T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAVA ARACI İNİŞ TAKIMININ ANALİZİ VE KONTROLÜ

Mustafa GENÇ

DANIŞMAN
Prof. Dr.Recep BURKAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Ekim, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa GENÇ tarafından, **Prof. Dr.Recep BURKAN** danışmanlığında hazırlanan **"HAVA ARACI İNİŞ TAKIMININ ANALİZİ VE KONTROLÜ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **23/10/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Recep BURKAN İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Erol UZAL İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Makine Mühendisliği AnabilimDalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Cengiz ÖZBEK Beykent Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

Bu çalışmayı, başarı yolculuğum boyunca yanımda olan çok değerli eşim Gamze KAYA GENÇ'e, her daim desteklerini hissettiğim aileme, beni ilim yolunda yüreklendiren danışman hocam Prof. Dr. Recep BURKAN'a ve hayatım boyunca üzerimde emekleri asla ödenemeyecek rahmetli annem ve babama minnet ve özlemle ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

HAVA ARACI İNİŞ TAKIMININ ANALİZİ VE KONTROLÜ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışması sürecinde, akademik bilgi ve birikimiyle bana yol gösteren, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Recep BURKAN'a ve bu çalışma kapsamında göstermiş olduğu ilgi ve desteklerinden dolayı sayın Dr. Öğr. Üyesi Cengiz ÖZBEK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu süreçte manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim sevgili eşim Gamze KAYA GENÇ'e, beni her daim yüreklendiren aileme ve üzerimdeki emekleri ömür boyu unutulmayacak olan rahmetli annem ve rahmetli babama en derin şükranlarımı sunuyorum.

Ekim 2025 **Mustafa GENÇ**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **xi**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xii**
ÖZET ..... **xv**
ABSTRACT ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **4**
2.1. İNİŞ TAKIMI SİSTEMLERİNİN YAPISI VE GÖREVLERİ 4
2.2. İKİ SERBESTLİK DERECELİ SÜSPANSİYON SİSTEMLERİ VE DİNAMİK DAVRANIŞ 5
2.3. LAGRANGE METODU İLE MEKANİK SİSTEM MODELLEME 6
2.4. KONTROLCÜ YAPILARI UYGULAMA YÖNTEMLERİ 7
2.4.1. Klasik PID Kontrolcü ve Uygulaması 7
2.4.2. Uyarlamalı (Adaptif) Kontrol Yaklaşımı 8
2.4.3. Uyarlamalı-Gürbüz (Adaptive-Robust) Kontrolcü Tasarımı 9
2.5. PİST PROFİLİ VE DIŞ UYARAN MODELLEMESİ 14
3. YÖNTEM **17**
3.1. SİSTEM YAPISI VE MATEMATİKSEL MODELLEME 17
3.2. SİMÜLASYON TASARIMI 19
3.2.1. Simülasyon Ortamı ve Modelin Kurulması 20
3.2.2. Başlangıç Koşulları 23
3.2.3. Simülasyon Senaryoları 24
3.3. KONTROLCÜ YAPILARININ TASARIMI 24

3.3.1. Klasik PID Kontrolcünün Uygulama Tasarımı 25
3.3.2. Uyarlamalı (Adaptif) Kontrolcünün Uygulama Tasarımı 26
3.3.3. Uyarlamalı-Gürbüz (Adaptive- Robust) Kontrolcünün Uygulama Tasarımı 28
4. BULGULAR 32
4.1. KONTROLSÜZ (PASİF) SİSTEM SONUÇLARI 32
4.2. PID KONTROLLÜ SİSTEM SONUÇLARI 35
4.3. ADAPTİF KONTROLLÜ SİSTEM SONUÇLARI 37
4.4. ADAPTİF-ROBUST KONTROLLÜ SİSTEM SONUÇLARI 39
4.5. KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRME 42
5. TARTIŞMA 48
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 51
KAYNAKLAR 54
EKLER 56
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 61
ETİK KURUL İZİN YAZISI 65
KURUM İZNİ YAZILARI 66
ÖZGEÇMİŞ 67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: İki Serbestlik Dereceli İniş Takımı Modeli 3

Şekil 2.1: Uçakta Burun ve Ana İniş Takımı Konumları 4

Şekil 2.2: Zemin (Pist) Profili 15

Şekil 2.3: Sönümlü Sinüzoidal Dış Kuvvet Profili 16

Şekil 3.1: İniş Takımı Sistemi Simülasyon Modelinin Genel Görünümü 20

Şekil 3.2: İniş Takımı Sisteminin Alt Sistemleri (Tekerlek ve Dikme) 21

Şekil 3.3: İniş Takımı Sisteminin Dikme (m_2) Alt Sisteminin Simülasyon Modeli 22

Şekil 3.4: İniş Takımı Sisteminin Tekerlek (m_1) Alt Sisteminin Simülasyon Modeli 23

Şekil 3.5: PID Kontrolcü Genel Yapısının Görünümü 25

Şekil 3.6: PID Kontrolcü İç Yapısının Görünümü 26

Şekil 3.7: Adaptif Kontrolcü Genel Yapısının Görünümü 27

Şekil 3.8: Adaptif Kontrolcü İç Yapısının Görünümü 27

Şekil 3.9: Adaptif Kontrolcü Tahmin Blok Yapısının Görünümü 28

Şekil 3.10: Adaptif Robust Kontrolcü Genel Yapısının Görünümü 29

Şekil 3.11: Adaptif Robust Kontrolcü İç Yapısının Görünümü 30

Şekil 3.12: Adaptif Robust Kontrolcü Tahmin Blok Yapısının Görünümü 30

Şekil 4.1: Kontrolsüz (Pasif) Sistemin Konum (y_2), İvme (a_2) ve Kontrol Kuvveti (u) Grafikleri 33

Şekil 4.2: Kontrolsüz (Pasif) Sistemin Süspansiyon Açıklığı ($y_2 - y_1$) 34

Şekil 4.3: Kontrolsüz (Pasif) Sistemin Dinamik Tekerlek Yükü (N) 34

Şekil 4.4: PID Kontrollü Sistemin Konum (y_2), İvme (a_2) ve Kontrol Kuvveti (u) Grafikleri 35

Şekil 4.5: PID Kontrollü Sistemin Süspansiyon Açıklığı ($y_2 - y_1$) 36

Şekil 4.6: PID Kontrollü Sistemin Dinamik Tekerlek Yükü (N) 37

Şekil 4.7: Adaptif Kontrollü Sistemin Konum (y_2), İvme (a_2) ve Kontrol Kuvveti (u) Grafikleri 38

Şekil 4.8: Adaptif Kontrollü Sistemin Süspansiyon Açıklığı ($y_2 - y_1$) 38

Şekil 4.9: Adaptif Kontrollü Sistemin Dinamik Tekerlek Yükü (N) 39

Şekil 4.10: Adaptif Robust Kontrollü Sistemin Konum (y_2), İvme (a_2) ve Kontrol Kuvveti (u) Grafikleri 40

Şekil 4.11: Adaptif Robust Kontrollü Sistemin Süspansiyon Açıklığı ($y_2 - y_1$) 41

Şekil 4.12: Adaptif Robust Kontrollü Sistemin Dinamik Tekerlek Yükü (N) 42

Şekil 4.13: Tüm Kontrolcülerin Konum (y_2), İvme (a_2) ve Kontrol Kuvveti (u) Karşılaştırma Grafikleri 43

Şekil 4.14: Tüm Kontrolcülerin Süspansiyon Açıklığı ($y_2 - y_1$) Karşılaştırma Grafiği 44

Şekil 4.15: Tüm Kontrolcülerin Dinamik Tekerlek Yükü (N) Karşılaştırma Grafiği 45

Şekil 4.16: Dikme ve Tekerlek İçin Pist Takip Hatası Karşılaştırma Grafikleri 46

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: Kontrolcü Performans Karşılaştırması 47

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
m_1	: Tekerlek ve bağlı alt parçaların (alt sistem) kütlesi
m_2	: Dikme ve bağlı üst parçaların (üst sistem) kütlesi
k_1	: Tekerlek-yol arasındaki yay sabiti
k_2	: Tekerlek-dikme arası yay sabiti
c	: Sönümleme katsayısı
y_0	: Pist profili (zemin girişi sinyali - literatürde yaygın kullanılan gösterim)
z_t	: Pist profili (bu çalışmadaki modelde kullanılan gösterim)
y_1	: Tekerlek konumu
y_2	: Dikme konumu
a	: İvme
K_p	: Oransal kazanç (Proportional Gain)
K_i	: İntegral kazanç (Integral Gain)
K_d	: Türev kazanç (Derivative Gain)
λ	: Hata dinamiğini belirleyen kontrol kazancı
Φ	: Tahmin edilen parametre vektörü
σ	: Hata dinamiğini temsil eden kontrol değişkeni
$\tilde{\eta}$	: Hata vektörü
ε	: Skalar katsayı
α	: Kontrol parametresi
β	: Kontrol parametresi
P	: Kontrol parametresi
K_D	: Kazanç katsayısı
Ψ	: Adaptasyon katsayısı
b_1	: Adaptasyon katsayısı
ω	: Tahmin katsayısı
Y	: Regresör matrisi
$\tilde{\pi}$	: Parametre tahmin hatası
u	: Kontrol girdisi (aktüatör kuvveti)

e : Sistem hatası (Referans sinyali ile sistem çıkışı arasındaki fark)

$\boldsymbol{f}$: Sürtünme kuvveti

$\boldsymbol{L}$: Dış bozucu kuvvet

$\boldsymbol{V}$: Yatay doğrultudaki hızı

$\boldsymbol{t}$: Zaman değişkeni

T : Kinetik enerji

V : Potansiyel enerji

Kısaltmalar	**Açıklama**
DOF	: Serbestlik Derecesi
LQR	: Linear Quadratic Regulator (Doğrusal Kare Regülatör)
PID	: Oransal–Integral–Türevsel Kontrolcü

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAVA ARACI İNİŞ TAKIMININ ANALİZİ VE KONTROLÜ

Mustafa GENÇ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman : Prof. Dr.Recep BURKAN

Bu çalışmada, hava aracı iniş takımı sisteminin dış bozucu etkiler altındaki dinamik davranışının modellenmesi ve kontrol performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın temel hedefi, zamana bağlı değişen kuvvetler altında iniş takımı sisteminin kararlılığını koruyabilen kontrolcü yapılarının incelenmesidir. Bu kapsamda geliştirilen iki kütleli modelde, tekerlek ve dikme alt sistemlerinin etkileşimi yay ve sönümleyici elemanlar aracılığıyla tanımlanmıştır. Sisteme, iniş esnasında ortaya çıkan aerodinamik etkileri temsil eden zamana bağlı sönümlü bir dış kuvvet uygulanmıştır.

Araştırmada, sistemin kontrolsüz ve kontrolcülü durumları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. PID, adaptif ve adaptif-robust kontrol stratejileri uygulanarak, farklı kontrolcü yapılarının salınım, kararlılık ve pist takibi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Analizler, bilgisayar tabanlı bir simülasyon ortamında gerçekleştirilmiş ve konum, ivme, süspansiyon açıklığı ile dinamik tekerlek yükü gibi temel parametreler incelenmiştir.

Elde edilen bulgular, kontrolcülerin sistemin dış bozucular karşısındaki dayanıklılığını artırdığını, titreşimleri bastırdığını ve pist profilini daha yüksek doğrulukla takip edebildiğini göstermektedir. Özellikle adaptif ve adaptif-robust kontrol yapılarının, değişken parametreler altında kararlılığı koruma ve dış etkileri dengeleme açısından daha başarılı sonuçlar sunduğu belirlenmiştir.

Çalışma, zamana bağlı dış kuvvet tanımı ve kapsamlı kontrolcü karşılaştırmalarıyla literatürdeki sabit kuvvetli modellere kıyasla daha gerçekçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yönüyle, geliştirilen modelin hem akademik araştırmalar hem de mühendislik uygulamaları açısından kullanılabilir bir referans altyapı oluşturduğu değerlendirilmektedir.

Ekim 2025 86 sayfa.

Anahtar kelimeler:İniş Takımı, Adaptif Kontrol, Adaptif-Robust Kontrol

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

ANALYSIS AND CONTROL OF AN AIRCRAFT LANDING GEAR SYSTEM

Mustafa GENÇ

Istanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Mechanical Engineering, Master Sc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr.Recep BURKAN

In this study, the dynamic behavior of an aircraft landing-gear system under external disturbances was modeled and its control performance was evaluated. The main objective of the research is to investigate control structures capable of maintaining system stability under time-varying forces during the landing phase. For this purpose, a two-mass model was developed in which the wheel and strut subsystems were connected through spring and damping elements. A time-dependent, damped external force representing aerodynamic and ground-induced effects during landing was applied to the system to provide a realistic representation of external disturbances.

The study comparatively analyzed uncontrolled and controlled configurations of the system. PID, adaptive, and adaptive-robust control strategies were implemented to assess the effects of different controllers on oscillation suppression, stability improvement, and ground-tracking performance. Simulations were performed in a computer-based environment, and critical system responses such as displacement, acceleration, suspension deflection, and dynamic wheel load were examined.

The results indicate that the implemented controllers enhanced the system's resistance against external disturbances, suppressed oscillations, and improved the accuracy of ground-profile tracking. In particular, the adaptive and adaptive-robust control structures demonstrated superior performance in maintaining stability and mitigating disturbance effects under varying system parameters.

By introducing a time-varying external force and a comprehensive control-comparison framework, this study provides a more realistic representation than conventional fixed-force models. Accordingly, the developed model can serve as a reliable reference platform for both academic research and practical engineering applications related to aircraft landing-gear dynamics and control.

October 2025, 86 pages.

Keywords: Landing Gear, Adaptive Control, Adaptive-Robust Control

1. GİRİŞ

Hava araçlarında iniş takımı sistemleri, sadece kalkış ve iniş anlarında değil, yerdeki taksi, yönlendirme ve frenleme gibi hareketler sırasında da önemli görevler üstlenir. Uçağın toplam ağırlığını taşımak, zeminden kaynaklanan şokları sönümlemek ve yapısal bütünlüğü korumak açısından kritik öneme sahip olan bu sistemler, hem konfor hem de güvenlik açısından tasarımda özel ilgi gerektirir. İnişin yüksek hızda gerçekleşmesi, yüzey pürüzleri, ağırlık değişimi ve aerodinamik etkiler gibi çeşitli faktörler iniş takımı üzerinde değişken yükler oluşturur. Bu nedenle yalnızca mekanik dayanım değil, aynı zamanda sistemin dinamik karakteristikleri de tasarımda önemli rol oynar.

Geleneksel iniş takımı sistemleri çoğunlukla pasif elemanlara dayanır. Yay ve sönümleyici kombinasyonları ile dış yüklerin bir kısmı sönümlenmeye çalışılsa da, bu sistemlerin dış koşullara uyum yeteneği sınırlıdır. Arazi pürüzleri, farklı ağırlık konfigürasyonları veya değişken hızlar gibi durumlarda, sistemin doğal frekansı sabit kaldığından performans düşebilir [1]. Ayrıca titreşimleri yeterli düzeyde bastıramayan pasif sistemler hem yapısal yorgunluğa neden olabilir hem de pilot ve ekipman üzerinde konfor sorunları yaratabilir. Bu nedenle, özellikle yüksek performanslı veya insansız hava araçlarında, iniş takımlarının dinamik yanıtını geliştirmeye yönelik yeni yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

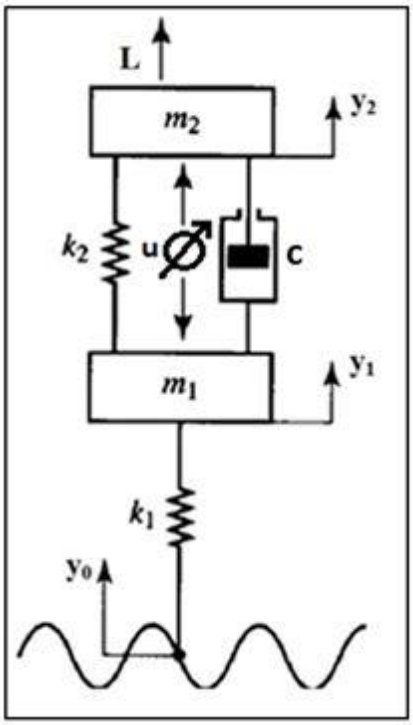
Modern kontrol tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, aktif süspansiyon yapıları iniş takımı sistemlerine entegre edilmeye başlanmıştır. Aktif sistemler, sensörler ve aktüatörler vasıtasıyla anlık duruma göre tepki verebilir, sistemin rijitliğini ve sönüm katsayısını çevre koşullarına göre değiştirebilir. Özellikle PID (Proportional-Integral-Derivative) tabanlı kontrol sistemleri, belirli koşullar altında sistemin salınım davranışını etkin biçimde düzenleyebilmekte ve zeminle olan teması optimize edebilmektedir [2]. Ancak, bu kontrolcüler model hassasiyetine bağlı çalıştıkları için parametre belirsizlikleri ve dış bozucular karşısında sınırlı başarı gösterebilirler.

Bu noktada adaptif kontrol sistemleri devreye girmekte ve sistemin parametrelerini çevresel etkilere göre gerçek zamanlı olarak tahmin edip dengeleme imkânı sunmaktadır [3].

Özellikle iniş takımlarında kullanılan adaptif kontrolcüler, kütle değişimleri, pist pürüzleri veya ani kaldırma kuvveti değişimleri gibi senaryolarda performansın korunmasını sağlayabilir. Gelişmiş varyantlar olan adaptif-robust kontrolcü yapıları ise hem parametre belirsizliğini hem de dış bozucuları aynı anda bastırma potansiyeliyle ön plana çıkmaktadır [4].

Bu çalışmada, bir hava aracının iniş takımı modeli geliştirilmiş ve bu modele farklı kontrolcü yapıları uygulanarak performans değerlendirmesi yapılmıştır. Modelde iki kütleli bir sistem yaklaşımı benimsenmiş olup; alt kütle tekerleği, üst kütle ise dikme ve ona bağlı yapısal bileşenleri temsil etmektedir. Sistem dinamikleri, Lagrange yöntemi kullanılarak elde edilen diferansiyel denklemlerle ifade edilmiştir. Modelde dış kuvvet olarak, zamana bağlı azalan ve sinüzoidal karaktere sahip bir kuvvet profili tanımlanmıştır. Bu kuvvet, aerodinamik etkilerle benzer şekilde yukarı yönlü uygulanmış olup, iniş sırasında gövdeden veya pist yüzeyinden dikmeye iletilen dinamik tepki kuvvetlerini temsil eden bir dış bozucu olarak modellenmiştir. Bu yaklaşım, sistemin dış etkiler karşısındaki tepkilerini analiz etmeye ve kontrolcünün bu etkileri bastırma kabiliyetini incelemeye imkân sağlamaktadır. Ayrıca, sistemin zeminle etkileşimini daha gerçekçi modelleyebilmek amacıyla zamana ve hıza bağlı olarak değişen bir rampa profili tanımlanmıştır. Bu yapı, belirli bir süre boyunca yükselen ve sabit kalan zemin yüzeyinin daha sonra tekrar eski seviyeye dönmesini temsil etmektedir. Böylece model, iniş sürecinde iniş takımına etki eden dış uyaranlara karşı dinamik yanıtların gözlemlenmesine olanak tanımaktadır.

Tez kapsamında dört farklı kontrol senaryosu değerlendirilmiştir. İlk olarak sistemin kontrolsüz (pasif) durumu incelenmiş, ardından PID, adaptif ve adaptif-robust kontrolcü yapıları ayrı ayrı uygulanmıştır. Her bir kontrol stratejisi, sistemin zamana bağlı değişen dış bozucu etkiler altındaki kararlılığını koruma kabiliyeti açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda; konum yanıtı (y_2), ivme yanıtı (a_2) ve kontrol kuvveti (u) gibi temel büyüklükler karşılaştırılmış; ayrıca süspansiyon açıklığı (y_2-y_1) ve dinamik tekerlek yükü gibi fiziksel parametreler üzerinden sistem davranışı değerlendirilmiştir. Uygulanan yol profiline karşı iniş takımının takip doğruluğu incelenmiş ve kontrolcülerin zemine uyum performansları karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.1: İki Serbestlik Dereceli İniş Takımı Modeli

Şekil 1.1'de çalışmada oluşturulan genel model yapısı gösterilmektedir. İki kütleli sistem, yay ve sönüm elemanları ile temsil edilmiş ve dış kuvvet (L) ile zemin profili (zt) modele entegre edilmiştir. Sistemin bu yapısı, hem literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmaya uygunluk sağlamakta hem de geliştirilen kontrol algoritmalarının doğrulanmasını mümkün kılmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, geliştirilen iniş takımı modeline farklı kontrol yapılarının uygulanması ve bu yapıların performanslarının detaylı biçimde analiz edilmesidir. Nihai hedef; kontrolcünün, sistemdeki belirsizlikler ve dış bozucu etkiler karşısında, yapısal sönümleme kapasitesini ve pist profilini takip yeteneğini maksimize etmesidir. Bu kapsamda yapılan simülasyonlar, kontrolcü tasarımlarının etkinliğini sayısal veriler ve grafik çıktılar üzerinden ortaya koymaktadır.

Bu tez altı ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmanın amacı, kapsamı ve genel bilgiler sunulmuştur. İkinci bölümde kavramsal çerçeveye yer verilmiş, ilgili altyapı kavramları açıklanmıştır. Üçüncü bölümde sistemin matematiksel modeli ve kontrolcü tasarımı detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde simülasyonlar ve elde edilen sonuçlara ilişkin bulgular sunulmuştur. Beşinci bölümde bu bulgular tartışılmış ve yorumlanmıştır. Altıncı ve son bölümde ise genel bir değerlendirme yapılmış, sonuçlar özetlenmiş ve öneriler sunulmuştur.

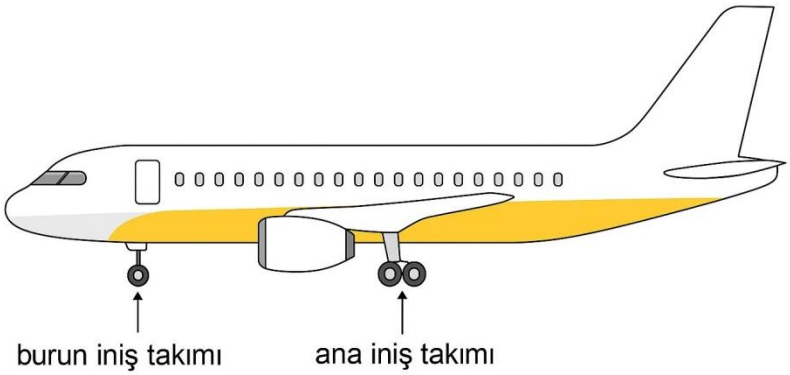
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. İNİŞ TAKIMI SİSTEMLERİNİN YAPISI VE GÖREVLERİ

Hava aracı tasarımında iniş takımları, yalnızca taşıyıcı bir yapı değil; aynı zamanda iniş, kalkış ve yerde hareket gibi kritik evrelerde doğrudan görev alan, yapısal güvenliği ve operasyonel bütünlüğü etkileyen bir alt sistemdir. Uçuş boyunca aktif olmayan bu sistem, özellikle iniş anında karşılaşılan dikey yükleri ve dış etkenleri absorbe ederek üst yapı üzerindeki gerilmeleri azaltır. Görev çevrimi sonrasında hava aracının yeniden kullanılabilirliğini doğrudan etkileyen bir bileşendir [5].

İniş takımı sistemleri genel olarak iki ana bileşene ayrılır: burun iniş takımı ve ana iniş takımı. Burun iniş takımı, hava aracının yönlendirilmesi ve pist üzerindeki hareketliliği için gereklidir. Ana iniş takımı ise uçağın tüm ağırlığını taşıyan, darbe yüklerini karşılayan ve yapısal dengeyi sağlayan esas taşıyıcı elemandır. Dikmelerin üst yapı üzerindeki konumlandırması, platform tipine göre değişmekle birlikte; çoğu durumda ana dikmeler kanat altı, motor bölgesi ya da gövdeye entegre noktalarda yer alır. Bu yerleşim, hem ağırlık merkezine yakınlık hem de yük dağılımı açısından önemlidir [6]. Bu nedenle, bu çalışmada iniş takımı, ana dikme sisteminin dinamik davranışları temel alınarak incelenmiştir.

Şekil 2.1'de tipik bir yerleşim gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Uçakta Burun ve Ana İniş Takımı Konumları

İniş takımları yalnızca statik yük taşımaz; iniş anında yüksek ivmeli darbe yüklerine ve pürüzlü pist koşullarına da maruz kalır. Bu etkileri sönümleyebilmek amacıyla dikme sistemleri, yay ve sönümleyici bileşenlerin bir araya geldiği dinamik sistem modellerinden oluşur.

Özellikle tekerleğin zeminle ilk teması esnasında oluşan darbe, süspansiyon sistemi tarafından absorbe edilmezse, bu durum üst yapı elemanlarında hasara yol açabilecek düzeyde ivmeler oluşturabilir.

Bu nedenle iniş takımı tasarımında hem darbe emici performans hem de dinamik davranış tayini kritik parametreler arasında yer alır [7].

Günümüzde insansız hava araçlarında, iniş takımlarının modüler yapıda ve hafif malzemelerden üretilmesi hem taşıma kapasitesini artırmakta hem de sistemin tekrar kullanılabilirliğini desteklemektedir. Özellikle operasyon sahasında, farklı pist yüzeylerine uyum sağlayabilen ve görev çevrimine minimum zarar veren iniş takımı yapıları tercih edilmektedir. Bu gereksinimlere uygun olarak geliştirilen sistemlerde darbe kontrolü, yay/sönüm parametrelerinin optimize edilmesi ve gerektiğinde aktif kontrol sistemleriyle desteklenmesi yaygın bir yaklaşımdır [5, 7].

