

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DOĞRUSAL SİSTEM SİMÜLASYONU VE KONTROLÜ İÇİN İNTERAKTİF
SANAL LABORATUVAR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Müh. Mustafa Şinasi AYAS

**OCAK 2012
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DOĞRUSAL SİSTEM SİMÜLASYONU VE KONTROLÜ İÇİN İNTERAKTİF
SANAL LABORATUVAR**

Elektrik-Elektronik Müh. Mustafa Şinasi AYAS

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"ELEKTRİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02.01.2012

Tezin Savunma Tarihi : 18.01.2012

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ

Trabzon 2012

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Mustafa Şinasi AYAS tarafından hazırlanan

**DOĞRUSAL SİSTEM SİMÜLASYONU VE KONTROLÜ İÇİN İNTERAKTİF
SANAL LABORATUVAR**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 03 / 01 / 2012 gün ve 1436 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin PEHLİVAN

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda hazırlanmıştır. Bu tezde kontrol sistemi eğitiminde kullanılmak üzere sistem davranışlarının incelenebilmesi ve bulanık mantık denetleyici tasarlama sırasındaki bütün adımların irdelenebilmesi için C++ kullanılarak hazırlanmış sanal bir laboratuvar üzerinde çalışılmıştır.

Öncelikle tüm öğrencilik ve akademisyenlik hayatımda benden hiçbir desteği esirgemeyen anneme, babama ve aileme teşekkürü bir borç bilirim. Kendileri gibi bir aileye sahip olduğum için çok mutlu olduğumu bilmelerini isterim.

Akademik hayata başladığım dönemden itibaren bilimsel desteği ve yönlendirici fikirleriyle bana yardımcı olan ve yol gösteren danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ' a, değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ ve Yrd. Doç. Dr. Hüseyin PEHLİVAN' a, çalışmalarımnda emeğini, tecrübelerini ve zamanını esirgemeyen Öğr. Gör. Emre ÖZKOP' a ve Ahmet Emir ERCİN' e de çok teşekkür ederim.

Temennim, tezimin bundan sonraki çalışmalara fayda sağlamasıdır.

Mustafa Şinasi AYAS
Trabzon 2012

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “*DOĞRUSAL SİSTEM SİMÜLASYONU VE KONTROLÜ İÇİN İNTERAKTİF SANAL LABORATUVAR*” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ’ ın sorumluluğunda tamamladığımı, örnekleri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.
02/01/2012

Mustafa Şinasi AYAS

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar(ÇİZELGELER) DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Araştırması.....	3
2. Kontrol Sistemleri.....	7
2.1. Giriş.....	7
2.2. PID Denetleyici ile Kontrol.....	10
2.2.1. Oransal Etki.....	11
2.2.2. İntegral Etki.....	12
2.2.3. Türevsel Etki.....	13
2.3. Bulanık Mantık ile Kontrol.....	15
2.3.1 Giriş.....	15
2.3.2. Bulanık Mantık Teorisi.....	15
2.3.2.1. Üyelik Fonksiyonları.....	17
2.3.2.2. Bulanık Küme İşlemleri.....	20
2.3.2.3. Bulanık Mantık Kontrol.....	22
2.3.2.3.1. Bulanıklaştırma Birimi.....	23
2.3.2.3.2. Bilgi Tabanı.....	23
2.3.2.3.3. Sonuç Çıkarma Birimi.....	23
2.3.2.3.4. Durulaştırma Birimi.....	23
2.3.2.4. Bilgi Tabanı ve Kural Tablosu.....	23

