



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

MODEL ÖNGÖRÜLÜ DENETLEYİCİ TASARIMI VE UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Raşit DEMİRKİRAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Serhat CAN

TOKAT- 2023

JÜRİ KABUL VE ONAY

Muhammed Raşit DEMİRKİRAN tarafından hazırlanan “Model Öngörülü Denetleyici Tasarımı Ve Uygulaması” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 12.01.2023 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmzası

Üye (Başkan) : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet EKİCİ

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Serhat CAN

.....

Üye : Doç. Dr. Cem EMEKSİZ

.....

ONAY

...../...../.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Serhat Can danışmanlığında hazırlamış olduğum “Model Öngörülü Denetleyici Tasarımı Ve Uygulaması” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

12/12/2022

Muhammed Raşit DEMİRKIRAN



ÖZET

MODEL ÖNGÖRÜLÜ DENETLEYİCİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Demirkıran, Muhammed Raşit
Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Serhat Can
Aralık 2022, x + 78 sayfa

Model Öngörülü Denetleyici (Model Predictive Controller, MPC) çok girişli ve çok çıkışlı sistemlerin denetiminde kullanılan, kendine ait parametre ve sistem kısıtları bulunduran, öngörü yeteneğine sahip olan bir denetleyici türüdür. Temel kontrol stratejisi benimsemiş klasik denetleyicilere göre daha gelişmiş bir yaklaşımı vardır. İleri seviye tasarım tekniklerine ihtiyaç duyar.

Bu tez çalışmasının amacı İkiz Motor Çok Giriş Çok Çıkış Sistem (Twin Rotor Multi Input Multi Output System, TRMS) için MPC tasarımı yapmak ve klasik PID (Proportional Integral Derivative) denetleyiciyle farklı çalışma durumlarındaki performanslarını değerlendirmektir. Çalışma MATLAB/Simulink ortamında yapılmıştır. Bunu yapmak için öncelikle çok girişli çok çıkışlı sistem olan TRMS'nin matematiksel modellemesi elde edilmiştir. Feedback Instruments tarafından sağlanan TRMS modeli tezde sistem olarak kullanılmıştır. Elde edilen model için MPC tasarımı gerçekleştirilmiş ve parametreleri firmanın belirttiği katalogdan alınan PID denetleyiciler ile performansları değerlendirilmiştir.

Tasarlanan MPC ile PID denetleyicilerin, TRMS için coupling seviye, düşey hareket seviyesi ve yatay hareket seviyesi durumları için farklı tip bozuculardaki performansları incelenmiştir. Her bir hareket seviyesi için farklı MPC denetleyiciler tasarlanmıştır. TRMS sisteminin çıkışları olan düşey seviye açısı (pitch angle) ve yatay seviye açısı (yaw angle) kontrol edilmiştir.

MATLAB/Simulink ortamında tasarımı yapılan TRMS sistemi için denetleyici, MPC araç kutusu kullanılarak yapılmıştır. Klasik PID denetleyiciye göre kapalı çevrim sistem performansları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Model Öngörülü Kontrol, MPC, İkiz Motor, TRMS, PID Denetleyici

ABSTRACT
DESIGN OF MODEL PREDICTIVE CONTROLLER AND IMPLEMENTATION

Demirkıran, Muhammed Raşit
Master's Thesis, Department of Electric Electronic Engineering
Advisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet Serhat Can
December 2020, x + 78 pages

Model Predictive Controller (MPC) is a type of controller that is used in the control of multi-input and multi-output systems, has its own parameters and system constraints, and has predictive capability. It has a more advanced approach than classical controllers that have adopted a basic control strategy. Requires advanced design techniques.

The aim of this thesis is to design an MPC for a Twin Rotor Multi Input Multi Output System (TRMS) and to evaluate its performance in different operating situations with a classical PID (Proportional Integral Derivative) controller. The study was done in MATLAB/Simulink environment. To do this, firstly, the mathematical modeling of TRMS, which is a multi-input multi-output system, is obtained. The TRMS model provided by Feedback Instruments was used as the system in the thesis. MPC design was carried out for the obtained model and their performance was evaluated with PID controllers whose parameters were taken from the catalog specified by the company.

The performances of the designed MPC and PID controllers in different types of disturbances for TRMS coupling level, vertical motion level and horizontal motion level conditions have been investigated. Different MPC controllers are designed for each movement level. The vertical level angle (pitch angle) and the horizontal level angle (yaw angle), which are the outputs of the TRMS system, were controlled.

For the TRMS system designed in MATLAB/Simulink environment, the controller was built using the MPC toolbox. Closed-loop system performances were compared and evaluated compared to the classical PID controller.

Keywords: Model Predictive Control, MPC, TRMS, PID Controller

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın tamamlanmasında eğitim hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, kıymetli bilgilerini benimle paylaşan ve desteklerini hayatım boyunca unutmayacağım saygıdeğer tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Serhat Can'a ve diğer tüm bölüm hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

MUHAMMED RAŞİT DEMİRKİRAN

12/12/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. KONTROL ELEMANLARI ve KONTROL SİSTEMLERİ.....	7
3.1. PID Denetleyici.....	8
3.2. MPC Denetleyici	11
3.3. MPC Öğeleri.....	13
3.4. MPC Denetleyicilerin Olumlu ve Olumsuz Tarafları	18
4. MATERYAL ve YÖNTEM	19
4.1. İkiz Motor Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistem (TRMS)	19
4.2. İkiz Motor Çok Giriş Çok Çıkış Sistemin Matematiksel Modeli	21
4.3. Model Öngörülü Denetleyici (MPC) Tasarımı.....	26
4.4. MPC Araç Kutusu Kullanarak TRMS Denetleyicisi Tasarımı.....	30
4.4.1. TRMS coupling kontrolü	30
4.4.2. TRMS düşey seviye kontrolü.....	39
4.4.3. TRMS yatay seviye kontrolü	46
5. BULGULAR.....	54
5.1. TRMS Coupling Sistemi Denetimi Sonuçları.....	55
5.2. TRMS Düşey Hareket Sistemi Denetimi Sonuçları	67
5.3. TRMS Yatay Hareket Sistemi Denetimi Sonuçları	70
6. SONUÇ	75
7. KAYNAKLAR	76
8. ÖZGEÇMİŞ	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Açıklama

K_p	: Oransal Kazanç
K_i	: İntegral Kazanç
K_d	: Türevsel Kazanç
T_s	: Örnekleme Zamanı
N_p	: Öngörü Ufku
N_c	: Kontrol Ufku
φ	: Yatay Seviye Hareket Açısı Phi
ψ	: Dikey Seviye Hareket Açısı Psi
v_1	: Ana Motor Gerilimi
v_2	: Yardımcı Motor Gerilimi

Kısaltmalar

Açıklama

TRMS	: İkiz Rotor Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistem (Twin Rotor Multi Input Multi Output System)
MPC	: Model Öngörülü Denetleyici (Model Predictive Controller)
P	: Oransal (Proportional) Kontrolcü
PD	: Oransal Türev (Proportional-Derivative) Kontrolcü
PI	: Oransal İntegral (Proportional-Integral) Kontrolcü
PID	: Oransal İntegral Türev (Proportional-Integral-Derivative) Kontrolcü
MATLAB	: Matris Laboratuvarı Programı (Matrix Laboratory)
MIMO	: Çok Giriş Çok Çıkış (Multi Input Multi Output)
ABC	: Yapay Arı Kolonisi (Artificial Be Colony)

ŞEKİL LİSTESİ

Sekil

Sayfa

Şekil 1. 1. Geri besleme kontrol sisteminin yapısı	1
Şekil 1. 2. MPC benzeşimi.....	3
Şekil 1. 3. Gerileme ilkesi.....	3
Şekil 3. 1. Açık döngü kontrol sistemi.....	7
Şekil 3. 2. Kapalı döngü kontrol sistemi.....	7
Şekil 3. 3. MPC Algoritmalarının Evrimsel Süreci (Qin ve Badwell, 2003)	11
Şekil 3. 4. MPC Algoritma Unsurları	13
Şekil 4. 1. İkiz motor sistem düzeneği (Feedback Instruments Ltd.)	20
Şekil 4. 2. TRMS'nin fenomenolojik modeli	21
Şekil 4. 3. TRMS blok diyagram	24
Şekil 4. 4. TRMS modelinin PID denetleyicileri ile MATLAB Simulink blok diyagramı (Feedback Instruments)	26
Şekil 4. 5. Ts Örnekleme zamanı seçimi (Bemporad ve ark.)	27
Şekil 4. 6. N_p Öngörü ufku seçimi (Bemporad ve ark.).....	28
Şekil 4. 7. N_c Kontrol ufku seçimi (Bemporad ve ark., 2018).....	29
Şekil 4. 8. MPC kısıtları analojisi	29
Şekil 4. 9. TRMS coupling sistem hareket kontrolünün PID denetleyicisi ile Simulink modeli (Feedback Instruments).....	31
Şekil 4. 10. TRMS coupling sisteminin ana motor PID denetleyicisi parametreleri.....	31
Şekil 4. 11. PID denetleyici ile kontrol edilen TRMS coupling modelinin ana motor birim basamak cevabı	32
Şekil 4. 12. TRMS coupling sisteminin yardımcı motor PID denetleyicisi parametreleri	32
Şekil 4. 13. PID denetleyici ile kontrol edilen TRMS coupling modelinin yardımcı motor birim basamak cevabı.....	33
Şekil 4. 14. TRMS coupling sistem hareket kontrolünün MPC denetleyicisi ile Simulink modeli.....	34
Şekil 4. 15. TRMS coupling modelinin MPC'ye ait araç kutusuna tanımlanması ve lineerleştirilmesi.....	35
Şekil 4. 16. TRMS coupling sisteminin MPC yapısı.....	36
Şekil 4. 17. TRMS coupling sisteminin MPC giriş çıkış özellikleri.....	36
Şekil 4. 18. TRMS coupling sisteminin MPC denetleyici kısıtları.....	37
Şekil 4. 19. TRMS coupling sisteminin MPC denetleyici ağırlıkları	38
Şekil 4. 20. TRMS coupling sisteminin MPC araç kutusunda performans ayarlaması..	39
Şekil 4. 21. TRMS düşey seviye hareket kontrolünün PID denetleyicisi ile Simulink modeli (Feedback Instruments)	40
Şekil 4. 22. TRMS düşey seviye hareket sisteminin ana motor PID denetleyicisi parametreleri	40
Şekil 4. 23. TRMS düşey seviye hareket kontrolünün MPC denetleyicisi ile Simulink modeli	41
Şekil 4. 24. TRMS düşey seviye hareket modelinin MPC'ye ait araç kutusuna tanımlanması ve lineerleştirilmesi	42
Şekil 4. 25. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC yapısı.....	43
Şekil 4. 26. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC giriş çıkış özellikleri	44

Şekil 4. 27. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC denetleyici kısıtları	44
Şekil 4. 28. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC denetleyici ağırlıkları.....	45
Şekil 4. 29. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC araç kutusunda performans ayarlaması.....	46
Şekil 4. 30. TRMS yatay seviye hareket kontrolünün PID denetleyicisi ile Simulink modeli (Feedback Instruments)	47
Şekil 4. 31. TRMS yatay seviye hareket sisteminin ana motor PID denetleyicisi parametreleri.....	47
Şekil 4. 32. TRMS yatay seviye hareket kontrolünün MPC denetleyicisi ile Simulink modeli	48
Şekil 4. 33. TRMS yatay seviye hareket modelinin MPC'ye ait araç kutusuna tanımlanması ve lineerleştirilmesi	49
Şekil 4. 34. TRMS yatay seviye hareket sisteminin MPC yapısı	50
Şekil 4. 35. TRMS yatay seviye hareket sisteminin MPC giriş çıkış özellikleri.....	51
Şekil 4. 36. TRMS yatay seviye hareket sisteminin MPC denetleyici kısıtları	51
Şekil 4. 37. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC denetleyici ağırlıkları.....	52
Şekil 4. 38. TRMS yatay seviye hareket sisteminin MPC araç kutusunda performans ayarlaması.....	53
Şekil 5. 1. TRMS matematiksel modelinin MATLAB Simulink blok diyagram yapısı (Feedback Instruments).....	54
Şekil 5. 2. MPC ile kontrol edilen TRMS coupling sisteminin kontrol sinyalleri.....	56
Şekil 5. 3. PID ile kontrol edilen TRMS coupling sisteminin kontrol sinyalleri.....	56
Şekil 5. 4. MPC ve PID ile kontrol edilen TRMS coupling sisteminin düşey seviye birim basamak cevapları	57
Şekil 5. 5. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin yatay seviye cevapları.....	57
Şekil 5. 6. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin birim basamak bozucu etkisinde düşey seviye cevapları.....	58
Şekil 5. 7. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin birim basamak bozucu etkisinde yatay seviye cevapları	59
Şekil 5. 8. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin periyodik bozucu etkisinde düşey seviye cevapları	60
Şekil 5. 9. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin periyodik bozucu etkisinde yatay seviye cevapları.....	60
Şekil 5. 10. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin beyaz gürültü etkisinde düşey seviye cevapları	61
Şekil 5. 11. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin beyaz gürültü etkisinde yatay seviye cevapları.....	62
Şekil 5. 12. MPC için TRMS coupling sisteminin atalet momenti değişimine bağlı düşey seviye cevapları	63
Şekil 5. 13. MPC için TRMS coupling sisteminin atalet momenti değişimine bağlı yatay seviye cevapları.....	63
Şekil 5. 14. PID için TRMS coupling sisteminin atalet momenti değişimine bağlı düşey seviye cevapları	64
Şekil 5. 15. PID için TRMS coupling sisteminin atalet momenti değişimine bağlı yatay seviye cevapları.....	64
Şekil 5. 16. MPC için TRMS coupling sisteminin sürtünme torku değişimine bağlı düşey seviye cevapları	65
Şekil 5. 17. MPC için TRMS coupling sisteminin sürtünme torku değişimine bağlı yatay seviye cevapları.....	65

Şekil 5. 18. PID için TRMS coupling sisteminin sürtünme torku değişimine bağlı düşey seviye cevapları	66
Şekil 5. 19. PID için TRMS coupling sisteminin sürtünme torku değişimine bağlı yatay seviye cevapları	66
Şekil 5. 20. MPC için TRMS düşey hareket sisteminin kontrol sinyali	68
Şekil 5. 21. PID için TRMS düşey hareket sisteminin kontrol sinyali	68
Şekil 5. 22. MPC ve PID için TRMS düşey seviye hareket sisteminin cevapları	69
Şekil 5. 23. MPC için TRMS düşey seviye hareket sisteminin karışık periyodik sinyal cevapları	69
Şekil 5. 24. PID için TRMS düşey seviye hareket sisteminin karışık periyodik sinyal cevapları	70
Şekil 5. 25. MPC için TRMS yatay hareket sisteminin kontrol sinyali	71
Şekil 5. 26. PID için TRMS yatay hareket sisteminin kontrol sinyali	72
Şekil 5. 27. MPC ve PID için TRMS yatay seviye hareket sisteminin cevapları	72
Şekil 5. 28. MPC için TRMS yatay seviye hareket sisteminin karışık periyodik sinyal cevapları	73
Şekil 5. 29. PID için TRMS düşey seviye hareket sisteminin karışık periyodik sinyal cevapları	73

ÇİZELGE LİSTESİ

Cizelge

Sayfa

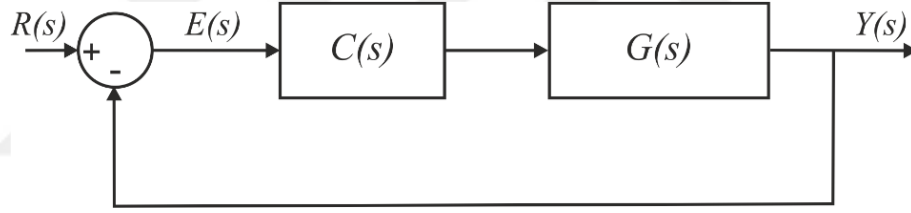
Çizelge 3. 1. Kontrolcü parametrelerinin sisteme etkileri	10
Çizelge 3. 2. 1980’den günümüze MPC algoritmalarının gelişimi	12
Çizelge 4. 1. TRMS fiziksel parametreleri (Feedback Instruments Ltd.).....	23
Çizelge 5. 1. TRMS coupling sisteminin PID denetleyici parametreleri.....	55
Çizelge 5. 2. TRMS düşey hareket sisteminin PID denetleyici parametreleri	68
Çizelge 5. 3. TRMS düşey hareket sisteminin PID denetleyici parametreleri	71



1. GİRİŞ

Günümüzde kontrol sistemleri hayatımızda çok önemli yerleri olan endüstri, otomotiv, medikal, savunma sanayi vb. birçok uygulamalarda kullanılmaktadır. Verimlilik, kalite, güvenlik ve konfor gibi birçok konu kontrol sistemlerinin gerekliliğini artırmış ve buna bağlı olarak yeni metotların geliştirilmesinde etkin rol oynamıştır.

Kontrol sistemleri, açık döngü ve kapalı döngü olarak iki farklı şekilde ifade edilir. Açık döngü sistemlerde, giriş-çıkış sinyallerinin dışında, denetleyici ile denetlenen olarak iki sistemden meydana gelmektedir. Kapalı döngü kontrol sistemlerinde ise açık çevrim kontrol sistemlerine ilaveten bir geri besleme bulunmaktadır. Bu geri beslemenin sistem üzerinde, denetleyici tasarımı açısından önemli etkinliği vardır. Kapalı döngü kontrolcü yapısına ait blok şema Şekil 1.1’de verilmiştir (Dorf ve Bishop, 2011).



Şekil 1. 1. Geri besleme kontrol sisteminin yapısı

Denetleyici sistemi uygulamalarında sistem çıkışlarının sisteme uygulanan referans değerine kısa sürede ulaşması, bu referans değerini aşmaması, referansa tutunarak orada kalması, hassasiyeti, cevap hızı ve bozucu giderebilir olması hedeflenmektedir. Bu sebepten tüm bu aksiyonların sağlanması için uygun denetleyici seçilip ona göre tasarım yapmak gerekir. En uygun denetleyicinin tasarlanabilmesi için sistemin fiziksel yapısı da önem arz etmektedir.

Klasik PID denetleyicide üç temel parametre vardır. Bunlar; Oransal kazanç (K_p), İntegral kazancı (K_i) ve Türevsel kazanç (K_d) olarak adlandırılır. Bu denetleyiciler uygulama olarak P, PI, PD yapılarına göre kullanılabilir.

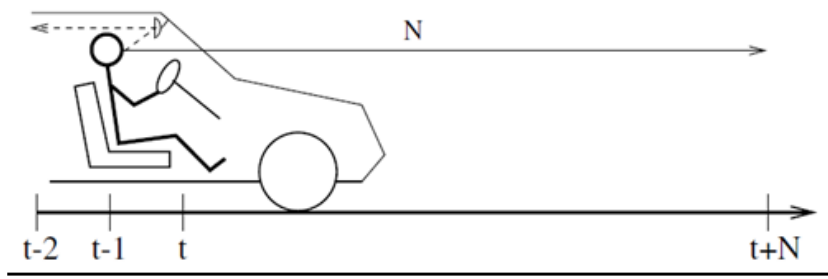
Klasik tasarım yöntemlerine ilave olarak farklı optimizasyon metotları da bulunmaktadır. Çeşitli simülasyon programları ve bilgisayar yazılımları ile PID denetleyici parametreleri de hesaplanabilir. Temel olarak genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu, farksal (diferansiyel) evrim (gelişim) algoritması, yapay arı kolonisi (ABC), karınca kolonisi gibi farklı algoritmalar kullanılarak denetleyiciler tasarlanabilmektedir.

Klasik denetleyicilerin yanında sezgisel denetleyici olarak da değerlendirmeye alınması mümkün olan denetleyiciler vardır. Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control, MPC) bunlardan biridir.

MPC bir sistemin gelecekteki çıkışlarını tahmin ederek öngöründe bulunan bir kontrol algoritmasıdır. Bir sisteme ait modelin, öngörü ufku denilen sınırları belli bir zamansal periyodun içindeki davranışlarına bağlı olarak öngörü oluşturulur. En iyi sonucu veren veri dizisine bağlı olarak optimizasyon yaparak sonuca ulaşır. Bunu bir sonraki zaman periyodunda da uygular. (Qin ve Badgwell, 2003).

MPC, bir sisteme ait modelin kontrol sinyalini elde eder. Bu kontrol sinyalinin özelliği, belli bir fonksiyonun en küçük değerini veren bir sinyal olmasıdır (Qin ve Badgwell, 2003).

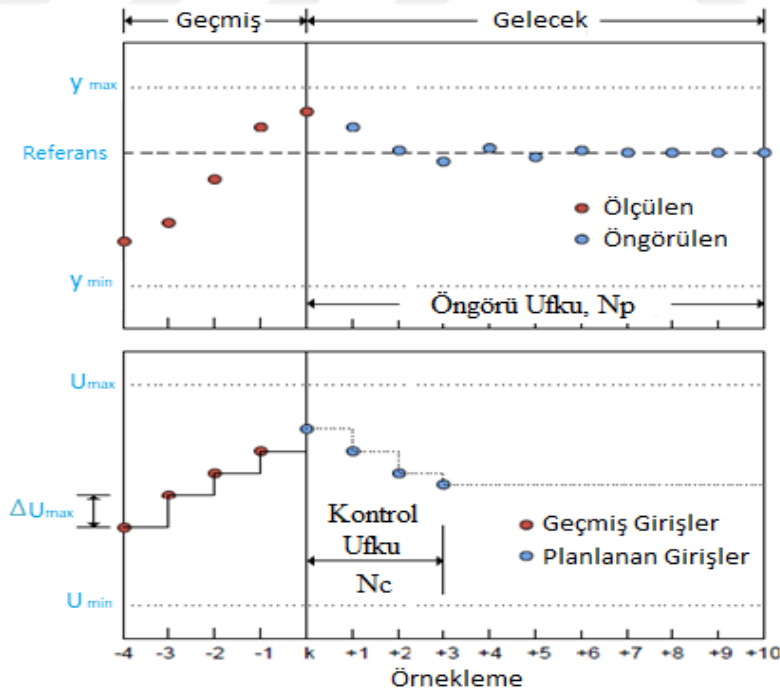
MPC metodu aslında gündelik hayatımızda oldukça sık uygulanır. Örnek olarak bir kişi gideceği yolun durumunu (mesafe, hız, yoğunluk, yol durumu) hesap ederek, bir otoyolda sollama yapmadan önce henüz gerçekleşmemiş bir eylemin analizini yapar.



Şekil 1. 2. MPC benzeşimi (Qin ve Badgwell, 2003).

MPC öngörü modeli algoritması kullanır. Referansa ulaşmak için şu adımları izler.

1. Öngörü ufku ile çıkışlar tahmin edilir.
2. İlerleyen zamandaki referanslar ile hata çıkışları arasında hesap yaparak sapmalar önlenir.
3. Kontrol ufku (N_c) ile öngörülen bir çıkış dizisi oluşturulur.
4. Çıkış dizisine ait ilk değer sisteme uygulanır.
5. Bu aşamalar sonraki örneklemelerde de oluşturulur.



Şekil 1. 3. Gerileme ilkesi (Qin ve Badgwell, 2003).

Bu tez çalışmasında Model Öngörülü Denetleyici ile PID denetleyicinin, ikiz motor çok giriş çok çıkış sisteminde üç farklı senaryo için farklı bozucu etkilerindeki ve parametre değişimlerindeki performansları karşılaştırılmıştır. Feedback Instruments firması tarafından önerilen PID denetleyicilere alternatif olarak Model Öngörülü Denetleyiciler tasarlanmış ve performansları değerlendirilmiştir. Literatürde bu sistem ile ilgili MPC denetleyicisi çalışmaları sadece ana motor ve yardımcı motorun hareket ettiği senaryo için yapılmıştır. Bu tez çalışması bu anlamda bir yenilik ortaya koymuştur. Ayrıca bozucu çeşitleri ve parametre değişimlerine bağlı performans değerlendirilmesi bakımından geniş bir kapsamı bulunmaktadır.

İkinci kısımda geçmişten günümüze MPC ile ilgili gelişmeler ve önceki çalışmalar vurgulanmaktadır. Üçüncü kısımda PID denetleyici ve MPC denetleyicilerin yapısından bahsedilmiştir. MPC denetleyicinin algoritmaları, unsurları, bağıntılarından bahsedilmiş; avantaj ve dezavantajları vurgulanmıştır.

Dördüncü kısımda ikiz motor çok girişli çok çıkışlı sistem ve sisteme ait matematiksel modelin oluşturulması anlatılmıştır. Matematiksel modelim MATLAB Simulink diyagramının üç farklı durum için gösterimi yapılmıştır. Model öngörülü denetleyici parametreler ve bu parametrelerin seçimi, MATLAB MPC araç kutusu kullanarak denetleyicinin tasarımından bahsedilmiştir. Beşinci kısımda ise MPC ve PID denetleyicilerin bulgularının farklı senaryo, bozucu değişimi ve fiziksel parametrelerindeki değişime bağlı olarak çıkışları değerlendirilmiştir. Altıncı kısımda ise sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Teknolojinin gelişimiyle birlikte kontrol teorisi tekniklerinde büyük bir ilerleme kaydedilmiştir. Model Öngörülü Denetim, modern zamanların ileri seviye denetim tekniklerinden biridir. Başlangıcı 1950-1960 yıllarına dayanan MPC o günlerden şu ana dek araştırma ve geliştirme konusudur. Farklı algoritmalar ile yapılan farklı çalışmalar mevcuttur. Literatürdeki çalışmalar MPC metodunun birçok alanda uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

Endüstriyel anlamda lineer ve lineer olmayan tür MPC'ler için Qin ve Badgwell (2003) bir bakış açısı ortaya koymuştur. MPC teknolojisinin tarihçesi verildikten sonra gelecekteki MPC teknolojisi için öngörüler ve araştırma hususlarından bahsedilmiştir.

Mansour ve ark. (2004) farklı MPC bulgularıyla, geleneksel PID kontrolcünün performans analizlerini haberleşme sistemlerinde yaşanan gecikme durumları için değerlendirmişlerdir. Bu çalışma iki MPC metodunun büyük zaman gecikmelerinde bile kararlı çalıştığını ortaya koyarken PID denetleyicinin küçük gecikmelerde dahi yetersiz kaldığını ortaya koymuşlardır.

Bemporad (2006) kuadratik program tabanlı klasik MPC denetleyiciler ve daha gelişmiş yapıdaki hibrit MPC denetleyicilerde dâhil olmak üzere farklı MPC denetleyicileri analiz etmiş ve tasarımlar için araç kutularının önemini vurgulamıştır. Bu çalışmada MATLAB MPC araç kutusunun önemi de vurgulanmıştır.

Stoica, Ayerbe ve Dumur (2008) farklı bir optimizasyon metoduyla birden fazla değişken ve kısıtlara sahip model öngörülü denetleyicilerin daha gürbüz şekilde çalışmasını sağlayan araç kutusu tasarlamışlardır. Bu araç kutusu kolay bir denetleyici tasarımı ortaya koyarak avantajlarını göstermiştir.

Farklı MPC tasarımlarını daha rahat gözlemlemek için Currie ve Wilson (2009), grafikler üzerinden izlenen bir araç kutusu tasarlamıştır. Bu durum yüksek hızlı gömülü sistem uygulamaları için tasarlanan öngörülü kontrolcülerin gelişimindeki ilk adımdır.

Syaichu-Rohman ve Sirius (2011) MPC denetleyici özelliğini bir PLC'ye gömerek DC makine hız kontrolü yapmıştır. Temel bir kuadratik algoritma, MPC ve PI denetleyicilerle beraber bir PLC'ye gömülerek kıyaslanabilir sonuçlar elde edilmiştir.

Liu ve Yokozawa (2012) DC-DC dönüştürücüye uygun MPC yöntemi önermiştir. Uygulama hedefi düşük aşım ve hızlı bir çıkış gerilimi elde etmektir. Bu denetleyici denenerek sinyal genişlik modülasyonu tekniğinden daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Çalışma, direnç değişimi için iyi bir performans ortaya koyarken, gerilimdeki kararsız değişimlere karşı yeterli performansı ortaya koyamamıştır.

Naik ve ark. (2013) MPC ile DC Servomotorun kontrolüne çalışmışlardır. Lineer algoritma ile yapılan bu çalışma sonucu elde edilen MPC denetleyicinin dış bozululara karşı daha dirençli olduğunu ortaya koymuştur.

