkaç daha eklenerek problem daha karmaşık bir hale sokulabilir (Sugihara, Nakamura, & Inoue, 2002), hatta sarkaç sayısı daha da artırılarak daha zor problemler

oluşturulabilir (Farwig & Unbehauen, 1990). Roketler ve insansı robotlarda aslında bir ters sarkaç sistemine benzer (Rubi, Rubio, & Avello, 2002). Çünkü bu tip mekanizmalarda dengeleyici hareket mekanizmanın en alt ucunda bulunan hareket sağlayıcı tarafından gerçekleştirilir. Bu nedenle özellikle insansı robotlar için geliştirilen kontrol sistemleri ters sarkaç mekanizması üzerinde test edilerek değerlendirilirler.

Literatürde var olan kontrol yöntemleri, model tabanlı kontrol yöntemi (Shen, 2010), (Bossi, Rottenbacher, Mimmi, & Magni, 2011) ve model tabanlı olmayan kontrol yöntemi (Zhao & Collins, 2003) diye iki temel sınıfa ayrılabilirler. Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanları model tabanlı olanlarıdır. Bu kontrol yönteminde mekanizmanın matematik modeli gerçeğe ne kadar yakın elde edilirse kontrol sisteminin performansı da o derece iyi olacaktır. Bunun yanında her kontrol yönteminin kontrol edilecek mekanizmaya göre ayarlanması gereken parametreleri vardır. Literatürde mekanizmanın matematik modeline göre bu parametrelerin belirlenmesine yardımcı olacak analiz yöntemleri mevcuttur (Routh-Hurwitz, Root-Locus, Lyapunov fonksiyonları vs.) (Golnaraghi & Kuo, 2010). Kullanılacak analiz yönteminin doğru sonuçlar verebilmesi için de mekanizmanın matematik modelinin hassas bir şekilde belirlenmesi gerekir. Ayrıca her mekanizma için tasarlanan kontrol sisteminin başarılı olup olamayacağı doğrudan gerçek mekanizmaya uygulanarak belirlenemez. Çünkü füze, uçak ve nükleer santrallerde kullanılan mekanizmalar gibi insan hayatını doğrudan etkileyen ve çok pahalı olan sistemlerde oluşabilecek kontrol hataları telafisi mümkün olmayan sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle kontrol edilmek istenilen sistemlerin önce bilgisayar ortamında tam bir matematik modelinin elde edilmesi ve ilk kontrol deneylerinin bilgisayar ortamında gerçekleştirilip iyileştirilmesi daha doğru olacaktır.

Matematik model kütleler, atalet momentleri, kütle merkezlerinin eklemlere olan mesafeleri ve sürtünme kuvvetleri gibi parametrelerin bir fonksiyonudur ve bu parametreler ne kadar doğru belirlenebilirse sistemin matematik modeli o kadar gerçeğe yakın olacaktır. Bu parametrelerin en belirsiz olanı belki de sürtünme kuvvetleridir. Çünkü sürtünme birbiri üzerinde hareket

eden yüzeylerin yapısıyla ilişkilidir ve bu ilişkinin tam bir modeli henüz belirlenememiştir.

Literatürde sürtünme üzerine rastlanılan ilk kapsamlı çalışmalar Da Vinci tarafından yapılmıştır ve daha sonra birçok araştırmacı sürtünmenin modellenmesi üzerine değişik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmaların birçoğu Armstrong ve arkadaşları tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir (Armstrong-Helouvy, Dupont, & Wit, 1994). Bu araştırmalarda genellikle biri hıza bağımlı diğeri sabit iki terimi olan klasik sürtünme modeli kullanılmıştır (Armstrong-Hélouvy, 1991). Bu model yüksek hızlarda yeterli sonuçlar vermektedir, fakat düşük hızlarda yetersiz kalmaktadır ve sıfır hız bölgesinde var olan kuru sürtünmeyi modelleyememektedir. Bu durum sarkaç gibi mekanik sistemlerin kontrolünde istenmeyen osilasyonlara sebep olmaktadır (Zhao, Qiu, & Zhang, 2011). Bu tür problemlerin giderilebilmesi için daha düşük hızlardaki sürtünme modelinin de doğru bir şekilde oluşturulması gerekir. Bunu başarabilmek için Dahl (Dahl, 1968) ve LuGre (de Wit, Olsson, J. Astrom, & Lischinsky, 1995) gibi modeller geliştirilmiştir. Zhao ve arkadaşları Gauss ve LuGre sürtünme modellerini kullanarak sarkacın arabası ile yol arasındaki sürtünmeyi modellemeye çalışmışlar ve kontrol esnasında meydana gelen osilasyonları azaltmışlardır (Zhao, Qiu, & Zhang, 2011). Fakat bu modeller karmaşık ve hesaplaması uzun süren modellerdir. Bu da sistemin kararsız olmasına sebep olmaktadır. Bu modellere alternatif olarak Karnopp' un (Karnopp, 1985) geliştirdiği daha basit hesaplamalar gerektiren yöntem kullanılabilir. Karnopp sürtünme modeli düşük hızlarda çok başarılı olmasa da klasik modelden daha iyi sonuçlar sağlamaktadır ve daha iyi kontrol performansları elde edilebilmektedir. Bu çalışmada sadelik / performans oranının diğerlerine göre daha iyi olmasından dolayı sürtünme modeli olarak (Romano & Claudio, 2007) Karnopp modeli kullanılmıştır . Uygulamaya yönelik birçok araştırmacı da aynı sebeplerden dolayı Karnopp sürtünme modelini kullanmışlardır (Pavkovic, Deur, & Lisac, 2011).

Sürtünme modelinin performansının yeterli olabilmesi için kullanılan modelleme tekniğinin parametrelerinin de doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Liu ve arkadaşları Karnopp modeli için istatikselsel bir parametre belirleme yöntemi kullanmışlardır (Liu, Liu, Wu, & Yuan, 2009). Bu yöntem

tamamen hesaba dayalıdır ve hesaplaması oldukça kolaydır. Fakat hesaplanan parametrelerde gerçek verilere göre herhangi bir ayarlama yapılması öngörülmemiştir. Benzetim sonuçları ile gerçek ölçümler ayrı ayrı grafiklerde verildiği için aralarında sadece şeklen bazı benzerliklerin olduğu söylenebilir. Fayez ve arkadaşları otomotiv sanayinde DC motor kontrolü için LuGre sürtünme modelini kullanmış ve bu modelin hesaplanamayan parametrelerini minimum karesel hata (mean square error – mse) yöntemi ile belirlediklerini söylemişler fakat nasıl bir işlem uyguladıkları hakkında detay bilgi vermemişlerdir. Ayrıca parametre belirleme metodunun performans değerlendirmesi de yapılmamıştır (Ahmed, Laghrouche, & Bagdouri, 2012). Elhami ve arkadaşları, Detchmendy ve Sridhar ın parametre belirleme metodu olan doğrusal olmayan filtreleme yöntemini (Detchmendy & Sridhar, 1966) kullanarak Coulomb ve viskoz sürtünmeden oluşan sürtünme modelinin parametrelerini belirlemişlerdir. Bu yöntemde parametreler gerçek zamanlı olarak sürekli güncellenmektedir. Güncelleme her bir örnekleme aralığında dokuz adet diferansiyel denklem çözümlenerek elde edilen sonuçlara göre yapılmaktadır. Güncellemeler yapılarak gerçek tork değeri ile benzetim sonucunda elde edilen tork arasındaki fark minimize edilmeye çalışılmıştır. Bu süreçte oldukça fazla hesaplama yapılması gerekmektedir. (Elhami & Brookfield, 1997). Garcia gerçek bir kontrol valfi üzerinde var olan sürtünme modelleme tekniklerinden seçtiği sekiz tanesini karşılaştırmış ve sürtünme modellerinin uygunluğunu test etmiştir (Garcia, 2008). Burada Karnopp (Karnopp, 1985), LuGre (de Wit, Olsson, J. Astrom, & Lischinsky, 1995) ve Kano' nun (Kano, Maruta, Kugemoto, & Shimizu, 2004) modellerinin diğerlerine göre daha uygun olduğunu tespit etmiştir. Değişik modeller için daha önce geliştirilmiş parametre belirleme tekniklerinden yaralandığını ve daha başarılı parametre belirleme metotları ile daha uygun sonuçların elde edilebileceğini ifade etmiştir. Daha sonraki çalışmalarında deneyler yapıp elde edilen sonuçları basit istatistik metotlarını kullanarak işlemişler ve parametreleri belirlemeye çalışmışlardır. Burada kaç deney yaptıkları ve ne kadar zaman aldığı hakkında herhangi bir bilgi bulunmamaktadır (Garcia & Romano, 2008). Kim ve arkadaşları hidrolik hareket sağlayıcı bir asansörün modelini çıkartırken Karnopp sürtünme modelini kullanmışlar ve parametreleri deneysel sonuçları kullanarak belirlemeye çalışmışlardır fakat parametrelerin iyileştirilmesi için herhangi bir çaba sarf etmedikleri görülmektedir

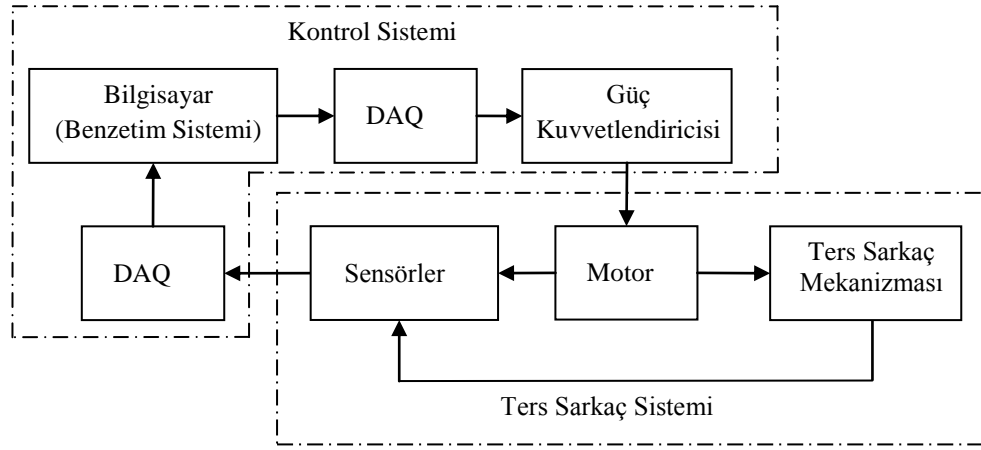
(Kim, Hong, & Kim, 2005). Sürtünme parametrelerinin belirlenmesinde genellikle deneysel sonuçlardan yola çıkıldığı açıkça görülmektedir. Çünkü parametrelerin birçoğu ölçülen sistem çıktıları ile ilişkileri değişken olduğu için doğrudan hesaplanamamaktadır ve hesaplanabilse bile imalat ve ölçme hatalarından dolayı bu parametrelerin ince ayarının deneysel sonuçlar ile yapılması gerektiği görülmektedir.

Sürtünme modelleri ve kontrol sistemleri gibi yapılarda bulunan belirsiz parametrelerin en uygun değerlerinin belirlenebilmesi için deneyler yapılması gerekmektedir. Herhangi bir sistematığe oturtulmadan yapılacak deneme yanılma yöntemi ile parametreler belirlenmeye kalkılırsa, parametre sayısına bağlı olarak yapılacak deney sayısı ve harcanacak zaman oldukça fazladır. Deney sayısını ve harcanacak zamanı en aza indirmek için kullanılacak deney tasarım yöntemlerinden birisi Yanıt Yüzeyi Yöntemi (YYY) dir. YYY girdiler ile çıktılar arasında doğrusal olmayan bağlantıyı minimum deney sayısı ile belirleyebilmektedir. Bu yapısı nedeni ile belirsiz olan sürtünme model parametrelerinin ve kontrol sistem parametrelerinin belirlenmesinde YYY nin kullanılması bu iş için belki de en uygun yöntem olacaktır.

Bu çalışmada kademesi arttırılabilir bir ters sarkaç sistemi tasarlanıp üretilmiş, Karnopp sürtünme modeli kullanılarak modellenmesi yapılmış, SEK kullanılarak kontrol edilmiş ve YYY ile belirsiz parametrelerin tamamı belirlenmiştir.

2. DENEY DÜZENEĞİ

Geliştirilen kontrol sistemlerini test etmek ve belirsiz parametrelerini belirleyebilmek için kurulan deney düzeneği üç temel kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım kontrol edilmek istenen ters sarkaç sistemidir. İkinci kısım ters sarkacın kontrol işleminin gerçekleştirildiği ve sistemin tüm davranışlarının kayıt altına alındığı kontrol kısmıdır. Son kısım ise tüm sistemin bilgisayar ortamında benzetiminin yapıldığı benzetim sistemidir. Deney düzeneğinin sembolik şeması Şekil 2.1 de görülmektedir.

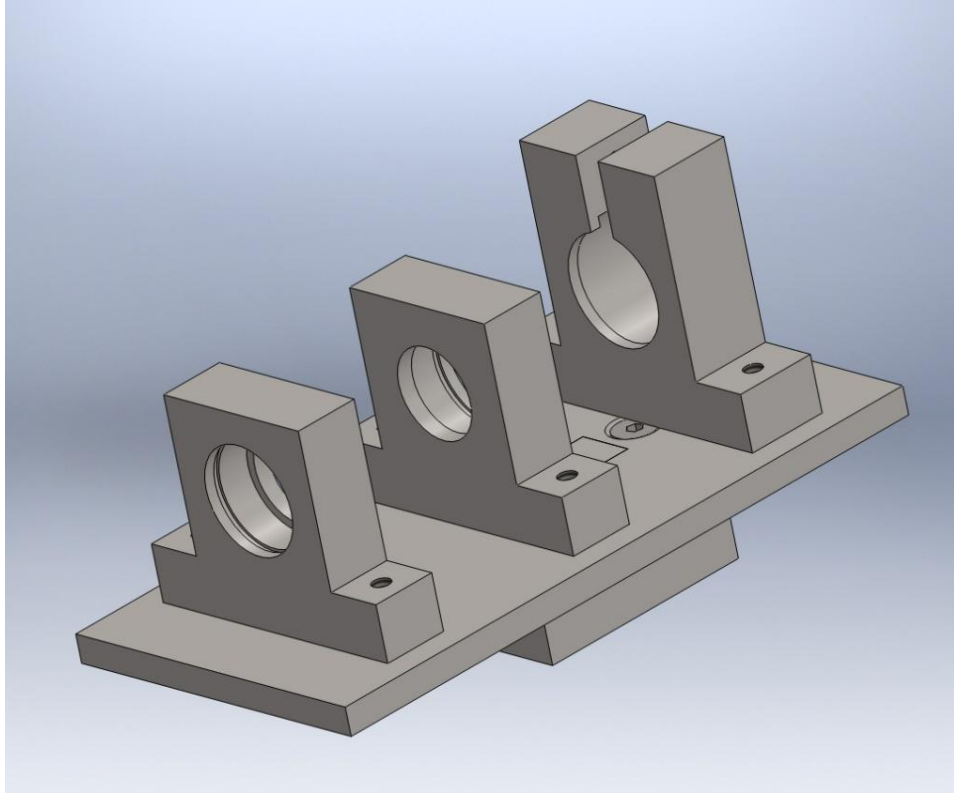


Şekil 2.1: Deney düzeneğinin sembolik şeması

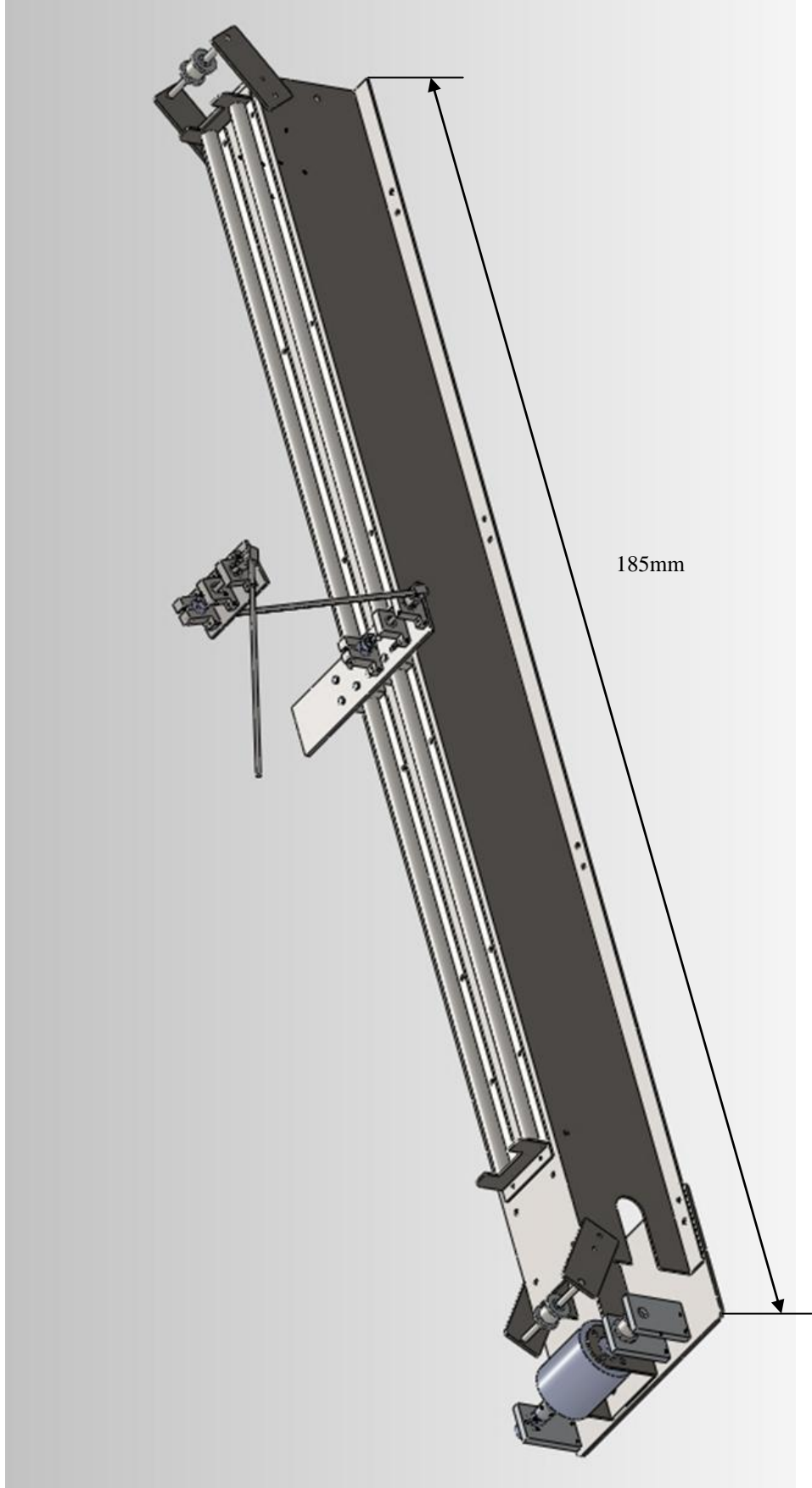
2.1 Ters Sarkaç

Ters sarkaç kontrol sistemlerinin performansının test edilmesi için sıklıkla kullanılan deney düzeneklerinden bir tanesidir. Sistem hareket sağlayıcısı olmadan serbest salınım yapabilen bir sarkaç ile bu sarkacın dik konumda dengede kalmasını sağlayacak hareketleri yapan araba kısmından oluşur. Bu özelliği ile ayaklı robotlar ve füzeler gibi mekanizmalardaki kontrol problemi ile aynı problem yapısına sahiptir ve bu gibi sistemler için geliştirilen kontrol yöntemleri için iyi bir deney platformudur. Sistem doğası gereği doğrusal değildir ve analitik çözümü kesin olarak bilinmemektedir (Wenzel, Vazquez, & Jamal, 2000), (Tolat & Widrow, 1988), (Williams & Matsuoka, 1991), (Hougen, Fischer, & Johnam, 1994), (Huang & Huang, 2000), (Mendil & Benmahammed, 1999),

(Lendaris & Paintz, 1997). Bu çalışmada geliştirilen kontrol metodlarının test edilmesi için kademesi arttırılabilir bir ters sarkaç sistemi SolidWorks CAD programı kullanılarak tasarlanmıştır. Ters sarkaç sistemi ön düzlemde serbest dönme hareketi yapabilen bir biri üzerine bindirilerek kademesi ayarlanabilen sarkaçlar ve sarkaçların üzerine tutturulduğu bir arabadan meydana gelmektedir. Sarkacın arabası birbirine paralel yerleştirilmiş iki adet lineer kızak üzerinde yatay ekseninde doğrusal hareket yapabilmektedir. Arabayı hareket ettirmek için bir DC motor ve motor ile araba arasına bağlanmış kayış kasnak sistemi kullanılmıştır. Motorun ürettiği tork kayış kasnak mekanizması ile doğrusal kuvvete dönüştürülerek arabaya uygulanmaktadır. Şekil 2.2 de ikinci sarkaç kademesi için tasarlanmış taşıyıcı sistemin ve Şekil 2.3 de tasarlanan sistemin tümünün üç boyutlu modeli görülmektedir.



Şekil 2.2: İkinci sarkaç kademesinin taşıyıcısı



Şekil 2.3: Tasarlanan ters sarkaç sistemi

Kütlesi fazla olan sistemlerin enerji tüketimi yüksek olduğundan bu tür yüksek güçlü yapıların kontrol sistemleri de oldukça pahalı olmaktadır. Bu nedenle sarkacın hafif olmasını sağlayabilmek için neredeyse tüm parçalar delrin malzemesinden %5 hassasiyet ile imal ettirilmiştir. Lineer kızakların boyu ve sarkaç uzunlukları, motor parametreleri ve sarkacın bozucu kuvvetler karşısında dengesini koruyabilmesi için gerekli mesafeler dikkate alınarak belirlenmiştir. Ters sarkaç sisteminin parametreleri Tablo 2.1 de verilmiştir.

Tablo 2.1: Ters sarkaç sisteminin parametreleri

| | | |
|-------------|--|------------------------------|
| m | Sarkacın kütlesi | 0.1466084 kg |
| M | Arabanın kütlesi | 0.9363916 kg |
| r | Kasnak yarıçapı | 0.01273 m |
| N | Motorun dişli oranı | 1 |
| η | Motorun verimi | 0.80 |
| K_t | Motorun tork sabiti | 0.055898 N m/A |
| K_b | Motorun zıt elektro motor kuvvet sabiti | 0.05982 Volt sn/rad |
| R_a | Motorun armatür direnci | 0.73086 ohm |
| J_m | Motorun atalet momenti | 0.00018 kgm ² |
| I | Sarkacın atalet momenti | 0.00284252 kg.m ² |
| l | Sarkacın kütle merkezinin dönme eksenine olan mesafesi | 0.1562177 m |
| $L_{kızak}$ | Kızak boyu | 1.5 m |

Sarkacın atalet momenti SolidWorks programının Kütle Özellikleri aracı kullanılarak belirlenmiştir (SolidWorks, 2010). Motorun atalet momenti ise üretici firmanın kataloglarından alınmış ve kasnak atalet momentleri bu değere ilave edilmiştir (Başkurt Motor, 2009).

Sistemde bulunan parçaların ağırlıkları 0.0001 gr hassasiyet ile ölçülmüştür. Motor parametreleri (K_t , K_b , R_a) deneysel olarak belirlenmiştir. Motorun dönme açısı motor şaftına kavrama ile bağlanmış Kübler 05.2400.1122.1024 model 1024 yarıklı enkoder (Kübler, 2010) ile, sarkacın dönme açısı ise Vishay Model 157 servo potansiyometre (Vishay, 2000) ile ölçülmüştür. Ters sarkaç mekanizmasının imalatı tamamlanmış hali Şekil 2.4 görülmektedir.



Şekil 2.4: İmalatı tamamlanmış ters sarkaç mekanizması

2.1.1 Ters Sarkacın Matematik Modeli

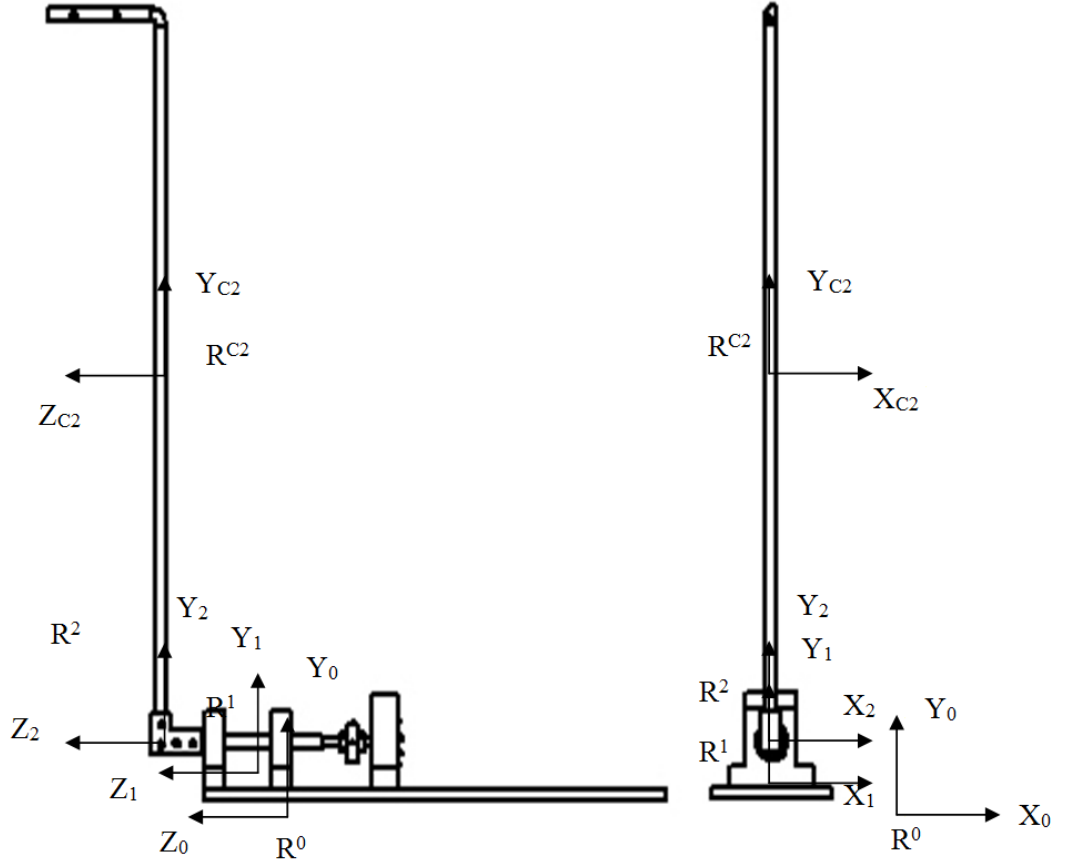
Mekanizmaların istenilen hareketleri yerine getirebilmesi için gerekli eklem torklarını hesaplamanın en sık kullanılan yollarından birisi Luh ve arkadaşları (Luh, Walker, & Paul, 1980) tarafından geliştirilen kuvvet temelli İteratif Newton – Euler Dinamik Denklemleri bir diğeri ise enerji tabanlı Lagrange formülleridir. Newton – Euler Dinamik Denklemleri bilgisayar yazılımı ile yapılacak olan çözümlerinde kullanılan bir dizi denklemden oluşur. Yapılacak işlem sayısı fazladır fakat türevli terimler içermediği için bilgisayar yazılımlarında daha çok tercih edilir. Lagrange Formülleri ise Hamilton prensibine dayanır ve el ile hesaplanması daha kolaydır (Craig, 2005), (Goldstein, Poole, & Safko, 2000). Bu çalışma kapsamında yapılacak deneyler tek kademeli ters sarkaç mekanizması ile yapılacağından mekanizmanın modeli (2.1) ve (2.2) eşitliklerinde verilen Lagrange Formülleri kullanılarak elde edilmiştir.

$$L = k - u \quad (2.1)$$

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = \frac{d}{dt} \frac{\partial k}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.2)$$

Burada L Lagrange enerji ifadesini k hareket eden parçaların kinetik enerjilerini, u hareket eden parçaların potansiyel enerjilerini, x eklemlerin zamana bağlı konum değişkenlerini ve τ eklemlerdeki kuvvetleri ifade eder.

Lagrange denklemlerinin uygulanabilmesi için eklem hızlarının ve enerjilerin belirlenmesi gerekir. Şekil 2.5 deki koordinat yerleşimleri ve dönme açısının saat ibrelerinin tersi yönünün pozitif yön olduğu dikkate alınarak eklem hızları belirlenmiştir. \mathbf{R}^0 referans, \mathbf{R}^1 arabanın kütle merkezindeki, \mathbf{R}^2 sarkacın dönme eksenindeki, \mathbf{R}^{C2} sarkacın kütle merkezindeki koordinat sistemini ifade etmektedir.



Şekil 2.5: Ters sarkaçtaki koordinat yerleşimleri

Koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm matrisleri ve koordinat sistemlerinin orijin noktalarının konumlarını ifade eden matrisler (2.3) - (2.5) eşitliklerindeki gibi ifade edilebilir.

$${}^0_1\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^0\mathbf{P}_{1org} = \begin{bmatrix} x \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

$${}^1_2\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1\mathbf{P}_{2org} = \begin{bmatrix} c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

$${}^2_{C2}\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^2\mathbf{P}_{C2org} = \begin{bmatrix} 0 \\ l \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

Mekanizmalarda dönme hareketi yapan eklemlere dönel, doğrusal hareket yapan eklemlere ise prizmatik eklem denir (Craig, 2005). Dönel eklemler için açısal ω ve çizgisel v hız ifadeleri (2.6) ve (2.7) eşitlikleri, prizmatik eklemler için ise (2.8) ve (2.9) eşitlikleri kullanılarak elde edilebilir.

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} \quad (2.6)$$

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}^i (v_i + \omega_i \times {}^i P_{i+1}) \quad (2.7)$$

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}^i \omega_i \quad (2.8)$$

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}^i (v_i + \omega_i \times {}^i P_{i+1}) + \dot{x}_{i+1} \quad (2.9)$$

\mathbf{R}^1 koordinat sistemi için hız ifadeleri (2.10) ve (2.11) eşitliklerindeki gibi, \mathbf{R}^{C2} koordinat sistemi için ise (2.12) ve (2.13) eşitliklerindeki gibi elde edilir.

$${}^0\omega_1 = {}^0\mathbf{R}_1 \mathbf{R}^0 \omega_0 = 0 \quad (2.10)$$

$${}^0v_1 = {}^0\mathbf{R}_1 \mathbf{R}^0 (v_0 + \omega_0 \times {}^0 P_{1org}) + \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$${}^0\omega_{C2} = {}^0\mathbf{R}_{C2} \mathbf{R}^{C2} \omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$${}^0v_{C2} = {}^0\mathbf{R}_{C2} \mathbf{R}^{C2} (v_2 + \omega_2 \times {}^0 P_{C2org}) = \begin{bmatrix} \dot{x} - (l \cos \theta) \dot{\theta} \\ (l \sin \theta) \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Mekanizmanın kinetik ve potansiyel enerjileri (2.14) - (2.17) eşitlikleri kullanılarak (2.18) ve (2.19) eşitliklerindeki gibi elde edilir.

$$k_i = \frac{1}{2} m_i v_{C_i}^T v_{C_i} + \frac{1}{2} \omega_i^T I_i \omega_i \quad (2.14)$$

$$k = \sum k_i \quad (2.15)$$

$$u_i = -m_i g^T P_{C_i} + u_{ref_i} \quad (2.16)$$

$$u = \sum u_i \quad (2.17)$$

$$k = \frac{1}{2}(m + M)\dot{x} - ml(\cos \theta)\dot{x}\dot{\theta} + \frac{1}{2}(ml^2 + I)\dot{\theta}^2 \quad (2.18)$$

$$u = Mc_1 g + m(l \cos \theta + c_4 + c_1)g \quad (2.19)$$

Burada l sarkacın kütle merkezinden dönme eksenine olan mesafeyi, I sarkacın atalet momentini, M arabanın kütlesini, m sarkacın kütlesini, x arabanın konumunu ve θ sarkacın açisal konumunu ifade etmektedir. Bulunan potansiyel ve kinetik enerjiler (2.2) eşitliğinde yerine konularak ters sarkacın matematik modeli (2.20) ve (2.21) eşitliklerindeki gibi elde edilir.

$$\tau_1 = (M + m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} \cos \theta + ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (2.20)$$

$$\tau_2 = (ml^2 + I)\ddot{\theta} - mgl \sin \theta - ml\dot{x} \cos \theta \quad (2.21)$$

Bu denklemlere sürtünme kuvvetleri de ilave edilip, sarkaç kısmında herhangi bir hareket sağlayıcı bulunmadığı için $\tau_2 = 0$ ve $\tau_1 = F_{motor}$ olduğu dikkate alınırsa eklemlerdeki kuvvetleri ifade eden denklemler (2.22) ve (2.23) eşitliklerindeki gibi ifade edilebilir.

$$F_{motor} = (M + m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} \cos \theta + ml\dot{\theta}^2 \sin \theta + Fs_a \quad (2.22)$$

$$0 = (ml^2 + I)\ddot{\theta} - mgl \sin \theta - ml\dot{x} \cos \theta + Fs_s \quad (2.23)$$

Burada F_{motor} motordan arabaya uygulanan kuvveti, Fs_a arabanın sürtünme kuvvetini ve Fs_s sarkacın sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. Motorun arabaya uyguladığı kuvvet F_{motor} (2.24) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir (Golnaraghi & Kuo, 2010).

$$F_{motor} = \frac{N \cdot \eta \cdot K_t}{R_a \cdot r} V - \frac{N^2 \cdot \eta \cdot K_t \cdot K_b}{R_a \cdot r} \dot{\theta}_m - \frac{N^2 \cdot \eta \cdot J_m}{r} \ddot{\theta}_m \quad (2.24)$$

Burada N motorun dişli oranını, η motorun verimliliğini, K_t motorun tork sabitini, K_b motorun zıt elektro motor kuvvet sabitini, R_a motorun armatür direncini, r motor şaftına bağlı olan kasnak yarı çapını, θ_m motor dönme açısını, J_m motorun ve kasnağın atalet momentini ve V motora uygulanan gerilimi ifade etmektedir. Motorun dönme açısı ile arabanın aldığı yol arasındaki bağı ifade eden (2.25) eşitliği, (2.24) eşitliğinde yerine yazılırsa motorun arabaya uyguladığı kuvvet (2.26) eşitliğindeki gibi yeniden yazılabilir.

$$\theta_m = \frac{x}{r} \quad (2.25)$$

$$F_{motor} = \frac{N \cdot \eta \cdot K_t}{R_a \cdot r} V - \frac{N^2 \cdot \eta \cdot K_t \cdot K_b}{R_a \cdot r^2} \dot{x} - \frac{N^2 \cdot \eta \cdot J_m}{r^2} \ddot{x} \quad (2.26)$$

(2.26) eşitliği, (2.22) eşitliğinde yerine yazılırsa ters sarkacın matematik modeli (2.28) ve (2.29) eşitliklerindeki gibi ifade edilebilir.

$$\underbrace{\left(M + m + \frac{N^2 \cdot \eta \cdot J_m}{r^2} \right)}_A \cdot \ddot{x} = \underbrace{\frac{N \cdot \eta \cdot K_t}{R_a \cdot r}}_B \cdot V - \underbrace{\frac{N^2 \cdot \eta \cdot K_t \cdot K_b}{R_a \cdot r^2}}_C \cdot \dot{x} + (ml \cos \theta) \cdot \ddot{\theta} - (ml \sin \theta) \cdot \dot{\theta}^2 - Fs_a \quad (2.27)$$

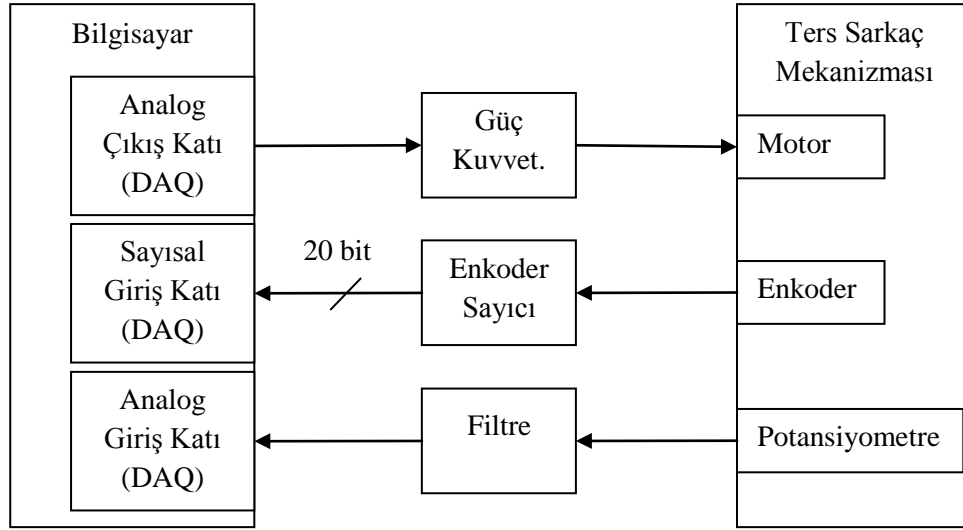
$$\ddot{x} = \frac{B}{A} \cdot V - \frac{C}{A} \cdot \dot{x} + \frac{ml \cos \theta}{A} \cdot \ddot{\theta} - \frac{ml \sin \theta}{A} \cdot \dot{\theta}^2 - \frac{1}{A} Fs_a \quad (2.28)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{mgl \sin \theta}{(ml^2 + I)} + \frac{ml \cos \theta}{(ml^2 + I)} \ddot{x} + \frac{1}{(ml^2 + I)} Fs_s \quad (2.29)$$

2.2 Kontrol Sistemi

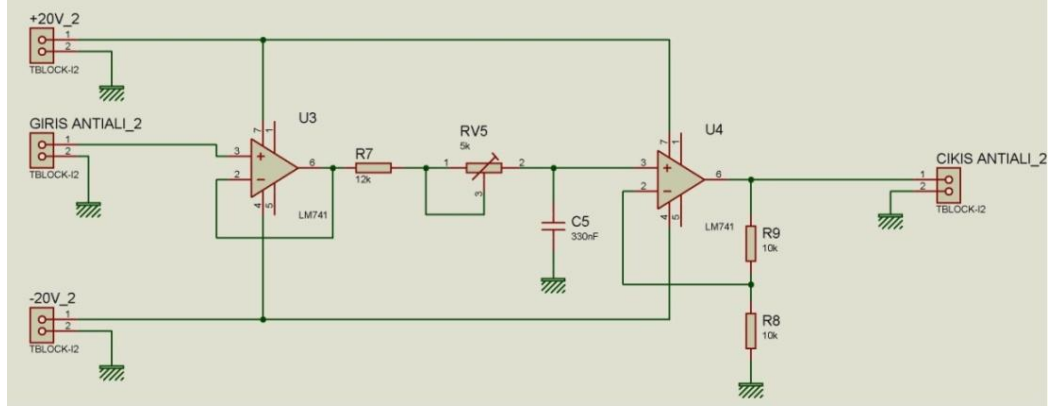
Kontrol sistemi ters sarkaç sisteminin algılayıcılarından gelen veriyi işleyip motora kontrol sinyalini uygulayan ve mekanizmanın tüm davranışlarını kayıt altına alan kısımdır. Sistemde arabanın konumunu algılayan bir artımsal

optik enkoder ve sarkacın açısai konumunu algılayan bir servo potansiyometre mevcuttur. Kontrol sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.6 da görölmektedir.