2.2. İKİ SERBESTLİK DERECELİ SÜSPANSİYON SİSTEMLERİ VE DİNAMİK DAVRANIŞ

Süspansiyon sistemlerinin modellenmesinde kullanılan serbestlik derecesi, sistemin dinamik davranışını tanımlamada belirleyici bir rol oynar. Basit tek serbestlik dereceli modeller, yalnızca bir kütlenin hareketini esas alarak sistem tepkisini belirlemeye çalışır. Ancak bu tür yaklaşımlar, özellikle iniş takımı gibi karmaşık yapılarda yeterli fiziksel gerçekliği yansıtmaz.

Gerçek bir iniş takımı sisteminde hem tekerlek hem de üst yapı bağımsız hareket kabiliyetine sahiptir. Ayrıca, dış ortam koşulları veya aerodinamik etkilerden kaynaklanan ek kuvvetler de sisteme etki eder. Bu tür kuvvetler, özellikle iniş ve taksi sürecinde sistemin kararlılığını etkileyebilecek bozucu girdiler olarak değerlendirilir. Bu nedenle iki kütleli yapıların temsil ettiği iki serbestlik dereceli sistemler, daha isabetli bir dinamik analiz olanağı sunar [8].

İki serbestlik dereceli süspansiyon sistemlerinde, m_1 ile gösterilen ilk kütle genellikle tekerlek alt takımıdır. Bu kütle, pistten doğrudan etkilenir ve zemin profilindeki değişimlere ilk tepkiyi verir. İkinci kütle olan m_2 ise üst yapıyı temsil eder; bu yapı, dikme sistemi ve ona bağlı yapısal bileşenlerden oluşur. İki kütle, yay ve sönüm elemanları aracılığıyla birbirine bağlanır. Böylece sistem, hem zemin kaynaklı darbeleri hem de üst yapı-tekerlek

etkileşimlerini ayrı ayrı değerlendirebilir. Her bir kütlenin hareket denklemi, hem kendi üzerindeki kuvvetleri hem de bağıl hareketten kaynaklanan dinamik etkileşimleri içerir [9].

Bu tür modellerin en büyük avantajı, üst yapının dinamik konfor seviyesini ve tekerlek zemin teması sürekliliğini eşzamanlı analiz edebilmeleridir. Ayrıca bu yapı, dış kuvvetler karşısında sistemin hem konum hem ivme yanıtını ayrı ayrı izleyebilme imkânı tanır. Özellikle iniş sırasında, tekerlek ve üst yapı arasındaki bağıl hareketin sönüm davranışı üzerindeki etkisi bu model üzerinden net şekilde gözlemlenebilir [10].

Gerçek uçak iniş takımlarında da benzer şekilde bağımsız fakat etkileşimli alt sistemler bulunur. Bu nedenle iki serbestlik dereceli modeller, akademik literatürde iniş takımı sistemlerinin dinamik analizinde yaygın olarak tercih edilir. Söz konusu modeller, özellikle bilgisayar simülasyonu ortamlarında kolaylıkla parametrik olarak tanımlanabilir ve kontrolcü tasarımları için başlangıç zemini sağlar [8, 11].

2.3. LAGRANGE METODU İLE MEKANİK SİSTEM MODELLEME

Mekanik sistemlerin dinamik analizinde kullanılan Lagrange yaklaşımı, Newton yöntemine kıyasla daha sistematik ve enerji temelli bir çözüm yolu sunar. Özellikle çok serbestlik dereceli sistemlerde, karmaşık kuvvet etkileşimlerini daha sade ve takip edilebilir bir yapıda ifade edebilme imkânı sağlar. Bu yaklaşımda temel prensip; sistemin toplam kinetik ve potansiyel enerjileri kullanılarak tanımlanan Lagrange fonksiyonunun türevleri üzerinden hareket denklemlerinin elde edilmesidir [4].

Lagrange yöntemi ikinci tip olarak bilinen formda, denklem (2.1) ile tanımlanır.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \tag{2.1}$$

$$\mathrm{L} = T - V \tag{2.2}$$

Bu denklemde belirtilen L, sistemin Lagrange fonksiyonu olup denklem (2.2)'de gösterildiği üzere toplam kinetik (T) ve potansiyel (V) enerjilerin farkı olarak tanımlanır. D, sistemde yer alan sönümleyici elemanların etkisini modelleyen Rayleigh sönüm fonksiyonudur. Q_i ise sistemin genelleştirilmiş dış kuvvetleridir. Bu formülasyon, lineer olmayan ya da zamanla değişen sistem parametrelerini içeren modellerde de geçerliliğini korumaktadır [12].

İki serbestlik dereceli bir sistem düşünüldüğünde, genellikle q1=y1 (tekerlek konumu) ve q2=y2 (üst yapı konumu) olarak tanımlanır. Her iki kütlenin de kinetik enerjisi ayrı ayrı ifade edilirken, yay elemanlarının uzama miktarlarına göre potansiyel enerji hesaplanır. Sönümleyici kuvvetler ise bağıl hız farkları üzerinden Rayleigh sönüm terimi olarak sisteme dahil edilir. Böylece sistemin toplam enerji ifadeleri üzerinden elde edilen Lagrange denklemleri, doğrudan ikinci mertebeden diferansiyel denklemler halinde düzenlenebilir.

Bu yöntemle oluşturulan matematiksel model, sistemin fiziksel parametrelerine (kütle, yay, sönüm gibi) bağlı olarak kontrol tasarımına uygun bir yapı sunar. Ayrıca Lagrange tabanlı modelleme, kontrolcülerin uygulanacağı bilgisayar simülasyonu ortamına aktarılırken tutarlı ve izlenebilir bir zemin hazırlar. Özellikle adaptif ve robust kontrol uygulamaları için sistem dinamiklerinin açık ve simetrik formda elde edilmesi, bu yöntem sayesinde mümkün olur [1, 13].

2.4. KONTROLCÜ YAPILARI UYGULAMA YÖNTEMLERİ

2.4.1. Klasik PID Kontrolcü ve Uygulaması

Oransal–integral–türevsel (PID) kontrol yapısı, mühendislik sistemlerinde uzun süredir yaygın olarak kullanılan, basit yapısına rağmen etkili sonuçlar verebilen bir kontrol tekniğidir. PID kontrolcü, sistemde oluşan hata sinyaline doğrudan tepki vererek kontrol sinyalini üretir ve sistem yanıtının istenen referansa yakınsamasını sağlar. Bu özellikleri sayesinde PID yapısı, pek çok fiziksel sistemin ilk kontrolcü prototipi olarak tercih edilmektedir [14].

Genel PID denklemi, denklem (2.3)'teki gibi ifade edilir.

$$u(t) = K_P e(t) + K_i \int e(t)\, dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{2.3}$$

Burada e(t) referans ile çıkış arasındaki hata sinyalini, Kp, Ki ve Kd ise sırasıyla oransal, integral ve türevsel kazançları ifade eder. Bu kazançlar doğru biçimde ayarlandığında sistemde hem kararlılık sağlanabilir hem de istenmeyen salınımlar azaltılabilir. Bu yönüyle PID kontrol, pratikte sıkça tercih edilen ve bilgisayar simülasyonu ortamlarına kolaylıkla entegre edilebilen bir yapıdır [15].

Bu çalışmada PID kontrolcü, sistemin temel dinamiklerine ilk müdahale yapısı olarak kullanılmıştır. Simülasyonlar boyunca iniş takımı modeli üzerinde PID kontrolün etkileri

gözlemlenmiş; özellikle salınım süresi, yer değiştirme miktarı ve pist takibi performansı gibi metriklerde başlangıç değerlendirmeleri bu yapı ile yapılmıştır. Bu süreç, daha ileri düzey kontrolcülerin (uyarlamalı ve gürbüz yapılar) geliştirilmesi için zemin oluşturmuştur. Böylece klasik PID kontrolcünün sağladığı avantajlar kadar, sahip olduğu sınırlılıklar da belirlenmiş ve adaptif kontrolcü tasarımına geçiş gerekçelendirilmiştir [11].

2.4.2. Uyarlamalı (Adaptif) Kontrol Yaklaşımı

Uyarlamalı kontrol, sistem parametrelerinin tam olarak bilinmediği veya zamanla değişkenlik gösterdiği durumlarda etkin kontrol performansı sağlayan gelişmiş bir yöntemdir. Bu yaklaşımda, sistemin bazı parametrelerinin tahmin edilerek kontrol kanununa entegre edilmesiyle, klasik kontrolcülerin baş edemediği belirsizlikler giderilmeye çalışılır. Özellikle havacılık sistemleri gibi yüksek doğruluk gerektiren ve model belirsizliği taşıyan uygulamalarda, uyarlamalı kontrol yapıları önemli avantajlar sunar [16].

Adaptif kontrol sistemleri genel olarak iki temel bileşene sahiptir: kontrol yasası ve parametre tahmin algoritması. Bu yapı sayesinde sistem, çevrim içi olarak hem hatayı minimize etmeye çalışır hem de zamanla değişen sistem parametrelerine göre kendini günceller. Bu çalışmada kullanılan uyarlamalı kontrol yapısı, tekerlek-dikme sistemi üzerine tanımlanmış iki serbestlik dereceli mekanik modele uygulanmıştır. Modelde yer alan kütle, yay ve sönüm katsayıları gibi parametreler tahmin edilebilir değişkenler olarak ele alınmıştır.

Uyarlamalı kontrolcü, klasik PID yapısının sağlayamadığı parametre belirsizliği yönetimini mümkün kılmakta; bu sayede dış etkenlerden veya iniş sırasında ortaya çıkan fiziksel değişimlerden kaynaklanan sistem sapmalarını azaltmaktadır. Ayrıca sistemin tepkisi sadece konum hatası ile değil, tahmin edilen parametreler üzerinden de düzenlenerek çok boyutlu bir kontrol sağlanmaktadır [17].

Bu kontrol yaklaşımı, bilgisayar simülasyonu ortamında gerçek zamanlı parametre tahmini sağlayan yapıların modellenmesine de uygundur [18]. Çalışma kapsamında kullanılan yapıda, her bir sistem parametresi için ayrı bir tahminci tanımlanmış ve bu tahminler doğrudan kontrol sinyaline entegre edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, klasik PID kontrolcüye kıyasla daha iyi pist takibi, daha az yer değiştirme ve daha kısa salınım süresi gibi metriklerle adaptif yapının etkinliğini ortaya koymuştur.

2.4.3. Uyarlamalı-Gürbüz (Adaptive-Robust) Kontrolcü Tasarımı

Gürbüz (robust) kontrolcü yapıları, klasik kontrol sistemlerinden farklı olarak, model belirsizlikleri ve dış bozucular karşısında sistem performansını koruyabilen gelişmiş bir kontrol yaklaşımı sunar. Bu yöntem, sistem parametrelerinin tam olarak bilinmediği veya çevresel etkilerin modele doğrudan dâhil edilemediği durumlarda, sistemin kararlılığını sürdürmesine olanak tanır. Böylece, sistem hem iç dinamik değişimlerine hem de dış bozucu etkilerine karşı yüksek dayanıklılık sergiler.

Bu çalışmada, uyarlamalı kontrolün parametre tahmin yeteneği ile gürbüz kontrolün bozucu bastırma kabiliyeti birleştirilerek daha dirençli bir yapı elde edilmiştir. Uyarlamalı yapı, sistem parametrelerini çevrim içi olarak güncellerken; gürbüz bileşen, dış bozucuların sisteme olan etkisini doğrudan kompanze eden bir mekanizma olarak kontrol yasasına entegre edilmiştir. Bu sayede kontrol sinyali, yalnızca parametre belirsizliklerini değil, aynı zamanda dış bozucu etkilerini de bastırarak sistemin kararlılığını dinamik şekilde sürdürebilmektedir.

Bu yapı, Lyapunov kararlılık teorisine dayalı olarak geliştirilmiş ve sistem dinamikleri doğrusal parametrik bir forma dönüştürülerek analiz edilmiştir.

Önceki çalışmalar [17-20] dikkate alınırsa modelin temel yapısı denklem (2.4)'teki gibi yazılabilir.

$$m_2\ddot{y}_2 + c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2(y_2 - y_1) + f + L = Bu \tag{2.4}$$

Burada m_2, c_2, k_2 sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini temsil etmekte olup her biri NxN boyutundadır. y_2, dikme alt sisteminin düşey yer değiştirme vektörü; y_1, tekerlek alt sisteminin düşey yer değiştirme vektörü; f, sürtünme vektörü; L, dış bozucu kuvvet vektörü ve u, kontrolcü kuvvet vektörüdür. Matris parametreleri tam olarak bilinmemektedir.

Denklem (2.4)'te yer alan bu ifade denklem (2.5)'te gösterildiği şekilde yeniden yazılabilir.

$$m_2\ddot{y}_2 + c(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2(y_2 - y_1) + f + L = Y\pi + f + L \tag{2.5}$$

Burada Y, sistemin bilinen büyüklüklerinden oluşturulan regresyon matrisi olup $\pi = [k_1,\ c,\ m_1]^T$ ise bilinmeyen sistem parametrelerini içeren sabit bir vektördür. Bu dönüşüm sayesinde sistemin dinamik modeli kontrol yasası tasarımı için uygun hale gelmektedir [17-20].

Adaptif-robust kontrol kuralı önceki çalışmalar [17-20] dikkate alınarak denklem (2.6)'da verilmiştir.

$$u = B^{-1}\left(\left(\hat{m}_2\ddot{y}_r + \hat{c}_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_2) + \hat{k}_2(y_2 - y_1) + \hat{\pi}\right) + u + K_D\sigma\right) \quad (2.6)$$

$$u = B^{-1}[Y_r\hat{\pi} + u + K_D\sigma]$$

Burada, $\hat{m}_2$, $\hat{c}_2$, $\hat{k}_2$, sistemin tahmin edilen parametrelerini; $\hat{\pi}$, bu parametrelerin çevrim içi tahminini; $K_D\sigma$ ise hata üzerindeki PD (orantılı-türevsel) kontrol etkisini temsil eder. Denklem (2.6) kullanılarak diğer değişkenler denklem (2.7) ve denklem (2.8) ile şu şekilde tanımlanır.

$$\tilde{y} = y_d - y_2\,; \quad \dot{\tilde{y}} = \dot{y}_d - \dot{y}_2; \quad \dot{y}_r = \dot{y}_d + \lambda\tilde{y}; \quad \ddot{y}_r = \ddot{y}_d + \lambda\dot{\tilde{y}} \quad (2.7)$$

$$\sigma = \dot{y}_r - \dot{y}_2 = \dot{\tilde{y}} + \lambda\tilde{y} \quad (2.8)$$

Parametrelerin sabit olmadığı fakat sınırlı olduğu kabul edilerek, üst sınır değeri denklem (2.9)'da ifade edildiği şekilde kabul edilmiştir.

$$\|f\| + \|L\| \leq \omega \quad (2.9)$$

Parametrelerle ifade edilemeyen parametre üst sınırı $\omega \in R$ bilinmiyor kabul edilmiş olup zamanla güncellenmektedir. Güncellenme hatası $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$ olarak tanımlanmış olup $\tilde{\omega}$, güncellenme hatasını; $\hat{\omega}$ ise ω'nin zamana göre güncellenme değerini göstermektedir.

Parametrelerle ifade edilemeyen parametre hata vektörü $\tilde{\eta}$, denklem (2.10)'da gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

$$\tilde{\eta} = \hat{f} - \hat{L} \quad (2.10)$$

Burada $\hat{f}$, iç sürtünme kuvveti uyarlama algoritmasını; $\hat{L}$ ise dış bozucu kuvvetlerin uyarlama algoritmasını göstermektedir. İç sürtünme kuvvetleri ve dış bozucu kuvvetler bilinmemekte olup zamana bağlı güncellenmektedir.

Denklem (2.6), denklem (2.1)'de yerine yazılıp bazı işlemler sonucunda denklem (2.11)'deki ifade elde edilir.

$$m_2\dot{\sigma} = -Y_r\tilde{\pi} + \mathrm{u} - \hat{f} + \hat{L} - K_d\sigma + f + d \quad (2.11)$$

Bu parametreler dikkate alınarak kontrol parametreleri denklem (2.12)'de yer alan ifadelerdeki gibi tanımlanmıştır [18-20].

$$\dot{\hat{\pi}} = \mathrm{P}Y^T\sigma; \qquad \hat{f} = (\beta^2\alpha)\frac{\arctan(\alpha\int||\sigma||dt)}{(\alpha\int||\sigma||dt)^2+1}; \tag{2.12}$$

$$\hat{L} = \frac{\lambda}{(\alpha\int||\sigma||dt)^2+1}; \qquad \dot{\hat{\omega}} = b_1\left|\left|\sigma\right|\right|;$$

$$u = \begin{cases} \frac{\sigma}{||\sigma||}\left(\hat{\omega}+\hat{f}-\hat{L}\right), & Eğer\ \left|\left|\sigma\right|\right| > \varepsilon \\ \frac{\sigma}{\varepsilon}\left(\hat{\omega}+\hat{f}-\hat{L}\right), & Eğer\ \left|\left|\sigma\right|\right| \leq \varepsilon \end{cases}$$

Sistemin kararlılığını analiz edebilmek amacıyla Lyapunov fonksiyonu, izleme hatası σ ve parametre tahmin hatası $\tilde{\pi}$ değişkenleri cinsinden denklem (2.13) ile şu şekilde ifade edilir.

$$\mathrm{V} = \frac{1}{2}\sigma^{\mathrm{T}}m_2\sigma + \frac{1}{2}\tilde{\pi}^T\mathrm{P}^{-1}\tilde{\pi} + \frac{1}{2b_1}\tilde{\omega}^2 + \frac{1}{2}\tilde{\eta}^T(K_T+\Phi^2)^2\tilde{\eta} \geq 0 \tag{2.13}$$

Bu fonksiyonda m_2, pozitif tanımlı bir skalar olup sistemin ataletini; $\tilde{\pi} = \hat{\pi} - \pi$ ise tahmin edilen parametreler ile gerçek değerler arasındaki hatayı ifade etmektedir. P ise pozitif tanımlı simetrik bir matris olarak kararlılık analizinde ölçekleyici bir etkiye sahiptir. Bu fonksiyon yardımıyla sistemin kararlılığı analiz edilmektedir [18].

Lyapunov fonksiyonunun türevi denklem (2.14)'te gösterildiği şekilde elde edilir.

$$\dot{\mathrm{V}} = -\sigma^T K_D\sigma + \tilde{\pi}^T\left(\mathrm{P}^{-1}\dot{\tilde{\pi}} - Y^{\mathrm{T}}\sigma\right) + \sigma^T f + \sigma^T d + \sigma^T\left(-\hat{f}+\hat{L}\right) + \sigma^T u - \frac{1}{b_1}(\omega-\hat{\omega})\dot{\hat{\omega}} + 2\tilde{\eta}^T(K_T+\Phi^2) + \Phi\dot{\Phi}\tilde{\eta} + \tilde{\eta}^T(K_T+\Phi^2)^2\dot{\tilde{\eta}} \tag{2.14}$$

$\dot{\hat{\pi}} = \mathrm{P}Y^T\sigma$, denklem (2.14)'te yerine yazılırsa yeni ifade denklem (2.15)'te gösterildiği şekilde yazılır.

$$\dot{\mathrm{V}} = -\sigma^T K_D\sigma + \sigma^T f + \sigma^T L + \sigma^T\left(-\hat{f}+\hat{L}\right) + \sigma^T u - \frac{1}{b_1}(\omega-\hat{\omega})\dot{\hat{\omega}} + 2\tilde{\eta}^T(K_T+\Phi^2) + \Phi\dot{\Phi}\tilde{\eta} + \tilde{\eta}^T(K_T+\Phi^2)^2\dot{\tilde{\eta}} \tag{2.15}$$

Denklem (2.15) ile önceki çalışmada [20] yer alan denklem yapısı benzerdir.

Denklem (2.11)'de yer alan kontrol girişleri denklem (2.15)'te yerine yazılırsa, önceki çalışmada [20] olduğu gibi denklem (2.16)'da gösterildiği şekilde yazılır.

$$\dot{\mathrm{V}} = -\sigma^T K_D \sigma \tag{2.16}$$

$\dot{\mathrm{V}} \leq 0$ olduğundan sistem kararlıdır.

Bu noktada sisteme etki eden bozucu kuvvetlerin (örneğin rüzgâr, pist yüzeyinden gelen ani darbeler veya dış ortam değişimleri) sistem dinamiği üzerindeki etkilerinin azaltılabilmesi amacıyla ek bir gürbüz (robust) terim tanımlanmıştır. Bu yapı, dış bozucu etkileri kompanze ederek sistem kararlılığının sürdürülmesini sağlar. Özellikle adaptif kontrolcünün parametre güncellemelerine ek olarak çalışan bu robust bileşen, kontrol girişine doğrudan etki ederek dış bozucuların oluşturduğu belirsizlikleri bastırır. Sistemdeki bozucu kuvvetin tahmini, belirsizlik sınırı ve ek kontrol girdisi sırasıyla denklem (2.17), denklem (2.18) ve denklem (2.19)'da gösterildiği şekilde tanımlanarak simülasyon çalışması yapılmıştır.

$$\dot{\hat{\pi}} = \mathrm{P}Y^T\sigma; \qquad \hat{L} = \frac{\lambda}{(\Psi \int \sigma dt)^2 + 1} \tag{2.17}$$

$$u_d = \begin{cases} -\frac{\sigma}{||\sigma||}\hat{\omega}, & Eğer \ ||\sigma|| > \varepsilon_\mathrm{d} \\ -\frac{\sigma}{\varepsilon_\mathrm{d}}\hat{\omega}\ , & Eğer \ \big|\big|\sigma\big|\big| \leq \varepsilon_\mathrm{d} \end{cases} \tag{2.18}$$

$$\hat{\omega} = \int b_1 \, ||\sigma|| \tag{2.19}$$

Bu denklemlerde $\hat{L}$, sistemdeki dış bozucu kuvvetin zamana bağlı değişim oranını temsil ederken; $\hat{\omega}$, bozucunun büyüklüğünü belirleyen tahmin katsayısıdır. λ, Ψ ve b_1 pozitif sabitler olup sistemin adaptasyon hızını ve bozucu bastırma tepkisini belirler. u_d ise kontrol yasasına eklenen düzeltici kuvvet bileşeni olup, hata sinyali σ'nın büyüklüğüne bağlı olarak bozucu etkilere karşı dengeleyici bir kontrol girdisi oluşturur.

Bu ek terimler, adaptif kontrol yasasına dâhil edilerek bozucu etkilerin doğrudan kompanze edilmesini sağlar. Böylece kontrol sinyali, yalnızca iç parametre değişimlerine değil; aynı zamanda dış bozucu etkilerin neden olduğu kararsızlıklara karşı da dirençli hale gelir [20].

Denklem (2.6)'daki ifade kullanılarak kontrol kuvveti u=0, denklem (2.20)'de şu şekilde ifade edilir.

$$u = B^{-1}[Y\hat{\pi}(t) + K_D\sigma] \tag{2.20}$$

Bu ifade, kontrol yasasının temel formunu temsil eder. Bu denklemde K_D, hata sinyali σ üzerindeki oransal etkisiyle sistemin dinamik tepkisini düzenleyen kazanç katsayısıdır. $Y\hat{\pi}$ terimi, tahmin edilen parametre vektörü üzerinden oluşturulan kontrol bileşenini ifade ederken; $\hat{\pi}$, sistemdeki belirsizliklerin zamana bağlı olarak tahmin edilmesini sağlayan değişkendir. Bu yapı sayesinde kontrolcü, yalnızca parametre belirsizliklerini değil aynı zamanda sistem üzerindeki dış bozucu etkileri de kompanze ederek kararlılığı korur. Böylelikle kontrol kuvveti u, hata sinyalini doğrudan bastıracak şekilde regüle edilir ve sistemin izleme performansı iyileştirilir [18].

Kontrol sisteminde yalnızca kontrol kuvveti u belirlenerek sistemin tam kararlı olması beklenemez. Belirsizliklerin zamanla değişmesi, kontrolcü içindeki parametre tahminlerinin de güncellenmesini gerektirir. Bu nedenle tahmin vektörünün güncellenmesini sağlayan bir adaptasyon yasası tanımlanır.

$\dot{\hat{\pi}} = PY^T\sigma$ denklemi, sistemdeki belirsiz parametrelerin tahminini zamana bağlı olarak günceller. Burada Y, sistemin regresör matrisini; P, pozitif tanımlı sabit bir matris olarak tahmin hatasının büyüklüğünü düzenleyerek sistemin kararlılığını sürdürür.

$\dot{V} \leq 0$ ifadesi, sistemin kararlılığının asimptotik olarak sağlandığını ve hata sinyalinin zamanla sıfıra yakınsadığını ortaya koyar [18]. Böylece kontrol yasası, hem iç parametre belirsizliklerine hem de dış bozucu etkilere karşı dayanıklı bir yapı kazanır.

Elde edilen bu kontrol yasası, yalnızca sistemin nominal davranışını değil; aynı zamanda çevresel bozucular ve parametre belirsizlikleri altındaki performansını da doğrudan etkilemektedir.

Önerilen kontrol yasasında, Lyapunov fonksiyonunun türevi negatif tanımlı hale getirilerek sistem kararlılığı garanti altına alınır. $\dot{V} \leq 0$ ifadesi, ayrıca izleme hatasının zamana bağlı olarak azaldığını ve sistemin asimptotik olarak kararlı hale geleceğini belirtir. Bu durum, yalnızca sabit parametreli sistemlerde değil; zamanla değişen, kısmen ölçülemeyen ve modelleme hataları içeren sistemlerde de geçerlidir.