Dahale ve Jadhav (2014) MATLAB MPC araç kutusu ile MPC'yi analiz etmek, farklı senaryolar göz önünde bulundurularak kontrolcünün performansını değerlendirmedeki faydasının önemini ortaya koymuşlardır. Kısıtlar ve ağırlıkları değiştirerek kontrolcünün performansı değiştirilebilmektedir (Dahale ve Jadhav,2014).

Kozâk (2016) MPC, geleneksel denetleyiciler ve bazı gelişmiş denetleyicilerin uygulamalardaki performansını kıyaslamışlardır. Uygulamada MPC denetleyicinin çok girişli çok çıkışlı sistemler için PID denetleyicilerden daha başarılı olduğunu ortaya koymuşlardır.

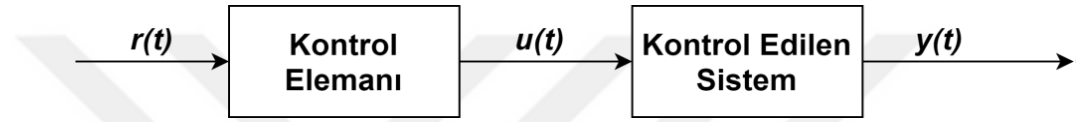
Durmaz ve ark. (2017) araç amortisör sistemi kontrolü üzerine çalışmışlardır. Model öngörülü denetleyici ve lineer kuadratik regülatör ile bu denetimi yapmışlardır. Bu çalışma Quanser firmasına ait deney setiyle yapılmıştır. MPC'nin bozululara ve çevresel faktörlere karşı daha iyi performans gösterdiğine buna karşılık LQR denetleyicinin ise model parametrelerindeki değişimlere karşı daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Varughese ve ark. (2018) bir takip robotunun belirli bir eksenini takip etmesini sağlayan bir MPC kontrolcü üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada geleneksel MPC yerine çoklu parametrelili bir MPC ile daha hızlı cevap veren bir denetleyiciyi ortaya koymuşlardır.

3. KONTROL ELEMANLARI ve KONTROL SİSTEMLERİ

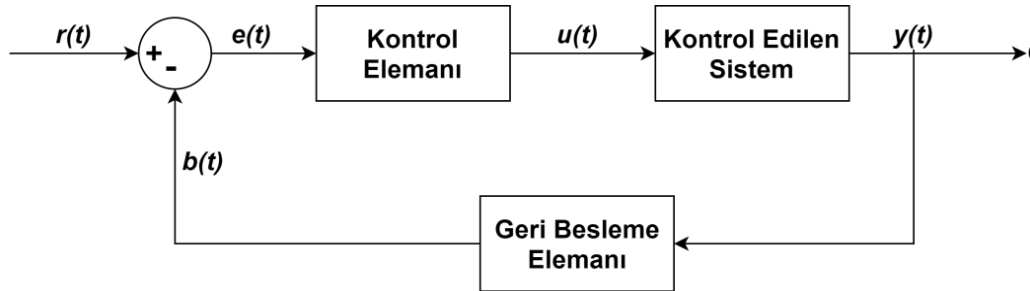
Bu kısımda, PID ve MPC denetleyiciler hakkında genel bilgilendirmeler ve tasarım için önemli hususlar verilmiştir.

Kontrol sistemleri, açık döngü ve kapalı döngü sistemi olarak iki başlıkta ifade edilir. Denetimi yapılacak sistemin kriterlerine göre değişiklik gösterse de genellikle kapalı çevrim kontrol sistemleri tercih edilmektedir. Aşağıdaki Şekil 3.1.' de ve Şekil 3.2.'de bu döngülerin blok şeması gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. Açık döngü kontrol sistemi

Açık döngü kontrol sisteminde sisteme verilen girişin hemen ardından uyarma gelir. Uyarma kontrol elemanı ile edilir ve herhangi bir hata ya da değişiklik yoksa sisteme doğru yoluna devam eder. Sistemde ise hedeflenen kontrol yapılır ve çıkış elde edilir.



Şekil 3. 2. Kapalı döngü kontrol sistemi

Herhangi bir kontrolcünün basamak cevabına göre performansının analiz edilebilmesi için bazı parametreler vardır. Bunlar:

1. Tepe Zamanı: “Sistemin verdiği cevabın tepe değerine ilk ulaştığı ana kadarki geçen süreyi ifade eder.”
2. Oturma(Yerleşme) Zamanı: “Sistemin verdiği cevabın en son değere (%2 tolerans bandı) ulaştığı ana kadarki geçen süreyi ifade eder.”
3. Aşım: “Sistemin cevabının ulaştığı en büyük nokta ile belirlenen referans değeri arasındaki fark ı ifade eder.”
4. Yükselme Zamanı: “Sistem cevabının yüzde 10’undan yüzde 90’ına kadar geçen zamanı ifade eder.”
5. Kalıcı Durum Hatası: “Sisteme ait belirli bir sinyalin cevabı ile referans değeri arasında oluşan farkı ifade eder.”

3.1. PID Denetleyici

Bu denetleyicinin adı İngilizce Proportional Integral Derivative sözcüklerinin baş harflerinden oluşmaktadır. Bu kontrolcüler endüstriyel alanda en fazla kullanılan kontrolcülerdir (Boiko, 2013). Endüstri sektöründe kullanılan bir çok kompleks sistemde bu denetleyiciler kullanılmaktadır (Burns,2001).

PID denetleyicinin zaman alanındaki çıkışını ifade eden bağıntı aşağıda verilmiştir. Bu denetlenecek sisteme verilen denetleyici sinyalidir. Bu denetleyici K_p , K_i , K_d değerleri ile kontrol edilir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Oransal kazanç K_p 'ı artırmak sabit hata değeri için denetleyici sinyalinin genliğini artırır. Kontrolcüyü belli bir hata değeri için zorlamak, kapalı çevrim sisteminin hızlı davranmasına ve aşım yapmasına yol açar. K_p değerinin artırılmasının bir diğer sonucu ise kalıcı durum hatasının azalmasıdır. Fakat bu değer artırılması hiçbir zaman tam olarak yok edilemez.

Türev terimi olan K_d ise denetleyiciye öngörü yeteneği kazandırır. Bu tahmin, sistemin sönümleme yapmasını sağlar. Sistemdeki aşım oranını azaltır. Fakat bu terim kalıcı durum hatası üzerinde etkili değildir.

İntegral terimi olan K_i ise kalıcı durum hatasını azaltır. Kalıcı durum hatası olan bir sistemde hataya ait değerleri toplar ve kontrol sinyalinin büyük bir değer almasına yol açar ve hatayı azaltır. Ancak sistem cevabının hızını azaltması ve salınım oluşturmaları bakımından dezavantajı vardır.

PID denetleyici tasarlanırken genelde şu yol izlenir. İlk olarak birim basamak girişi ile nelerin iyileştirileceğine karar verilir. Akabinde yükselme zamanı optimizasyonu için oransal kontrolcü, aşımı iyileştirmek için ise türev terimi ve son olarak integral terimi ile kalıcı durum hatası yok etmeye çalışılarak kapalı sisteme eklenir.

Denetleyici türlerinin denetlenecek sistem üzerindeki etkilerine Çizelge 3.1.'de yer verilmiştir. PID denetleyici tasarımı yapmadan önce bu tablonun göz önüne alınması denetleyicinin tasarımına katkıda bulunacaktır. (Vatansever, Deniz, 2013:7).

Çizelge 3. 1. Kontrolcü parametrelerinin sisteme etkileri

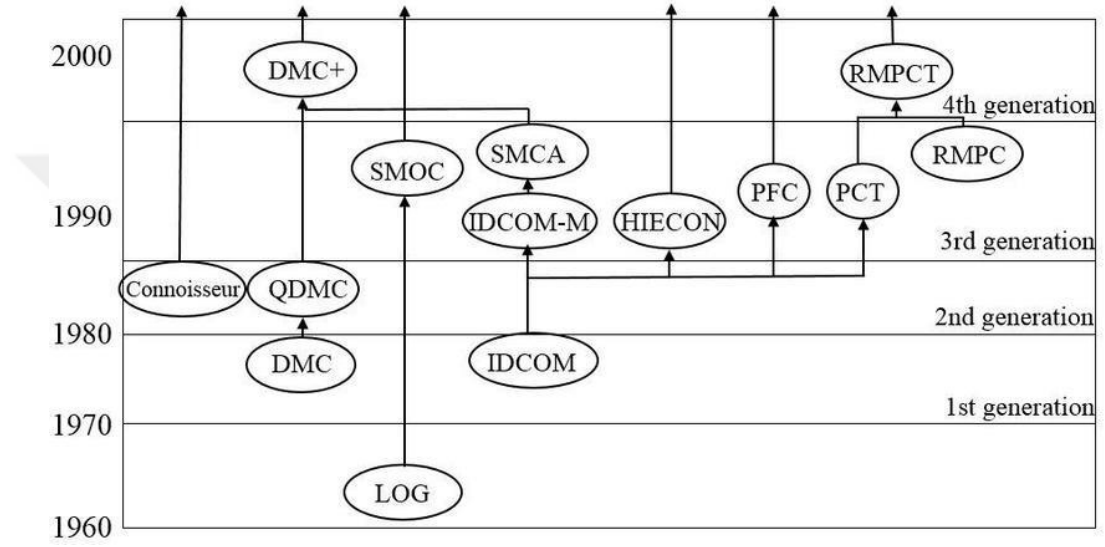
Parametre	Yükselme Zamanı	Aşma	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası
K_p	Küçülür	Büyür	Az oranda değişir	Küçülür
K_i	Küçülür	Büyür	Büyür	Yok olur
K_d	Az oranda değişir	Küçülür	Büyür	Az oranda değişir

Endüstriyel kontrol sistemlerinde kullanım için en çok tercih konusu olan denetleyici türü olarak kabul edilen PID denetleyicinin parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesi sistemden alınması istenen performans bakımından oldukça önem arz eder. Bu bağlamda tasarım sürecinde K_p, K_i, K_d parametrelerinin en uygun şekilde seçilmesi gereklidir (Azman, Rahiman, Mohammad, Marzaki, Taib, Ali, 2017:25).

3.2. MPC Denetleyici

Bu bölümde MPC'nin tarihçesi, algoritmaları, içerdiği unsurlar, olumlu ve olumsuz yönleri ve genel bilgiler verilmiştir.

Aşağıdaki Şekil 3.3.'de endüstriyel MPC algoritmalarının gelişimi ve birbirleriyle olan ilişkileri özetlenerek gösterilmektedir.



Şekil 3. 3. MPC Algoritmalarının Evrimsel Süreci (Qin ve Badwell, 2003)

MPC'nin ortaya çıkışı Kalman ve ark.(1960) 1960'lardaki çalışmalarına dayanmaktadır. Bu çalışma ayrık zamanlı lineer durum uzayı şeklinde ifade edilebilir.

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Gw_k \quad (3.2)$$

$$y_k = Cx_k + \varepsilon_k \quad (3.3)$$

bağıntısında x_k : durum değişkenlerini, y_k : süreç çıkışlarını, u_k : süreç girişlerini, w_k : durum değişken bozucularını, ε_k : gürültüleri ifade etmektedir

1970’lerden itibaren birçok farklı MPC algoritmaları geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak Model Algoritma Kontrolü, Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol, Öngörülü Fonksiyonel Kontrol verilebilir.

Model Algoritma Kontrolü, uzun bir öngörü ufkuna sahip olarak çıkış sinyalini takip eden ve hata değişimi indirgenmiş bir algoritma türüdür (Camacho ve Bordons, 2007).

Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrolü, akademik ve endüstriyel alanlarda en çok tercih edilen MPC metodudur. Birçok problem ve süreç bu algoritmadaki tasarım parametreleri kullanılarak denetlenebilir (Camacho ve Bordons, 2007).

Öngörülü Fonksiyonel Kontrol, hızlı cevap veren süreçler için Richalet(1987) tarafından öneriye sunulmuştur. Bu algoritma yaklaşımı, öngörü ufkuna bağlı fonksiyon ile kontrol sinyaline bağlı bir fonksiyonun, düzlemde çakıştığı noktaları baz alan bir algoritma yaklaşımıdır. (Maciejowski 2002).

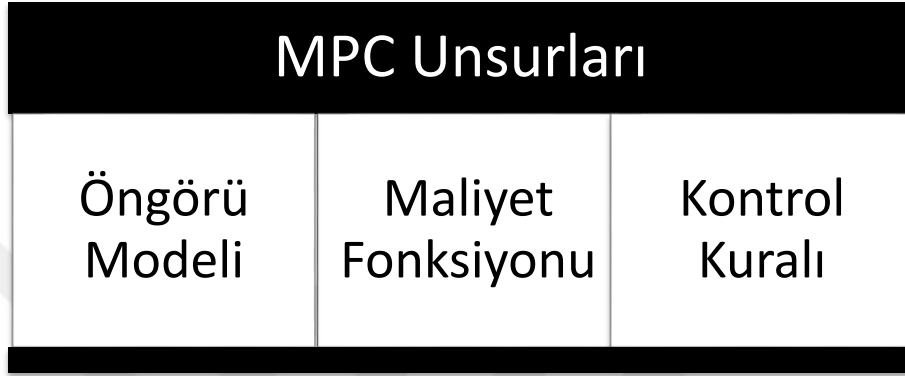
Model öngörülü kontrolcü ile ilgili algoritma geliştirme çalışmaları halen devam etmektedir. 1980’lerden günümüze bu algoritmalar üzerine yapılan gelişmeler ve endüstriyel uygulamalar Çizelge 3.2.’de verilmiştir.

Çizelge 3. 2. 1980’den günümüze MPC algoritmalarının gelişimi

1980-2000	Lineer ve Lineer olmayan MPC
2000-2005	Otomotiv, Hibrit MPC
2005-2010	Uzay Araçları, Lineer zamanla değişen MPC
2010-2015	Haberleşme
2015-Günümüz	Enerji, Endüstriyel finans

3.3. MPC Öğeleri

Tüm MPC algoritmalarının ortak olan unsurları vardır (Camacho ve Bordons, 2007). Her bir unsur kadar seçilen seçenekler birbirinden farklı algoritmalar meydana getirir. Bir MPC algoritmasında bulunan unsurlar aşağıdaki Şekil 3.4.'deki gibidir.



Şekil 3. 4. MPC Algoritma Unsurları

MPC tasarımı, kontrol dinamiklerini kapsayacak ve öngörü hesaplamalarına izin verecek düzeyde en iyi modele göre yapılmalıdır. Gelecekte $\hat{y}(t + K|t)$ anlarında öngörülen çıkışın hesaplanması gerekir. MPC metotlarının farklılığı giriş çıkış ilişkilerinde de farklılıklar meydana getirir. Dolayısıyla farklı modeller söz konusudur. Çıkış değişkenleri kontrol değişkenlerinden ve bozuculardan oluşabilir.

Bu modeller basamak, rampa, darbe yanıtı olabileceği gibi durum uzayı şeklinde de gösterilebilir ve öngörü için oldukça önemlidir.

Darbe yanıtı için giriş ve çıkış bağıntısı şu şekilde ifade edilebilir.(Camacho ve Bordons,2007).

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i u(t - i) \quad (3.4)$$

Burada h_i , ayrık çıkış değeridir ve sürecin birim darbe tarafından uyarılmasını ifade etmektedir. Bağıntı (3.4) ile gösterilen ifadede yalnızca N adet değer hesaba katılır (Camacho ve Bordons,2007).

$$y(t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t-i) = H(z^{-1})u(t) \quad (3.5)$$

Burada $H(z^{-1}) = h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_N z^{-N}$ olarak ifade edilir ve öngörü hesabı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır (Camacho ve Bordons,2007).

$$\hat{y}(t+K|t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t+k-i|t) = H(z^{-1})u(t+k|t) \quad (3.6)$$

Endüstriyel alanlarda, oldukça sezgisel ve kontrol değişkenlerinin etkilerinin çıkış değişkeninde net olarak göstermesi özelliğinden dolayı net kabul gören bir metottur. Ve bu metodun en önemli özellik ve avantajlarından birisi ise herhangi bir tanıma ihtiyacı duymamasıdır (Rossiter, 2004).

Basamak cevabında ise giriş ve çıkış ifadesi şöyle ifade edilir (Camacho ve Bordons, 2007).

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t-i) = y_0 + G(z^{-1})(1-z^{-1})u(t) \quad (3.7)$$

Burada öngörü,

$$\hat{y}(t+K|t) = \sum_{i=1}^N g_i u(t+k-i|t) \quad (3.8)$$

olarak ifade edilir (Camacho ve Bordons, 2007). Burada darbe, iki basamak arasındaki örnekleme turu gecikmeye sahip farkı ifade ettiği varsayılarak lineer bir sistem için aşağıdaki bağıntı ifade edilir.

$$h_i = g_i - g_{i-1} \leftrightarrow g_i = \sum_{j=1}^i h_j \quad (3.9)$$

Transfer fonksiyonu, genellikle Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol algoritmalarında kullanılır (Rossiter, 2004).

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) \quad (3.10)$$

Bağıntıda,

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = 1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}$$

Olarak ifade edilir ve öngörü ise aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir (Camacho ve Bordons, 2007).

$$\hat{y}(t + K|t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t + k|t) \quad (3.11)$$

Kararsız süreçler içinde geçerli olan bu yaklaşım birkaç parametreye ihtiyaç duyduğu için avantajlıdır. Ancak A ve B denklemlerinin derecelerinin bilinmesi gerekir.

Durum uzayı gösterimi ise aşağıdaki bağıntılar ile verilir. Öngörülü Fonksiyonel Denetleyici algoritmalarında kullanılır (Maciejowski, 2002).

$$x(t) = Ax(t - 1) + Bu(t - 1) \quad (3.12)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.13)$$

Bu bağıntılarda x durum değişkenlerini, A, B ve C ise sisteme ait olan matrisleri ifade eder. Öngörü ise aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$\hat{y}(t + K|t) = C\hat{x}(t + K|t) = C[A^k x(t) + \sum_{i=1}^k A^{i-1} Bu(t + K - i|t)] \quad (3.14)$$

Çok değişkenli olan süreçler için avantajlı bir yöntem olması bu gösterimin en büyük avantajlarındanıdır.

Diğer bir modelleme türü ise bozucu model olarak isimlendirilir. Ölçüme bağlı gerçek zamanlı çıkış değeri ile hesaplama sonucu elde edilen çıkış değerinin farkına bağlı olarak çözümleme yapar. (Camacho ve Bordons, 2007).

$$\eta(t) = \frac{C(z^{-1})e(t)}{D(z^{-1})} \quad (3.15)$$

Burada $D(z^{-1})$ bir integratöre sahiptir. $e(t)$ ise beyaz gürültüdür. Ortalaması sıfırdır. C ise 1 olarak alınır. Bu modelleme rastgele zamanda oluşan değişimlerin olduğu ve kararsız hareketlerin olduğu modeller için uygundur. Diophantine bağıntısına göre (Camacho ve Bordons, 2007)

$$1 = E_k(z^{-1})D(z^{-1}) + z^{-k}F_k(z^{-1}) \quad (3.16)$$

Ve aşağıda verilen bağıntılar ile de

$$\eta(t) = E_k(z^{-1})e(t) + z^{-k} \frac{F_k(z^{-1})}{D(z^{-1})} e(t) \quad (3.17)$$

$$\eta(t+k) = E_k(z^{-1})e(t+k) + F_k(z^{-1})\eta(t) \quad (3.18)$$

Öngörü bağıntısı şu şekilde ifade edilebilir (Camacho ve Bordons, 2007)

$$\hat{y}(t+K|t) = F_k(z^{-1})y(t) + E_k(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+K|t) \quad (3.19)$$

MPC tekniğinin diğer bir unsuru maliyet fonksiyonuna değinecek olursak bu fonksiyonun minimum yapılması istenir. Ayırık durum matrisi Q ve giriş ağırlığı matrisi R'den oluşur (Qin ve Badgwell, 2003).

$$J = \sum_{j=1}^{\infty} (\|x_{k+j}\|_Q^2 + \|u_{k+j}\|_R^2) \quad (3.20)$$

Maliyet fonksiyonu için norm terim bağıntıları aşağıda verilmiştir.

$$\|x_{k+j}\|_Q^2 = x^T Q x \quad (3.21)$$

$$\|u_{k+j}\|_R^2 = u^T R u$$

Çözüm Lineer Quadratik Gaussian (LQG) Denetleyici olarak verilirse

$$u_k = -K_c \hat{x}_k | k \quad (3.22)$$

Genel olarak maliyet fonksiyonu ise aşağıdaki gibidir (Camacho ve Bordons, 2007).

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(k) [\hat{y}(t+j|t) - \omega(t+k)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (3.23)$$

Bağıntıdaki terimlerin ilki, referans giriş değişkeninin çıkış değişkenine yakınlığını ifade ederken ikincisi kontrol adımını ifade eder. Kontrol adımı ne kadar az olursa, denetleyici sistemi hedeflenen duruma o kadar hızlı yaklaştırır. Bu bağıntıda yer alan N_1 ve N_2 sistem çıkışının sistem girişine odaklanmasını gerektiren zamanı ifade eder ve isteğe bağlı olarak değerlendirmeye alınır (Camacho ve Bordons, 2007).

Bu aşamaların ardından kontrol kurallarını elde etmek gerekir. Önceki giriş-çıkış değerlerine bağlı olarak gelecekte oluşacak çıkış değerleri hesaplanır. Kontrol kuralları, sisteme ait matematiksel modelin hedefin yakınlarına kompanze edilmesine bağlı olarak minimum değerın hesaplanmasına dayalı elde edilir. Matematiksel olarak bunu sağlamanın bazı yöntemleri vardır.

- Analitik Yöntem: Sisteme ait mevcut kısıtlamaların olmadığı, lineer modeller için uygundur.
- İteratif Yöntem: Fazla sayıda değişkene bağlı olarak hesaplama yükü gibi bir takım zorluklar oluşturmakta ve öngörü ufkuunu artırmaktadır. Analitik yönteme göre daha kapsamlıdır.
- Yapısal Yöntem: Modeli basitleştirerek derecesini azaltmakta ve hesaplama zorluklarının üstesinden gelmeye çalışarak diğer denetleyicilerdeki eksiklikleri tamamlamaya çalışan bir yöntemdir.

3.4. MPC Denetleyicilerin Olumlu ve Olumsuz Tarafları

MPC kontrolcülerin avantajları şu şekilde ifade edilebilir (Rakovic' ve Levine, 2019).

- Çok karmaşık dinamiklere sahip sistemlerde kullanılabilirler.
- Değişkeni fazla olan sistemlerde kullanılabilirler.
- Uygulanışı kolay denetleyiciler sunmaktadır.
- Tasarım aşamasında kısıt ve ağırlıkların uygulanması oldukça kolaydır.
- Birçok denetleyici ile uyumlu olarak çalışabilir.

MPC kontrolcülerin dezavantajları ise şu şekilde ifade edilebilir (Rakovic' ve Levine, 2019).

- Klasik PID denetleyicilere göre çok daha fazla işlem yüküne sahiptir ve hesaplama için güçlü işlemcilere ihtiyaç duyar.
- Adaptif MPC tasarımında, ayırık zamanda çalışması bakımından her örnekleme periyodunda tekrar hesaba gereksinim duyar.
- Klasik PID denetleyicilerin aksine, öngörülü denetleyiciler sisteme ait dinamik bir model olmadan denetleme yapamazlar.
- Bu denetleyici tipinin birçok alanda kullanım yaygınlığının az olması ve avantajlarının bilinmemesi.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu kısımda çalışmada kullanılan ikiz motor çok giriş çok çıkış sistem (TRMS), TRMS için kullanılan matematiksel model, model için önerilen değerlere sahip PID denetleyicinin performans analizi ve MPC tasarımı ve parametrelerinin nasıl ayarlandığı anlatılmıştır.

Çalışmada TRMS sisteminin benzetimi ve MPC denetleyici tasarımı MATLAB R2019b yazılımı Simulink eklentisi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Simulink eklentisinde TRMS sistemine ait matematiksel model kullanılmıştır. MPC denetleyici “MPC Toolbox” araç kutusu kullanılarak tasarlanmış ve önerilen PID denetleyicisi ile karşılaştırılmıştır.

4.1. İkiz Motor Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistem (TRMS)

Bu çalışmada, Feedback Instruments firmasına ait TRMS deney setine ait matematiksel model kullanılmıştır (Feedback Instruments Ltd.). Basitleştirilmiş helikopter dinamiklerini temsil eden TRMS, bir helikoptere ait uçuşu simüle etme amacıyla tasarlanmıştır.

TRMS sistemi iki adet motordan oluşur. Bunlardan ilki ana motor (main rotor), diğeri ise yardımcı motor (tail rotor) olan dc motorlardır. Bu sistem, motora bağlı pervanelerin oluşturduğu itme kuvvetiyle düşey ve yatay seviyede denge kurmaktadır. Düşey seviye hareketi, modelin yukarı ve aşağı hareketini temsil ederken yatay seviye hareketi, modelin sağa ve sola hareketini temsil etmektedir. TRMS’nin bu hareketleri iki açıyla temsil edilir (Feedback Instruments Ltd.)

- Dikey seviye hareket açısı (pitch angle)
- Yatay seviye hareket açısı (yaw angle)

Bu motorların düşey ve yatay hareketleri birbirlerine istenmeyen etkilerde bulunmaktadır. Yüksek gerilimlere tedbir olarak rotor hareketini kısıtlayan anahtarlar bulunmaktadır (Feedback Instruments Ltd.).

Bu sistem iki giriş ve iki çıkışa sahip olması bakımından çok girişli ve çok çıkışlı bir sistemdir. Bir helikopterin sahip olduğu temel dinamik özellikler TRMS’de vardır. İki motor arasındaki çapraz bağ ikisinde de vardır. Farklılık olarak ise TRMS’de rotor hızları daha fazladır. Düşey seviye motoru çalıştırıldığında sistem yatay düzlemde de dönecektir.



Şekil 4. 1. İkiz motor sistem düzeneği (Feedback Instruments Ltd.)

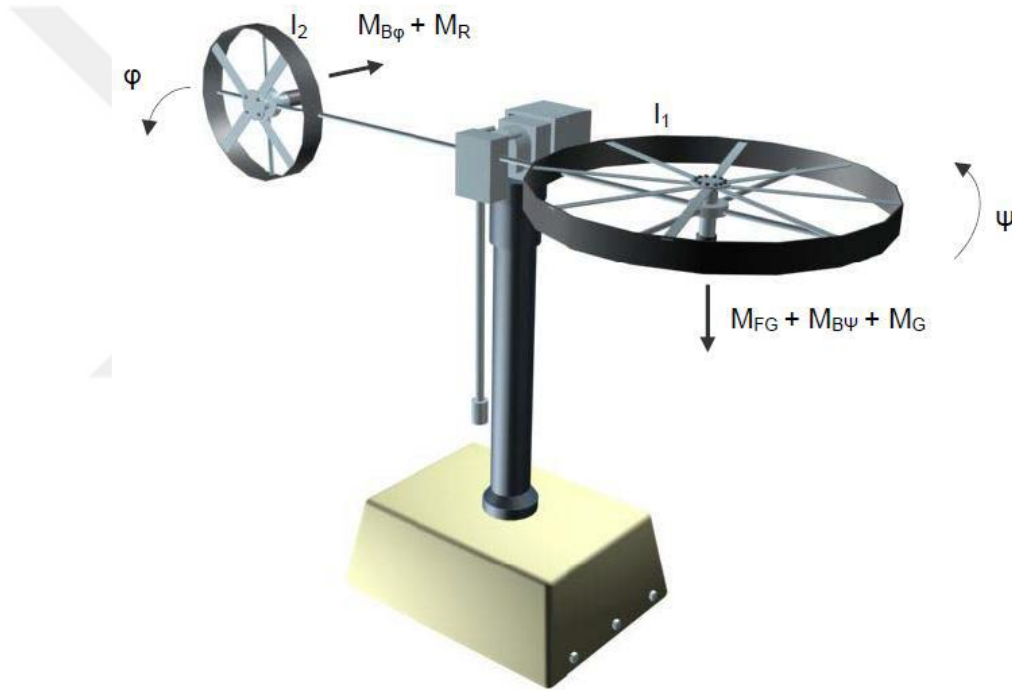
TRMS’nin kararsız yapısı ve buna ilave olarak iki motorun birbirine karşı uyguladığı çaprazlama etkisi (coupling) sebebiyle denetleme uygulaması olarak değerlendirilmeye alınmasına sebep olmuştur. Ayrıca lineer olmayan davranış sergilemesi de bu sebeplerden biridir.