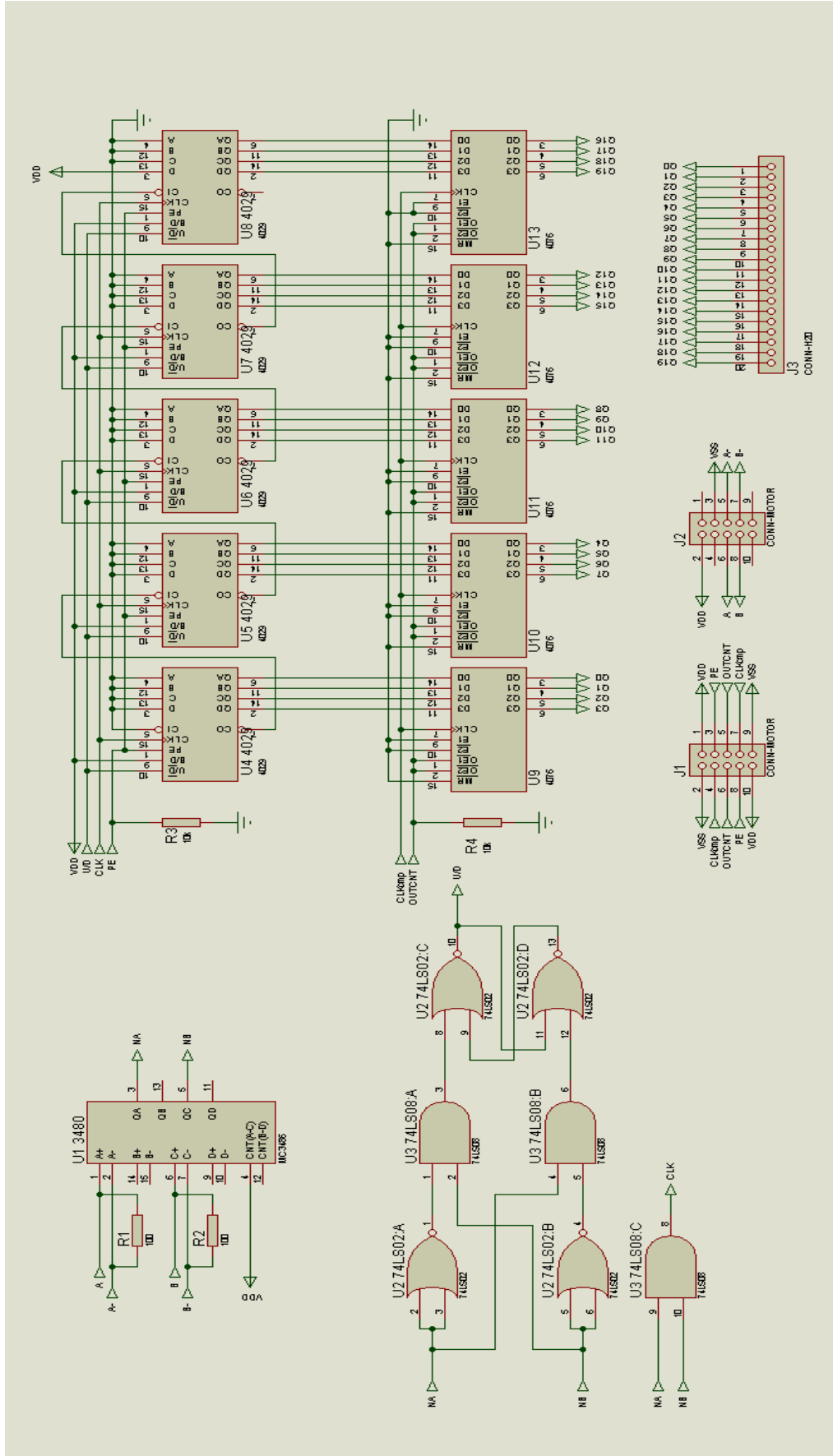
Şekil 2.6: Ters sarkaç kontrol sisteminin şeması

Sarkacın açısai konum bilgisi dış uçları arasına +/- 10V uygulanan sonsuz türlü 10Kohm değerinde servo potansiyometre ile ölçölmektedir. Potansiyometre %2 doğrusallığa sahiptir. Potansiyometreden alınan konum sinyali, motor ve çevrede bulunan diğer elektrikli aletlerden gelen gürültüyü filtre eden 40Hz kesim frekansına sahip alçak geçiren filtre devresine uygulanmaktadır. Burada konum bilgisinde var olan gürültü seviyesi yaklaşık 10mV mertebesine indirgenerek sarkacın açısai konumu yaklaşık 0.18 derece hassasiyet ile ölçölebilmektedir. Filtreden alınan analog çıkış sinyali Adlink NuDAQ PCI-9114(A) DG/HG model (Adlink Technology Inc., 2005) 16 bit analog giriş birimi aracılığı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Filtre devresinin açık devre şeması Şekil 2.7 de görölmektedir.



Şekil 2.7: 40Hz kesim frekanslı bant geçiren filtre devresi

Arabanın konum bilgisi 1024 yarıklı artımsal enkoder ile ölçülmektedir. Enkoderin meydana gelebilecek istenmeyen salınım hareketlerinden etkilenmemesi için motor şaftı ile bağlantısı kavrama elemanı ile yapılmıştır. Enkoder çıkışında birbiri ile doksan derece faz farkı olan iki adet kare dalga sinyal alınmaktadır. Bu sinyalden motorun hangi yöne, ne kadar döndüğünü algılayabilmek için hangi kare dalganın önce geldiğine göre yön tayini yapan ve gelen kare dalgaların sayısını sayan bir enkoder ara yüz devresi tasarlanmıştır. Tasarlanan devre 100MHz hızında sayma işlemi gerçekleştirebilmektedir. Bu motorun dönebileceği maksimum hızın çok üzerindedir. Motor şaftına bağlı kasnağın çalışma dairesi çapı dikkate alınarak yapılan hesaplamalarda 17 bitlik sayacın yeterli olacağı görülmüştür ve bu nedenle sayaç 20 bitlik olarak tasarlanmıştır. İleride sarkacın kademelerinin arttırılacağı göz önüne alınarak bu sayıcıların 20 bitlik veri yolu üzerinden sırası ile bilgisayara aktarılabilmesi bir yol verme devresi de sisteme dâhil edilmiştir. Tasarlanan sayaç devresinin açık devre şeması Şekil 2.8 de gösterilmektedir.

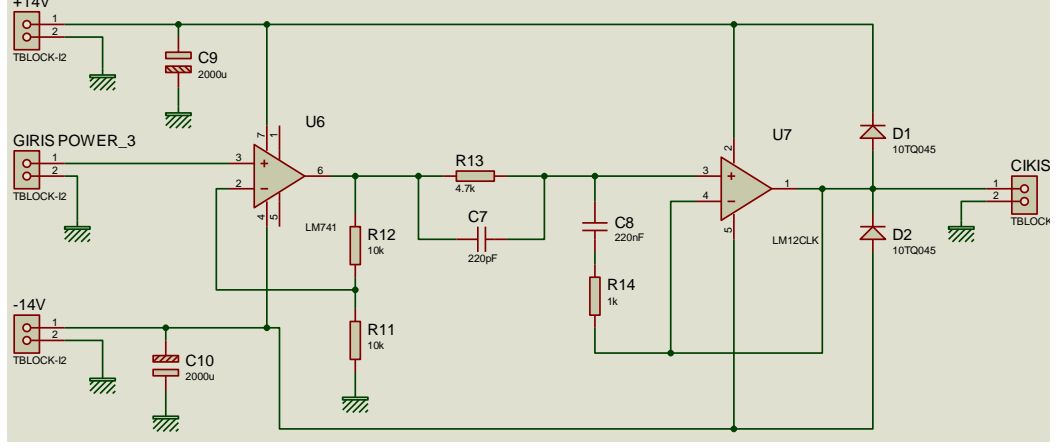


Şekil 2.8: Enkoder ara yüz devresi

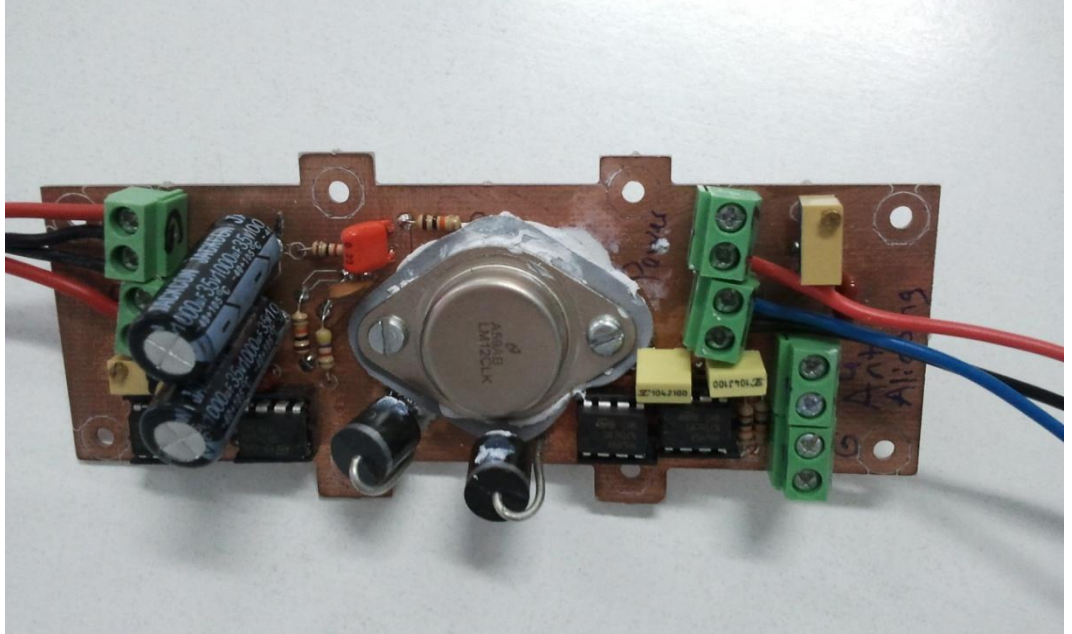
Ara yüz devre sisteminden alınan konum sinyalleri Adlink PCI-7396 model (Adlink Technology Inc., 2005) 96 bit çift yönlü sayısal giriş / çıkış birimi ile bilgisayara aktarılmaktadır.

Algılayıcılardan gelen konum bilgilerinin işlenip kontrol çıkış sinyalinin oluşturulduğu çift Intel Xeon 3000 işlemcili, iş istasyonu tipi bilgisayar gerçek zamanlı işletim sistemi DOS 6 altında çalıştırılmaktadır. Gerçek zamanlı işletim sistemleri giriş birimlerinden aldıkları verileri zaman gecikmesi olmadan işleyip çıkış bilgisini çıkış birimleri aracılığı ile dış dünyaya doğrudan aktarabilmektedirler. Gerçek zamanlı olmayan işletim sistemleri kendi çalışmasını sürdürebilmek için arka planda birçok işlem yapılmasına ihtiyaç duyduklarından çevre birimlerinden aldıkları bilgileri gecikmeli olarak işleyebilirler. Bu nedenle kritik kontrol işlemlerinin gerçekleştirilmesi gereken mekanizmalarda kullanılmaları uygun değildir. Uygulanacak kontrol yönteminin gerektirdiği işlemlerin gerçekleştirilmesinden sonra oluşan kontrol sinyali Adlink NuDAQ PCI-6216V model (Adlink Technology Inc., 2005) 16 bit çözünürlüğe sahip analog çıkış kartı ile motor sürücü devresi olan güç kuvvetlendiricisine aktarılmaktadır. Bu yapısı ile sistem konum bilgilerini okuyup, gerekli işlemleri yaptıktan sonra çıkış sinyalini oluşturma işlemini saniyede 160 defa tekrarlayabilmektedir.

Bilgisayarın analog çıkış kartından gelen kontrol sinyali sistemin motorunu doğrudan sürebilecek güce sahip olmadığından +/- 14V ile beslenen 80W çıkış gücüne sahip güç kuvvetlendiricisi katına uygulanmaktadır. Güç katı sürekli olarak 10A çıkış akımı verebilen anma akımı 30A den fazla olan LM12CLK işlevsel kuvvetlendiricisi kullanılarak tasarlanmıştır. Güç kuvvetlendirici katının açık şeması Şekil 2.9 da imal edilmiş hali ise Şekil 2.10 gösterilmektedir.



Şekil 2.9: Güç kuvvetlendirici devresi açık şeması



Şekil 2.10: Güç kuvvetlendirici devresi

2.3 Benzetim Sistemi

Füze, uçak ve nükleer santrallerde kullanılan mekanizmalar gibi insan hayatını doğrudan etkileyen ve çok pahalı olan sistemlerin kontrol edilmesi için geliştirilen kontrol yöntemleri doğrudan bu sistemler üzerinde test edilmemelidirler. Çünkü ortaya çıkabilecek en küçük hatalar bile geri dönülemez sonuçlar doğurabilir. Geliştirilen kontrol yöntemlerinin test edilebilmesi için kontrol edilmek istenen mekanizmanın bilgisayar ortamında benzetiminin

yapılması gerekir. Bu çalışmada deney mekanizması olarak kullanılan ters sarkacın benzetimini yapabilmek için ters sarkacın matematik modelinde bulunan doğrusal olmayan ikinci dereceden diferansiyel denklemlerin çözülmesi gerekir. Diferansiyel denklemlerin çözümü için 4.Derece Runge - Kutta Metodu (DDRKM) (Press, Teukolsky, Vetterling, & Flannery, 2007) kullanılmıştır. İki boyutlu DDRKM (2.30) - (2.44) eşitliklerinde verildiği gibi özetlenebilir.

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x, y) \quad (2.30)$$

$$\frac{dy}{dt} = g(t, x, y) \quad (2.31)$$

$$k_1 = f(t_n, x_n, y_n) \quad (2.32)$$

$$l_1 = g(t_n, x_n, y_n) \quad (2.33)$$

$$k_2 = f(t_n + \frac{1}{2}h, x_n + \frac{1}{2}hk_1, y_n + \frac{1}{2}hl_1) \quad (2.34)$$

$$l_2 = g(t_n + \frac{1}{2}h, x_n + \frac{1}{2}hk_1, y_n + \frac{1}{2}hl_1) \quad (2.35)$$

$$k_3 = f(t_n + \frac{1}{2}h, x_n + \frac{1}{2}hk_2, y_n + \frac{1}{2}hl_2) \quad (2.36)$$

$$l_3 = g(t_n + \frac{1}{2}h, x_n + \frac{1}{2}hk_2, y_n + \frac{1}{2}hl_2) \quad (2.37)$$

$$k_4 = f(t_n + h, x_n + hk_3, y_n + hl_3) \quad (2.38)$$

$$l_4 = g(t_n + h, x_n + hk_3, y_n + hl_3) \quad (2.39)$$

$$k = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.40)$$

$$l = \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \quad (2.41)$$

$$x_{n+1} = x_n + hk \quad (2.42)$$

$$y_{n+1} = y_n + hl \quad (2.43)$$

$$t_{n+1} = t_n + h \quad (2.44)$$

Burada t zamanı, h zamanda ilerleme adımını, x ve y zamana bağımlı değişkenleri ifade etmektedir. DDRKM birinci dereceden diferansiyel denklemlere uygulanabilen bir metottur. Fakat sarkacın matematik modeli ikinci dereceden diferansiyel denklemlerden oluşmaktadır. DDRKM nu kullanabilmek için sarkacın denklemlerinin birinci dereceden diferansiyel denklemler haline dönüştürülmesi gerekir. Ters sarkacın (2.28) ve (2.29) eşitliklerindeki ikinci dereceden diferansiyel denklemleri, (2.45) - (2.48) eşitliklerindeki gibi birinci dereceden diferansiyel denklemler şeklinde yeniden yazılabilir.

$$v = \dot{x} \quad (2.45)$$

$$\dot{v} = \frac{B}{A} \cdot V - \frac{C}{A} \cdot v + \frac{ml \cos \theta}{A} \cdot \dot{\omega} - \frac{ml \sin \theta}{A} \cdot \omega^2 - \frac{1}{A} F_{s_a} \quad (2.46)$$

$$\omega = \dot{\theta} \quad (2.47)$$

$$\dot{\omega} = \frac{mgl \sin \theta}{(ml^2 + I)} + \frac{ml \cos \theta}{(ml^2 + I)} \dot{v} + \frac{1}{(ml^2 + I)} F_{s_s} \quad (2.48)$$

Burada x arabanın konumunu, v arabanın hızını, θ sarkacın açısal konumunu ve ω sarkacın açısal hızını göstermektedir. (2.46) eşitliği $\dot{\omega}$ terimini, (2.47) eşitliği ise \dot{v} terimini ihtiva ettiği için iki denklem birbirine bağımlıdır. Bağımlılığı ortadan kaldırmak için her iki denklemde de biri diğerinin yerine yazılırsa (2.49) ve (2.50) eşitlikleri elde edilir.

$$\dot{v} = g(\theta, \omega, x, v) = \frac{1}{A(ml^2 + I) - (ml \cos \theta)^2} [(ml^2 + I)B \cdot V - (ml^2 + I)C \cdot v + ml \cos \theta \cdot F_{s_s} + m^2 l^2 g \cos \theta \sin \theta - (ml^2 + I)ml \sin \theta \cdot \omega^2 - (ml^2 + I)F_{s_a}] \quad (2.49)$$

$$\dot{\omega} = f(\theta, \omega, x, v) = \frac{1}{A(ml^2 + I) - (ml \cos \theta)^2} [Amgl \sin \theta + Bml \cos \theta \cdot V - Cml \cos \theta \cdot v - m^2 l^2 \cos \theta \sin \theta \cdot \omega^2 - ml \cos \theta \cdot F_{s_a} + A \cdot F_{s_s}] \quad (2.50)$$

Bu hali ile ters sarkaç mekanizmasının matematik modeli dört adet birinci derece diferansiyel denkleme indirgenmiş olur ve DDRKM bu denklemler için (2.51) - (2.74) eşitliklerindeki gibi uygulanabilir.

$$k_1 = \omega_n \quad (2.51)$$

$$l_1 = f(\theta_n, \omega_n, v_n) \quad (2.52)$$

$$\alpha_1 = v_n \quad (2.53)$$

$$\beta_1 = g(\theta_n, \omega_n, v_n) \quad (2.54)$$

$$k_2 = \omega_n + \frac{1}{2}hl_1 \quad (2.55)$$

$$l_2 = f(\theta_n + \frac{1}{2}hk_1, \omega_n + \frac{1}{2}hl_1, v_n + \frac{1}{2}h\beta_1) \quad (2.56)$$

$$\alpha_2 = v_n + \frac{1}{2}\beta_1 \quad (2.57)$$

$$\beta_2 = g(\theta_n + \frac{1}{2}hk_1, \omega_n + \frac{1}{2}hl_1, v_n + \frac{1}{2}h\beta_1) \quad (2.58)$$

$$k_3 = \omega_n + \frac{1}{2}hl_2 \quad (2.59)$$

$$l_3 = f(\theta_n + \frac{1}{2}hk_2, \omega_n + \frac{1}{2}hl_2, v_n + \frac{1}{2}h\beta_2) \quad (2.60)$$

$$\alpha_3 = v_n + \frac{1}{2}\beta_2 \quad (2.61)$$

$$\beta_3 = g(\theta_n + \frac{1}{2}hk_2, \omega_n + \frac{1}{2}hl_2, v_n + \frac{1}{2}h\beta_2) \quad (2.62)$$

$$k_4 = \omega_n + hl_3 \quad (2.63)$$

$$l_4 = f(\theta_n + hk_3, \omega_n + hl_3, v_n + h\beta_3) \quad (2.64)$$

$$\alpha_4 = v_n + \beta_3 \quad (2.65)$$

$$\beta_4 = g(\theta_n + hk_3, \omega_n + hl_3, v_n + h\beta_3) \quad (2.66)$$

$$k = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.67)$$

$$l = \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \quad (2.68)$$

$$\alpha = \frac{1}{6}(\alpha_1 + 2\alpha_2 + 2\alpha_3 + \alpha_4) \quad (2.69)$$

$$\beta = \frac{1}{6}(\beta_1 + 2\beta_2 + 2\beta_3 + \beta_4) \quad (2.70)$$

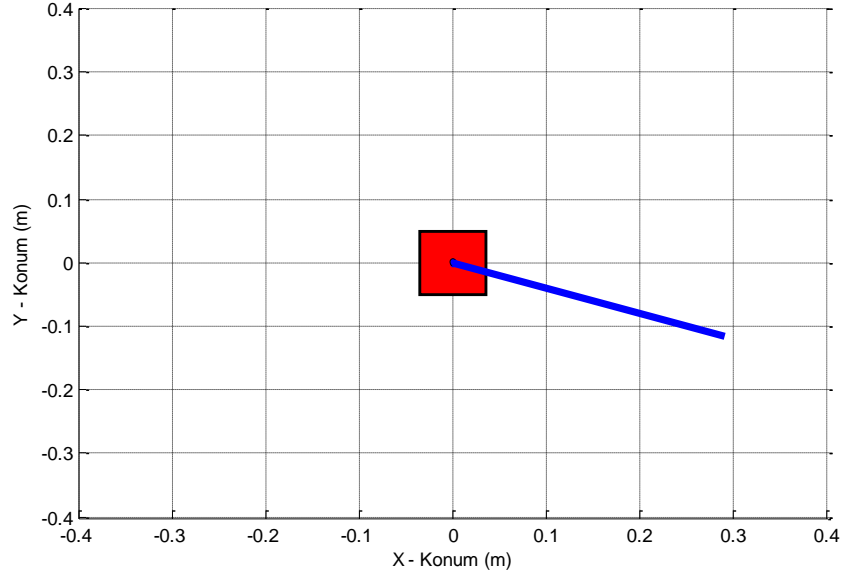
$$\theta_{n+1} = \theta_n + hk \quad (2.71)$$

$$\omega_{n+1} = \omega_n + hl \quad (2.72)$$

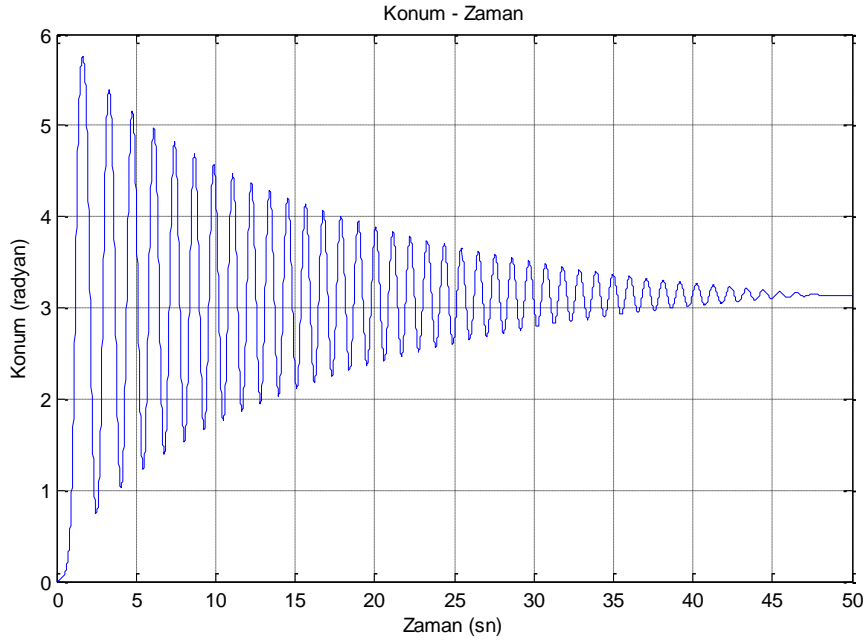
$$x_{n+1} = x_n + h\alpha \quad (2.73)$$

$$v_{n+1} = v_n + h\beta \quad (2.74)$$

Elde edilen denklemler bilgisayar programında iteratif olarak uygulanarak sarkacın benzetimi gerçekleştirilmiştir. Belirli bir yükseklikten serbest bırakılan ters sarkacın benzetim programının çıktıları olan sarkacın görsel gösterimi Şekil 2.11 de, sarkacın konum - zaman grafiği de Şekil 2.12 de görülmektedir.



Şekil 2.11: Görsel ters sarkaç gösterimi



Şekil 2.12: Sarkacın Konum - Zaman Grafiği

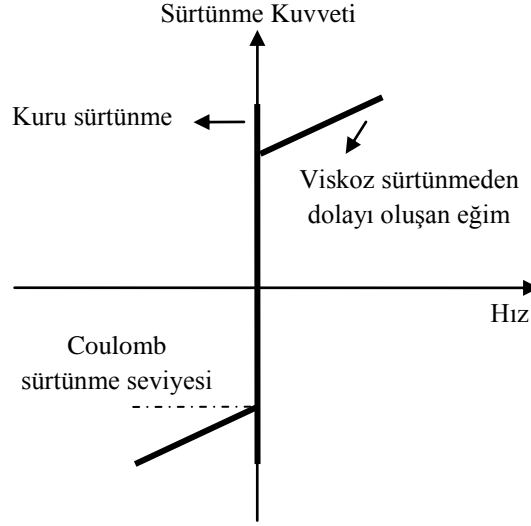
Bu benzetim programında sarkacın dik durduğu konum sıfır açısı olarak kabul edilmiştir ve sarkaç 0.01 radyandan serbest bırakılmıştır. DDRKM uygulanırken adım büyüklüğü $h=0.01$ alınmıştır.

3. YÖNTEMLER

Bölüm 2.1.1 de elde edilen ters sarkaç sisteminin matematik modelinde sadece sembolik olarak gösterilen sürtünme kuvvetleri Karnopp sürtünme modeli kullanılarak modellenmiştir. Sürtünmenin de eklenmesi ile ters sarkaç sisteminin tam bir matematik modeli elde edilmiş olur. Ters sarkacın kontrolünde Oransal Kontrol (OK) ve Sanal Eleman Kontrolü (SEK) kullanılmıştır. Matematik modelde ve kontrol yönteminde bulunan belirsiz parametrelerin tam değerini belirleyebilmek için ise Yanıt Yüzeyi Yöntemi (YYY) kullanılmıştır.

3.1 Karnopp Sürtünme Modeli

Mekanizmaların davranışlarının kontrol edilmesi için mekanizmayı etkileyen dinamiklerin bilinmesi gerekir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda kütle, atalet momenti, hız, ivme gibi dinamiklerin mekanizmalar üzerine olan etkileri neredeyse kesin bir şekilde belirlenebilmiştir. Fakat mekanizmanın hareketine karşı tepki oluşturan sürtünme kuvvetlerinin nasıl bir etki oluşturduğu tam olarak modellenememiştir. Literatürde sürtünme modeli oluşturulurken üç temel bölüme ayrılarak yaklaşım yapılmaktadır. Bu bölgeler viskoz sürtünme, Coulomb sürtünme ve kuru sürtünme bölgeleridir (Armstrong-Helouvry, Dupont, & Wit, 1994). Viskoz sürtünme hıza bağımlı bir parametre, Coulomb sürtünmesi hızdan bağımsız fakat sıfır hız bölgesinde var olmayan bir parametre ve yapışma (stiction) diye de bilinen kuru sürtünme ise hızın sıfır olduğu noktalarda var olduğu düşünülen bir parametredir. Şekil 3.1 de bu sürtünme parametrelerinin toplam sürtünme kuvveti üzerine olan etkileri görülmektedir (Armstrong-Helouvry, Dupont, & Wit, 1994).



Şekil 3.1: Sürtünme parametrelerinin sürtünme kuvvetine etkileri

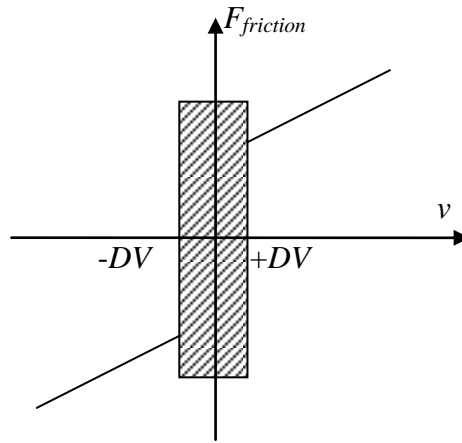
ANSI ye göre kuru sürtünme “Hareketin başlamasına karşı direnç kuru sürtünmeyi yenmek için kullanılan pozitif ve negatif yönlü değerlerin farkı olarak ölçülür (The resistance to the start of motion, usually measured as the difference between the driving values required to overcome static friction upscale and downscale)” olarak tanımlanmaktadır (ANSI/ISA-51.1-1979, 1979 (R1993)). Bu parametrelerden belirlenmesi en zor olanı kuru sürtünmedir. Kuru sürtünmeyi modelleyebilmek için birçok matematik model geliştirilmiştir (Armstrong-Helouvry, Dupont, & Wit, 1994). Bunlar temel olarak statik ve dinamik modeller diye iki gruba ayrılabilirler. Dinamik modeller hız ve ivme gibi etkenlere bağlı olan doğrusal olmayan modellerdir. Dolayısı ile uygulanması için diferansiyel denklem çözümü gibi karmaşık işlemler gerektirirler. Bu yapıları sebebi ile dinamik modeller statik modellere göre kuru sürtünmeyi daha iyi modelleyebilmektedirler fakat çok fazla işlem yükü ve ölçülmesi güç olan bir çok parametre içermektedirler (Mohammad & Hung, 2011). Statik modellerin ise uygulanması daha kolaydır ve performans değerlendirmesinde kabul edilebilir sonuçlar ortaya koyabilmektedirler. Bu modellerden en yaygın olarak kullanılanlardan biri Karnopp sürtünme modelidir (Karnopp, 1985).

Karnopp sürtünme modeli dışındaki diğer statik sürtünme modellerinin doğru sonuçlar verebilmesi sıfır hız noktasının tam olarak ölçülebilmesini gerektirmektedir. Pratik uygulamalarda ise örnekleme hızları ve gürültü etkisi hesaba katıldığında sıfır hız noktasının tam olarak ölçülebilmesi genellikle

mümkün olamamaktadır. Karnopp sürtünme modelinde ise sıfır hız noktası yerine bir sıfır hız bölgesi belirlenerek belirli değerlerin altındaki hızların sıfır hız olarak alınması sağlanmıştır. Karnopp sürtünme modeli (3.1) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$F_{friction} = \begin{cases} F_v \cdot v + F_c \cdot \text{sgn}(v) & , |v| \geq DV \\ \min(F_e(t), F_s) & , F_e(t) \geq 0 \\ \max(F_e(t), -F_s) & , F_e(t) < 0, |v| < DV \end{cases} \quad (3.1)$$

Burada F_v viskoz sürtünme katsayısını, F_c Coulomb sürtünme katsayısını, F_s kuru sürtünme değerini, $F_e(t)$ dışarıdan mekanizmaya uygulanan harici kuvvetleri, DV Karnopp sıfır hız bölgesinin sınır değerini ve v ise mekanizmanın hızını temsil etmektedir. Eğer sistemin hızı sınır hız değeri DV den büyük ise sürtünme kuvveti hıza bağımlı viskoz sürtünme ve yönü hızın yönüne bağlı fakat sabit değeri olan Coulomb sürtünmesinden meydana gelir. Sistem hızı, sınır hız değeri DV den küçük olursa sürtünme kuvveti değeri uygulanan harici kuvvete bağlı olarak değişen kuru sürtünmeden meydana gelir. Kuru sürtünme bölgesinde F_s kuru sürtünme değeri ile $F_e(t)$ harici kuvvetinden hangisinin genliği daha küçük ise sürtünme kuvveti ona eşit olur. Böylece sistemin harekete başlamadan yada durmadan hemen önceki sürtünme durumu ifade edilmiş olur. Karnopp sürtünme modelinin grafiksel gösterimi Şekil 3.2 de görülmektedir.



Şekil 3.2: Karnopp sürtünme modeli

3.2 Yanıt Yüzeyi Yöntemi

Deney tasarımı, tasarımın sınırlarını bilmek bu sınırlar dâhilinde tasarım değişkenlerinin tasarıma etkilerini anlamak ve analitik olarak en uygun çözümü bulmak tasarımcı için son derece önem taşır. Burada deney tasarımını oluşturan parametreler ile deneyin işlevliliğini ölçecek parametreler arası bağlantı olması gerekmektedir. Bu koşulun olmaması durumunda değerlendirme ölçütünün tasarım değişkenlerindeki değişmelere karşı duyarlılığını görmek ve hatta gerekli bağıntıları deneysel yoldan elde etmek için Yanıt Yüzeyi Yöntemi (YYY, RSM-Response Surface Methodology) kullanılır (Tekindal, 2009).

YYY literatürde iyi bilinen ve yaygın kullanılan bir deney tasarımı (Design of Experiment - DOE) yöntemidir. Yanıt Yüzey Yöntemi, “Denemelerin Optimum Koşullara Ulaşması” ismi ile 1951 yılında Box ve Wilson tarafından geliştirilmiş ve tanımlanmıştır (Box & Wilson, 1951).

Yanıt Yüzeyi Yönteminde model, regresyon analizi yardımıyla oluşturulur. Bir faktörün ana etkisinin veya interaksiyon (etkileşim) etkisinin yanıt değişkeninin değerlerinde ne derece önemli bir etkiye sahip olduğuna regresyon katsayıları yardımıyla karar verilir.

Deney tasarımı amaç ortogonal (dik) dizilerden faydalanarak tasarlanan deneylerle, az sayıda deney sonucundan yola çıkarak girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi modellemek ve bu modellerden yola çıkarak tahminleme ve optimizasyon yapmaktır.

YYY metodunda öncelikle modellenecek ve optimize edilecek sistemdeki Kontrol edilebilen değişkenler belirlenir. Bu değişkenler Faktör olarak isimlendirilir. Sonraki aşamada ise bu faktörlerin her birinin minimum ve maksimum seviyeleri belirlenir. Regresyon modelini oluşturmak için bu iki verinin elde edilmesi şarttır (Kul, 2004). YYY ile elde edilecek ikinci dereceden doğrusal, karesel ve etkileşim terimlerini içeren model (full quadratic) (3.2) eşitliğindeki gibidir.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^n \beta_{ij} X_i X_j + e \quad (3.2)$$

Burada Y çıktıyı, X girdiyi, $\beta_0, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ regresyon denkleminin katsayılarını, i ve j lineer ve karesel katsayıların indisini, ve e ise artık deneysel hatayı göstermektedir (Hata terimi) (Yalcinkaya & Bayhan, 2009), (Rashid, et al., 2011), (Montgomery, 2001). Bu modelde X girdi matrisini, Y çıktı matrisini, β katsayılar matrisini ve ε hata terimleri matrisini göstermek üzere matris formunda (3.3) eşitliğindeki gibi de ifade edilebilir:

$$Y = \beta X + \varepsilon \quad (3.3)$$

Modeldeki β katsayıları (3.4) eşitliğindeki matris çarpımı yardımıyla hesaplanabilir.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3.4)$$

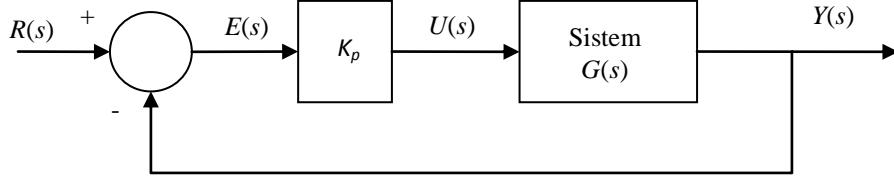
Birçok yanıt yüzey yöntemi probleminde, yanıt ve bağımsız değişken arasındaki fonksiyonun matematiksel formu genellikle bilinmediğinden tahmin edilmesi gerekmektedir. Sistemin yanıtı, bağımsız değişkenin bir lineer fonksiyonu olarak iyi bir uyum veriyorsa, birinci dereceden polinomiyal denklem, model olarak kullanılabilir. Eğer sistemin yanıt yüzeyinde bir eğrilik varsa, ikinci dereceden polinomiyal denklemler gibi daha yüksek dereceli polinomiyal denklemler kullanılmalıdır.

YYY az sayıda deney yaparak elde edilen deneysel sonuçlardan faydalanılarak girdilerle çıktılar arasındaki matematiksel ifadeyi elde etmeyi ve bu matematiksel modelden faydalanarak denenmemiş kombinasyonlar denenseydi ne sonuç çıkardı veya belirlenen bir hedef değere ulaşmak için girdilerin değeri ne olmalı sorularının yanıtlarını arayan bir yöntem olması nedeniyle deneysel çalışmalar için vazgeçilmez bir modelleme ve en uygun şekle sokma yöntemidir.

3.3 Oransal Kontrol

Kontrol sistemleri geri beslemeli ve geri beslemesiz olmak üzere iki temel sınıfa ayrılabilirler. Sistemde algılayıcılar bulunuyorsa ve bu algılayıcılardan gelen bilgi kontrol sistemine girdi olarak uygulanıyorsa bu tip sistemlere geri beslemeli sistem denir. Oransal kontrol en çok kullanılan doğrusal geri beslemeli

kontrol sistemlerinden bir tanesidir (Golnaraghi & Kuo, 2010). Oransal kontrolün blok diyagramı Şekil 3.3 de görülmektedir.



Şekil 3.3: Oransal kontrol

Sistemin girişi ile çıkışı arasındaki bağıntıyı veren fonksiyona transfer fonksiyonu denir. Bu sistemde $R(s)$ sisteme uygulanan referans giriş sinyalini, $G(s)$ kontrol edilmek istenen sistemin davranışını ifade eden transfer fonksiyonunu, K_p oransal kazanç değerini, $Y(s)$ sistemin çıkış sinyalini, $E(s)$ referans girişi ile çıkış arasındaki hatayı temsil etmektedir. Sistem negatif geri beslemeli bir sistem olduğu için hatayı sıfıra çekmeye çalışacaktır. Tüm sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu (3.9) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad (3.5)$$

$$U(s) = K_p \cdot E(s) \quad (3.6)$$

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) \quad (3.7)$$

$$Y(s) = G(s) \cdot K_p \cdot [R(s) - Y(s)] \quad (3.8)$$

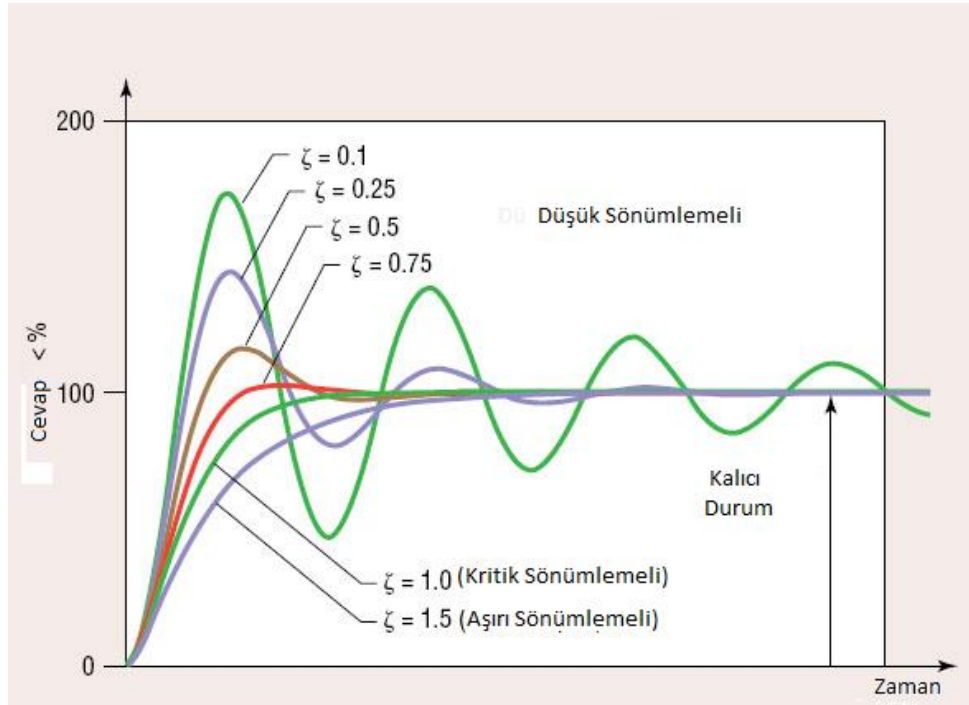
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K_p \cdot G(s)}{1 + K_p \cdot G(s)} \quad (3.9)$$

Kapalı çevrim transfer fonksiyonunun paydasını sıfıra eşitlenmesi ile elde edilen eşitliğe sistemin karakteristik denklemi denir. Karakteristik denklemin kökleri sistemin zaman içersindeki davranışı hakkında birçok bilgiye sahip olmamızı sağlar. Eğer kökler karmaşık düzlemin sağ yarısında kalıyor ise sistem kararsızdır. Eğer kökler sol yarı düzlemde kalıyor ise sistem köklerin durumuna göre değişik kararlılık karakteristiklerine sahip olmaktadır. Bu kararlılık durumları köklerin gerçek ve farklı olması durumunda oluşan aşırı sönümlenmeli

(over damped), köklerin gerçekte ve eşit olması durumunda kritik sönümlenmeli (critically damped) ve köklerin karmaşık olması durumunda ise düşük sönümlenmeli (under damped) çıkış durumlarıdır. Bu sönümlenme durumları için çıkışın aldığı hal Şekil 3.4 da görülmektedir. Tipik bir ikinci dereceden sistemin transfer fonksiyonu (3.10) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.10)$$

Burada ζ sistemin sönümlenme oranını, ω_n ise sistemin doğal frekansını ifade etmektedir. Doğal frekans sistemin sönümlenme için yaptığı salınımların oluşma sıklığı olarak ifade edilebilir.