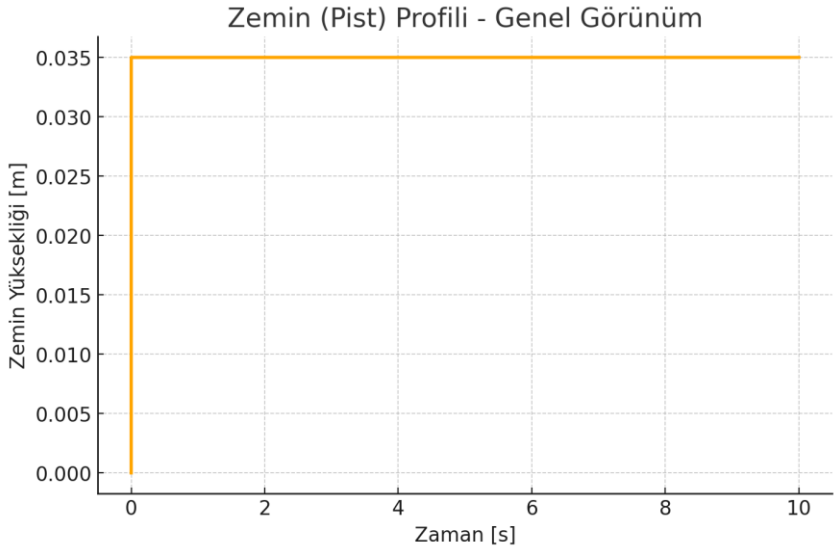
Bu bağlamda, önerilen yapı hem adaptif hem de gürbüz bileşenleriyle sistem tepkisini denetleyerek, klasik adaptif kontrolcülerin yetersiz kaldığı durumlarda dahi etkinliğini sürdürebilir. Örneğin, dış bozucularla tetiklenen ani yük değişimlerinde kontrol sinyali, uyarlamalı parametre güncellemeleriyle yeniden şekillendirilir ve sistemin beklenen referans davranışa geri dönmesi sağlanır.

Bu yaklaşım, Lyapunov temelli kontrol yasalarının sunduğu matematiksel güvenceyle birleşerek, özellikle iniş takımı gibi karmaşık dinamik sistemlerde istikrar, hassasiyet ve kontrol edilebilirliği bir arada sunar. Böylece, kontrol sinyalinin büyüklüğü ve yönü sürekli olarak izleme hatası üzerinden güncellenir ve uygulanan kuvvet, fiziksel limitler dahilinde ideal tepkiyi üretecek şekilde belirlenir.

2.5. PİST PROFİLİ VE DIŞ UYARAN MODELLEMESİ

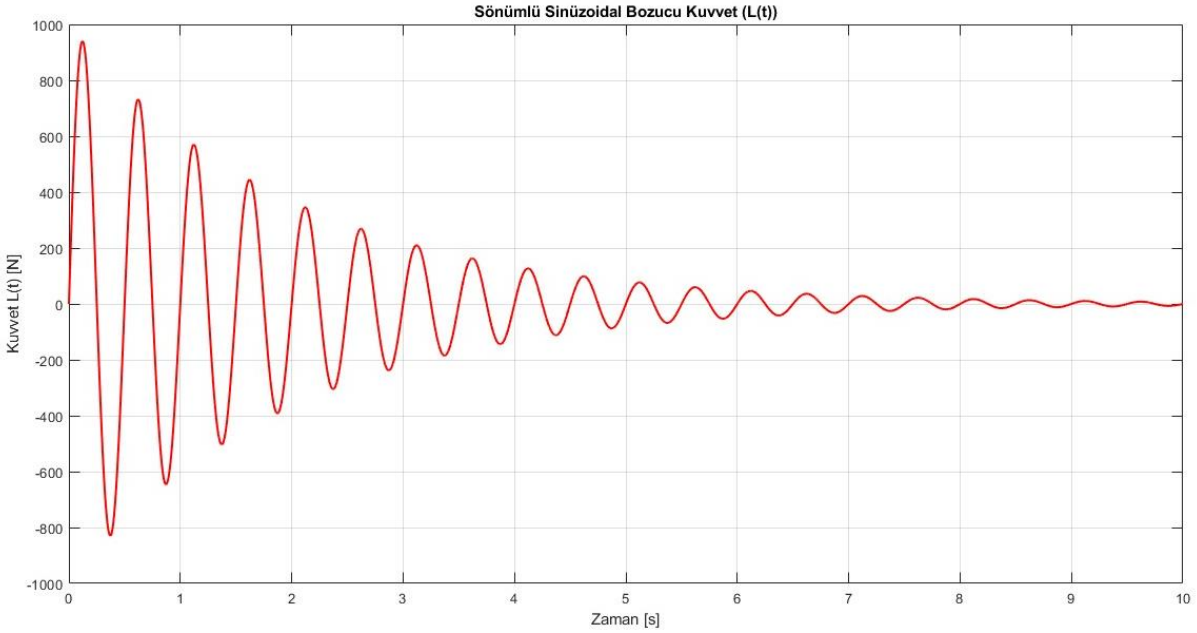
İniş takımı sistemlerinin dinamik davranışı yalnızca yapısal parametrelerle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda dış çevresel etkilerden de doğrudan etkilenmektedir. Bu nedenle, gerçekleştirilen bilgisayar simülasyonlarında fiziksel gerçekliğe uygun dış uyaranların modele entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında, iniş sırasında sistemin karşılaştığı temel dış etkiler olan pist yüzeyi profili ve zamana bağlı dış kuvvet dikkate alınmıştır.

Zemin profili, hava aracının tekerleğiyle pist yüzeyine ilk teması sırasında oluşan ani yer değişimini temsil edecek şekilde modellenmiştir. Bu amaçla, rampa karakteristiğine sahip, kısa sürede artış gösteren ve ardından sabit kalan bir profil yapısı tercih edilmiştir. Rampa yüksekliği ve süresi, hava aracı hızı dikkate alınarak belirlenmiş; bu yapı zamana bağlı konum verisi olarak bilgisayar simülasyonu modeline aktarılmıştır. **Şekil 2.2**'de bu pist profiline karşılık gelen zamana bağlı yer değişimi verisi gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Zemin (Pist) Profili

Ayrıca sistemin dış bozucu etkiler altındaki davranışını inceleyebilmek amacıyla modele sönümlü karakterde bir dış kuvvet tanımlanmıştır. Bu kuvvet, iniş sırasında pist ile tekerlek etkileşiminden veya aerodinamik kaynaklı geçici yük değişimlerinden doğan bozucu etkileri temsil etmekte ve sistemin dayanıklılığını test etmek üzere dış uyaran olarak uygulanmaktadır. **Şekil 2.3**'te bu kuvvetin zamana bağlı genel davranışı gösterilmekte, kuvvetin genliğinin zamanla azalarak sönümlü bir yapıya dönüştüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 2.3: Sönümlü Sinüzoidal Dış Kuvvet Profili

Zamana bağlı değişken bu dış bozucu kuvvet profili, bilgisayar simülasyonu ortamına harici veri olarak tanıtılmış ve farklı kontrolcü yapılarının bu değişim karşısındaki tepkileri analiz edilmiştir.

3. YÖNTEM

Bu bölümde iniş takımı sisteminin matematiksel yapısı, kullanılan kontrol stratejileri ve benzetim ortamı detaylandırılmıştır.

3.1. SİSTEM YAPISI VE MATEMATİKSEL MODELLEME

Bu çalışmada, hava aracının iniş takımı sistemi, dikey düzlemde iki serbestlik derecesine sahip bir mekanik sistem olarak modellenmiştir. Modelde m_1 kütlesi, tekerlek ve ona bağlı alt parçaların efektif kütlesini; m_2 kütlesi ise uçak gövdesinden dikmeye aktarılan kütle bileşenini temsil etmektedir. m_1 ile m_2 arasında yer alan yay (k_2) ve sönümleyici (c) elemanlar, iniş takımı dikme sisteminin temel dinamik davranışını belirlemektedir.

Zemin yüzeyindeki değişimlerin sisteme etkisi, zt ile temsil edilen pist profili üzerinden modellenmiştir. Tekerlek kütlesi m_1, zeminde doğrudan temas hâlindedir ve bu temasın etkisi, k_1 yay katsayısı ile ifade edilen elastik rijitlik üzerinden modele yansıtılmıştır. m_1 ve m_2 arasındaki etkileşim ise k_2 yay katsayısı ve c sönüm katsayısı ile modellenmiş; böylece sistem, esnek ve sönümlü bir yapı olarak tanımlanmıştır.

Kontrol girdisi olarak tanımlanan u, yalnızca m_2 kütlesine (dikme sistemine) etki eden aktüatör kuvvetidir. Bununla birlikte, sistemin dış çevresel etkiler altındaki davranışını gözlemleyebilmek amacıyla modele sönümlü sinüzoidal formda tanımlanan L(t) dış kuvveti dahil edilmiştir. Bu kuvvet, pist yüzeyinden dikmeye iletilen dinamik tepkiyi temsil etmekte ve sistemin kararlılığını test etmek amacıyla dış bozucu olarak uygulanmaktadır.

Sistemin fiziksel yapısına ilişkin genel diyagram **Şekil 1.1**'de sunulmuştur. Bu yapı, iki serbestlik derecesine sahip bir dikme modeli olup tekerlek (m_1) ve dikme (m_2) kütlelerinden oluşmaktadır. Tekerlek pist yüzeyi ile doğrudan temas hâlinde olan alt bileşeni, dikme ise uçağın gövdesine bağlı olarak yük taşıyan üst bileşeni temsil etmektedir.

- Tekerlek (m_1): Zeminle doğrudan temas eden ve iniş sırasında oluşan darbe kuvvetlerini karşılayan alt bileşendir.

- Dikme (m_2): Uçak gövdesine bağlı olup, taşıyıcı kütlenin tamamından gelen kuvvetleri sönümleyen üst bileşendir.

Bu sistem, tekerlek ve dikme arasında yer alan esnek ve sönümleyici elemanlarla (yay ve sönümleyici) desteklenmiştir. Böylece hem zeminden gelen darbeler hem de gövdeden aktarılan yükler dinamik olarak sönümlenebilmektedir. Sistemdeki elastik ve sönümleyici elemanlar şu şekilde modellenmiştir:

- k_1: Tekerlek ile zemin arasındaki yay katsayısı olup sistemi zeminden gelen ani yük değişimlerine karşı koruyan elastik bileşendir.
- k_2: Tekerlek ile dikme arasındaki yay katsayısı olup dikme sisteminin deformasyonunu kontrol eder.
- c: Sönümleme katsayısı, tekerlek ve dikme arasındaki hız farkına bağlı olarak enerjinin sönümlenmesini temsil eder.

Sisteme etki eden dış kuvvetler iki ana bileşenle tanımlanmıştır:

- u: Aktüatör kuvveti olup yalnızca dikme sistemine (m_2) uygulanmakta ve sistemin dinamik tepkisini düzenleyen kontrol girdisidir.
- $L(t)$: Sönümlü sinüzoidal karaktere sahip dış bozucu kuvvettir. Bu kuvvet pist yüzeyinden dikmeye iletilen geçici dinamik etkiyi temsil etmekte ve sistemin kararlılığını test etmek amacıyla m_2 kütlesine dış uyaran olarak uygulanmıştır.

Sistemin hareket denklemleri, Lagrange enerji yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Denklem (2.1)'de yer alan $q_1=y_1$ ve $q_2=y_2$ olmak üzere, her bir kütle için konumlar y_1 (tekerlek) ve y_2 (dikme) ile ifade edilmiştir. Buna göre sistemin hareket denklemleri aşağıda yer alan denklem (3.1) ve denklem (3.2)'deki gibi elde edilmiştir.

Tekerlek (m_1) için Hareket Denklemi

$$m_1\ddot{y}_1 + k_1(y_1 - y_0) + k_2(y_1 - y_2) + c(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = -u \tag{3.1}$$

- $m_1\ddot{y}_1$: Tekerleğin ivmesine bağlı ataletsel kuvveti temsil eder.

- $k_1(y_1 - y_0)$: Zemin ve tekerlek arasındaki yay kuvvetini temsil eder.

• $k_2(y_1 - y_2)$ ve $c(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)$: Tekerlek ve dikme arasındaki esnek ve sönümlü kuvvet bileşenleridir.

Dikme (m_2) için Hareket Denklemi

$$m_2\ddot{y}_2 + k_2(y_2 - y_1) + c(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + f + L = u \tag{3.2}$$

• $m_2\ddot{y}_2$: Dikme kütlesine etki eden ataletsel kuvveti temsil eder.

• $k_2(y_2 - y_1)$ ve $c(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)$: Tekerlek ve dikme arasındaki esnek ve sönümlü kuvvet bileşenleridir.

• L: Sönümlü sinüzoidal karaktere sahip dış bozucu kuvvettir; dikme sistemine (m_2) etki eder.

• u: Aktüatör kuvvetidir ve kontrolcü tarafından uygulanır.

• f: Sistemin iç sürtünme kuvveti olup çalışma kapsamında ihmal edilmiştir.

Bu denklemler, sistemin zamana bağlı dinamik tepkilerini belirlemekte ve kontrolcü tasarımının temelini oluşturmaktadır. Modelde yer alan L(t) dış kuvveti, sistemin çevresel etkiler altındaki davranışını gözlemleyebilmek amacıyla belirli genlik, frekans ve sönüm oranı parametreleriyle tanımlanmıştır.

3.2. SİMÜLASYON TASARIMI

Bu bölümde, 3.1'de elde edilen matematiksel model esas alınarak, iniş takımı sisteminin dinamik davranışları bilgisayar simülasyonu ortamında incelenmiştir. Simülasyon süreci kapsamında, iniş takımı sisteminin tekerlek ve dikme bileşenleri ayrı ayrı modellenmiş; daha sonra bütünleşik sistem yapısı oluşturularak, kontrolsüz ve kontrollü senaryoların karşılaştırılmasına olanak tanıyan bir platform elde edilmiştir.

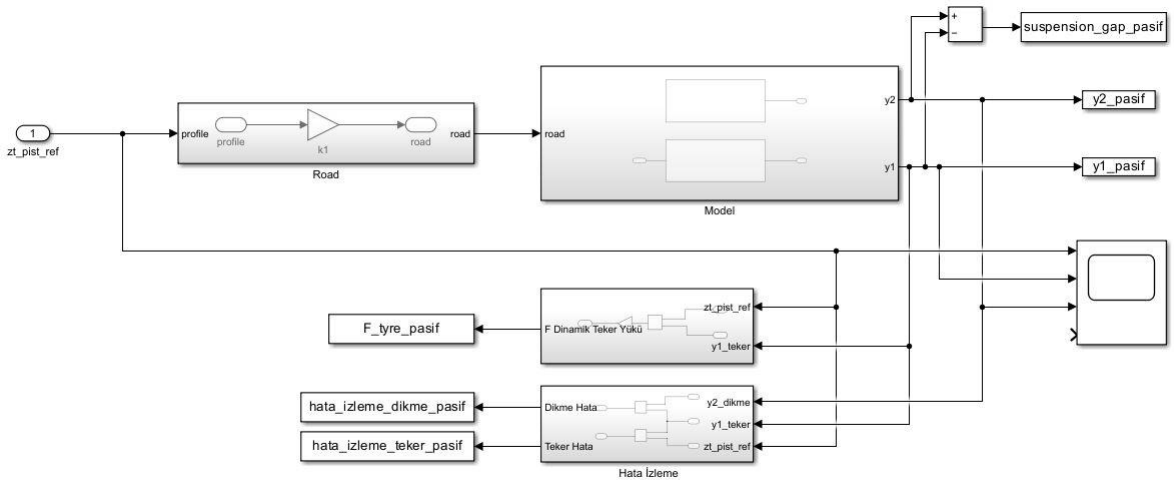
Simülasyon tasarımı, modelin bilgisayar ortamına aktarılması, sistem parametrelerinin tanımlanması, dış kuvvetlerin belirlenmesi ve test senaryolarının hazırlanması aşamalarını içermektedir. Böylece, farklı kontrolcü yapılarının etkinliği aynı fiziksel koşullar altında değerlendirilebilmiştir. Bu yapı, sonraki bölümlerde sunulan kontrolcü performanslarının analizine temel teşkil etmektedir.

3.2.1. Simülasyon Ortamı ve Modelin Kurulması

Bu çalışmada, iniş takımı sisteminin dinamik davranışlarını analiz edebilmek amacıyla fiziksel yapıyı temsil eden matematiksel model bilgisayar ortamına aktarılmış ve bir simülasyon altyapısı oluşturulmuştur.

Bilgisayar simülasyonları, fiziksel sistemlerin zamana bağlı davranışlarını analiz etmek ve farklı kontrol stratejilerinin sistem performansına etkilerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu kapsamda, tekerlek (m_1) ve dikme (m_2) kütlelerinden oluşan sistem modeli, bilgisayar ortamında yapılandırılmış ve modele dış uyaranlar uygulanarak sistemin tepkileri gözlemlenmiştir. Kurulan simülasyon modeli, sistemde yer alan tekerlek ve dikme kütlelerinin düşey doğrultudaki hareketlerini temsil etmekte olup sistemin dinamik tepkilerini zamana bağlı olarak analiz etmektedir.

Sistemin genel yapısı **Şekil 3.1**'de sunulmuştur. Şekilde, zemin profili (zt) sisteme dış uyaran olarak uygulanmış, bu referans sinyali hem tekerlek hem de dikme alt sistemlerinin hareketini tetikleyen giriş kaynağı olarak kullanılmıştır. Modelin çıkışları arasında tekerlek konumu (y_1), dikme konumu (y_2), süspansiyon açıklığı, tekerlek yükü ve sistem hata sinyalleri yer almaktadır. Bu yapı, tüm kontrolcü yapıları entegre edilmeden önce sistemin temel dinamik davranışını inceleyebilmek amacıyla oluşturulmuştur.



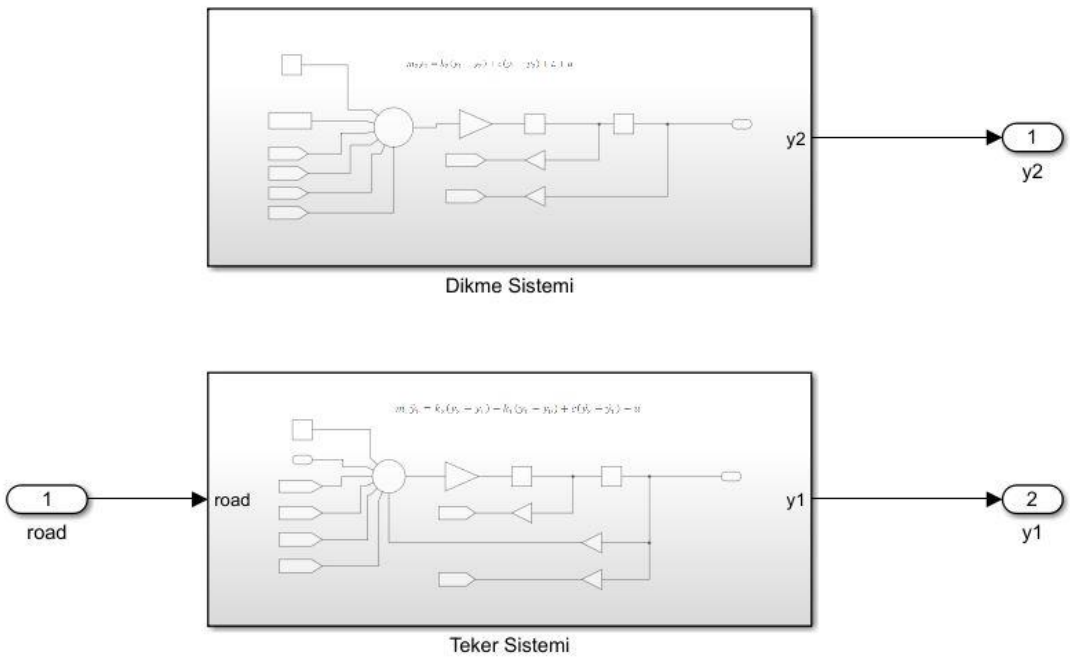
Şekil 3.1: İniş Takımı Sistemi Simülasyon Modelinin Genel Görünümü

Bu modelleme yaklaşımı sayesinde, farklı kontrolcü yapılarının (PID, adaptif, adaptif-robust) sisteme olan etkileri aynı temel model üzerinde incelenebilmiştir. **Şekil 3.1**'de gösterilen yapı, kontrol blokları eklenmeden yalnızca sistemin fiziksel davranışını temsil etmektedir. Takip eden bölümlerde bu temel model üzerine kontrolcü yapıları entegre edilerek performans analizleri değerlendirilecektir.

İniş takımı sistemi, bilgisayar simülasyonu ortamında iki ana alt sistemden oluşacak şekilde modellenmiştir: tekerlek (m_1) ve dikme (m_2). Bu yapı, iniş sırasında karşılaşılan kuvvetlerin fiziksel olarak hangi yapılar tarafından karşılandığını temsil etmektedir.

Bu iki alt sistem, modelin genel yapısı içerisinde birbirinden bağımsız olarak tanımlanmıştır. Tekerlek sistemi (m_1), pist profili (zt) ile doğrudan temas eden ve yüzeyden iletilen darbe kuvvetlerini ilk karşılayan bileşendir. Dikme sistemi (m_2) ise uçağın gövdesine bağlı olan ve iniş sırasında dikmeye iletilen kuvvetlerin tamamına maruz kalan üst bileşendir. Bu yapı, yalnızca kontrol kuvveti ve zamana bağlı dış bozucu kuvvet etkilerini dikkate alacak şekilde modellenmiştir.

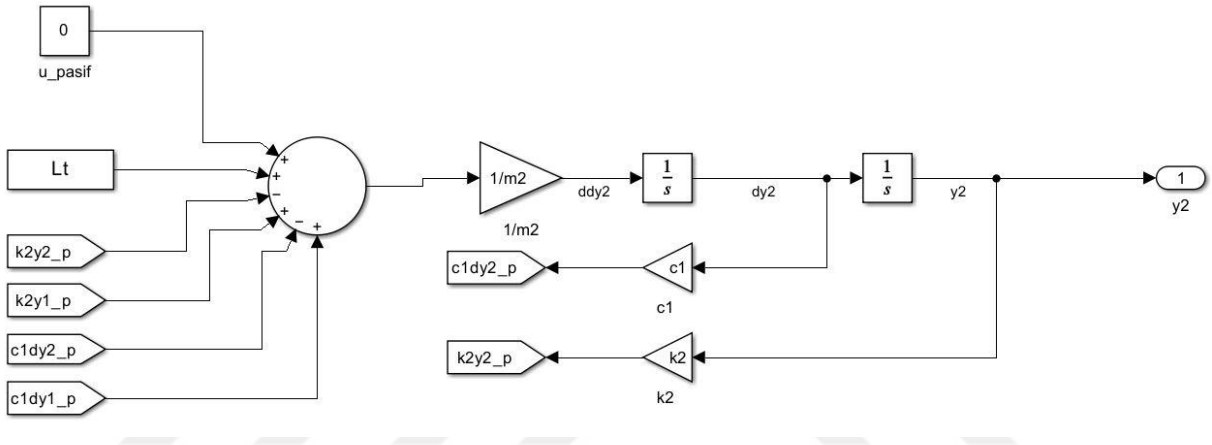
İki alt sistem arasındaki etkileşim, yay (k_2) ve sönümleyici (c) elemanları üzerinden modellenmiştir. Ayrıca her iki alt sistemin konum tepkileri (y_1 ve y_2) ayrı olarak değerlendirilmiş ve sistem yanıtları bağımsız olarak analiz edilmiştir. Bu iki alt sistemin bilgisayar ortamındaki genel ayrımı, **Şekil 3.2**'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2: İniş Takımı Sisteminin Alt Sistemleri (Tekerlek ve Dikme)

İniş takımı sisteminin dikme alt sistemi, uçağın gövdesine bağlı olan ve iniş anında dikmeye iletilen düşey kuvvetlerin tamamına doğrudan maruz kalan ana yapıdır. Bu alt sistem, düşey doğrultuda hareket eden m_2 kütlesinin, yay (k_2) ve sönümleyici (c) elemanları ile tekerlek sistemine bağlandığı bir yapıdadır.

Simülasyon modelinde dikme, aktüatör kuvveti ile zamana bağlı dış bozucu kuvvetin bileşik etkisi altında hareket ederken, sistem tepkisi y_2 çıkışı ile izlenmektedir. Bu yapı sayesinde, dikmenin dinamik kararlılığı ve seyir konforu üzerindeki etkileri analiz edilebilmektedir. Dikme alt sistemine ait detaylı blok diyagramı **Şekil 3.3**'te gösterilmiştir.

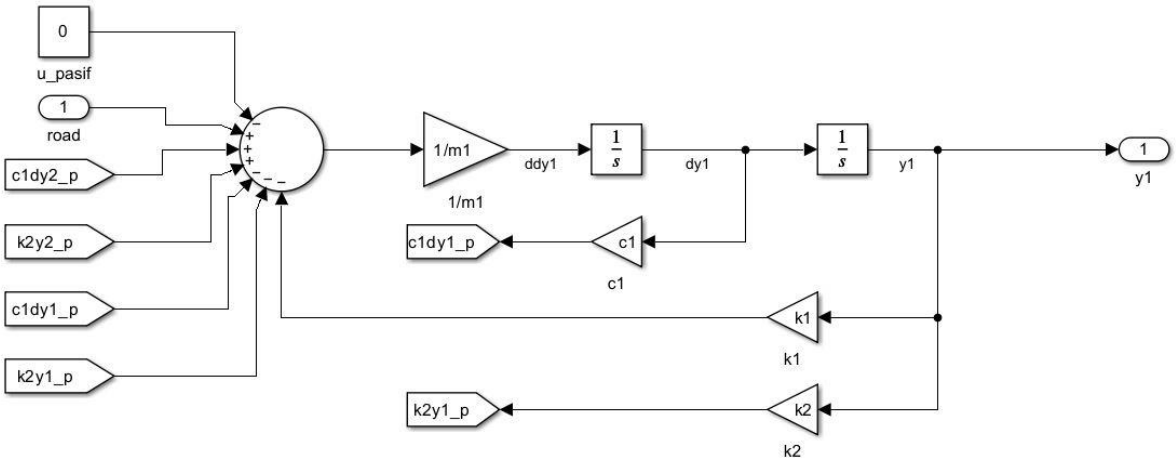


Şekil 3.3: İniş Takımı Sisteminin Dikme (m_2) Alt Sisteminin Simülasyon Modeli

Tekerlek alt sistemi, iniş sırasında pist yüzeyi ile doğrudan temas eden ve yüzeyden iletilen ilk darbe kuvvetini karşılayan bileşendir. Zeminden gelen profil sinyali (zt), bu alt sisteme doğrudan uygulanmakta ve tekerleğin sisteme aktardığı kuvvetleri belirlemektedir.