Şekil 4.1.’de gösterilen TRMS sistem düzeneğinde dört ana kısım vardır. Aktif kısım olarak ifade edilen ilk iki kısım ana motor ve yardımcı motordur. Bunlardan ana motor düşey hareketi sağlarken yardımcı motor yatay hareketi sağlar. Diğer kısımlar ise hareket esnasında sistemin dengede kalmasını sağlayan karşı ağırlık (counterbalance) ile motorlara bağlı mili tutan gövde kısmıdır (Feedback Instruments Ltd.).

Sistemdeki kontrol sinyali gerilimdir ve motorların açısal hızları ve konumu bu gerilimler ile ayarlanmaktadır. Ana motor ve yardımcı motor gerilimleri, yine bu motorlardaki açı verilerine bağlı olarak ayarlanarak denetim yapılabilir.(Feedback Instruments Ltd.).

4.2. İkiz Motor Çok Giriş Çok Çıkış Sistemin Matematiksel Modeli

TRMS'nin MPC ve PID denetleyicilerle denetlenebilmesi için sistemin matematiksel modelinin oluşturulması gerekmektedir. Kullanılacak sistemin elektromekanik modeli aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4. 2. TRMS'nin fenomenolojik modeli

TRMS'nin düşey seviye hareketi için moment bağıntısı şu şekilde yazılır.

$$I_1 \ddot{\psi} = M_1 - M_{FG} - M_{B\psi} - M_G \quad (4.1)$$

Ve bu denklemi oluşturan bileşenleri ifade edersek,

Lineer olmayan statik karakteristik;

$$M_1 = a_1 \tau_1^2 + b_1 \tau_1 \quad (4.2)$$

Yerçekimi momenti;

$$M_{FG} = M_G \sin \psi \quad (4.3)$$

Sürtünme kuvvetlerine ait moment;

$$M_{B\psi} = B_{1\psi}\dot{\psi} + B_{2\psi}sign(\dot{\psi}) \quad (4.4)$$

Dönel moment;

$$M_G = K_{gv}M_1\dot{\phi} \cos \psi \quad (4.5)$$

Düşey seviye hareketin birinci dereceden Laplace formundaki transfer fonksiyonu şu şekilde ifade edilir

$$\tau_1 = \frac{k_1 u_1}{T_{11}s + T_{10}} \quad (4.6)$$

TRMS'nin düşey seviye hareketi için moment bağıntısı şu şekilde yazılır.

$$I_1\ddot{\phi} = M_2 - M_{B\phi} - M_R \quad (4.7)$$

Ve bu denklemi oluşturan bileşenleri ifade edersek,

Lineer olmayan statik karakteristik;

$$M_2 = a_2\tau_2^2 + b_2\tau_2 \quad (4.8)$$

Sürtünme kuvvetlerine ait moment;

$$M_{B\phi} = B_{1\phi}\dot{\phi} + B_{2\phi}sign(\dot{\phi}) \quad (4.9)$$

Dönel moment;

$$M_R = \frac{k_c(T_0s+1)\tau_1}{(T_p s+1)} \quad (4.10)$$

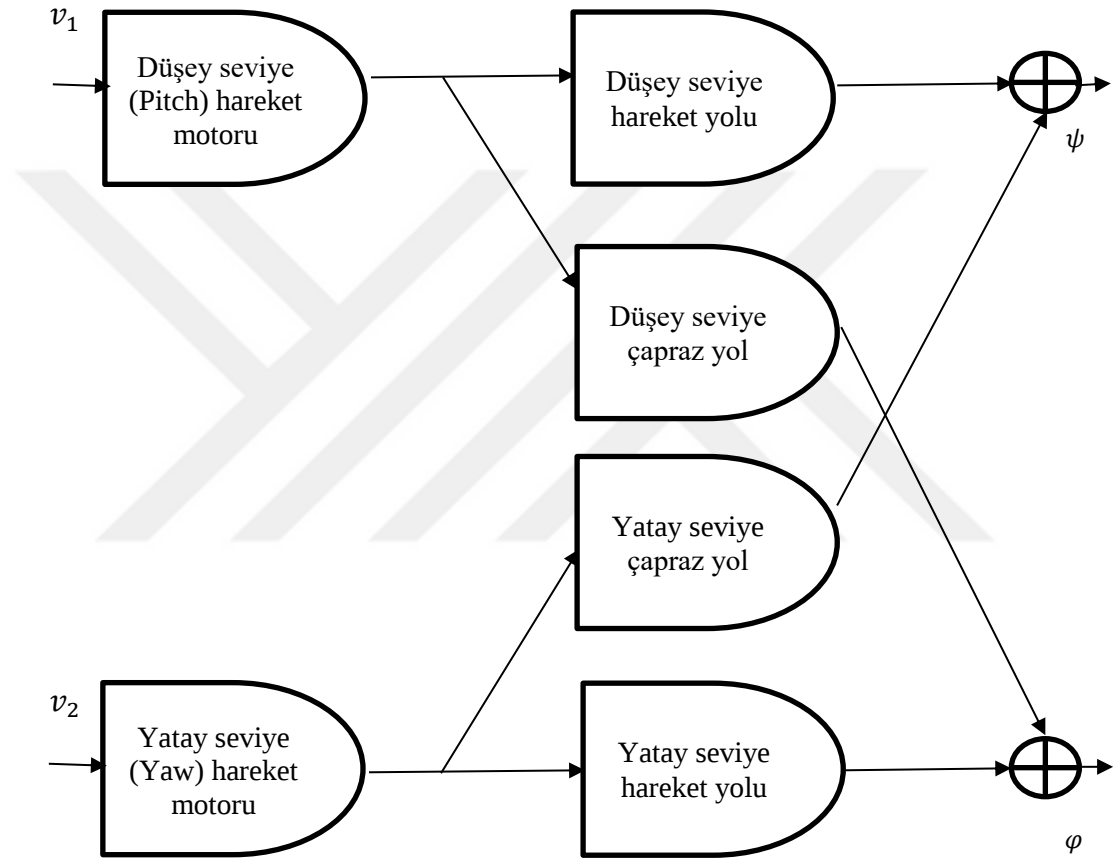
Düşey seviye hareketin birinci dereceden Laplace formundaki transfer fonksiyonu şu şekilde ifade edilir

$$\tau_2 = \frac{k_2 u_2}{T_{21}s + T_{20}} \quad (4.11)$$

Çizelge 4. 1. TRMS fiziksel parametreleri (Feedback Instruments Ltd.).

PARAMETRE		DEĞER
I_1	Ana motor (düşey) atalet momenti	$6.8 \cdot 10^{-2} kg \cdot m^2$
I_2	Yardımcı motor (yatay) atalet momenti	$2 \cdot 10^{-2} kg \cdot m^2$
a_1	Statik parametre	0.0135
b_1	Statik parametre	0.0924
a_2	Statik parametre	0.02
b_2	Statik parametre	0.09
M_g	Yerçekimi momenti	$0.32 N \cdot m$
$B_{1\psi}$	Sürtünme momenti fonksiyonu parametresi	$6 \cdot 10^{-3} N \cdot m \cdot s / rad$
$B_{2\psi}$	Sürtünme momenti fonksiyonu parametresi	$1 \cdot 10^{-3} N \cdot m \cdot s^2 / rad$
$B_{1\phi}$	Sürtünme momenti fonksiyonu parametresi	$1 \cdot 10^{-1} N \cdot m \cdot s / rad$
$B_{2\phi}$	Sürtünme momenti fonksiyonu parametresi	$1 \cdot 10^{-2} N \cdot m \cdot s^2 / rad$
K_{gy}	Dönel moment parametresi	$0.05 s / rad$
k_1	1'inci motora ait kazanç	1.1
k_2	2'nci motora ait kazanç	0.8
T_{11}	Motor 1 payda parametresi	1.1
T_{10}	Motor 1 payda parametresi	1
T_{21}	Motor 2 payda parametresi	1
T_{20}	Motor 2 payda parametresi	1
T_p	Çapraz etki momenti parametresi	2
T_0	Çapraz etki momenti parametresi	3.5
k_c	Çapraz etki momenti kazancı	-0.2

TRMS blok diyagramı aşağıdaki Şekil 4.3.'de verilmiştir. Burada v_1 ve v_2 sistem girişleri ve φ ve ψ ise sistem çıkışlarıdır. İki motor arasında bulunan çapraz bağlantı TRMS için en temel özelliklerden biridir. Aşağıdaki blok diyagramdan da anlaşılacağı üzere matematiksel modellerin oluşturulmasında dört adet doğrusal model belirlenmektedir. Bunlar düşey seviye hareket yolu modeli, düşey seviye çapraz yol modeli, yatay seviye hareket yolu modeli ve yatay seviye çapraz yol modelidir.



Şekil 4. 3. TRMS blok diyagram

MATLAB programına ait Simulink ortamında TRMS matematiksel modeli oluşturulup yine bu ortamda denetleyiciler tasarlanabilir.

Düşey seviye hareket kontrolü, yatay seviye hareket kontrolü ve hem düşey hem de yatay seviye hareket kontrolü (coupling) modellenerek bu modeller üzerinden denetleyici tasarımı yapılacaktır. Bu modeller, Feedback Instruments firması tarafından sunulmaktadır.

Blok diyagramda verilen hareket yollarının denklemlerini sırayla ifade edecek olursak.

Düşey seviye (pitch) hareketin yoluna ait matematiksel model;

$$G_p(s) = \frac{2.57}{s^3 + 1.869s^2 + 4.916s + 7.515} \quad (4.12)$$

Yatay seviye (yaw) hareketin yoluna ait matematiksel model;

$$G_y(s) = \frac{0.1511}{s^2 + 0.7281s + 0.3111} \quad (4.13)$$

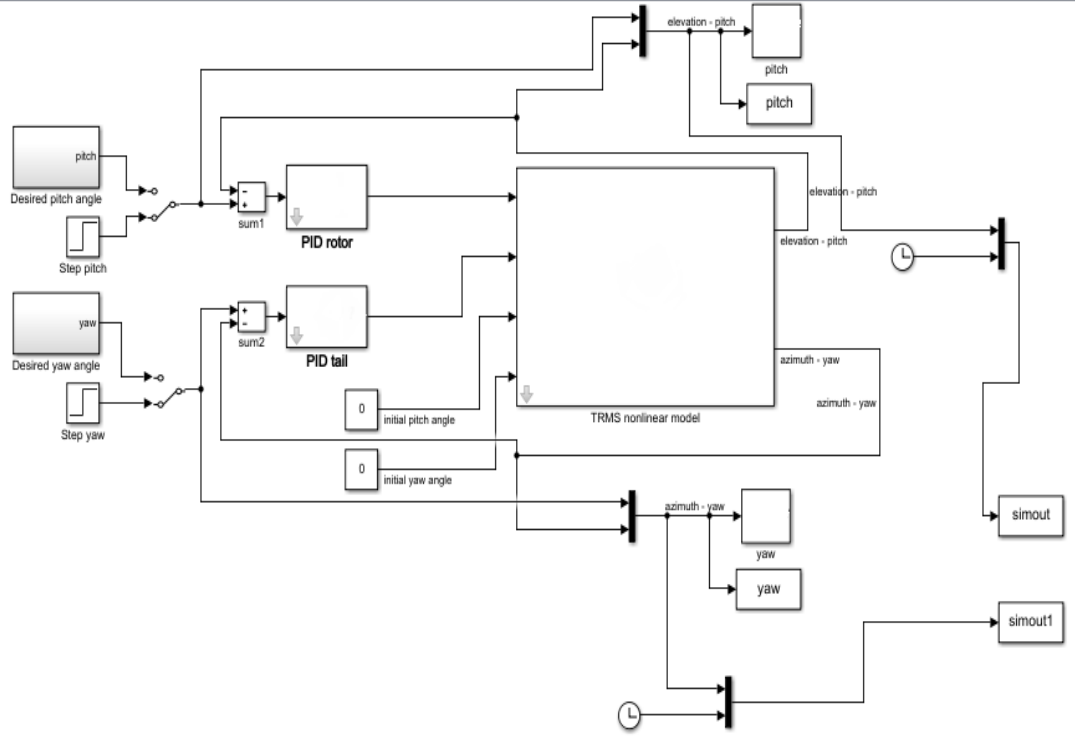
Düşey seviye çapraz yol (cross pitch) matematiksel model;

$$G_{cp}(s) = \frac{0.008407}{s^2 + 0.7783s + 0.02515} \quad (4.14)$$

Yatay seviye çapraz yol (cross yaw) matematiksel model;

$$G_{cy}(s) = \frac{0.055045s + 0.08529}{s^2 + 0.2527s + 4.837} \quad (4.15)$$

Verilen matematiksel modellerin Simulink ortamında Feedback Instruments tarafından sunulan modeli ve yine bu firma tarafından önerilen PID denetleyici yapısı Şekil 4.4.'de görülmektedir. İlerleyen kısımda bu model ve düşey ve yatay hareket kontrolü modelleri ayrı ayrı değerlendirilecek ve MPC denetleyici ile karşılaştırılacaktır.



Şekil 4. 4. TRMS modelinin PID denetleyicileri ile MATLAB Simulink blok diyagramı (Feedback Instruments)

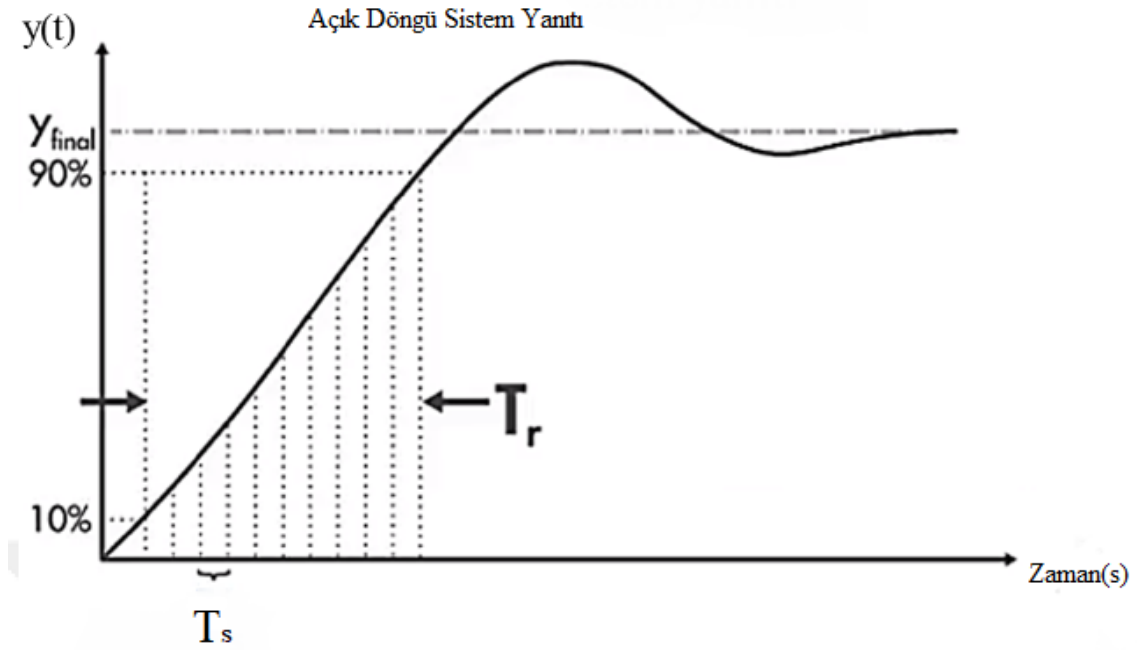
4.3. Model Öngörülü Denetleyici (MPC) Tasarımı

Bu kısımda model öngörülü denetleyici tasarımında önemli olan parametrelerden bahsedilecektir. MPC parametrelerinin uygun olarak seçilmesi, denetleyicinin performansı açısından çok önemlidir. MPC parametrelerinin (örnekleme zamanı, öngörü ufku, kontrol ufku, kısıtlar ve ağırlıklar) seçilmesi sırasındaki tavsiyeler aşağıda verilmiştir. (Bemporad ve ark, 2018)

Örnekleme zamanı T_s , denetleyiciye ait denetim algoritmasının uygulama hızını belirler. Bu değer çok büyük seçilirse, denetleyici sisteme uygulanan bozululara hızlı yanıt veremez. Çok küçük seçildiği takdirde bozululara aşırı hızlı cevap verir fakat bu ciddi bir hesap yükü oluşmasına neden olur.

Örnekleme zamanı (T_s) seçerken hesap yükü ile denetleyicinin performansı arasında dengeli bir ilişki kurmak için Şekil 4.5.'de gösterildiği gibi sistemin açık çevrim cevabınının yükselme zamanının 10-20 arası örnekleme sığdırılması tavsiye edilir (Bemporad ve ark. 2018). İfade şu şekilde gösterilir.

$$\frac{T_r}{20} \leq T_s \leq \frac{T_r}{10} \quad (4.16)$$

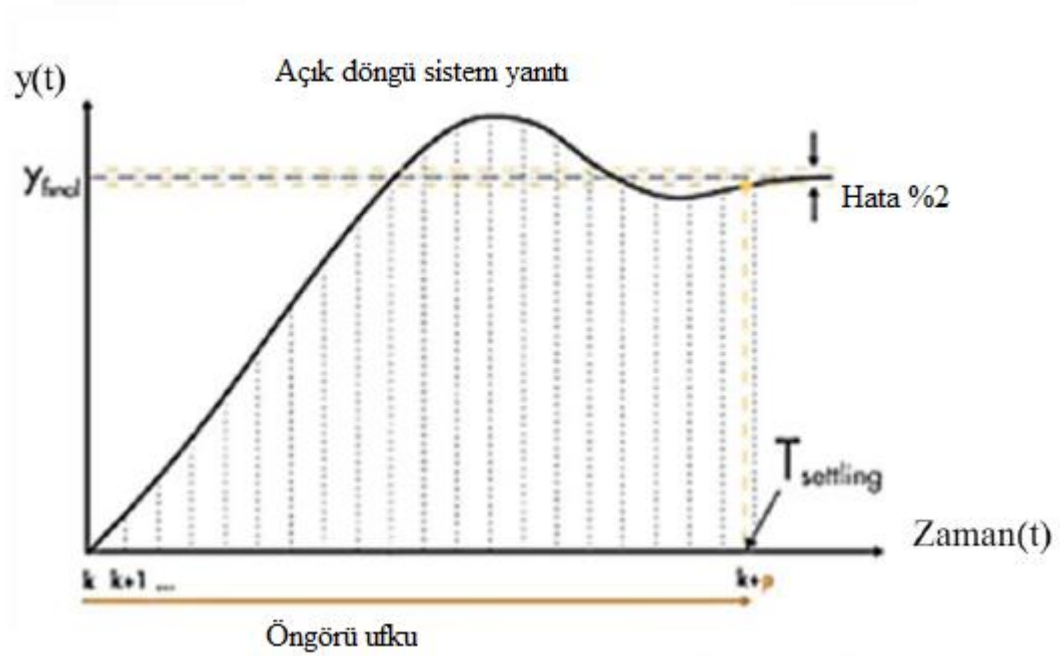


Şekil 4. 5. T_s Örnekleme zamanı seçimi (Bemporad ve ark.)

Bir diğer parametre ise Öngörü ufkudur (N_p). Tahmin edilen gelecekteki adımların sayısını ifade eder. MPC'nin ne kadar uzaktaki geleceği öngördüğünü belirtir. N_p çok küçük seçilirse sisteme ait olan önemli dinamiklerini kapsayamama durumu olabilir. N_p çok büyük seçilirse sistem aktif bir şekilde çalışırken umulmadık bir olay meydana geldiği zaman boşuna hesap yapılmasına sebebiyet verir. Öngörü ufku N_p için önerilen değer sisteme ait olan açık çevrim geçici durum yanıtında 20-30 örnekleme sayısını ihtiva edecek şekilde seçilmesidir (Bemporad ve ark., 2018)

İfade şu şekilde gösterilir.

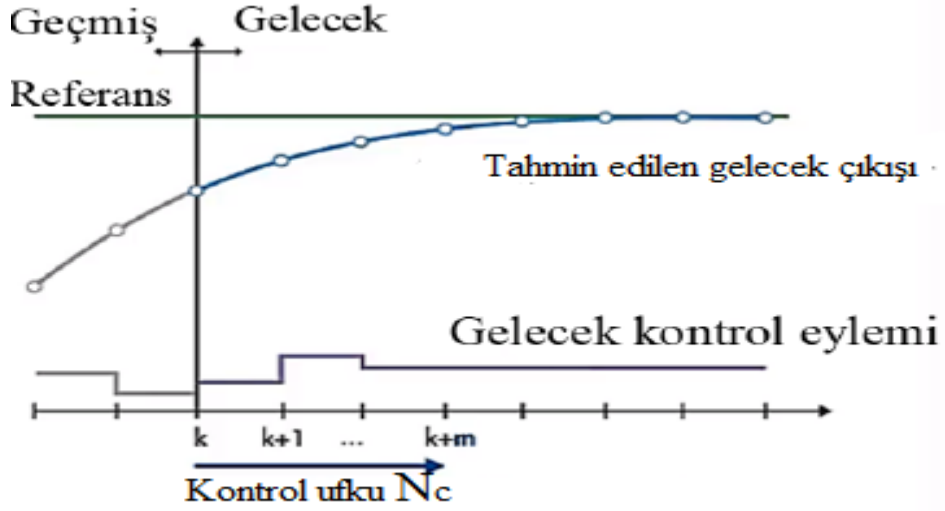
$$N_p T_s \geq T_{yerleşme} \quad (4.17)$$



Şekil 4. 6. N_p Öngörü ufku seçimi (Bemporad ve ark.)

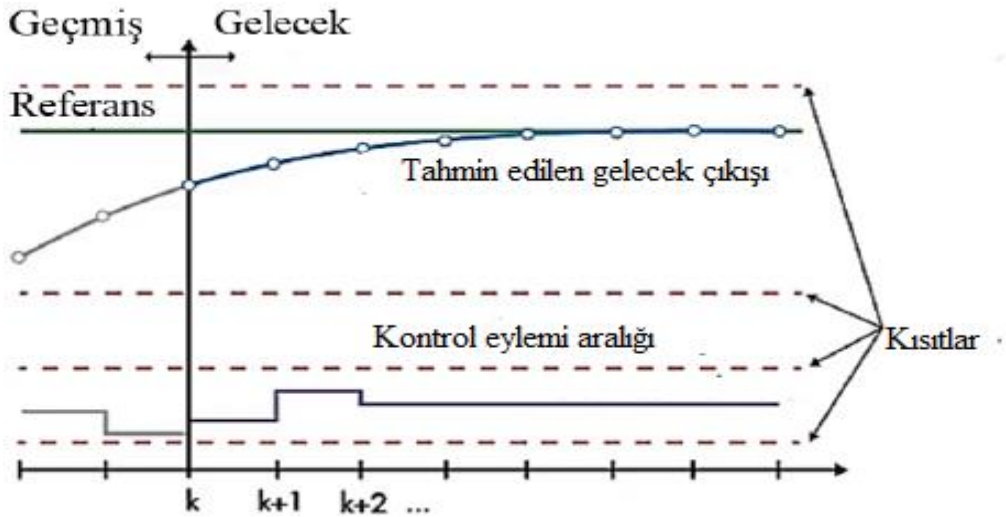
Başka bir parametre ise kontrol ufkudur (N_c). m ile ifade edilen zamana ait adım değerine ulaşılmasını sağlayan eylem sayısına kontrol ufku denir. Denetleyicinin ne kadar süre iterasyona gireceğini ifade eder. Tahmini yapılan çıkış değerine ulaştığı zaman eylem sabit tutulur. Kontrol ufkuna it tüm kontrol eylemlerinin hesabı eniyileyci tarafından yapılır. N_c 'nin küçük tutulması hesap yükünü azaltır ama denetleyicinin öngörü yeteneği daha azalır. Bunun aksine N_c 'nin yüksek tutulması daha iyi bir öngörü sağlar ancak hesaplama yükü buna bağlı olarak artar. N_c 'yi seçmek için önerilen kural, öngörü ufku N_p 'nin %10-%20 değerine ayarlanmasıdır. Bu ifade aşağıdaki eşitsizlik ile verilebilir. (Bemporad ve ark.)

$$0.1N_p \leq N_c \leq 0.2N_p \quad (4.18)$$



Şekil 4. 7. N_c Kontrol ufku seçimi (Bemporad ve ark., 2018)

Yine bir diğer parametre ise kısıtlardır. MPC denetleyicilerde kısıtlar, sistemin istenen aralıklarda çalışmasını sağlar. Sistem girişleri, girişlere bağlı değişim oranları ve sistem çıkışlarına uygulanabilir. Yazılımsal ve donanımsal kısıtlar vardır. Giriş ve çıkışlarda uygulanan kısıtların katı olması da denetleyicinin optimizasyon yapmasında ciddi sorunlara yol açar (Bemporad ve ark., 2018).



Şekil 4. 8. MPC kısıtları analojisi (Bemporad ve ark., 2018)

Ve son olarak ise ağırlık parametresi vardır. Tüm kontrol sistemlerinde olduğu gibi MPC denetleyicisinde de temel amaç referans sinyale tutunmak ve bunu yaparken şiddetli manevralardan kaçınmaktır. Daha yumuşak bir kontrol sistemi özellikle otomotiv sektöründe bulunan denetleyiciler için daha büyük önem taşımaktadır. Birbirine karşı zıt etkileri olan çıkış hedefleri arasındaki dengeyi sağlamak için ağırlıklar kullanılmaktadır.

4.4. MPC Araç Kutusu Kullanarak TRMS Denetleyicisi Tasarımı

Bu bölümde TRMS sisteminin farkı seviyelerdeki hareketleri için MATLAB MPC Araç Kutusu kullanılarak MPC denetleyiciler tasarlanacak ve bu tasarlanan MPC denetleyici ile Feedback Instruments firması tarafından önerilen PID denetleyiciler karşılaştırılacaktır.

MATLAB MPC Araç Kutusu ile denetleyici tasarımı üç aşamadan oluşmaktadır (Bemporad ve ark. 2018).

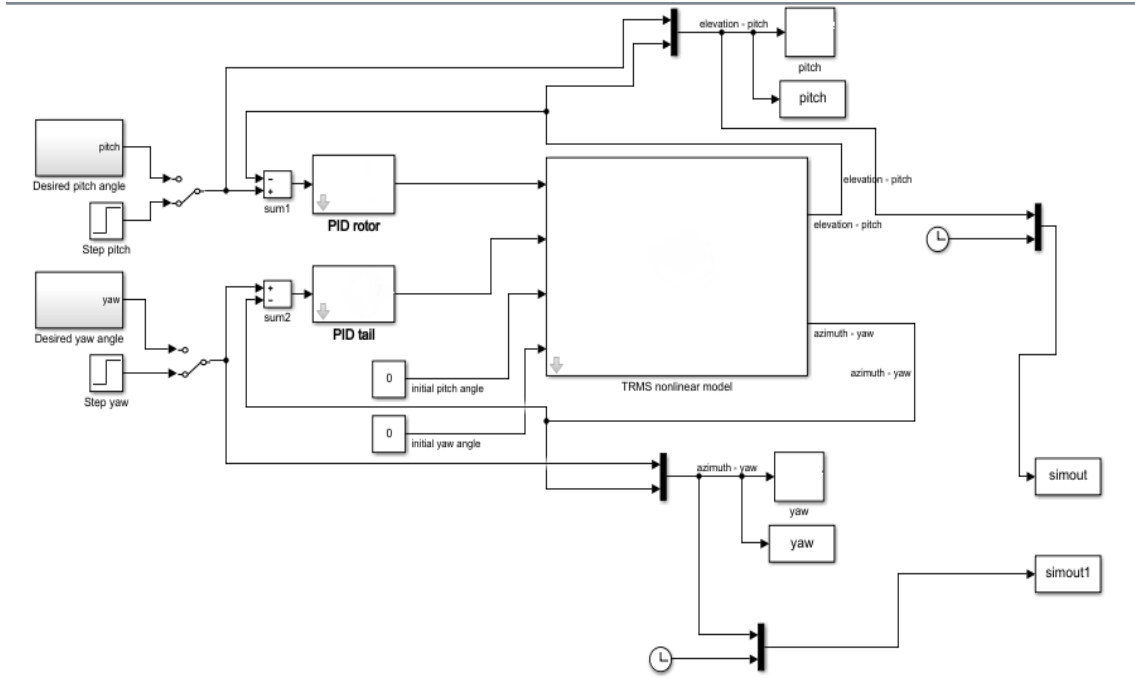
- MATLAB Simulink'te sistem modeli oluşturulur ve MPC bloğuna tanımlanır.
- Sistemin giriş ve çıkışları MPC'ye tanımlanır.
- MPC parametreleri araç kutusunda tanımlanır.