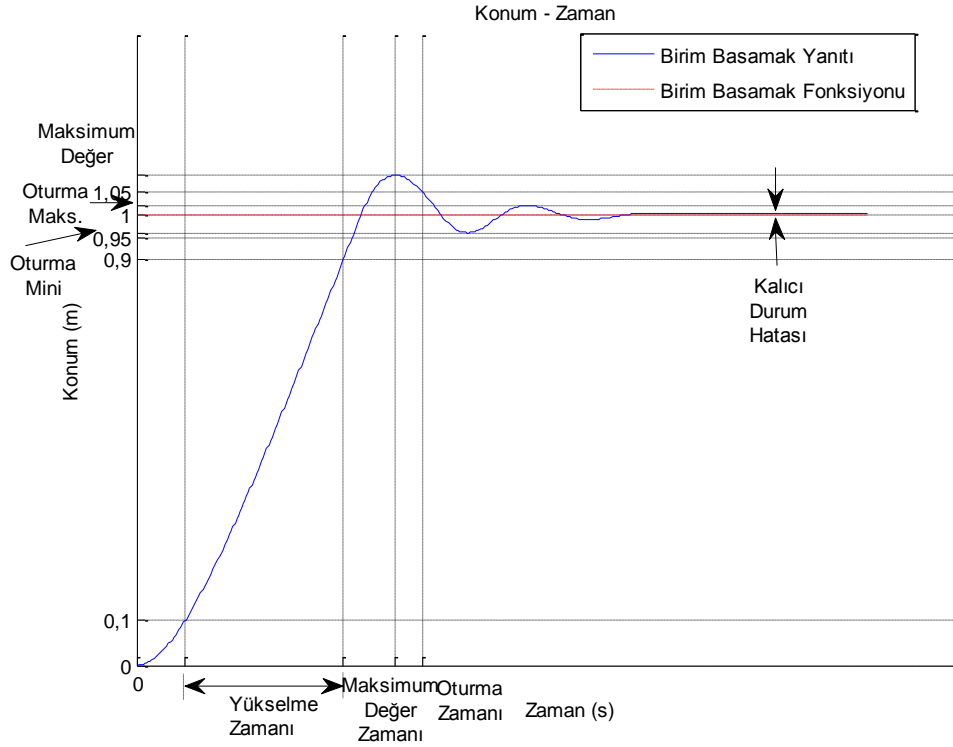
Şekil 3.4: Sönümlenme çeşitleri

Sistemin kararlılığını belirleyebilmek, sürekli zaman analizini yapabilmek ve kontrol parametrelerinin alabileceği değer aralıklarını belirleyebilmek için birçok analiz yöntemi mevcuttur. Bu yöntemlerden bir tanesi olan Routh - Hurwitz Kararlılık Kriteri ile karakteristik denklem üzerinde bir dizi işlem yapılarak sistemin kararlı olabilmesi için denklemin katsayılarının ne olması gerektiği hakkında sınırlayıcı eşitlikler elde edilebilmektedir (Dorf, 1992). Sürekli zaman analizinin bir parçası olan ve (3.11) eşitliğindeki gibi ifade edilebilen son değer

teoreminden faydalanılarak sistemin kalıcı durum hatasının ne olacağı bulunabilmektedir (Golnaraghi & Kuo, 2010).

$$ess = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)} \quad (3.11)$$

Sistemin genel davranışı hakkında bilgi edinebilmek için kullanılan en temel yöntem girişine birim basamak sinyali uygulayıp sistemin birim basamak yanıtının çıktılarının incelenmesidir. Birim basamak yanıtının çıktıları Kalıcı Durum Hatası - ess , Yükselme Zamanı - t_r , Oturma Zamanı - t_s , Oturma Maksimumu - S_{max} , Oturma Minimumu - S_{min} , Yüzdeler Maksimum Taşma - PO , Maksimum Değer - P ve Maksimum Değer Zamanı - t_p dir. ess zaman sonsuza giderken çıkışın alacağı son değer ile birim basamak girişi arasındaki fark, t_r çıkışın alacağı son değer yüzde onundan yüzde doksanına ulaşması için geçen zaman, t_s çıkışın alacağı son değer civarında oluşturulan yüzde beşlik bant içerisinde kaldığı ilk zaman, S_{max} çıkışın oturma zamanına ulaşıldıktan sonra aldığı maksimum değer, S_{min} oturma zamanına ulaşıldıktan sonra aldığı minimum değer, PO çıkışın aldığı maksimum değer ile aldığı son değer oranının yüzdelik değeri, P çıkışın aldığı maksimum değer ve t_p maksimum değer oluştuğu zaman olarak tanımlanabilir. Kontrol parametrelerinin belirlenmesinde bu çıktıların değerlerinin belirli değer aralıklarında kalmasının sağlanması da kısıtlayıcı olarak kullanılabilir. Birim basamak yanıtının çıktıların değerlerini belirlemek için bilgisayar yazılımı kullanılması en uygun yöntemlerden birisidir. Oransal kontrol uygulanmış tipik bir sistemin birim basamak yanıtı Şekil 3.5 de görülmektedir.



Şekil 3.5: Birim basamak yanıtı

Sistemin kararlılığı yani köklerinin yeri, girişteki sinyal değişimlerine tepki verebilme kapasitesi ve sönümlenme oranı gibi parametrelerin kontrol yönteminin parametrelerinin aldığı değere göre değişimleri hakkında bilgi edinmemize yardımcı olan bir diğer analiz yöntemi ise Evans tarafından geliştirilen Root - Locus yöntemidir (Evans, 1948). Root - Locus yönteminde karakteristik denklemin köklerinin yeri kontrol yönteminin katsayılarının değişimine göre nasıl değiştiği görsel olarak gözlemlenebilmektedir. Williamson yaptığı bir seri çalışma ile bu yöntemi sistemin sönümlenme oranı ve doğal frekans gibi diğer parametreleri hakkında da bilgi verebilmesi için geliştirmiştir (Williamson, Design Data to assist the Plotting of Root Loci (Part I), 1968a), (Williamson, Design Data to assist the Plotting of Root Loci (Part II), 1968b) , (Williamson, Design Data to assist the Plotting of Root Loci (Part III), 1968c), (Williamson, Computer Program to Obtain the Time Response of Sampled Data Systems, 1969a), (Williamson, Accurate Root Locus Plotting Including the Effects of Pure Time Delay, 1969b). Bu yöntem görselliğinin yanında sistem hakkında diğer önemli parametrelerinde bilgisini bir arada verebildiği için kontrol sistem parametrelerinin alabileceği değer aralıklarının belirlenmesinde diğer yöntemlere

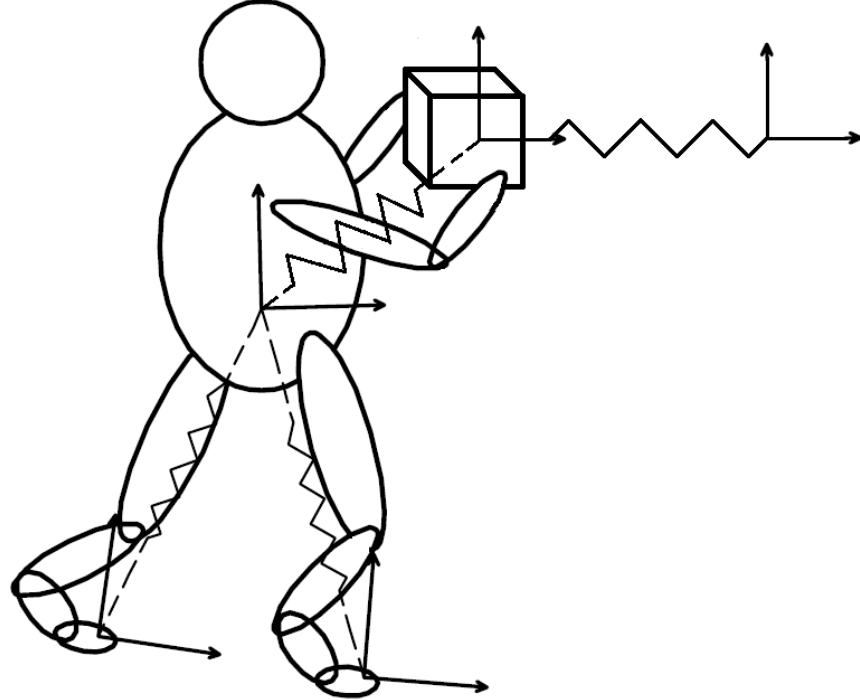
nazaran daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da ters sarkaç için tasarlanan oransal kontrol parametrelerinin alabileceği başlangıç değer aralıkları Root - Locus yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin en uygun değerleri alabilmesi için ise YYY kullanılmıştır.

3.4 Sanal Eleman Kontrolü

Bilinen klasik kontrol tekniklerinde katı analiz metotları ile belirli kalıplara sahip yapılar kullanılması gerekmektedir. Bu özellikleri nedeni ile de gelişme kaydedilmesi oldukça zor olan kontrol yöntemleridir. Bu nedenle kontrol sistemi geliştirmek için uğraşan araştırmacılar alternatif metotlar geliştirebilmek için çaba sarf etmektedirler. Ayrıca robotlar gibi doğrusal olmayan yapıya sahip mekanizmaların kontrolü için de klasik yöntemlerden daha gelişmiş doğrusal olmayan Doğrusal Olmayan Kontrol (Du, Xu, Banks, & Wu, 2009), (Zhang & Chong, 2009) ve Adaptif Kontrol (Krstic, Kanellakopoulos, & Kokotovic, 1995) gibi kontrol yöntemleri de literatürde geliştirilmektedir. Bu çalışmaların ortak noktası uygulanmaları oldukça zor olması ve çok karmaşık işlemler gerektirmeleri nedeni ile anlaşılması güç olmalarıdır. Bu nedenle robotlar gibi mekanizmalara yaptırılması tasarlanan hareketlerin kontrol sistemleri tarafından gerçekleştirilmesi bu yöntemler ile neredeyse imkânsız hale gelmektedir. Çünkü her eklem için ayrı ayrı yörünge hesaplama ve bunları bir bütüne uygulayabilmek için oldukça fazla çaba sarf edilmesi gerekmektedir.

Pratt ve ekibi tarafından geliştirilen Sanal Eleman Kontrolü (SEK, Virtual Model Control - VMC) diğer kontrol yöntemlerinden uygulanma şekli ve daha az matematiksel işlem gerektirmesi yönü ile farklılaşmaktadır. Pratt tarafından "Sanal eleman kontrolü etkileşimli kuvvet davranışlarını tanımlama dilidir" diye tanımlanmıştır (Pratt J. E., 1995). SEK yönteminde eklem hareketlerini ve mekanizmanın bütün davranışlarını sağlamak için sanal mekanik elemanlar kullanır. Kontrol sistemi, mekanizma üzerinde gerçekte var olmayan bu sanal elemanlar eklemler arasında ve çevredeki diğer nesnelere ile mekanizma arasında gerçekten varmış gibi kuvvetler üreterek eklemleri ve mekanizmayı kontrol eder. Bu tekniğin doğası gereği kontrol sisteminin tasarımı mekanizma tasarım yeteneği gerektirir. Mekanizmanın davranışları, sanki oynatma çubuklarının uçları önceden

belirlenmiş yörüngeleri takip eden mekanizmalara bağlanmış otomatik kuklalara benzer şekilde bilinen veya hayal edilebilen sanal mekanik parçalar ile gerçekleştirilir. Yöntemin bu özellikleri dikkate alındığında kontrol işlemi ağır matematiksel teoriler ile uğraşmadan sezgisel olarak mekanizmanın nasıl hareket ettirilebileceğinin hayal edilmesi ile yapılabilmektedir. Bu da kontrol yönteminin herkes tarafından kolayca uygulanabilir olması anlamına gelmektedir. Bir insansı robotun dengede kalması ve aynı zamanda bir nesneyi taşıyabilmesi için kullanılacak sanal elemanlara örnek Şekil 3.6 de görülmektedir. Robotun kütle merkezi ile ayakları arasına bağlanan yaylar robotun kütle merkezinin belirli bir yükseklikte kalmasını, robotun ellerinin taşınan cisme temas ettiği nokta ile robotun kütle merkezi arasına bağlanan yay cismin robota göre belirli bir mesafede kalmasını ve son olarak da robotun ellerinin taşınan cisme temas ettiği nokta ile sürekli sabit hız ile hareket eden bir nokta arasına bağlanan yay robotun yürütülmesini sağlamaktadır. Robotun her eklemine konumları ile ayrı ayrı uğraşmak yerine genel davranış tanımlamaları yapılarak hareketin sağlandığı görülmektedir.



Şekil 3.6: İnsansı robotun sanal yaylar ile yürütülmesi

Bağlanan sanal elemanların oluşturduğu kuvvetler ile eklemlerdeki genelleştirilmiş kuvvet denklemleri yazılarak hareket sağlayıcıların üretmesi gereken kuvvetler hesaplanır. Böylece eklemler sanal eleman gerçekten bağlıymış gibi hareket edebilirler. Sanal eleman ile oluşturulmak istenen hareket aslında eklemlerdeki hareket sağlayıcılar ile oluşturulduğundan yapılabilecek hareketler yada elde edilmek istenen dinamikler hareket sağlayıcının dinamik özellikleri ile sınırlıdır. Sanal elemanın ürettiği kuvvetler hiçbir zaman bu sınırları geçmemelidir. Sanal elemanların seçimi tamamen sezgiseldir. Konu ile ilgili yapılan literatür taramasında mekanizmanın yapması istenilen davranışları oluşturabilmesi için seçilen sanal elemanların parametrelerinin değerlerinin nasıl belirleneceğine dair herhangi bir yöntem ile karşılaşılmamıştır. Yapılan çalışmalarda bu parametreler deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir.

Sanal elemanların mekanizma üzerine uygulanmasında dikkat edilmesi gereken üç temel adım vardır. İlk olarak sanal elemanların referans koordinat düzlemlerinin tam olarak tanımlanması gerekir. Her sanal elemanın üç temel koordinat düzlemi vardır. Bunlar Etki Koordinat Düzlemi (${}^E R$), Tepki Koordinat Düzlemi (${}^T R$) ve Referans Koordinat Düzlemi (${}^O R$) dir. ${}^E R$ düzlemi sanal elemanın bağlandığı ve oluşturduğu kuvvetin etkidiği temel noktaya yerleştirilmelidir. Newton' un üçüncü yasasına uygun olarak bir etki kuvvetine karşılık bir tepki kuvveti oluşturulur. SEK yönteminde bu tepki kuvvetinin etkiyeceği nokta sanal elemanın bağlandığı diğer noktadır ve ${}^T R$ bu noktaya yerleştirilir. Bu noktanın seçimi çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. ${}^O R$ ise sanal eleman ile ilgili tüm tanımlamaların yapıldığı referans düzlemini ifade etmektedir. Bu koordinat düzlemlerinin bulunduğu noktalar sabit olmak zorunda değildir. Bu hareket edebilme özellikleri sebebi ile de mekanizmaların eklem düzeyindeki kontrol yöntemleri ile yapılması güç olan hareketlerinin (robotların yürümesi ve koşması yada insansı robotun basket oynaması gibi) kolayca yapılabilmesini sağlarlar. İkinci adım ise mekanizmanın ileri kinematik ve dinamik hesaplamalarının yapılmasıdır. Klasik kontrol yöntemlerinde mekanizma hareket ettirilirken ters kinematik hesaplamalar yapılarak mekanizmanın istenen konuma gelebilmesi için eklemlerin olması gerektiği konumlar kesin olarak belirlenmektedir. Bu aşamadan sonra diğer eklemlerin konumları dikkate alınmadan sadece o eklem için kontrol işlemi gerçekleştirilmektedir. SEK de ise ters kinematik işlemler yapılmaz. Son

adım olarak eklemler üzerinde etkili olan torklar belirlenir ve böylece bir eklem kontrol edilirken diğler eklemlerin konumları da dikkate alınmış olur. Elde edilen eklem torklarından sanal kuvvetler elde edilerek kontrol işlemleri tamamlanmış olur.

Bu çalışmada ters sarkaç için tasarlanan SEK de kullanılan yayların parametrelerinin belirlenmesinde YYY yöntemi kullanılmıştır. Böylece sanal elemanların parametrelerinin belirlenmesi için sistematik bir yöntem olan YYY ilk defa kullanılarak parametre belirlemek için yapılması gereken deney sayısı minimize edilmiştir.

4. DENEYLER

Ters sarkacın kontrolü için kullanılan kontrol yöntemlerinin bilgisayar benzetimi üzerinden tasarlanabilmesi ve yüksek performans elde edilebilmesi için matematik modelde bulunan belirsiz parametrelerin değerinin mümkün olduğunca gerçeğe yakın olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Bu parametreleri belirleyebilmek için ters sarkacın, sarkaç kısmı ve araba kısmı üzerinde birbirlerinden bağımsız olarak deneyler yapılmıştır. Bu deneyler tamamen bilgisayar benzetimi üzerinde yapılmış ve mekanizmanın bilgisayar benzetiminin davranışı, kaydı alınan gerçek mekanizmanın davranışına mümkün olduğunca benzer hale getirilmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler YYY kullanılarak yapılmış ve parametreler optimize edilmiştir.

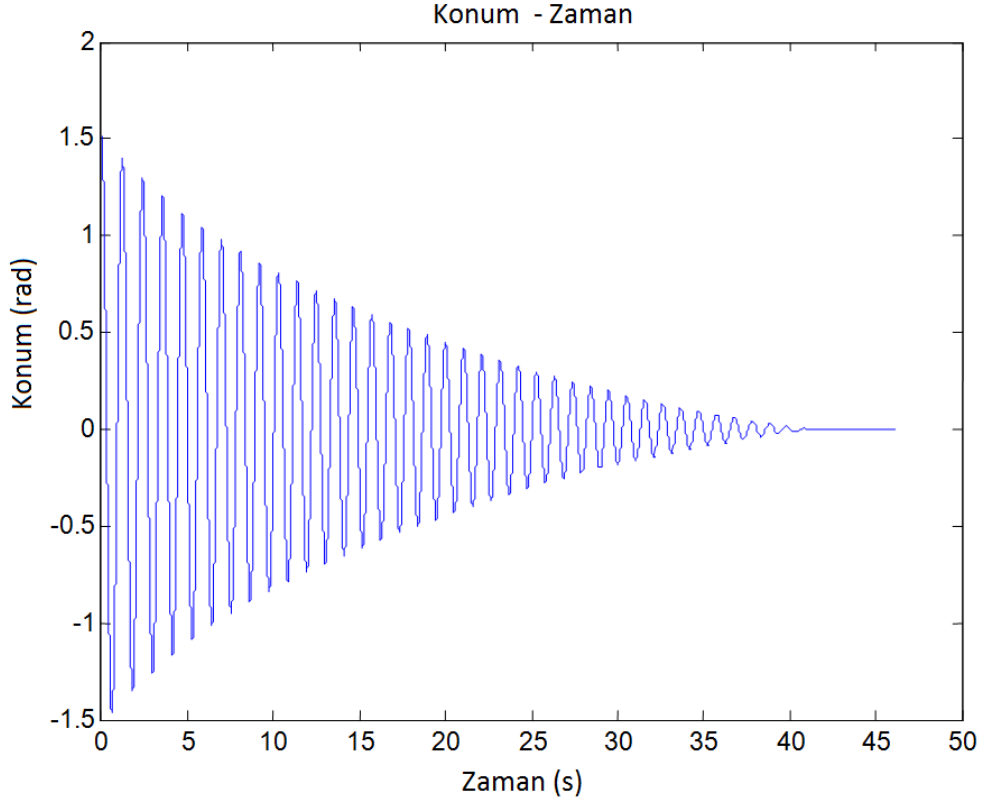
Sürtünme parametreleri belirlendikten sonra ters sarkacın kontrolü için OK sistemi tasarlanmış ve kazanç parametreleri bilgisayar ortamında YYY kullanılarak optimize edilmiştir. Ayrıca ters sarkaç için SEK sistemi tasarlanmış ve kullanılan sanal elemanların değerleri ters sarkacın bilgisayar benzetimi üzerinden yine YYY kullanılarak optimize edilmiştir. Bulunan değerler gerçek ters sarkaç üzerinde denenmiştir.

4.1 Sarkacın Karnopp Sürtünme Parametrelerinin Belirlenmesi

Sürtünme kuvvetlerinin modellenmesi üzerine yapılan literatür taraması sırasında, ters sarkacın sarkaç kısmı gibi mekanizmalardaki sürtünme kuvvetlerinin ihmal edilebilir kabul edildiği görülmüş ve bu gibi mekanizmalar için sürtünme kuvvetlerinin modellenmesi çalışmalarına rastlanamamıştır. Sarkaçta sürtünme modeli olarak Karnopp sürtünme modeli kullanılmıştır.

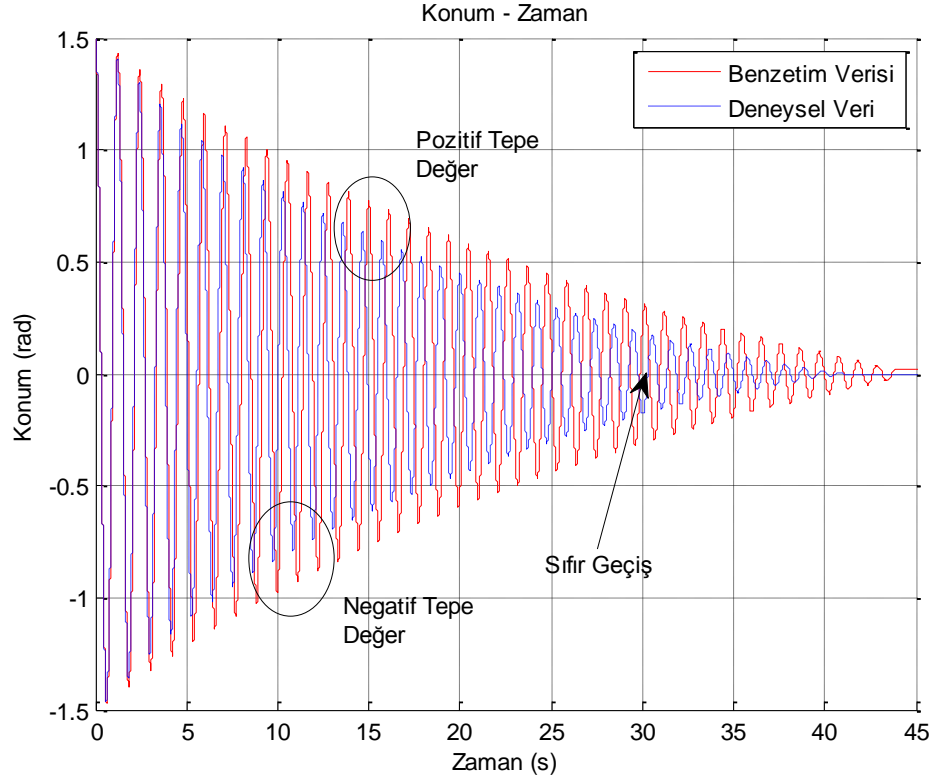
Sarkaç belirli bir yükseklikten serbest bırakıldığında yer çekiminin etkisi altında doğal salınım hareketini yaparak nihai pozisyonunu almaktadır. Bu harekette yer çekimi ve sürtünme kuvvetleri gibi doğal etkenlerin dışında başka bir yapay kuvvet etkili değildir. Sarkacın bilgisayar benzetiminin belirli bir yükseklikten serbest bırakılması ile elde edilen salınım hareketinin bilgisayara kaydı alınan gerçek sarkacın salınım hareketi ile aynı özellikleri taşıyabilmesi için

Karnopp sürtünme parametrelerinin doğru olması yeterlidir. Ayrıca atalet momenti de CAD programı vasıtası ile belirlendiğinden oluşan hesaplama ve imalat hatalarından dolayı optimize edilmelidir. Gerçek sarkacın salınım hareketi PicoScope 3424 model dijital osiloskop kullanılarak 1 ms örnekleme zamanı hassasiyeti ile kaydedilmiştir. Kaydedilen konum sinyali Şekil 4.1 de görülmektedir.



Şekil 4.1: Gerçek sarkacın konum - zaman grafiği

Atalet momentinin ve sürtünme parametrelerinin YYY ile optimize edilebilmesi için her parametre için başlangıç değer aralığının ve parametrelerin uygunluğunu gösteren değerlendirme kıstaslarının belirlenmesi gerekmektedir. Kıstas olarak gerçek sistemin salınım hareketi ile sistemin benzetiminin salınım hareketinin birbirine benzerliğini ifade eden sıfır geçiş sayılarının farkı (e_{ZC}), pozitif ve negatif tepe değer sayılarının farkı (e_{PM} , e_{NM}) ve hız ve aı değerlerinin ortalama karesel hataları (mse_A , mse_V) seçilmiştir. Bu kıstaslar Şekil 4.2 de görülmektedir.



Şekil 4.2: Sarkaç optimizasyonu için değerlendirme kısıtları

Atalet momenti için başlangıç değer aralığı CAD programı aracılığı ile belirlenen değer civarında seçilmiştir. Karnopp sürtünme modeli parametrelerinin (F_v , F_c , F_s , DV) başlangıç değer aralığı ise rastgele değerler ile birkaç sezgisel deney yapılarak elde edilen sonuçlara göre kabaca belirlenmiştir. Başlangıç aralığının belirlenmesi için yapılan deneylerde her parametrenin etkisinin birbirinden çok farklı olduğu ve sistematik bir yöntem olmaksızın yapılacak parametre belirleme çalışmalarının çok uzun zaman alacağı ve uygun sonuçları veren değerlerin beklide hiçbir zaman belirlenemeyeceği gözlemlenmiştir. Benzetim sonuçlarının gerçek sonuçlara uydurulabilmesi için merkezi karma, yüzey merkezli 27 deney benzetim ortamında gerçekleştirilmiş ve sonuçları Tablo 4.2 da verilmiştir. Tasarımda kullanılan başlangıç faktör seviyeleri Tablo 4.1 de verilmiştir.

Tablo 4.1: Karnopp sürtünme model parametrelerinin başlangıç değer aralığı

| Parametre | Sembol | Seviye | | |
|--------------------|--------|---------|---------|---------|
| | | Düşük | Orta | Yüksek |
| Viskoz Sürtünme | F_v | 0.00010 | 0.00055 | 0.00100 |
| Coulomb Sürtünme | F_c | 0.00010 | 0.00055 | 0.00100 |
| Kuru Sürtünme | F_s | 0.0010 | 0.0055 | 0.0100 |
| Karnopp Sınır Hızı | DV | 0.01 | 0.03 | 0.05 |
| Atalet Momenti | I | 0.0026 | 0.0028 | 0.0030 |

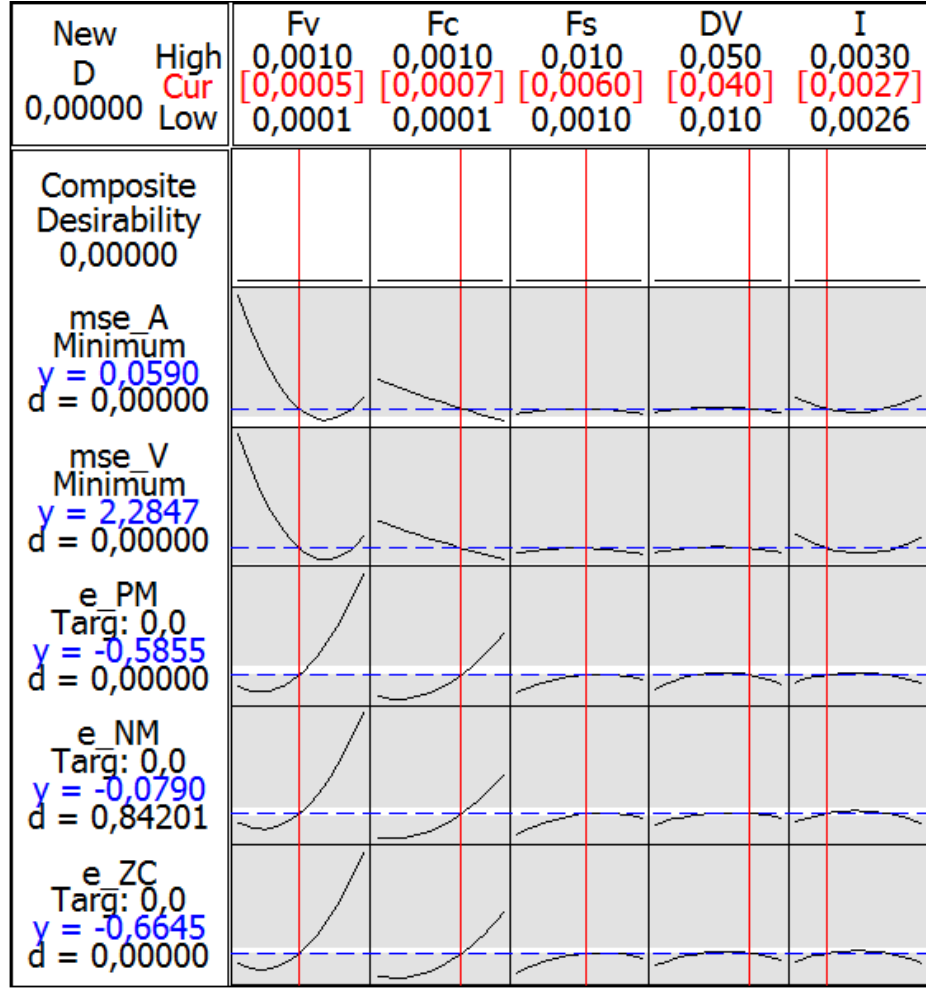
Tablo 4.2: Gerçek değerleri ve gözlemlenen sonuçları gösteren deney tasarım matrisi

| F_v | F_c | F_s | DV | I | mse_A | mse_V | e_{PM} | e_{NM} | e_{ZC} |
|---------|---------|--------|------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.00010 | 0.00010 | 0.0010 | 0.01 | 0.0030 | 0.851394 | 24.5198 | -1 | 0 | -1 |
| 0.00100 | 0.00010 | 0.0010 | 0.01 | 0.0026 | 0.172923 | 5.902288 | -5 | -5 | -10 |
| 0.00010 | 0.00100 | 0.0010 | 0.01 | 0.0026 | 0.420202 | 13.79541 | -4 | -3 | -7 |
| 0.00100 | 0.00100 | 0.0010 | 0.01 | 0.0030 | 0.024684 | 0.83359 | 15 | 15 | 30 |
| 0.00010 | 0.00010 | 0.0100 | 0.01 | 0.0026 | 0.748657 | 22.94686 | -2 | -2 | -4 |
| 0.00100 | 0.00010 | 0.0100 | 0.01 | 0.0030 | 0.037481 | 1.249698 | 1 | 2 | 3 |
| 0.00010 | 0.00100 | 0.0100 | 0.01 | 0.0030 | 0.527503 | 16.03793 | -2 | -2 | -4 |
| 0.00100 | 0.00100 | 0.0100 | 0.01 | 0.0026 | 0.170452 | 5.726086 | 17 | 17 | 34 |
| 0.00010 | 0.00010 | 0.0010 | 0.05 | 0.0026 | 0.74871 | 22.94693 | -2 | -2 | -4 |
| 0.00100 | 0.00010 | 0.0010 | 0.05 | 0.0030 | 0.037696 | 1.265339 | -4 | -4 | -8 |
| 0.00010 | 0.00100 | 0.0010 | 0.05 | 0.0030 | 0.527562 | 16.03839 | -2 | -2 | -4 |
| 0.00100 | 0.00100 | 0.0010 | 0.05 | 0.0026 | 0.169584 | 5.725135 | 15 | 15 | 30 |
| 0.00010 | 0.00010 | 0.0100 | 0.05 | 0.0030 | 0.850958 | 24.51124 | -1 | 0 | -1 |
| 0.00100 | 0.00010 | 0.0100 | 0.05 | 0.0026 | 0.174283 | 5.939797 | 2 | 3 | 5 |
| 0.00010 | 0.00100 | 0.0100 | 0.05 | 0.0026 | 0.419574 | 13.78747 | -4 | -3 | -7 |
| 0.00100 | 0.00100 | 0.0100 | 0.05 | 0.0030 | 0.025338 | 0.834071 | 16 | 17 | 33 |
| 0.00010 | 0.00055 | 0.0055 | 0.03 | 0.0028 | 0.620959 | 19.04629 | -2 | -2 | -4 |
| 0.00100 | 0.00055 | 0.0055 | 0.03 | 0.0028 | 0.058951 | 2.008085 | 10 | 11 | 21 |
| 0.00055 | 0.00010 | 0.0055 | 0.03 | 0.0028 | 0.158014 | 5.321195 | -4 | -4 | -8 |
| 0.00055 | 0.00100 | 0.0055 | 0.03 | 0.0028 | 0.008474 | 0.277822 | 7 | 7 | 14 |
| 0.00055 | 0.00055 | 0.0010 | 0.03 | 0.0028 | 0.053817 | 1.815587 | -4 | -4 | -8 |
| 0.00055 | 0.00055 | 0.0100 | 0.03 | 0.0028 | 0.051149 | 1.722521 | -1 | -1 | -2 |
| 0.00055 | 0.00055 | 0.0055 | 0.01 | 0.0028 | 0.053532 | 1.805356 | -3 | -2 | -5 |
| 0.00055 | 0.00055 | 0.0055 | 0.05 | 0.0028 | 0.051252 | 1.728908 | -3 | -2 | -5 |
| 0.00055 | 0.00055 | 0.0055 | 0.03 | 0.0026 | 0.040183 | 1.389426 | -2 | -2 | -4 |
| 0.00055 | 0.00055 | 0.0055 | 0.03 | 0.0030 | 0.23898 | 7.8004 | -3 | -3 | -6 |
| 0.00055 | 0.00055 | 0.0055 | 0.03 | 0.0028 | 0.052539 | 1.772103 | -3 | -2 | -5 |

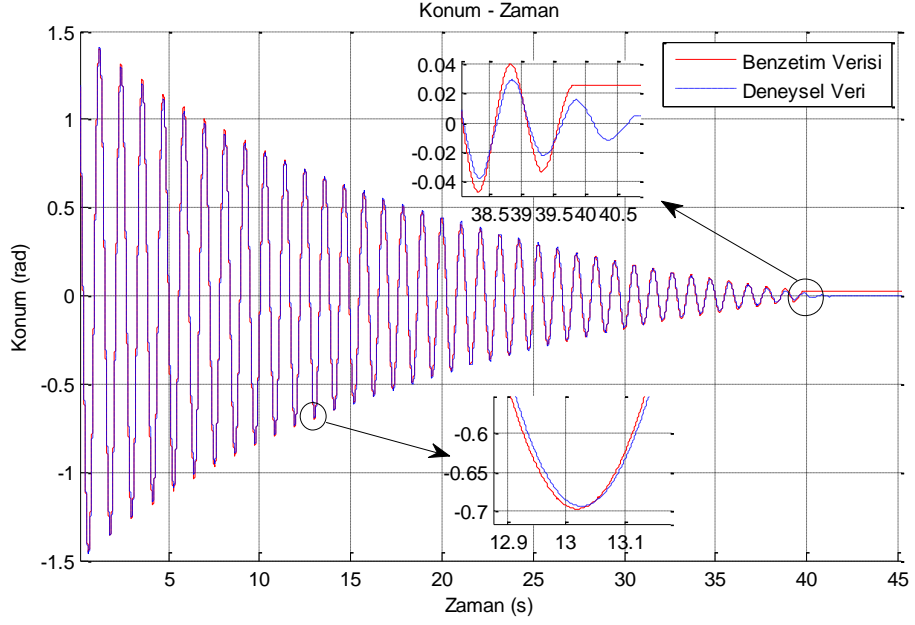
β matrisini bulmak ve istenen sonuçları elde edebilmek için gerekli matematik modeli kurmak için bir istatistiksel yazılım kullanılmıştır (MINITAB 16 Trial Version, USA). Tablo 4.2 de verilen sonuçlara göre YYY ne göre mse_A , mse_V , e_{PM} , e_{NM} , e_{ZC} kıstasları için matematik model 95% lik bir güven değeri ile oluşturulmuştur. Kıstaslar için belirlenen 0 hedef değeri için Minitab ın optimizasyon modülü kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan optimum parametre değerleri Tablo 4.3 de verilmiştir. Optimizasyon aracının grafiksel sonuçları Şekil 4.3 de görülmektedir.

Tablo 4.3: İlk tasarım için optimum parametre değerleri

| Parametre | Sembol | Optimum değer |
|--------------------|--------|---------------|
| Viskoz Sürtünme | F_v | 0.00054 |
| Coulomb Sürtünme | F_c | 0.0007 |
| Kuru Sürtünme | F_s | 0.006 |
| Karnopp Sınır Hızı | DV | 0.04 |
| Atalet Momenti | I | 0.0027 |

**Şekil 4.3:** İlk tasarım için optimizasyon aracının grafiksel sonuçları

Bulunan optimum parametre değerleri için benzetim ortamında yapılan deneyde kıstasların değerleri $mse_A = 5.8208e-04$, $mse_V = 0.0179$, $e_{PM} = 1$, $e_{NM} = 2$, $e_{ZC} = 3$ olarak elde edilmiştir. Gerçek kayıt ile benzetim sonucunda elde edilen konum sinyalinin karşılaştırılması Şekil 4.4 de görülmektedir.



Şekil 4.4: Gerçek kayıt ile benzetim sonucunun karşılaştırılması

Şekil 4.4 incelendiğinde başlangıçtaki duruma göre ilerleme kaydedildiği görülmektedir. Daha iyi sonuçlar elde edebilmek için elde edilmiş olan optimum değerler orta seviye değeri olarak ele alınıp daha dar değer aralıkları ile yeni deney tasarımı oluşturulmuştur. İkinci tasarım için seçilen değer aralığı Tablo 4.4 de, deney tasarım matrisi ve deney sonuçları Tablo 4.5 de verilmiştir.

Tablo 4.4: İkinci tasarım için yeni parametre aralıkları

| Parametre | Sembol | Seviye | | |
|--------------------|--------|---------|---------|---------|
| | | Düşük | Orta | Yüksek |
| Viskoz Sürtünme | F_v | 0.00050 | 0.00054 | 0.00058 |
| Coulomb Sürtünme | F_c | 0.00066 | 0.00070 | 0.00074 |
| Kuru Sürtünme | F_s | 0.0020 | 0.0060 | 0.0100 |
| Karnopp Sınır Hızı | DV | 0.02 | 0.04 | 0.06 |
| Atalet Momenti | I | 0.00265 | 0.00270 | 0.00275 |

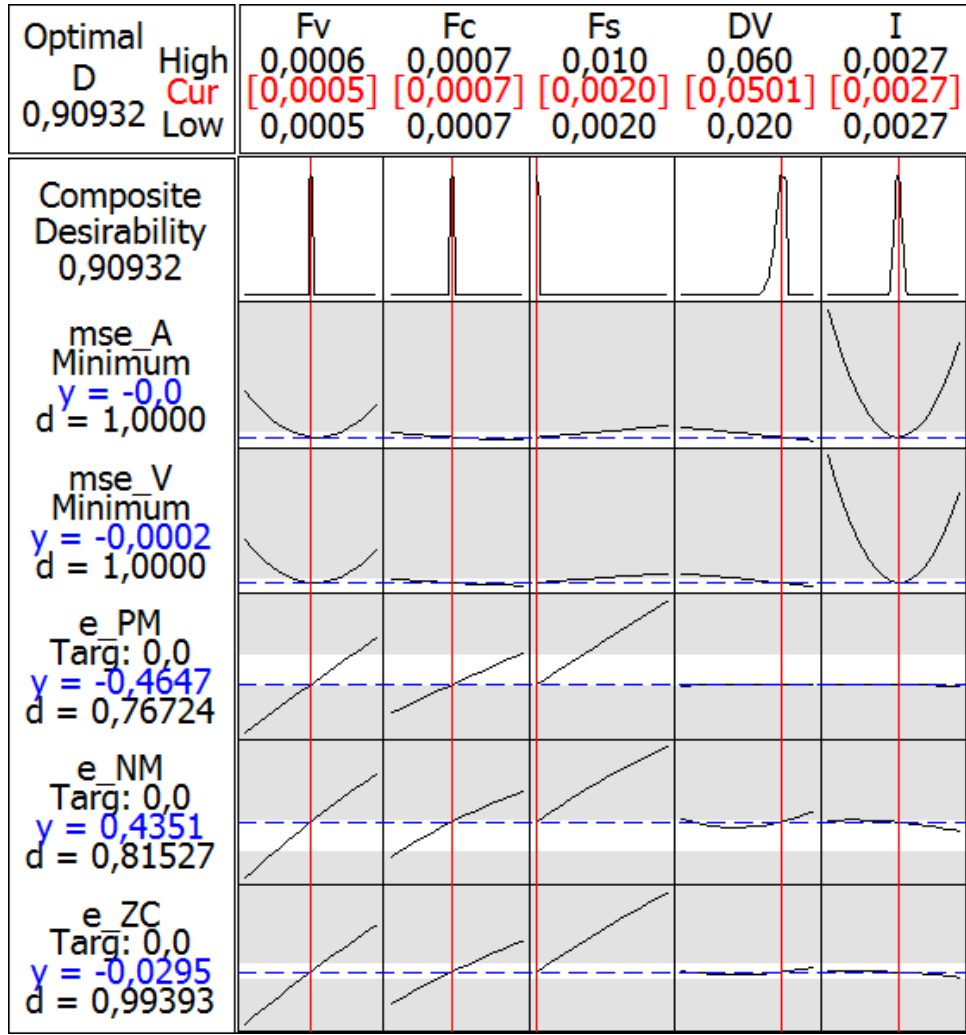
Tablo 4.5: İkinci tasarım için değerleri ve alınan sonuçları gösteren deney tasarım matrisi

| F_v | F_c | F_s | DV | I | mse_A | mse_V | e_{PM} | e_{NM} | e_{ZC} |
|---------|---------|-------|------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.00050 | 0.00066 | 0.002 | 0.02 | 0.00275 | 0.032038 | 1.082901 | -3 | -3 | -6 |
| 0.00058 | 0.00066 | 0.002 | 0.02 | 0.00265 | 0.025712 | 0.890945 | 0 | 1 | 1 |
| 0.00050 | 0.00074 | 0.002 | 0.02 | 0.00265 | 0.005415 | 0.188658 | -1 | 0 | -1 |
| 0.00058 | 0.00074 | 0.002 | 0.02 | 0.00275 | 0.001033 | 0.03477 | 2 | 3 | 5 |
| 0.00050 | 0.00066 | 0.010 | 0.02 | 0.00265 | 0.003484 | 0.115879 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00058 | 0.00066 | 0.010 | 0.02 | 0.00275 | 0.002126 | 0.062734 | 3 | 3 | 6 |
| 0.00050 | 0.00074 | 0.010 | 0.02 | 0.00275 | 0.020873 | 0.693653 | 2 | 2 | 4 |
| 0.00058 | 0.00074 | 0.010 | 0.02 | 0.00265 | 0.033605 | 1.153488 | 5 | 5 | 10 |
| 0.00050 | 0.00066 | 0.002 | 0.06 | 0.00265 | 0.003184 | 0.110504 | -3 | -2 | -5 |
| 0.00058 | 0.00066 | 0.002 | 0.06 | 0.00275 | 0.002083 | 0.069543 | 0 | 1 | 1 |
| 0.00050 | 0.00074 | 0.002 | 0.06 | 0.00275 | 0.021201 | 0.713407 | -1 | 0 | -1 |
| 0.00058 | 0.00074 | 0.002 | 0.06 | 0.00265 | 0.032645 | 1.132497 | 2 | 3 | 5 |
| 0.00050 | 0.00066 | 0.010 | 0.06 | 0.00275 | 0.027383 | 0.91897 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00058 | 0.00066 | 0.010 | 0.06 | 0.00265 | 0.030882 | 1.06174 | 3 | 4 | 7 |
| 0.00050 | 0.00074 | 0.010 | 0.06 | 0.00265 | 0.008063 | 0.274908 | 2 | 2 | 4 |
| 0.00058 | 0.00074 | 0.010 | 0.06 | 0.00275 | 0.000886 | 0.020742 | 4 | 5 | 9 |
| 0.00050 | 0.00070 | 0.006 | 0.04 | 0.00270 | 0.003003 | 0.098633 | -1 | 0 | -1 |
| 0.00058 | 0.00070 | 0.006 | 0.04 | 0.00270 | 0.006101 | 0.211344 | 3 | 3 | 6 |
| 0.00054 | 0.00066 | 0.006 | 0.04 | 0.00270 | 0.000337 | 0.00937 | 0 | 1 | 1 |
| 0.00054 | 0.00074 | 0.006 | 0.04 | 0.00270 | 0.001124 | 0.039248 | 2 | 2 | 4 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.002 | 0.04 | 0.00270 | 0.000363 | 0.013565 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.010 | 0.04 | 0.00270 | 0.000914 | 0.023961 | 2 | 3 | 5 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.006 | 0.02 | 0.00270 | 0.000481 | 0.014276 | 1 | 2 | 3 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.006 | 0.06 | 0.00270 | 0.000725 | 0.023164 | 1 | 2 | 3 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.006 | 0.04 | 0.00265 | 0.015536 | 0.537834 | 1 | 2 | 3 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.006 | 0.04 | 0.00275 | 0.007888 | 0.262603 | 1 | 1 | 2 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.006 | 0.04 | 0.00270 | 0.000582 | 0.017937 | 1 | 2 | 3 |

Kıstaslar için belirlenen 0 hedef değeri için Minitab ın optimizasyon modülü kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan optimum parametre değerleri Tablo 4.6 da verilmiştir. Optimizasyon aracının grafiksel sonuçları Şekil 4.5 de görülmektedir.