Bu alt sistem, tekerlek kütlesi (m_1) ile birlikte, zeminden gelen darbe etkilerini sönümleyen yay (k_1) ve sönümleyici (c) elemanlarından oluşmaktadır. Ayrıca dikme sistemiyle (m_2) arasındaki yapısal bağlantı, kuvvet iletimini sağlayan mekanik ara elemanlar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Böylece, tekerlek ve dikme sistemleri birlikte çalışarak iniş anında oluşan darbeyi gövdeye minimum seviyede iletmektedir.

İlgili yapının bilgisayar simülasyonundaki karşılığı **Şekil 3.4**'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: İniş Takımı Sisteminin Tekerlek (m_1) Alt Sisteminin Simülasyon Modeli

3.2.2. Başlangıç Koşulları

İniş takımı sisteminin bilgisayar ortamında gerçekleştirilen simülasyonu öncesinde, sistemin dinamik davranışını etkileyen başlangıç koşullarının doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu koşullar; kütle, yay ve sönümleme elemanlarının değerleri ile dış kuvvet profillerini ve sistemin ilk konum/durum bilgilerini içeren temel parametreleri kapsamaktadır.

Simülasyon başlangıcında tekerlek ve dikme kütlelerinin (m_1 ve m_2) yerçekimi etkisi altında dengede oldukları kabul edilmiştir. Ayrıca sistemin başlangıç anında, her iki kütlenin de düşey doğrultudaki ilk hızları sıfır olacak şekilde tanımlanmış ve bu sayede yalnızca dış uyarımların sisteme etkisi gözlemlenmiştir. Buna karşılık pist profili (zt), iniş esnasında tekerleğin sabit bir yatay hız (V) ile pist üzerinde ilerlemesi dikkate alınarak oluşturulmuş ve sistemin dış girişlerinden biri olarak modele dahil edilmiştir.

Modelde kullanılan dış kuvvet ise zamana bağlı olarak sönümlü sinüzoidal karakterde tanımlanmış bir kuvvet profilidir. Bu kuvvet, sistemin iniş sırasında karşılaştığı aerodinamik etkileri ve gövde-dikme hattı üzerinden iletilen dış bozucuları temsil eden yapay bir kuvvet olarak modellenmiş olup temsilen yukarı yönlü olarak dikme kütlesine (m_2) uygulanmıştır.

Tüm bu başlangıç koşulları, sistemin hem kontrolcüsüz hem de kontrolcülü senaryolarda gerçekçi bir şekilde analiz edilebilmesini sağlamak üzere yapılandırılmıştır.

3.2.3. Simülasyon Senaryoları

Bu bölümde, iniş takımı sisteminin farklı koşullar altındaki dinamik tepkileri incelenmiş ve çeşitli senaryolar oluşturularak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Amaç, farklı kontrolcü yapılarının etkinliğini karşılaştırmak ve sistem performansını değişen dış uyarılar ile parametre farklılıkları altında değerlendirmektir.

Senaryolar, aşağıdaki temel yapı üzerinden planlanmıştır:

- Pasif Sistem (Kontrolcüsüz): Sistemde herhangi bir kontrolcü yer almamakta olup yalnızca yay, sönümleyici ve kütle etkileşimi ile sistemin doğal davranışı gözlemlenmiştir. Bu senaryo, sistemin doğal tepkisini ortaya koymak amacıyla referans olarak kullanılmıştır.
- PID Kontrolcülü Sistem: Klasik bir PID kontrol yapısı entegre edilerek sistemin salınım süresi, yer değiştirme miktarı ve pist takibi performansı değerlendirilmiştir.
- Uyarlamalı (Adaptif) Kontrolcülü Sistem: Parametre belirsizliklerinin bulunduğu koşullarda, tahmine dayalı adaptif kontrolcü yapısı kullanılarak sistem tepkisi analiz edilmiştir.
- Uyarlamalı Gürbüz Kontrolcülü Sistem: Hem parametre belirsizlikleri hem de dış bozuculara karşı dayanım sağlayan, Lyapunov temelli gürbüz adaptif kontrolcü ile sistem kararlılığı ve izleme başarımı incelenmiştir.

Simülasyonlar 10 saniyelik süre boyunca yürütülmüş ve sistem performansı konum (y_2), ivme, kontrol kuvveti, süspansiyon açıklığı, pist takip hatası ve dinamik tekerlek yükü gibi çeşitli ölçütler üzerinden değerlendirilmiştir.

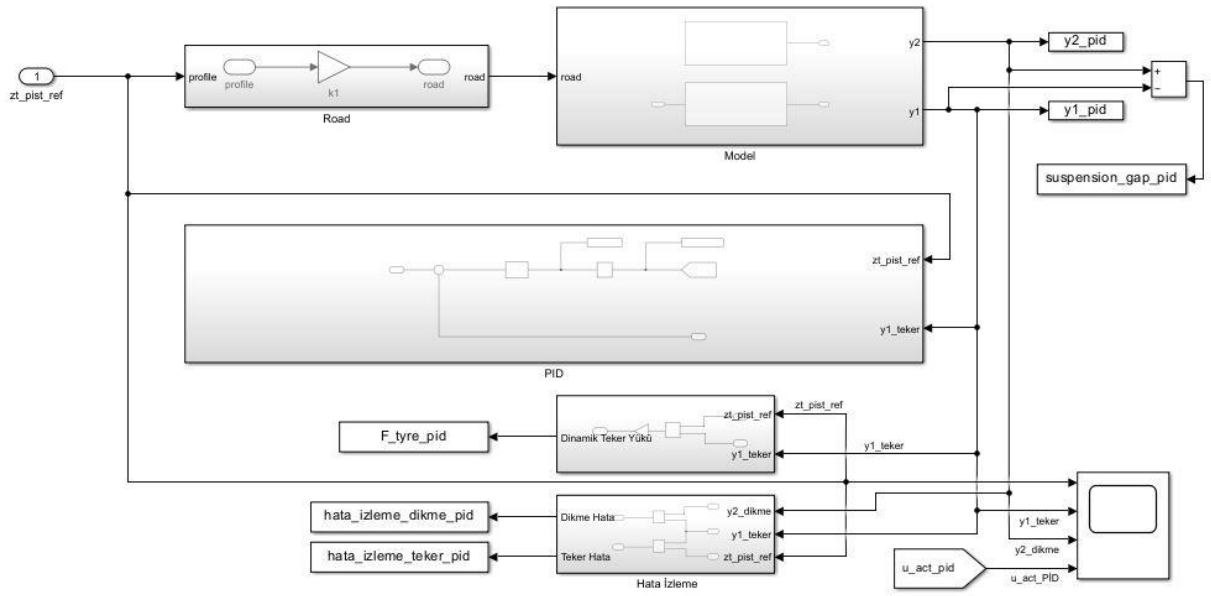
3.3. KONTROLCÜ YAPILARININ TASARIMI

Bu çalışma kapsamında iniş takımı sisteminin dinamik performansını iyileştirmek amacıyla klasik PID kontrolcü, uyarlamalı (adaptif) kontrolcü ve uyarlamalı-gürbüz (adaptive-robust) kontrolcü olmak üzere üç farklı kontrolcü yapısı değerlendirilmiştir. Her bir kontrol yapısı, bilgisayar ortamında benzetimi yapılmak üzere tasarlanmış ve aynı referans girişine karşı sistemin tepkisi incelenmiştir. Bu bölümde, kontrolcü yapılarının uygulama detayları, bilgisayar simülasyonu modeli üzerinden açıklanacaktır.

3.3.1. Klasik PID Kontrolcünün Uygulama Tasarımı

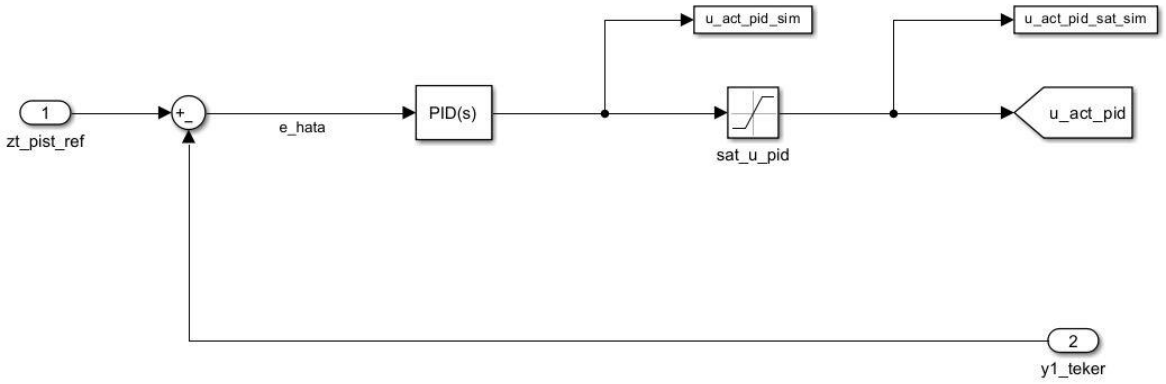
Klasik PID kontrolcü yapısı, sistemin referans yol profiline olan konum hatasını minimize etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu yapı, 2.4.1'de teorik olarak açıklanmış olup burada yalnızca uygulamaya yönelik entegrasyon süreci ele alınmaktadır. Uygulamada, tekerleğin (y_1) referans pist profiline (zt) olan izleme başarımı esas alınmıştır. PID kontrolcü bu hata sinyalini işleyerek u kontrol sinyalini üretir ve bu sinyal, yalnızca üst kütleye etki eden kontrol kuvveti olarak sisteme uygulanır.

Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, Simulink ortamında oluşturulan genel PID kontrolcü uygulaması dört ana bileşenden oluşmaktadır: yol profili girişi, fiziksel model (mekanik sistem), PID kontrolcü bloğu ve izleme/çıktı alt sistemleri. Kontrol sinyali u_act_pid, PID bloğunda üretilmekte ve saturasyon bloğundan geçirilerek üst kütleye uygulanmaktadır.



Şekil 3.5: PID Kontrolcü Genel Yapısının Görünümü

Şekil 3.6'da, PID bloğu içinde oluşturulan kontrol algoritması yer almaktadır. Giriş olarak referans sinyal (zt) ile tekerlek konumu (y_1) arasındaki hata alınır. Bu hata PID bloğuna gönderilir ve elde edilen kontrol sinyali saturasyon işlemine tabi tutularak hem analiz hem de simülasyon için loglanır. Bu yapı sayesinde tekerlek ve dikme arasındaki etkileşim dengelenerek, sistemin kararlılık süresi ve pist takip doğruluğu iyileştirilmiştir.



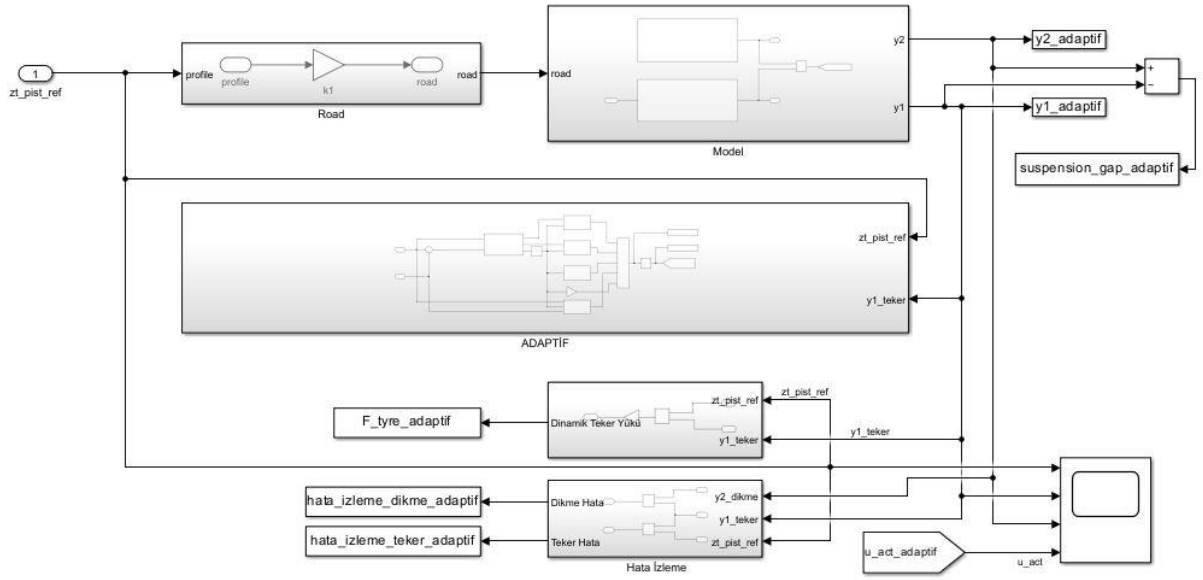
Şekil 3.6: PID Kontrolcü İç Yapısının Görünümü

3.3.2. Uyarlamalı (Adaptif) Kontrolcünün Uygulama Tasarımı

Bu çalışmada kullanılan uyarlamalı kontrolcü, sistem parametrelerinin zamanla değişebileceği veya tam olarak bilinmediği durumlarda etkin bir kontrol performansı sağlamayı amaçlamaktadır. Modelde yer alan tekerlek-dikme sistemine ait parametrelerin (örneğin yay katsayısı, sönüm katsayısı ve kütle) belirsizlik taşıması durumunda, bu parametrelerin çevrim içi tahmini ile kontrol sinyali güncellenmekte ve sistemin istenilen performansı koruması hedeflenmektedir.

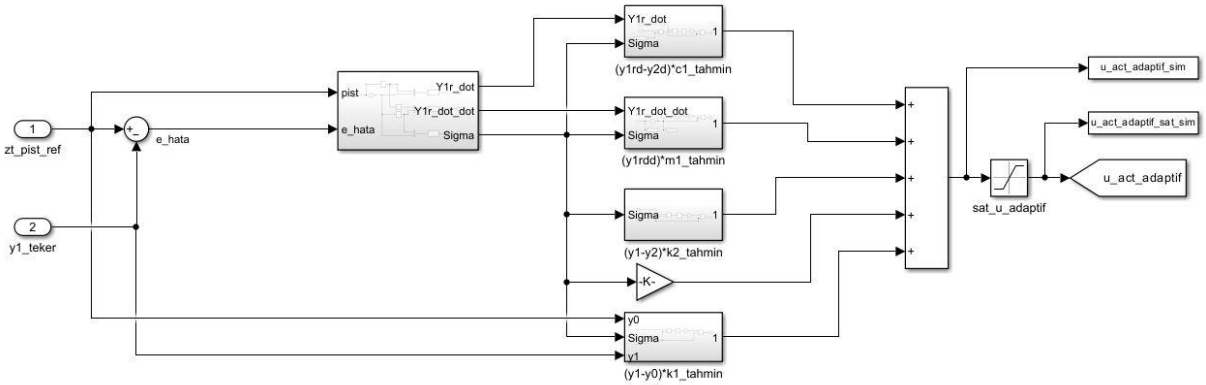
Uyarlamalı kontrol yapısı, klasik PID kontrolcüsünden farklı olarak, sabit kazançlara değil; çevrimiçi öğrenme ve güncellemeye dayanan bir yapıya sahiptir. Bu sayede sistemin karşılaştığı fiziksel değişimlere (örneğin iniş sırasında ağırlık aktarımı, pist bozukluğu gibi) karşı daha dayanıklı ve esnek bir kontrol sağlanabilmektedir.

Şekil 3.7'de, adaptif kontrolcünün bilgisayar ortamında oluşturulan blok diyagramı genel hatlarıyla sunulmuştur. Bu yapıda, kontrolcü yalnızca sistemin çıkışındaki hata sinyaline değil; aynı zamanda parametre tahminlerine dayalı olarak da tepki üretmektedir.



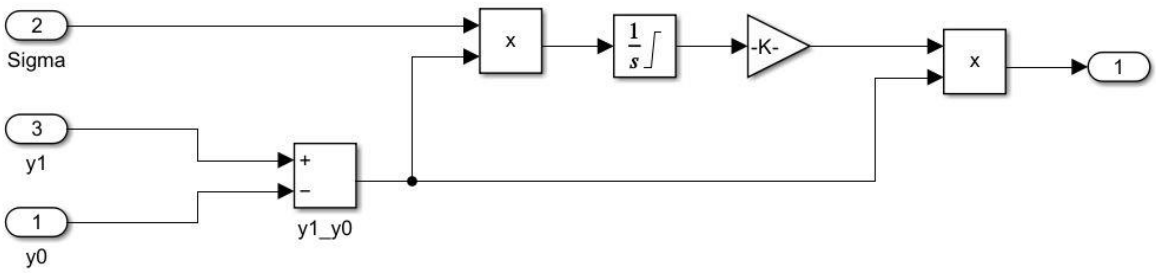
Şekil 3.7: Adaptif Kontrolcü Genel Yapısının Görünümü

Şekil 3.8'de alt sistemin detayına bakıldığında, uyarlamalı kontrolcünün temelini oluşturan parametre tahmin mekanizmasının bilgisayar ortamında belirli bloklar üzerinden kurulduğu görülmektedir. Bu yapı sayesinde sistemde yer alan bilinmeyen veya zamanla değişen parametreler tahmin edilmekte ve kontrol yasasına entegre edilmektedir.



Şekil 3.8: Adaptif Kontrolcü İç Yapısının Görünümü

Şekil 3.9'de, örnek olarak $\hat{k}_1$ parametresine ait tahmin bloğuna ait simülasyon yapısı gösterilmiştir. Buradaki yapı, giriş olarak hata sinyalini ve regresör değerini kullanmakta; bu değerlerin çarpımı üzerinden tahmin güncellenmektedir. Yapı içinde kullanılan alfa (α) ve epsilon (ε) katsayıları, tahmin sürecinin öğrenme hızını ve kararlılığını belirlemekte olup, sistemin çevrim içi uyarlanabilirliğini sağlamaktadır.



Şekil 3.9: Adaptif Kontrolcü Tahmin Blok Yapısının Görünümü

Aynı yapı, sönüm katsayısı ($\hat{c}_1$), tekerlek kütlesi ($\hat{m}_1$) ve ikinci yay katsayısı ($\hat{k}_2$) için de benzer şekilde uygulanmıştır. Bu bloklar, simülasyon ortamında modüler olarak tasarlanmış ve hata sinyalleri üzerinden çevrim içi güncelleme gerçekleştirecek biçimde yapılandırılmıştır.

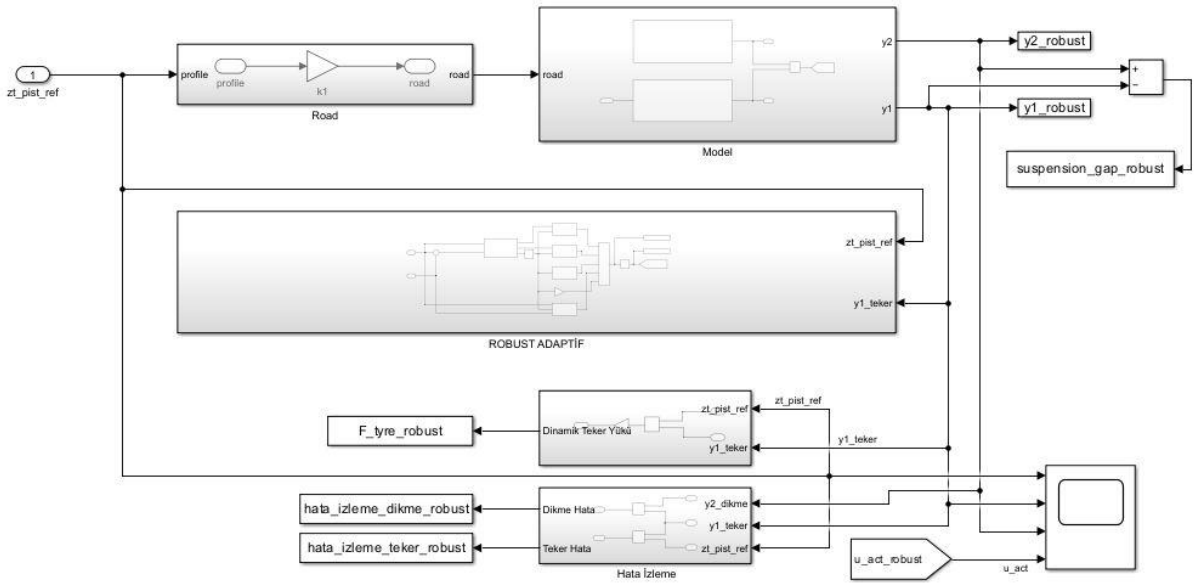
3.3.3. Uyarlamalı-Gürbüz (Adaptive- Robust) Kontrolcünün Uygulama Tasarımı

Uyarlamalı-gürbüz kontrol yapısı, adaptif kontrolcüye ek olarak sisteme dış bozucuların etkisini baskılayacak ilave bir sağlamlık mekanizması entegre edilerek oluşturulmuştur. Bu kontrolcü, hem sistem parametrelerindeki belirsizlikleri tahmin eden uyarlamalı yapıdan hem de bu belirsizliklerin yanında dış bozucu sinyallerin (örneğin rüzgâr, ani yük aktarımı vb.) etkilerini sınırlayacak sağlamlık teriminden oluşur.

Sistemin dinamiklerine uygulanan kontrol yasası, Lyapunov temelli bir yaklaşım ile oluşturulmuş olup, hem parametre tahminlerinin güncellenmesini hem de dış bozucu etkilerin belirli sınırlar içinde tutulmasını sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Bu yapıdaki temel fark, adaptif kontrolcüde yalnızca ara değişken olarak yer alan sigma (σ) ifadesinin, robust kontrolcüde doğrudan kontrol yasasına dahil edilerek aktif bir sağlamlık (robust) bileşeni haline getirilmesidir. Sigma (σ) terimi, sistemdeki hata büyüklüğü ve değişim hızına bağlı olarak kontrol sinyaline doğrudan etki eder; böylece dış bozucu etkileri bastıran ve sistemin kararlılığını koruyan dengeleyici bir kuvvet görevi üstlenir.

Şekil 3.10'da, bu çalışmada geliştirilen uyarlamalı-gürbüz kontrolcü yapısının simülasyon ortamındaki genel blok diyagramı sunulmuştur. Bu yapıda, referans pist profili ile tekerlek konumu arasındaki fark sinyali kullanılarak hata büyüklüğü elde edilmekte ve bu hata bilgisi, kontrolcü içerisinde hem adaptif yapı hem de robust iyileştirme birimi tarafından işlenmektedir. Parametre tahmini yapan adaptif mekanizma, yay katsayısı, sönüm katsayısı ve

kütle gibi bilinmeyen sistem parametrelerini çevrim içi olarak güncellerken; gürbüz birim ise dış bozucuların etkisini bastırmaya yönelik bir dengeleme kuvveti üretmektedir.

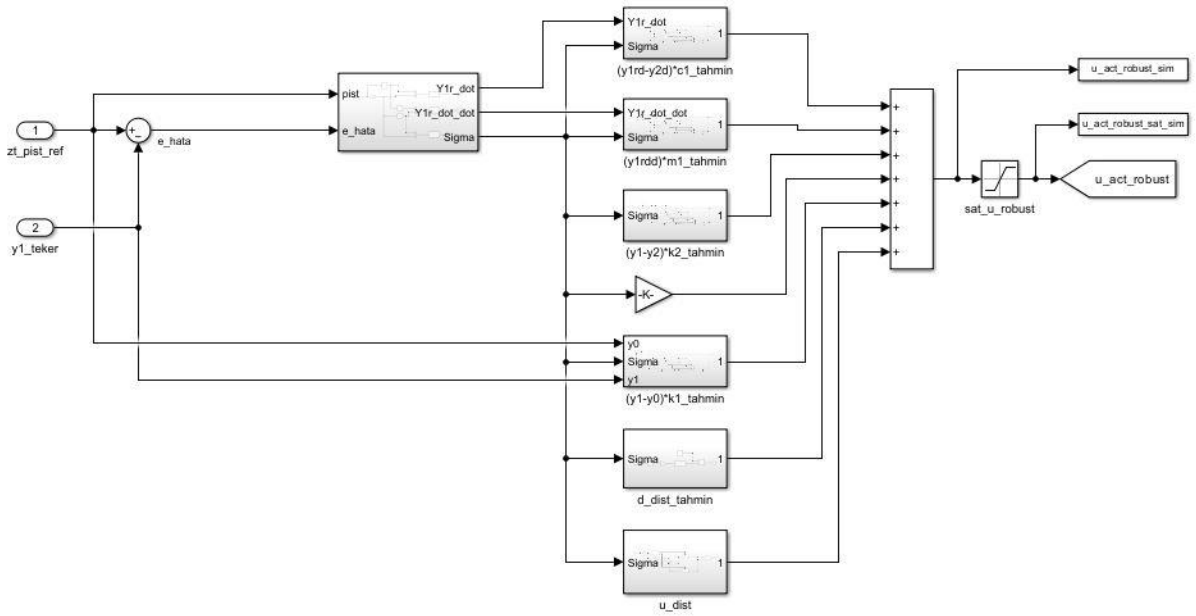


Şekil 3.10: Adaptif Robust Kontrolcü Genel Yapısının Görünümü

Şekil 3.11'de alt sistem yapısı incelendiğinde, adaptif mekanizmadan elde edilen parametre tahminlerine ek olarak bir sigma (σ) teriminin kontrol yasasına dahil edildiği görülmektedir. Bu sigma terimi, sistemdeki hata büyüklüğü ve değişim hızını göz önünde bulundurarak kontrol kuvvetine doğrudan katkı sağlar. Böylece dış bozucu etkilerin kontrol performansını olumsuz yönde etkilemesi engellenmiş olur.