4.4.1. TRMS coupling kontrolü

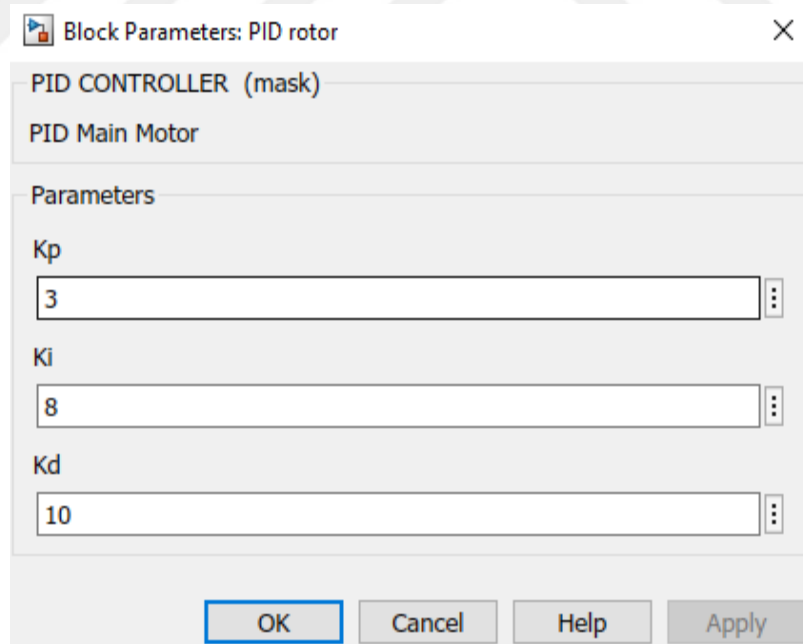
TRMS sisteminin iki motoru arasında çapraz bağlantılarına sahip olması en önemli özelliklerinden biridir. Ana motor ve yardımcı motorun birbirlerine etkileri olmaktadır. Bu etkiler sistemin kontrol edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu kontrol denetiminde PID denetleyici ve MPC denetleyici ile TRMS sistemi kontrol edilecektir. PID denetleyiciye ait K_p , K_d ve K_i değerleri üretici firma (Feedback Instruments) tarafından açıklanan katalog bilgilerinden alınmıştır. TRMS sisteminin coupling kontrolü yani ana motor ve yardımcı motorun aynı anda çalıştığı senaryo için firmanın verdiği PID denetleyicisine ait denklemler aşağıda verilmiştir.

$$C_1(s) = 3 + \frac{8}{s} + 10s \quad (4.19)$$

$$C_2(s) = 2 + \frac{0.5}{s} + 5s \quad (4.20)$$

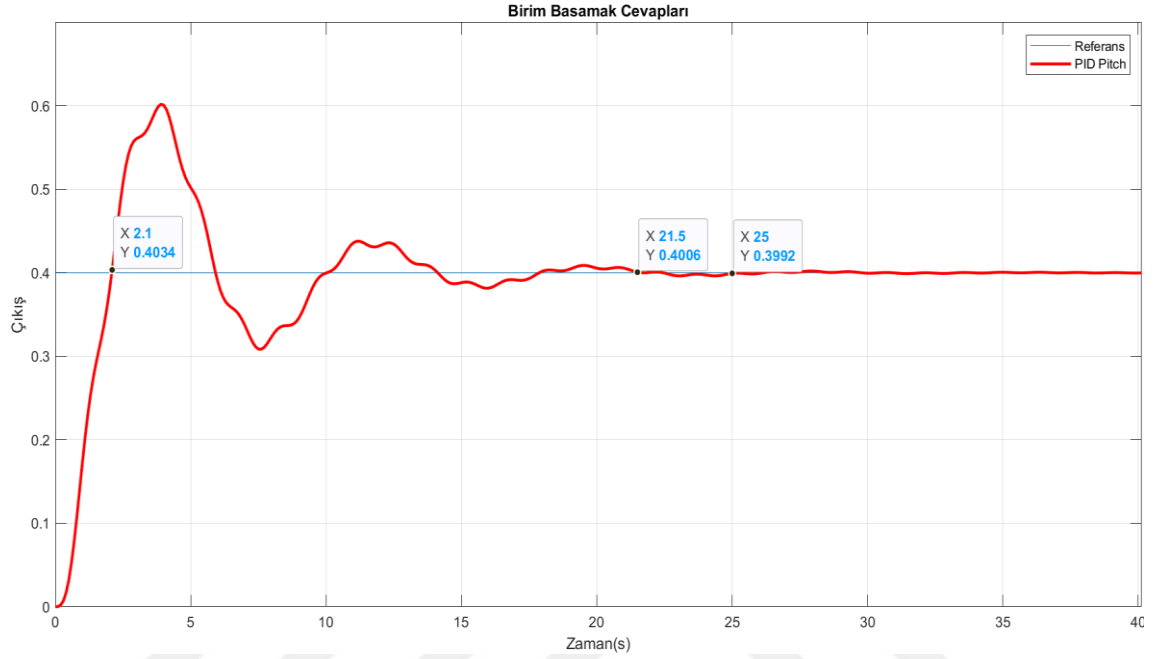


Şekil 4. 9. TRMS coupling sistem hareket kontrolünün PID denetleyicisi ile Simulink modeli (Feedback Instruments)



Şekil 4. 10. TRMS coupling sisteminin ana motor PID denetleyicisi parametreleri

TRMS sisteminde ana motora ait olan PID denetleyicisinin birim basamak cevabı Şekil 4.11.'de verilmiştir. Yükselme zamanı 2.1 s, yerleşme zamanı 21.5s ve oturma zamanı 25 s olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 11. PID denetleyici ile kontrol edilen TRMS coupling modelinin ana motor birim basamak cevabı

Block Parameters: PID tail

PID CONTROLLER (mask)

PID Tail Motor

Parameters

Kp

2

Ki

0.5

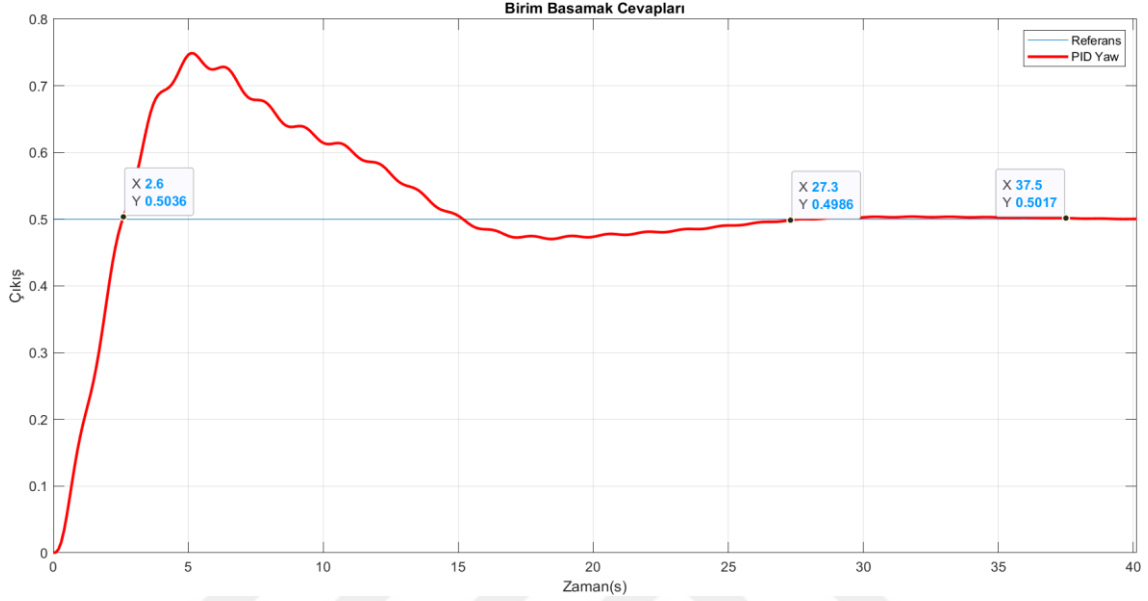
Kd

5

OK Cancel Help Apply

Şekil 4. 12. TRMS coupling sisteminin yardımcı motor PID denetleyicisi parametreleri

TRMS sisteminde yardımcı motora ait olan PID denetleyicisinin birim basamak cevabı Şekil 4. 13.'de verilmiştir. Yükselme zamanı 2.6 s, yerleşme zamanı 27.3s ve oturma zamanı 37.5 s olduğu görülmektedir.



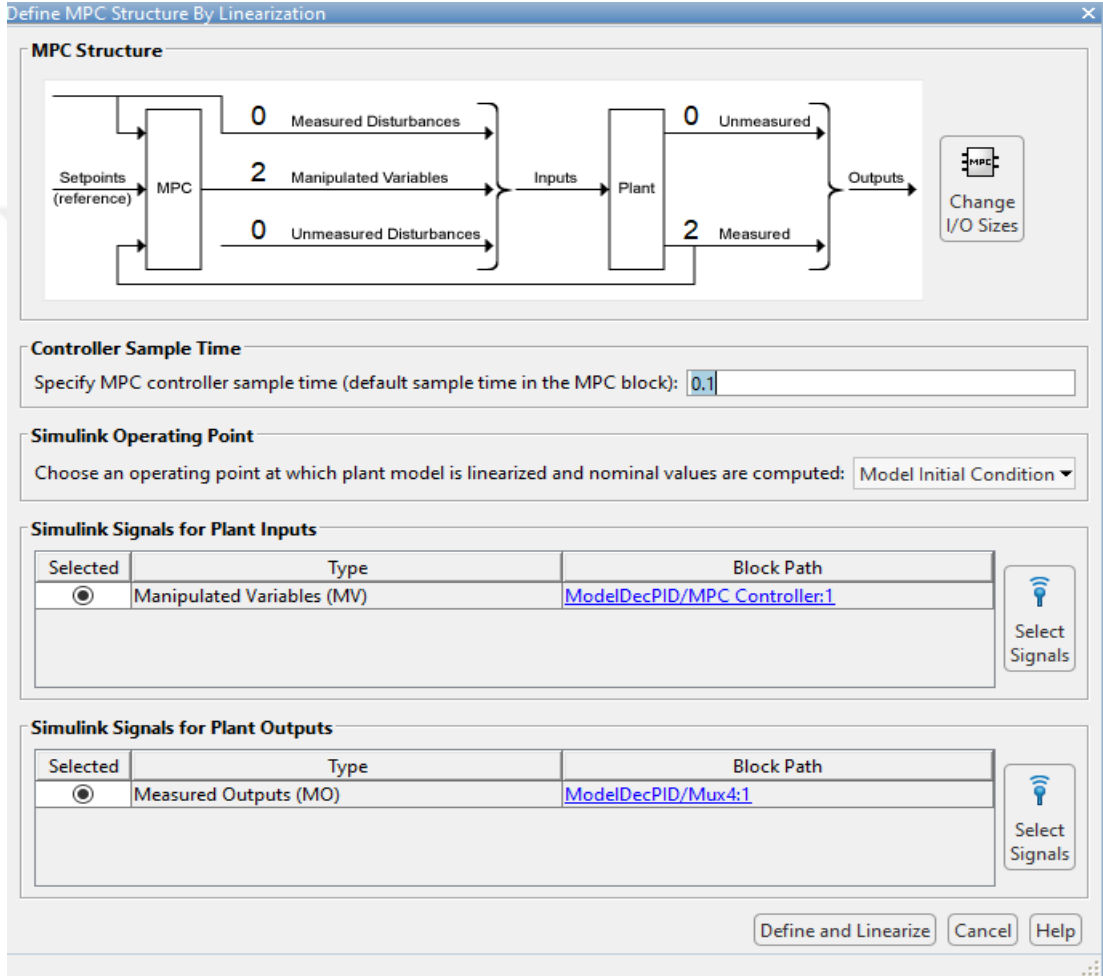
Şekil 4. 13. PID denetleyici ile kontrol edilen TRMS coupling modelinin yardımcı motor birim basamak cevabı

Buraya kadar TRMS'ye ait coupling modelin firma tarafından önerilen PID denetleyicileri ile denetimi sonucu birim basamak cevaplarının analizi yapılmıştır. Şimdi ise MPC Araç kutusu ile TRMS için MPC denetleyicisi tasarımı anlatılacaktır.

Yükselme zamanı ve yerleşme zamanı değerlerine göre MPC parametrelerinin seçilmesinde önerilen kuralları da dikkate alarak TRMS coupling model için aşağıda ifade edilen değerler MPC parametrelerinde kullanılmıştır.

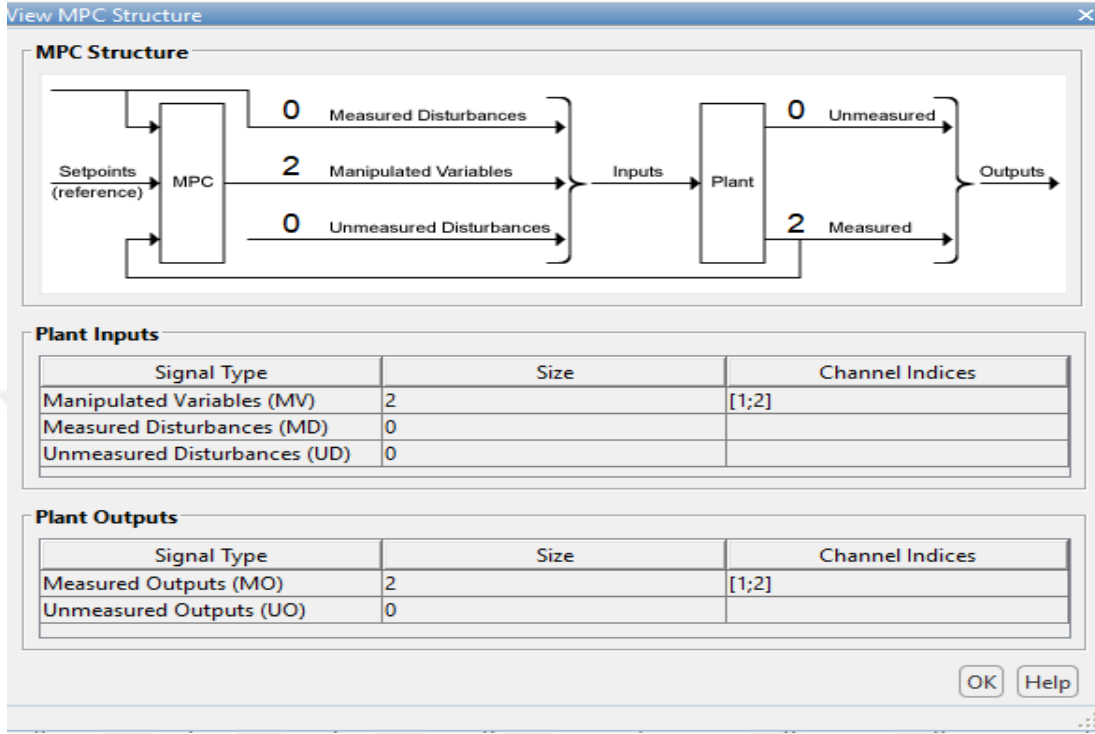
- Örnekleme zamanı $T_s = 0.1$
- Öngörü ufku $N_p = 80$
- Kontrol ufku $N_c = 9$
- Giriş kısıtları $2.5 \geq v_{1,2} \geq -2.5$ volt

MPC denetleyici tasarlarken MPC araç kutusu kullanılmaktadır. Tasarımda lineer model kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Modeli sisteme tanıtmak ve lineerleştirme işlemi yapılmalıdır. Giriş çıkış değerleri ve örnekleme zamanı değerinin de ayarlandığı bu Simulink ortamında MPC araç kutusuna gidilerek aşağıdaki Şekil 4.15.'de gösterildiği gibi “define and linearize” butonuna basılarak lineerleştirilir.



Şekil 4. 15. TRMS coupling modelinin MPC'ye ait araç kutusuna tanımlanması ve lineerleştirilmesi

MPC araç kutusuna tanıtım yapıldıktan sonra, araç kutusu giriş ve çıkış sayısını kendisi belirler. Fakat bu yapılacak işleme göre kullanıcı tarafından da değiştirilebilir.



Şekil 4. 16. TRMS coupling sisteminin MPC yapısı

The 'Input and Output Channel Specifications' dialog box provides detailed information about the input and output channels of the MPC system.

Plant Inputs Table:

Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
u(1)	MV	Ana Motor	Volt	0	1
u(2)	MV	Yardımcı M...	Volt	0	1

Plant Outputs Table:

Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
y(1)	MO	Düşey Açı Psi	rad	0	1
y(2)	MO	Yatay Açı Phi	rad	0	1

Buttons: OK, Apply, Cancel, Help

Şekil 4. 17. TRMS coupling sisteminin MPC giriş çıkış özellikleri

TRMS coupling sisteminin kısıtlarının MPC araç kutusunda tanıtılması Şekil 4. 18.'de verilmiştir. TRMS sisteminin ana ve yardımcı motorları 2.5 volt DC motor ile çalışmaktadır.

Constraints (mpc1)

Input Constraints

Channel	Type	Min	Max	RateMin	RateMax
u(1)	MV	-2.5	2.5	-Inf	Inf
u(2)	MV	-2.5	2.5	-Inf	Inf

+ Constraint Softening Settings

Output Constraints

Channel	Type	Min	Max
y(1)	MO	-Inf	Inf
y(2)	MO	-Inf	Inf

+ Constraint Softening Settings

OK Apply Cancel Help

Şekil 4. 18. TRMS coupling sisteminin MPC denetleyici kısıtları

TRMS'ye ait düşey ve yatay eksen açısı cevaplarının ayarlanması için giriş ve çıkış ağırlıklarının ayarlanması gerekmektedir. Ağırlıklar ayarlanırken şu metotlar kullanılmıştır.

- Giriş gerilimlerine atanan ağırlık 0 seçilmiştir. Bu denetleyiciye bağımsız bir kontrol yeteneği kazandırmıştır. Çıkış değerlerini izin verilen aralıkta değiştirmesine olanak sağlamıştır.
- İlk çıkış değeri ağırlığının değeri ikinci çıkış değeri ağırlığından daha büyük seçilmiştir. Bu çıkış değerleri düşey ve yatay açısı değerleridir.

TRMS coupling sistemi için seçilen ağırlıkların MPC araç kutusuna tanıtılması aşağıdaki Şekil 4. 19.'da gösterilmiştir.

Weights (mpc1)

Input Weights (dimensionless)

Channel	Type	Weight	Rate Weight	Target
u(1)	MV	0	0.017	nominal
u(2)	MV	0	0.001	nominal

Output Weights (dimensionless)

Channel	Type	Weight
y(1)	MO	0.7
y(2)	MO	0.01

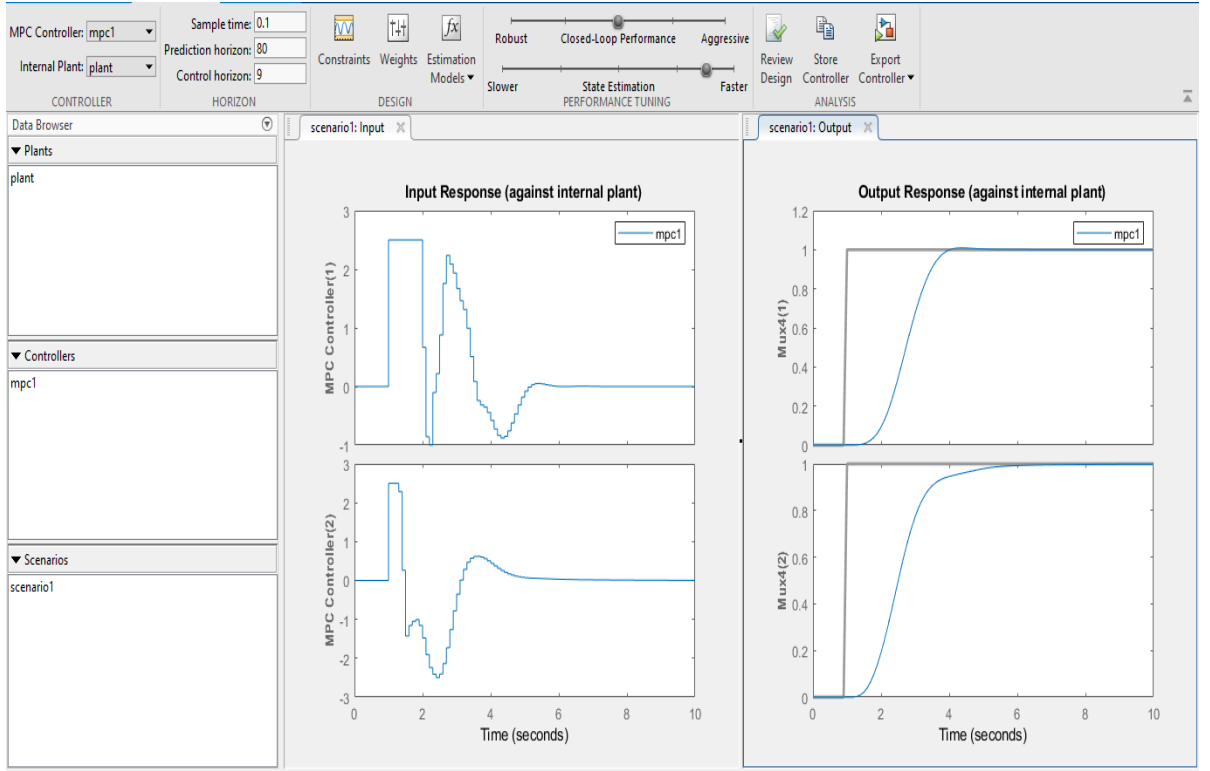
ECR Weight (dimensionless)

Weight on the slack variable: 100000

OK Apply Cancel Help

Şekil 4. 19. TRMS coupling sisteminin MPC denetleyici ağırlıkları

TRMS sistemine ait sistem cevabı MPC araç kutusundaki “Performance Tuning” bölümü kullanılarak Yavaş-Hızlı ve Gürbüz-Agresif ayarlamaları yapılır. Denetleyici parametrelerinden öngörü ufku, kontrol ufku burada seçilir ve örnekleme periyodu yine burada belirlenir.

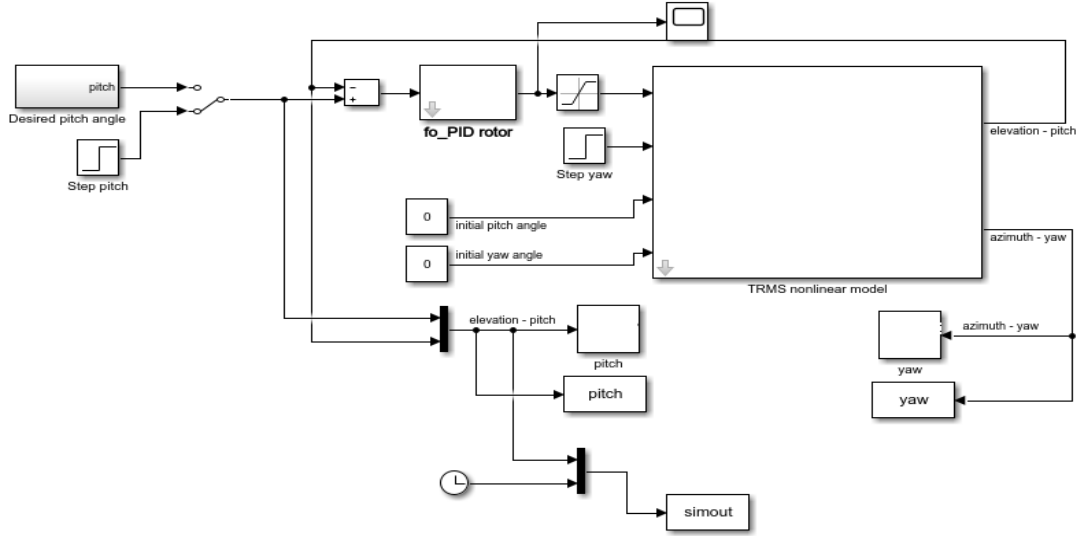


Şekil 4. 20. TRMS coupling sisteminin MPC araç kutusunda performans ayarlaması

4.4.2. TRMS düşey seviye kontrolü

Bu kontrol denetiminde PID denetleyici ve MPC denetleyici ile TRMS sisteminin düşey seviye hareketi kontrol edilecektir. PID denetleyiciye ait K_p , K_d ve K_i değerleri üretici firma (Feedback Instruments) tarafından açıklanan katalog bilgilerinden alınmıştır. TRMS sisteminin düşey seviye kontrolü yani ana motorun çalıştığı senaryo için firmanın verdiği PID denetleyicisine ait denklem aşağıda verilmiştir.

$$C_p(s) = 5 + \frac{8}{s} + 10s \quad (4.21)$$



Şekil 4. 21. TRMS düşey seviye hareket kontrolünün PID denetleyicisi ile Simulink modeli (Feedback Instruments)

Block Parameters: fo_PID rotor

PID CONTROLLER (mask)

PID Main Motor

Parameters

Kp

5

Ki

8

Kd

10

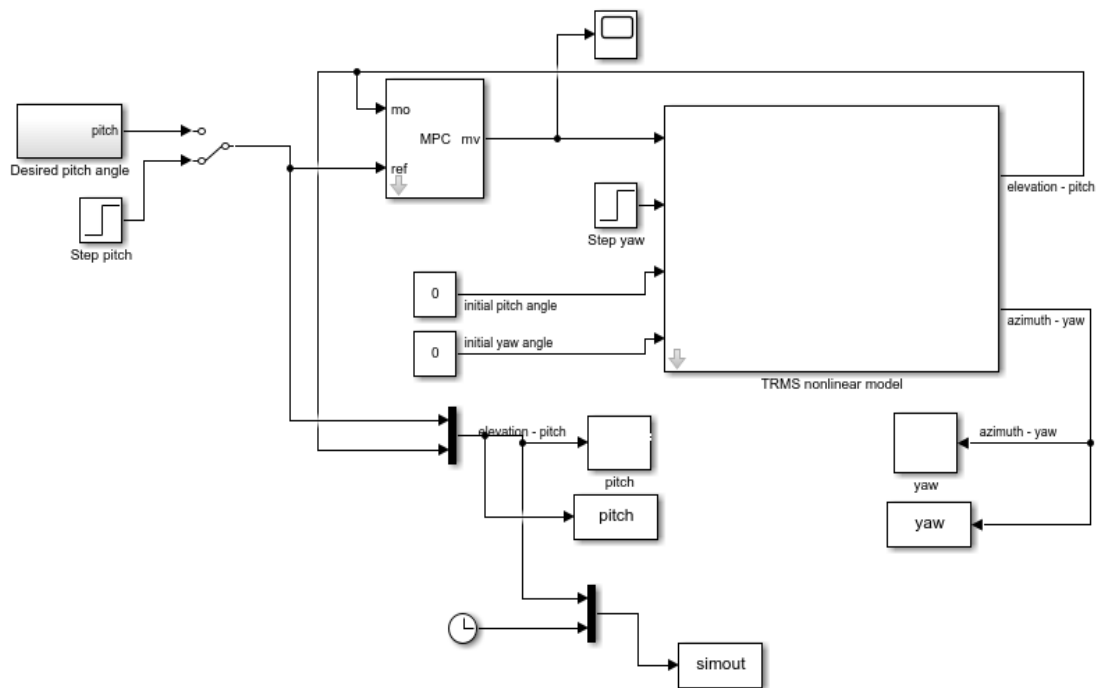
OK Cancel Help Apply

Şekil 4. 22. TRMS düşey seviye hareket sisteminin ana motor PID denetleyicisi parametreleri

Buraya kadar TRMS'ye ait düşey seviye hareket modelinin firma tarafından önerilen PID denetleyicisi ile denetimi yapılmıştır. Şimdi ise MPC Araç kutusu ile TRMS için MPC denetleyicisi tasarımı anlatılacaktır.

Yükselme zamanı ve yerleşme zamanı değerlerine göre MPC parametrelerinin seçilmesinde önerilen kuralları da dikkate alarak TRMS düşey seviye hareket modeli için aşağıda ifade edilen değerler MPC parametrelerinde kullanılmıştır.