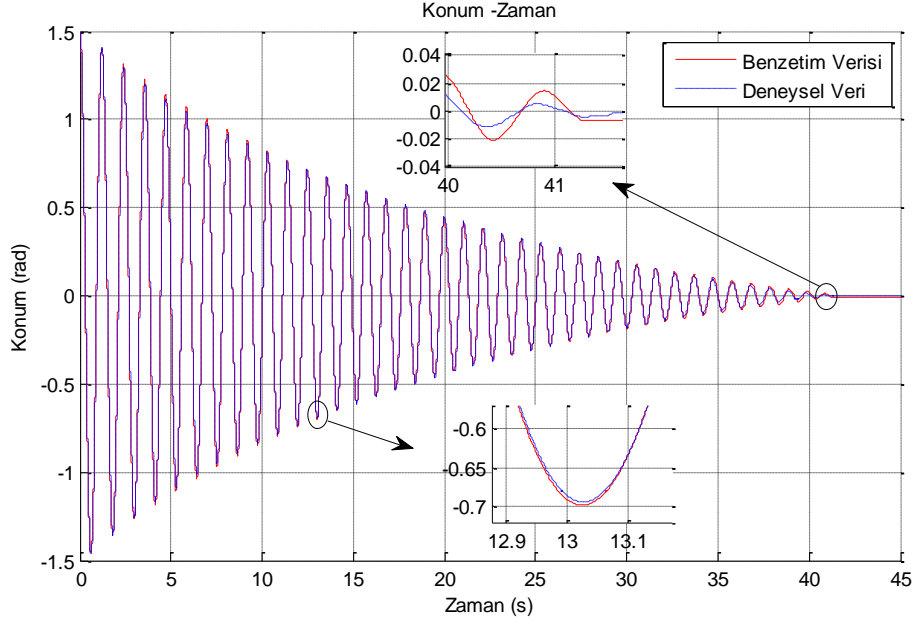
Tablo 4.6: İkinci tasarım için optimum parametre değerleri

| Parametre | Sembol | Optimum değer |
|--------------------|--------|----------------|
| Viskoz Sürtünme | F_v | 0.00054 |
| Coulomb Sürtünme | F_c | 0.000697042591 |
| Kuru Sürtünme | F_s | 0.002 |
| Karnopp Sınır Hızı | DV | 0.050142663751 |
| Atalet Momenti | I | 0.002703592627 |



Şekil 4.5: İkinci tasarım için optimizasyon aracının grafiksel sonuçları

Bulunan optimum parametre değerleri için benzetim ortamında yapılan deneyde kistasların değerleri $mse_A = 2.0995e-04$, $mse_V = 0.0079$, $e_{PM} = 0$, $e_{NM} = 0$, $e_{ZC} = 0$ olarak elde edilmiştir. Gerçek kayıt ile benzetim sonucunda elde edilen konum sinyalinin karşılaştırılması Şekil 4.6 de görülmektedir. Sonuçlara göre hesaplanan hatalar azalmıştır.



Şekil 4.6: İkinci tasarım için gerçek kayıt ile benzetim sonucunun karşılaştırılması

Şekil 4.6 incelendiğinde iki konum sinyalinin birbirine daha da yaklaştığı fakat hala daha zaman ekseninde küçük bir kayma olduğu görülmektedir. Bu nedenle hatayı azaltmak ve sinyalleri birbirlerine daha da yaklaştırabilmek için yeni deney tasarımı yapılması gerekmektedir. Hesaplanan optimum parametre değerleri orta değer seçilmiş ve uygun çözüm aralığı daha da daraltılmıştır. Yeni tasarım için parametre aralıkları Tablo 4.7 de, deney tasarım matrisi ve deney sonuçları Tablo 4.8 de verilmiştir.

Tablo 4.7: Üçüncü tasarım için yeni parametre aralıkları

| Parametre | Sembol | Seviye | | |
|--------------------|--------|---------|---------|---------|
| | | Düşük | Orta | Yüksek |
| Viskoz Sürtünme | F_v | 0.00052 | 0.00054 | 0.00056 |
| Coulomb Sürtünme | F_c | 0.00068 | 0.00070 | 0.00072 |
| Kuru Sürtünme | F_s | 0.0010 | 0.0015 | 0.0020 |
| Karnopp Sınır Hızı | DV | 0.045 | 0.050 | 0.055 |
| Atalet Momenti | I | 0.00268 | 0.00270 | 0.00272 |

Tablo 4.8: Üçüncü tasarım için gerçek değerleri ve alınan sonuçları gösteren deney tasarım matrisi

| F_v | F_c | F_s | DV | I | mse_A | mse_v | e_{PM} | e_{NM} | e_{ZC} |
|---------|---------|--------|-------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.00052 | 0.00068 | 0.0010 | 0.045 | 0.00272 | 0.005323 | 0.178887 | -2 | -1 | -3 |
| 0.00056 | 0.00068 | 0.0010 | 0.045 | 0.00268 | 0.006282 | 0.219974 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00052 | 0.00072 | 0.0010 | 0.045 | 0.00268 | 0.001221 | 0.043418 | -1 | 0 | -1 |
| 0.00056 | 0.00072 | 0.0010 | 0.045 | 0.00272 | 0.00029 | 0.01126 | 1 | 1 | 2 |
| 0.00052 | 0.00068 | 0.0020 | 0.045 | 0.00268 | 0.000791 | 0.027965 | -2 | -1 | -3 |
| 0.00056 | 0.00068 | 0.0020 | 0.045 | 0.00272 | 0.000201 | 0.007459 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00052 | 0.00072 | 0.0020 | 0.045 | 0.00272 | 0.00324 | 0.107903 | -1 | 0 | -1 |
| 0.00056 | 0.00072 | 0.0020 | 0.045 | 0.00268 | 0.008422 | 0.294349 | 1 | 2 | 3 |
| 0.00052 | 0.00068 | 0.0010 | 0.055 | 0.00268 | 0.000764 | 0.027009 | -2 | -1 | -3 |
| 0.00056 | 0.00068 | 0.0010 | 0.055 | 0.00272 | 0.000231 | 0.008513 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00052 | 0.00072 | 0.0010 | 0.055 | 0.00272 | 0.003362 | 0.11211 | -1 | 0 | -1 |
| 0.00056 | 0.00072 | 0.0010 | 0.055 | 0.00268 | 0.008207 | 0.287249 | 1 | 1 | 2 |
| 0.00052 | 0.00068 | 0.0020 | 0.055 | 0.00272 | 0.005033 | 0.168945 | -2 | -1 | -3 |
| 0.00056 | 0.00068 | 0.0020 | 0.055 | 0.00268 | 0.006582 | 0.230216 | 0 | 1 | 1 |
| 0.00052 | 0.00072 | 0.0020 | 0.055 | 0.00268 | 0.00133 | 0.047181 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00056 | 0.00072 | 0.0020 | 0.055 | 0.00272 | 0.000289 | 0.011291 | 1 | 1 | 2 |
| 0.00052 | 0.00070 | 0.0015 | 0.050 | 0.00270 | 0.000684 | 0.022663 | -1 | -1 | -2 |
| 0.00056 | 0.00070 | 0.0015 | 0.050 | 0.00270 | 0.002044 | 0.073151 | 0 | 1 | 1 |
| 0.00054 | 0.00068 | 0.0015 | 0.050 | 0.00270 | 0.000272 | 0.009973 | -1 | 0 | -1 |
| 0.00054 | 0.00072 | 0.0015 | 0.050 | 0.00270 | 0.000557 | 0.020501 | 0 | 1 | 1 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.0010 | 0.050 | 0.00270 | 0.000352 | 0.013214 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.0020 | 0.050 | 0.00270 | 0.000375 | 0.014015 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.0015 | 0.045 | 0.00270 | 0.000361 | 0.013486 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.0015 | 0.055 | 0.00270 | 0.000366 | 0.013665 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.0015 | 0.050 | 0.00268 | 0.00332 | 0.117046 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.0015 | 0.050 | 0.00272 | 0.001054 | 0.034939 | 0 | 0 | 0 |
| 0.00054 | 0.00070 | 0.0015 | 0.050 | 0.00270 | 0.000362 | 0.013542 | 0 | 0 | 0 |

YYY kullanılarak kıstasların matematik modeli 95% güven değeri ve 99.96%, 99.96%, 98.25%, 97.87%, 99.78% R^2 değerleri ile (4.1) – (4.5) eşitliklerindeki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
mse_A = & 22.528194 + 14033.1F_v + 2803.71F_c + 13.68F_s + 0.421228DV \\
& - 20193.53I + 2492169F_v^2 + 117904F_c^2 - 13.96F_s^2 - 0.151637DV^2 \\
& + 4549294.77I^2 + 1042163.91F_vF_c + 4750.3F_vF_s + 125.44F_vDV \\
& - 6458354.64F_vI + 1228.96F_cF_s + 1.42F_cDV - 1307208.23F_cI \\
& + 28.29F_sDV - 6833.08F_sI - 191.46DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
mse_v = & 770.69 + 480327.16F_v + 96913.75F_c + 466.7F_s + 14.34DV \\
& - 691038.47I + 85503755.07F_v^2 + 3827817.84F_c^2 - 364.78F_s^2 \\
& - 5.22DV^2 + 1557167198.56I^2 + 35965714.18F_vF_c + 160917.57F_vF_s \\
& + 4471.81F_vDV - 221177987.49F_vI + 40528.44F_cF_s + 313.96F_cDV \\
& - 45042303.76F_cI + 965.41F_sDV - 232698.92F_sI - 6624.14DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
e_{pm} = & 1524.88 + 754387.63F_v + 1766130.05F_c + 13099.75F_s \\
& + 1015.66DV - 1778061.87I - 909090909.09F_v^2 \\
& - 909090909.09F_c^2 + 545454.55F_s^2 + 545.55DV^2 + 340909090.91I^2 \\
& - 156250000F_vF_c - 6250000F_vF_s - 625000F_vDV + 156250000F_vI \\
& + 6250000F_cF_s - 625000F_cDV - 156250000F_cI + 25000F_sDV \\
& - 6250000F_sI - 625000DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.3}$$

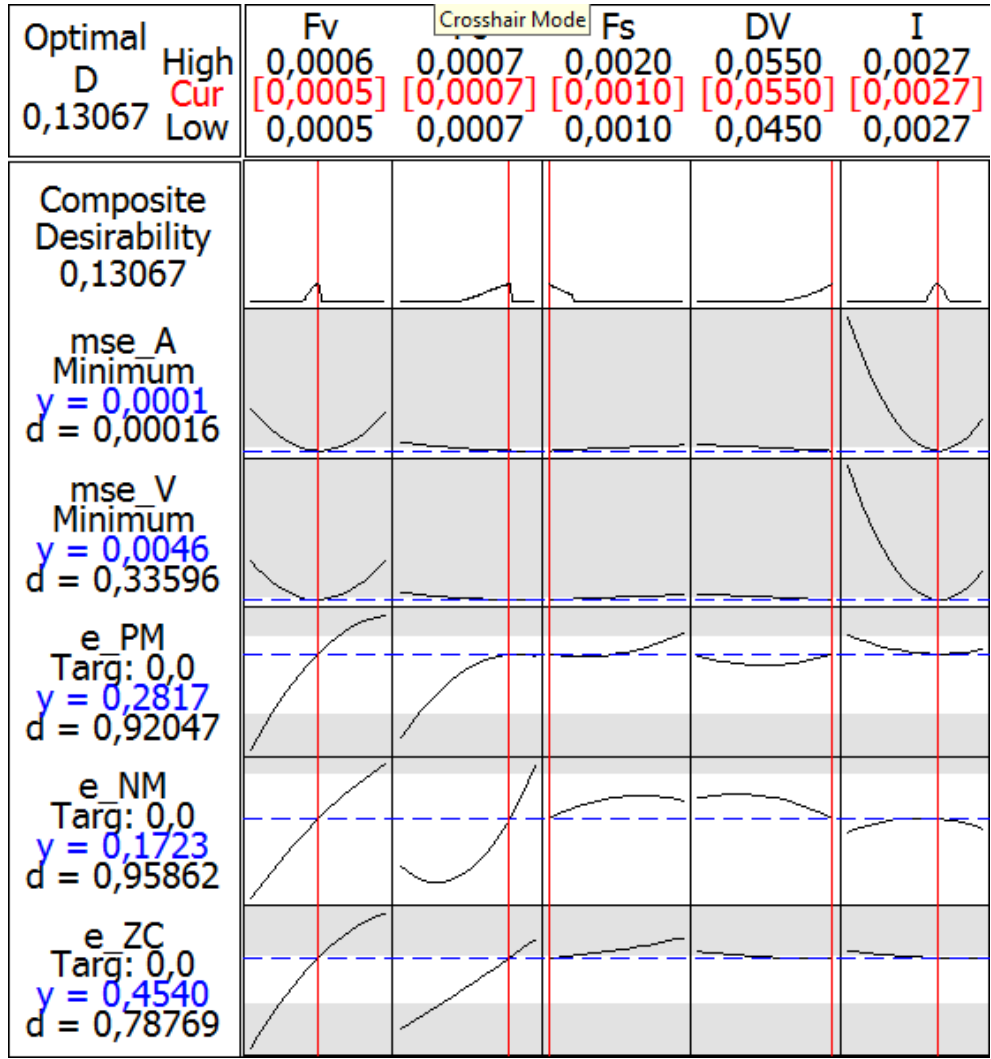
$$\begin{aligned}
e_{Nm} = & -1792.49 - 110378.88F_v - 1344318.18F_c + 28313.13F_s \\
& + 1238.64DV + 1409217.17I - 227272727.27F_v^2 \\
& + 102272727.73F_c^2 - 363636.36F_s^2 - 3636.36DV^2 - 227272727.27I^2 \\
& + 0.00000047F_vF_c + 12500000F_vF_s - 0.000000021F_vDV \\
& - 312500000F_vI + 0.000000894F_cF_s - 1250000F_cDV - 0.0000103F_cI \\
& - 0.0000000041F_sDV - 12500000F_sI + 0.0000000259DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.4}$$

$$\begin{aligned}
e_{zC} = & -267.61 + 1858175.51F_v + 421811.87F_c + 41412.88F_s \\
& + 2254.29DV - 368844.7I - 1136363636.36F_v^2 + 113636363.64F_c^2 \\
& + 181818.18F_s^2 + 1818.18DV^2 + 113636363.64I^2 - 156250000F_vF_c \\
& + 6250000F_vF_s - 625000F_vDV - 156250000F_vI + 6250000F_cF_s \\
& - 625000F_cDV - 156250000F_cI + 25000F_sDV - 18750000F_sI \\
& - 625000DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Kıstaslar için belirlenen 0 hedef değeri için Minitab in optimizasyon modülü kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan optimum parametre değerleri Tablo 4.9 da verilmiştir. Optimizasyon aracının grafiksel sonuçları Şekil 4.7 de görülmektedir.

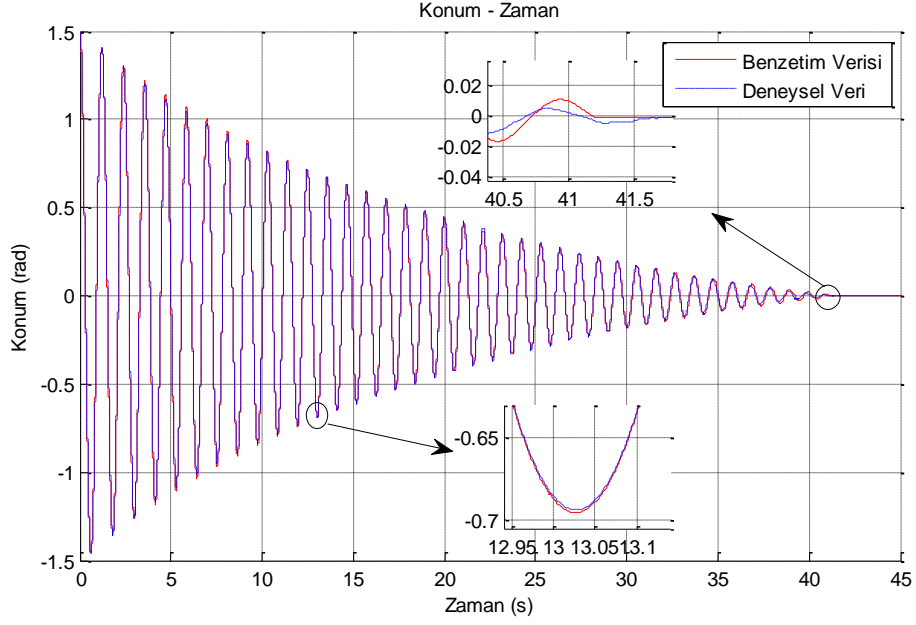
Tablo 4.9: Üçüncü tasarım için optimum parametre değerleri

| Parametre | Sembol | Optimum değer |
|--------------------|--------|----------------|
| Viskoz Sürtünme | F_v | 0.000540104134 |
| Coulomb Sürtünme | F_c | 0.000712350307 |
| Kuru Sürtünme | F_s | 0.001 |
| Karnopp Sınır Hızı | DV | 0.055 |
| Atalet Momenti | I | 0.002706768718 |



Şekil 4.7: Üçüncü tasarım için optimizasyon aracının grafiksel sonuçları

Optimum parametre değerleri için kısıtlar (4.1) – (4.5) eşitlikleri kullanılarak $mse_A = 1.164e-04$, $mse_V = 0.0046$, $e_{PM} = 0.2817$, $e_{NM} = 0.1723$, $e_{ZC} = 0.454$ olarak hesaplanmıştır. Optimum değerler için benzetim ortamında yapılan deneyden elde edilen sonuçlar matematiksel eşitliklerden elde edilen sonuçlardan daha iyi çıkmıştır. Gerçek kayıt ile benzetim sonucunda elde edilen konum sinyalinin karşılaştırılması Şekil 4.8 de görülmektedir. Sonuçlara göre hesaplanan hata değerleri düşürülmüştür ve istenilen hedef değerlere oldukça yaklaşmıştır.



Şekil 4.8: Üçüncü tasarım için gerçek kayıt ile benzetim sonucunun karşılaştırılması

(4.1) – (4.5) eşitlikleri kullanılarak hesaplanan kıstas değerleri ile benzetim ortamında yapılan deneylerden elde edilen kıstas değerleri Tablo 4.10 da verilmiştir. Ayrıca her kıstas için tahmin hatası da belirtilmiştir. Sonuçlara göre matematik model, benzetim sonuçlarından elde edilen kıstas değerlerine neredeyse mükemmel bir şekilde uyum sağlamıştır.

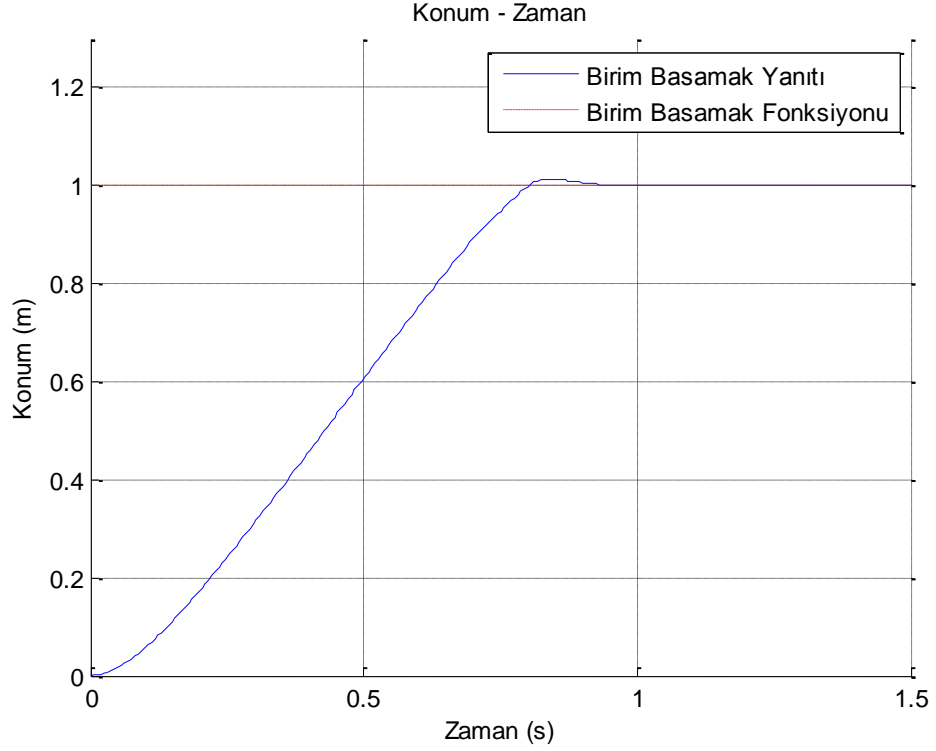
Tablo 4.10: (4.1) – (4.5) eşitlikleri kullanılarak hesaplanan kıstas değerleri ile benzetim ortamında yapılan deneylerden elde edilen kıstas değerleri

| Deney No | MSE_A | Tutturulmuş MSE_A | PE | MSE_V | Tutturulmuş MSE_V | PE | e _P M | Tutturulmuş e _{PM} | PE | e _N M | Tutturulmuş e _{NM} | PE | e _{ZC} | Tutturulmuş e _{ZC} | PE |
|----------|-----------------|-------------------|---------------|-----------------|-------------------|---------------|------------------|-----------------------------|---------------|------------------|-----------------------------|---------------|-----------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | 0.00532 2709 | 0.00528 7709 | 0.0000 350 | 0.17888 6513 | 0.17770 1665 | 0.0011 848 | -2 | 1.925505 051 | 0.0744 949 | - | 0.012626 263 | 0.0126 263 | -3 | 2.938131 313 | 0.0618 687 |
| 2 | 0.00628 2098 | 0.00630 1737 | 0.0000 196 | 0.21997 4488 | 0.22063 5030 | 0.0006 605 | 0 | 0.036616 162 | 0.0366 162 | 0 | 0.042929 293 | 0.0429 293 | 0 | 0.006313 131 | 0.0063 131 |
| 3 | 0.00122 0619 | 0.00123 5963 | 0.0000 153 | 0.04341 7848 | 0.04395 9260 | 0.0005 414 | -1 | 0.953282 828 | 0.0467 172 | 0 | 0.040404 040 | 0.0404 040 | -1 | 0.993686 869 | 0.0063 131 |
| 4 | 0.00028 9529 | 0.00029 0127 | 0.0000 006 | 0.01126 0184 | 0.01126 1982 | 0.0000 018 | 1 | 0.963383 838 | 0.0366 162 | 1 | 1.070707 071 | 0.0707 071 | 2 | 2.034090 909 | 0.0340 909 |
| 5 | 0.00079 0929 | 0.00079 0364 | 0.0000 006 | 0.02796 4976 | 0.02796 5905 | 0.0000 009 | -2 | 1.953282 828 | 0.0467 172 | -1 | 1.068181 818 | 0.0681 818 | -3 | 3.021464 646 | 0.0214 646 |
| 6 | 0.00020 0599 | 0.00018 5287 | 0.0000 153 | 0.00745 8601 | 0.00691 9917 | 0.0005 387 | 0 | 0.036616 162 | 0.0366 162 | 0 | 0.042929 293 | 0.0429 293 | 0 | 0.006313 131 | 0.0063 131 |
| 7 | 0.00324 0100 | 0.00322 0494 | 0.0000 196 | 0.10790 3490 | 0.10724 5675 | 0.0006 578 | -1 | 0.953282 828 | 0.0467 172 | 0 | 0.040404 040 | 0.0404 040 | -1 | 0.993686 869 | 0.0063 131 |
| 8 | 0.00842 1820 | 0.00845 6853 | 0.0000 350 | 0.29434 8952 | 0.29553 6528 | 0.0011 876 | 1 | 0.935606 061 | 0.0643 939 | 2 | 2.015151 515 | 0.0151 515 | 3 | 2.950757 576 | 0.0492 424 |
| 9 | 0.00076 4403 | 0.00076 4192 | 0.0000 002 | 0.02700 8751 | 0.02701 8219 | 0.0000 095 | -2 | 1.953282 828 | 0.0467 172 | -1 | 1.040404 040 | 0.0404 040 | -3 | 2.993686 869 | 0.0063 131 |
| 10 | 0.00023 0991 | 0.00021 6034 | 0.0000 150 | 0.00851 2698 | 0.00798 2553 | 0.0005 301 | 0 | 0.036616 162 | 0.0366 162 | 0 | 0.070707 071 | 0.0707 071 | 0 | 0.034090 909 | 0.0340 909 |
| 11 | 0.00336 1738 | 0.00334 2486 | 0.0000 193 | 0.11211 0012 | 0.11146 0735 | 0.0006 493 | -1 | 0.953282 828 | 0.0467 172 | 0 | 0.012626 263 | 0.0126 263 | -1 | 0.965909 091 | 0.0340 909 |
| 12 | 0.00820 6870 | 0.00824 2257 | 0.0000 354 | 0.28724 9192 | 0.28844 5306 | 0.0011 961 | 1 | 0.935606 061 | 0.0643 939 | 1 | 1.042929 293 | 0.0429 293 | 2 | 1.978535 354 | 0.0214 646 |
| 13 | 0.00503 2555 | 0.00499 7394 | 0.0000 352 | 0.16894 5419 | 0.16775 5660 | 0.0011 898 | -2 | 1.953282 828 | 0.0467 172 | -1 | 1.040404 040 | 0.0404 040 | -3 | 2.993686 869 | 0.0063 131 |
| 14 | 0.00658 2026 | 0.00660 1504 | 0.0000 195 | 0.23021 6430 | 0.23087 2062 | 0.0006 556 | 0 | 0.064393 939 | 0.0643 939 | 1 | 1.015151 515 | 0.0151 515 | 1 | 0.950757 576 | 0.0492 424 |
| 15 | 0.00133 0086 | 0.00134 5269 | 0.0000 152 | 0.04718 1084 | 0.04771 7585 | 0.0005 365 | 0 | 0.018939 394 | 0.0189 394 | 0 | 0.068181 818 | 0.0681 818 | 0 | 0.049242 424 | 0.0492 424 |
| 16 | 0.00028 9291 | 0.00028 9728 | 0.0000 004 | 0.01129 1235 | 0.01128 8122 | 0.0000 031 | 1 | 0.935606 061 | 0.0643 939 | 1 | 1.042929 293 | 0.0429 293 | 2 | 1.978535 354 | 0.0214 646 |
| 17 | 0.00068 4117 | 0.00076 3384 | 0.0000 793 | 0.02266 3479 | 0.02525 6867 | 0.0025 934 | -1 | 1.373737 374 | 0.3737 374 | -1 | 0.676767 677 | 0.3232 323 | -2 | 2.050505 051 | 0.0505 051 |
| 18 | 0.00204 3644 | 0.00196 3341 | 0.0000 803 | 0.07315 1188 | 0.07052 1467 | 0.0026 297 | 0 | 0.404040 404 | 0.4040 404 | 1 | 0.656565 657 | 0.3434 343 | 1 | 1.060606 061 | 0.0606 061 |
| 19 | 0.00027 1633 | 0.00033 3722 | 0.0000 621 | 0.00997 2916 | 0.01208 9781 | 0.0021 169 | -1 | 1.040404 040 | 0.0404 040 | 0 | 0.010101 010 | 0.0101 010 | -1 | 1.050505 051 | 0.0505 051 |
| 20 | 0.00055 6716 | 0.00049 3591 | 0.0000 631 | 0.02050 1001 | 0.01834 7804 | 0.0021 532 | 0 | 0.070707 071 | 0.0707 071 | 1 | 0.989898 990 | 0.0101 010 | 1 | 1.060606 061 | 0.0606 061 |
| 21 | 0.00035 1654 | 0.00035 0106 | 0.0000 015 | 0.01321 4242 | 0.01316 9177 | 0.0000 451 | 0 | 0.040404 040 | 0.0404 040 | 0 | 0.121212 121 | 0.1212 121 | 0 | 0.161616 162 | 0.1616 162 |
| 22 | 0.00037 5393 | 0.00037 5905 | 0.0000 005 | 0.01401 5033 | 0.01402 3765 | 0.0000 087 | 0 | 0.070707 071 | 0.0707 071 | 0 | 0.101010 101 | 0.1010 101 | 0 | 0.171717 172 | 0.1717 172 |
| 23 | 0.00036 0938 | 0.00036 0808 | 0.0000 001 | 0.01348 6033 | 0.01347 5122 | 0.0000 109 | 0 | 0.040404 040 | 0.0404 040 | 0 | 0.010101 010 | 0.0101 010 | 0 | 0.050505 051 | 0.0505 051 |
| 24 | 0.00036 5505 | 0.00036 4599 | 0.0000 009 | 0.01366 4829 | 0.01363 9407 | 0.0000 254 | 0 | 0.070707 071 | 0.0707 071 | 0 | 0.010101 010 | 0.0101 010 | 0 | 0.060606 061 | 0.0606 061 |
| 25 | 0.00331 9806 | 0.00318 0517 | 0.0001 393 | 0.11704 5877 | 0.11225 7702 | 0.0047 882 | 0 | 0.070707 071 | 0.0707 071 | 0 | 0.101010 101 | 0.1010 101 | 0 | 0.171717 172 | 0.1717 172 |
| 26 | 0.00105 3656 | 0.00119 1907 | 0.0001 383 | 0.03493 9160 | 0.03969 1003 | 0.0047 518 | 0 | 0.040404 040 | 0.0404 040 | 0 | 0.121212 121 | 0.1212 121 | 0 | 0.161616 162 | 0.1616 162 |
| 27 | 0.00036 2349 | 0.00036 6495 | 0.0000 041 | 0.01354 2336 | 0.01368 7665 | 0.0001 453 | 0 | 0.121212 121 | 0.1212 121 | 0 | 0.080808 081 | 0.0808 081 | 0 | 0.040404 040 | 0.0404 040 |

4.2 Arabanın Karnopp Sürtünme Parametrelerinin Belirlenmesi

Ters sarkaç mekanizmasının arabasının sürtünme parametrelerini belirleyebilmek için sarkaç kısmında olduğu gibi doğal davranışını kaydederek bunun üzerinden işlem yapmak mümkün değildir. Bu yüzden arabanın konumunun kontrol edilmesi için $K_p=300$ değerine sahip bir OK sistemi tasarlanmış ve kontrol sisteminin birim basamak sinyaline verdiği tepki (birim basamak yanıtı) kaydedilmiştir. Bu işlem esnasında sarkaç kısmının, arabanın kontrol işlemi sırasında sergileyeceği davranışı etkilememesi için sarkaç 180 derece açıda sabitlenmiştir. Aynı kontrol işlemi arabanın bilgisayar benzetimine de uygulanarak alınan birim basamak yanıtı YYY kullanılarak gerçek arabanın birim basamak yanıtına uygun hale getirilmeye çalışılmıştır. Bu işlemde girdi olarak Karnopp sürtünme parametrelerinin yanı sıra motorun atalet momenti de ele alınmıştır. Araba kayış kasnak sistemini ve motoru da ihtiva etmektedir ve motorun atalet momentinin içine kasnak atalet momenti de dâhil edilmiştir. Sarkaç kısmında olduğu gibi motor atalet momentinin de imalat ve hesaplama hatalarından dolayı yeniden ayarlanması gerekmektedir.

YYY ile optimize edilmeye çalışılan parametrelerin (Karnopp sürtünme parametreleri ve motor atalet momenti) uygunluğunu ifade eden kıstasların ve parametrelerin başlangıç değer aralıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Birim basamak yanıtının temel özellikleri olan Kalıcı Durum Hatası - ess , Yükselme Zamanı - t_r , Oturma Zamanı - t_s , Oturma Maksimumu - S_{max} , Oturma Minimumu - S_{min} , Yüzelik Maksimum Taşma - PO , Maksimum Değer - P ve Maksimum Değer Zamanı - t_p parametrelerin uygunluğunu ifade eden kıstaslar olarak belirlenmiştir. Gerçek arabanın birim basamak yanıtı Şekil 4.9 de görülmektedir. Uygunluk için kıstas olarak belirlenen gerçek arabanın birim basamak yanıtının özelliklerinin aldığı değerler Tablo 4.11 de verilmiştir.



Şekil 4.9: Gerçek arabanın birim basamak yanıtı

Tablo 4.11: Uyumluluk kriterlerinin hedef değerleri

| | | |
|-----------|-------------------------|-------------|
| ess | Kalıcı Durum Hatası | -0.002809 m |
| t_r | Yükselme Zamanı | 0.568560 s |
| t_s | Oturma Zamanı | 0.753733 s |
| S_{max} | Oturma Maksimumu | 0.906984 m |
| S_{min} | Oturma Minimumu | 1.014338 m |
| PO | Yüzdelik Maksimum Taşma | 1.149671 |
| P | Maksimum Değer | 1.014338 m |
| t_p | Maksimum Değer Zamanı | 0.836950 s |

Motorun atalet momentinin (J_m) başlangıç değer aralığı katalogdan okunan değer civarında seçilmiştir. Karnopp sürtünme parametreleri (F_v , F_c , F_s , DV) için ise sezgisel olarak rastgele değerler ile benzetim ortamında deneyler yapılmış ve buradan elde edilen sonuçlara göre başlangıç değer aralıkları belirlenmiştir. Benzetim sonuçlarının gerçek sonuçlara uydurulabilmesi için merkezi karma, yüzey merkezli 27 deney benzetim ortamında gerçekleştirilmiş ve sonuçları Tablo 4.13 de verilmiştir. Tasarımda kullanılan başlangıç değer aralıkları Tablo 4.12 de verilmiştir.