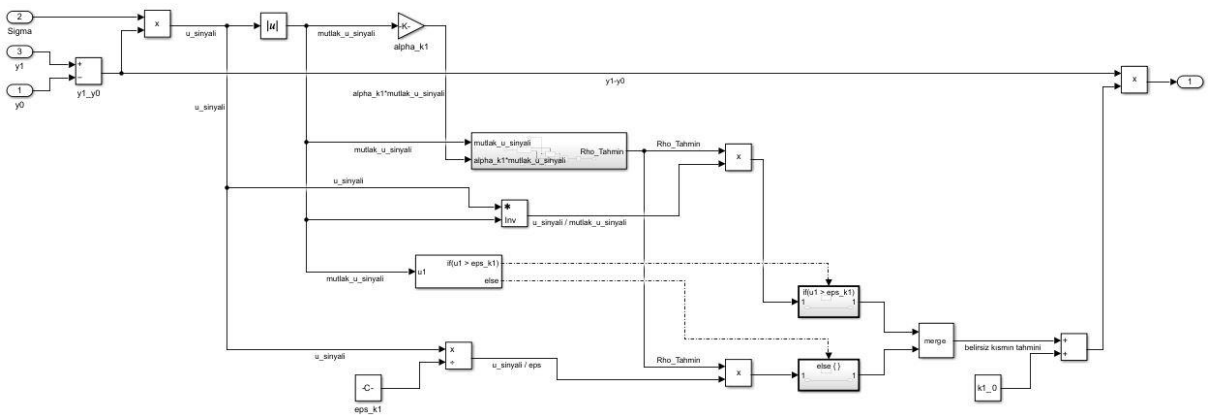
Buna ek olarak, sistemdeki bozucu kuvvetlerin (örneğin rüzgar, yüzey darbeleri veya ani yük aktarımı gibi) dinamik etkilerini bastırmak amacıyla ek bir gürbüz (robust) tahmin birimi modele entegre edilmiştir. Bu yapı, kontrolcüye yalnızca adaptif parametre güncellemeleriyle değil, aynı zamanda dış bozucu kuvvetleri tahmin edip sistemi dengeleyen bir katkı sağlamaktadır.

Bu kapsamda adaptif robust kontrol yapısında, dış bozucu etkilerin bastırılması amacıyla kullanılan bu dengeleme kuvveti; bozucu tahmin ($\hat{L}$), gürbüz dengeleme kuvveti (u_d) ve tahmin katsayısı ($\hat{\omega}$) terimlerinden oluşur. Bu terimler, 2.4.3'te yer alan denklemler (2.17)–(2.19)'da ifade edildiği üzere, kontrol yasasına ek bir düzeltici kuvvet bileşeni olarak entegre edilmiştir.



Şekil 3.11: Adaptif Robust Kontrolcü İç Yapısının Görünümü

Bu yapının en kritik bileşenlerinden biri olan sigma (σ) terimi, sistemin dinamik davranışına göre değişen bir koruyucu sınır tanımlar. **Şekil 3.12**'de gösterildiği üzere, bu mekanizmada kontrol girişinin mutlak değeri üzerinden türetilmiş bir katkı hesaplanmakta ve belirli bir eşik değerinin üzerinde bu katkı doğrudan kontrol sinyaline dahil edilmektedir. Bu terim, hata büyüklüğüne göre sistemi kararlı tutmak için kontrol girişine doğrudan katkı sağlamaktadır.



Şekil 3.12: Adaptif Robust Kontrolcü Tahmin Blok Yapısının Görünümü

Aynı yapı, yay katsayısı ($\hat{k}_1$) dışında sönüm katsayısı ($\hat{c}_1$), tekerlek kütlesi ($\hat{m}_1$) ve ikinci yay katsayısı ($\hat{k}_2$) için de benzer şekilde uygulanmıştır. Her parametre için bağımsız bir tahminci tanımlanarak kontrolcüye entegre edilmiştir.

Bu yapı sayesinde sistem, yalnızca parametre belirsizliklerine karşı değil, aynı zamanda dış bozucu kuvvetlerin etkilerine karşı da aktif olarak tepki üretebilmektedir. Böylece kontrolcü, hem adaptif tahmin mekanizmasıyla parametre değişimlerini izlemekte, hem de sigma tabanlı robust bileşen aracılığıyla bozucuların etkisini bastırmaktadır.

Sonuç olarak, bu yapı sayesinde kontrolcü yalnızca sistem parametrelerini çevrim içi tahmin etmekle kalmamakta; aynı zamanda dış bozucuların etkisini azaltmak için ek bir gürbüzlük katmanı sunmaktadır. Bu sayede iniş takımı sisteminin daha kararlı, güvenli ve esnek bir yapıda çalışmasını mümkün hale getirmektedir.

4. BULGULAR

Bu bölümde, iniş takımı sisteminin farklı kontrol stratejileri altında sergilediği dinamik tepkiler analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında kontrolcüsüz (pasif) sistem, PID kontrollü sistem, adaptif kontrollü sistem ve adaptif-robust kontrollü sistem olmak üzere dört ayrı senaryo değerlendirilmiştir. Her bir kontrol yaklaşımı, sistemin zamana bağlı değişen dış bozucu etkiler karşısında kararlılığını koruma ve pist profilini takip etme kabiliyeti açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Gerçekleştirilen simülasyonlarda, her kontrol yapısı için temel sistem tepkileri olan dikme konumu (y_2), ivme (a_2) ve kontrol kuvveti (u) büyüklükleri değerlendirilmiştir. Bu değişkenler, sistemin zamana bağlı kararlılık davranışı ve kontrolcü etkinliği hakkında doğrudan bilgi sağlamaktadır.

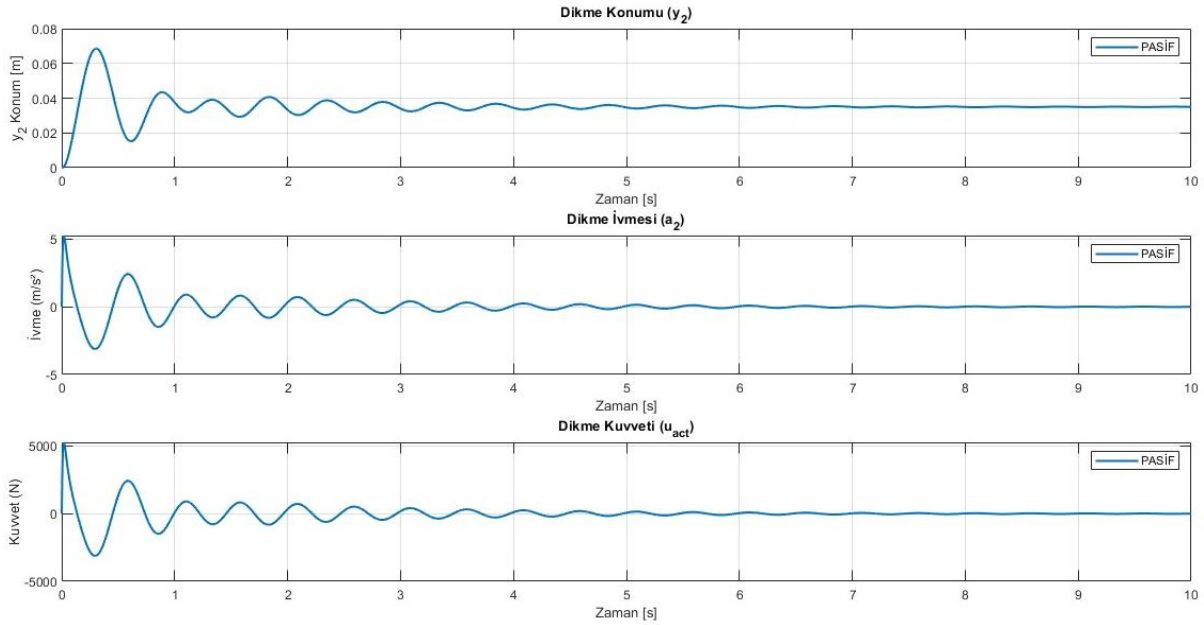
Buna ek olarak, sistemin fiziksel performansını temsil eden iki önemli parametre üzerinden de değerlendirme yapılmıştır. Bunlardan ilki olan süspansiyon açıklığı (y_2-y_1), iniş takımı strok miktarını ve enerji sönümleme kabiliyetini göstermektedir. İkincisi olan dinamik tekerlek yükü, tekerleğin pist yüzeyi ile temas kararlılığını ve zemine aktarılan yük değişimini yansıtmaktadır. Bu parametreler, kontrolcülerin gerçek pist koşullarındaki fiziksel etkilerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Her kontrolcü için gerçekleştirilen simülasyonlar 10 saniyelik süre boyunca yürütülmüş ve tüm sistem tepkileri aynı pist profili altında değerlendirilmiştir. Analizlerde, kontrolcüsüz sistem referans alınarak her kontrolcü yapısının getirdiği iyileşme oranları belirlenmiştir. Böylece, konum, ivme, kontrol kuvveti, süspansiyon açıklığı ve dinamik tekerlek yükü büyüklükleri üzerinden sistemin genel davranışı kapsamlı biçimde karşılaştırılmıştır.

4.1. KONTROLSÜZ (PASİF) SİSTEM SONUÇLARI

Bu bölümde, iniş takımı sisteminin herhangi bir kontrolcü etkisi olmadan, yalnızca yay, sönümleyici ve kütle etkileşimi altında sergilediği doğal dinamik davranış incelenmiştir. Bu durum, sistemin dış kontrol girişinden bağımsız olarak kendi mekanik özellikleriyle verdiği tepkiyi göstermesi açısından referans senaryo olarak ele alınmıştır.

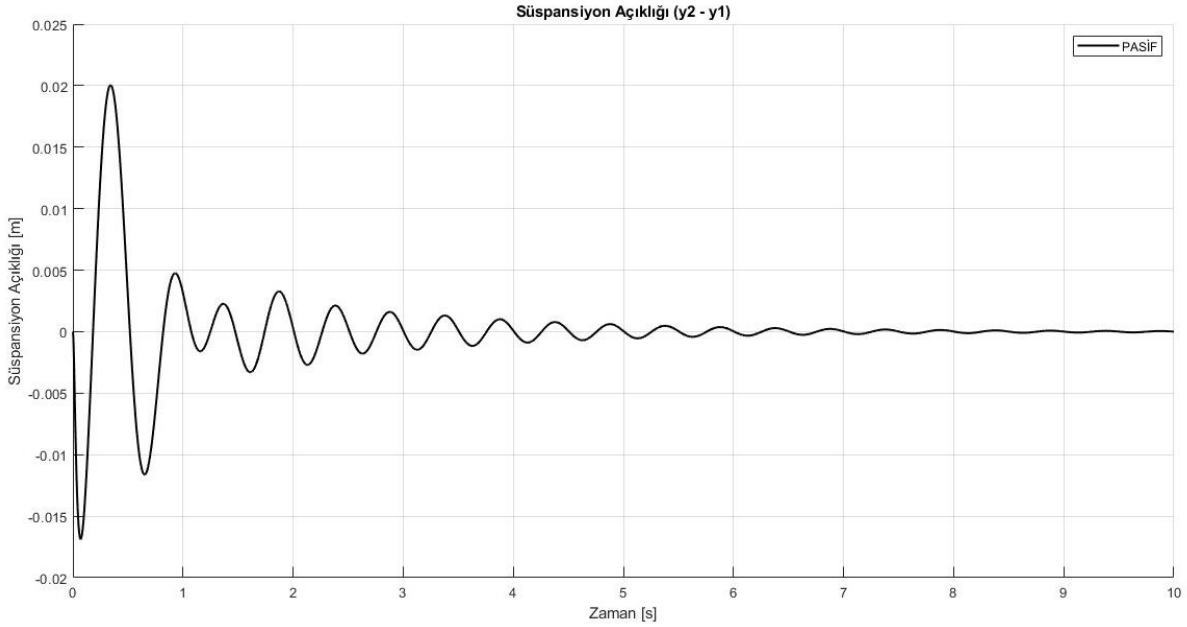
Şekil 4.1'de dikme konumu (y_2), dikme ivmesi (a_2) ve dikme kuvveti (u) büyüklüklerinin zamana bağlı değişimleri görülmektedir. Sistem, dış uyaranın etkisiyle ilk anda belirgin bir salınım göstermekte, ardından sönümleyici elemanın etkisiyle titreşim genliği zamanla azalmaktadır. Yaklaşık 3 saniye sonrasında salınımlar belirgin biçimde azalarak sistem kararlı hâle geçmektedir. Bu durum, pasif sistemin enerji sönümleme kapasitesinin sınırlı olduğunu, ancak belirli bir süre sonunda denge konumuna ulaşabildiğini göstermektedir.



Şekil 4.1: Kontrolsüz (Pasif) Sistemin Konum (y_2), İvme (a_2) ve Kontrol Kuvveti (u) Grafikleri

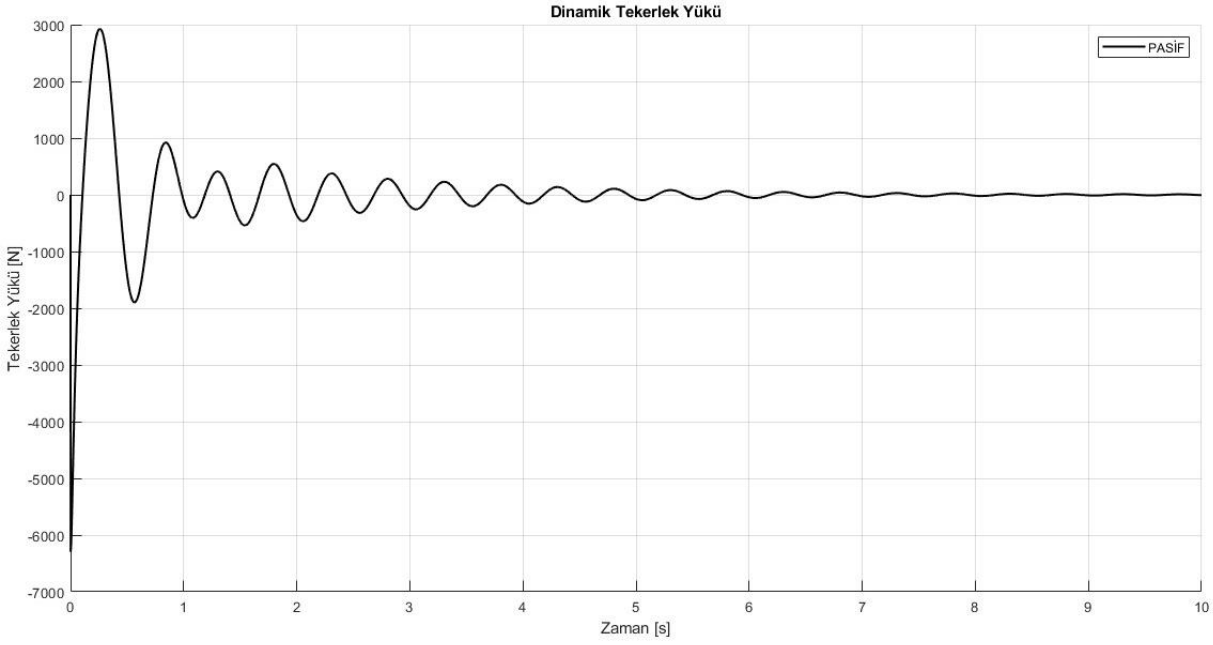
Pasif sistem senaryosunda herhangi bir aktif kontrol kuvveti uygulanmamaktadır. Grafikte gösterilen u_act ifadesi, yalnızca sistemin dikme tarafında meydana gelen reaksiyon kuvvetini (yay ve sönüm elemanlarından kaynaklanan iç dinamik kuvvetleri) temsil etmektedir. Bu nedenle, bu kuvvetin varlığı aktif kontrol etkisini değil, pasif sistemin doğal tepki kuvvetini göstermektedir.

Şekil 4.2'de verilen süspansiyon açıklığı ($y_2 - y_1$) grafiği, iniş takımı strok hareketini ve enerji sönümleme davranışını ortaya koymaktadır. Başlangıçta yaklaşık 0.02 m genliğe ulaşan açıklık, zamanla azalarak denge değerine yaklaşmıştır. Bu davranış, sistemin pasif sönümleme elemanlarıyla kademeli olarak enerjiyi dağıttığını ve titreşimleri mekanik olarak bastırdığını göstermektedir.



Şekil 4.2: Kontrolsüz (Pasif) Sistemin Süspansiyon Açıklığı ($y_2 - y_1$)

Şekil 4.3'te dinamik tekerlek yükü değişimi sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, tekerlek yükünün ilk anda yaklaşık ±3000 N mertebesinde dalgalandığını ve ardından dengeye geldiğini göstermektedir. Bu davranış, pasif sistemlerde karakteristik olarak gözlenen zemin-temas kararsızlıklarının ve yük salınımlarının bir göstergesidir. Bu tür sistemlerde aktif bir kontrol kuvveti bulunmadığından, dış uyaranlara karşı yük aktarımı doğrudan mekanik yay-sönüm özellikleri tarafından belirlenmektedir.



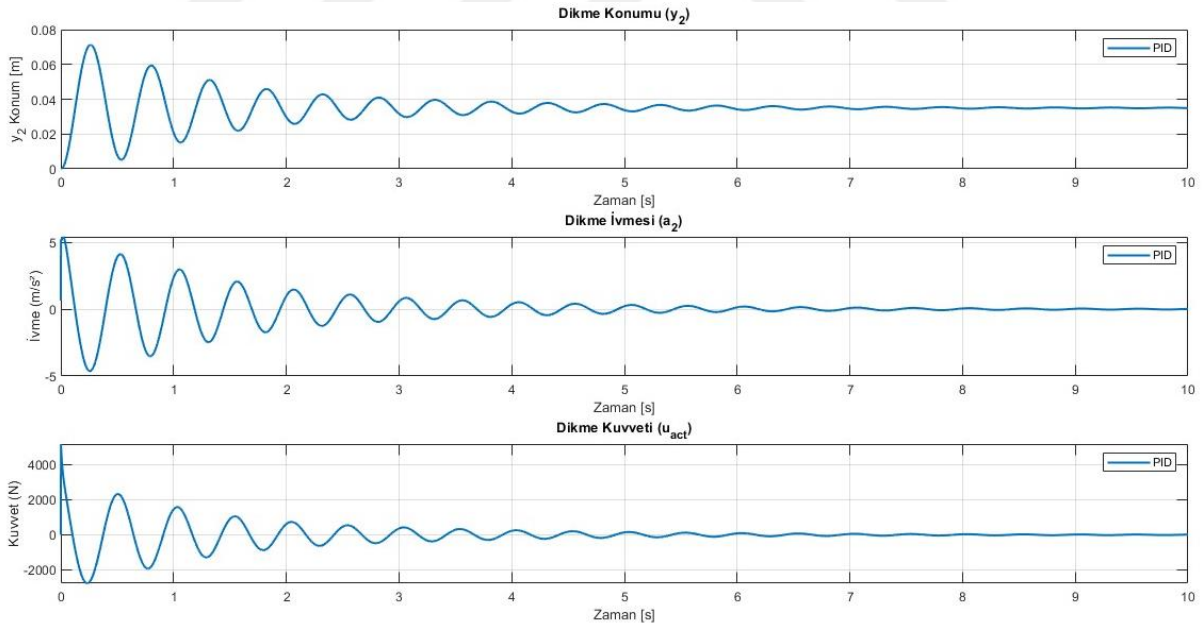
Şekil 4.3: Kontrolsüz (Pasif) Sistemin Dinamik Tekerlek Yükü (N)

Sonuç olarak, kontrolsüz (pasif) sistem senaryosu, iniş takımı dinamiğinin doğal davranışını ve diğer kontrol yapılarının sağlayacağı iyileştirmeleri değerlendirmek açısından referans bir temel oluşturmaktadır.

4.2. PID KONTROLLÜ SİSTEM SONUÇLARI

Bu bölümde, klasik PID kontrolcünün iniş takımı sistemine uygulanmasıyla elde edilen dinamik davranışlar analiz edilmiştir. PID kontrol yapısı, sistemin pist profilini daha hızlı ve kararlı bir biçimde takip etmesini, aynı zamanda titreşim genliğini azaltmasını hedeflemektedir.

Şekil 4.4'te dikme konumu (y_2), dikme ivmesi (a_2) ve kontrol kuvveti (u) büyüklüklerinin zamana bağlı değişimleri sunulmuştur. Pasif duruma kıyasla PID kontrolü, sistemin ilk salınım genliğini belirgin biçimde azaltmış ve kararlılık süresini kısaltmıştır. Yaklaşık 2 saniye içerisinde sistem denge konumuna ulaşmış, bu da kontrolcünün hızlı tepki kabiliyetini ortaya koymuştur.

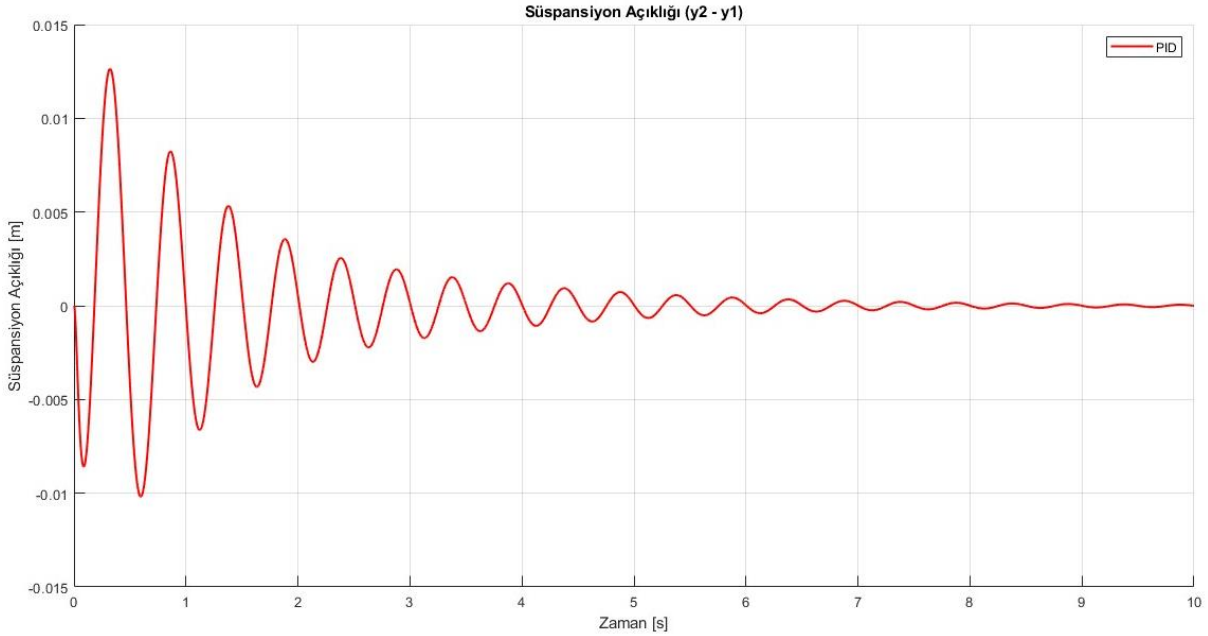


Şekil 4.4: PID Kontrollü Sistemin Konum (y_2), İvme (a_2) ve Kontrol Kuvveti (u) Grafikleri

İvme grafiğinde, sistemin titreşim davranışının sönümlendiği ve daha düzgün bir geçiş gösterdiği gözlenmiştir. Kontrol kuvveti grafiği ise kontrolcünün salınım fazında dengeleyici yönde kuvvet ürettiğini ve zamanla bu kuvvetin sıfıra yaklaştığını göstermektedir. Bu durum,

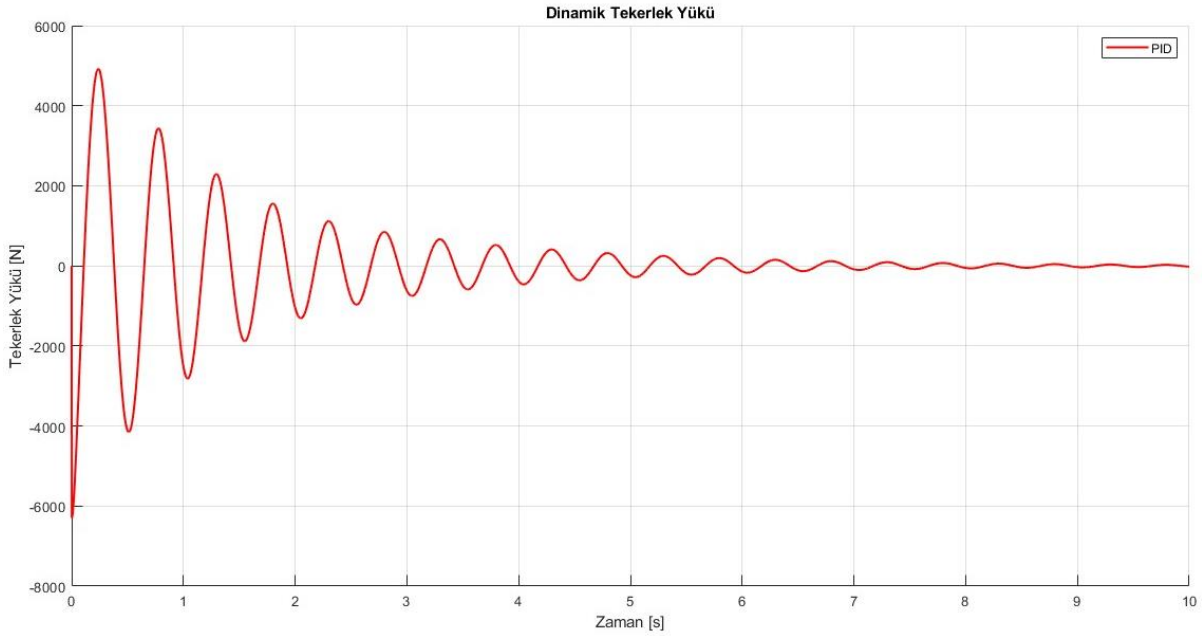
PID kontrolcünün enerji etkin bir biçimde çalıştığını ve gereksiz kontrol eforundan kaçındığını doğrulamaktadır.