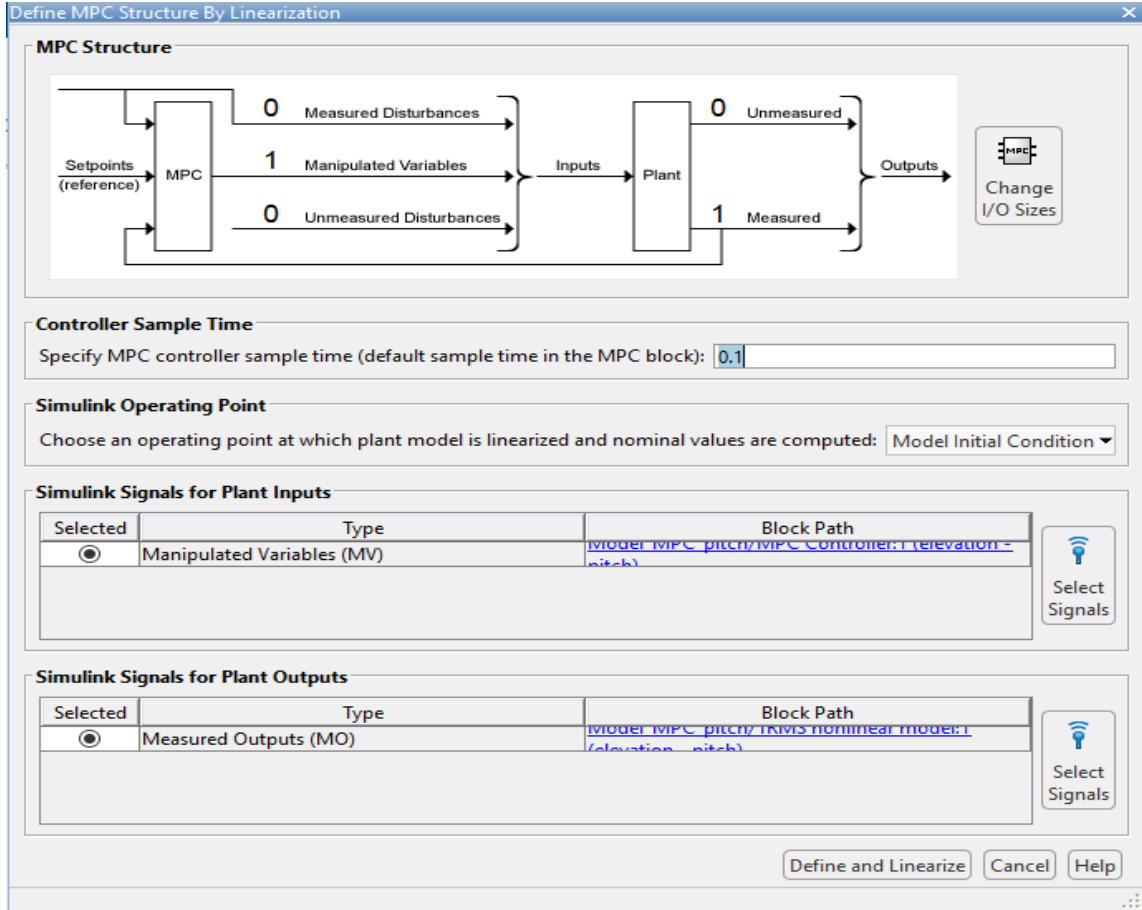
- Örneklemeye zamanı $T_s = 0.1$
- Öngörü ufku $N_p = 100$
- Kontrol ufku $N_c = 9$
- Giriş kısıtları $5 \geq v_1 \geq -5$ volt



Şekil 4. 23. TRMS düşey seviye hareket kontrolünün MPC denetleyicisi ile Simulink modeli

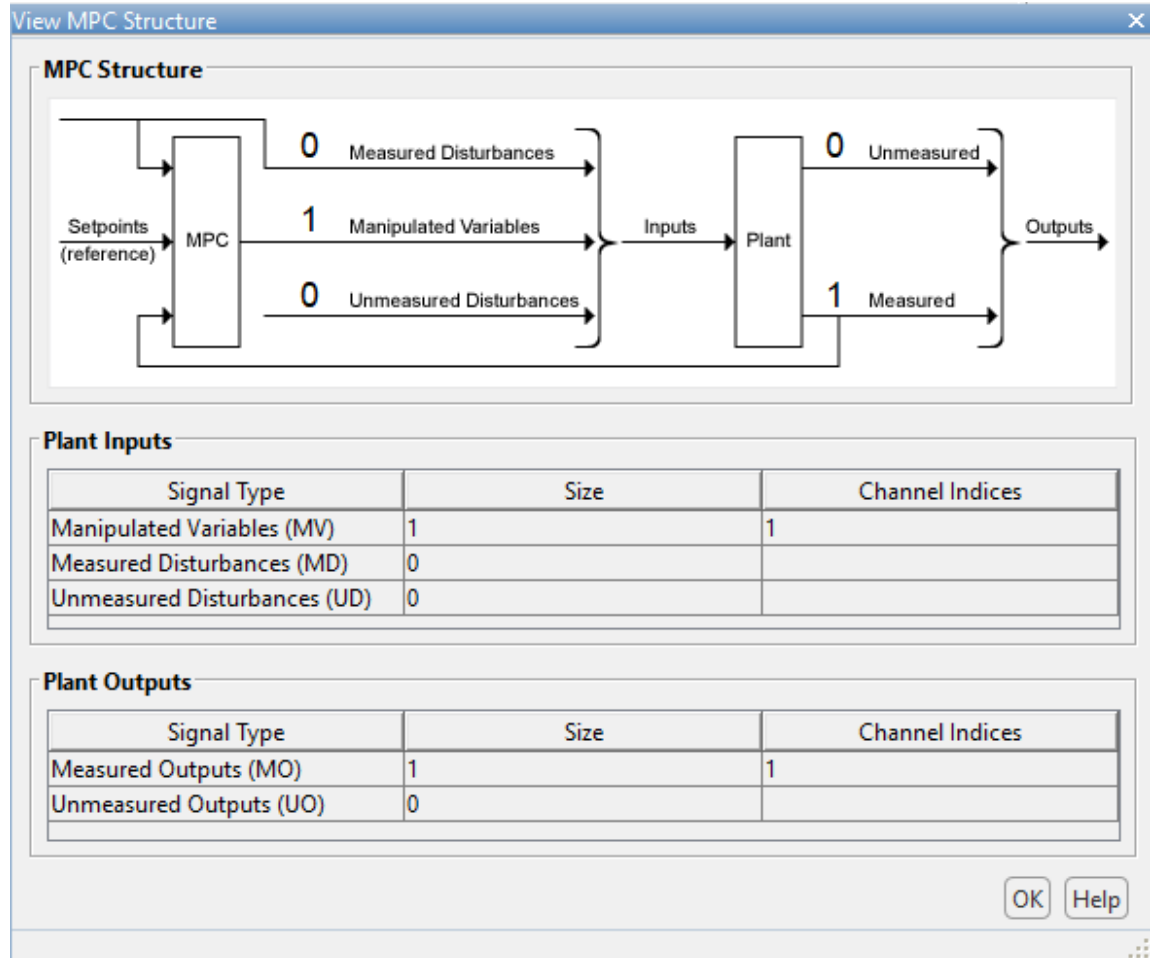
Simulink ortamında TRMS modeline bir giriş ve bir çıkıştan oluşan bir adet MPC bloğu yerleştirilerek MPC araç kutusu yardımıyla model tanıtılacak ve lineerleştirilecektir. Ardından belirlenen model parametreleri araç kutusuna tanıtılacak ve denetleyicinin performansı değerlendirilecektir.

Bir önceki sistemde olduğu gibi modeli sisteme tanıtmak ve lineerleştirme işlemi yapılmalıdır. Giriş çıkış değerleri ve örnekleme zamanı değerinin de ayarlandığı bu Simulink ortamında MPC araç kutusuna gidilerek aşağıdaki Şekil 4.24.'de gösterildiği gibi “define and linearize” butonuna basılarak lineerleştirilir.



Şekil 4. 24. TRMS düşey seviye hareket modelinin MPC'ye ait araç kutusuna tanımlanması ve lineerleştirilmesi

MPC araç kutusuna tanıtım yapıldıktan sonra, araç kutusu giriş ve çıkış sayısını kendisi belirler. Fakat bu yapılacak işleme göre kullanıcı tarafından da değiştirilebilir.



Şekil 4. 25. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC yapısı

Input and Output Channel Specifications

Plant Inputs

Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
u(1)	MV	Ana Motor	Volt	0	1

Plant Outputs

Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
y(1)	MO	Düşey Açı Psi	rad	0	1

OK Apply Cancel Help

Şekil 4. 26. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC giriş çıkış özellikleri

Şekil 4.27.'de TRMS düşey seviye hareket sisteminin kısıtlarının MPC araç kutusunda tanıtılması gösterilmiştir.

Constraints (mpc1)

Input Constraints

Channel	Type	Min	Max	RateMin	RateMax
u(1)	MV	-5	5	-Inf	Inf

+ Constraint Softening Settings

Output Constraints

Channel	Type	Min	Max
y(1)	MO	-Inf	Inf

+ Constraint Softening Settings

OK Apply Cancel Help

Şekil 4. 27. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC denetleyici kısıtları

TRMS'ye ait düşey seviye açıcı cevabının ayarlanması için giriş ve çıkış ağırlıklarının ayarlanması gerekmektedir. Ağırlıklar ayarlanırken şu metotlar kullanılmıştır.

- Giriş gerilimine atanan ağırlık 0 seçilmiştir. Bu denetleyiciye bağımsız bir kontrol yeteneği kazandırmıştır. Çıkış değerini izin verilen aralıkta değiştirmesine olanak sağlamıştır.
- Çıkış ağırlığı değeri 3.15 seçilmiştir. Bu düşey seviye hareket açısına ait ağırlık değeridir.

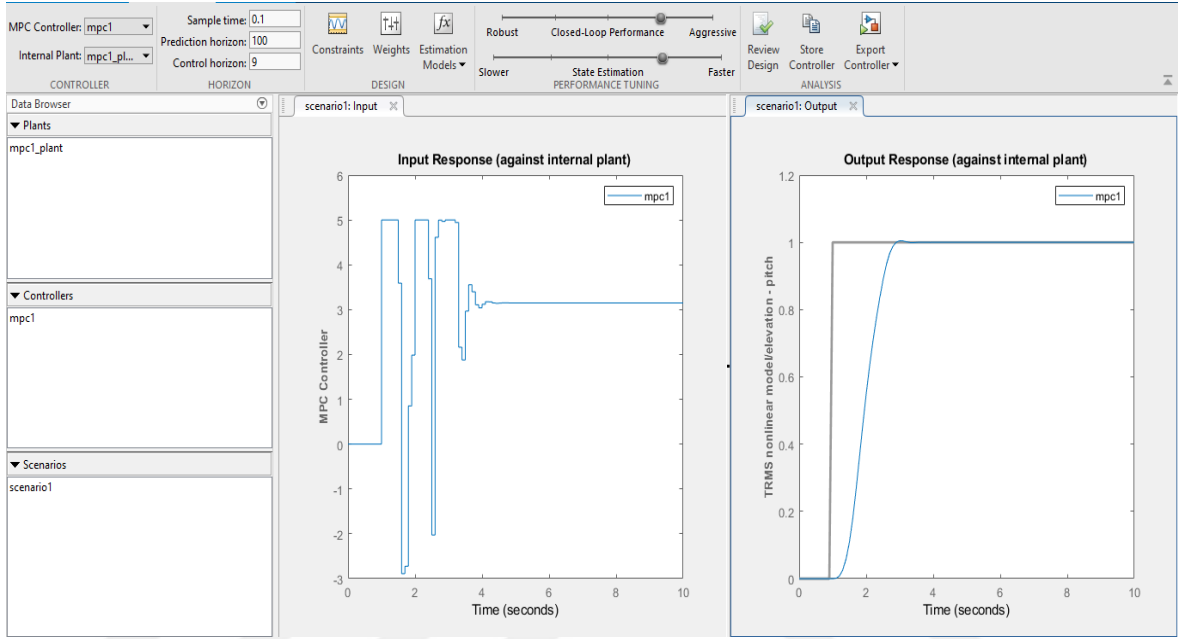
The image shows a software window titled "Weights (mpc1)". It contains three sections for configuring weights:

- Input Weights (dimensionless)**: A table with 5 columns: Channel, Type, Weight, Rate Weight, and Target. The first row shows Channel "u(1)", Type "MV", Weight "0", Rate Weight "0.01", and Target "nominal".
- Output Weights (dimensionless)**: A table with 3 columns: Channel, Type, and Weight. The first row shows Channel "y(1)", Type "MO", and Weight "3.15".
- ECR Weight (dimensionless)**: A text field labeled "Weight on the slack variable:" with the value "100000".

At the bottom right, there are four buttons: OK, Apply, Cancel, and Help.

Şekil 4. 28. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC denetleyici ağırlıkları

TRMS sistemine ait sistem cevabı MPC araç kutusundaki “Performance Tuning” bölümü kullanılarak Yavaş-Hızlı ve Gürbüz-Agresif ayarlamaları yapılır. Denetleyici parametrelerinden öngörü ufku, kontrol ufku burada seçilir ve örnekleme periyodu yine burada belirlenir.

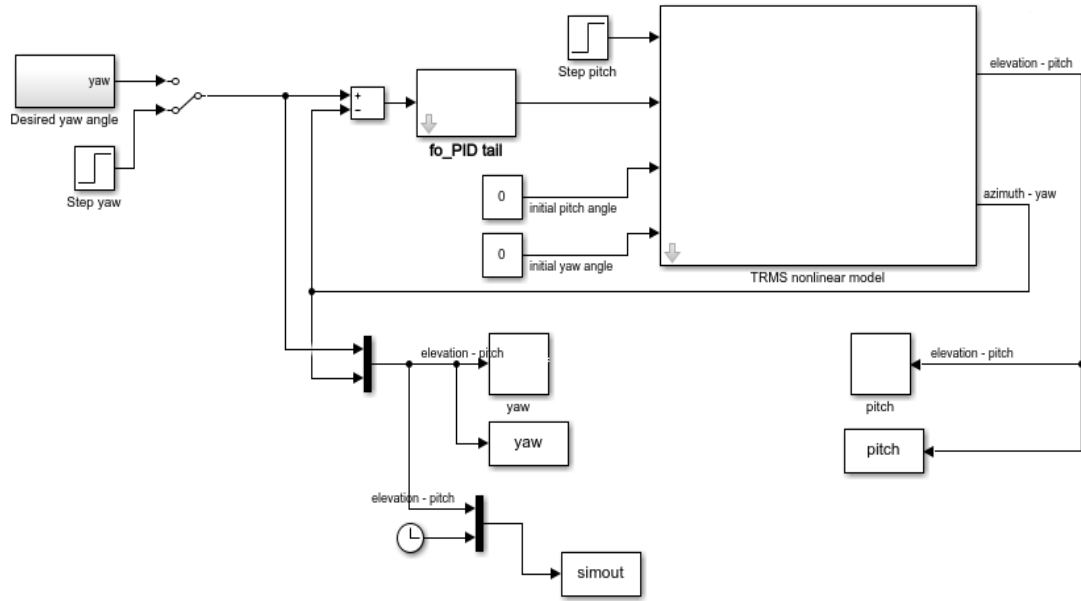


Şekil 4. 29. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC araç kutusunda performans ayarlaması

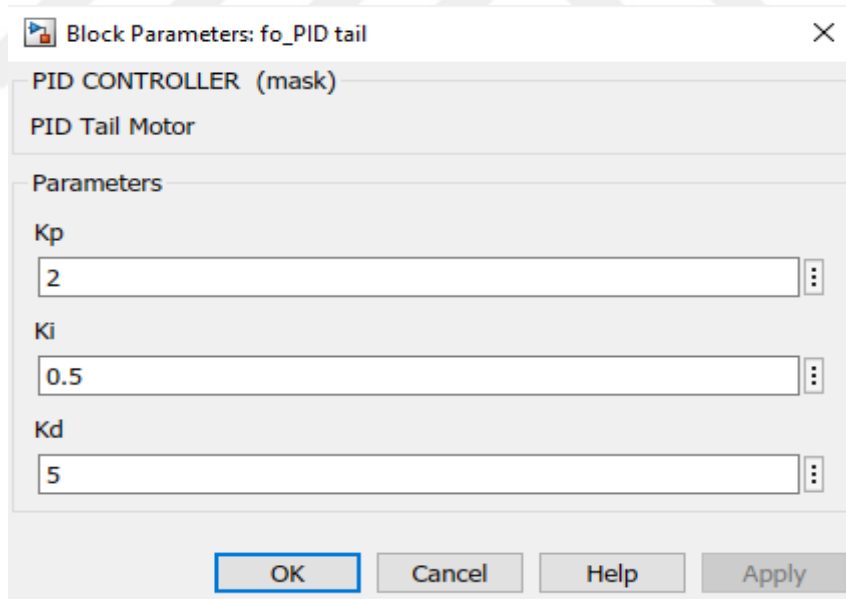
4.4.3. TRMS yatay seviye kontrolü

Bu kontrol denetiminde PID denetleyici ve MPC denetleyici ile TRMS sisteminin yatay seviye hareketi kontrol edilecektir. PID denetleyiciye ait K_p , K_d ve K_i değerleri üretici firma (Feedback Instruments) tarafından açıklanan katalog bilgilerinden alınmıştır. TRMS sisteminin düşey seviye kontrolü yani ana motorun çalıştığı senaryo için firmanın verdiği PID denetleyicisine ait denklem aşağıda verilmiştir.

$$C_y(s) = 2 + \frac{0.5}{s} + 5s \quad (4.22)$$

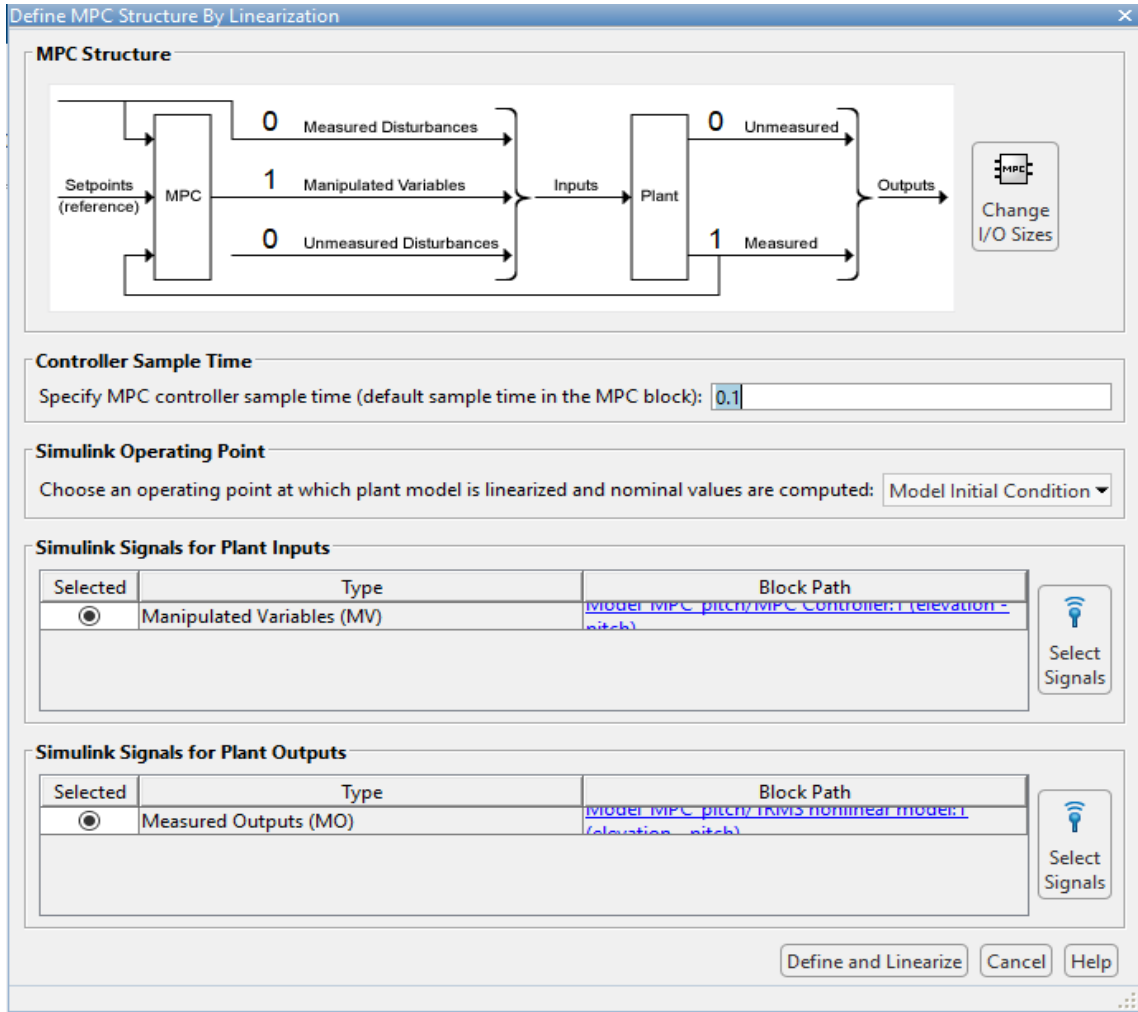


Şekil 4. 30. TRMS yatay seviye hareket kontrolünün PID denetleyicisi ile Simulink modeli (Feedback Instruments)



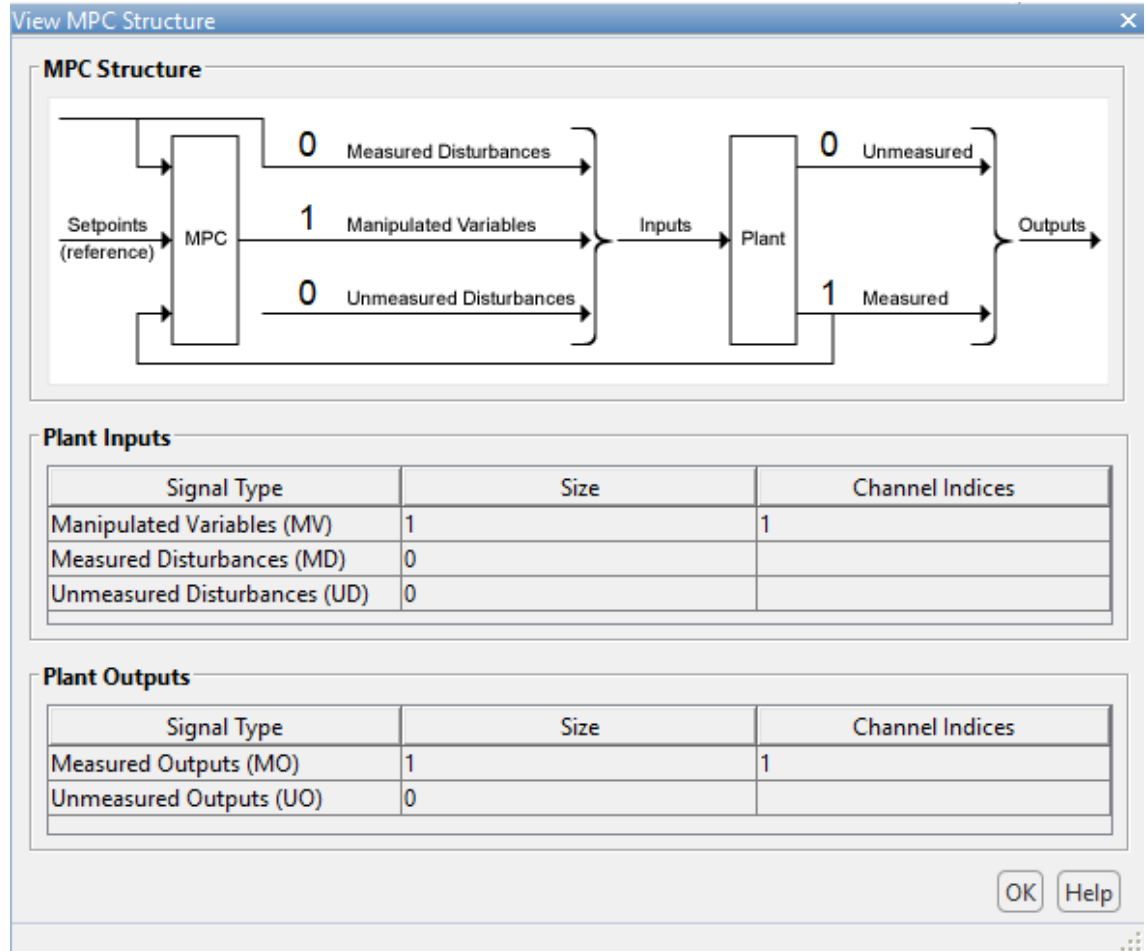
Şekil 4. 31. TRMS yatay seviye hareket sisteminin ana motor PID denetleyicisi parametreleri

Bir önceki sistemde olduğu gibi modeli sisteme tanıtmak ve lineerleştirme işlemi yapılmalıdır. Giriş çıkış değerleri ve örnekleme zamanı değerinin de ayarlandığı bu Simulink ortamında MPC araç kutusuna gidilerek aşağıdaki Şekil 4.33.'de gösterildiği gibi “define and linearize” butonuna basılarak lineerleştirilir.



Şekil 4. 33. TRMS yatay seviye hareket modelinin MPC’ye ait araç kutusuna tanımlanması ve lineerleştirilmesi

MPC araç kutusuna tanıtım yapıldıktan sonra, araç kutusu giriş ve çıkış sayısını kendisi belirler. Fakat bu yapılacak işleme göre kullanıcı tarafından da değiştirilebilir.



Şekil 4. 34. TRMS yatay seviye hareket sisteminin MPC yapısı

Input and Output Channel Specifications

Plant Inputs

Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
u(1)	MV	Yardımcı M...	Volt	0	1

Plant Outputs

Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
y(1)	MO	Yatay Açı Phi	rad	0	1

OK Apply Cancel Help

Şekil 4. 35. TRMS yatay seviye hareket sisteminin MPC giriş çıkış özellikleri

TRMS yatay seviye hareket sisteminin kısıtlarının MPC araç kutusunda tanıtılması Şekil 4. 36.'da verilmiştir.

Constraints (mpc1)

Input Constraints

Channel	Type	Min	Max	RateMin	RateMax
u(1)	MV	-2.5	2.5	-Inf	Inf

+ Constraint Softening Settings

Output Constraints

Channel	Type	Min	Max
y(1)	MO	-Inf	Inf

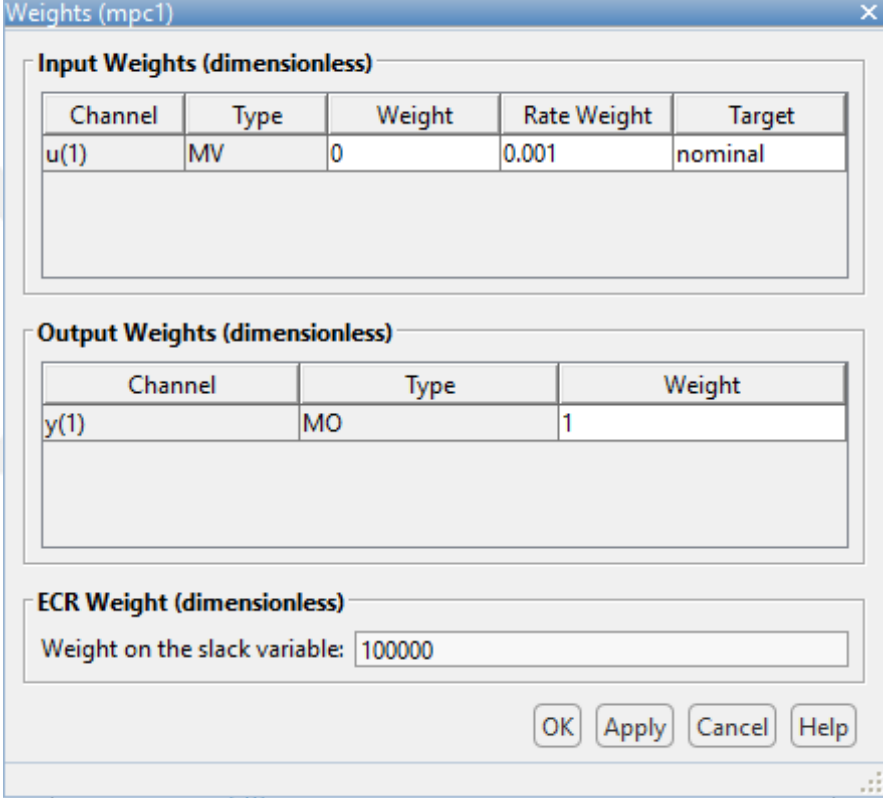
+ Constraint Softening Settings

OK Apply Cancel Help

Şekil 4. 36. TRMS yatay seviye hareket sisteminin MPC denetleyici kısıtları

TRMS'ye ait yatay seviye açılı cevabının ayarlanması için giriş ve çıkış ağırlıklarının ayarlanması gerekmektedir. Ağırlıklar ayarlanırken şu metotlar kullanılmıştır.