Tablo 4.12: Parametrelerin başlangıç değer aralıkları

| Parametre | Sembol | Seviye | | |
|--------------------|--------|----------|----------|----------|
| | | Düşük | Orta | Yüksek |
| Viskoz Sürtünme | F_v | 7 | 9 | 11 |
| Coulomb Sürtünme | F_c | 14 | 17 | 20 |
| Kuru Sürtünme | F_s | 17 | 20 | 23 |
| Karnopp Sınır Hızı | DV | 0.003 | 0.006 | 0.009 |
| Atalet Momenti | J_m | 1.50e-04 | 2.50e-04 | 3.50e-04 |

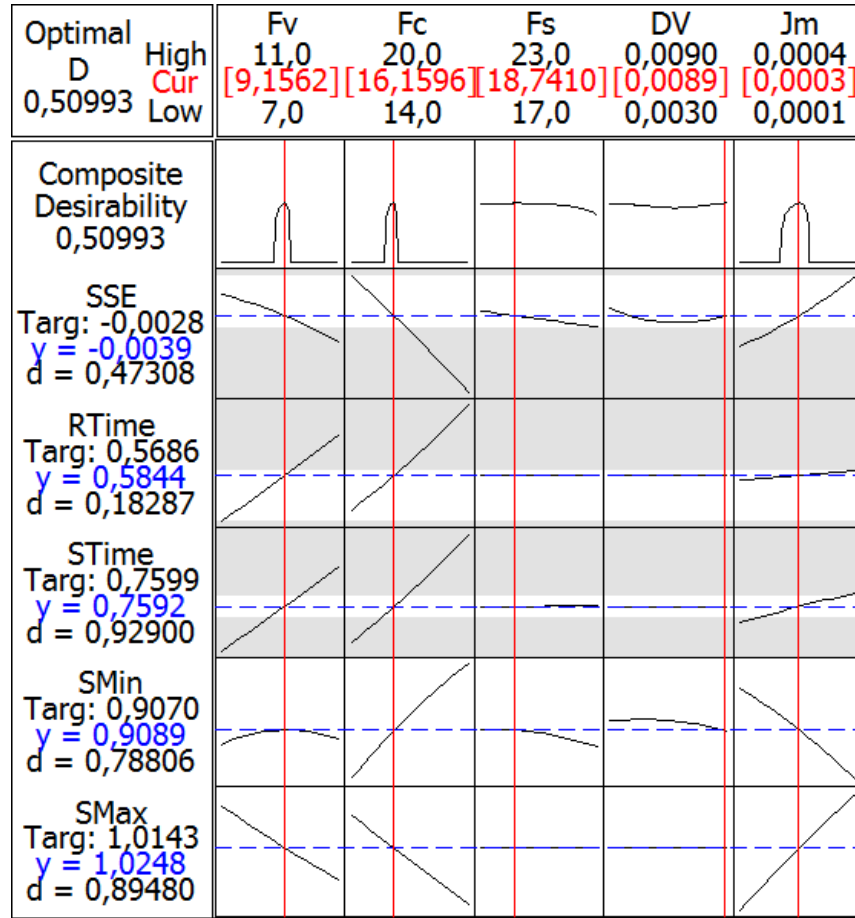
Tablo 4.13: İlk deney tasarım matrisi ve çıktıları

| Fv | Fc | Fs | DV | Jm | ess | t _r | t _s | S _{min} | S _{max} | PO | P | t _p |
|----|----|----|-------|---------|----------|----------------|----------------|------------------|------------------|------|------|----------------|
| 7 | 14 | 17 | 0.003 | 0.00035 | 0.00578 | 0.526 | 0.69 | 0.89 | 1.03 | 4.47 | 1.03 | 0.79 |
| | | | | | | 86 | 973 | 696 | 875 | 838 | 875 | 355 |
| | | | | | | 0.584 | 0.74 | 0.90 | 1.01 | 1.29 | 1.01 | 0.81 |
| 11 | 14 | 17 | 0.003 | 0.00015 | -0.00531 | 54 | 735 | 727 | 836 | 811 | 836 | 835 |
| | | | | | | 0.596 | 0.76 | 0.91 | 1.01 | 0.48 | 1.01 | 0.83 |
| 7 | 20 | 17 | 0.003 | 0.00015 | -0.01178 | 59 | 609 | 374 | 672 | 794 | 672 | 075 |
| | | | | | | 0.679 | 0.87 | 0.91 | 1.02 | 1.29 | 1.02 | 0.96 |
| 11 | 20 | 17 | 0.003 | 0.00035 | -0.00782 | 03 | 932 | 365 | 083 | 101 | 083 | 714 |
| | | | | | | 0.517 | 0.67 | 0.90 | 1.02 | 2.39 | 1.02 | 0.74 |
| 7 | 14 | 23 | 0.003 | 0.00015 | -0.00160 | 30 | 166 | 910 | 555 | 034 | 555 | 396 |
| | | | | | | 0.591 | 0.77 | 0.90 | 1.03 | 3.00 | 1.03 | 0.86 |
| 11 | 14 | 23 | 0.003 | 0.00035 | 0.00000 | 20 | 391 | 839 | 009 | 947 | 009 | 175 |
| | | | | | | 0.605 | 0.79 | 0.90 | 1.02 | 2.25 | 1.02 | 0.88 |
| 7 | 20 | 23 | 0.003 | 0.00035 | -0.00573 | 12 | 617 | 926 | 844 | 747 | 844 | 035 |
| | | | | | | 0.672 | 0.85 | 0.91 | 1.01 | 0.00 | 1.01 | 0.92 |
| 11 | 20 | 23 | 0.003 | 0.00015 | -0.01057 | 30 | 299 | 060 | 062 | 429 | 062 | 374 |
| | | | | | | 0.517 | 0.67 | 0.91 | 1.02 | 2.32 | 1.02 | 0.74 |
| 7 | 14 | 17 | 0.009 | 0.00015 | -0.00217 | 58 | 121 | 036 | 551 | 856 | 551 | 396 |
| | | | | | | 0.591 | 0.77 | 0.90 | 1.03 | 3.01 | 1.03 | 0.86 |
| 11 | 14 | 17 | 0.009 | 0.00035 | 0.00000 | 20 | 311 | 089 | 011 | 081 | 011 | 175 |
| | | | | | | 0.605 | 0.79 | 0.91 | 1.02 | 2.25 | 1.02 | 0.88 |
| 7 | 20 | 17 | 0.009 | 0.00035 | -0.00576 | 13 | 528 | 051 | 841 | 245 | 841 | 035 |
| | | | | | | 0.672 | 0.85 | 0.91 | 1.01 | 0.01 | 1.01 | 0.92 |
| 11 | 20 | 17 | 0.009 | 0.00015 | -0.01044 | 20 | 197 | 171 | 062 | 839 | 062 | 374 |
| | | | | | | 0.527 | 0.70 | 0.89 | 1.03 | 4.44 | 1.03 | 0.79 |
| 7 | 14 | 23 | 0.009 | 0.00035 | 0.00542 | 04 | 075 | 571 | 877 | 261 | 877 | 355 |
| | | | | | | 0.585 | 0.74 | 0.90 | 1.01 | 1.21 | 1.01 | 0.82 |
| 11 | 14 | 23 | 0.009 | 0.00015 | -0.00620 | 04 | 875 | 616 | 841 | 359 | 841 | 455 |
| | | | | | | 0.596 | 0.76 | 0.91 | 1.01 | 0.44 | 1.01 | 0.83 |
| 7 | 20 | 23 | 0.009 | 0.00015 | -0.01216 | 81 | 727 | 248 | 668 | 660 | 668 | 695 |
| | | | | | | 0.680 | 0.88 | 0.91 | 1.02 | 1.03 | 1.02 | 0.96 |
| 11 | 20 | 23 | 0.009 | 0.00035 | -0.01044 | 73 | 229 | 254 | 088 | 296 | 088 | 714 |
| | | | | | | 0.558 | 0.73 | 0.90 | 1.02 | 2.37 | 1.02 | 0.81 |
| 7 | 17 | 20 | 0.006 | 0.00025 | -0.00385 | 51 | 048 | 951 | 764 | 018 | 764 | 215 |
| | | | | | | 0.629 | 0.81 | 0.91 | 1.02 | 1.22 | 1.02 | 0.89 |
| 11 | 17 | 20 | 0.006 | 0.00025 | -0.00793 | 47 | 123 | 037 | 026 | 354 | 026 | 275 |
| | | | | | | 0.554 | 0.72 | 0.90 | 1.02 | 2.74 | 1.02 | 0.80 |
| 9 | 14 | 20 | 0.006 | 0.00025 | -0.00074 | 42 | 307 | 829 | 826 | 984 | 826 | 595 |
| | | | | | | 0.638 | 0.82 | 0.91 | 1.01 | 0.84 | 1.01 | 0.89 |
| 9 | 20 | 20 | 0.006 | 0.00025 | -0.01071 | 58 | 461 | 221 | 922 | 265 | 922 | 895 |
| | | | | | | 0.593 | 0.76 | 0.91 | 1.02 | 1.84 | 1.02 | 0.84 |
| 9 | 17 | 17 | 0.006 | 0.00025 | -0.00519 | 25 | 956 | 097 | 374 | 543 | 374 | 935 |
| | | | | | | 0.593 | 0.77 | 0.90 | 1.02 | 1.77 | 1.02 | 0.84 |
| 9 | 17 | 23 | 0.006 | 0.00025 | -0.00586 | 64 | 087 | 980 | 374 | 771 | 374 | 935 |
| | | | | | | 0.592 | 0.76 | 0.91 | 1.02 | 2.04 | 1.02 | 0.84 |
| 9 | 17 | 20 | 0.003 | 0.00025 | -0.00324 | 15 | 864 | 038 | 374 | 387 | 374 | 935 |
| | | | | | | 0.593 | 0.77 | 0.91 | 1.02 | 1.74 | 1.02 | 0.84 |
| 9 | 17 | 20 | 0.009 | 0.00025 | -0.00621 | 84 | 069 | 038 | 374 | 204 | 374 | 935 |
| | | | | | | 0.589 | 0.75 | 0.91 | 1.01 | 0.98 | 1.01 | 0.82 |
| 9 | 17 | 20 | 0.006 | 0.00015 | -0.00763 | 72 | 604 | 485 | 760 | 928 | 760 | 455 |
| | | | | | | 0.597 | 0.78 | 0.90 | 1.02 | 2.66 | 1.02 | 0.87 |
| 9 | 17 | 20 | 0.006 | 0.00035 | -0.00261 | 62 | 383 | 594 | 928 | 028 | 928 | 415 |
| | | | | | | 0.593 | 0.77 | 0.91 | 1.02 | 1.74 | 1.02 | 0.84 |
| 9 | 17 | 20 | 0.006 | 0.00025 | -0.00621 | 84 | 069 | 038 | 374 | 204 | 374 | 935 |

Tablo 4.13 de verilen sonuçlara göre YYY ne göre ess , t_r , t_s , S_{max} , S_{min} , PO , P ve t_p kistasları için matematik model 95% lik bir güven değeri ile oluşturulmuştur. Kistasların Tablo 4.11 de verilen hedef değerleri için Minitab in optimizasyon modülü kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan optimum parametre değerleri Tablo 4.14 de verilmiştir. Optimizasyon aracının grafiksel sonuçları Şekil 4.10 da görülmektedir.

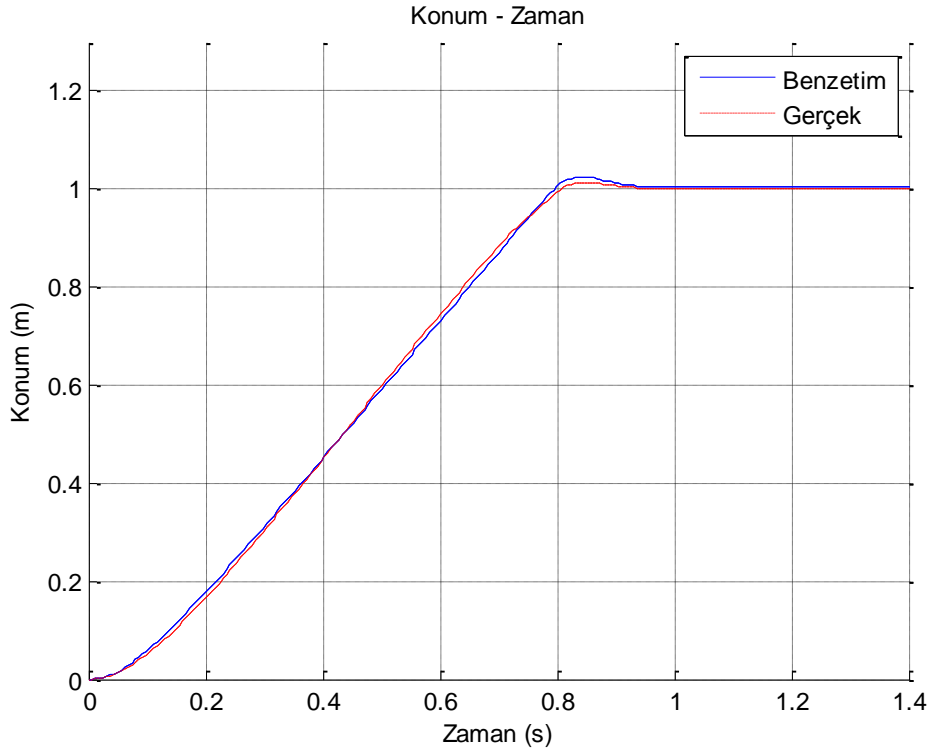
Tablo 4.14: İlk tasarımda elde edilen optimum değerler

| Parametre | Sembol | Optimum değer |
|--------------------|--------|----------------|
| Viskoz Sürtünme | F_v | 0.000540104134 |
| Coulomb Sürtünme | F_c | 0.000712350307 |
| Kuru Sürtünme | F_s | 0.001 |
| Karnopp Sınır Hızı | DV | 0.055 |
| Atalet Momenti | J_m | 0.002706768718 |



Şekil 4.10: İlk tasarım için optimizasyon aracının çıktıları

Hesaplanan optimum parametre değerleri için yapılan benzetim deneyinde kistasların değerleri $e_{ss}=-0.004425627$, $t_r=0.584825651$, $t_s=0.759608489$, $S_{min}=0.906190364$, $S_{max}=1.024814285$, $PO=2.02988227$, $P=1.02481428$, $t_p=0.83694978$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.11 de optimum değerler için elde edilen konum bilgisi ile gerçek arabanın konum bilgisi karşılaştırılmaktadır.



Şekil 4.11: İlk tasarım için benzetim ile gerçek sistemin karşılaştırılması

Şekil 4.11 incelendiğinde benzetimsel arabanın davranışının gerçek arabanın davranışına çok yaklaştığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar bir tasarım daha yapılarak daha da iyileştirebilir. Bunun için hesaplanan optimum değerler orta değerler olarak seçilerek daha dar değer aralıkları için bir deney tasarımı daha YYY kullanılarak yapılmıştır. İkinci tasarım için seçilen parametrelerinin değer aralıkları Tablo 4.15 de, deney tasarım matrisi ve deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.16 da verilmiştir.

Tablo 4.15: İkinci tasarımın parametre aralıkları

| Parametre | Sembol | Seviye | | |
|--------------------|--------|----------|----------|----------|
| | | Düşük | Orta | Yüksek |
| Viskoz Sürtünme | F_v | 8.15 | 9.15 | 10.15 |
| Coulomb Sürtünme | F_c | 15.15 | 16.15 | 17.15 |
| Kuru Sürtünme | F_s | 17.7 | 18.7 | 19.7 |
| Karnopp Sınır Hızı | DV | 0.008 | 0.01 | 0.012 |
| Atalet Momenti | J_m | 2.00e-04 | 2.50e-04 | 3.00e-04 |

Tablo 4.16: İkinci deney tasarım matrisi ve çıktıları

| Fv | Fc | Fs | DV | Jm | ess | t _r | t _s | S _{min} | S _{max} | PO | P | t _p |
|-------|-------|------|-------|---------|----------|----------------|----------------|------------------|------------------|-------|-------|----------------|
| | | | | | | 0.55 | 0.730 | 0.905 | 1.031 | 3.108 | 1.031 | 0.818 |
| 8.15 | 15.15 | 17.7 | 0.008 | 0.00030 | -0.00014 | 674 | 85 | 28 | 23 | 74 | 23 | 35 |
| | | | | | | 0.58 | 0.756 | 0.912 | 1.021 | 1.564 | 1.021 | 0.830 |
| 10.15 | 15.15 | 17.7 | 0.008 | 0.00020 | -0.00564 | 692 | 07 | 67 | 38 | 81 | 38 | 75 |
| | | | | | | 0.57 | 0.748 | 0.914 | 1.022 | 1.482 | 1.022 | 0.824 |
| 8.15 | 17.15 | 17.7 | 0.008 | 0.00020 | -0.00718 | 895 | 76 | 92 | 11 | 26 | 11 | 55 |
| | | | | | | 0.61 | 0.802 | 0.910 | 1.024 | 1.845 | 1.024 | 0.886 |
| 10.15 | 17.15 | 17.7 | 0.008 | 0.00030 | -0.00566 | 794 | 48 | 55 | 22 | 23 | 22 | 55 |
| | | | | | | 0.55 | 0.717 | 0.910 | 1.025 | 2.176 | 1.025 | 0.793 |
| 8.15 | 15.15 | 19.7 | 0.008 | 0.00020 | -0.00321 | 239 | 05 | 28 | 05 | 51 | 05 | 55 |
| | | | | | | 0.59 | 0.769 | 0.908 | 1.027 | 2.471 | 1.027 | 0.855 |
| 10.15 | 15.15 | 19.7 | 0.008 | 0.00030 | -0.00249 | 022 | 26 | 57 | 26 | 12 | 26 | 55 |
| | | | | | | 0.58 | 0.762 | 0.909 | 1.027 | 2.441 | 1.027 | 0.843 |
| 8.15 | 17.15 | 19.7 | 0.008 | 0.00030 | -0.00343 | 265 | 58 | 35 | 94 | 93 | 94 | 15 |
| | | | | | | 0.61 | 0.789 | 0.913 | 1.018 | 0.968 | 1.018 | 0.861 |
| 10.15 | 17.15 | 19.7 | 0.008 | 0.00020 | -0.00877 | 488 | 91 | 74 | 54 | 14 | 54 | 75 |
| | | | | | | 0.55 | 0.717 | 0.910 | 1.025 | 2.113 | 1.025 | 0.793 |
| 8.15 | 15.15 | 17.7 | 0.012 | 0.00020 | -0.00385 | 272 | 18 | 69 | 06 | 19 | 06 | 55 |
| | | | | | | 0.59 | 0.769 | 0.908 | 1.027 | 2.456 | 1.027 | 0.855 |
| 10.15 | 15.15 | 17.7 | 0.012 | 0.00030 | -0.00262 | 029 | 08 | 95 | 24 | 00 | 24 | 55 |
| | | | | | | 0.58 | 0.762 | 0.909 | 1.027 | 2.410 | 1.027 | 0.843 |
| 8.15 | 17.15 | 17.7 | 0.012 | 0.00030 | -0.00376 | 283 | 52 | 75 | 95 | 61 | 95 | 15 |
| | | | | | | 0.61 | 0.789 | 0.914 | 1.018 | 0.971 | 1.018 | 0.861 |
| 10.15 | 17.15 | 17.7 | 0.012 | 0.00020 | -0.00875 | 487 | 61 | 11 | 56 | 98 | 56 | 75 |
| | | | | | | 0.55 | 0.731 | 0.904 | 1.031 | 3.110 | 1.031 | 0.818 |
| 8.15 | 15.15 | 19.7 | 0.012 | 0.00030 | -0.00014 | 674 | 13 | 88 | 25 | 48 | 25 | 35 |
| | | | | | | 0.58 | 0.756 | 0.912 | 1.021 | 1.560 | 1.021 | 0.830 |
| 10.15 | 15.15 | 19.7 | 0.012 | 0.00020 | -0.00566 | 693 | 35 | 29 | 36 | 42 | 36 | 75 |
| | | | | | | 0.57 | 0.749 | 0.914 | 1.022 | 1.484 | 1.022 | 0.824 |
| 8.15 | 17.15 | 19.7 | 0.012 | 0.00020 | -0.00718 | 895 | 05 | 52 | 14 | 61 | 14 | 55 |
| | | | | | | 0.61 | 0.803 | 0.910 | 1.024 | 1.802 | 1.024 | 0.886 |
| 10.15 | 17.15 | 19.7 | 0.012 | 0.00030 | -0.00610 | 820 | 08 | 18 | 24 | 80 | 24 | 55 |
| | | | | | | 0.56 | 0.739 | 0.905 | 1.026 | 2.304 | 1.026 | 0.818 |
| 8.15 | 16.15 | 18.7 | 0.010 | 0.00025 | -0.00356 | 730 | 50 | 97 | 69 | 14 | 69 | 35 |
| | | | | | | 0.60 | 0.778 | 0.907 | 1.022 | 1.753 | 1.022 | 0.861 |
| 10.15 | 16.15 | 18.7 | 0.010 | 0.00025 | -0.00531 | 188 | 82 | 64 | 94 | 62 | 94 | 75 |
| | | | | | | 0.57 | 0.743 | 0.909 | 1.026 | 2.296 | 1.026 | 0.824 |
| 9.15 | 15.15 | 18.7 | 0.010 | 0.00025 | -0.00320 | 154 | 43 | 35 | 24 | 54 | 24 | 55 |
| | | | | | | 0.59 | 0.776 | 0.912 | 1.023 | 1.651 | 1.023 | 0.855 |
| 9.15 | 17.15 | 18.7 | 0.010 | 0.00025 | -0.00662 | 861 | 09 | 24 | 24 | 10 | 24 | 55 |
| | | | | | | 0.58 | 0.759 | 0.907 | 1.024 | 1.992 | 1.024 | 0.836 |
| 9.15 | 16.15 | 17.7 | 0.010 | 0.00025 | -0.00472 | 467 | 13 | 13 | 74 | 41 | 74 | 95 |
| | | | | | | 0.58 | 0.759 | 0.906 | 1.024 | 1.990 | 1.024 | 0.836 |
| 9.15 | 16.15 | 19.7 | 0.010 | 0.00025 | -0.00474 | 468 | 42 | 74 | 74 | 89 | 74 | 95 |
| | | | | | | 0.58 | 0.759 | 0.906 | 1.024 | 1.991 | 1.024 | 0.836 |
| 9.15 | 16.15 | 18.7 | 0.008 | 0.00025 | -0.00473 | 467 | 27 | 94 | 74 | 65 | 74 | 95 |
| | | | | | | 0.58 | 0.759 | 0.906 | 1.024 | 1.991 | 1.024 | 0.836 |
| 9.15 | 16.15 | 18.7 | 0.012 | 0.00025 | -0.00473 | 467 | 27 | 94 | 74 | 65 | 74 | 95 |
| | | | | | | 0.58 | 0.752 | 0.909 | 1.021 | 1.506 | 1.021 | 0.830 |
| 9.15 | 16.15 | 18.7 | 0.010 | 0.00020 | -0.00647 | 305 | 67 | 15 | 64 | 83 | 64 | 75 |
| | | | | | | 0.58 | 0.765 | 0.904 | 1.027 | 2.460 | 1.027 | 0.849 |
| 9.15 | 16.15 | 18.7 | 0.010 | 0.00030 | -0.00300 | 652 | 87 | 73 | 68 | 28 | 68 | 35 |
| | | | | | | 0.58 | 0.759 | 0.906 | 1.024 | 1.991 | 1.024 | 0.836 |
| 9.15 | 16.15 | 18.7 | 0.010 | 0.00025 | -0.00473 | 467 | 27 | 94 | 74 | 65 | 74 | 95 |

YYY kullanılarak kıstasların matematik modeli 95% güven değeri ve 99.92%, 100%, 100%, 99.99%, 100%, 99.98%, 100%, 99.83% R^2 değerleri ile (4.6) – (4.13) eşitliklerindeki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
ess &= -0.037239339 - 0.005587062F_v + 0.004684095F_c + 0.002489563F_s \\
&+ 0.391488022DV + 73.9147142I + 0.000284982F_v^2 - 0.000189791F_c^2 \\
&- 0.0000105396F_s^2 - 2.634905722DV^2 - 5305.232649I^2 \\
&+ 0.000083765F_vF_c - 0.0000809807F_vF_s + 0.0123764F_vDV \\
&- 2.484135689F_vI - 0.0000545759F_cF_s + 0.001784729F_cDV \\
&- 0.049349575F_cI - 0.025907776F_sDV - 0.722487092F_sI \\
&- 156.75181DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.6}$$

$$\begin{aligned}
t_r &= 0.375500625 + 0.012108737F_v - 0.003886112F_c - 0.001473588F_s \\
&- 0.30524571DV + 58.14117899I - 0.000077066F_v^2 + 0.000412431F_c^2 \\
&+ 0.00000781276F_s^2 + 1.966271546DV^2 + 48210.65107I^2 \\
&+ 0.000421509F_vF_c + 0.0000446844F_vF_s - 0.005819712F_vDV \\
&- 3.610800459F_vI + 0.0000302091F_cF_s - 0.000123724F_cDV \\
&- 1.336975864F_cI + 0.017016312F_sDV + 0.396456666F_sI \\
&+ 105.3992242DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.7}$$

$$\begin{aligned}
t_s &= 0.489723899 + 0.013913417F_v - 0.00471525F_c - 0.001619429F_s \\
&- 0.313642851DV + 163.7800626I - 0.0000992535F_v^2 \\
&+ 0.000496193F_c^2 + 0.00000792632F_s^2 + 1.98157735DV^2 \\
&+ 3403.294155I^2 + 0.000477049F_vF_c + 0.0000543309F_vF_s \\
&- 0.007085996F_vDV - 3.864903336F_vI + 0.0000399083F_cF_s \\
&- 0.0000959149F_cDV - 0.42464554F_cI + 0.018002355F_sDV \\
&+ 0.481510655F_sI + 130.0586593DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.8}$$

$$\begin{aligned}
S_{\min} &= 1.806413801 + 0.012327583F_v - 0.116987897F_c \\
&- 0.000245597F_s + 0.075906003DV - 136.3203412I \\
&- 0.000129314F_v^2 + 0.003859779F_c^2 + 0.000000988818F_s^2 \\
&+ 0.247204564DV^2 + 1401.179198I^2 - 0.000706218F_vF_c \\
&+ 0.00000615377F_vF_s - 0.00000101072F_vDV + 8.220931476F_vI \\
&- 0.00000000290354F_cF_s - 0.000002755F_cDV + 0.978909895F_cI \\
&- 0.004320832F_sDV + 0.000223209F_sI + 0.014459679DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.9}$$

$$\begin{aligned}
S_{\max} &= 1.054751987 - 0.003573029F_v - 0.001520128F_c \\
&- 0.0000662164F_s - 0.193393268DV + 108.2959603I \\
&+ 0.0000689984F_v^2 - 0.00000298551F_c^2 - 0.00000111301F_s^2 \\
&- 0.278252604DV^2 - 35168.75599I^2 + 0.0000479573F_vF_c \\
&- 0.00000166044F_vF_s - 0.002548365F_vDV - 1.115027404F_vI \\
&+ 0.000000125306F_cF_s + 0.002377858F_cDV - 1.424635374F_cI \\
&+ 0.009970654F_sDV + 0.085661481F_sI - 1.249735881DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.10}$$

$$\begin{aligned}
PO &= 1.849427268 - 0.935748871F_v + 0.305451731F_c \\
&+ 0.245698996F_s + 19.01295801DV + 18698.00029I \\
&+ 0.036039049F_v^2 - 0.019018965F_c^2 - 0.001188437F_s^2 \\
&- 297.1105738DV^2 - 3712668.672I^2 + 0.01408204F_vF_c \\
&- 0.008390907F_vF_s + 1.01386049F_vDV - 381.7528118F_vI \\
&- 0.005525099F_cF_s + 0.422829429F_cDV - 172.2885104F_cI \\
&- 1.567075993F_sDV - 64.59063533F_sI - 16005.40671DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.11}$$

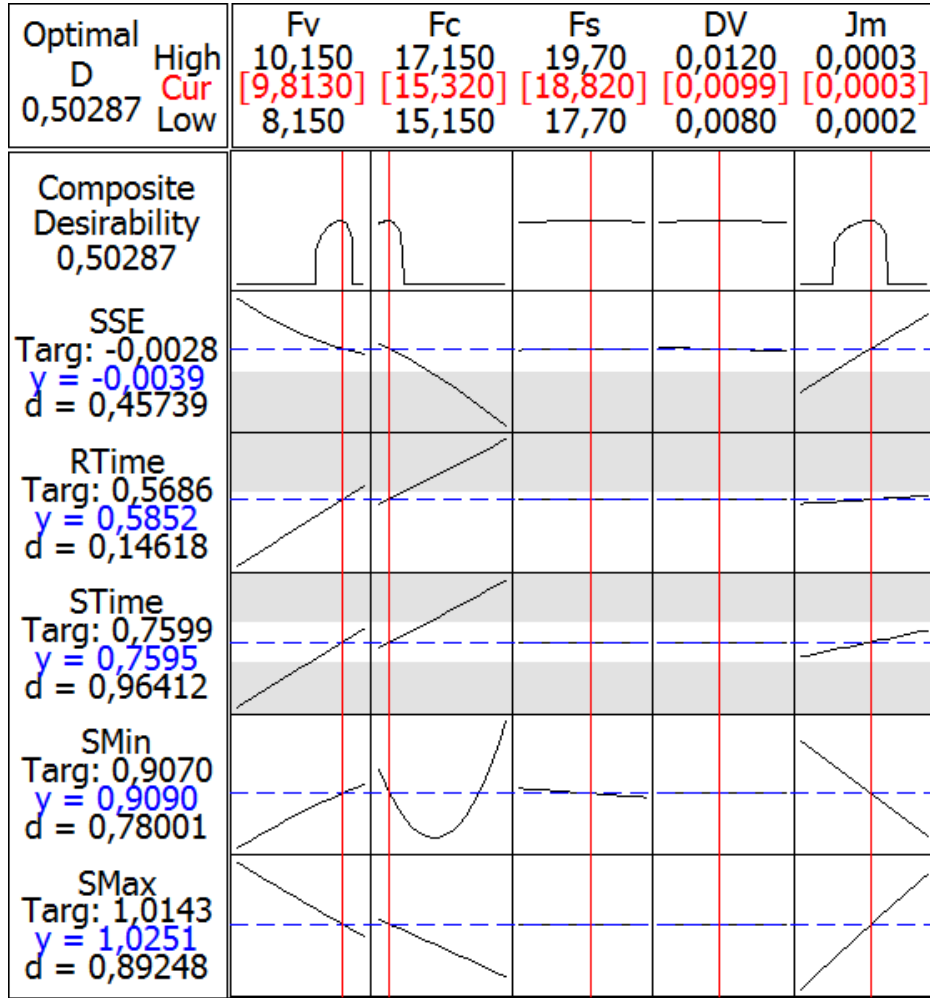
$$\begin{aligned}
P &= 1.054751987 - 0.003573029F_v - 0.001520128F_c \\
&- 0.0000662164F_s - 0.193393268DV + 108.2959603I \\
&+ 0.0000689984F_v^2 - 0.00000298551F_c^2 - 0.00000111301F_s^2 \\
&- 0.278252604DV^2 - 35168.75599I^2 + 0.0000479573F_vF_c \\
&- 0.00000166044F_vF_s - 0.002548365F_vDV - 1.115027404F_vI \\
&+ 0.000000125306F_cF_s + 0.002377858F_cDV - 1.424635374F_cI \\
&+ 0.009970654F_sDV + 0.085661481F_sI - 1.249735881DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.12}$$

$$\begin{aligned}
t_p &= 0.409817624 - 0.022542928F_v - 0.03391674F_c + 0.059361438F_s \\
&+ 1.208222961DV + 54.0119108I + 0.001409006F_v^2 + 0.001409006F_c^2 \\
&- 0.001690808F_s^2 - 422.7019106DV^2 + 563602.5475I^2 \\
&+ 0.000774954F_vF_c - 4.85485e-18F_vF_s + 1.14147e-15F_vDV \\
&+ 15.49907006F_vI - 5.51375e-18F_cF_s - 2.60954e-15F_cDV \\
&- 15.49907006F_cI + 0.387476751F_sDV + 4.69505e-14F_sI \\
&- 7.23376e-11DV \cdot I
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Minitab in optimizasyon modülü kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan optimum parametre değerleri Tablo 4.17 de verilmiştir. Optimizasyon aracının grafiksel sonuçları Şekil 4.12 de verilmiştir.

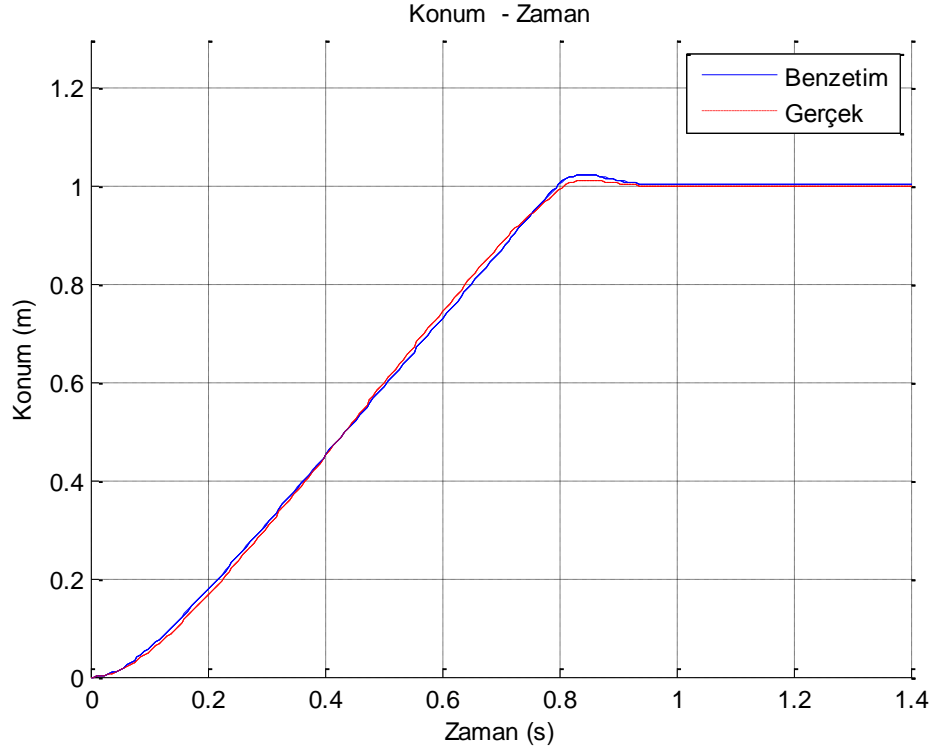
Tablo 4.17: İkinci tasarımda elde edilen optimum değerler

| Parametre | Sembol | Optimum değer |
|--------------------|--------|---------------|
| Viskoz Sürtünme | F_v | 9.813 |
| Coulomb Sürtünme | F_c | 15.32 |
| Kuru Sürtünme | F_s | 18.82 |
| Karnopp Sınır Hızı | DV | 0.00989 |
| Atalet Momenti | J_m | 2.55e-04 |

**Şekil 4.12:** İkinci tasarım için optimizasyon aracının çıktıları

Optimum parametre değerleri için kistasların aldığı değerler Denklem (4.6) – Denklem (4.13) kullanılarak $ess = -0.003924812$, $t_r = 0.58518616$, $t_s = 0.759566808$, $S_{min} = 0.905858387$, $S_{max} = 1.02508693$, $PO = 2.10793857$, $P = 1.02508693$, $t_p = 0.84314941$ olarak hesaplanmıştır. Optimum değerler için benzetim ortamında yapılan deneyden elde edilen sonuçlar matematiksel eşitliklerden elde edilen sonuçlardan daha iyi çıkmıştır. Gerçek kayıt ile benzetim

sonucunda elde edilen konum sinyalinin karşılaştırılması Şekil 4.13 de görülmektedir. Sonuçlara göre hesaplanan hata değerleri düşürülmüştür ve istenilen hedef değerlere oldukça yaklaşmıştır.



Şekil 4.13: İkinci tasarım için benzetim ile gerçek sistemin karşılaştırılması

(4.6) – (4.13) eşitlikleri kullanılarak hesaplanan kıstas değerleri ile benzetim ortamında yapılan deneylerden elde edilen kıstas değerleri Tablo 4.18 de verilmiştir. Ayrıca her kıstas için tahmin hatası da belirtilmiştir. Sonuçlara göre matematik model, benzetim sonuçlarından elde edilen kıstas değerlerine neredeyse mükemmel bir şekilde uyum sağlamıştır.

Tablo 4.18: (4.6) – (4.13) eşitlikleri kullanılarak hesaplanan kıstas değerleri ile benzetim ortamında yapılan deneylerden elde edilen kıstas değerleri

| E x p - N o | Tutt urul muş ess | | PE | | Tutt urul muş t _r | | PE | | Tutt urul muş t _s | | PE | | Tutt urul muş S _{mi} | | PE | | Tutt urul muş S _{ax} | | PE | | Tutt urul muş PO | | PE | | Tutt urul muş P | | PE | | |
|----------------------------|----------------------------|-----|-----|----------------|---------------------------------------|-----|----------------|----------------|---------------------------------------|-----------------|------------------|-----|--|------------------|-----|--------|--|-----|------|----|---------------------------|------|----|-----|--------------------------|----|-----|------|----|
| | ess | ess | PE | t _r | t _r | PE | t _s | t _s | PE | S _{mi} | S _{min} | PE | S _{ax} | S _{max} | PE | PO | PO | PE | P | P | PE | tP | tP | PE | P | P | PE | tP | tP |
| 1 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 00 | 0.00 | 00 | 56 | 0.55 | 00 | 30 | 0.73 | 00 | 05 | 0.90 | 00 | 31 | 1.03 | 00 | 08 | 3.10 | 00 | 31 | 1.03 | 00 | 31 | 1.03 | 00 | 31 | 1.03 | 00 | 18 | 0.81 | 00 |
| 14 | 015 | 01 | 74 | 675 | 00 | 85 | 086 | 01 | 28 | 528 | 01 | 23 | 124 | 01 | 74 | 844 | 29 | 23 | 124 | 01 | 35 | 777 | 58 | - | - | - | - | - | |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 05 | 0.00 | 00 | 86 | 0.58 | 00 | 56 | 0.75 | 00 | 12 | 0.91 | 00 | 22 | 1.02 | 00 | 64 | 1.56 | 00 | 21 | 1.02 | 00 | 30 | 0.83 | 00 | 30 | 0.83 | 00 | 30 | 0.83 | 00 |
| 64 | 564 | 00 | 92 | 692 | 00 | 07 | 606 | 00 | 67 | 268 | 01 | 38 | 137 | 01 | 81 | 425 | 56 | 38 | 137 | 01 | 75 | 120 | 45 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 07 | 0.00 | 00 | 78 | 0.57 | 00 | 48 | 0.74 | 00 | 14 | 0.91 | 00 | 22 | 1.02 | 00 | 82 | 1.47 | 04 | 22 | 1.02 | 00 | 24 | 0.82 | 00 | 24 | 0.82 | 00 | 24 | 0.82 | 00 |
| 18 | 722 | 04 | 95 | 898 | 03 | 76 | 879 | 03 | 92 | 490 | 02 | 11 | 210 | 01 | 26 | 763 | 63 | 11 | 210 | 01 | 55 | 466 | 11 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 0.0 | - | 0.0 | 0.6 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 05 | 0.00 | 00 | 17 | 0.61 | 00 | 02 | 0.80 | 00 | 10 | 0.91 | 00 | 24 | 1.02 | 00 | 45 | 1.84 | 03 | 24 | 1.02 | 00 | 86 | 0.88 | 00 | 86 | 0.88 | 00 | 86 | 0.88 | 00 |
| 66 | 564 | 03 | 94 | 793 | 02 | 48 | 246 | 02 | 55 | 057 | 01 | 22 | 423 | 01 | 23 | 874 | 51 | 22 | 423 | 01 | 55 | 666 | 11 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 5 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.7 | - |
| 03 | 0.00 | 00 | 52 | 0.55 | 00 | 17 | 0.71 | 00 | 10 | 0.91 | 00 | 25 | 1.02 | 00 | 76 | 2.17 | 05 | 25 | 1.02 | 00 | 93 | 0.79 | 00 | 93 | 0.79 | 00 | 93 | 0.79 | 00 |
| 21 | 326 | 05 | 39 | 241 | 03 | 05 | 708 | 03 | 28 | 027 | 01 | 05 | 504 | 01 | 51 | 096 | 54 | 05 | 504 | 01 | 55 | 349 | 06 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 02 | 0.00 | 00 | 90 | 0.59 | 00 | 69 | 0.76 | 00 | 08 | 0.90 | 00 | 27 | 1.02 | 00 | 71 | 2.47 | 02 | 27 | 1.02 | 00 | 55 | 0.85 | 00 | 55 | 0.85 | 00 | 55 | 0.85 | 00 |
| 49 | 247 | 02 | 22 | 021 | 01 | 26 | 924 | 02 | 57 | 859 | 02 | 26 | 727 | 01 | 12 | 372 | 60 | 26 | 727 | 01 | 55 | 549 | 06 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 03 | 0.00 | 00 | 82 | 0.58 | 00 | 62 | 0.76 | 00 | 09 | 0.90 | 00 | 27 | 1.02 | 00 | 41 | 2.44 | 01 | 27 | 1.02 | 00 | 43 | 0.84 | 00 | 43 | 0.84 | 00 | 43 | 0.84 | 00 |
| 43 | 346 | 02 | 65 | 266 | 01 | 58 | 260 | 02 | 35 | 933 | 01 | 94 | 795 | 01 | 93 | 046 | 48 | 94 | 795 | 01 | 15 | 274 | 41 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 8 | 0.0 | - | 0.0 | 0.6 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 08 | 0.00 | 00 | 14 | 0.61 | 00 | 89 | 0.78 | 00 | 13 | 0.91 | 00 | 18 | 1.01 | 00 | 68 | 0.96 | 01 | 18 | 1.01 | 00 | 61 | 0.86 | 00 | 61 | 0.86 | 00 | 61 | 0.86 | 00 |
| 77 | 878 | 01 | 88 | 489 | 01 | 91 | 992 | 01 | 74 | 374 | 01 | 54 | 853 | 01 | 14 | 641 | 74 | 54 | 853 | 01 | 75 | 237 | 63 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 9 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.7 | - |
| 03 | 0.00 | 00 | 52 | 0.55 | 00 | 17 | 0.71 | 00 | 10 | 0.91 | 00 | 25 | 1.02 | 00 | 13 | 2.11 | 02 | 25 | 1.02 | 00 | 93 | 0.79 | 00 | 93 | 0.79 | 00 | 93 | 0.79 | 00 |
| 85 | 386 | 01 | 72 | 273 | 01 | 18 | 720 | 01 | 69 | 067 | 01 | 06 | 505 | 01 | 19 | 076 | 43 | 06 | 505 | 01 | 55 | 349 | 06 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 10 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 02 | 0.00 | 00 | 90 | 0.59 | 00 | 69 | 0.76 | 00 | 08 | 0.90 | 00 | 27 | 1.02 | 00 | 56 | 2.46 | 05 | 27 | 1.02 | 00 | 55 | 0.85 | 00 | 55 | 0.85 | 00 | 55 | 0.85 | 00 |
| 62 | 257 | 05 | 29 | 026 | 03 | 08 | 904 | 04 | 95 | 897 | 02 | 24 | 725 | 01 | 00 | 171 | 71 | 24 | 725 | 01 | 55 | 549 | 06 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 03 | 0.00 | 00 | 82 | 0.58 | 00 | 62 | 0.76 | 00 | 09 | 0.90 | 00 | 27 | 1.02 | 00 | 10 | 2.41 | 01 | 27 | 1.02 | 00 | 43 | 0.84 | 00 | 43 | 0.84 | 00 | 43 | 0.84 | 00 |
| 76 | 375 | 01 | 83 | 282 | 00 | 52 | 251 | 00 | 75 | 974 | 01 | 95 | 796 | 01 | 61 | 225 | 64 | 95 | 796 | 01 | 15 | 274 | 41 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 12 | 0.0 | - | 0.0 | 0.6 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 08 | 0.00 | 00 | 14 | 0.61 | 00 | 89 | 0.78 | 00 | 14 | 0.91 | 00 | 18 | 1.01 | 00 | 71 | 0.97 | 01 | 18 | 1.01 | 00 | 61 | 0.86 | 00 | 61 | 0.86 | 00 | 61 | 0.86 | 00 |
| 75 | 873 | 02 | 87 | 486 | 01 | 61 | 960 | 01 | 11 | 412 | 01 | 56 | 855 | 01 | 98 | 336 | 37 | 56 | 855 | 01 | 75 | 237 | 63 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 13 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 00 | 0.00 | 00 | 56 | 0.55 | 00 | 31 | 0.73 | 00 | 04 | 0.90 | 00 | 31 | 1.03 | 00 | 10 | 3.11 | 00 | 31 | 1.03 | 00 | 18 | 0.81 | 00 | 18 | 0.81 | 00 | 18 | 0.81 | 00 |
| 14 | 014 | 00 | 74 | 674 | 00 | 13 | 113 | 00 | 88 | 487 | 01 | 25 | 126 | 01 | 48 | 120 | 72 | 25 | 126 | 01 | 35 | 777 | 58 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 05 | 0.00 | 00 | 86 | 0.58 | 00 | 56 | 0.75 | 00 | 12 | 0.91 | 00 | 21 | 1.02 | 00 | 60 | 1.56 | 00 | 21 | 1.02 | 00 | 30 | 0.83 | 00 | 30 | 0.83 | 00 | 30 | 0.83 | 00 |
| 66 | 565 | 01 | 93 | 692 | 01 | 35 | 634 | 01 | 29 | 231 | 01 | 36 | 135 | 01 | 42 | 088 | 46 | 36 | 135 | 01 | 75 | 120 | 45 | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 15 | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | 0.8 | - |
| 07 | 0.00 | 00 | 78 | 0.57 | 00 | 49 | 0.74 | 00 | 14 | 0.91 | 00 | 22 | 1.02 | 00 | 84 | 1.48</ | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|
| - | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 2.2 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 | | | |
| 1 | 03 | 0.00 | 00 | 71 | 0.57 | 00 | 43 | 0.74 | 00 | 09 | 0.90 | 00 | 26 | 1.02 | 00 | 96 | 2.29 | 00 | 26 | 1.02 | 00 | 24 | 0.82 | 00 |
| 9 | 20 | 322 | 01 | 54 | 156 | 01 | 43 | 344 | 01 | 35 | 933 | 02 | 24 | 625 | 01 | 54 | 586 | 68 | 24 | 625 | 01 | 55 | 505 | 50 |
| - | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.6 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 |
| 2 | 06 | 0.00 | 00 | 98 | 0.59 | 00 | 76 | 0.77 | 00 | 12 | 0.91 | 00 | 23 | 1.02 | 00 | 51 | 1.65 | 00 | 23 | 1.02 | 00 | 55 | 0.85 | 00 |
| 0 | 62 | 661 | 01 | 61 | 860 | 01 | 09 | 608 | 01 | 24 | 226 | 02 | 24 | 323 | 01 | 10 | 151 | 41 | 24 | 323 | 01 | 55 | 467 | 88 |
| - | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 |
| 2 | 04 | 0.00 | 00 | 84 | 0.58 | 00 | 59 | 0.75 | 00 | 07 | 0.90 | 00 | 24 | 1.02 | 00 | 92 | 1.98 | 04 | 24 | 1.02 | 00 | 36 | 0.83 | 00 |
| 1 | 72 | 477 | 04 | 67 | 469 | 02 | 13 | 915 | 03 | 13 | 713 | 00 | 74 | 474 | 00 | 41 | 809 | 32 | 74 | 474 | 00 | 95 | 676 | 19 |
| - | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 |
| 2 | 04 | 0.00 | 00 | 84 | 0.58 | 00 | 59 | 0.75 | 00 | 06 | 0.90 | 00 | 24 | 1.02 | 00 | 90 | 1.99 | 04 | 24 | 1.02 | 00 | 36 | 0.83 | 00 |
| 2 | 74 | 470 | 04 | 68 | 466 | 02 | 42 | 939 | 02 | 74 | 674 | 00 | 74 | 474 | 00 | 89 | 494 | 06 | 74 | 474 | 00 | 95 | 676 | 19 |
| - | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 |
| 2 | 04 | 0.00 | 00 | 84 | 0.58 | 00 | 59 | 0.75 | 00 | 06 | 0.90 | 00 | 24 | 1.02 | 00 | 91 | 1.99 | 08 | 24 | 1.02 | 00 | 36 | 0.83 | 00 |
| 3 | 73 | 465 | 08 | 67 | 463 | 05 | 27 | 921 | 06 | 94 | 694 | 00 | 74 | 474 | 00 | 65 | 978 | 13 | 74 | 474 | 00 | 95 | 676 | 19 |
| - | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 |
| 2 | 04 | 0.00 | 00 | 84 | 0.58 | 00 | 59 | 0.75 | 00 | 06 | 0.90 | 00 | 24 | 1.02 | 00 | 91 | 1.98 | 08 | 24 | 1.02 | 00 | 36 | 0.83 | 00 |
| 4 | 73 | 482 | 09 | 67 | 472 | 05 | 27 | 933 | 06 | 94 | 694 | 00 | 74 | 475 | 00 | 65 | 326 | 39 | 74 | 475 | 00 | 95 | 676 | 19 |
| - | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.5 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 |
| 2 | 06 | 0.00 | 00 | 83 | 0.58 | 00 | 52 | 0.75 | 00 | 09 | 0.90 | 00 | 21 | 1.02 | 00 | 06 | 1.52 | 16 | 21 | 1.02 | 00 | 30 | 0.82 | 02 |
| 5 | 47 | 637 | 10 | 05 | 298 | 07 | 67 | 259 | 08 | 15 | 917 | 02 | 64 | 170 | 07 | 83 | 351 | 68 | 64 | 170 | 07 | 75 | 850 | 25 |
| - | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 2.4 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 |
| 2 | 03 | 0.00 | 00 | 86 | 0.58 | 00 | 65 | 0.76 | 00 | 04 | 0.90 | 00 | 27 | 1.02 | 00 | 60 | 2.44 | 16 | 27 | 1.02 | 00 | 49 | 0.85 | 01 |
| 6 | 00 | 310 | 10 | 52 | 659 | 07 | 87 | 595 | 08 | 73 | 471 | 02 | 68 | 761 | 07 | 28 | 334 | 94 | 68 | 761 | 07 | 35 | 123 | 88 |
| - | 0.0 | - | 0.0 | 0.5 | - | 0.0 | 0.7 | - | 0.0 | 0.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 1.9 | - | 0.0 | 1.0 | - | 0.0 | 0.8 | - | 0.0 |
| 2 | 04 | 0.00 | 00 | 84 | 0.58 | 00 | 59 | 0.75 | 00 | 06 | 0.90 | 00 | 24 | 1.02 | 00 | 91 | 1.99 | 01 | 24 | 1.02 | 00 | 36 | 0.83 | 01 |
| 7 | 73 | 472 | 01 | 67 | 467 | 01 | 27 | 926 | 01 | 94 | 693 | 00 | 74 | 474 | 00 | 65 | 271 | 06 | 74 | 474 | 00 | 95 | 845 | 50 |