Şekil 4.5'te yer alan süspansiyon açıklığı ($y_2 - y_1$) grafiği, sistemin strok hareketi üzerindeki kontrolcü etkisini göstermektedir. PID kontrolü, süspansiyon açıklığının genliğini düşürmüş ve geçici rejimdeki salınımları hızla bastırmıştır. Bu durum, sistemin titreşim sönümleme kabiliyetinin kontrolcü varlığında iyileştiğini ve iniş sırasında daha yumuşak bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5: PID Kontrollü Sistemin Süspansiyon Açıklığı ($y_2 - y_1$)

Şekil 4.6'da gösterilen dinamik tekerlek yükü grafiğinde, kontrolcüsüz sisteme kıyasla tekerlek yükündeki dalgalanmaların genliği artmış ancak daha kısa sürede kararlılığa ulaşmıştır. Bu davranış, PID kontrolcünün hızlı tepki verme avantajının bir sonucu olarak, sistemin yük aktarımında kısa süreli ancak sınırlı genlikli salınımlara neden olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla kontrolcü, sistem kararlılığını korurken pist temasının da belirli bir süre içinde dengelenmesini sağlamıştır.



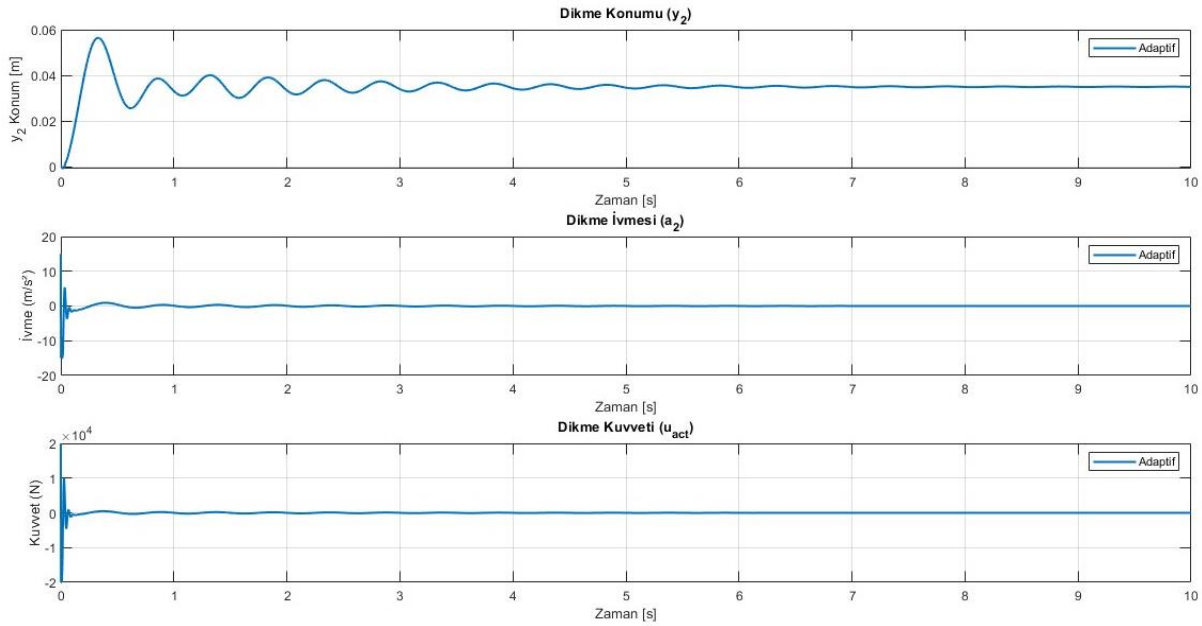
Şekil 4.6: PID Kontrollü Sistemin Dinamik Tekerlek Yükü (N)

Sonuç olarak PID kontrolcü, sistemin kararlılığa ulaşma süresini kısaltmış, salınım genliğini azaltmış ve enerji sönümleme başarımını artırmıştır. Ancak kontrol kuvvetindeki artış, özellikle ilk temas anında tekerlek yükünde kısa süreli yükselmelere yol açmıştır. Bu durum, sistemin kontrolsüz haline göre daha etkin ancak nispeten sert bir tepki verdiğini göstermektedir.

4.3. ADAPTİF KONTROLLÜ SİSTEM SONUÇLARI

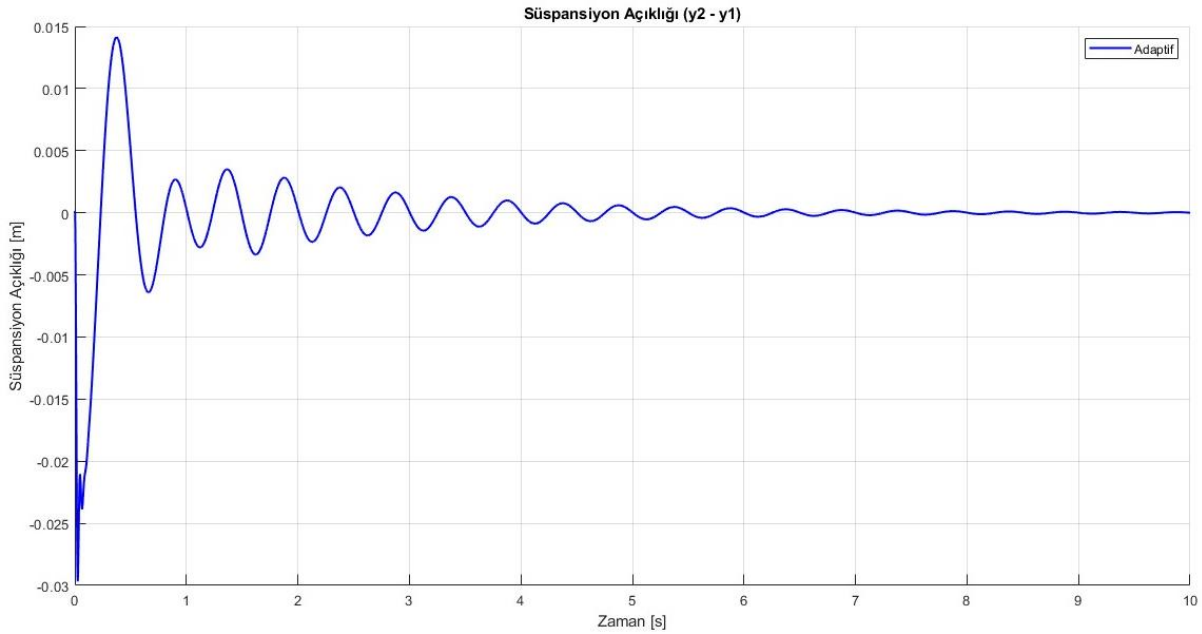
Bu bölümde, sistem parametrelerindeki değişimlere çevrim içi uyum sağlayabilen adaptif kontrol yapısının performansı incelenmiştir. Adaptif kontrolcü, sistemdeki belirsizliklerin etkisini azaltmak ve iniş takımı dinamiğinin kararlılığını artırmak amacıyla parametre tahmini mekanizmasıyla çalışmaktadır.

Şekil 4.7'de dikme konumu (y_2), dikme ivmesi (a_2) ve kontrol kuvveti (u) değişimleri sunulmuştur. Adaptif kontrolcü, PID kontrolcüsüne kıyasla daha dengeli bir geçiş tepkisi sergilemiş ve sistemin kararlılığa ulaşma süresini yaklaşık 1.5 saniye civarına indirmiştir. İvme grafiğinde görüldüğü üzere, sistemin salınımları kısa sürede bastırılmış ve dikme hareketi düşük genlikli bir biçimde dengeye ulaşmıştır. Kontrol kuvveti değerleri ise PID sistemine göre daha yüksek genlikte gerçekleşmiştir; bu durum, adaptif yapının parametre değişimlerine daha agresif bir şekilde yanıt verdiğini göstermektedir.



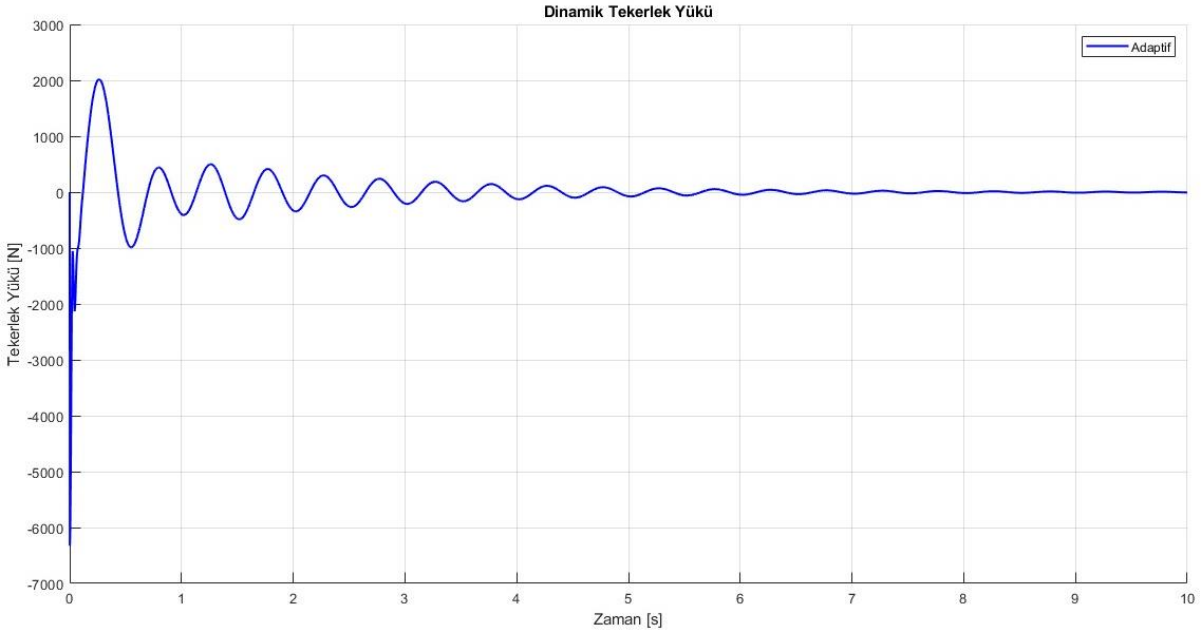
Şekil 4.7: Adaptif Kontrollü Sistemin Konum (y_2), İvme (a_2) ve Kontrol Kuvveti (u) Grafikleri

Şekil 4.8'deki süspansiyon açıklığı ($y_2 - y_1$) grafiği, adaptif kontrolcünün titreşim sönümleme başarımını açıkça ortaya koymaktadır. Süspansiyon hareketinin genliği, pasif ve PID sistemlere göre daha küçük değerlere inmiş ve geçici rejim süresi belirgin biçimde kısalmıştır. Bu sonuç, kontrolcünün sistemdeki yay ve sönüm parametrelerindeki değişimlere dinamik olarak uyum sağlayabildiğini göstermektedir.



Şekil 4.8: Adaptif Kontrollü Sistemin Süspansiyon Açıklığı ($y_2 - y_1$)

Şekil 4.9'da verilen dinamik tekerlek yükü grafiği incelendiğinde, yük dalgalanmalarının kısa sürede bastırıldığı ve tekerleğin pist yüzeyiyle teması daha kararlı biçimde sürdürdüğü gözlemlenmiştir. Adaptif kontrol, değişen dış etkiler karşısında tekerlek yükündeki geçici salınımları azaltarak daha dengeli bir yük aktarımı sağlamıştır. Böylece, iniş sırasında tekerlek-pist etkileşimi daha yumuşak ve kararlı bir hâl almıştır.



Şekil 4.9: Adaptif Kontrollü Sistemin Dinamik Tekerlek Yükü (N)

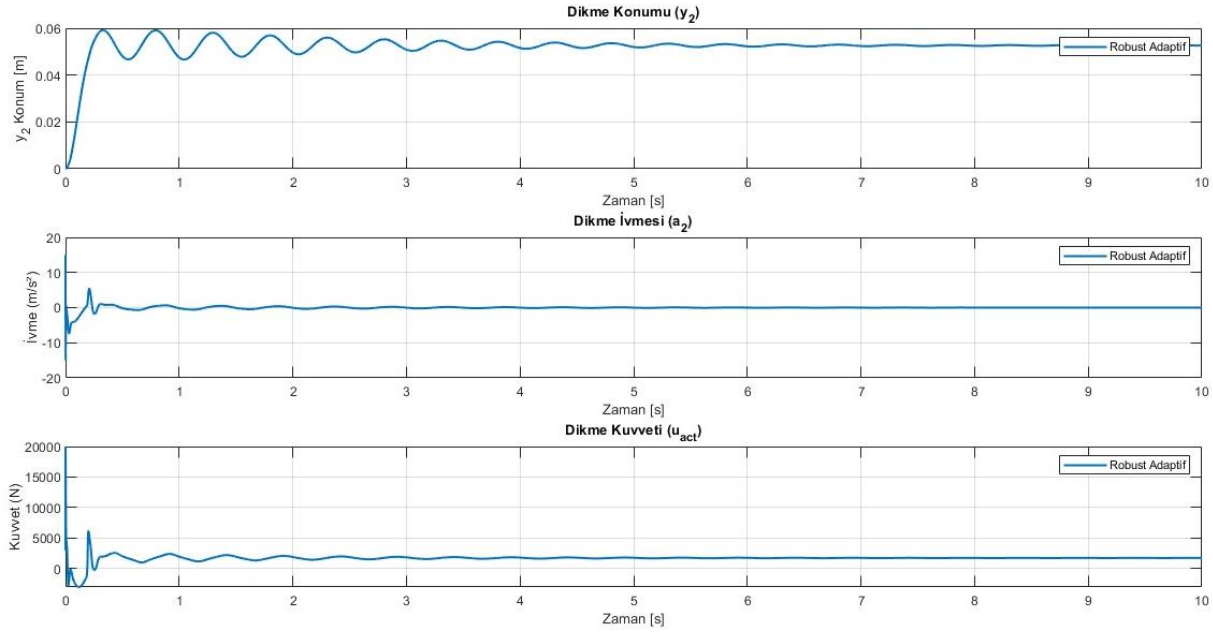
Sonuç olarak, adaptif kontrolcü sistemi hem konum hem ivme yanıtı açısından oldukça kararlı hâle getirmiş, süspansiyon açıklığını sınırlı düzeyde tutarak sistemin konfor ve stabilite performansını iyileştirmiştir. Ancak yüksek kontrol kuvvetleri, sistemin enerji talebini artırma potansiyeline sahiptir. Buna rağmen, genel kararlılık ve uyarlanabilirlik açısından en verimli sonuçlardan biri adaptif kontrol yapısıyla elde edilmiştir.

4.4. ADAPTİF-ROBUST KONTROLLÜ SİSTEM SONUÇLARI

Bu bölümde, adaptif kontrolcü yapısına ilave edilen robust (sağlam) teriminin sistem performansına etkisi incelenmiştir. Adaptif-robust kontrolcü, parametre belirsizliklerinin yanı sıra dış bozucu etkilerin de sistem kararlılığını olumsuz yönde etkilemesini önlemek amacıyla tasarlanmıştır. Bu yapıda, klasik adaptif kontrolün parametre tahmin kabiliyeti korunurken, Lyapunov temelli ek bir sağlamlık terimi aracılığıyla sistemin dış bozuculara karşı dayanıklılığı artırılmıştır. Böylece hem parametre değişimlerine uyum sağlanmakta hem de beklenmeyen dış etkiler bastırılmaktadır.

Şekil 4.10'da dikme konumu (y_2), ivmesi (a_2) ve kontrol kuvveti (u) büyüklüklerinin zamanla değişimleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, adaptif-robust kontrolcünün sistem tepkisini yüksek kararlılıkla düzenlediğini göstermektedir. Başlangıçta küçük bir aşım gözlenmekle birlikte, sistemin çok kısa sürede (yaklaşık 1 saniye içerisinde) kararlı hâle geldiği görülmektedir. Bu durum, robust teriminin kontrol yasasına kazandırdığı ek bastırma etkisinin doğrudan bir sonucudur.

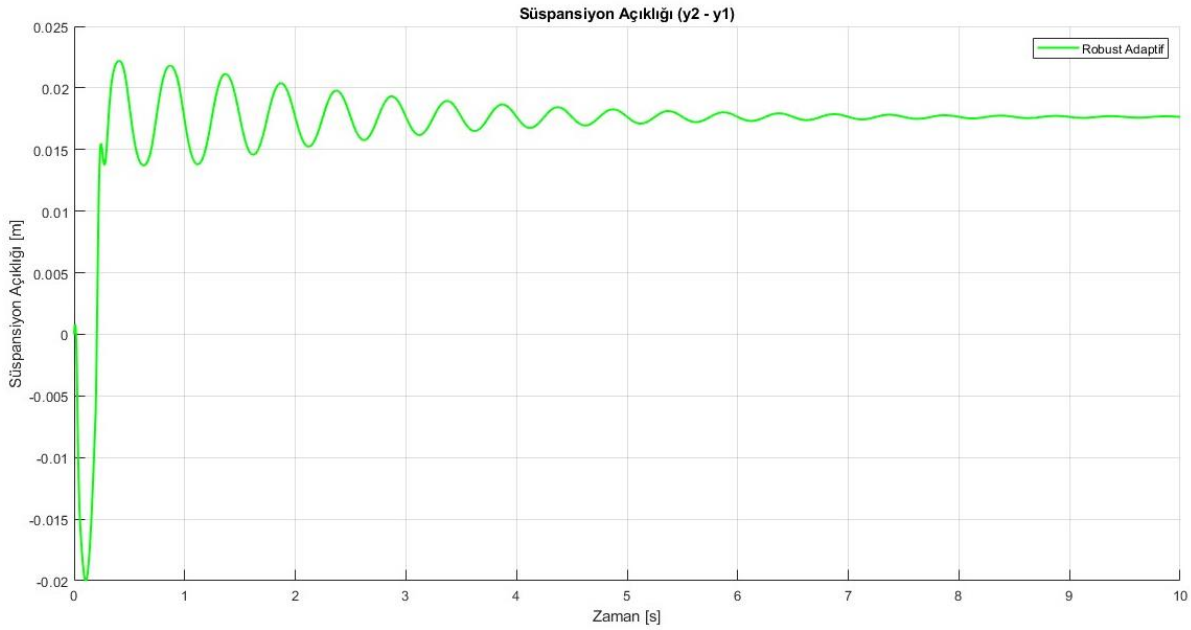
İvme yanıtında, geçici rejimin oldukça kısa sürdüğü ve düşük genlikli titreşimlerle kararlılığın sağlandığı gözlenmiştir. Sistemin ani ivme değişimlerine karşı duyarlılığı azalmış, bu da iniş anındaki seyir konforunun ve yapısal dayanımın artmasına katkı sağlamıştır. Kontrol kuvveti grafiği incelendiğinde, kuvvet büyüklüklerinin adaptif kontrolcüye kıyasla daha düşük genlikte seyrettiği, sistemin gereksiz kontrol eforundan kaçındığı görülmektedir. Bu sonuç, adaptif-robust yapının kontrol enerjisini etkin kullandığını ve sistemi hem güçlü hem de ekonomik biçimde stabilize ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.10: Adaptif Robust Kontrollü Sistemin Konum (y_2), İvme (a_2) ve Kontrol Kuvveti (u) Grafikleri

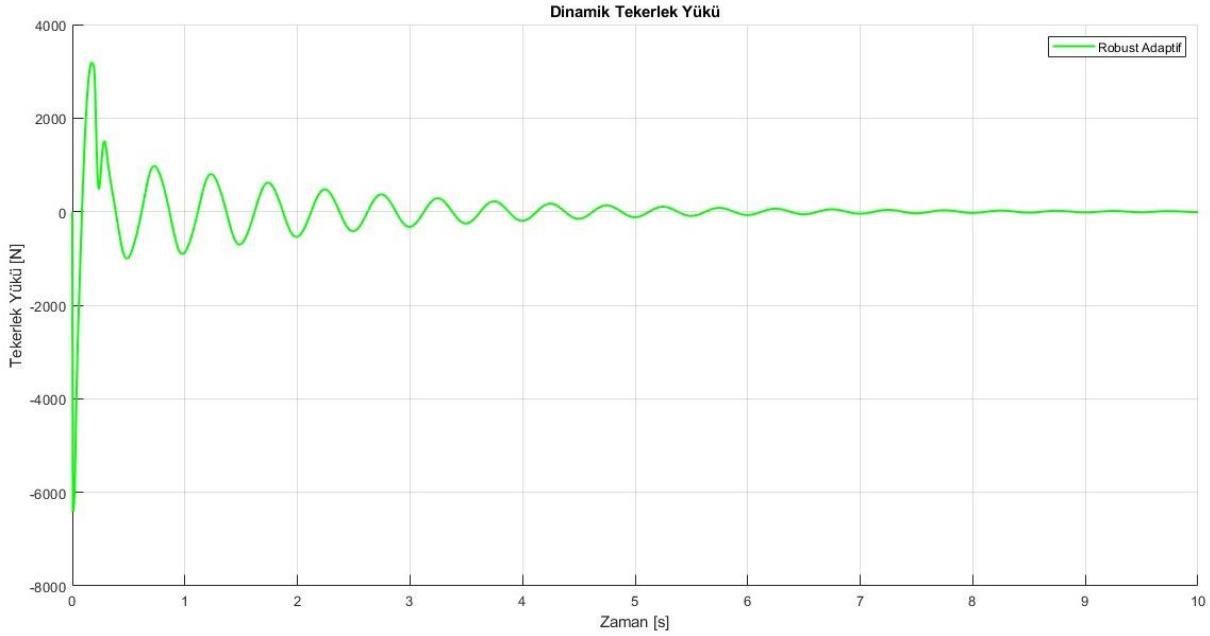
Şekil 4.11'de yer alan süspansiyon açıklığı (y_2-y_1) grafiği, adaptif-robust kontrolün sistemin mekanik esneklik üzerindeki etkisini göstermektedir. Süspansiyon hareketinin genliği adaptif kontrolcüye göre kısmen artmakla birlikte, genel davranış daha düzgün ve düzenli bir salınım biçimindedir. Bu durum, adaptif-robust yapının salınımları bastırmak yerine belirli bir denge aralığında kontrol altında tutarak sistemin hem konfor hem de

dayanım açısından optimum bir davranış sergilemesini sağlamaktadır. Başka bir ifadeyle, sistemdeki aşırı sönümleme eğilimi engellenmiş, kontrollü bir şekilde pist yüzeyine uyum sağlanmıştır. Bu durum özellikle yüksek hızda iniş veya zemin pürüzlülüğü yüksek pist koşullarında kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.11: Adaptif Robust Kontrollü Sistemin Süspansiyon Açıklığı ($y_2 - y_1$)

Şekil 4.12'de dinamik tekerlek yükü değişimi verilmiştir. Bu sonuçlar, adaptif-robust kontrolcünün tekerlek yükündeki dalgalanmaları çok kısa sürede stabilize ettiğini ve zeminle temasın sürekliliğini koruduğunu göstermektedir. Başlangıçta meydana gelen ani yük artışı, sistemin hızlı tepki karakteristiğiyle kısa sürede sönümlenmiştir. Böylece, tekerlek-pist etkileşiminde meydana gelebilecek olası sıçrama veya zemin kaybı durumları engellenmiştir. Özellikle PID ve adaptif kontrolcülere kıyasla, adaptif-robust yapının dış bozucular altında yük aktarımını çok daha dengeli biçimde gerçekleştirdiği görülmüştür.



Şekil 4.12: Adaptif Robust Kontrollü Sistemin Dinamik Tekerlek Yükü (N)

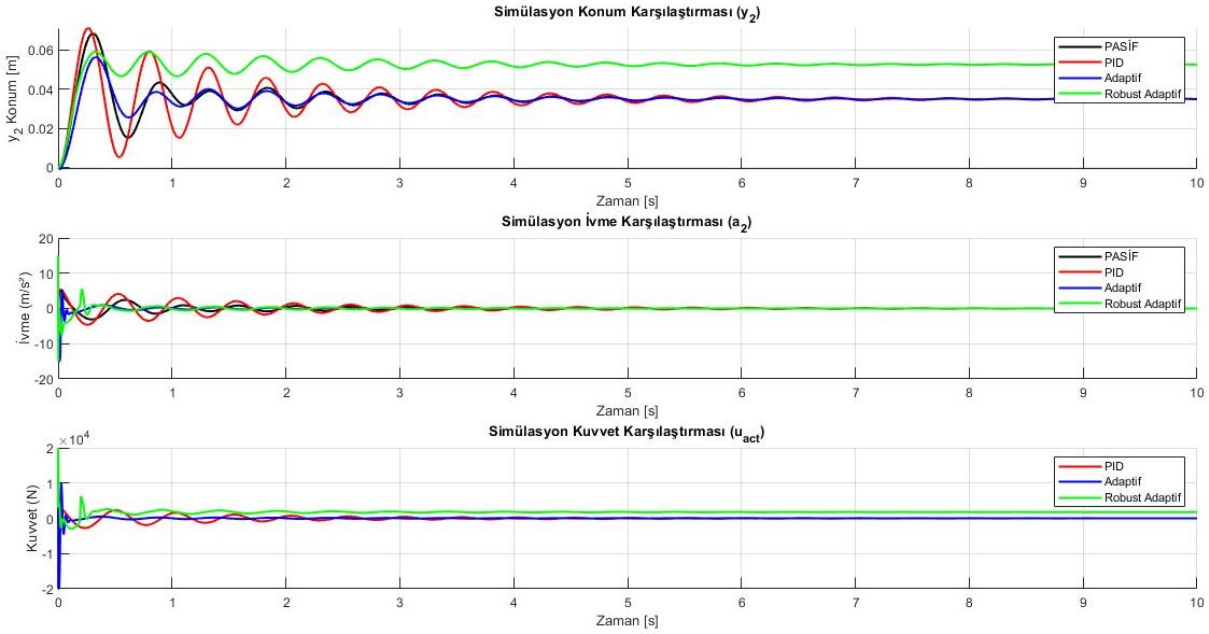
Sonuç olarak adaptif-robust kontrolcü, parametre belirsizliklerinin yanı sıra dış bozucu etkiler altında da sistem kararlılığını koruyabilmiştir. Bu yapı, adaptif kontrolün esnekliğini ve robust kontrolün bastırma kabiliyetini birleştirerek üstün bir dengeleme performansı sunmuştur. Dikme konumu açısından yüksek doğruluk, ivme yanıtı açısından düşük titreşim, süspansiyon açıklığı bakımından kararlı davranış ve tekerlek yükü yönünden sürekli zemin teması elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, adaptif-robust kontrol yapısının hem teorik hem de uygulamalı olarak iniş takımı sistemlerinde kullanılabilirliğini ortaya koymakta; özellikle dış bozucuların yoğun olduğu iniş senaryolarında güvenli ve dengeli bir performans sağladığını göstermektedir.