- Giriş gerilimine atanan ağırlık 0 seçilmiştir. Bu denetleyiciye bağımsız bir kontrol yeteneği kazandırmıştır. Çıkış değerini izin verilen aralıkta değiştirmesine olanak sağlamıştır.
- Çıkış ağırlığı değeri 1 seçilmiştir. Bu yatay seviye hareket açısına ait ağırlık değeridir.



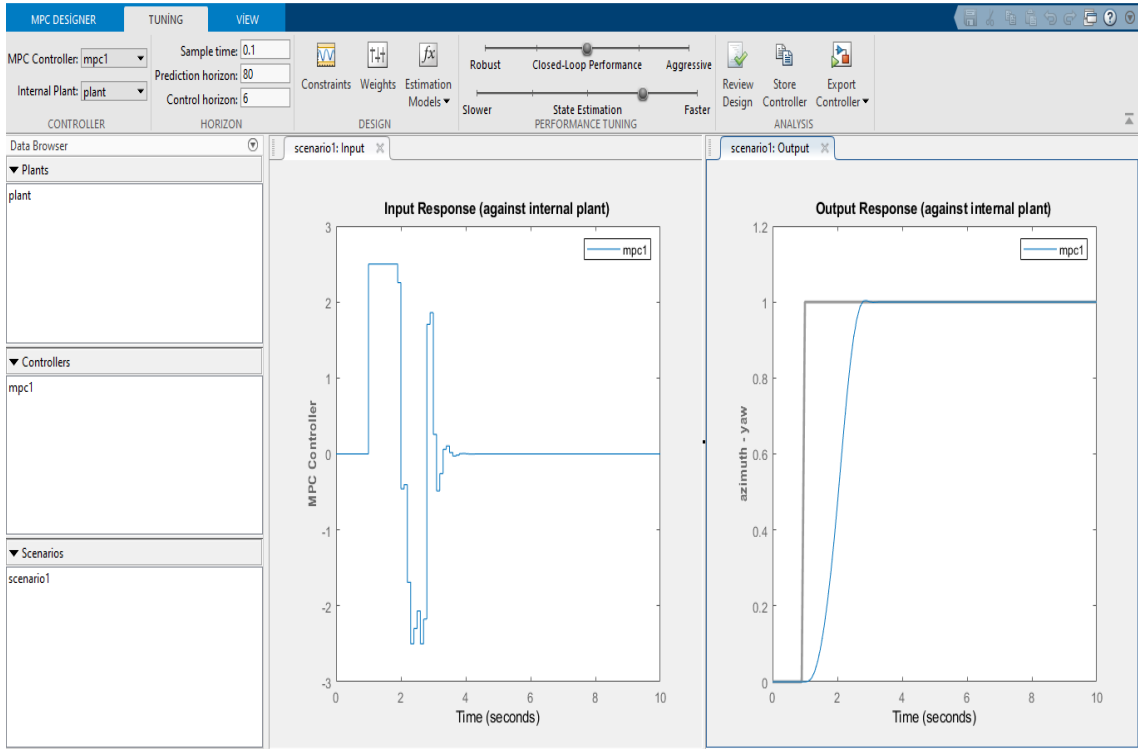
The dialog box titled "Weights (mpc1)" contains three sections for configuring weights:

- Input Weights (dimensionless)**: A table with 5 columns: Channel, Type, Weight, Rate Weight, and Target. The first row shows Channel "u(1)", Type "MV", Weight "0", Rate Weight "0.001", and Target "nominal".
- Output Weights (dimensionless)**: A table with 3 columns: Channel, Type, and Weight. The first row shows Channel "y(1)", Type "MO", and Weight "1".
- ECR Weight (dimensionless)**: A text field labeled "Weight on the slack variable:" with the value "100000".

At the bottom right, there are four buttons: OK, Apply, Cancel, and Help.

Şekil 4. 37. TRMS düşey seviye hareket sisteminin MPC denetleyici ağırlıkları

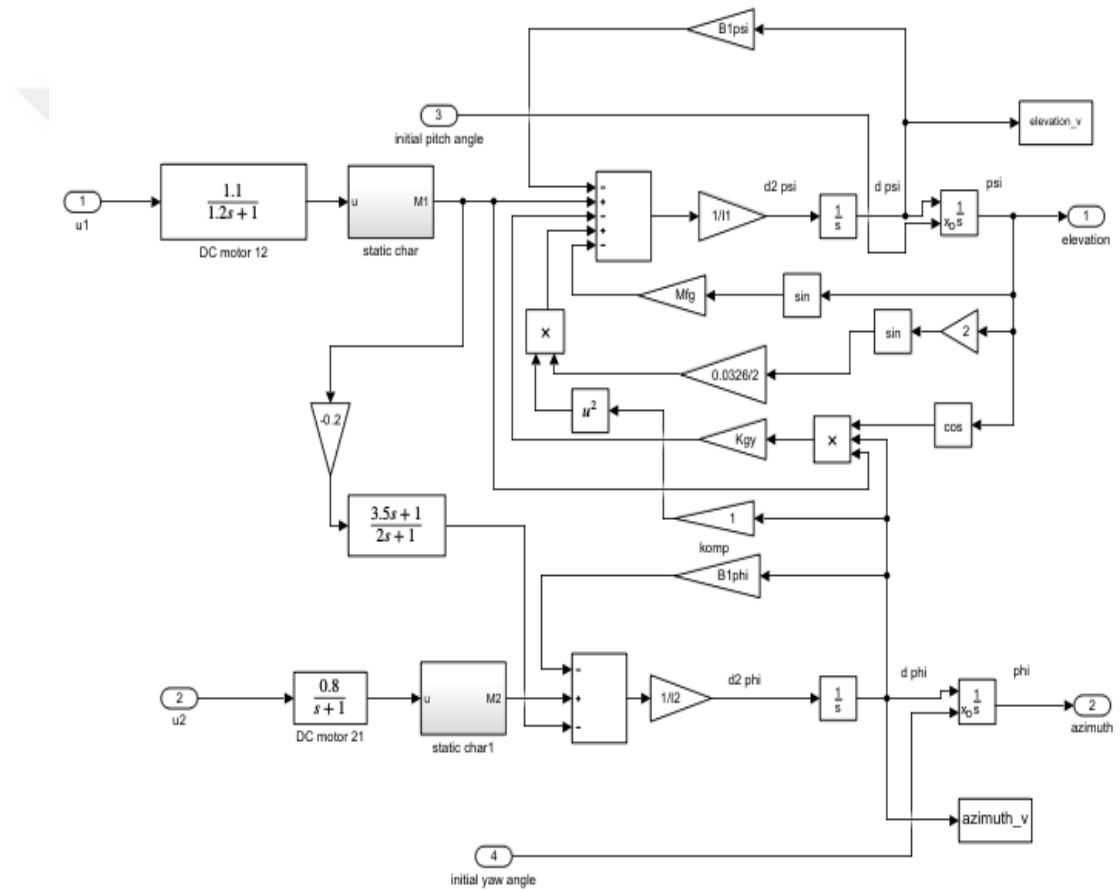
TRMS sistemine ait sistem cevabı MPC araç kutusundaki “Performance Tuning” bölümü kullanılarak Yavaş-Hızlı ve Gürbüz-Agresif ayarlamaları yapılır. Denetleyici parametrelerinden öngörü ufku, kontrol ufku burada seçilir ve örnekleme periyodu yine burada belirlenir.



Şekil 4. 38. TRMS yatay seviye hareket sisteminin MPC araç kutusunda performans ayarlaması

5. BULGULAR

Bu kısımda, önceden tasarlanan PID ve MPC denetleyicilerle denetlenmiş TRMS sistemi için farklı çalışma durumlarına göre uygulama sonuçları değerlendirilmiştir. TRMS sistemine ait olan ve daha önceki bölümde tasarımı anlatılan coupling sistem, düşey hareket sistemi ve yatay hareket sistemleri için MPC ve PID denetleyicilerin, farklı bozucu durumlarında ve parametre değişimlerindeki performanslarının sonuçları ele alınmıştır.



Şekil 5. 1. TRMS matematiksel modelinin MATLAB Simulink blok diyagram yapısı (Feedback Instruments)

5.1. TRMS Coupling Sistemi Denetimi Sonuçları

MATLAB Simulink ortamında sonuçları alınan TRMS coupling sisteminin firma tarafından önerilen PID denetleyici ve tasarlanan MPC denetleyicisi ile denetim performansları kıyaslanmıştır.

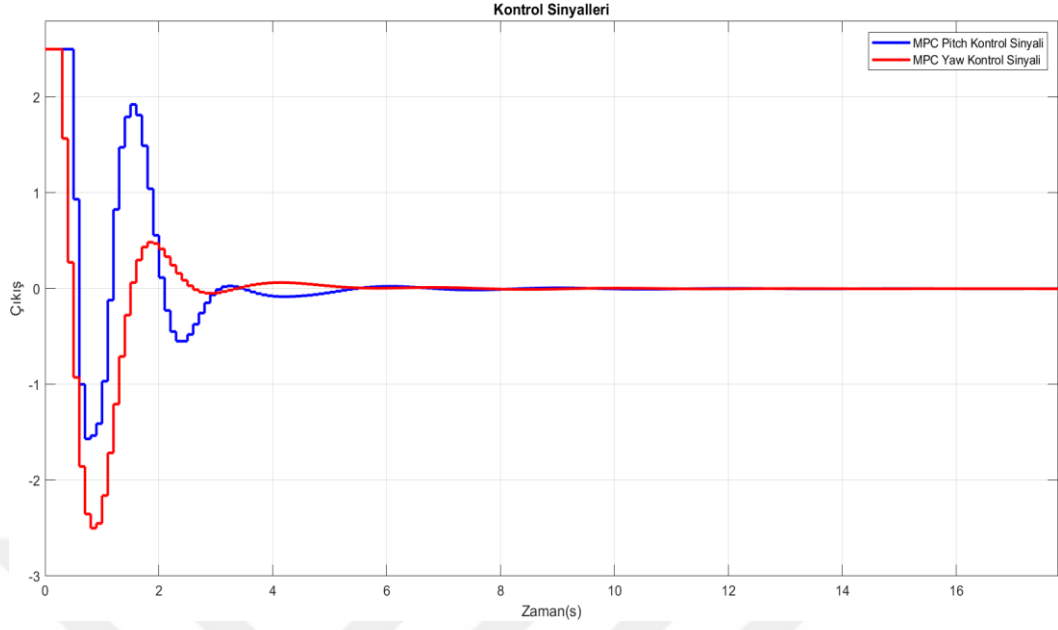
Çalışma 1:

Bu kısımda TRMS Coupling sisteminin herhangi bir bozucu olmadan PID ve MPC denetleyicileri performansları, düşey hareket açısı (ψ) ve yatay hareket açısı (ϕ) performansları bakımından gösterilmiştir. Aşağıdaki Çizelge 5.1.'de çalışmada kullanılan PID denetleyiciye ait K_p , K_i ve K_d değerleri üretici firma (Feedback Instruments) tarafından açıklanan katalog bilgilerinden alınmıştır.

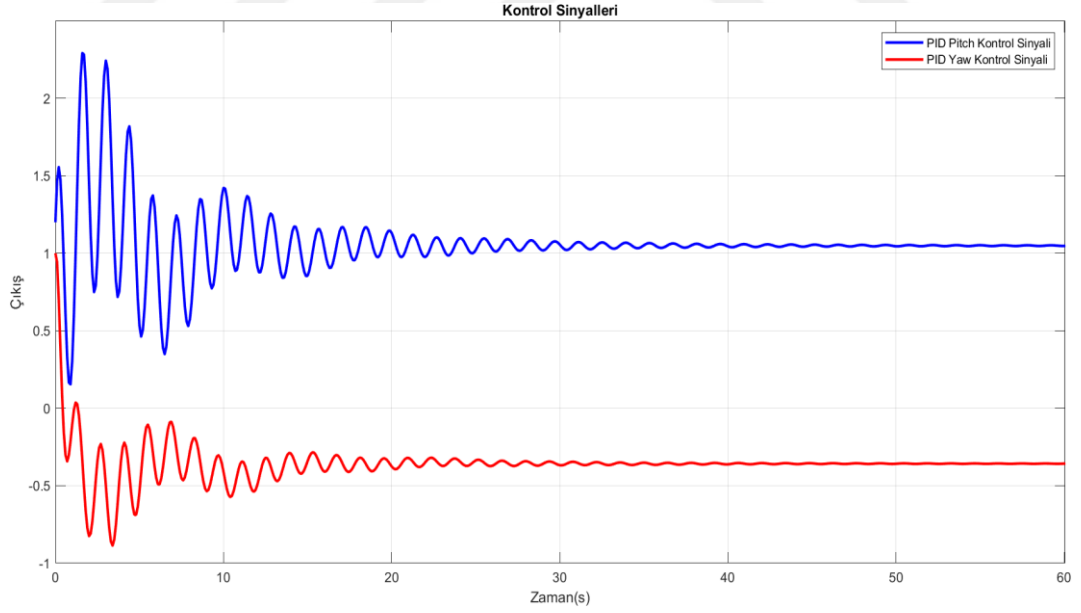
Çizelge 5. 1. TRMS coupling sisteminin PID denetleyici parametreleri

	K_p	K_i	K_d
Ana Motor PID	3	8	10
Yardımcı Motor PID	2	0.5	5

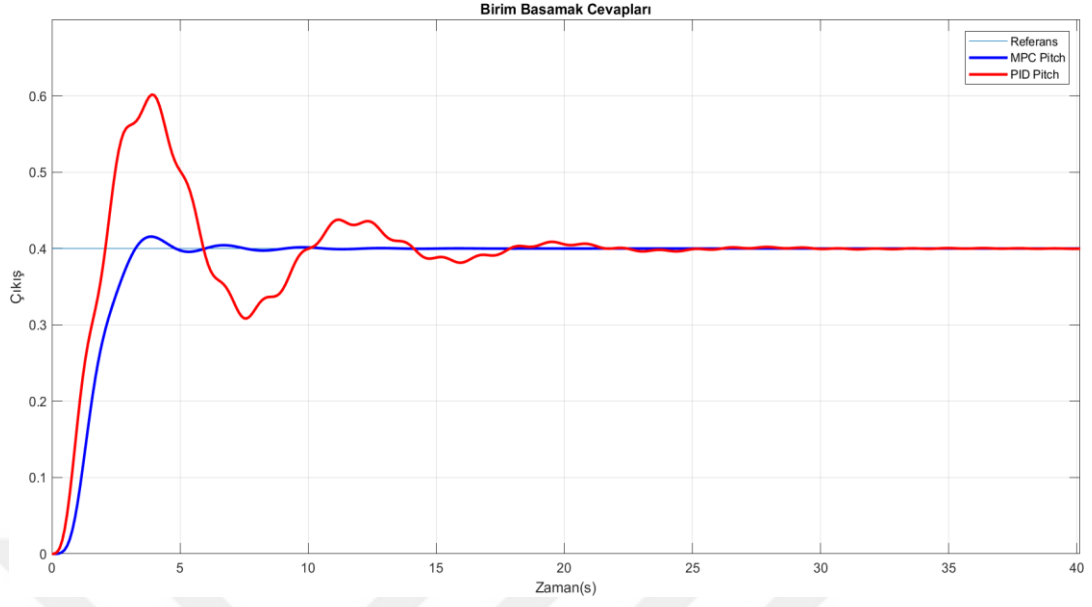
MPC'ye ait parametrelerin seçilmesi önceki kısımlarda belirtilmişti.



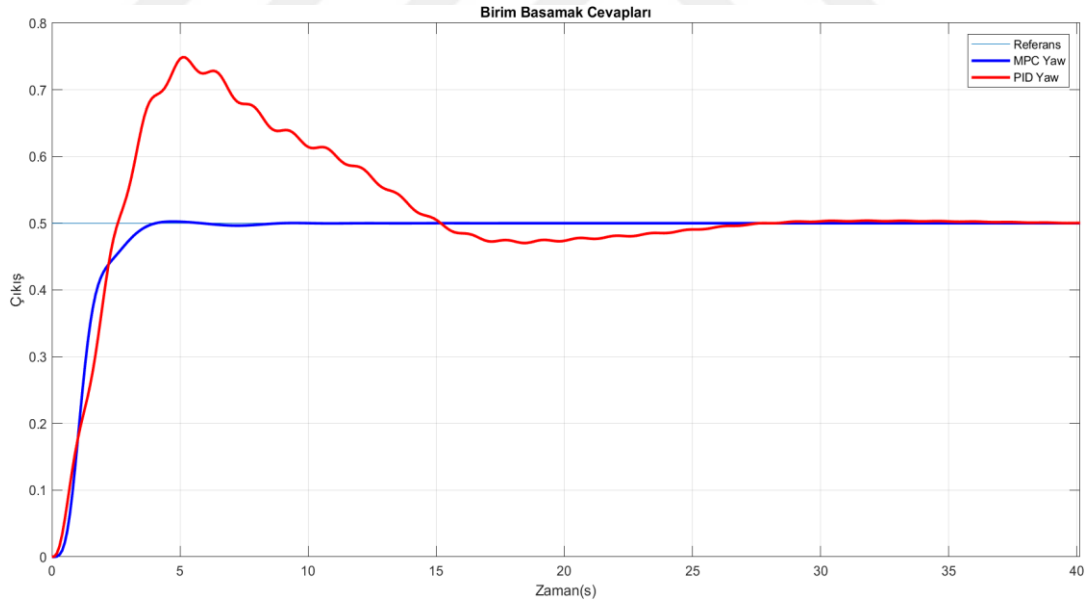
Şekil 5. 2. MPC ile kontrol edilen TRMS coupling sisteminin kontrol sinyalleri



Şekil 5. 3. PID ile kontrol edilen TRMS coupling sisteminin kontrol sinyalleri



Şekil 5. 4. MPC ve PID ile kontrol edilen TRMS coupling sisteminin düşey seviye birim basamak cevapları

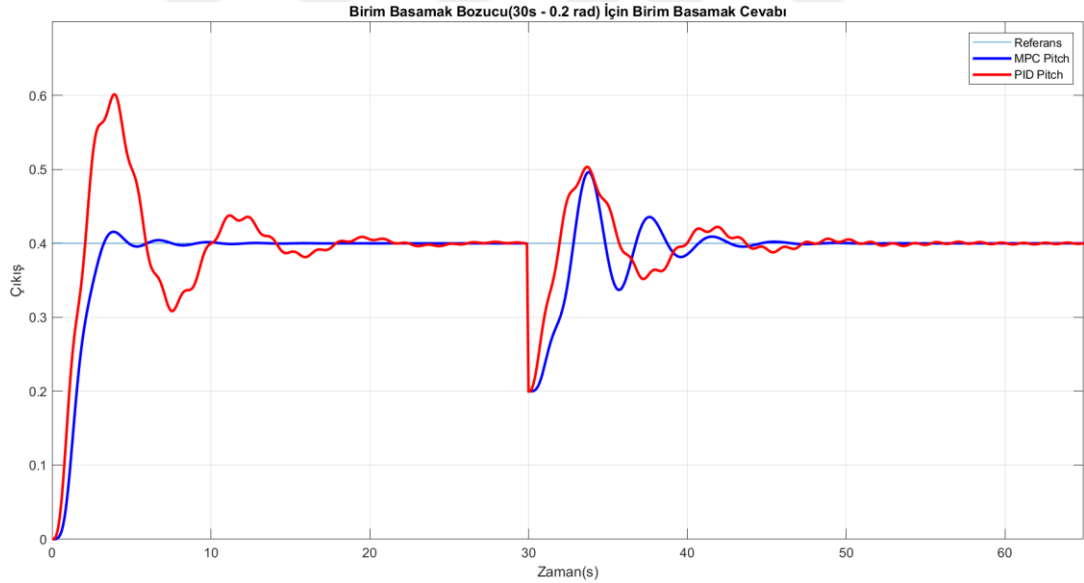


Şekil 5. 5. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin yatay seviye cevapları

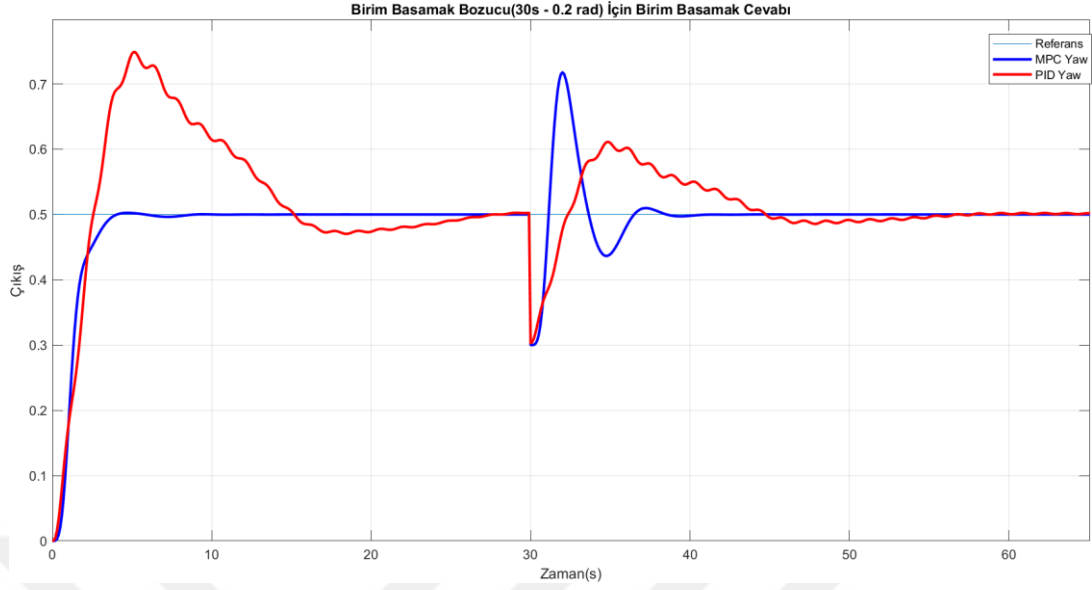
Çalışma 1’de TRMS Coupling sistemin herhangi bir bozucuya maruz kalmadan firma tarafından önerilen PID denetleyicisi ile tasarlanan MPC denetleyicisinin, ana motor (pitch) ve yardımcı motor (yaw) kontrollerindeki performansları gösterilmiştir. Düşey seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin çok daha az aşım ve çok daha kısa sürede referans değerine ulaşarak kararlı bir çalışma sergilediği Şekil 5.4.’de açıkça gösterilmiştir. Yatay seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında ise MPC denetleyicinin PID denetleyiciye göre neredeyse hiç aşım yapmadan referans değerine ulaştığı ve kararlı bir şekilde çalışmaya devam ettiği Şekil 5.5.’de gösterilmiştir.

Çalışma 2:

Bu kısımda TRMS Coupling sisteminin 30 s. periyot ve 0.2 genlikli birim basamak bozucu uygulandığında PID ve MPC denetleyicileri performansları, düşey hareket açısı (psi) ve yatay hareket açısı (phi) performansları bakımından gösterilmiştir.



Şekil 5. 6. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin birim basamak bozucu etkisinde düşey seviye cevapları

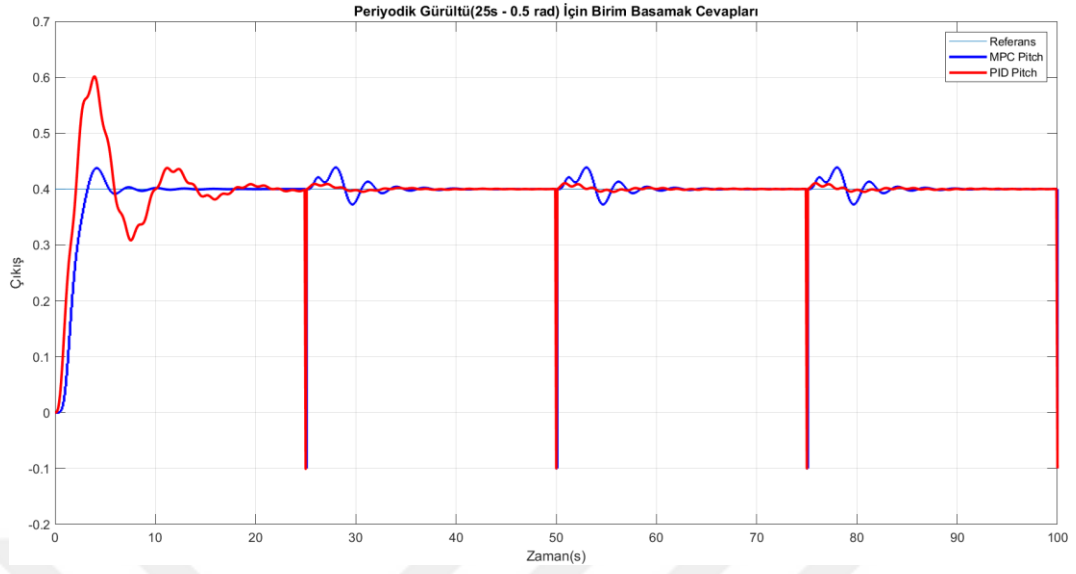


Şekil 5. 7. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin birim basamak bozucu etkisinde yatay seviye cevapları

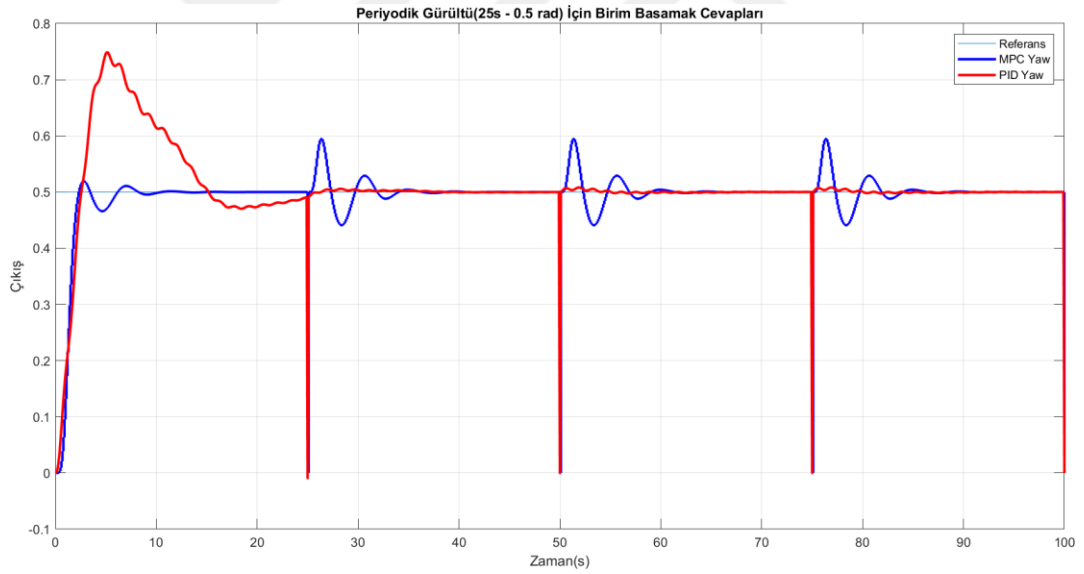
Çalışma 2’de TRMS Coupling sistemin 30s. Periyot ve 0.2 genliğe sahip birim basamak bozucuya karşı firma tarafından önerilen PID denetleyicisi ile tasarlanan MPC denetleyicisinin, ana motor (pitch) ve yardımcı motor (yaw) kontrollerindeki performansları gösterilmiştir. Düşey seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin bozucu sonrası PID denetleyiciye göre aynı aşım oranı ile ancak daha az salınımla referans değerine ulaşp kararlı bir çalışma sergilediği Şekil 5.6.’te açıkça gösterilmiştir. Yatay seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin bozucu sonrası PID denetleyiciye göre daha fazla aşım gittiğinin ancak oturma zamanının 10s’den daha kısa bir süre ile tamamlayarak referans değerine ulaşp kararlı bir çalışma sergilediği Şekil 5. 7.’da açıkça gösterilmiştir.