4.3 Oransal Kontrol Kazanç Değerlerinin Belirlenmesi

Ters sarkaç mekanizmasının benzetim ortamında kontrol edilebilmesi için tam geri beslemeli (full feedback) oransal kontrol sistemi tasarlanmıştır. Kontrol sisteminin motora gönderilen kontrol çıkış sinyali $u(t)$ (3.6) eşitliğinden yola çıkılarak (4.15) eşitliğindeki gibi elde edilir. Ters sarkacın açısının sıfır da tutulması amaçlandığından $r(t)=0$ olarak yazılabilir. Sistem tam geri beslemeli olduğu için çıkış sinyali (4.16) eşitliğindeki gibidir. Buna bağlı olarak kazanç matrisi de (4.17) eşitliğindeki gibidir.

$$u(t) = \mathbf{K}_p \cdot [\mathbf{r}(t) - \mathbf{y}(t)] \quad (4.14)$$

$$u(t) = -\mathbf{K}_p \mathbf{y}(t) \quad (4.15)$$

$$\mathbf{y}(t) = [x \quad \theta \quad \dot{x} \quad \dot{\theta}]^T \quad (4.16)$$

$$\mathbf{K}_p = [K_1 \quad K_2 \quad K_3 \quad K_4] \quad (4.17)$$

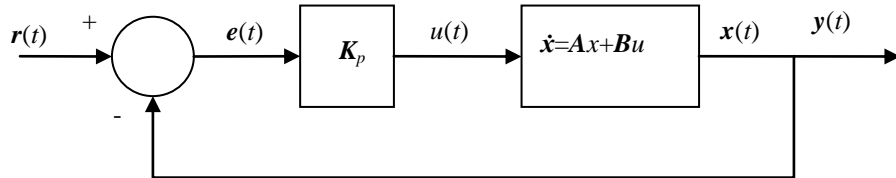
Kontrol sisteminin kazanç değerlerinin belirlenebilmesi için YYY metodu kullanılmıştır. Bu değerlerin uygunluğunu kontrol edebilmek için kıstas olarak ters sarkacın konumlarının ortalama değerleri (x_{ort} , θ_{ort}) ile bu konumların en yüksek ve en küçük değerleri arasındaki farklar (x_{p-p} , θ_{p-p}) belirlenmiştir. Bu kıstasların hedef değerleri hepsi için 0 dır. Parametrelerin (K_1 , K_2 , K_3 , K_4) başlangıç değer aralıklarını belirleyebilmek için ters sarkacın doğrusallaştırılmış matematik modeli üzerinde Root-Locus analizi uygulanmıştır. Doğrusallaştırma işleminde küçük açı değerleri için (4.18) eşitliğinde verilen kabuller kullanılmıştır. Doğrusallaştırılmış matematik model (4.19) ve (4.20) eşitliklerindeki gibi yazılabilir.

$$\left. \begin{array}{l} \sin(\theta) = \theta \\ \cos(\theta) = 1 \\ \theta^2 = 0 \end{array} \right\} \theta < 10^\circ \quad (4.18)$$

$$F_{motor} = (M + m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} \quad (4.19)$$

$$0 = (ml^2 + I)\ddot{\theta} - mgl\theta - ml\ddot{x} \quad (4.20)$$

Kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 4.14 de görüldüğü gibidir. Root-Locus analizini yapabilmek için sistemin transfer matrisinin karakteristik eşitliklerinin bulunması gerekmektedir. Başlangıç şartları sıfır kabul edilerek yapılan işlemlerden sonra transfer matrisinin karakteristik eşitliği (4.27) eşitliğindeki matrisin tersinin alınması işleminden dolayı tersi alınacak matrisin determinantıdır.



Şekil 4.14: Kontrol sisteminin blok diyagramı

Burada x durum değişkenlerini ifade etmektedir.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (4.21)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{K}_p(\mathbf{r} - \mathbf{x}) \quad (4.22)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}_p)\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{K}_p\mathbf{r} \quad (4.23)$$

$$s\mathbf{X}(s) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}_p)\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}\mathbf{K}_p\mathbf{R}(s) \quad (4.24)$$

$$[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}_p)]\mathbf{X}(s) = \mathbf{B}\mathbf{K}_p\mathbf{R}(s) \quad (4.25)$$

$$\mathbf{X}(s) = [s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}_p)]^{-1} \mathbf{B}\mathbf{K}_p\mathbf{R}(s) \quad (4.26)$$

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{X}(s) = [s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}_p)]^{-1} \mathbf{B}\mathbf{K}_p\mathbf{R}(s) \quad (4.27)$$

(2.28) ve (2.29) eşitlikleri kullanılarak \mathbf{A} ve \mathbf{B} matrisleri bulunur.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.362959 & -21.426380 & -0.000856 \\ 0 & 37.113085 & -78.167921 & -0.087547 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.128351 \\ 7.764669 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

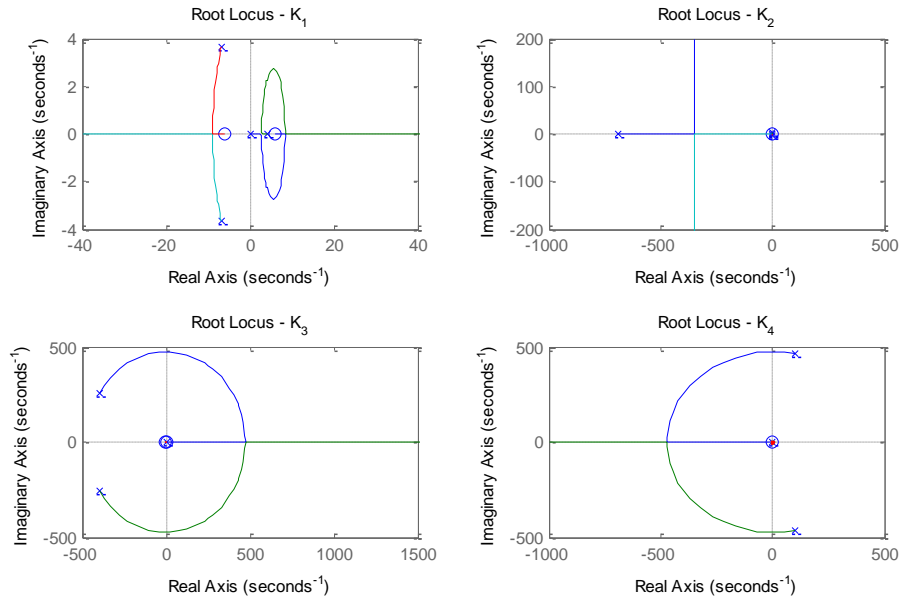
Buradan karakteristik denklem (4.30) eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \det([s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}_p)]) = & \\ & s^4 + (2.128351K_3 + 7.764669K_4 + 21.513928)s^3 \\ & + (2.128351K_1 + 7.764669K_2 + 0.179684K_3 - 2.17e - 14K_4 \\ & - 35.304183)s^2 + (0.179684K_1 - 2.17e - 14K_2 - 76.171407K_3 \\ & - 766.827308)s + 76.171407K_1 \end{aligned} \quad (4.30)$$

Bulunan karakteristik denklem her kazanç parametresi için ayrı ayrı (4.31) eşitliğindeki forma dönüştürülerek Root-Locus analizi yapılır.

$$\det([sI - (A - BK_p)]) = 1 + \frac{KQ(s)}{P(s)} \quad (4.31)$$

Elde edilen Root-Locus grafikleri Şekil 4.15 de görülmektedir.



Şekil 4.15: Her kazanç parametresi için Root-Locus analiz grafikleri

Yapılan Root-Locus analizi sonucunda belirlenen parametre başlangıç değer aralıkları Tablo 4.19 de verilmiştir.

Tablo 4.19: Başlangıç tasarımı için parametre değerler aralıkları

| Parametre | Seviye | | |
|-----------|--------|------|--------|
| | Düşük | Orta | Yüksek |
| K_1 | -60 | -35 | -10 |
| K_2 | 200 | 300 | 400 |
| K_3 | -100 | -70 | -40 |
| K_4 | 30 | 50 | 70 |

Kıstasların istenilen hedef değerlere (her kıstas için 0 olarak belirlenmiştir) ulaşması için merkezi karma, yüzey merkezli 25 deney benzetim ortamında yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 4.20 da verilmiştir. Tablo 4.20 de verilen sonuçlara

göre Y_{YY} ile x_{ort} , θ_{ort} , x_{p-p} ve θ_{p-p} kıstasları için matematik model 95% lik bir güven değeri ile oluşturulmuştur.

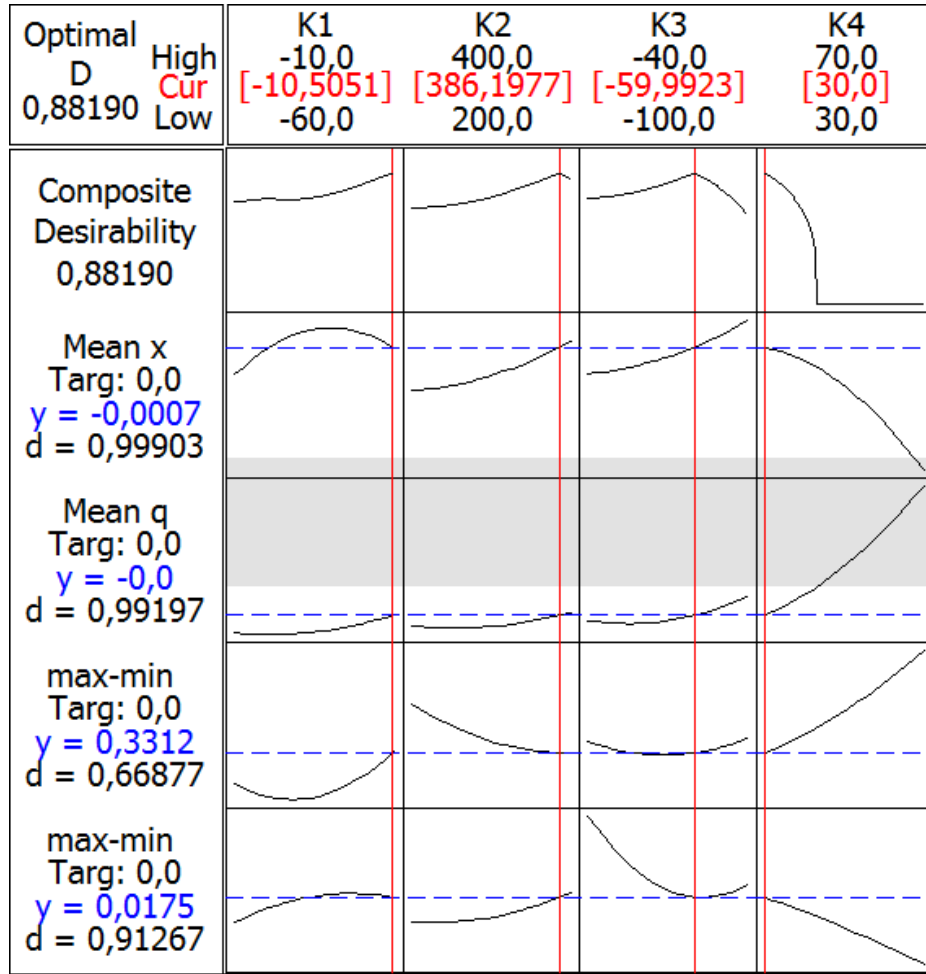
Tablo 4.20: Birinci deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları

| K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | x_{ort} | θ_{ort} | x_{p-p} | θ_{p-p} |
|-------|-------|-------|-------|-------------|----------------|------------|----------------|
| -60 | 200 | -100 | 30 | -0.03444647 | 0.00025424 | 0.03469370 | 0.01917600 |
| -10 | 200 | -100 | 30 | -0.18442956 | 0.00025587 | 0.19250533 | 0.01779433 |
| -60 | 400 | -100 | 30 | -0.03336572 | -0.00032180 | 0.03389756 | 0.01047508 |
| -10 | 400 | -100 | 30 | -0.15489497 | 0.00095429 | 0.16734529 | 0.00976316 |
| -60 | 200 | -40 | 30 | -0.00084294 | -0.00010919 | 0.19812824 | 0.07072941 |
| -10 | 200 | -40 | 30 | -0.03107194 | -0.00011952 | 0.61137044 | 0.04812878 |
| -60 | 400 | -40 | 30 | -0.00170095 | -0.00012574 | 0.29703440 | 0.05415362 |
| -10 | 400 | -40 | 30 | -0.02518584 | -0.00021754 | 0.69983849 | 0.03097076 |
| -60 | 200 | -100 | 70 | -0.04886829 | 0.00006953 | 0.47119249 | 0.10499534 |
| -10 | 200 | -100 | 70 | -1.25178891 | 0.00006094 | 1.41305759 | 0.04466910 |
| -60 | 400 | -100 | 70 | 0.10988018 | 0.00289980 | 0.46685288 | 0.07287090 |
| -10 | 400 | -100 | 70 | -1.17626458 | 0.00051886 | 1.41401969 | 0.02679295 |
| -60 | 200 | -40 | 70 | 0.00024209 | 0.00105706 | 1.26043915 | 0.41255658 |
| -10 | 200 | -40 | 70 | -2.26038626 | 0.00024828 | 2.44404397 | 0.09214728 |
| -60 | 400 | -40 | 70 | -0.02127702 | 0.00636852 | 0.03592053 | 0.00583932 |
| -10 | 400 | -40 | 70 | -0.02755403 | 0.00880938 | 0.05372341 | 0.00189592 |
| -60 | 300 | -70 | 50 | -0.00352509 | 0.00001097 | 0.22677926 | 0.06043078 |
| -10 | 300 | -70 | 50 | -0.62634539 | 0.00002824 | 0.67419317 | 0.01373854 |
| -35 | 200 | -70 | 50 | -0.05690192 | 0.00000640 | 0.38503297 | 0.05192115 |
| -35 | 400 | -70 | 50 | -0.01630615 | -0.00000331 | 0.38575066 | 0.04973408 |
| -35 | 300 | -100 | 50 | -0.06059850 | 0.00026555 | 0.06121429 | 0.01544344 |
| -35 | 300 | -40 | 50 | -0.00832065 | 0.00003663 | 0.72743035 | 0.12088507 |
| -35 | 300 | -70 | 30 | -0.00020127 | -0.00017601 | 0.19290584 | 0.03658115 |
| -35 | 300 | -70 | 70 | -0.49969757 | 0.00074923 | 0.55117820 | 0.05001904 |
| -35 | 300 | -70 | 50 | -0.01580304 | 0.00001867 | 0.38532147 | 0.04264881 |

Kıstasların sıfır hedef değeri için Minitab'ın optimizasyon modülü kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan optimum parametre değerleri Tablo 4.21 de verilmiştir. Optimizasyon aracının grafiksel sonuçları Şekil 4.16 da görülmektedir.

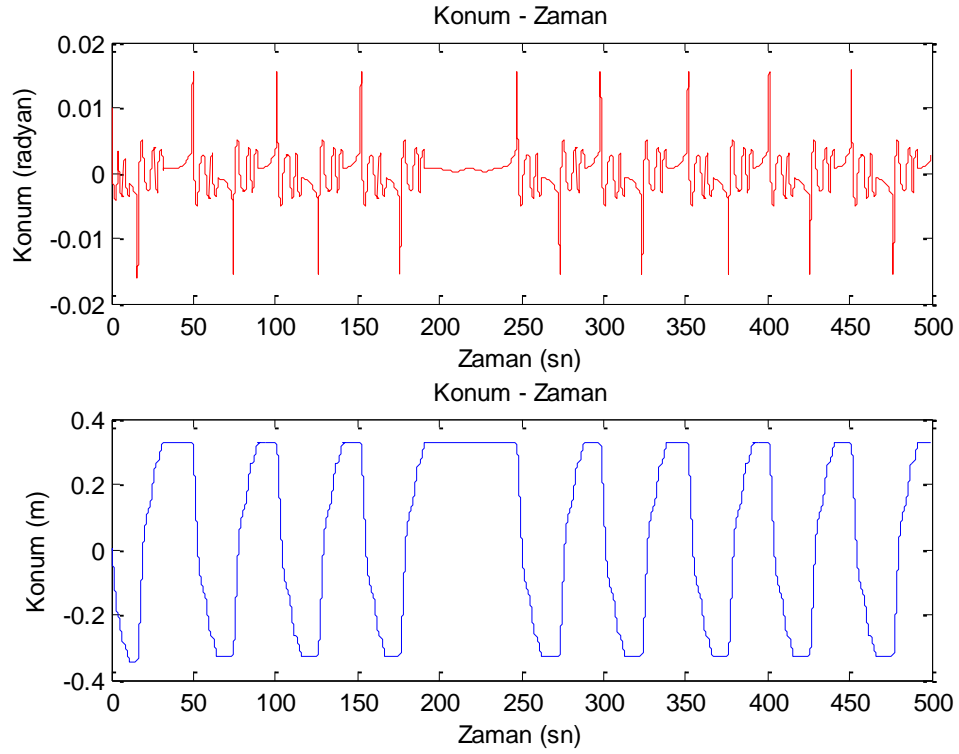
Tablo 4.21: Birinci tasarımda elde edilen optimum değerler

| Parametre | Optimum değer |
|-----------|---------------|
| K_1 | -10.5051 |
| K_2 | 386.1977 |
| K_3 | -59.9923 |
| K_4 | 30 |



Şekil 4.16: Birinci tasarım için optimizasyon aracının çıktıları

Hesaplanan optimum parametre değerleri için yapılan benzetim deneyinde kısıtların değerleri $x_{opt}=0.159368464$, $\theta_{opt}=0.000232416$, $x_{p-p}=0.556880425$, $\theta_{p-p}=0.024854782$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.17 de optimum değerler için elde edilen konum bilgileri görülmektedir.



Şekil 4.17: Birinci tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri

Şekil 4.17 incelendiğinde bulunan optimum değerler ile sarkacın düşmeden kontrol edilebildiği fakat arabanın konumu x için hedeflenen değerlerin biraz daha iyileştirilmesi gerektiği görülmektedir. Bu nedenle bulunan optimum değerler civarında daha dar değer aralıkları için YYY ile ikinci bir tasarım gerçekleştirilmiştir. İkinci tasarım için seçilen parametrelerinin değer aralıkları Tablo 4.22 de, deney tasarım matrisi ve deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.23 da verilmiştir.

Tablo 4.22: İkinci tasarım için parametre değerler aralıkları

| Parametre | Seviye | | |
|-----------|--------|------|--------|
| | Düşük | Orta | Yüksek |
| K_1 | -30 | -10 | -5 |
| K_2 | 300 | 386 | 486 |
| K_3 | -69 | -59 | -49 |
| K_4 | 20 | 30 | 40 |

Tablo 4.23: İkinci deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları

| K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | x_{ort} | θ_{ort} | x_{p-p} | θ_{p-p} |
|-------|-------|-------|-------|-------------|----------------|------------|----------------|
| -30 | 300 | -69 | 20 | 0.05947865 | 0.00025259 | 0.15858099 | 0.03013615 |
| -5 | 300 | -69 | 20 | 0.10188377 | 0.00011968 | 0.85449568 | 0.02933759 |
| -30 | 486 | -69 | 20 | -0.01455618 | 0.00011702 | 0.25491282 | 0.02938023 |
| -5 | 486 | -69 | 20 | -0.07582758 | 0.00030348 | 1.30016334 | 0.02374643 |
| -30 | 300 | -49 | 20 | -0.00248127 | -0.00006495 | 0.23316218 | 0.04172606 |
| -5 | 300 | -49 | 20 | -0.54634942 | -0.00053952 | 0.58617447 | 0.01609331 |
| -30 | 486 | -49 | 20 | -0.00316406 | -0.00009269 | 0.33326561 | 0.03382756 |
| -5 | 486 | -49 | 20 | -0.43063042 | 0.00223998 | 0.46974365 | 0.01405680 |
| -30 | 300 | -69 | 40 | 0.07435076 | -0.00356206 | 0.18763669 | 0.02660225 |
| -5 | 300 | -69 | 40 | -0.46714392 | 0.00017569 | 0.50052850 | 0.01488661 |
| -30 | 486 | -69 | 40 | -0.00271232 | -0.00003682 | 0.24162322 | 0.02567104 |
| -5 | 486 | -69 | 40 | -0.47449650 | 0.00013295 | 0.50437973 | 0.01365272 |
| -30 | 300 | -49 | 40 | -0.10909761 | 0.00032802 | 0.11060464 | 0.01462599 |
| -5 | 300 | -49 | 40 | -0.74316472 | 0.00000393 | 0.81507425 | 0.01667945 |
| -30 | 486 | -49 | 40 | -0.11573221 | -0.00039033 | 0.11855481 | 0.01230769 |
| -5 | 486 | -49 | 40 | -0.73251206 | 0.00010392 | 0.81702061 | 0.01554156 |
| -30 | 393 | -59 | 30 | -0.00040821 | -0.00001755 | 0.22684427 | 0.03072401 |
| -5 | 393 | -59 | 30 | -0.51793644 | -0.00043641 | 0.56008170 | 0.01381876 |
| -18 | 300 | -59 | 30 | -0.13496320 | 0.00071913 | 0.13695010 | 0.01642246 |
| -18 | 486 | -59 | 30 | 0.12013778 | -0.00005731 | 0.33952979 | 0.02287755 |
| -18 | 393 | -69 | 30 | -0.13516302 | 0.00027838 | 0.13729806 | 0.01447238 |
| -18 | 393 | -49 | 30 | 0.14242298 | 0.00061459 | 0.36800421 | 0.02554707 |
| -18 | 393 | -59 | 20 | -0.16056067 | -0.00060774 | 0.16359569 | 0.01478837 |
| -18 | 393 | -59 | 40 | -0.17125254 | -0.00033286 | 0.17462822 | 0.01487915 |
| -18 | 393 | -59 | 30 | -0.15938712 | -0.00065402 | 0.16206593 | 0.01483214 |

Kıstasların sıfır hedef değeri için Minitab ın optimizasyon modülü kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan optimum parametre değerleri Tablo 4.24 de verilmiştir. Optimizasyon aracının grafiksel sonuçları Şekil 4.18 da görülmektedir.

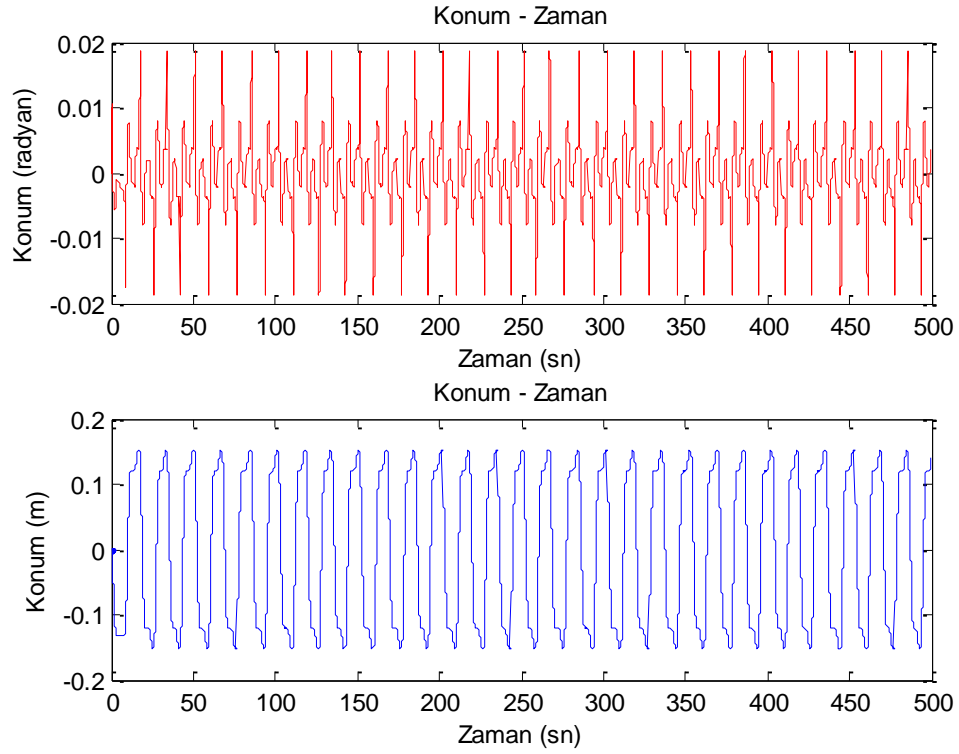
Tablo 4.24: İkinci tasarımda elde edilen optimum değerler

| Parametre | Optimum değer |
|-----------|---------------|
| K_1 | -26 |
| K_2 | 344 |
| K_3 | -52.702 |
| K_4 | 26.56 |

| Optimal D | K1 | K2 | K3 | K4 |
|---|---------|---------|------------|-----------|
| 0,92995 | -5,0 | 486,0 | -49,0 | 40,0 |
| High Cur | [-26,0] | [344,0] | [-52,7020] | [26,5600] |
| Low | -30,0 | 300,0 | -69,0 | 20,0 |
| Composite Desirability 0,92995 | | | | |
| Mean x Targ: 0,0 y = -0,0123 d = 0,98355 | | | | |
| Mean q Targ: 0,0 y = 0,0 d = 0,99994 | | | | |
| max-min Targ: 0,0 y = 0,1246 d = 0,87544 | | | | |
| max-min Targ: 0,0 y = 0,0263 d = 0,86866 | | | | |

Şekil 4.18: İkinci tasarım için optimizasyon aracının çıktıları

Hesaplanan optimum parametre değerleri için yapılan benzetim deneyinde kistasların değerleri $x_{opt}=-0.006406215$, $\theta_{opt}=-0.000119959$, $x_{p-p}=0.253405623$, $\theta_{p-p}=0.034464097$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.19 de optimum değerler için elde edilen konum bilgileri görülmektedir.



Şekil 4.19: İkinci tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri

Şekil 4.19 incelendiğinde sarkacın açısal salınım değerlerinin çok fazla değişmediği fakat daha sık aralıklarla yön değiştirdiği arabanın konum değişimlerinin +/- 0.2 m aralığına indirildiği gözlemlenmektedir. Arabanın ve sarkacın dengeyi sağlamak için yaptığı salınım hareketinin daha az sıklıkta yapılabilmesi için bir tasarım daha yapılması gerekmektedir. Bu nedenle bulunan optimum değerler civarında aralık daha da daraltılarak YYY ile bir deney tasarımı daha gerçekleştirilmiştir. Üçüncü tasarım için seçilen parametrelerinin değer aralıkları Tablo 4.25 de, deney tasarım matrisi ve deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.26 da verilmiştir.

Tablo 4.25: Üçüncü tasarım için parametre değerler aralıkları

| Parametre | Seviye | | |
|-----------|--------|------|--------|
| | Düşük | Orta | Yüksek |
| K_1 | -30 | -26 | -22 |
| K_2 | 324 | 344 | 364 |
| K_3 | -57 | -52 | -47 |
| K_4 | 20 | 26 | 32 |

Tablo 4.26: Üçüncü deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları

| K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | x_{ort} | θ_{ort} | x_{p-p} | θ_{p-p} |
|-------|-------|-------|-------|-------------|----------------|------------|----------------|
| -30 | 324 | -57 | 20 | 0.00082518 | -0.00000713 | 0.20734939 | 0.03726323 |
| -22 | 324 | -57 | 20 | -0.12991839 | -0.00082590 | 0.13182900 | 0.01652530 |
| -30 | 364 | -57 | 20 | -0.00074931 | -0.00000427 | 0.22417525 | 0.03538733 |
| -22 | 364 | -57 | 20 | 0.09635552 | -0.00031214 | 0.26021790 | 0.02756371 |
| -30 | 324 | -47 | 20 | -0.00207111 | -0.00002750 | 0.25655200 | 0.04110149 |
| -22 | 324 | -47 | 20 | -0.00596366 | -0.00010629 | 0.30267722 | 0.03859399 |
| -30 | 364 | -47 | 20 | -0.00354696 | -0.00014011 | 0.27984143 | 0.03918432 |
| -22 | 364 | -47 | 20 | -0.00295114 | -0.00005736 | 0.32631561 | 0.03657546 |
| -30 | 324 | -57 | 32 | -0.00111283 | -0.00002063 | 0.20725123 | 0.03354220 |
| -22 | 324 | -57 | 32 | 0.00163220 | -0.00020839 | 0.31903894 | 0.03529193 |
| -30 | 364 | -57 | 32 | -0.00227346 | -0.00006081 | 0.22458143 | 0.03192449 |
| -22 | 364 | -57 | 32 | 0.09558232 | -0.00026501 | 0.25873999 | 0.02551829 |
| -30 | 324 | -47 | 32 | -0.00324529 | -0.00016629 | 0.26121388 | 0.03737355 |
| -22 | 324 | -47 | 32 | 0.00085430 | 0.00012085 | 0.30600377 | 0.03495117 |
| -30 | 364 | -47 | 32 | -0.00051589 | 0.00009163 | 0.28588366 | 0.03609660 |
| -22 | 364 | -47 | 32 | 0.00100353 | 0.00010090 | 0.33148102 | 0.03342945 |
| -30 | 344 | -52 | 26 | -0.00362586 | -0.00011587 | 0.23900521 | 0.03597443 |
| -22 | 344 | -52 | 26 | 0.10940358 | 0.00041733 | 0.27887296 | 0.02783313 |
| -26 | 324 | -52 | 26 | -0.00368172 | -0.00007470 | 0.24736671 | 0.03569615 |
| -26 | 364 | -52 | 26 | -0.00321364 | -0.00006724 | 0.26714948 | 0.03391063 |
| -26 | 344 | -57 | 26 | 0.09026675 | 0.00030106 | 0.23006962 | 0.02762307 |
| -26 | 344 | -47 | 26 | -0.00418481 | -0.00011939 | 0.28877967 | 0.03676089 |
| -26 | 344 | -52 | 20 | -0.00385960 | -0.00006638 | 0.25740758 | 0.03684510 |
| -26 | 344 | -52 | 32 | -0.00019044 | -0.00001160 | 0.25842227 | 0.03338998 |
| -26 | 344 | -52 | 26 | 0.00084429 | 0.00009627 | 0.25741834 | 0.03468613 |

YYY kullanılarak kıstasların matematik modeli 95% güven değeri ve 62.22%, 56.73%, 79.38%, 79.80% R^2 değerleri ile (4.32) – (4.35) eşitliklerindeki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}x_{ort} = & -7.02501589 - 0.02341429K_1 + 0.052823177K_2 \\ & + 0.129796006K_3 + 0.065063562K_4 + 0.001568432K_1^2 \\ & - 7.8104e - 05K_2^2 + 0.00060988K_3^2 - 0.0008283K_4^2 \\ & + 0.000253803K_1K_2 - 0.000202K_1K_3 + 0.0003728K_1K_4 \\ & - 0.00019567K_2K_3 - 6.8004e - 05K_2K_4 - 0.00023893K_3K_4\end{aligned}\quad (4.32)$$

$$\begin{aligned}\theta_{ort} = & -0.0400577 + 0.0003322K_1 + 0.0002719K_2 \\ & + 0.000248K_3 + 0.0003007K_4 + 4.178e - 06K_1^2 \\ & - 3.871e - 07K_2^2 + 2.783e - 07K_3^2 - 3.413E - 06K_4^2 \\ & + 2.954e - 07K_1K_2 + 5.684e - 06K_1K_3 + 2.675e - 06K_1K_4 \\ & - 1.534E - 07K_2K_3 - 1.624E - 07K_2K_4 - 2.422e - 07K_3K_4\end{aligned}\quad (4.33)$$

$$\begin{aligned}
x_{p-p} = & 0.138969 + 0.000285K_1 + 0.003844K_2 + 0.031324K_3 \\
& + 0.028587K_4 + 9.83e-05K_1^2 - 2.7e-07K_2^2 + 8.23e-05K_3^2 \\
& + 1.52e-05K_4^2 + 2.74e-05K_1K_2 + 0.000239K_1K_3 + 0.000477K_1K_4 \\
& - 3.2e-06K_2K_3 - 9.6e-05K_2K_4 - 0.00035K_3K_4
\end{aligned} \tag{4.34}$$

$$\begin{aligned}
\theta_{p-p} = & 0.32943 - 0.00491K_1 - 0.0021K_2 - 0.00056K_3 \\
& + 0.000157K_4 - 9.9e-05K_1^2 + 3.31e-06K_2^2 - 5.2e-05K_3^2 \\
& + 4.55e-05K_4^2 + 3.45e-06K_1K_2 + 7.19e-05K_1K_3 + 6.23e-05K_1K_4 \\
& - 2.8e-06K_2K_3 - 1e-05K_2K_4 - 4.8e-05K_3K_4
\end{aligned} \tag{4.35}$$

Kıstasların sıfır hedef değeri için Minitab in optimizasyon modülü kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan optimum parametre değerleri Tablo 4.27 de verilmiştir. Optimizasyon aracının grafiksel sonuçları Şekil 4.20 de görülmektedir.