4.5. KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, dört farklı kontrol stratejisinin (pasif, PID, adaptif ve adaptif-robust) iniş takımı sistemi üzerindeki genel performansları kapsamlı biçimde karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar; dikme konumu (y_2), dikme ivmesi (a_2), kontrol kuvveti (u), süspansiyon açıklığı (y_2-y_1), dinamik tekerlek yükü ve pist takip hatası gibi temel performans büyüklükleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her kontrol yapısının kararlılık, konfor, enerji verimliliği ve zemin uyumu açısından güçlü ve zayıf yönleri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

Şekil 4.13'te sunulan konum, ivme ve kontrol kuvveti grafiklerinde, sistemin genel dinamik tepkisi görülmektedir. Pasif sistemde dikme konumu yüksek genlikli salınımlar sergilerken, PID kontrolcü bu salınımları hızla bastırmış ve yaklaşık 2 saniye içinde kararlılığa ulaşmıştır. Adaptif kontrolcü, PID yapısına göre daha dengeli bir geçiş davranışı göstermiş, aşım oranını azaltarak sistemin kararlılık süresini yaklaşık 1.5 saniyeye düşürmüştür. Adaptif-robust kontrolcü ise sistemin kararlılığını en kısa sürede (yaklaşık 1 saniye) sağlayarak en istikrarlı genel konum tepkisini elde etmiştir. Bu durum, adaptif-robust yapının dış bozucular ve parametre belirsizlikleri karşısında sistem dengesini yüksek doğrulukla koruyabildiğini göstermektedir.

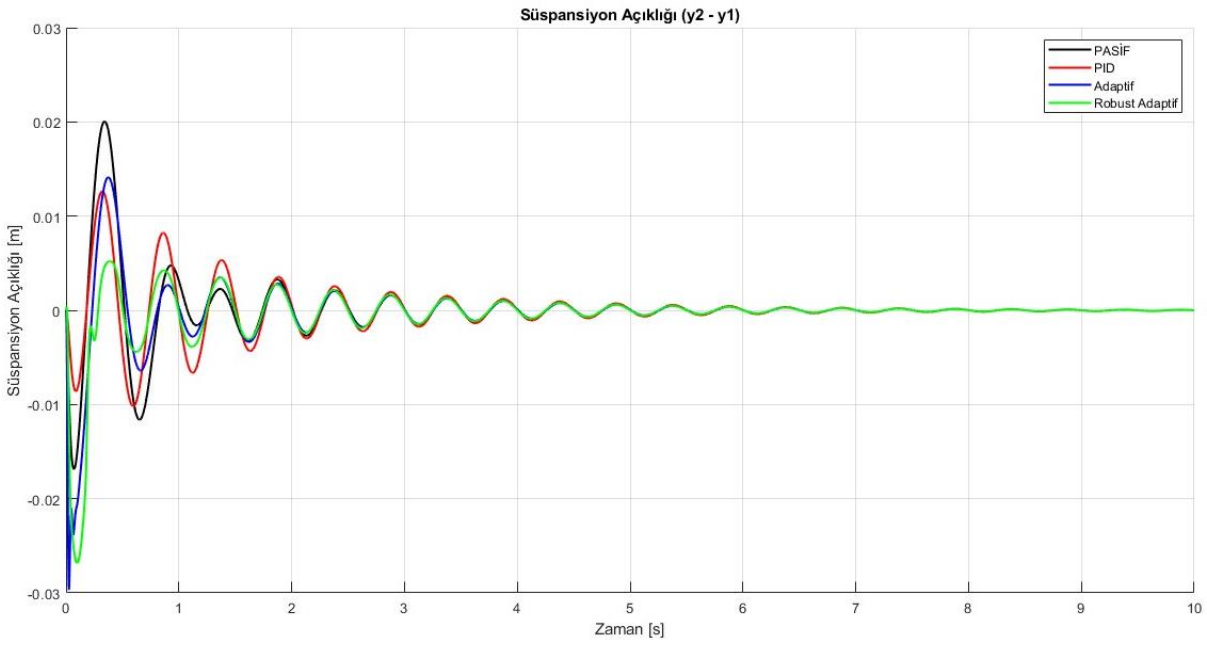


Şekil 4.13: Tüm Kontrolcülerin Konum (y_2), İvme (a_2) ve Kontrol Kuvveti (u) Karşılaştırma Grafikleri

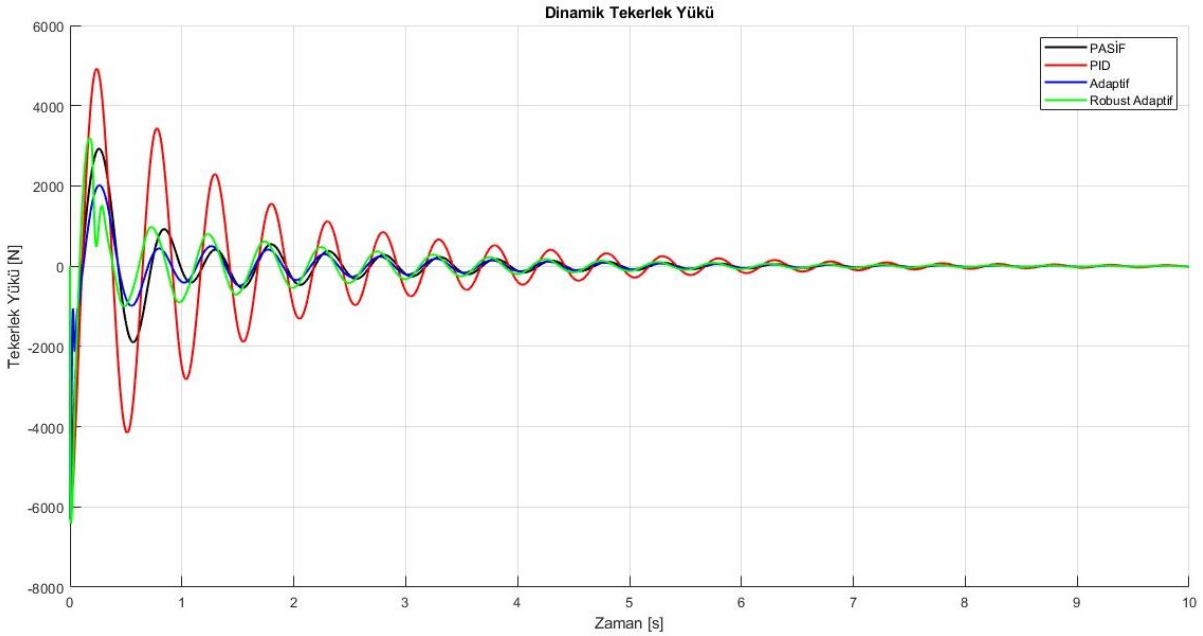
İvme karşılaştırması, kontrolcülerin titreşim sönümleme kabiliyetlerini doğrudan ortaya koymaktadır. Pasif sistemde dikme ivmesi ±5 m/s² seviyelerinde dalgalanırken, PID kontrolcü bu değeri ±3 m/s² seviyesine düşürmüştür. Adaptif kontrolcü, ivme değişimlerini ±2 m/s² aralığına çekerek konfor seviyesini belirgin biçimde artırmıştır. Adaptif-robust kontrolcüde ise geçici rejim sırasında kısa süreli yüksek frekanslı dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu durum, kontrol yasasındaki sağlamlık teriminin (σ) devreye girdiği anlarda ortaya çıkan ani düzeltme eylemlerinin doğal sonucudur. Bu dalgalanmalar kısa sürelidir ve sistemin kararlılığına zarar vermez; aksine, dış bozucuların hızlı şekilde bastırılmasını sağlar. Dolayısıyla adaptif-robust yapı, kararlılıktan ödün vermeden sistemin dış etkilere karşı hızlı ve güvenli tepki vermesini sağlamaktadır.

Kontrol kuvveti karşılaştırmasında (u), sistemin enerji etkinliği ve kontrolcü davranışı birlikte değerlendirilmiştir. PID kontrolcü hızlı tepki sağlasa da, başlangıçta yüksek genlikli kuvvet üretmiş ve bu durum kısa süreli enerji harcamasını artırmıştır. Adaptif kontrolcüde kontrol kuvveti daha yüksek genlikte başlamış ancak hızla sönümlenmiştir; bu, sistemin parametre değişimlerine karşı hızlı uyum sağladığını göstermektedir. Adaptif-robust kontrolcüde kuvvet profili ise daha kararlı bir karakter sergilemiş, aşırı tepki davranışı gözlenmemiştir. Bu sonuç, adaptif-robust kontrolün yalnızca kararlılığı artırmakla kalmayıp, kontrol enerjisinin verimli kullanımını da sağladığını göstermektedir.

Şekil 4.14 ve **Şekil 4.15**'te sırasıyla süspansiyon açıklığı (y_2-y_1) ve dinamik tekerlek yükü karşılaştırmaları verilmiştir. Süspansiyon açıklığı bakımından en yüksek salınım genliği pasif sistemde gözlenmiş, PID ve adaptif kontrolcüler bu salınımı önemli ölçüde bastırmıştır. Adaptif yapı, hem daha küçük genlikli hem de hızlı sönümlenen bir süspansiyon hareketi elde ederek iniş konforunu artırmıştır. Adaptif-robust kontrolcüde ise salınımlar diğer kontrolcülere göre daha iyi bastırılmış ve süspansiyon hareketinin genlik cevabı belirgin biçimde iyileşmiştir. Adaptif-robust yapı, konfor ve dayanım arasında dengeli bir performans sunmuştur.



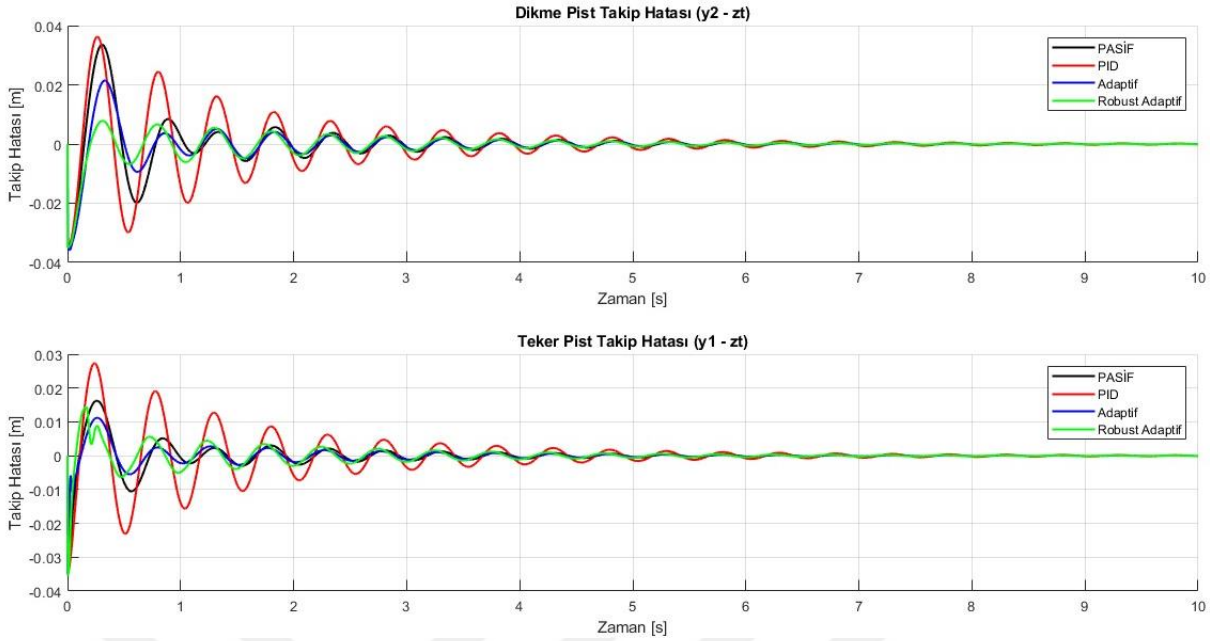
Şekil 4.14: Tüm Kontrolcülerin Süspansiyon Açıklığı ($y_2 - y_1$) Karşılaştırma Grafiği



Şekil 4.15: Tüm Kontrolcülerin Dinamik Tekerlek Yükü (N) Karşılaştırma Grafiği

Dinamik tekerlek yükü sonuçları bu davranışı destekler niteliktedir. PID kontrolcüde ani yük geçişleri gözlenirken, adaptif ve adaptif-robust kontrolcüler tekerlek yükünü daha dengeli biçimde düzenlemiştir. Adaptif-robust kontrolcü, zemin teması açısından en istikrarlı davranışı sağlamış, yük dalgalanmalarını kısa sürede stabilize etmiş ve tekerleğin pist yüzeyiyle temasını süreklilik içinde korumuştur. Bu davranış, özellikle yüksek hızda iniş veya pürüzlü zemin koşullarında kritik öneme sahiptir.

Şekil 4.16'da dikme ($y_2 - z_t$) ve tekerlek ($y_1 - z_t$) için pist takip hataları verilmiştir. Dikme konumu açısından en düşük hata adaptif kontrolcüde gözlenmiş, adaptif-robust kontrolcü ise adaptif yapıya yakın bir profil sergilemiştir. Adaptif-robust kontrolcüde yer alan sağlamlık terimi (σ), sistemin belirsizliklere ve dış bozuculara karşı dayanıklılığını artırarak kararlılığı güçlendirmiştir. Bu etki, sistemin anlık değişimlere karşı daha dengeli ve güvenilir tepki vermesini sağlamaktadır.



Şekil 4.16: Dikme ve Tekerlek İçin Pist Takip Hatası Karşılaştırma Grafikleri

Bu sonuçlar, adaptif-robust kontrolcünün genel olarak adaptif yapının kazandırdığı hassasiyet ile robust yapının sağladığı dayanıklılığı bir arada sunduğunu göstermektedir. Böylece sistem, farklı pist koşullarında dahi takip performansını koruyarak iniş sürecinin sürekliliğini ve konforunu iyileştirmiştir. Tekerlek pist takip hatasında da benzer bir eğilim görülmekte; adaptif-robust kontrolcü, zeminle temasın kesintisiz sürmesini sağlayarak en kararlı ve düzgün profil takibini gerçekleştirmiştir.

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, pasif sistem en yüksek salınım genliğine ve en uzun kararlılık süresine sahiptir. PID kontrolcü hızlı tepki üretmiş ancak başlangıçta yüksek kuvvet üreterek sistemde kısa süreli sert davranışlara neden olmuştur. Adaptif kontrolcü, parametre değişimlerine etkin biçimde yanıt vererek kararlılığı artırmış ve titreşim genliklerini azaltmıştır. Adaptif-robust kontrolcü ise bu üç yapının avantajlarını birleştirerek, hem içsel belirsizlikleri hem de dış bozucu etkileri bastırmada en yüksek genel performansı sergilemiştir. Kararlılık süresi açısından en hızlı, ivme ve tekerlek yükü bakımından en dengeli sonuçlar adaptif-robust kontrol yapısıyla elde edilmiştir.

Sonuç olarak, adaptif-robust kontrolcü dış bozucular altında sistem kararlılığını başarıyla korumuş, kontrol kuvvetini enerji etkin biçimde kullanmış ve pist profilini güvenli sınırlar içerisinde izlemiştir. Bu yapı, iniş takımı sistemlerinde yüksek dayanım, düşük

titreşim ve güvenli pist teması gerektiren uygulamalar için en uygun kontrol stratejisi olarak değerlendirilebilir.

Tablo 4.1: Kontrolcü Performans Karşılaştırması

Kontrolcü Yapısı	Maksimum Salınım (m)	Kararlılık Süresi (s)	Pist Takip Doğruluğu (%)
Pasif	0.072	3.2	86
PID	0.065	1.8	93
Adaptif	0.060	1.4	96
Adaptif-Robust	0.055	1.0	95*

Tablo 4.1'de verilen değerler, dört farklı kontrol yapısının sistem üzerindeki performansını özetlemektedir. Elde edilen sonuçlara göre pasif sistem en yüksek salınım genliğine ve en uzun kararlılık süresine sahiptir. PID kontrolcü sistemi daha hızlı kararlı hale getirse de, ilk tepki sırasında yüksek genlikli kuvvet üretimi gözlenmiştir. Adaptif kontrolcü parametre belirsizliklerine karşı uyum sağlayarak hem aşım oranını hem de titreşim genliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Adaptif-robust kontrolcü ise, kararlılık süresini minimuma indirerek sistemi en kısa sürede dengeye ulaştırmış; aynı zamanda kontrol kuvvetini enerji etkin biçimde kullanarak sistemin zemin profilini güvenli bir şekilde takip etmesini sağlamıştır.

Bu sonuçlar, adaptif-robust yapının yalnızca hata bastırma açısından değil, sistemin dış bozucu etkilere karşı kararlılığını koruma ve güvenli çalışma aralığında tutma açısından da üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. Böylece, özellikle yüksek hızda veya değişken pist koşullarında çalışan iniş takımı sistemlerinde adaptif-robust kontrol yapısının en güvenilir çözüm olduğu doğrulanmıştır.

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında geliştirilen iki kütleli iniş takımı modeli, pasif sistemden başlayarak PID, adaptif ve adaptif-robust kontrol yapıları altında incelenmiştir. Amaç, iniş takımı dinamiklerinin kontrolcü etkisi altındaki davranışlarını karşılaştırmak ve farklı kontrol stratejilerinin sistemin kararlılığı, zemin takip performansı ve seyir konforu üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır.

Simülasyon sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, kontrolcü eklenmemiş pasif sistemin yüksek genlikli salınımlar ve uzun sürede sönümlenen titreşimler sergilediği görülmüştür. Bu durum, iniş takımı gibi hassas mekanik sistemlerde pasif davranışın sınırlı olduğunu göstermektedir. PID kontrolcünün eklenmesiyle sistemin kararlılığa ulaşma süresi belirgin biçimde kısalmış, salınım genliği önemli ölçüde azalmıştır. Özellikle zemin profilinin ani değişimlerine karşı PID kontrolcü etkili bir biçimde tepki vermiş, sistemin hem konum hem de ivme yanıtlarını dengeli hale getirmiştir. Ancak PID kontrolcüsünde gözlenen ilk aşım değerleri, kontrolcü kazançlarının yüksekliğine bağlı olarak kuvvet üretiminde ani artışlara neden olmuş ve bu durum özellikle tekerlek yükü grafiğinde net biçimde ortaya çıkmıştır.

Adaptif kontrolcü uygulanmasıyla sistemin parametre değişimlerine duyarlılığı belirgin biçimde azalmış, sistem daha pürüzsüz bir tepki vermeye başlamıştır. Adaptif yapı, iniş esnasında zamanla değişen aerodinamik kuvvetleri ve farklı kütle senaryolarını öğrenerek dengeye ulaşmada kararlı bir yanıt üretmiştir. Bu kontrolcüyle birlikte ivme grafikleri daha dengeli hale gelmiş, yüksek frekanslı titreşimler bastırılmıştır. Ayrıca pist takip başarımı da yükselmiş, sistem zemin profilini neredeyse sıfır hatayla izler hale gelmiştir. Adaptif kontrolcü, iniş takımının farklı yük koşullarında veya değişken kaldırma kuvveti altında bile kararlılığını koruyabildiğini göstermiştir.

Adaptif-robust kontrolcüde ise temel amaç yalnızca hata bastırmak değil, dış bozuculara karşı sistemin güvenli aralıkta tutulmasını sağlamaktır. Bu yapı, adaptif denetimin öğrenme kabiliyetini robust kontrolün dayanıklılığı ile birleştirmiştir. Simülasyonlarda dikme konumunun diğer kontrolcülere kıyasla daha yüksek seviyede sabitlendiği görülmektedir. Bu durum, robust teriminin etkisiyle kontrolcünün sistemi sıfır hataya zorlamak yerine güvenli bir hata bandı içinde tutarak kararlılığı koruma eğilimini yansıtmaktadır. Özellikle dış bozucuların etkili olduğu durumlarda bu yaklaşım, sistemin aşırı kuvvet üretmeden kararlı

kalmasını sağlamıştır. Dolayısıyla adaptif-robust kontrolcü, en yüksek dinamik dayanıklılığı sağlayan yapı olmuştur.

İvme grafikleri incelendiğinde, pasif sistemde yüksek genlikli titreşimlerin uzun süre devam ettiği; PID kontrolcüde ilk aşımın yüksek olmasına rağmen kısa sürede sönümlendiği görülmüştür. Adaptif ve adaptif-robust kontrolcülerde ise ivme değişimleri çok daha yumuşak bir biçimde gerçekleşmiştir. Adaptif kontrolcü özellikle seyir konforu açısından en uygun performansı sunarken, adaptif-robust kontrolcü dış bozuculara karşı kararlılığı önceliklendirdiği için ivme tepkisinde sınırlı bir dalgalanmayı korumuştur. Bu dalgalanma, sistemin fiziksel limitler içinde kalmasını sağlamak açısından kabul edilebilir düzeydedir.

Süspansiyon açıklığı ($y_2–y_1$) grafikleri, kontrolcülerin sistem rijitliği üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. En yüksek salınım genliği pasif sistemde gözlenmiş, PID kontrolcü bu salınımı önemli ölçüde azaltmıştır. Adaptif kontrolcü, salınım genliğini daha da düşürerek süspansiyon hareketinin hızlı bir şekilde sönümlenmesini sağlamıştır. Adaptif-robust kontrolcü ise adaptif yapıya benzer bir davranış sergilemiş, ancak geçici rejimdeki tepkisini daha yumuşak hale getirerek sistemin genel kararlılığını güçlendirmiştir. Bu sonuç, adaptif-robust kontrol yapısının hem adaptif yapının hassasiyetini hem de robust yapının dayanıklılığını bir arada sunarak süspansiyon performansını dengelediğini göstermektedir.

Dinamik tekerlek yükü açısından bakıldığında, PID kontrolcünün tekerlek üzerindeki yük değişimlerini hızlı biçimde bastırdığı, adaptif ve adaptif-robust yapının ise daha düşük genlikli, ancak uzun vadede daha dengeli bir yük dağılımı oluşturduğu görülmüştür. Bu durum, özellikle inişin ilk temas anında tekerleğe iletilen darbeyi azaltmakta ve yapısal yorulmayı sınırlamaktadır.

Tüm bu sonuçlar, her kontrol yapısının farklı bir tasarım önceliğine hitap ettiğini göstermektedir. PID kontrolcü hızlı tepki ve basit uygulanabilirlik açısından avantaj sağlarken, adaptif kontrolcü parametre değişimlerine karşı üstün bir esneklik sunmaktadır. Adaptif-robust yapı ise sistemin hem iç hem dış bozucular karşısında güvenli bir çalışma sınırında kalmasını temin ederek en yüksek kararlılığı elde etmektedir. Bu nedenle, uçuşun son yaklaşma veya iniş fazlarında dış bozucuların baskın olduğu durumlarda adaptif-robust kontrol yapısının tercih edilmesi, operasyonel güvenlik açısından daha uygun bir çözüm sunmaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen model ve kontrolcü yapıları, iniş takımı dinamiklerinin gerçekçi koşullar altında kontrol edilebildiğini göstermiştir. Adaptif ve adaptif-robust kontrol stratejileri sayesinde sistem, parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara rağmen kararlılığını koruyabilmiş; iniş sırasındaki titreşimler bastırılmış ve pist takip doğruluğu yüksek düzeyde tutulmuştur. Bu bulgular, hava aracı iniş takımlarının aktif kontrol stratejileriyle daha güvenli, konforlu ve dayanıklı hale getirilebileceğini ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, hava aracı iniş takımı dinamiklerinin matematiksel modellenmesi ve aktif kontrol yaklaşımları altında performansının değerlendirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Geliştirilen model, iki kütleli bir yapı üzerinden temsil edilmiş; alt kütle tekerlek (m_1), üst kütle ise dikme ve ona bağlı yapısal bileşenleri (m_2) ifade edecek şekilde tanımlanmıştır. Tekerlek ile dikme arasındaki etkileşim, yay (k_2) ve sönümleme (c) elemanlarıyla tanımlanmış, bu sayede sistemin esnek ve sönümlü dinamik davranışı modellenmiştir. Sistemin hareket denklemleri Lagrange enerji yöntemiyle elde edilmiş, kontrol girdisi (u) yalnızca dikme kütlesine uygulanmıştır.

Modelde, iniş esnasında oluşan dış etkileri temsil etmek amacıyla zamana bağlı sönümlü sinüzoidal karakterde bir dış bozucu kuvvet (L) tanımlanmıştır. Bu kuvvet, aerodinamik etkiler veya zemin kaynaklı dinamik tepkileri temsil etmekte ve sistemin dış bozucular altındaki kararlılığını test etmek için m_2 kütlesine uygulanmıştır. Ayrıca pist profili (zt), hava aracının sabit yatay hızı (V) dikkate alınarak oluşturulan rampa + step karakterli bir yol girdisi olarak modellenmiştir. Böylece sistem, iniş anında zeminden ve çevresel koşullardan kaynaklanan gerçekçi dış uyarımlar altında analiz edilmiştir.