Çalışma 3:

Bu kısımda TRMS Coupling sisteminin 25 s. periyot ve 0.5 genlikli periyodik bozucu uygulandığında PID ve MPC denetleyicileri performansları, düşey hareket açısı (psi) ve yatay hareket açısı (phi) performansları bakımından gösterilmiştir.



Şekil 5. 8. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin periyodik bozucu etkisinde düşey seviye cevapları

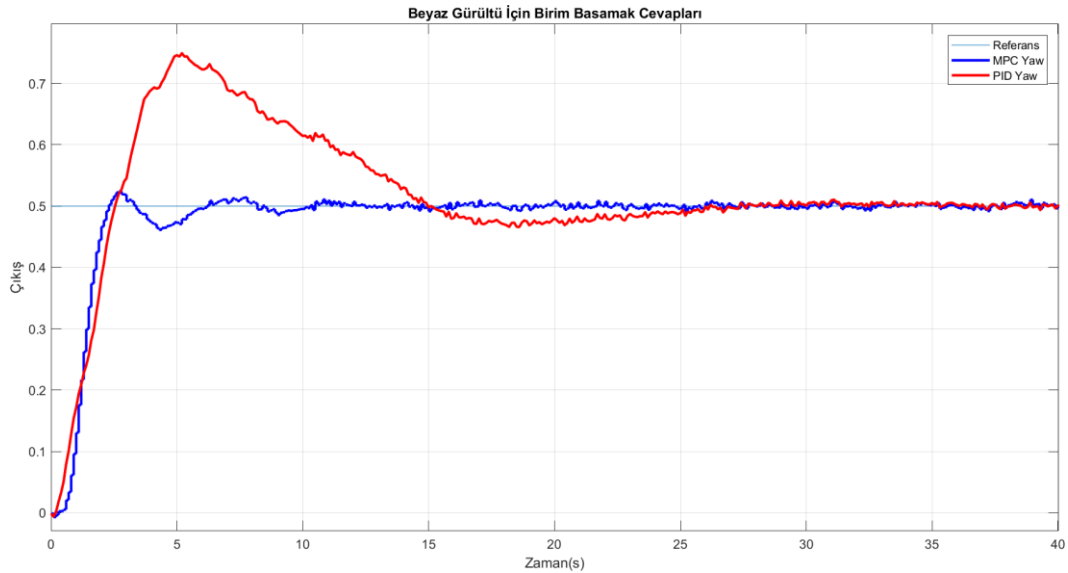


Şekil 5. 9. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin periyodik bozucu etkisinde yatay seviye cevapları

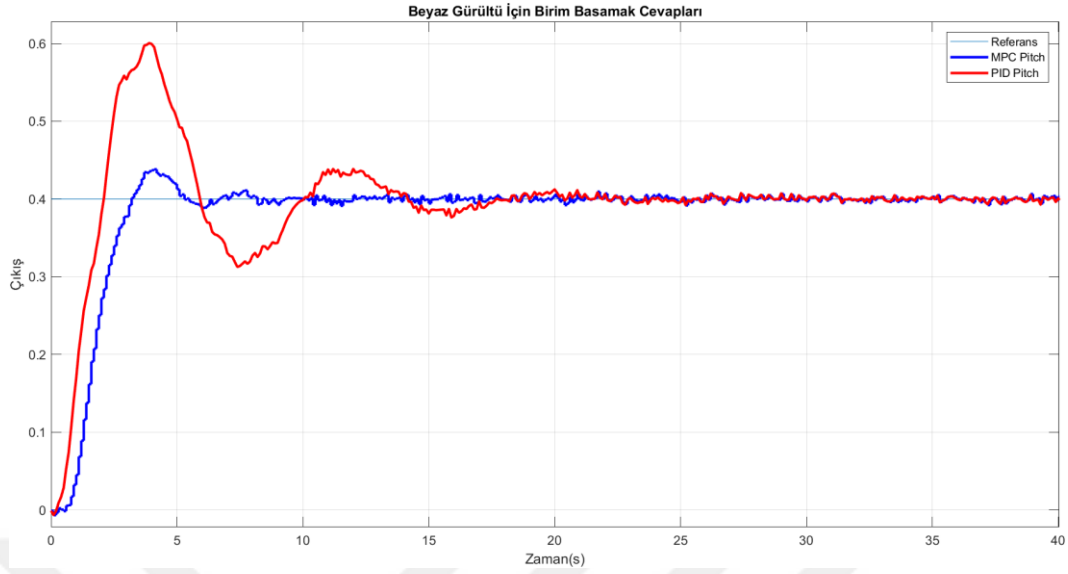
Çalışma 3'te TRMS Coupling sistemin 25s. Periyot ve 0.5 genliğe sahip periyodik bozucuya karşı firma tarafından önerilen PID denetleyicisi ile tasarlanan MPC denetleyicisinin, ana motor (pitch) ve yardımcı motor (yaw) kontrollerindeki performansları gösterilmiştir. Düşey seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin bozucu sonrası PID denetleyiciye göre daha fazla aşım ve daha fazla salınım gösterip daha geç oturma zamanına sahip olarak referans değerine ulaşip kararlı bir çalışma sergilediği Şekil 5.8.'de açıkça gösterilmiştir. Yatay seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin bozucu sonrası PID denetleyiciye göre daha fazla aşım ve daha fazla salınım gösterip daha geç oturma zamanına sahip olarak referans değerine ulaşip kararlı bir çalışma sergilediği Şekil 5.9.'da açıkça gösterilmiştir.

Çalışma 4:

Bu kısımda TRMS Coupling sisteminin beyaz gürültü (White noise) uygulandığında PID ve MPC denetleyicileri performansları, düşey hareket açısı (psi) ve yatay hareket açısı (phi) performansları bakımından gösterilmiştir.



Şekil 5. 10. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin beyaz gürültü etkisinde düşey seviye cevapları

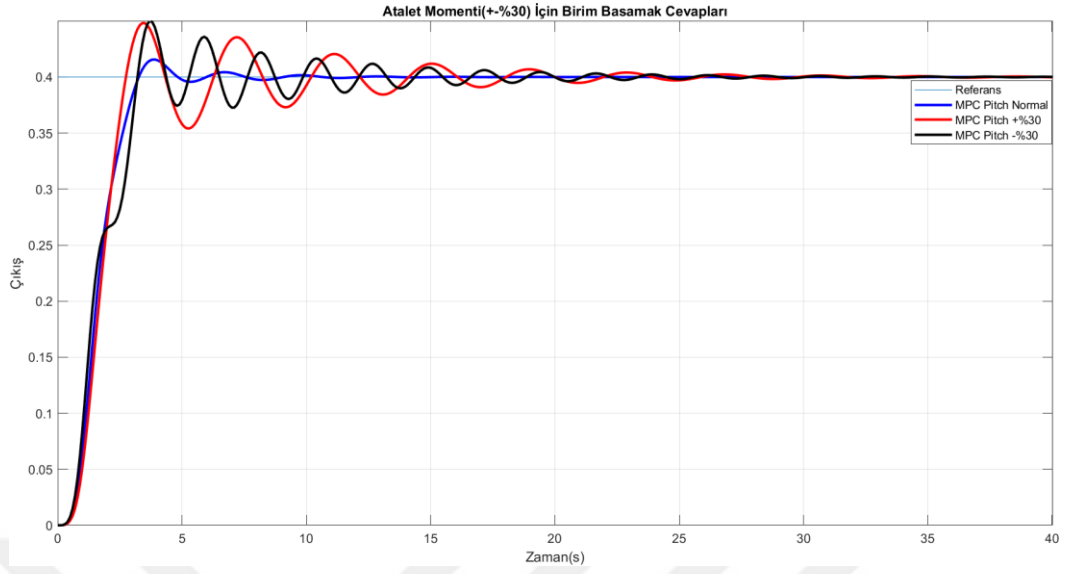


Şekil 5. 11. MPC ve PID için TRMS coupling sisteminin beyaz gürültü etkisinde yatay seviye cevapları

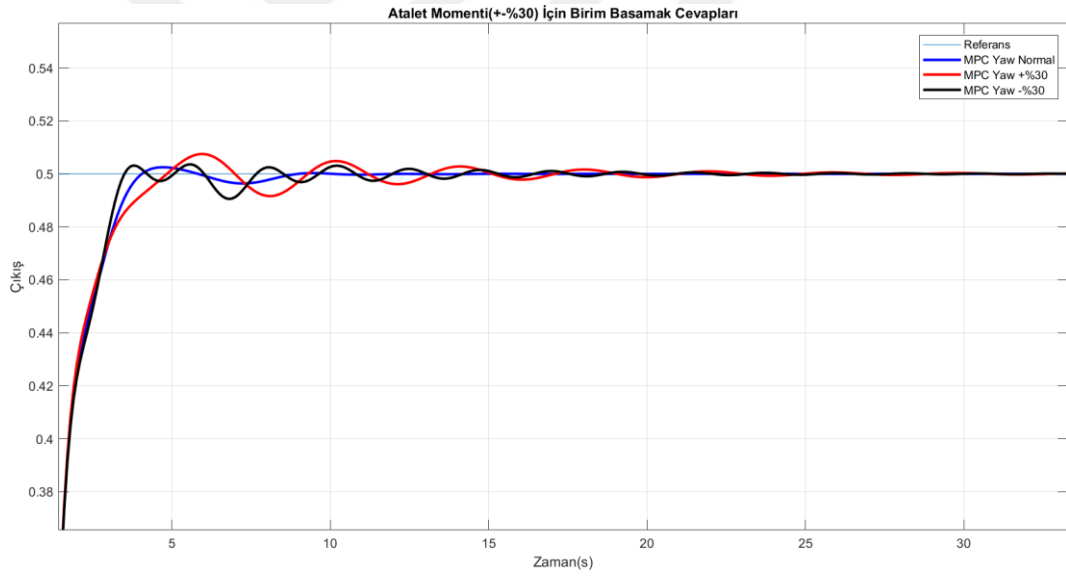
Çalışma 4’te TRMS Coupling sistemin beyaz gürültüye karşı firma tarafından önerilen PID denetleyicisi ile tasarlanan MPC denetleyicisinin, ana motor (pitch) ve yardımcı motor (yaw) kontrollerindeki performansları gösterilmiştir. Düşey seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin bozucu sonrası PID denetleyiciye göre aynı oranda titreşim sergilediği ancak çok daha az aşım ve salınım ile referans değerine ulaşır kararlı bir çalışma sergilediği Şekil 5.10.’da açıkça gösterilmiştir. Yatay seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin bozucu sonrası PID denetleyiciye göre aynı oranda titreşim sergilediği ancak çok daha az aşım ve salınım ile referans değerine ulaşır kararlı bir çalışma sergilediği Şekil 5.11.’de açıkça gösterilmiştir.

Çalışma 5:

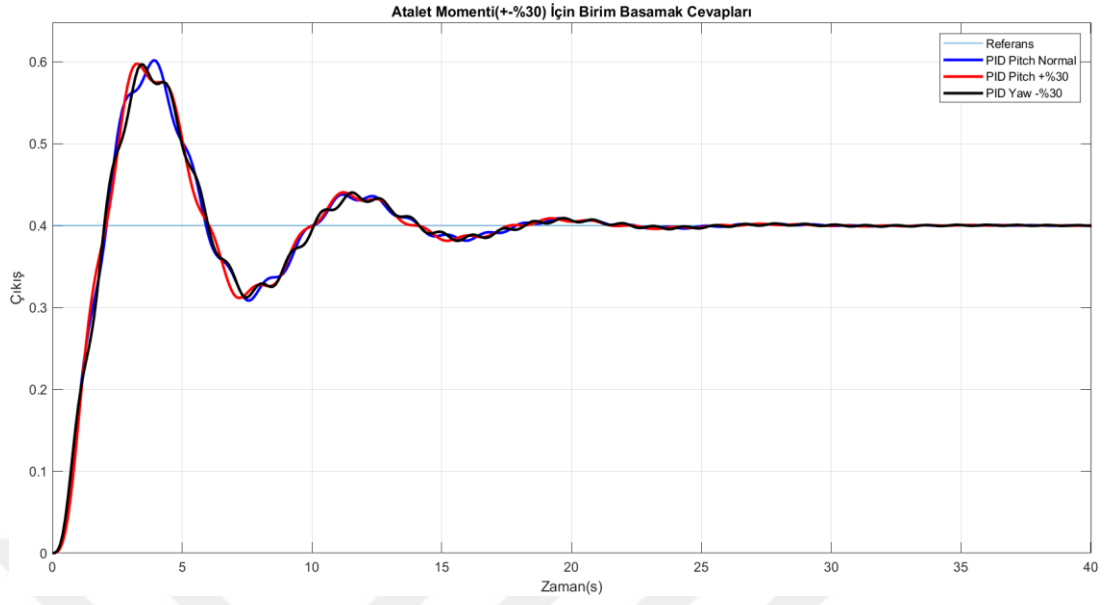
Bu kısımda TRMS Coupling sisteminin parametrelerinden atalet momenti ve sürtünme torku değerlerinin %30 artış ve azalışları durumunda PID ve MPC denetleyicileri performansları, düşey hareket açısı (psi) ve yatay hareket açısı (phi) performansları bakımından gösterilmiştir.



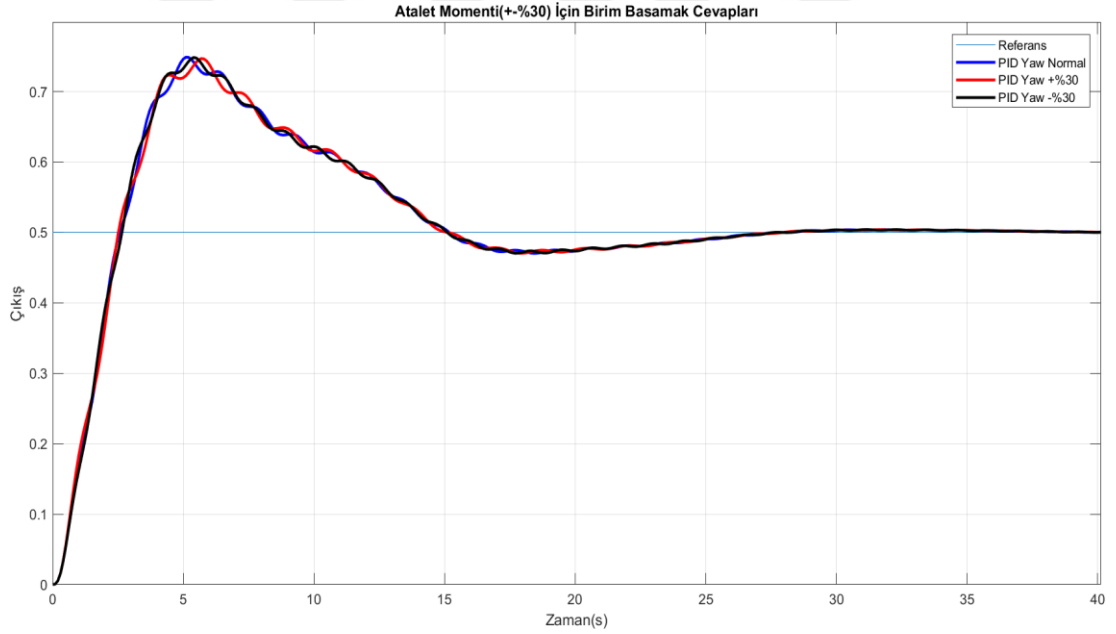
Şekil 5. 12. MPC için TRMS coupling sisteminin atalet momenti değişimine bağlı düşey seviye cevapları



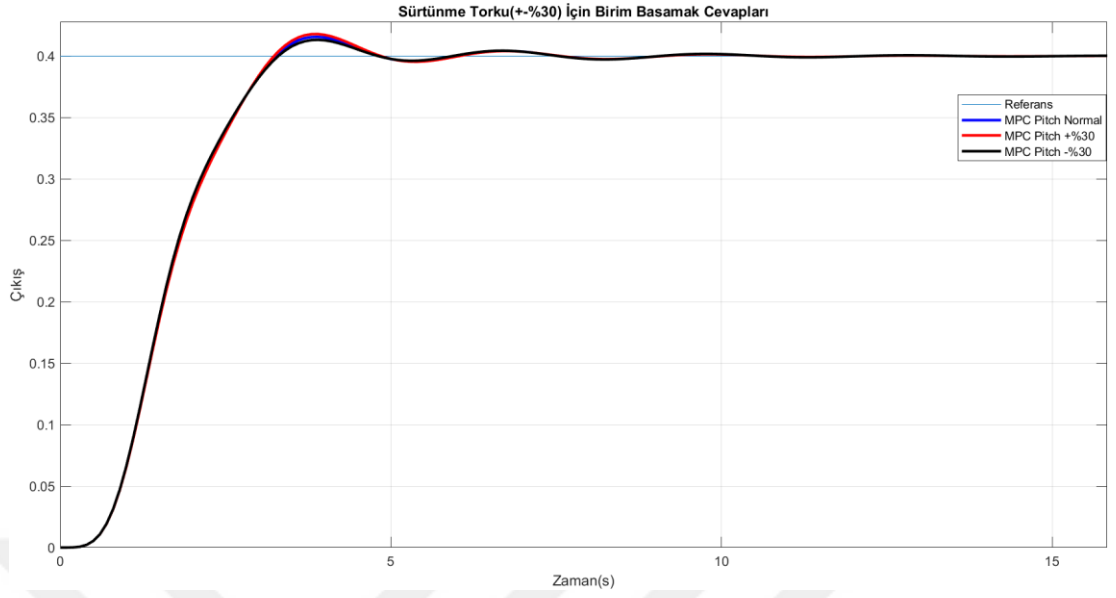
Şekil 5. 13. MPC için TRMS coupling sisteminin atalet momenti değişimine bağlı yatay seviye cevapları



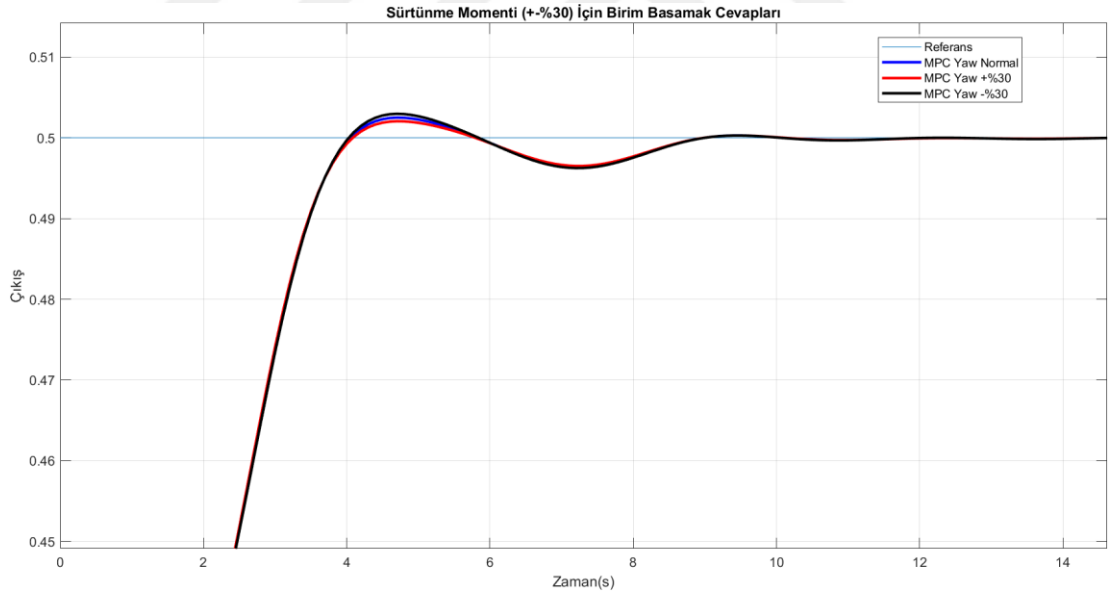
Şekil 5. 14. PID için TRMS coupling sisteminin atalet momenti değişimine bağlı düşey seviye cevapları



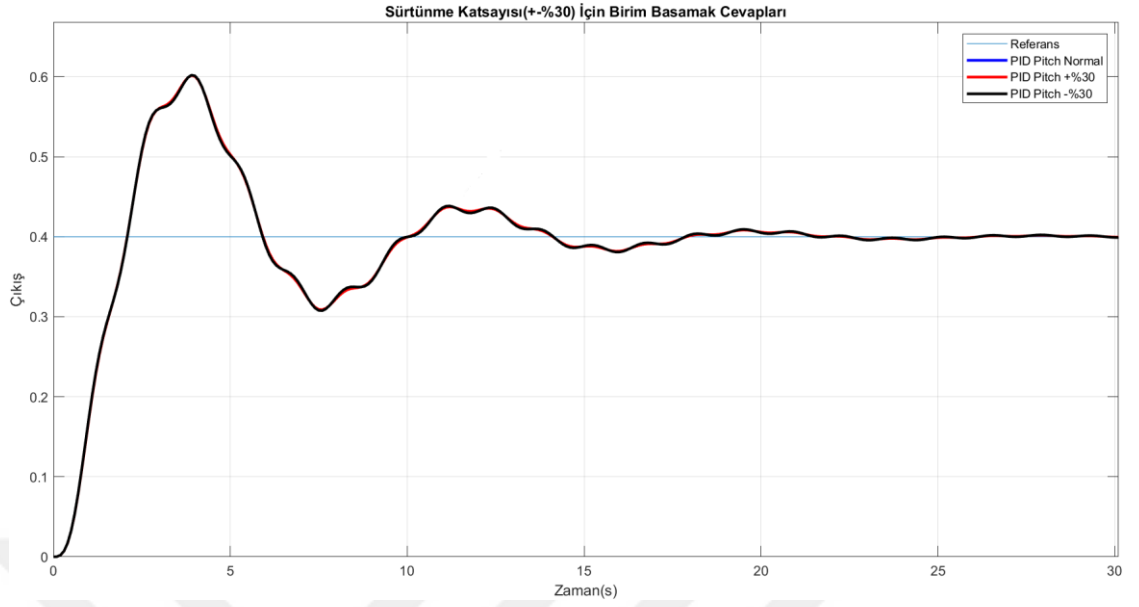
Şekil 5. 15. PID için TRMS coupling sisteminin atalet momenti değişimine bağlı yatay seviye cevapları



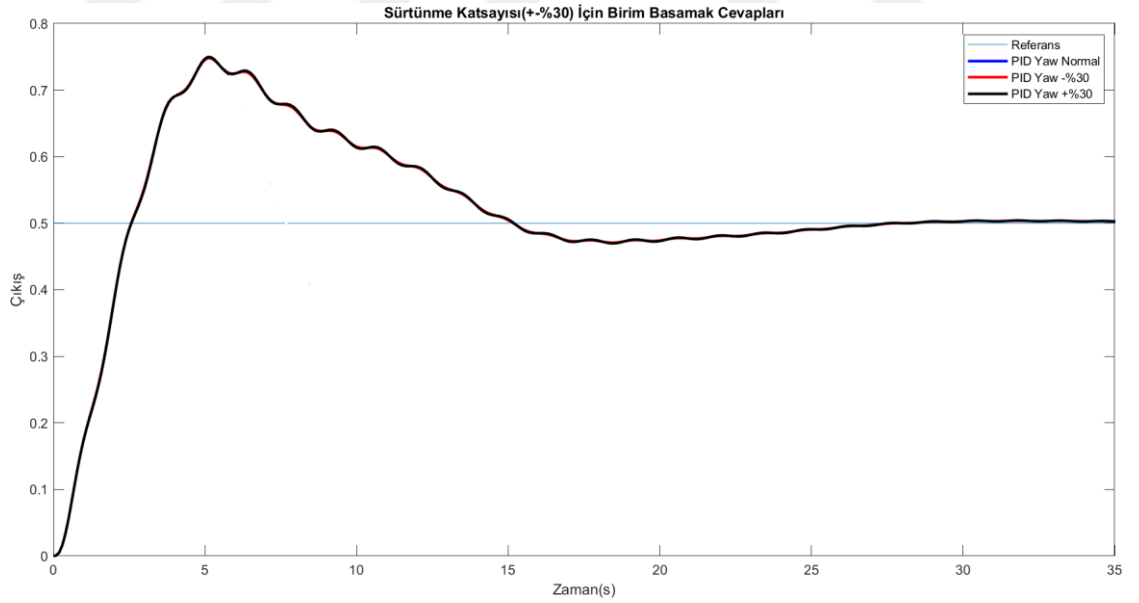
Şekil 5. 16. MPC için TRMS coupling sisteminin sürtünme torku değişimine bağlı düşey seviye cevapları



Şekil 5. 17. MPC için TRMS coupling sisteminin sürtünme torku değişimine bağlı yatay seviye cevapları



Şekil 5. 18. PID için TRMS coupling sisteminin sürtünme torku değişimine bağlı düşey seviye cevapları



Şekil 5. 19. PID için TRMS coupling sisteminin sürtünme torku değişimine bağlı yatay seviye cevapları

Çalışma 5'te TRMS Coupling sisteminin fiziksel parametrelerinden atalet momenti değerinin %30 artırılarak ve %30 azaltılarak normal duruma kıyasla MPC ve PID denetleyicilerdeki ana motor (pitch) ve yardımcı motor (yaw) kontrollerindeki performansları gösterilmiştir. Düşey seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin atalet momenti değeri değişimi sonrası PID denetleyiciye göre daha fazla salınım göstererek hassasiyetinin olduğu ancak yakın sürelerde kararlılığa ulaştığı Şekil 5.12. ve Şekil 5.14.'de gösterilmiştir. Benzer performans yatay seviye kontrol için Şekil 5.13. ve Şekil 5.15.'de gösterilmiştir.

TRMS Coupling sisteminin fiziksel parametrelerinden sürtünme torku değerinin %30 artırılarak ve %30 azaltılarak normal duruma kıyasla MPC ve PID denetleyicilerdeki ana motor (pitch) ve yardımcı motor (yaw) kontrollerindeki performansları gösterilmiştir. Düşey seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin sürtünme torku değeri değişimi sonrası PID denetleyiciye göre aynı hassasiyeti gösterdiğini ancak performans olarak çok daha kısa sürede referans değerine oturup kararlılığa ulaştığı Şekil 5.16. ve Şekil 5.18.'de gösterilmiştir. Benzer performans yatay seviye kontrol için Şekil 5.17. ve Şekil 5.19.'de gösterilmiştir.

5.2. TRMS Düşey Hareket Sistemi Denetimi Sonuçları

MATLAB Simulink ortamında sonuçları alınan TRMS düşey hareket sisteminin firma tarafından önerilen PID denetleyici ve tasarlanan MPC denetleyicisi ile denetim performansları kıyaslanmıştır.

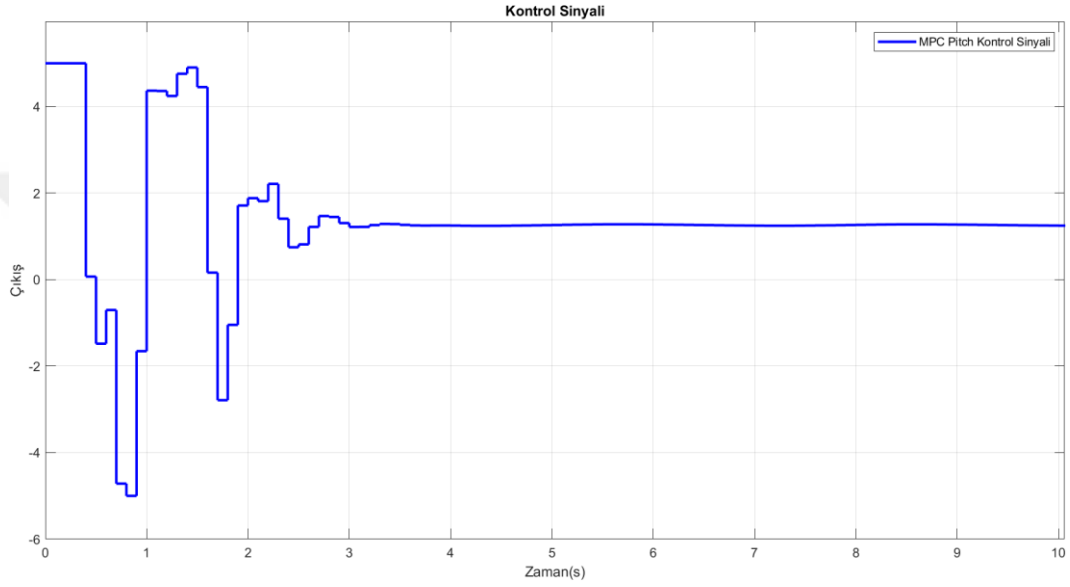
Çalışma 6:

Bu kısımda TRMS düşey hareket sisteminin PID ve MPC denetleyicileri performansları, düşey hareket açısı (ψ) ve yatay hareket açısı (ϕ) performansları bakımından gösterilmiştir. Aşağıdaki Çizelge 5.2.'de çalışmada kullanılan PID denetleyiciye ait K_p , K_i ve K_d değerleri üretici firma (Feedback Instruments) tarafından açıklanan katalog bilgilerinden alınmıştır.