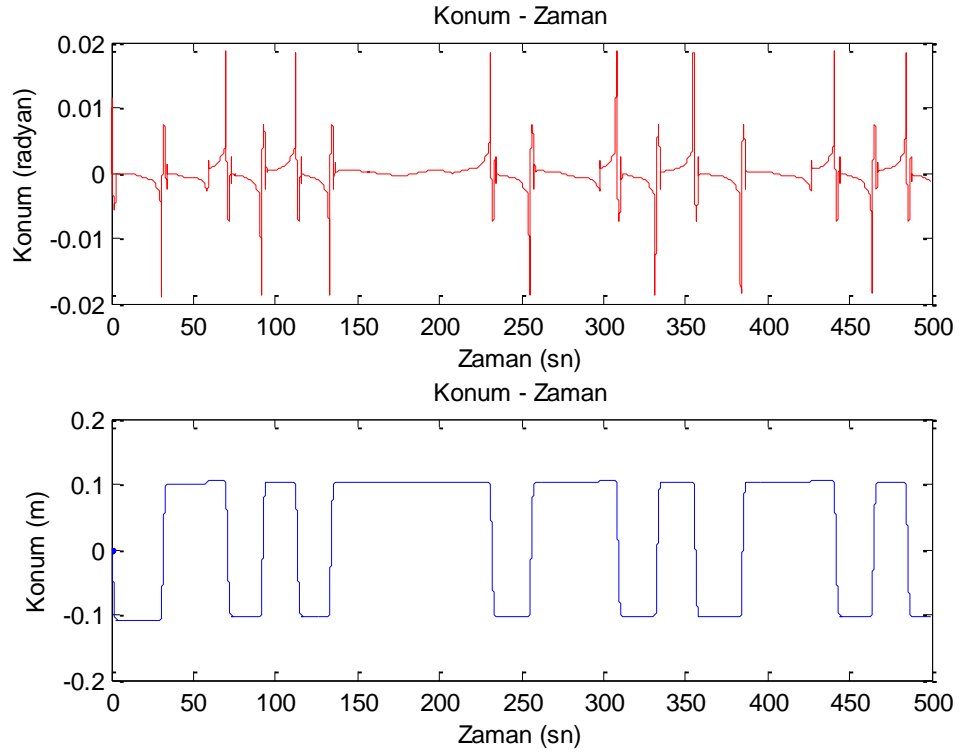
Tablo 4.27: Üçüncü tasarımda elde edilen optimum değerler

| Parametre | Optimum değer |
|-----------|---------------|
| K_1 | -30 |
| K_2 | 324 |
| K_3 | -57 |
| K_4 | 20 |

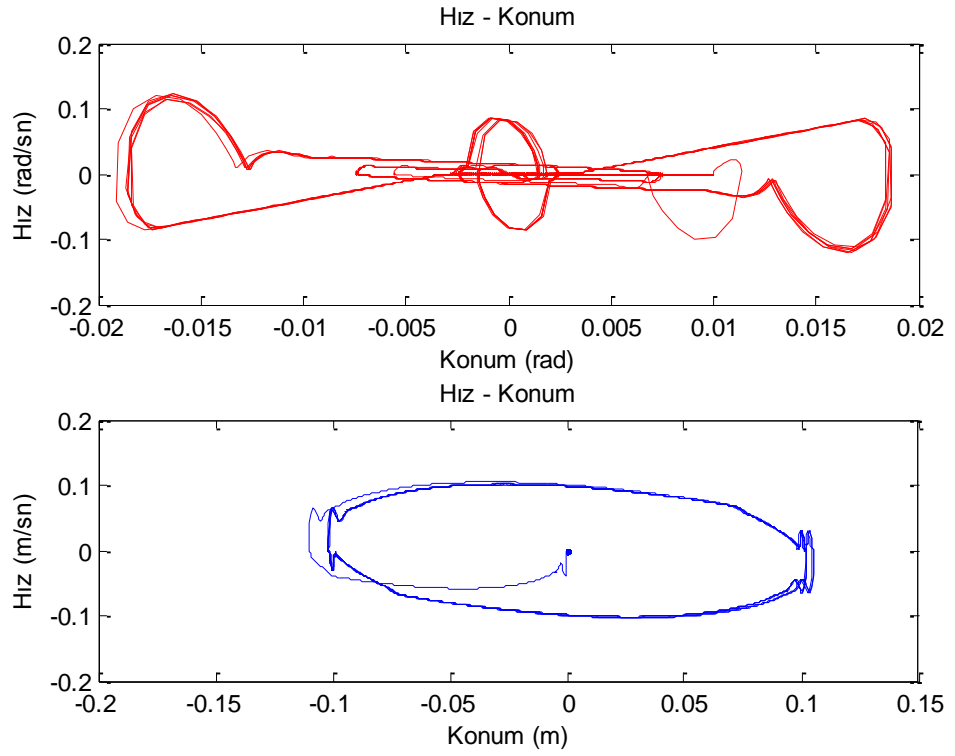
| New D | High Cur | K1 | K2 | K3 | K4 |
|------------------------|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 0,00000 | Low | -22,0 [-30,0] -30,0 | 364,0 [324,0] 324,0 | -47,0 [-57,0] -57,0 | 32,0 [20,0] 20,0 |
| Composite Desirability | 0,00000 | | | | |
| Mean x | Targ: 0,0 y = -0,0330 d = 0,67037 | | | | |
| Mean q | Targ: 0,0 y = -0,0001 d = 0,61030 | | | | |
| max-min | Targ: 0,0 y = 0,1837 d = 0,00000 | | | | |
| max-min | Targ: 0,0 y = 0,0344 d = 0,65627 | | | | |

Şekil 4.20: Üçüncü tasarım için optimizasyon aracının çıktıları

Hesaplanan optimum parametre değerleri için yapılan benzetim deneyinde kistasların değerleri $x_{ort} = 0.000825183$, $\theta_{ort} = -7.13e-06$, $x_{p-p} = 0.207349394$, $\theta_{p-p} = 0.03726323$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.21 de optimum değerler için elde edilen konum bilgileri, Şekil 4.22 de ise hız – konum grafikleri görülmektedir.

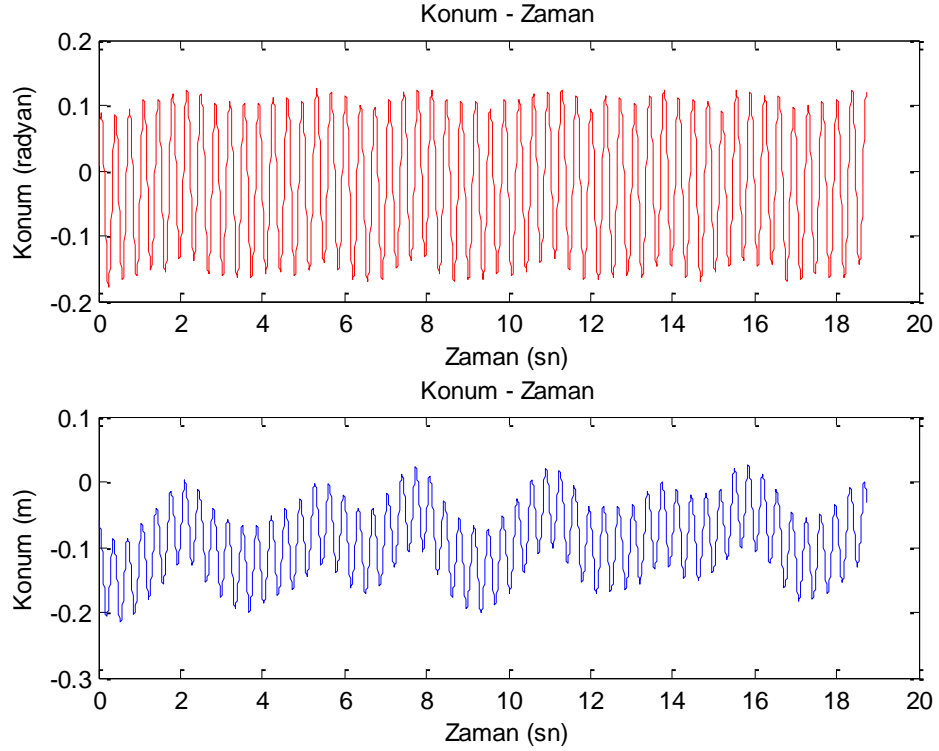


Şekil 4.21: Üçüncü tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri



Şekil 4.22: Üçüncü tasarımda bulunan optimum değerleri için hız - konum grafikleri

Şekil 4.21 incelendiğinde sarkacın salınım aralığı ± 0.02 radyan (1.14 derece), arabanın salınım aralığı ise ± 0.1 m salınım aralığına indirgenmiştir. Ters sarkaç sistemi doğası gereği salınım yaparak dengesini sağlamaktadır. Ters sarkacın YYY kullanılarak bulunabilen en uygun OK parametreleri ile kontrolü sağlanmıştır. Bulunan optimum değerler gerçek ters sarkaç üzerinde denenmiştir. Şekil 4.23 de gerçek deneye ait konum grafikleri görülmektedir.

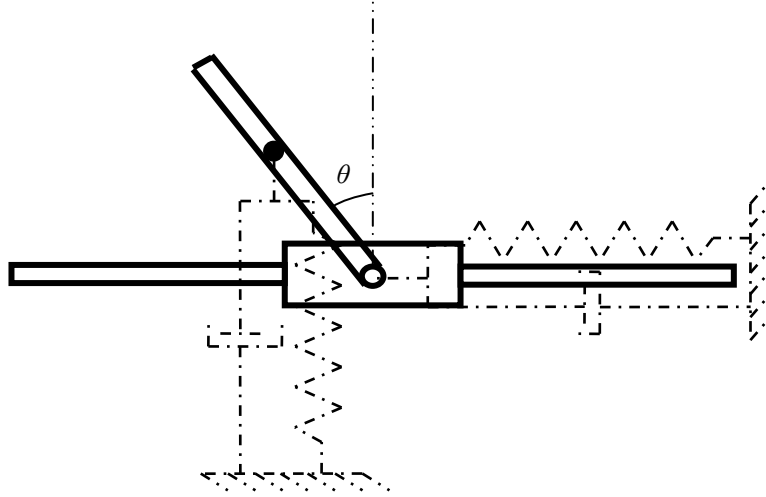


Şekil 4.23: Gerçek sistemde yapılan deney ile elde edilen konumlar

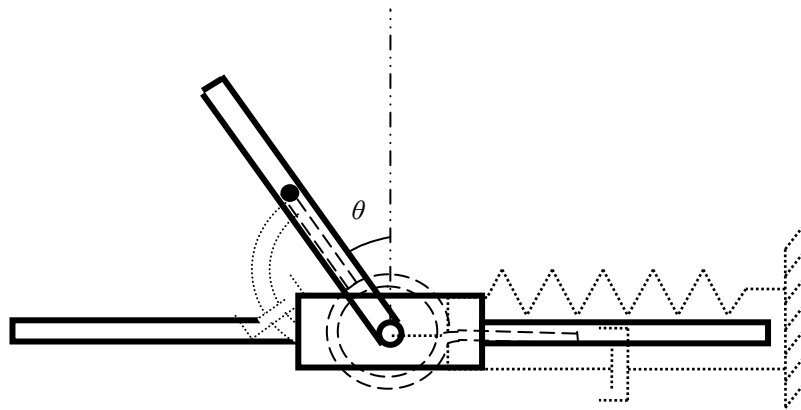
Gerçek ters sarkaç üzerinde benzetim sistemi ile bulunan optimum parametreler ile yapılan deneyde ters sarkaç sistemi düşmeden kontrol edilebilmiştir. Benzetim üzerinden yapılan ilk parametre belirleme işlemlerinin ışığında gerçek sisteme zarar verilmeden ilk kontrol deneyi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Böylece gerçek sistemler üzerinde yapılacak kontrol deneylerine yanlış değerler ile başlanarak pahalı ve insan hayatı için önemli cihazların zarar görmeleri ya da çevreye zarar vermeleri engellenmiş olur.

4.4 Sanal Elemanların Parametrelerinin Değerlerinin Belirlenmesi

SEK yöntemi ile ters sarkacı kontrol edebilmek için öncelikle ters sarkacın mekanik olarak arabanın kızak sınırları aşılmadan (mümkünse kızıağın orta konumunda) nasıl dengede tutulabileceğinin hayal edilmesi gerekmektedir. Sarkacın denge konumunda kalabilmesi için iki farklı yaklaşımda bulunulabilir. Bu yaklaşımlar Şekil 4.24 ve Şekil 4.25 de görülmektedir.



Şekil 4.24: Çizgisel yay ve sönümleyici yaklaşımı



Şekil 4.25: Burulma yayı ve sönümleyici yaklaşımı

Her iki yaklaşımda da arabanın konumu bir yay ve sönümleyici ile orta noktada tutulmaya çalışılmaktadır. İki yaklaşımın birbirinden farklılaştığı nokta sarkacın dik konumda tutulması için kullanılan elemanların farklı olmasıdır. Sarkaç Şekil 4.24 deki yaklaşımda normal yay ve sönümleyici ile dengede tutulmaya

çalışılmaktayken Şekil 4.25 deki yaklaşımda burulma yayı ve sönümleyicisi kullanılmaktadır.

Her iki yaklaşımda da arabaya bağlı olan yay ve sönümleyicinin etkisinin motor tarafından nasıl oluşturulacağı (4.36) - (4.42) eşitlikleri ile izah edilebilir. SEK yönteminde kuvvetlerin eklemlere olan yansımaları belirlenerek sanal elemanların etkileri hareket sağlayıcıları tarafından oluşturulur. Yay ve sönümleyicinin arabanın prizmatik eklemine uyguladığı kuvvet (4.36) eşitliğindeki gibidir. Motorun sanal elemanların oluşturduğu kuvveti sağlayabilmesi için motorun ürettiği kuvvetin bu kuvvete eşit olması gerekir. Motorun arabaya uyguladığı çizgisel kuvvet (3.41) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir (Golnaraghi & Kuo, 2010).

$$F_{sanal_araba} = K_{yay_araba}x + B_{sön_araba}\dot{x} \quad (4.36)$$

$$F_{motor} = -F_{sanal_araba} = -K_{yay_araba}x - B_{sön_araba}\dot{x} \quad (4.37)$$

$$F_{motor} = \frac{K_t}{r}i(t) \quad (4.38)$$

$$i(t) = \frac{V}{R_a} - \frac{K_b}{R_a}\dot{\theta}_m \quad (4.39)$$

$$\dot{\theta}_m = \frac{\dot{x}}{r} \quad (4.40)$$

$$F_{motor} = \frac{K_t}{r} \left(\frac{V}{R_a} - \frac{K_b}{R_a r} \dot{x} \right) \quad (4.41)$$

$$F_{motor} = -F_{sanal_araba} = -K_{yay_araba}x - B_{sön_araba}\dot{x} \quad (4.42)$$

Burada K_{yay_araba} yay sabitini, $B_{sön_araba}$ sönümleyici sabitini, F_{sanal_araba} sanal elemanların oluşturduğu kuvveti, F_{motor} motorun oluşturduğu kuvveti, K_t motor tork sabitini, K_b motor ters emk sabitini, R_a armatür direncini, r kaskak yarı çapını, θ_m motor şaftının konumunu, x arabanın konumunu, $i(t)$ armatür akımını, V motora uygulanan gerilimi ifade etmektedir. (4.41) eşitliği, (4.42) eşitliğinde

yerine yazılırsa motora uygulanması gereken gerilim (4.43) eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$V = \left(\frac{K_b}{r} - \frac{R_a r B_{sön_araba}}{K_t} \right) \dot{x} - \frac{R_a r K_{yay_araba}}{K_t} x \quad (4.43)$$

x ve \dot{x} deney esnasında algılanıp hesaplanabilir. Ayrıca analitik çözüm yapılarak \dot{x} (4.52) ve (4.53) eşitliklerindeki gibi elde edilir. Arabanın matematik modeli

$$M\ddot{x} + B\dot{x} - K_{yay_araba}x = 0 \quad (4.44)$$

şeklindedir. Burada homojen çözüm aynı zamanda genel çözümdür.

$$y_H(t) = Ce^{rt} \quad (4.45)$$

Homojen denklemin kökleri (4.46) eşitliği ile elde edilir. Bu tip sistemlerde kökler genellikle karmaşık çıkmaktadır.

$$r_{1,2} = \frac{-B \mp \sqrt{B^2 - 4MK_{yay_araba}}}{2M} \quad (4.46)$$

$$r_{1,2} = \alpha \mp j\beta \Rightarrow \alpha = \frac{-B}{2M}, \quad \beta = \frac{\sqrt{B^2 - 4MK_{yay_araba}}}{2M} \quad (4.47)$$

(4.48) eşitliğindeki genel çözüm formu kullanılarak başlangıç şartları için bilinmeyen katsayılar belirlenir.

$$y_H(t) = e^{\alpha t} (K_3 \cos \beta t + K_4 \sin \beta t) \quad (4.48)$$

Başlangıç şartları $\dot{y}(0) = 0$, $y(0) = a$ olarak alınırsa

$$y(0) = a \Rightarrow K_3 = a \quad (4.49)$$

$$\dot{y}(t) = \frac{-B}{2M} e^{\frac{-B}{2M}t} (K_3 \cos \beta t + K_4 \sin \beta t) + e^{\frac{-B}{2M}t} (-K_3 \beta \sin \beta t + K_4 \beta \cos \beta t) \quad (4.50)$$

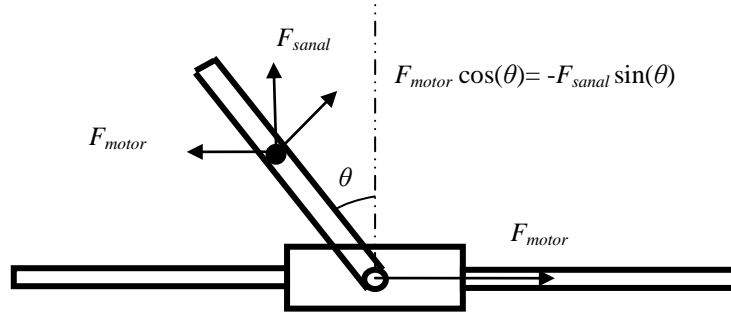
$$\dot{y}(0) = 0 \Rightarrow K_4 = \frac{Ba}{2M\beta} \quad (4.51)$$

şeklinde katsayılar bulunur. Burada bulunan değerler yerine konulursa analitik çözüm elde edilmiş olur.

$$y(t) = e^{\frac{-B}{2M}t} \left(a \cos \beta t + \frac{Ba}{2M\beta} \sin \beta t \right) \quad (4.52)$$

$$\dot{y}(t) = \frac{-B}{2M} e^{\frac{-B}{2M}t} \left(a \cos \beta t + \frac{Ba}{2M\beta} \sin \beta t \right) + e^{\frac{-B}{2M}t} \left(-a\beta \sin \beta t + \frac{Ba}{2M} \cos \beta t \right) \quad (4.53)$$

Sarkaç kısmına bağlanan sanal elemanların etkisi motor tarafından Şekil 4.24 için (4.60) eşitliği ve Şekil 4.25 için (4.67) eşitliğindeki kontrol sinyali ile oluşturulur. Burada K_{yay_sarkac} sarkacın yay sabitini, $B_{sön_sarkac}$ sarkacın sönümleyici sabitini, F_{sanal_sarkac} sarkacın sanal elemanlarının oluşturduğu kuvveti, F_{motor} motorun oluşturduğu kuvveti, K_t motor tork sabitini, K_b motor ters emk sabitini, R_a armatür direncini, r kasnak yarı çapını, θ_m motor şaftının konumunu, x arabanın konumunu, $i(t)$ armatür akımını, V motora uygulanan gerilimi ifade etmektedir.



Şekil 4.26: Normal yay ve sönümleyicinin oluşturduğu kuvvetler

$$F_{sanal_sarkac} = K_{yay_sarkac}(l - l \cos \theta) + B_{sön_sarkac}(l \sin \theta)\dot{\theta} \quad (4.54)$$

$$F_{motor} = -F_{sanal_sarkac} \tan \theta \quad (4.55)$$

(4.41) ve (4.54) eşitlikleri, (4.55) eşitliğinde yerine yazılırsa motora uygulanacak kontrol sinyali (4.57) eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$\frac{K_t}{r} \left(\frac{V}{R_a} - \frac{K_b}{R_a r} \dot{x} \right) = -[K_{yay_sarkac}(l - l \cos \theta) + B_{sön_sarkac}(l \sin \theta) \dot{\theta}] \tan \theta \quad (4.56)$$

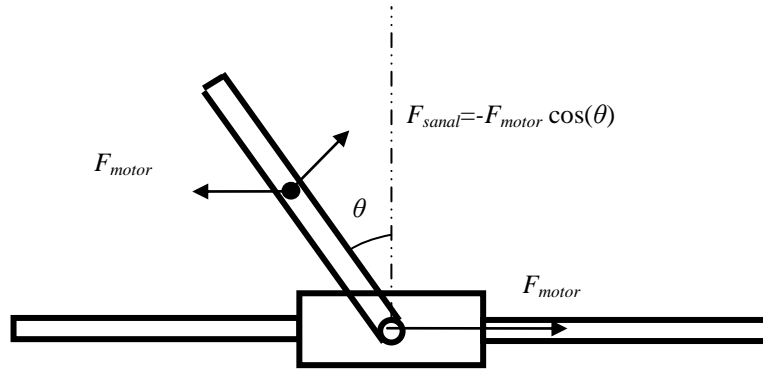
$$V = \frac{K_b}{r} \dot{x} - \frac{R_a r}{K_t} [K_{yay_sarkac}(l - l \cos \theta) + B_{sön_sarkac}(l \sin \theta) \dot{\theta}] \tan \theta \quad (4.57)$$

Süper pozisyon yöntemi uygulanarak araba ve sarkaç için bulunan kontrol sinyalleri toplanarak birleşik kontrol sinyali (4.60) eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$F_{motor} = -K_{yay_araba}x - B_{sön_araba}\dot{x} - [K_{yay_sarkac}(l - l \cos \theta) + B_{sön_sarkac}(l \sin \theta) \dot{\theta}] \tan \theta \quad (4.58)$$

$$\frac{K_t}{r} \left(\frac{V}{R_a} - \frac{K_b}{R_a r} \dot{x} \right) = -K_{yay_araba}x - B_{sön_araba}\dot{x} - [K_{yay_sarkac}(l - l \cos \theta) + B_{sön_sarkac}(l \sin \theta) \dot{\theta}] \tan \theta \quad (4.59)$$

$$V = \frac{R_a r}{K_t} \left[\left(\frac{K_t K_b}{R_a r^2} - B_{sön_araba} \right) \dot{x} - K_{yay_araba}x - [K_{yay_sarkac}(l - l \cos \theta) + B_{sön_sarkac}(l \sin \theta) \dot{\theta}] \tan \theta \right] \quad (4.60)$$



Şekil 4.27: Burulma yayı ve sönümleyicisinin oluşturduğu kuvvetler

Burulma elemanlarının oluşturduğu kuvvetler (4.61) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$F_{sanal_sarkac} = K_{yay_sarkac}\theta + B_{sön_sarkac}\dot{\theta} \quad (4.61)$$

$$F_{motor} = \frac{-F_{sanal_sarkac}}{\cos \theta} \quad (4.62)$$

(4.41) ve (4.61) eşitlikleri, (4.62) eşitliğinde yerine yazılırsa motora uygulanacak kontrol sinyali (4.64) eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$\frac{K_t}{r} \left(\frac{V}{R_a} - \frac{K_b}{R_a r} \dot{x} \right) = \frac{-(K_{yay_sarkac}\theta + B_{sön_sarkac}\dot{\theta})}{\cos \theta} \quad (4.63)$$

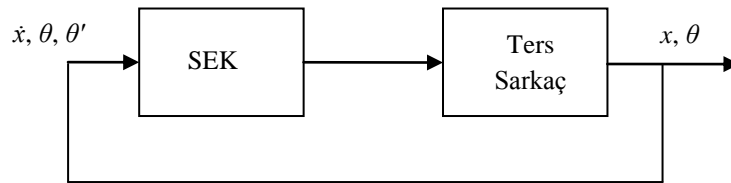
$$V = \frac{K_b}{r} \dot{x} - \frac{R_a r (K_{yay_sarkac}\theta + B_{sön_sarkac}\dot{\theta})}{K_t \cos \theta} \quad (4.64)$$

Süper pozisyon yöntemi uygulanarak araba ve sarkaç için bulunan kontrol sinyalleri toplanarak birleşik kontrol sinyali (4.67) eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$F_{motor} = -K_{yay_araba}x - B_{sön_araba}\dot{x} - \frac{K_{yay_sarkac}\theta + B_{sön_sarkac}\dot{\theta}}{\cos \theta} \quad (4.65)$$

$$\frac{K_t}{r} \left(\frac{V}{R_a} - \frac{K_b}{R_a r} \dot{x} \right) = -K_{yay_araba}x - B_{sön_araba}\dot{x} - \frac{K_{yay_sarkac}\theta + B_{sön_sarkac}\dot{\theta}}{\cos \theta} \quad (4.66)$$

$$V = \frac{R_a r}{K_t} \left[\left(\frac{K_t K_b}{R_a r^2} - B_{sön_araba} \right) \dot{x} - K_{yay_araba}x - \frac{K_{yay_sarkac}\theta + B_{sön_sarkac}\dot{\theta}}{\cos \theta} \right] \quad (4.67)$$



Şekil 4.28: Sanal eleman kontrolörü

SEK kontrol sistemlerinde kullanılan sanal elemanlarının parametrelerinin belirlenebilmesi için literatürde herhangi bir yönteme rastlanamamıştır. YYY yöntemi OK sisteminin kazançlarının belirlenmesinde kullanıldığında başarılı sonuçlar vermiştir. Aynı yöntem SEK de kullanılan sanal elemanların parametrelerinin belirlenmesinde de kullanılabilir bir yöntemdir.

Ters sarkaç için burulma elemanları ile yapılan kontrol sisteminde kullanılan sanal elemanların parametreleri (arabanın yay sabiti - K_a , arabanın sönümleyici sabiti - B_a , sarkacın yay sabiti - K_s , sarkacın sönümleyici sabiti - B_s) YYY kullanılarak benzetim ortamında yapılan sistematik deneyler ile mümkün olan en uygun hale getirilmiştir. Bu değerlerin uygunluğunu kontrol edebilmek için kıstas olarak ters sarkacın konumlarının ortalama değerleri (x_{ort} , θ_{ort}) ile bu konumların en yüksek ve en küçük değerleri arasındaki farklar (x_{p-p} , θ_{p-p}) belirlenmiştir. Bu kıstasların hedef değerleri hepsi için 0 dır. Parametrelerin başlangıç değer aralıkları benzetim ortamında rastgele parametre değerleri ile yapılan birkaç deney ile belirlenmiştir. Parametrelerin başlangıç değer aralıkları Tablo 4.28 de verilmiştir.

Tablo 4.28: Başlangıç tasarımı için parametre değerler aralıkları

| Parametre | Seviye | | |
|-----------|---------|---------|---------|
| | Düşük | Orta | Yüksek |
| K_s | 1.5e+06 | 2.0e+06 | 2.5e+06 |
| B_s | 20000 | 30000 | 40000 |
| K_a | 500 | 1000 | 1500 |
| B_a | 200 | 300 | 400 |

Kıstasların istenilen hedef değerlere (her kıstas için 0 olarak belirlenmiştir) ulaşması için merkezi karma, yüzey merkezli 25 deney benzetim ortamında yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 4.29 da verilmiştir. Tablo 4.29 de verilen sonuçlara göre YYY ne göre x_{ort} , θ_{ort} , x_{p-p} ve θ_{p-p} kıstasları için matematik model 95% lik bir güven değeri ile oluşturulmuştur.

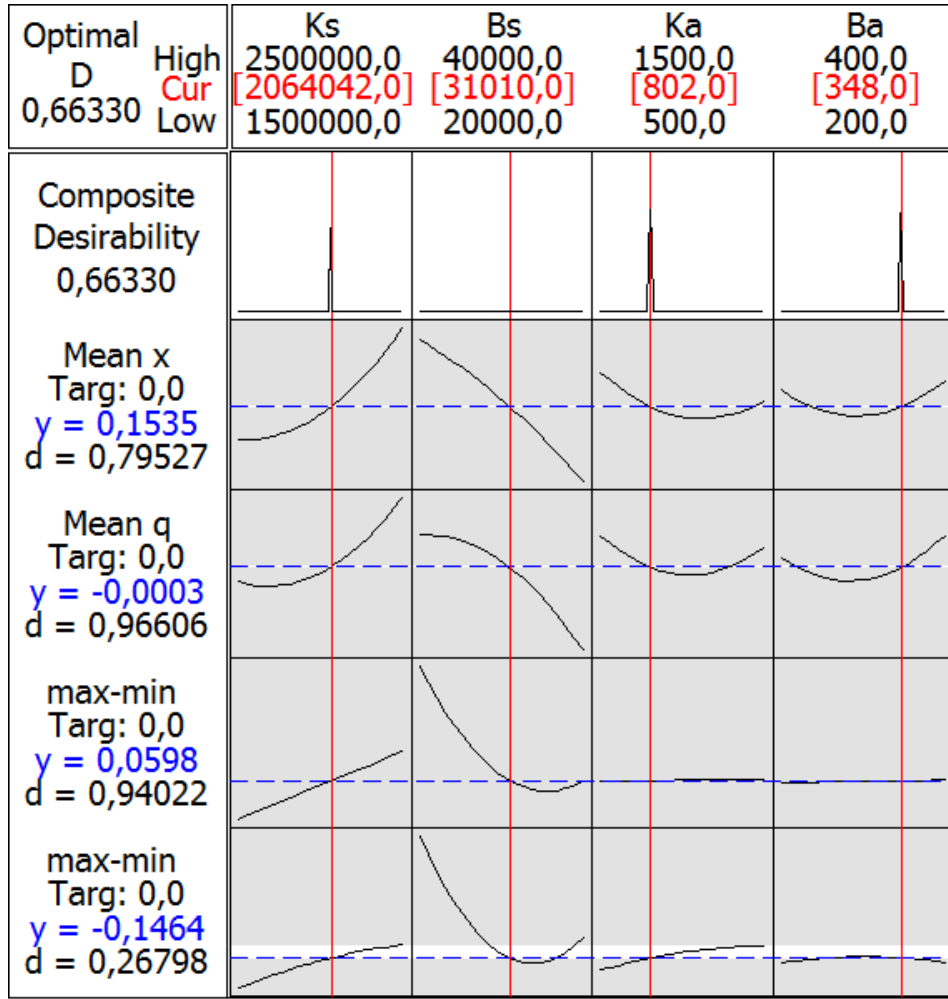
Tablo 4.29: Birinci deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları

| K_s | B_s | K_a | B_a | x_{ort} | θ_{ort} | x_{p-p} | θ_{p-p} |
|---------|-------|-------|-------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 1500000 | 20000 | 500 | 200 | 0,01739282 | -0,00000043 | 0,19675421 | 0,02009690 |
| 2500000 | 20000 | 500 | 200 | 242,76111034 | 2,66208449 | 592,60585176 | 4,54520398 |
| 1500000 | 40000 | 500 | 200 | 0,00295970 | -0,00000098 | 0,21284678 | 0,03321806 |
| 2500000 | 40000 | 500 | 200 | -0,06604570 | 0,00000039 | 0,12942948 | 0,02131265 |
| 1500000 | 20000 | 1500 | 200 | -33,14410694 | -1,00545855 | 223,48860530 | 4,58970442 |
| 2500000 | 20000 | 1500 | 200 | -29,53771927 | -0,95517243 | 212,29389225 | 4,59662800 |
| 1500000 | 40000 | 1500 | 200 | 0,14313640 | 0,00000314 | 0,37329006 | 0,03333489 |
| 2500000 | 40000 | 1500 | 200 | -0,03832028 | 0,00000194 | 0,09865397 | 0,02138095 |
| 1500000 | 20000 | 500 | 400 | -0,17675591 | -0,00000043 | 0,38743146 | 0,02043461 |
| 2500000 | 20000 | 500 | 400 | 195,06257888 | 2,39135921 | 532,08441738 | 4,58515345 |
| 1500000 | 40000 | 500 | 400 | -0,13190831 | -0,00000104 | 0,28834606 | 0,03338713 |
| 2500000 | 40000 | 500 | 400 | -0,06338105 | 0,00000158 | 0,14616651 | 0,02143245 |
| 1500000 | 20000 | 1500 | 400 | 41,19412114 | 1,11671482 | 248,35497971 | 4,53163552 |
| 2500000 | 20000 | 1500 | 400 | 143,98807017 | 2,05627246 | 457,47167683 | 4,61888857 |
| 1500000 | 40000 | 1500 | 400 | 0,01217644 | 0,00000046 | 0,21647203 | 0,03326655 |
| 2500000 | 40000 | 1500 | 400 | -0,08241204 | -0,00000075 | 0,19946972 | 0,02148455 |
| 1500000 | 30000 | 1000 | 300 | -0,08620522 | -0,00000018 | 0,17031602 | 0,02519296 |
| 2500000 | 30000 | 1000 | 300 | -0,04336842 | -0,00000287 | 0,22493317 | 0,01972594 |
| 2000000 | 20000 | 1000 | 300 | -54,10153966 | -1,28225854 | 285,14345484 | 4,56692002 |
| 2000000 | 40000 | 1000 | 300 | 0,07611067 | 0,00000406 | 0,17992657 | 0,02522662 |
| 2000000 | 30000 | 500 | 300 | -0,06839200 | 0,00000074 | 0,17883096 | 0,02103640 |
| 2000000 | 30000 | 1500 | 300 | 0,00923196 | 0,00000176 | 0,16056428 | 0,02086660 |
| 2000000 | 30000 | 1000 | 200 | -0,18127046 | -0,00000229 | 0,32710601 | 0,02101369 |
| 2000000 | 30000 | 1000 | 400 | 0,01339005 | 0,00000065 | 0,10506487 | 0,02106626 |
| 2000000 | 30000 | 1000 | 300 | -0,07717608 | -0,00000344 | 0,21896016 | 0,02100762 |

Kıstasların sıfır hedef değeri için Minitab ın optimizasyon modülü kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan optimum parametre değerleri Tablo 4.30 de verilmiştir. Optimizasyon aracının grafiksel sonuçları Şekil 4.29da görülmektedir.

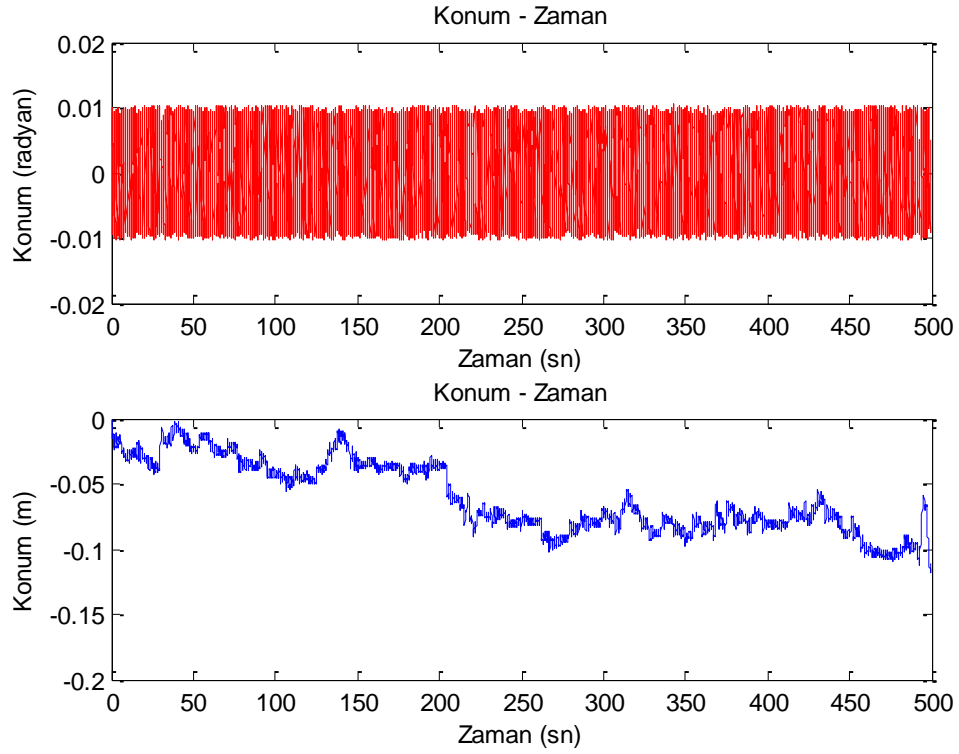
Tablo 4.30: Birinci tasarımda elde edilen optimum değerler

| Parametre | Optimum değer |
|-----------|---------------|
| K_s | 2064042 |
| B_s | 31010 |
| K_a | 802 |
| B_a | 348 |



Şekil 4.29: Birinci tasarım için optimizasyon aracının çıktıları

Hesaplanan optimum parametre değerleri için yapılan benzetim deneyinde kısıtların değerleri $x_{ort}=-0.0606546525111845$, $\theta_{ort}=-2.78973544120107e-06$, $x_{p-p} = 0.118086891067279$, $\theta_{p-p}=0.0209317421028421$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.30 de optimum değerler için elde edilen konum bilgileri görülmektedir.



Şekil 4.30: Birinci tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri

Şekil 4.30 incelendiğinde bulunan optimum değerler ile sarkacın düşmeden kontrol edilebildiği fakat arabanın konumu x negatif yönde sürekli arttığı için hedeflenen değerlerin biraz daha iyileştirilmesi gerektiği görülmektedir. Bu nedenle bulunan optimum değerler civarında daha dar değer aralıkları için YYY ile ikinci bir tasarım gerçekleştirilmiştir. İkinci tasarım için seçilen parametrelerin değer aralıkları Tablo 4.31 de, deney tasarım matrisi ve deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.32 da verilmiştir.

Tablo 4.31: İkinci tasarım için parametre değerler aralıkları

| Parametre | Seviye | | |
|-----------|--------|--------|--------|
| | Düşük | Orta | Yüksek |
| K_s | 1.96e6 | 2.06e6 | 2.16e6 |
| B_s | 30010 | 31010 | 32010 |
| K_a | 702 | 802 | 902 |
| B_a | 300 | 348 | 396 |

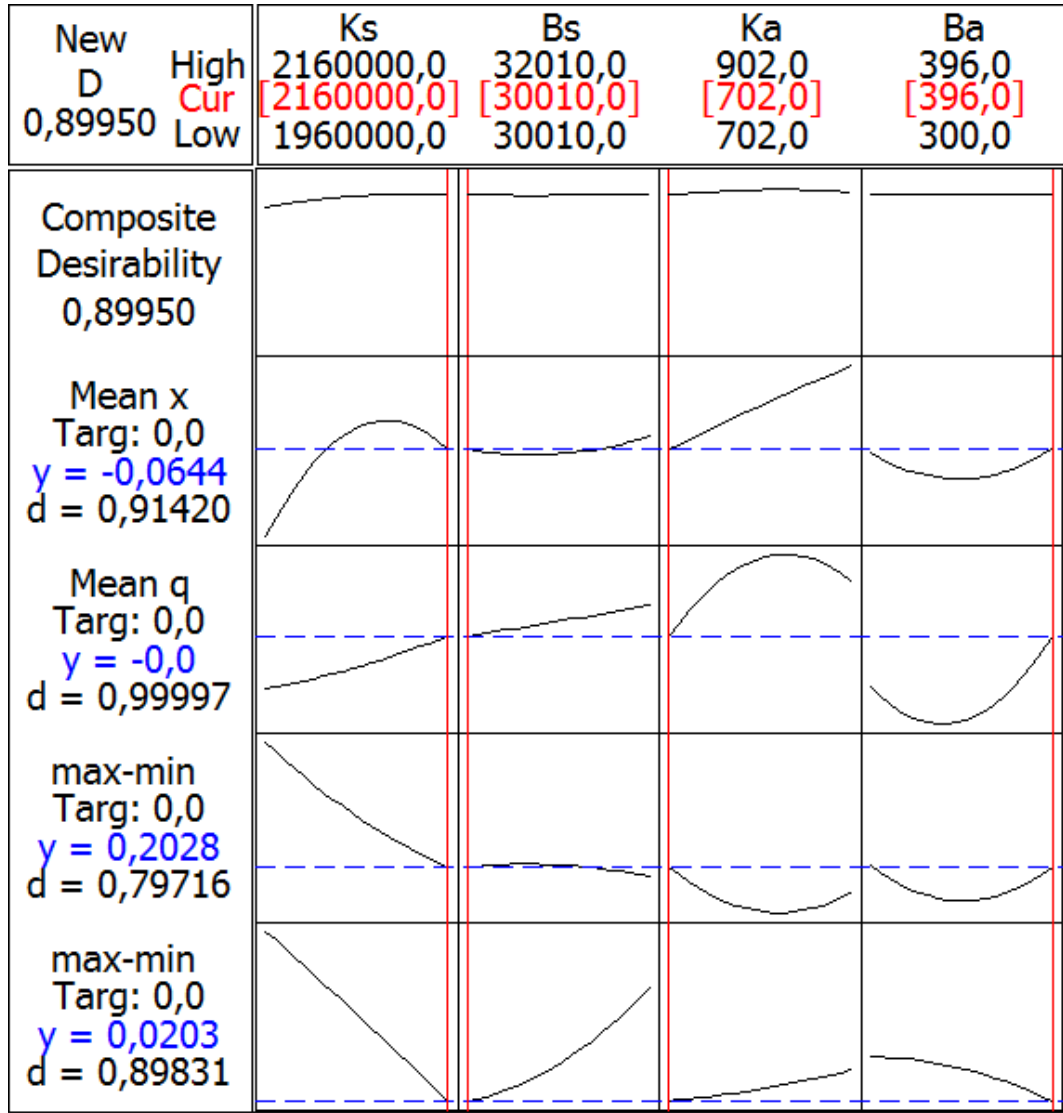
Tablo 4.32: İkinci deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları

| K_s | B_s | K_a | B_a | x_{ort} | θ_{ort} | x_{p-p} | θ_{p-p} |
|---------|-------|-------|-------|-------------|----------------|------------|----------------|
| 1960000 | 30010 | 702 | 300 | -0,02851496 | 0,00000015 | 0,14962012 | 0,02117352 |
| 2160000 | 30010 | 702 | 300 | -0,10405218 | -0,00000319 | 0,21766364 | 0,02059536 |
| 1960000 | 32010 | 702 | 300 | 0,04171901 | 0,00000250 | 0,13941668 | 0,02160440 |
| 2160000 | 32010 | 702 | 300 | 0,08212918 | 0,00000071 | 0,18148446 | 0,02098434 |
| 1960000 | 30010 | 902 | 300 | -0,00091885 | 0,00000232 | 0,13667110 | 0,02115293 |
| 2160000 | 30010 | 902 | 300 | -0,11564083 | -0,00000179 | 0,31857628 | 0,02060368 |
| 1960000 | 32010 | 902 | 300 | 0,04152337 | -0,00000153 | 0,14439650 | 0,02161916 |
| 2160000 | 32010 | 902 | 300 | 0,09952964 | 0,00000109 | 0,22475031 | 0,02090939 |
| 1960000 | 30010 | 702 | 396 | -0,18707136 | -0,00000269 | 0,38553077 | 0,02113011 |
| 2160000 | 30010 | 702 | 396 | -0,07795373 | 0,00000024 | 0,16149968 | 0,02030916 |
| 1960000 | 32010 | 702 | 396 | -0,22242982 | -0,00000438 | 0,36070441 | 0,02168591 |
| 2160000 | 32010 | 702 | 396 | -0,03953492 | 0,00000190 | 0,22354949 | 0,02086438 |
| 1960000 | 30010 | 902 | 396 | -0,05928548 | -0,00000083 | 0,12743613 | 0,02119864 |
| 2160000 | 30010 | 902 | 396 | 0,09202080 | 0,00000266 | 0,23214010 | 0,02046402 |
| 1960000 | 32010 | 902 | 396 | 0,03946138 | 0,00000062 | 0,19220970 | 0,02156705 |
| 2160000 | 32010 | 902 | 396 | -0,02004993 | -0,00000152 | 0,12089798 | 0,02100243 |
| 1960000 | 31010 | 802 | 348 | -0,08330417 | 0,00000059 | 0,15875733 | 0,02139943 |
| 2160000 | 31010 | 802 | 348 | -0,06150663 | -0,00000135 | 0,12459941 | 0,02057933 |
| 2060000 | 30010 | 802 | 348 | -0,00029558 | -0,00000051 | 0,11356197 | 0,02092036 |
| 2060000 | 32010 | 802 | 348 | 0,03635600 | -0,00000060 | 0,13158247 | 0,02125269 |
| 2060000 | 31010 | 702 | 348 | 0,05182920 | -0,00000339 | 0,16252483 | 0,02093470 |
| 2060000 | 31010 | 902 | 348 | -0,04653163 | -0,00000182 | 0,16169267 | 0,02109092 |
| 2060000 | 31010 | 802 | 300 | 0,02946101 | 0,00000120 | 0,19186635 | 0,02096021 |
| 2060000 | 31010 | 802 | 396 | 0,04661904 | 0,00000255 | 0,13920849 | 0,02093540 |
| 2060000 | 31010 | 802 | 348 | 0,00641221 | -0,00000254 | 0,15705601 | 0,02104662 |

Kıstasların sıfır hedef değeri için Minitab ın optimizasyon modülü kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan optimum parametre değerleri Tablo 4.33 de verilmiştir. Optimizasyon aracının grafiksel sonuçları Şekil 4.31 de görülmektedir.