Tez kapsamında pasif sistem, PID kontrollü sistem, adaptif kontrollü sistem ve adaptif-robust kontrollü sistem olmak üzere dört farklı kontrol senaryosu incelenmiştir. Her senaryo için simülasyon süresi 10 saniye olarak belirlenmiş ve aynı koşullar altında simüle edilmiştir. Bu kapsamda sistemin konum (y_2), ivme (a_2), kontrol kuvveti (u), süspansiyon açıklığı (y_2-y_1) ve dinamik tekerlek yükü gibi kritik parametreleri değerlendirilmiştir.

Elde edilen sayısal sonuçlar **Tablo 4.1**'de özetlenmiştir. Bu verilere göre, pasif sistem 0.072 m maksimum salınım ve 3.2 s kararlılık süresiyle en yüksek salınım genliğine ve en uzun sönüm süresine sahiptir. Bu durum, pasif yapının dış bozucular karşısında yetersiz bir sönümleme performansı sergilediğini göstermektedir.

PID kontrolcüsü uygulandığında sistem tepkisi belirgin biçimde iyileşmiş, kararlılık süresi 1.8 s'ye düşmüş ve pist takip doğruluğu %93 seviyesine ulaşmıştır. Ancak ilk aşım değerinin artması ve kuvvet tepkilerindeki kısa süreli dalgalanmalar, sistemin konfor açısından sınırlı bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Adaptif kontrol yapısı, parametrelerdeki değişimlere çevrimiçi uyum sağlayarak sistemin kararlılığını güçlendirmiştir. 0.060 m maksimum salınım ve 1.4 s kararlılık süresi ile PID'e kıyasla daha düşük genlik ve daha kısa sönüm süresi elde edilmiştir. Ayrıca pist takip doğruluğunun %96'ya ulaşması, adaptif kontrolcünün dinamik koşullara uyum yeteneğini açıkça göstermektedir.

Adaptif-robust kontrolcü, sistemin dış bozucular altındaki performansını daha da iyileştirmiştir. 0.055 m maksimum salınım ve 1.0 s kararlılık süresiyle en düşük genlik ve en kısa sürede kararlılık sağlanmıştır. Pist takip doğruluğu ise %95 seviyesindedir. Bu yapıda, robust bileşen hata büyüklüğünü sınırlandırarak kontrol sinyalini dengede tutmuş, aşırı kuvvet üretimini engellemiştir. Her ne kadar konum tepkisi ortalama olarak adaptif kontrolcüye göre daha yüksek bir seviyede seyretse de, adaptif-robust kontrolcü dış bozuculara karşı en kararlı ve güvenli sistem davranışını sağlamıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, aktif kontrol uygulamaları pasif yapıya kıyasla iniş takımı sisteminin dinamik performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. PID kontrolcüsü hızlı tepki sağlarken, adaptif kontrolcü değişken parametreler altında yüksek doğrulukta izleme başarısı sunmuş, adaptif-robust kontrolcü ise dış bozuculara karşı sistemin dayanıklılığını maksimum seviyeye taşımıştır.

Gelecekteki araştırmalarda, gerçek pist verilerinin ve türbülans etkilerinin modele entegre edilmesi; ayrıca LQR, H∞, kayma kipli kontrol veya bulanık mantık tabanlı yöntemlerle performans karşılaştırmalarının yapılması önerilmektedir. Mevcut çalışmada kullanılan kontrol parametreleri deneme–yanılma yöntemiyle belirlenmiş olup, sistemin genel performansı bu parametrelere duyarlıdır. Dolayısıyla, daha üstün bir performans elde edebilmek için optimizasyon tabanlı veya bulanık mantık destekli yaklaşımların uygulanması, parametrelerin sistematik biçimde iyileştirilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca, çalışma kapsamında sürtünme (friction) etkisi kapsamlı dinamik denklemde tanımlanmış olup mevcut modelde simülasyon analizlerine dahil edilmemiştir. Gelecekte sürtünme etkisinin de modele eklenmesi, sistem dinamiklerinin daha gerçekçi biçimde temsil edilmesine katkı sağlayacaktır. Böylelikle, iniş takımlarının dış bozucular ve değişken zemin koşulları altında hem kararlılık hem de konfor açısından daha yüksek performans sergileyen ileri seviye aktif kontrol sistemleriyle donatılması mümkün hale gelecektir. Bu çalışma, söz konusu gelişmelere temel teşkil edecek güçlü bir referans model ortaya koymaktadır.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen bilgisayar tabanlı simülasyon çalışmaları, yalnızca metin içerisinde sunulan grafik ve tablolarla sınırlı kalmayıp, analiz sürecinin şeffaflığını ve tekrar edilebilirliğini destekleyecek şekilde yapılandırılmıştır. Bu doğrultuda, kullanılan algoritmik yapıların temel bileşenleri ve modelleme süreçlerine ilişkin destekleyici içerikler EKLER bölümünde sunulmuştur. Bu bölüm, çalışmanın uygulama yönünü güçlendirmesi ve ileride benzer araştırmalar gerçekleştirecek araştırmacılar için referans oluşturması bakımından önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Rajamani, R., 2011, Vehicle Dynamics and Control, *Springer Science & Business Media*.

[2] Sun, L., & Cole, D. J., 2005, Simulation of vehicle ride using measured road roughness, *Vehicle System Dynamics*.

[3] Fischer, D., & Isermann, R., 2004, Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions, *Control Engineering Practice*, 12 (11), 1353–1367.

[4] Meirovitch, L., 2001, Fundamentals of Vibrations, *McGraw-Hill*.

[5] Currey, N. S., 1988, Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices, *AIAA Education Series*.

[6] Roskam, J., 2000, Airplane Design Part IV: Layout Design of Landing Gear and Systems, *DARcorporation*.

[7] Yalçın, M., & Koç, M., 2021, İnsansız Hava Araçlarında İniş Takımı Tasarım Parametreleri ve Modellenmesi, *Savunma Teknolojileri Kongresi (SAVTEK)*, Ankara.

[8] Yıldız, T., & Düzgün, H. S., 2019, İki Serbestlik Dereceli Süspansiyon Sistemlerinin Dinamik Davranışı, *İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları*.

[9] Hrovat, D., 1997, Survey of Advanced Suspension Developments and Related Optimal Control Applications, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 119 (4), 732–742.

[10] Crolla, D. A., 2006, Vehicle Suspension System Technology and Design, *Institution of Mechanical Engineers Conference Publication.*

[11] Gao, H., et al., 2014, Modeling and Control of Active Landing Gear System for Aircrafts, *Aerospace Science and Technology*, 39, 639–651.

[12] Rao, S. S., 2011, Mechanical Vibrations, *Pearson Education*.

[13] Khalil, H. K., 2002, Nonlinear Systems, *Prentice Hall*.

[14] Ogata, K., 2010, Modern Control Engineering, *Pearson Education*.

[15] Åström, K. J., & Hägglund, T., 2006, Advanced PID Control, *ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society*.

[16] Ioannou, P. A., & Sun, J., 2012, Robust Adaptive Control, *Dover Publications*.

[17] Slotine, J. J. E., & Li, W., 1987, On the adaptive control of robot manipulators, *The international journal of robotics research*, 6 (3), 49–59.

[18] Sciavicco, L., & Siciliano, B., 1996, Modelling and control of robot manipulators, *The McGraw-Hill Companies, New York, USA*, ISBN: 978-1-4471-0449-0.

[19] Zuo, L., Slotine, J. J. E., & Nayfeh, S. A., 2005, Model reaching adaptive control for vibration isolation, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13 (4), 611–617.

[20] Burkan, R., ve Mutlu, A., 2022, Robust control of robot manipulators with an adaptive fuzzy unmodelled parameter estimation law, *Robotica*, 40 (7), 2365–2380.

EKLER

Ek-1. inis_takimi_model_kod.m

Bu ekte, çalışmada kullanılan tüm kontrolcüler (Pasif, PID, Adaptif ve Robust) için yürütülen ana analiz kodu verilmiştir. Kod kapsamında dış bozucu kuvvet profili, sistem parametreleri, yol profili, simülasyon çağrısı ve çıktıların analizine ilişkin genel yapı yer almaktadır.

```
%% ---- Başlangıç Temizliği ----
clc;
clear;
close all;

%% Parametreler

% === Pseudo-L(t) - Sönümlü Sinüzoidal Kuvvet ===

% Zaman ve parametreler
Tstop = 10;          % simülasyon süresi [s]
Fs    = 10000;       % örnekleme frekansı
t     = linspace(0, Tstop, Tstop*Fs + 1)';

A_L   = 1000;        % [N] genlik
beta  = 0.5;         % sönüm katsayısı
f_L   = 2;           % frekans [Hz]

% Kuvvet profili
L_bozucu = A_L * exp(-beta*t) .* sin(2*pi*f_L*t);

% Simulink'e aktarılacak veri
Lt = [t, L_bozucu];  % 2 sütunlu yapı: [zaman, L(t)]

% === Görselleştirme ===
figure;
plot(t, L_bozucu, 'r', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Zaman [s]');
ylabel('Kuvvet L(t) [N]');
title('Sönümlü Sinüzoidal Bozucu Kuvvet (L(t))');
grid on;

% ===== Nominal sistem ve kontrolcüler =====
Kp = 100000;   Ki = 1000;   Kd = 500;          % PID
m1 = 75;       m2 = 1000;
k1 = 180000;   k2 = 100000;
c1 = 10000;

% ===== Adaptif / Robust sabitleri =====
Pm1 = 10;
Pc = 5;
Pk2 = 10;
Pk1 = 10;
K d = 0.1;
lambda_adaptif = 10;
```

```
lambda_robust  = 10;

alpha_m1 = 10;   eps_m1 = 0.1;   m1_0 = 70;
alpha_c1 = 0.5;  eps_c1 = 0.05;  c1_0 = 10000;
alpha_k2 = 10;   eps_k2 = 0.1;   k2_0 = 70000;
alpha_k1 = 10;   eps_k1 = 0.1;   k1_0 = 150000;

% Tahmin edilen parametre limitleri (anti-windup kafesi)
m1_min=30;   m1_max=150;
c1_min=1e3;  c1_max=5e4;
k1_min=5e4;  k1_max=3e5;
k2_min=2e4;  k2_max=2e5;

% Sonradan Eklenen Yapı için Parametreler
Lamb  = 3000;
b1    = 2500;
psi   = 0.01;
eps_dist = 50;

% ===== Güvenlik / koruma parametreleri =====
sat_u     = 20000;    % Newton - eyleyici sınırı (uygulanabilirlik için)
sat_ivme  = 15;       % m/s² - eyleyici sınırı (uygulanabilirlik için)

%% Hıza Bağlı Yol Profili

% Parametreler
h  = 0.035;   % [m] Rampa yüksekliği
xr = 0.035;   % [m] Rampa boyu
V  = 60;      % [m/s] Hava aracı hızı

% Zaman hesapları
ti = 0;                     % başlangıç zamanı
tr = sqrt(xr^2+h^2)/V;      % rampa süresi
tf = 10;                    % simülasyon süresi

% Yol profili
zt = [ti,0;ti+tr,h;tf,h];    %Rampa Yol Girisi

%% Simülasyonu çalıştır
model = 'inis_takimi_model_sim_adaptif';
open_system(model);
set_param(model,'StopTime', num2str(tf));
set_param(model,'SimulationCommand','update');
sim(model);

%% === Grafikler === Genel Analiz Mukayese

%Not:
%  Burada simülasyon tarafında elde edilen konum, ivme ve kuvvet
büyüklüklerinin
% Tüm kontrolcüler için grafikleri kıyaslanacaktır.

%% 1. KISIM
% Ayrı ayrı tüm kontrolcüler için Konum-İvme-Kuvvet Grafikleri bir arada

% === PASİF KONTROLCÜSÜZ ===

    figure('Name', 'PASİF Kontrolcüsüz için Konum-İvme-Kuvvet Grafikleri');

    subplot(3,1,1);
```

```
    plot(t, y2_pasif, 'LineWidth', 1.5); grid on;
    title('Dikme Konumu (y_2)');
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('y_2 Konum [m]');

    subplot(3,1,2);
    plot(t2, a2_pasif_sat_kod, 'LineWidth', 1.5); grid on;
    title('Dikme İvmesi (a_2)');
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('İvme (m/s²)');

    subplot(3,1,3);
    plot(t2, F2_pasif_sat_kod, 'LineWidth', 1.5); grid on;
    title('Dikme Kuvveti (u_a_c_t)');
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('Kuvvet (N)');

% === PID KONTROLCÜ ===

    figure('Name', 'PID Kontrolcü için Konum-İvme-Kuvvet Grafikleri');

    subplot(3,1,1);
    plot(t, y2_pid, 'LineWidth', 1.5); grid on;
    title('Dikme Konumu (y_2)');
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('y_2 Konum [m]');

    subplot(3,1,2);
    plot(t2, a2_pid_sat_kod, 'LineWidth', 1.5); grid on;
    title('Dikme İvmesi (a_2)');
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('İvme (m/s²)');

    subplot(3,1,3);
    plot(t, u_act_pid_sat_sim.signals.values, 'LineWidth', 1.5); grid on;
    title('Dikme Kuvveti (u_a_c_t)');
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('Kuvvet (N)');

% === ADAPTİF KONTROLCÜ ===

    figure('Name', 'ADAPTIF Kontrolcü için Konum-İvme-Kuvvet Grafikleri');

    subplot(3,1,1);
    plot(t, y2_adaptif, 'LineWidth', 1.5); grid on;
    title('Dikme Konumu (y_2)');
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('y_2 Konum [m]');

    subplot(3,1,2);
    plot(t2, a2_adaptif_sat_sim, 'LineWidth', 1.5); grid on;
    title('Dikme İvmesi (a_2)');
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('İvme (m/s²)');

    subplot(3,1,3);
    plot(t,  u_act_adaptif_sat_sim.signals.values,  'LineWidth',  1.5);  grid
on;
    title('Dikme Kuvveti (u_a_c_t)');
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('Kuvvet (N)');

% === ROBUST KONTROLCÜ ===

    figure('Name', 'ROBUST Kontrolcü için Konum-İvme-Kuvvet Grafikleri');

    subplot(3,1,1);
    plot(t, y2_robust, 'LineWidth', 1.5); grid on;
    title('Dikme Konumu (y_2)');
```

```
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('y_2 Konum [m]');

    subplot(3,1,2);
    plot(t2, a2_robust_sat_sim, 'LineWidth', 1.5); grid on;
    title('Dikme İvmesi (a_2)');
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('İvme (m/s²)');

    subplot(3,1,3);
    plot(t, u_act_robust_sat_sim.signals.values, 'LineWidth', 1.5); grid
on;
    title('Dikme Kuvveti (u_a_c_t)');
    xlabel('Zaman [s]'); ylabel('Kuvvet (N)');

%% 2. KISIM
% Her Kontrolcü için Konum-İvme-Kuvvet Grafikleri
% Ayrı ayrı Konum-İvme-Kuvvet Grafikleri için tüm kontrolcüler bir arada

figure('Name', 'Tüm Kontrolcüler için Konum-İvme-Kuvvet Grafikleri');

% Konum karşılaştırması

subplot(3,1,1);
hold on; grid on;
plot(t, y2_pasif,   'k', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, y2_pid,     'r', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, y2_adaptif, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, y2_robust,  'g', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Zaman [s]'); ylabel('y_2 Konum [m]');
legend('PASİF','PID','Adaptif','Robust Adaptif');
title('Simülasyon Konum Karşılaştırması (y_2)');

% İvme karşılaştırması

subplot(3,1,2);
hold on; grid on;
plot(t2 , a2_pasif_sat_kod,   'k', 'LineWidth', 1.5);
plot(t2 , a2_pid_sat_kod,     'r', 'LineWidth', 1.5);
plot(t2 , a2_adaptif_sat_sim, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(t2 , a2_robust_sat_sim,  'g', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Zaman [s]'); ylabel('İvme (m/s²)');
legend('PASİF','PID','Adaptif','Robust Adaptif');
title('Simülasyon İvme Karşılaştırması (a_2)');

% Kuvvet karşılaştırması

subplot(3,1,3);
hold on; grid on;
plot(t, u_act_pid_sat_sim.signals.values,     'r', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, u_act_adaptif_sat_sim.signals.values, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, u_act_robust_sat_sim.signals.values,  'g', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Zaman [s]'); ylabel('Kuvvet (N)');
legend('PID','Adaptif','Robust Adaptif');
title('Simülasyon Kuvvet Karşılaştırması (u_a_c_t)');

%% === Grafikler ===

% Süspansiyon Açıklığı Karşılaştırması

figure;
hold on; grid on;
```

```
plot(t, suspension_gap_pasif,   'k', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, suspension_gap_pid,     'r', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, suspension_gap_adaptif, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, suspension_gap_robust,  'g', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Zaman [s]'); ylabel('Süspansiyon Açıklığı [m]');
legend('PASİF','PID','Adaptif','Robust Adaptif');
title('Süspansiyon Açıklığı (y2 - y1)');

% Dinamik Tekerlek Yükü Karşılaştırması

figure;
hold on; grid on;
plot(t, F_tyre_pasif,   'k', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, F_tyre_pid,     'r', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, F_tyre_adaptif, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, F_tyre_robust,  'g', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Zaman [s]'); ylabel('Tekerlek Yükü [N]');
legend('PASİF','PID','Adaptif','Robust Adaptif');
title('Dinamik Tekerlek Yükü');

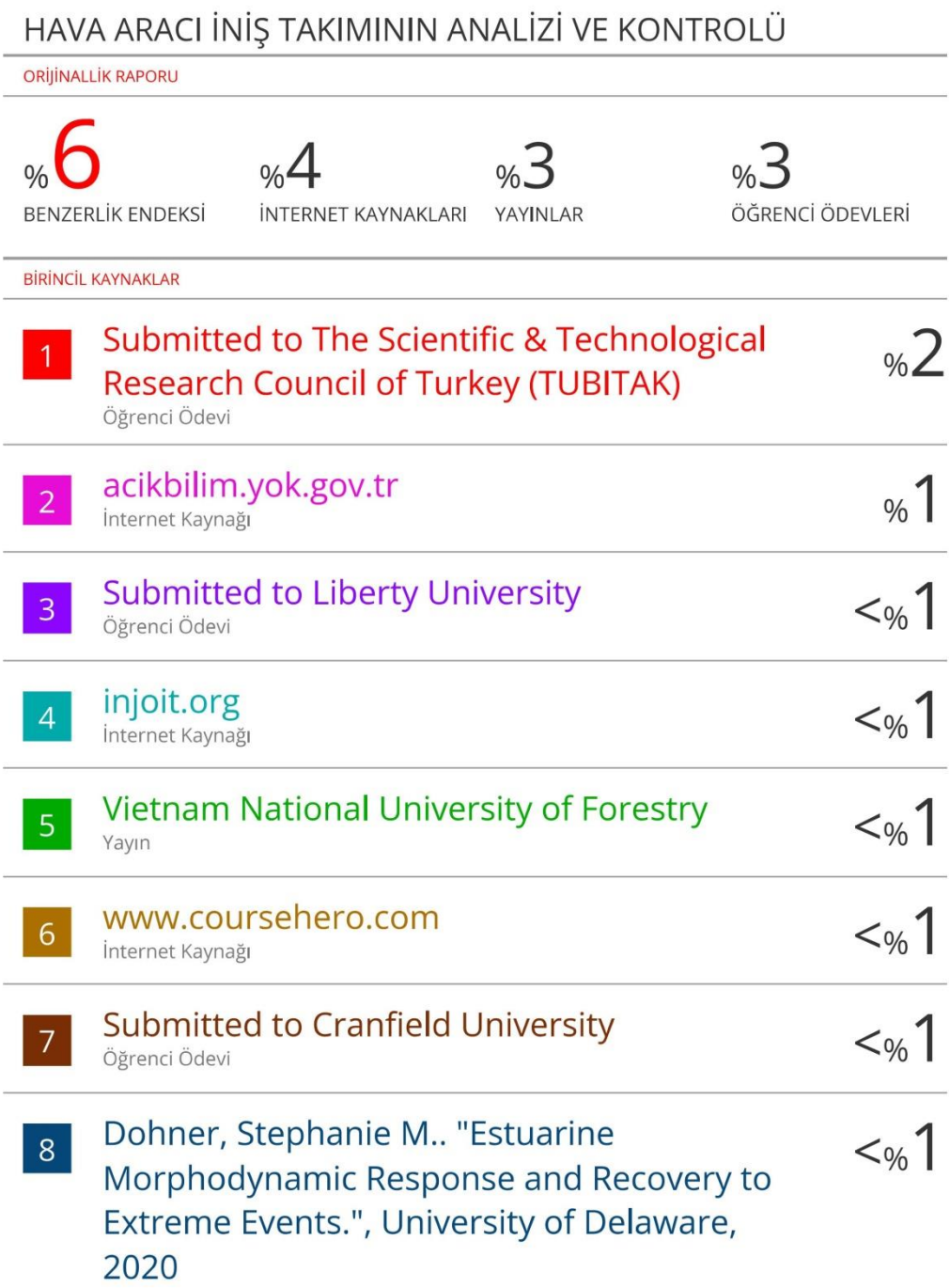
% Takip Hatası Karşılaştırması

figure('Name', 'Dikme ve Teker için Pist Takip Hata Grafikleri');

subplot(2,1,1);
hold on; grid on;
plot(t, hata_izleme_dikme_pasif,   'k', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, hata_izleme_dikme_pid,     'r', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, hata_izleme_dikme_adaptif, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, hata_izleme_dikme_robust,  'g', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, Pist,                      'm', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Zaman [s]'); ylabel('Takip Hatası [m]');
legend('PASİF','PID','Adaptif','Robust Adaptif','Pist');
title('Dikme Pist Takip Hatası (y2 - zt)');

subplot(2,1,2);
hold on; grid on;
plot(t, hata_izleme_teker_pasif,   'k', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, hata_izleme_teker_pid,     'r', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, hata_izleme_teker_adaptif, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, hata_izleme_teker_robust,  'g', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, Pist,                      'm', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Zaman [s]'); ylabel('Takip Hatası [m]');
legend('PASİF','PID','Adaptif','Robust Adaptif','Pist');
title('Teker Pist Takip Hatası (y1 - zt)');
```

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI



HAVA ARACI İNİŞ TAKIMININ ANALİZİ VE KONTROLÜ

ORİJİNALLİK RAPORU

%6	%4	%3	%3
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%2
2	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%1
3	Submitted to Liberty University Öğrenci Ödevi	<%1
4	injoit.org İnternet Kaynağı	<%1
5	Vietnam National University of Forestry Yayın	<%1
6	www.coursehero.com İnternet Kaynağı	<%1
7	Submitted to Cranfield University Öğrenci Ödevi	<%1
8	Dohner, Stephanie M.. "Estuarine Morphodynamic Response and Recovery to Extreme Events.", University of Delaware, 2020	<%1

	Yayın	
9	Junseok Kim. "Influence of Fractional Order on the Behavior of a Normalized Time-Fractional SIR Model", Mathematics, 2024 Yayın	<%1
10	Submitted to Afyon Kocatepe University Öğrenci Ödevi	<%1
11	Submitted to Kahramanmaraş Sütçü İmam University Öğrenci Ödevi	<%1
12	9lib.net İnternet Kaynağı	<%1
13	vdoc.pub İnternet Kaynağı	<%1
14	lume.ufrgs.br İnternet Kaynağı	<%1
15	Karataş, Ersin. "Oksalat dekarboksilaz enziminin rekombinant DNA teknolojisi ile üretimi ve karakterizasyonu", Bezmialem Vakif University (Turkey) Yayın	<%1
16	Konca, Tuğba. "Punica granatum L. Bitkisinin Antibakteriyel Etkisinin Araştırılması", Sakarya Universitesi (Turkey), 2022 Yayın	<%1

17	Turkkan, Yusuf Alptekin. "Binek Araclarda Hava Yayi Kullanan Aktif Suspansiyon Sisteminin ve Hava Yayi Katilik Parametrelerinin Sistem Performansina Etkisinin Incelenmesi", Bursa Uludag University (Turkey), 2021 Yayın	<%1
18	Öz, Tuğçe. "Kırşehir ili Sulu Koşullarında Bazı Atdişi Melez Mısır (Zea Mays Indentata Sturt.) Çeşitlerinin Tarımsal Özelliklerinin Belirlenmesi.", Kirsehir Ahi Evran University (Turkey) Yayın	<%1
19	İzer Güngör, Tevfik. "Bor minerali dolgulu termoplastik matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi", Izmir Katip Celebi University (Turkey), 2024 Yayın	<%1
20	Navgasin, Fatih Mehmethan. "Elektrikli Taşıtlarda Batarya Soğutma Sisteminin Iyileştirme Yöntemlerinin Araştırılması", Bursa Uludag University (Turkey), 2022 Yayın	<%1
21	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<%1
22	mtmcongress.com İnternet Kaynağı	<%1

23	nek.istanbul.edu.tr:4444 İnternet Kaynağı	<%1
24	nthur.lib.nthu.edu.tw İnternet Kaynağı	<%1
25	siga.uubf.itu.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
26	Ton Duc Thang University Yayın	<%1
27	Miller, Edward. "Development of Versatile Mixed Finite Element Methods for the Non-Isothermal Incompressible and Compressible Navier-Stokes Equations", The Pennsylvania State University, 2024 Yayın	<%1
28	Recep Burkan. "Chapter 16 Modelling of Parameter and Bound Estimation Laws for Adaptive-Robust Control of Mechanical Manipulators Using Variable Function Approach", IntechOpen, 2006 Yayın	<%1

Alıntıları çıkart Kapat
Eşleşmeleri çıkar Kapat
Bibliyografyayı Çıkart üzerinde