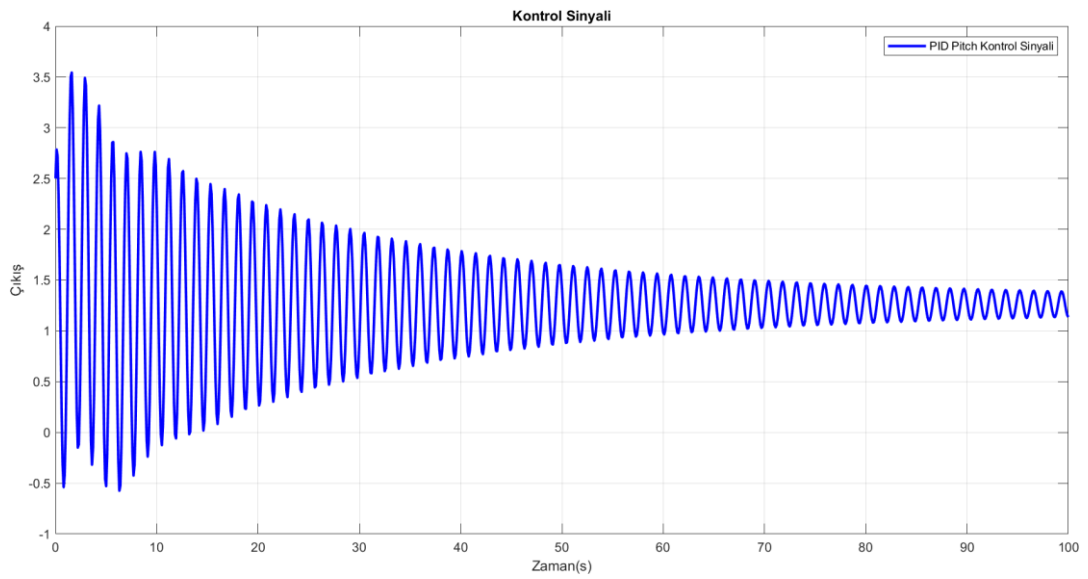
Çizelge 5. 2. TRMS düşey hareket sisteminin PID denetleyici parametreleri

	K_p	K_i	K_d
Ana Motor PID	5	8	10

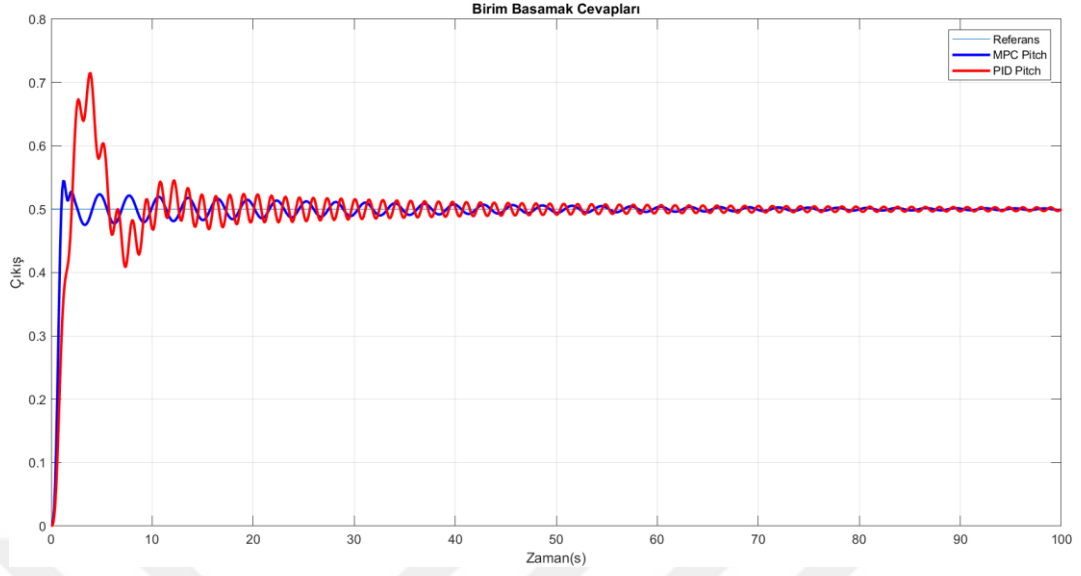
MPC'ye ait parametrelerin seçilmesi önceki kısımlarda belirtilmişti.



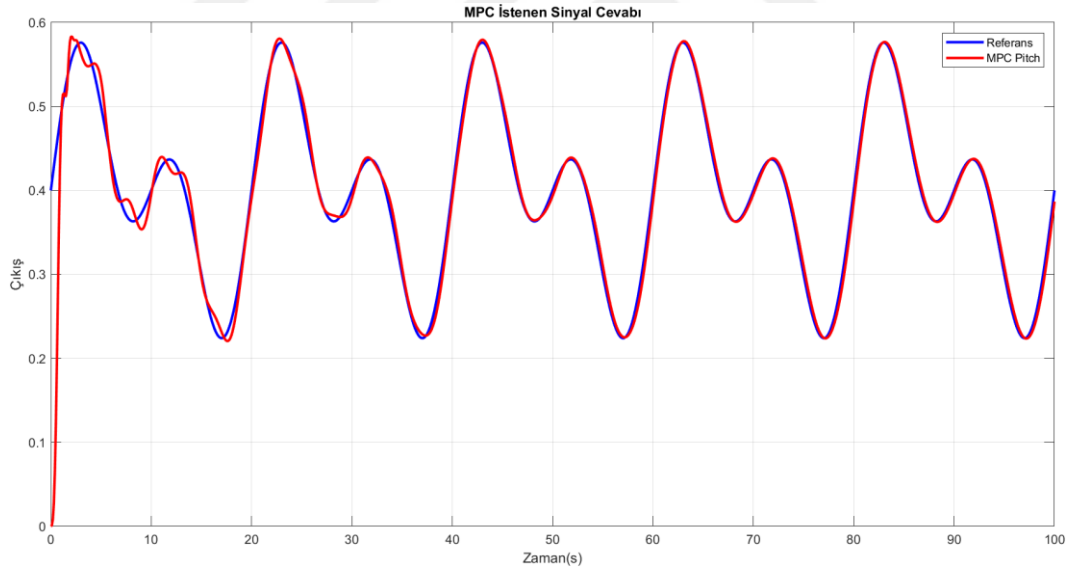
Şekil 5. 20. MPC için TRMS düşey hareket sisteminin kontrol sinyali



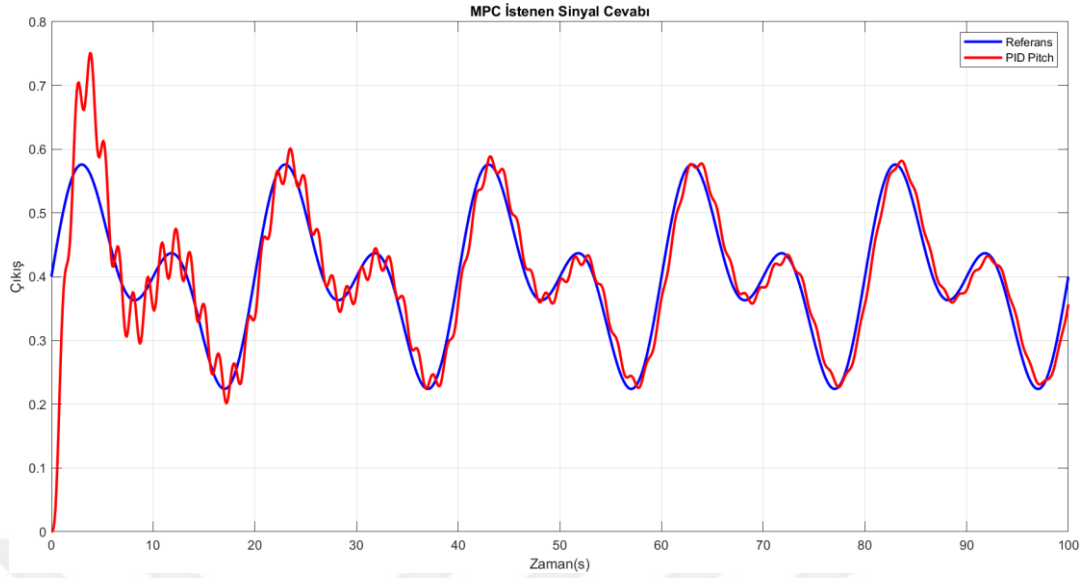
Şekil 5. 21. PID için TRMS düşey hareket sisteminin kontrol sinyali



Şekil 5. 22. MPC ve PID için TRMS düşey seviye hareket sisteminin cevapları



Şekil 5. 23. MPC için TRMS düşey seviye hareket sisteminin karışık periyodik sinyal cevapları



Şekil 5. 24. PID için TRMS düşey seviye hareket sisteminin karışık periyodik sinyal cevapları

Çalışma 6'da TRMS düşey seviye hareket sisteminin herhangi bir bozucuya maruz kalmadan firma tarafından önerilen PID denetleyicisi ile tasarlanan MPC denetleyicisinin, ana motor (pitch) kontrollerindeki performansları gösterilmiştir. Düşey seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin PID denetleyiciye göre daha az aşım ve daha az salınımla daha kısa sürede referans değerine ulaşmaya çalışan bir performans sergilediği Şekil 5.22.'de açıkça gösterilmiştir. Düşey seviye kontrol için karışık periyodik sinyal cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin PID denetleyiciye göre daha az aşım ve daha az salınımla daha kısa sürede referans değerine ulaşmaya çalışan bir performans sergilediği Şekil 5.23. ve Şekil 5.24.'de açıkça gösterilmiştir.

5.3. TRMS Yatay Hareket Sistemi Denetimi Sonuçları

MATLAB Simulink ortamında sonuçları alınan TRMS yatay hareket sisteminin firma tarafından önerilen PID denetleyici ve tasarlanan MPC denetleyicisi ile denetim performansları kıyaslanmıştır.

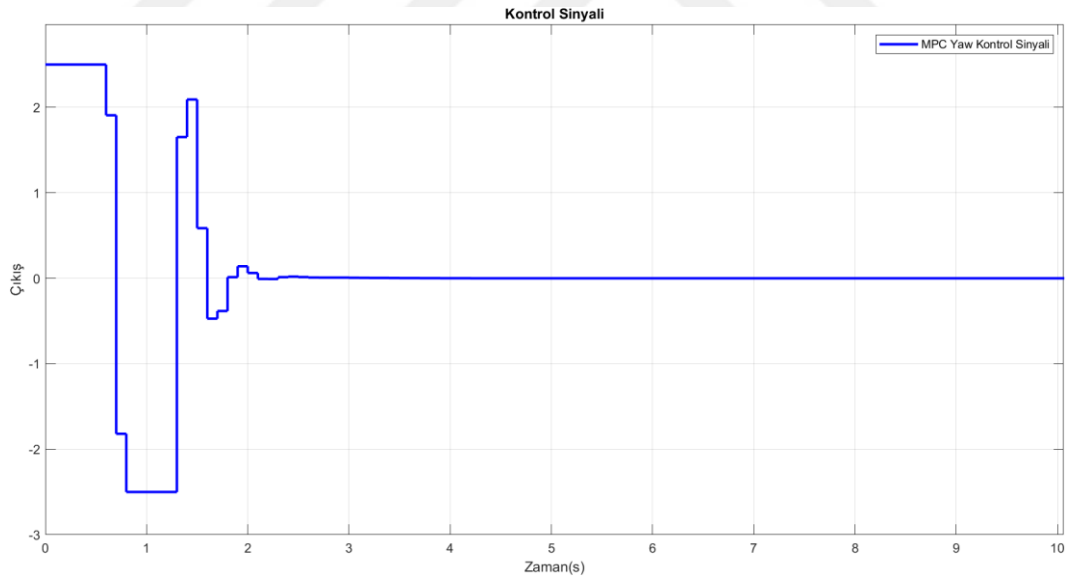
Çalışma 7:

Bu kısımda TRMS düşey hareket sisteminin PID ve MPC denetleyicileri performansları, düşey hareket açısı (psi) ve yatay hareket açısı (phi) performansları bakımından gösterilmiştir. Aşağıdaki Çizelge 5.3.'de çalışmada kullanılan PID denetleyiciye ait K_p , K_i ve K_d değerleri üretici firma (Feedback Instruments) tarafından açıklanan katalog bilgilerinden alınmıştır.

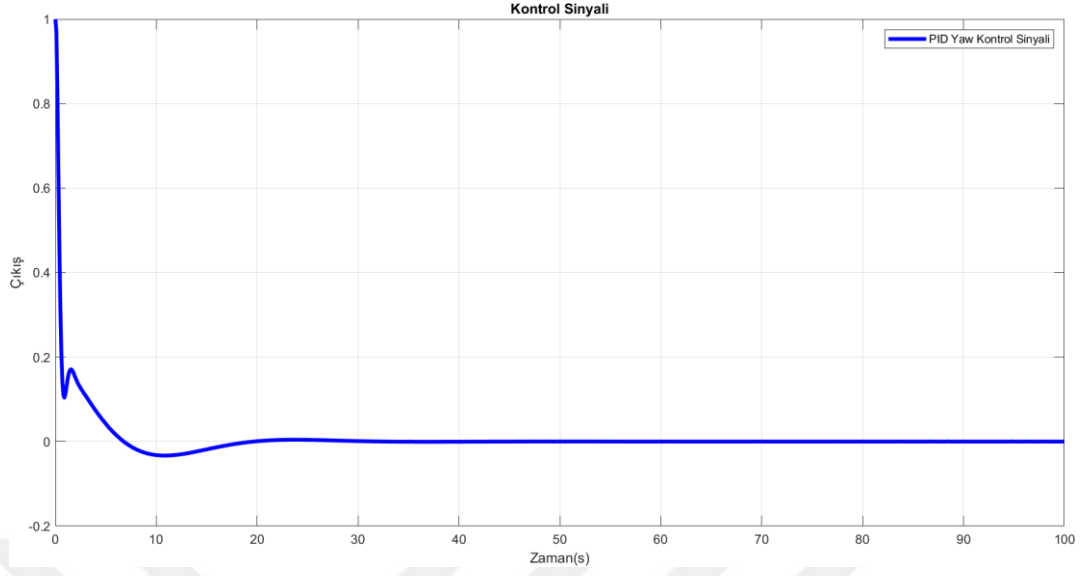
Çizelge 5. 3. TRMS düşey hareket sisteminin PID denetleyici parametreleri

	K_p	K_i	K_d
Ana Motor PID	2	0.5	5

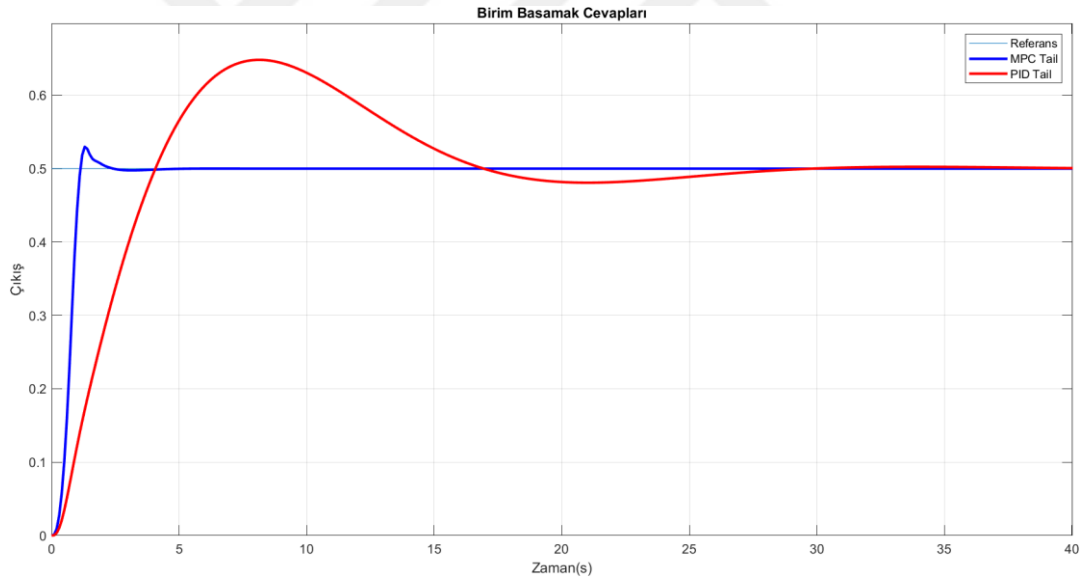
MPC'ye ait parametrelerin seçilmesi önceki kısımlarda belirtilmişti.



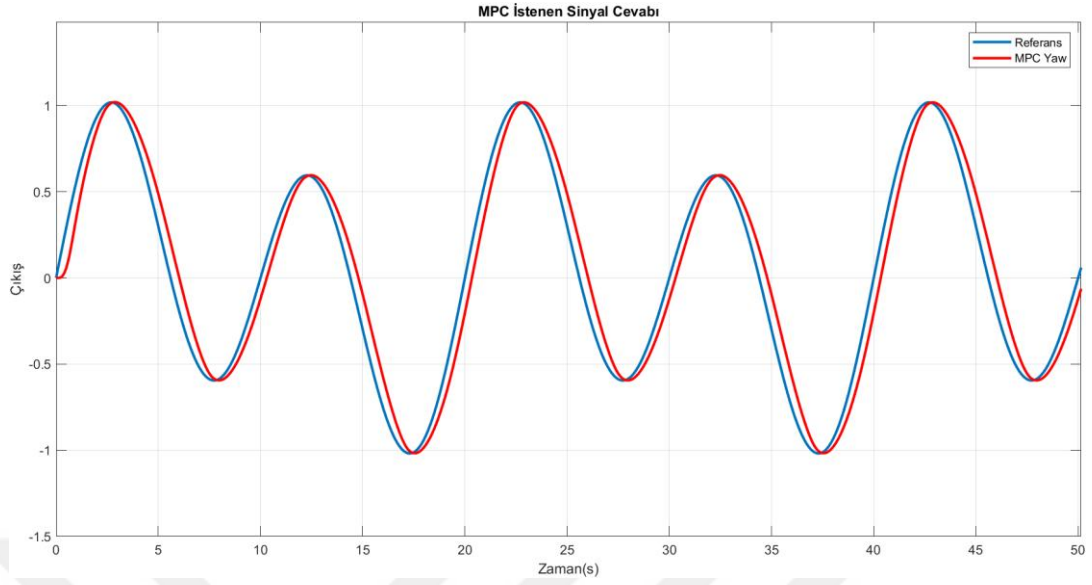
Şekil 5. 25. MPC için TRMS yatay hareket sisteminin kontrol sinyali



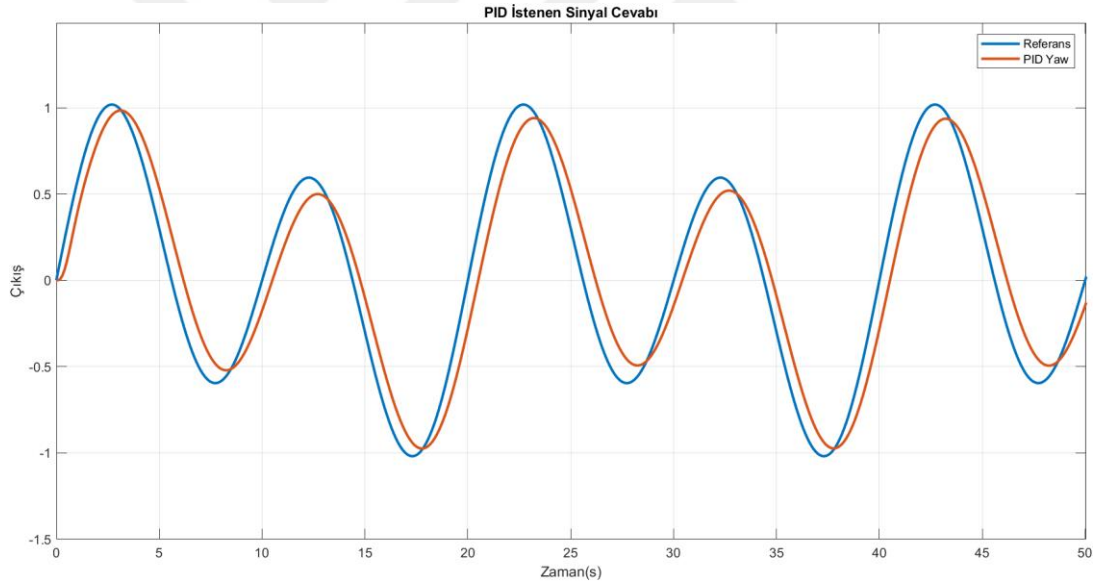
Şekil 5. 26. PID için TRMS yatay hareket sisteminin kontrol sinyali



Şekil 5. 27. MPC ve PID için TRMS yatay seviye hareket sisteminin cevapları



Şekil 5. 28. MPC için TRMS yatay seviye hareket sisteminin karışık periyodik sinyal cevapları



Şekil 5. 29. PID için TRMS düşey seviye hareket sisteminin karışık periyodik sinyal cevapları

Çalışma 7’de TRMS yatay seviye hareket sisteminin herhangi bir bozucuya maruz kalmadan firma tarafından önerilen PID denetleyicisi ile tasarlanan MPC denetleyicisinin, yardımcı motor (yaw) kontrollerindeki performansları gösterilmiştir.

Yatay seviye kontrol için birim basamak cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin PID denetleyiciye göre çok daha az aşım ve salınımsız olarak çok daha kısa sürede referans değerine ulaşan bir performans sergilediği Şekil 5.27.'de açıkça gösterilmiştir. Yatay seviye kontrol için karışık periyodik sinyal cevapları kıyaslandığında MPC denetleyicinin PID denetleyiciye göre referans değerine daha yakın bir kontrol sinyaliyle daha iyi bir performans sergilediği Şekil 5.28. ve Şekil 5.29.'de açıkça gösterilmiştir.



6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında TRMS sistemi için MATLAB Simulink ortamında yapılan denetleyici uygulamalarının performansları değerlendirilmiştir. İlk olarak TRMS'ye ait matematiksel modeller MATLAB Simulink ortamında çalıştırılmıştır. Üretici firma tarafından sunulan TRMS Simulink modelinde bulunan PID denetleyici kullanılmış ve sonuçları tasarlanan MPC ile düşey seviye hareket, yatay seviye hareket ve coupling durumları için karşılaştırılmıştır. Tasarlanan MPC denetleyiciler çok girişli çok çıkışlı bir sistem olan TRMS sistemi için en uygun sonucu vermesi amaçlanmıştır. MPC denetleyici ile denetlenen TRMS sisteminin klasik PID denetleyici sistemine kıyasla daha iyi bir performans ortaya koyduğu gösterilmiştir. Periyodik bozucunun TRMS sistemine uygulandığı durumda PID denetleyicinin performansı MPC denetleyiciye göre daha iyi olmaktadır. Nitekim genel performans analizinde MPC denetleyicinin daha üstün olduğu görülmektedir.

Sonraki yapılacak denetleyici tasarımı çalışmalarında TRMS'ye ait dinamik modeller kullanılarak farklı denetleyicilerle tasarımlar oluşturulabilir. Daha zor sistemlerden meydana gelen çok girişli ve çok çıkışlı modeller üzerine MPC denetleyicisi tasarımları geliştirilebilir.

7. KAYNAKLAR

- Azman, A. A., Rahiman, M. H. F., Mohammad, N. N., Marzaki, M. H., Taib, M. N., & Ali, M. F. 2017. Modeling And Comparative Study Of PID Ziegler Nichols (ZN) And Cohen-Coon (CC) Tuning Method For Multi-Tube Aluminum Sulphate Water Filter (MTAS). In 2017 IEEE 2nd International Conference On Automatic Control And Intelligent Systems (I2CACIS) (Pp. 25-30). IEEE.
- Bemporad, A. 2008. Model Predictive Control Design: New Trends and Tools. The 45th IEEE Conference on Decision & Control, 13-15 Aralık 2006, USA. S, 6678–6683.
- Bemporad, A., Morari, M., Ricker, N. L. 2019. Model Predictive Control Toolbox™ Getting Started Guide, Mathworks. The MathWorks, Inc. Natick.
- Boiko, I. 2013. Non-parametric tuning of PID controllers. Springer yayınları, London.
- Bordons, C., Camacho, E.F. 2007. Model Predictive Control 2. Baskı, Springer yayınları, Spain.
- Borrelli, F., Bemporad, A., Morari, M., 2011. Predictive Control for linear and hybrid systems. Cambridge yayınları, United Kingdom.
- Burns, R. 2001. Advanced Control Engineering. Butterworth-Heinemann yayınları, United Kingdom.
- Currie, J., Wilson, D. I. 2009. A Model Predictive Control Toolbox Intended for Rapid Prototyping. The 16th Electronics New Zealand Conference, 15-18 Kasım 2009, New Zealand. S, 7–12.
- Dahale, O. P., Jadhav, S. P. 2014. Design and Implementation of Controller using MPC Toolbox™. International Journal of Applied Information Systems. 2014(1):11-17.
- Di Cairano, S., Yanakiev, D., Bemporad, A., V. Kolmanovsky, I. 2012. Model predictive idle speed control: Design, analysis, and experimental evaluation. IEEE Control Systems Technology, 20(1): 84–97
- Durmaz, B. E., Kacmaz, B., Mutlu, I., Söylemez, M. T., 2017. Implementation and Comparison of LQR-MPC on Active Suspension System. The 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 30 Kasım- 2 Aralık 2017. Turkey. S, 828–835.
- Kozák . Š. 2016. From PID to MPC. 2016. The 28th International Conference Cybernetics and Information (K&I), 2-5 Şubat 2016. S, 62-69.
- Levine, W. S., Rakovic, S. V. 2019. Handbook of Model Predictive Control. Springer yayınları, Switzerland.
- Liu, K. Z. and Yokozawa, Y. 2012. An MPC-PI approach for buck DC-DC converters and its implementation. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 28-31 Mayıs 2012. China. S, 171–176.
- Maciejowski, J. M. 2002. Predictive Control with Constraints. Prentice Hall yayınları, England.

- Mansour, S., Robertson, B., Phillips, B. and Kember, G. 2004. Predictive control for real-time control over the internet. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2-5 Mayıs 2004. Canada. S, 827–830.
- Naik, V. V. Sonawane, D. N., Ingole, D. D. 2013. Model Predictive Control of DC Servomotor using Active Set Method. IEEE International Conference on Control Applications (CCA), 28-30 Augustos 2013. India. S, 820–825.
- Qin, S. J., Badgwell, T. A. 2003. A survey of industrial model predictive control technology. Science direct Control Engineering Practice, 11(7): 733–764.
- R. C. Dorf ve R. H. Bishop, Modern control systems, Pearson, 2011.
- Rossiter, J. I. 2004. Model- Based Predictive Control A Practical Approach. CRC yayınları, USA.
- Stoica, C., Rodríguez-Ayerbe, P., Dumur, D. 2008. MIMO_{Opt}MPC: A MatlabTM toolbox for offline robustification of multivariable MPC. The IEEE International Symposium on Computer- Aided Control System Design, 3-5 Eylül 2008. USA. S, 1259–1264.
- Syaichu-Rohman, A., Sirius, R. 2011. Model predictive control implementation on a programmable logic controller for DC motor speed control. The International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 17-19 Temmuz 2011. Indonesia. S, 1–4.
- TRMS, Twin Rotor MIMO System Control Experiments Manuel, 33-949S, Feedback Instruments Ltd., Sussex, U.K., 2010.
- Varughese, S. K. Prasad, A. Devadhas, D. 2018. Recent Developments in Control of Car like Robot using MP-MPC. The International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT), 23-24 Mart 2018. India. S, 596–599.
- Vatansever, F., ve Deniz, S., 2013. Design Of PID Controller Simulator Based On Genetic Algorithm. Uludağ University Journal Of The Faculty Of Engineering, 18(2), 7-18.
- Vatansever, F., ve Şen, D., 2013. Genetik Algoritma Tabanlı PID Kontrolör Simülâtörü Tasarımı.

8. ÖZGEÇMİŞ