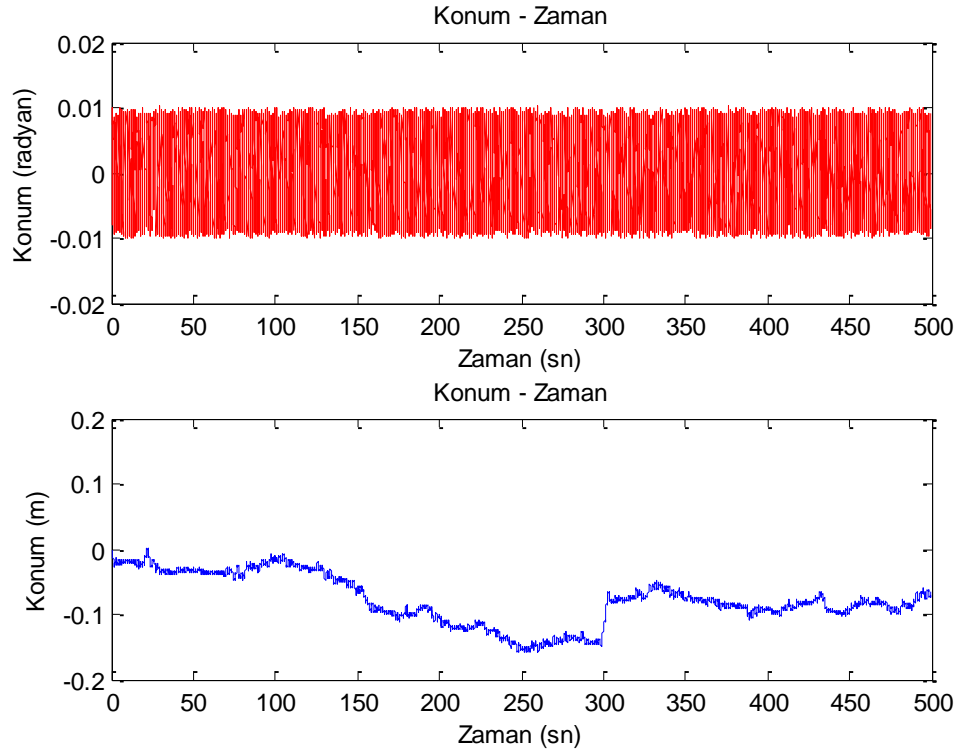
Tablo 4.33: İkinci tasarımda elde edilen optimum değerler

| Parametre | Optimum değer |
|-----------|---------------|
| K_s | 2160000 |
| B_s | 30010 |
| K_a | 702 |
| B_a | 396 |



Şekil 4.31: İkinci tasarım için optimizasyon aracının çıktıları

Hesaplanan optimum parametre değerleri için yapılan benzetim deneyinde kıstasların değerleri $x_{opt}=-0.0779537336332568$, $\theta_{opt}=2.42953489186487e-07$, $x_{p-p}=0.161499684570214$, $\theta_{p-p}=0.0203091610112536$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.32 de optimum değerler için elde edilen konum bilgileri görülmektedir.



Şekil 4.32: İkinci tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri

Şekil 4.32 incelendiğinde sarkacın açısal konumunun birinci tasarıma göre değişmediği fakat arabanın konumunun hala daha yavaş yavaş bir yöne doğru sürekli ilerlediği gözlenmektedir. Bu nedenle bulunan optimum değerler civarında arabanın parametrelerine biraz daha önem verilerek YYY ile bir deney tasarımı daha gerçekleştirilmiştir. Üçüncü tasarım için seçilen parametrelerinin değer aralıkları Tablo 4.34 de, deney tasarım matrisi ve deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.35 de verilmiştir.

Tablo 4.34: Üçüncü tasarım için parametre değerler aralıkları

| Parametre | Seviye | | |
|-----------|---------|-------|---------|
| | Düşük | Orta | Yüksek |
| K_s | 2.399e6 | 2.4e6 | 2.401e6 |
| B_s | 25750 | 25775 | 25800 |
| K_a | 667 | 674 | 681 |
| B_a | 462 | 464 | 466 |

Tablo 4.35: Üçüncü deney için deney tasarım matrisi ve çıktıları

| K_s | B_s | K_a | B_a | x_{ort} | θ_{ort} | x_{p-p} | θ_{p-p} |
|---------|-------|-------|-------|-------------|----------------|------------|----------------|
| 2399000 | 25750 | 667 | 462 | 0,02876597 | 0,00000106 | 0,41262957 | 0,01956928 |
| 2401000 | 25750 | 667 | 462 | -0,15472644 | -0,00000298 | 0,45920603 | 0,02015333 |
| 2399000 | 25800 | 667 | 462 | -0,21279906 | -0,00000460 | 0,63775989 | 0,01980578 |
| 2401000 | 25800 | 667 | 462 | 0,03987742 | 0,00000107 | 0,16342181 | 0,01996085 |
| 2399000 | 25750 | 681 | 462 | 0,03396547 | 0,00000556 | 0,23854487 | 0,02013646 |
| 2401000 | 25750 | 681 | 462 | 0,08346344 | 0,00000264 | 0,24734962 | 0,01971887 |
| 2399000 | 25800 | 681 | 462 | 0,18979033 | 0,00000122 | 0,45105081 | 0,01954260 |
| 2401000 | 25800 | 681 | 462 | 0,07530161 | -0,00000052 | 0,17669597 | 0,01948081 |
| 2399000 | 25750 | 667 | 466 | -0,06605862 | 0,00000006 | 0,11076615 | 0,01997270 |
| 2401000 | 25750 | 667 | 466 | -0,10493291 | -0,00000043 | 0,21503523 | 0,01954784 |
| 2399000 | 25800 | 667 | 466 | 0,32967444 | -0,00000047 | 0,57567125 | 0,01933323 |
| 2401000 | 25800 | 667 | 466 | -0,19161714 | -0,00000122 | 0,46028701 | 0,01962777 |
| 2399000 | 25750 | 681 | 466 | -0,06733290 | -0,00000354 | 0,35591793 | 0,01969445 |
| 2401000 | 25750 | 681 | 466 | 0,02073901 | -0,00000186 | 0,23834056 | 0,01995776 |
| 2399000 | 25800 | 681 | 466 | -0,00898739 | -0,00000068 | 0,21247283 | 0,01975123 |
| 2401000 | 25800 | 681 | 466 | -0,08226614 | -0,00000236 | 0,31826112 | 0,01971141 |
| 2399000 | 25775 | 674 | 464 | 0,01374482 | -0,00000097 | 0,20051839 | 0,01919243 |
| 2401000 | 25775 | 674 | 464 | -0,07752597 | -0,00000010 | 0,19122198 | 0,01948491 |
| 2400000 | 25750 | 674 | 464 | -0,03688870 | -0,00000045 | 0,19206771 | 0,02000523 |
| 2400000 | 25800 | 674 | 464 | 0,01100789 | -0,00000028 | 0,22330204 | 0,01962363 |
| 2400000 | 25775 | 667 | 464 | -0,03466008 | 0,00000035 | 0,27248927 | 0,02004163 |
| 2400000 | 25775 | 681 | 464 | -0,04011666 | -0,00000083 | 0,18384225 | 0,01945388 |
| 2400000 | 25775 | 674 | 462 | -0,08043177 | 0,00000073 | 0,17437125 | 0,01961071 |
| 2400000 | 25775 | 674 | 466 | -0,32246768 | -0,00000283 | 1,04466134 | 0,02003934 |
| 2400000 | 25775 | 674 | 464 | -0,03681547 | -0,00000107 | 0,19655896 | 0,01988812 |

YYY kullanılarak kıstasların matematik modeli 95% güven değeri ve 53.26%, 62.51%, 48.58%, 47.14% R^2 değerleri ile (4.68) – (4.71) eşitliklerindeki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}x_{ort} = & 340604.6314 - 0.24920682K_1 - 4.17361014K_2 \\ & - 7.79214793K_3 + 64.17601234K_4 + 5.80066e - 08K_1^2 \\ & + 0.000123131K_2^2 + 0.001071609K_3^2 - 0.02788813K_4^2 \\ & - 9.2896e - 07K_1K_2 + 3.93557e - 06K_1K_3 - 1.7174e - 05K_1K_4 \\ & - 5.6816e - 05K_2K_3 + 0.000204609K_2K_4 - 0.00351034K_3K_4\end{aligned}\quad (4.68)$$

$$\begin{aligned}\theta_{ort} = & 1.8771825 - 8.144e - 07K_1 - 6.868e - 05K_2 \\ & + 0.0001615K_3 - 0.0002958K_4 + 7.338e - 14K_1^2 \\ & + 3.85e - 10K_2^2 + 7.486e - 09K_3^2 - 1.101e - 07K_4^2 \\ & + 1.811e - 11K_1K_2 - 4.512E - 11K_1K_3 + 5.531E - 11K_1K_4 \\ & - 7.877E - 10K_2K_3 + 1.269e - 08K_2K_4 - 9.252e - 08K_3K_4\end{aligned}\quad (4.69)$$

$$\begin{aligned}
x_{p-p} = & -763572 + 0.533107K_1 + 12.08948K_2 + 2.961883K_3 \\
& -141.948K_4 - 1e-07K_1^2 - 0.00015K_2^2 - 0,00143K_3^2 \\
& + 0.077773K_4^2 - 2e-06K_1K_2 + 1.44e-06K_1K_3 + 2.1e-05K_1K_4 \\
& - 0.0002K_2K_3 + 0.000719K_2K_4 + 0.00144K_3K_4
\end{aligned} \tag{4.70}$$

$$\begin{aligned}
\theta_{p-p} = & -1718.76 + 0,001581K_1 - 0.01379K_2 + 0.018494K_3 \\
& - 0.02824K_4 - 3.3e-10K_1^2 + 2.29e-07K_2^2 + 1.57e-06K_3^2 \\
& + 3.85e-05K_4^2 + 8.58e-10K_1K_2 - 7.7e-09K_1K_3 - 5.2e-09K_1K_4 \\
& - 1.8e-07K_2K_3 + 4.85e-08K_2K_4 + 5.55e-06K_3K_4
\end{aligned} \tag{4.71}$$

Kıstasların sıfır hedef değeri için Minitab in optimizasyon modülü kullanılarak yapılan optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan optimum parametre değerleri Tablo 4.36 de verilmiştir. Optimizasyon aracının grafiksel sonuçları Şekil 4.33 de görülmektedir.

Tablo 4.36: Üçüncü tasarımda elde edilen optimum değerler

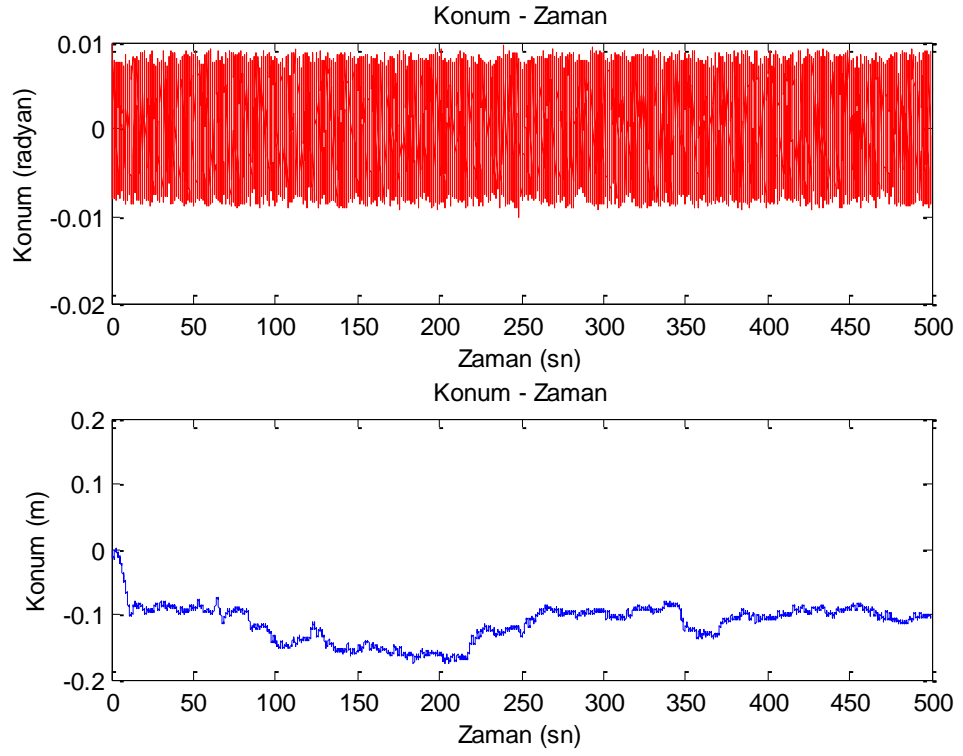
| Parametre | Optimum değer |
|-----------|---------------|
| K_s | 2399000 |
| B_s | 25787.6263 |
| K_a | 674.7778 |
| B_a | 464 |

| New D | High Cur | Ks | Bs | Ka | Ba |
|---------|----------|-------------|--------------|------------|---------|
| 0,40762 | Low | 2401000,0 | 25800,0 | 681,0 | 466,0 |
| | | [2399000,0] | [25787,6263] | [674,7778] | [464,0] |
| | | 2399000,0 | 25750,0 | 667,0 | 462,0 |

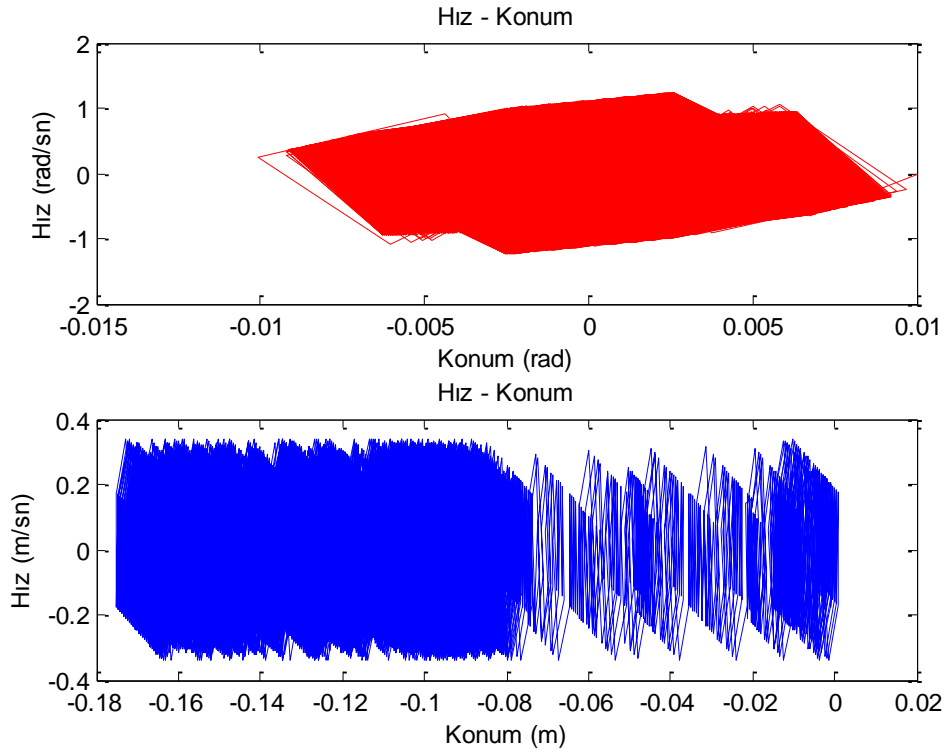
| | | | | |
|---|--|--|--|--|
| Composite Desirability 0,40762 | | | | |
| Mean x Targ: 0,0 y = 0,0543 d = 0,94567 | | | | |
| Mean q Targ: 0,0 y = -0,0 d = 0,99993 | | | | |
| max-min Targ: 0,0 y = 0,2353 d = 0,84311 | | | | |
| max-min Targ: 0,0 y = 0,0193 d = 0,03463 | | | | |

Şekil 4.33: Üçüncü tasarım için optimizasyon aracının çıktıları

Hesaplanan optimum parametre değerleri için yapılan benzetim deneyinde kısıtların değerleri $x_{ort} = -0.11292322303781$, $\theta_{ort} = -3,00508054679557e-06$, $x_{p-p} = 0.176288395615898$, $\theta_{p-p} = 0.0200921662055398$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.34 de optimum değerler için elde edilen konum bilgileri, Şekil 4.35 de ise hız – konum grafikleri görülmektedir.

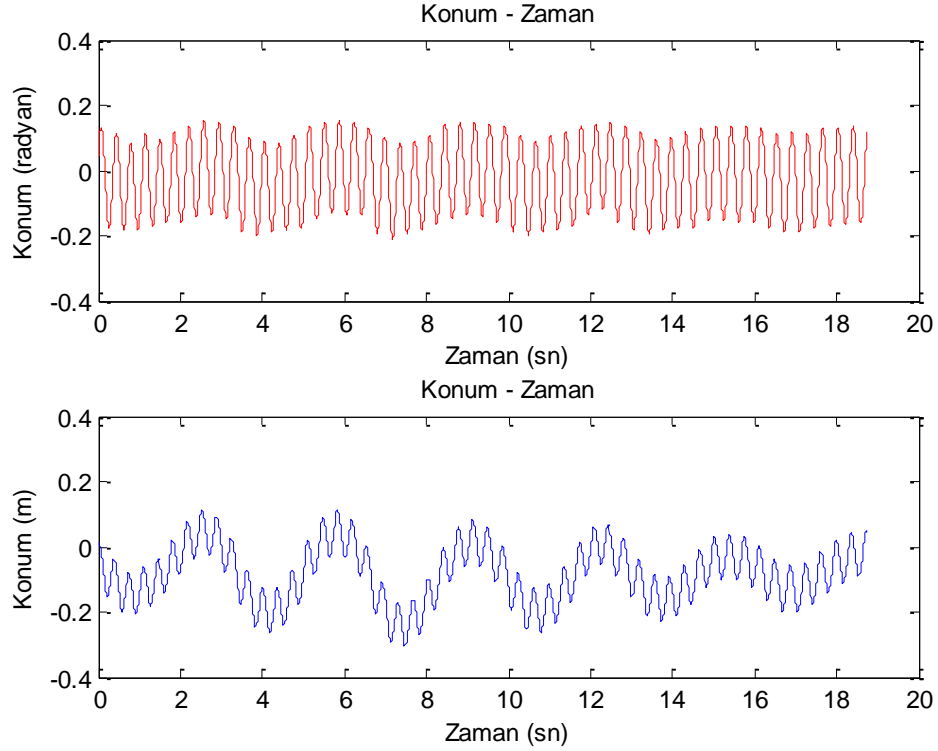


Şekil 4.34: Üçüncü tasarımda bulunan optimum değerleri için konum grafikleri



Şekil 4.35: Üçüncü tasarımda bulunan optimum değerleri için hız - konum grafikleri

Şekil 4.21 incelendiğinde sarkacın salınım aralığı ± 0.01 radyan (0.7 derece), arabanın salınım aralığı ise 0 m – -0.1 m salınım aralığına indirgenmiştir. Ters sarkaç sistemi doğası gereği salınım yaparak dengesini sağlamaktadır. Ters sarkacın YYY kullanılarak bulunabilen en uygun SEK parametreleri ile kontrolü sağlanmıştır. Bulunan optimum değerler gerçek ters sarkaç üzerinde denenmiştir. Şekil 4.36 da gerçek deneye ait konum grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.36: Gerçek sistemde yapılan deney ile elde edilen konumlar

Gerçek ters sarkaç üzerinde benzetim sistemi ile bulunan optimum parametreler ile yapılan deneyde ters sarkaç sistemi düşmeden kontrol edilebilmiştir. Benzetim üzerinden yapılan ilk parametre belirleme işlemlerinin ışığında gerçek sisteme zarar verilmeden ilk kontrol deneyi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Böylece gerçek sistemler üzerinde yapılacak kontrol deneylerine yanlış değerler ile başlanarak pahalı ve insan hayatı için önemli cihazların zarar görmeleri ya da çevreye zarar vermeleri engellenmiş olur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Sonuç

Bu doktora çalışması sonucunda elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Mekanizmaların matematik modelinde belirlenmesi en zor parametrelerden biri olan sürtünmenin modellenmesi üzerine kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Özellikle Karnopp ve LuGre modelleri detaylı olarak incelenmiştir.
- Karnopp sürtünme modeli, doktora çalışmasında deney platformu olarak kullanılan ters sarkaç mekanizmasında başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu modelin insansı robotlar gibi daha karmaşık mekanizmalarda kullanılabilmesi için yöntemler sunulmuştur.
- Ters sarkacın matematik modeli detaylı olarak açıklayıcı bir şekilde açıklanmıştır. Verilen yöntem kullanılarak daha karmaşık mekanizmaların modellenmesi de mümkündür.
- Sürtünme modelinin parametrelerinin Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile belirlenebileceği ortaya konmuştur. Yanıt Yüzeyi Yöntemi bu maksatla ilk kez kullanılmıştır.
- Sistemlerin karalı hale getirilmesinde kullanılan önemli yöntemlerden birisi Oransal Kontrol'dür. Bu yöntemin parametrelerinin belirlenmesi benzetim ortamında ve deneysel olarak yapılır. Bu çalışmada her iki yöntemde kullanılmıştır. İlave olarak Yanıt Yüzeyi Yönteminin Oransal Kontrol parametrelerinin belirlenmesinde başarılı olduğu gösterilmiştir.
- Sanal Eleman Kontrol yöntemi insan mantığına yatkın bir kontrol tekniğidir. Bu çalışmada bu yöntemi geliştirmek ve test etmek için ters sarkaç kullanılmıştır.
- Bu tez ile beraber dünyada bir ilk olarak ters sarkaç mekanizmasının Sanal Eleman Kontrolü ile deneysel olarak kontrol edilebileceği gösterilmiştir.

- Sanal Eleman Kontrolü yönteminde kullanılan sanal elemanların parametrelerinin nasıl belirleneceği konusunda literatürde herhangi bir yöntem mevcut değildir. Sanal elemanların parametrelerinin belirlenmesi için Yanıt Yüzeyi Yöntemi önerilmiş ve nasıl uygulanacağı ortaya konmuştur.

Bu tez ile beraber teorik ve deneysel olarak bir çok kavram açıklanmış ve doğru bir şekilde uygulanarak sunulan tezlerin doğruluğu ispatlanmıştır. Bu çalışma bu yönüyle benzer çalışmalara güzel bir örnek oluşturacaktır.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada birçok teorik ve deneysel metotlardan bahsedilmiş ve uygulaması gösterilmiştir. Fakat burada verilenlerin bu yöntemler için nihai olacağı düşünülemez. Bu sebeple aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Diğer sürtünme modelleri gelecek çalışmalarda ele alınabilir.
- Burada Yanıt Yüzeyi Yöntemi çevrimdışı olarak uygulanmıştır. Yanıt Yüzeyi Yönteminin çevrimiçi olarak uygulanması çalışılabilir. Böylelikle kendi kendini iyileştiren sistemler gerçekleştirilebilecektir.
- Burada Yanıt Yüzeyi Yöntemi kullanılarak Oransal Kontrol yapılmıştır. PI, PD, PID, Phase Lead, Phase Lag ve Optimal Control kontrol tekniklerinde de Yanıt Yüzeyi Yöntemi uygulanabilir.
- Sanal Eleman Kontrolü ile ters sarkaç kontrol edilmiştir. Burada sadece yay ve sönümleyici kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda ters yerçekimi, negatif kütle gibi hayal edilebilecek diğer sanal elemanlar kullanılarak ters sarkaç başta olmak üzere diğer karmaşık mekanizmaların kontrolü yapılabilir.
- Burada kullanılan Sanal Eleman Kontrolünün alt seviye kontrolörleri denetleyen üst seviye kontrolör olarak kullanılması çalışılabilir.

6. KAYNAKLAR

Adlink Technology Inc. (2005). *Analog Output Cards*. 2012 tarihinde Adlink Technology Inc. Web Site: http://www.adlinktech.com/PD/marketing/Datasheet/PCI-6208+6216Series/PCI-6208+6216Series_Datasheet_en_1.pdf adresinden alındı

Adlink Technology Inc. (2005). *Data Acquisition Cards*. 2012 tarihinde Adlink Technology Inc. Web Site: http://www.adlinktech.com/PD/marketing/Datasheet/PCI-9114Series/PCI-9114Series_Datasheet_en_1.pdf adresinden alındı

Adlink Technology Inc. (2005). *Digital I/O Cards*. 2012 tarihinde Adlink Technology Inc. Web Site: http://www.adlinktech.com/PD/marketing/Datasheet/PCI-7396/PCI-7396_Datasheet_en_1.pdf adresinden alındı

Ahmed, F. S., Laghrouche, S., & Bagdouri, M. E. (2012). Analysis, modeling, identification and control of pancake DC torque motors: Application to automobile air path actuators. *Mechatronics* , 195-212.

Akdas, D., & Medrano-Cerda, G. (2000). Design of a Stabilizing Controller for a 10-degree of Freedom Bipedal Robot Using Linear Quadratic Regulator Theory. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C* , 27-43.

Akdaş, D., & Bicakçı, S. (2009). İnsansı Robotun Kontrol Sistem Dizaynı. *Otomasyon Dergisi* , 240-250.

Anderson, C. (1989). Learning to control an inverted pendulum using neural networks. *Control Systems Magazine* (9), 31 - 37.

ANSI/ISA-51.1-1979. (1979 (R1993)). *Process Instrumentation Terminology*. North Carolina: ISA The Instrumentation, Systems, and Automation Society.

Armstrong-Hélouvy, B. (1991). *Control of Machines with Friction*. Boston, Massachusetts: Kluwer.

Armstrong-Helouvry, B., Dupont, P., & Wit, C. C. (1994). A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction. *Automatica*, Vol. 30 No.7 , 1083-1138.

Başkurt Motor. (2009). *24 Volt Çift Milli Kalorifer Motorları*. 5 12, 2010 tarihinde Başkurt Motor: <http://www.baskurt.com.tr/sayfam/1727/Kalorifer-Motorlar%C4%B1---24-Volt-%C3%87ift-Milli-Kalorifer-Motorlar%C4%B1-.htm> adresinden alındı

Bayhan, M., & Önel, K. (2010). Optimization of reinforcement content and sliding distance for AlSi7Mg/SiCp composites using response surface methodology. *Materials and Design* (31), 3015–3022.

Bossi, L., Rottenbacher, C., Mimmi, G., & Magni, L. (2011). Multivariable predictive control for vibrating structures: An application. *Control Engineering Practice* , 1087-1098.

Box, G., & Wilson, K. (1951). On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of Royal Statistical Society Series B* (13), 1-38.

Brock, S. (2002). Identification of the parameters in inverted pendulum model. *AMC 2002* (s. 316-321). Maribor: IEEE.

Bugeja, M. (2003). Non-Linear Swing-Up and Stabilizing Control of an Inverted Pendulum System. *EUROCON* (s. 437-441). Ljubljana: IEEE.

Chaoui, H., & Sicard, P. (2011). Motion and Balance Neural Control of Inverted Pendulums with Nonlinear Friction and Disturbance. *Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (s. 1222-1227). IEEE.

Craig, J. J. (2005). *Introduction to Robotic*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.

Dahl, P. R. (1968). *A Solid Friction Model*. California, USA: Aerospace Corporation.

de Wit, C. C., Olsson, H., J. Astrom, K., & Lischinsky, P. (1995). A New Model for Control of Systems with Friction. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 40, No. 3 , 419-425.

- Detchmendy, D. M., & Sridhar, R. (1966). Sequential estimation of states and parameters in noisy nonlinear . *Journal of Basic Engineering* , 362-368.
- Dorf, R. C. (1992). *Modern Control Systems*. California: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Du, C., Xu, X., Banks, S., & Wu, A. (2009). Control of nonlinear functional differential equations. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications* , 1850-1857.
- Ekkelenkamp, R., Veltink, P., Stramigioli, S., & Kooij, H. v. (2007). Evaluation of a Virtual Model Control for the Selective Support of Gait Functions Using an Exoskeleton. *IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, (s. 693-699). Noordwijk.
- Ekren, O., & Ekren, B. Y. (2008). Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology. *Applied Energy* (85), 1086–1101.
- Elhami, M. R., & Brookfield, D. J. (1997). Sequential Identification of Coulomb and Viscous Friction in Robot Drives. *Automatica* , 393-401.
- El-Hawwary, M., Elshafei, A., Emara, H., & Fattah, H. (2006). Adaptive Fuzzy Control of the Inverted Pendulum Problem. *Adaptive Fuzzy Control of the Inverted Pendulum Problem* (14), 1135 - 1144.
- Endo, G., Nakanishi, J., Morimoto, J., & Cheng, G. (2005). Experimental Studies of a Neural Oscillator for Biped Locomotion with QRIO. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, (s. 596-602).
- Evans, W. R. (1948). Graphical Analysis of Control Systems. *Trans. AIEE* 67 (1), 547–551.
- Farwig, H. Z., & Unbehauen, H. (1990). Discrete computer control of a triple-inverted pendulum. *Optimal Control Applications and Methods* (11), 157–171.
- Garcia, C. (2008). Comparison of friction models applied to a control valve. *Control Engineering Practice* , 1231-1243.

- Garcia, C., & Romano, R. A. (2008). Comparison Between Two Friction Model Parameter Estimation Methods Applied To Control Valves. *8th International IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems*, (s. 303-308). Cancun, Mexico.
- Goldstein, H., Poole, C., & Safko, J. (2000). *Classical Mechanics* (3rd Edition b.). Adisson Wesley.
- Golnaraghi, F., & Kuo, B. C. (2010). *Automatic Control Systems* (9th Edition b.). Wiley.
- Hougen, D., Fischer, J., & Johnam, D. (1994). A neural network pole balancer that learns and operates on a real robot in real time. *Proceedings of the MLC-COLT Workshop on Robot Learning*, (s. 73-80).
- Hu, J. J., Pratt, J. E., Chew, C.-M., Herr, H. M., & Pratt, G. A. (1999). Virtual Model Based Adaptive Dynamic Control of Biped Walking Robot. *International Journal on Artificial Intelligence Tools* , 337-348.
- Huang, S.-J., & Huang, C.-L. (2000). Control of an Inverted Pendulum Using Grey Prediction Model. *IEEE Transactions on Industry Applications* (36), 452-458.
- J.Rubi, J., Rubio, A., & Avello, A. (2002). Swing-up control problem for a self-erecting double inverted pendulum. *Control Theory and Applications* , 169-175.
- Kano, M., Maruta, H., Kugemoto, H., & Shimizu, K. (2004). Practical model and detection algorithm for valve stiction. *7th IFAC DYCOPS*. Boston, USA.
- Karnopp, D. (1985). Computer simulation of stick slip friction in mechanical dynamic systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 107 , 100-103.
- Kim, C.-S., Hong, K.-S., & Kim, M.-K. (2005). Nonlinear robust control of a hydraulic elevator: experiment-based modeling and two-stage Lyapunov redesign. *Control Engineering Practice* , 789-803.

- Korb, W., Marmulla, R., Raczkowsky, J., Mühling, J., & Hassfeld, S. (2004). Robots in the operating theatre—chances and challenges. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* , 721-732.
- Krstic, M., Kanellakopoulos, I., & Kokotovic, P. (1995). *Nonlinear and Adaptive Control Design*. John Wiley and Sons.
- Kul, S. (2004). *Cevap Yüzeyi Yöntemi*. Mersin: Mersin Üniversitesi.
- Kübler. (2010, 5). *Miniature optic 2400*. 10 10, 2012 tarihinde The Kübler Group Web Site: http://www.kuebler.com/PDFs/leaflet/drehgeber/english/2400-2420_en.pdf adresinden alındı
- Lendaris, G., & Paintz, C. (1997). Training strategies for critic and action neural networks in dual heuristic programming method. *International Conference on Neural Networks*, (s. 712-717).
- Liu, L., Liu, H., Wu, Z., & Yuan, D. (2009). A new method for the determination of the zero velocity region of the Karnopp model based on the statistics theory. *Mechanical System and Signal Processing* , 1696-1703.
- Luh, J., Walker, M., & Paul, R. (1980). On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators. *Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* , 69-76.
- Mendil, B., & Benmahammed, K. (1999). FEP Learning Algorithm : Application to Direct Self-Learning Control. *Proc. Of the 1999 IEEE Int. Conf. On Control Applications*, (s. 432-435).
- Mohammad, M. A., & Hung, B. (2011). Frequency analysis and experimental validation for stiction phenomenon in multi-loop processes. *Journal of Process Control* , 437-447.
- Montgomery, D. (2001). *Design and Analysis of Experiments* (5th Edition b.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Mouri, K., Terashima, K., Minyong, P., Kitagawa, H., & Miyoshi, T. (2007). Identification and hybrid impedance control of human skin muscle by multi-

fingered robot hand. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* , (s. 2895-2900).

Muskinja, N., & Tovornik, B. (2006). Swinging Up and Stabilization of a Real Inverted Pendulum. *Industrial Electronics* , 631-639.

Nakayama, S., Deng, M., Bi, S., & Yanou, A. (2010). Genetic algorithm with a robust solution searching scheme based controller parameters selection of a cart-type inverted pendulum. *Modelling, Identification and Control*, (s. 568-573). Okayama.

Pavkovic, D., Deur, J., & Lisac, A. (2011). A torque estimator-based control strategy for oil-well drill-string torsional vibrations active damping including an auto-tuning algorithm. *Control Engineering Practice* 19 , 839-850.

Platt, R., Abdallah, M., & Wampler, C. (2011). Multiple-priority impedance control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, (s. 6033-6038).

Pratt, J. E. (1995). *Virtual Model Control of a Biped Walking Robot*. Massachusetts Institute of Technology.

Pratt, J., & Pratt, G. (1998). Intuitive Control of a Planar Bipedal Walking Robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Belgium.

Pratt, J., Chew, C.-M., Torres, A., Dilworth, P., & Pratt, G. (2001). Virtual Model Control: An Intuitive Approach for Bipedal Locomotion. *The International Journal of Robotics Research* (20), 129-143.

Pratt, J., Dilworth, P., & Pratt, G. (1997). Virtual Model Control of a Bipedal Walking Robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Albuquerque.

Pratt, J., Torres, A., Dilworth, P., & Pratt, G. (1996). Virtual actuator control. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Osaka.

Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press.

- Rashid, U., Anwar, F., Ashraf, M., Saleem, M., & Yusup, S. (2011). Application of response surface methodology for optimizing transesterification of moringa oleifera oil: Biodiesel production. *Energy Convers Manage* (52), 3034–3042.
- Romano, R. A., & Claudio, G. (2007). Comparison Between Two Friction Model Parameter Estimation Methods Applied To Control Valves. *8th International IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems*, (s. 303-308). Cancún, Mexico.
- Rubi, J., Rubio, A., & Avello, A. (2002). Swing-up control problem for a self-erecting double inverted pendulum. *Control Theory and Applications* (149), 169 - 175.
- Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N., & Fujimura, K. (2002). The intelligent ASIMO: system overview and integration. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (s. 2478-2483).
- Shen, X. (2010). Nonlinear model-based control of pneumatic artificial muscle servo systems. *Control Engineering Practice* , 311–317.
- SolidWorks. (2010). *SolidWorks Help*. 10 21, 2011 tarihinde SolidWorks: http://help.solidworks.com/2012/English/SolidWorks/sldworks/HIDD_MASSPROPERTY_TEXT_DLG.htm adresinden alındı
- Sugihara, T., Nakamura, Y., & Inoue, H. (2002). Real-time humanoid motion generation through ZMP manipulation based on inverted pendulum control. *Robotics and Automation* (2), 1404 - 1409.
- Tekindal, M. (2009). *Yanıt Yüzeyi Metodu ve Bir Uygulama*. Gazi Üniversitesi.
- Tolat, V., & Widrow, B. (1988). An adaptive ‘broom balancer’ with visual inputs. *IEEE International Conference on Neural Networks*, (s. 641-647). San Diego.
- Vishay. (2000). *Model 157 product information*. 10 5, 2012 tarihinde Vishay Spectrol Web Site: <http://www.vishay.com/docs/57042/157.pdf> adresinden alındı
- Wang, L.-M. (2010). Generalized Projective Chaos Synchronization of Rotational Simple Pendulum Subjected to External Disturbance Using Fuzzy Sliding Mode Control. *Information Engineering and Computer Science (ICIECS)* (s. 1-4). IEEE.

- Wang, L.-X. (1996). Stable adaptive fuzzy controllers with application to inverted pendulum tracking. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics* (26), 677 - 691.
- Wenzel, L., Vazquez, N., & Jamal, N. N. (2000). Computer vision based inverted pendulum. *Proc. of IEEE Conference on Instrumentation and Measurement Technology*, (s. 1319-1323).
- Williams, V., & Matsuoka, K. (1991). Learning to Balance the Inverted Pendulum Using Neural Networks. *Neural Networks, IEEE Int. Joint Conference on*, (s. 214-219).
- Williamson, S. E. (1969b). Accurate Root Locus Plotting Including the Effects of Pure Time Delay. *Proc. IEE 116* (7), 1269-1271.
- Williamson, S. E. (1969a). Computer Program to Obtain the Time Response of Sampled Data Systems. *IEE Electronics Letters* 5 (10), 209-210.
- Williamson, S. E. (1968a). Design Data to assist the Plotting of Root Loci (Part I). *Control Magazine* 12 (119), 404-407.
- Williamson, S. E. (1968b). Design Data to assist the Plotting of Root Loci (Part II). *Control Magazine* 12 (120), 556-559.
- Williamson, S. E. (1968c). Design Data to assist the Plotting of Root Loci (Part III). *Control Magazine* 12 (121), 645-647.
- Yalcinkaya, O., & Bayhan, G. M. (2009). Modelling and optimization of average travel time for a metro line by simulation and response surface methodology. *European Journal of Operational Research* , 1 (196), 225–233.
- Zhang, Y., & Chong, K. T. (2009). Time-discretization of nonlinear control systems with state-delay via Taylor–Lie series. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications* , 83-98.
- Zhao, Y., & Collins, E. J. (2003). Non-model-based control for an industrial weigh belt feeder. *American Control Conference* (s. 3667 - 3672 vol.5). Denver, Colorado: IEEE.

Zhao, Y.-z., Qiu, L.-K., & Zhang, Y.-x. (2011). Model-based Friction Compensation Scheme for the Linear Inverted Pendulum. *2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer* (s. 554-558). Jilin: IEEE.