2.3.2.5.	Sonuç Çıkarma.....	27
2.3.2.5.1.	Maks-Min Metodu ile Sonuç Çıkarma.....	28
2.3.2.5.2.	Maks-Çarpım Metodu ile Sonuç Çıkarma.....	29
2.3.2.5.3.	Takagi-Sugeno-Kang Metodu ile Sonuç Çıkarma.....	29
2.3.2.6.	Durulaştırma.....	30
2.3.2.7.	Bulanık Mantık Denetleyici Akış Şeması.....	33
2.4.	Performans Analizi.....	33
3.	Yapılan Çalışmalar.....	36
3.1.	Giriş.....	36
3.2.	Tasarlanan İnteraktif Sanal Laboratuvar.....	36
3.2.1.	İnteraktif Sanal Laboratuvar Akış Diyagram Bileşenleri.....	38
3.3.	Tasarım Örnekleri.....	54
3.3.1.	Tasarım Örneği-1.....	54
3.3.2.	Tasarım Örneği-2.....	60
3.3.2.1.	Doğru Akım Hız ve Motor Kontrollü Modelleme Aşaması.....	61
3.3.2.2.	DA Motoru Kontrol Seçenekleri.....	64
3.3.2.2.1.	Endüvi Kontrollü DA Motoru.....	65
3.3.2.3.	Simülasyon Diyagramı ve Durum Denklemleri.....	67
3.3.2.4.	Örnek Simülasyon.....	68
4.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	70
5.	ÖNERİLER.....	71
6.	KAYNAKLAR.....	72
7.	EKLER.....	76
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

*DOĞRUSAL SİSTEM SİMÜLASYONU VE KONTROLÜ İÇİN İNTERAKTİF SANAL
LABORATUVAR*

Mustafa Şinasi AYAS

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ
2012, 77 Sayfa

Kontrol sistemleri eğitiminde bilgisayar destekli tasarım ve uygulamalar gün geçtikçe artarken, bu konuya yönelik bilgisayar yazılımları ve araçları da derslerin vazgeçilmez birer parçası haline gelmektedir. Ancak bu yazılımlar eğitim amaçlı da olsa pahalı satılmakta ve genellikle problem çözümünü yaparken kullanıcı katkısını minimuma indirerek hazır çözümler sunmakta, bu durum da, eğitim amaçlı kullanımlarda öğrencinin çözüme hazır ulaşmasını sağlayarak öğrenme sürecine olan katkıyı azaltmaktadır.

Bu çalışmada öğrenciyi problem çözümü için gerekli modelleme ve formül oluşturma aşamalarından koparmadan, doğrusal sistemlerin durum uzayı modellerini test edebileceği, sonuçlarını gözlemleyebileceği ve bu sistemlere klasik ya da bulanık mantık tabanlı denetleyiciler tasarlayabileceği görsel özellikli bir sanal laboratuvar ortamı geliştirilmiştir. Özellikle öğrencilerin otomatik kontrol sistemleri derslerinde doğrusal sistem simülasyonu için model geliştirme ve denetleyici tasarlama becerilerine katkı sağlanacaktır. Bu yazılımda Oransal (P), İntegral (I) ve Türev (D) denetleyiciler ayrı ayrı ya da birbirleriyle ikili/üçlü gruplar halinde ve bulanık mantık denetleyici tasarlanabilmektedir. Hem PID hem de bulanık mantık denetleyici tasarımında gerçekleştirilecek olan bütün adımların sistem davranışına olan etkileri görsel olarak izlenebilmekte ve gerekli parametrik önlemler alınabilmektedir. Ayrıca tasarlanan ve kullanılan bütün denetleyicilerin performansları kontrol sistemleri teorisinde yaygın olarak kullanılan performans ölçüm yöntemleri kullanılarak ölçülebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kontrol sistemleri, doğrusal sistem simülasyonu, PID, bulanık mantık, denetleyici tasarımı, sanal kontrol laboratuvarı.

Master Thesis

SUMMARY

LINEAR INTERACTIVE VIRTUAL LABORATORY FOR SYSTEM SIMULATION
AND CONTROL

Mustafa Şinasi AYAS

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical – Electronics Graduate Program

Supervisor: Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ
2012, 77 Pages

Computer based design and applications in control system education have increased tremendously during last decade resulting in a dependency on computer tools and software related to the subject. However, these software packages are expensive and minimize the contribution of the students in design and analysis of control system by offering predefined solutions to the problems. This limits the work to be done by the student and offenses to the learning process.

In this study, it is planned to keep the students in every stage of control system modeling, design and analysis by letting them to model and develop alternative designs in terms of state-space modeling and then testing their designs in the virtual lab proposed here. The virtual control lab introduced here will contribute to the students in modeling and design of linear control systems. The virtual lab provides design opportunity of proportional (P), integral (I), derivative (D) controllers and the combinations of them in group of two or three. In addition to the classical PID controllers, an interface for designing and using fuzzy logic controllers is also included. A visual display window is also included for analyzing and making necessary parameter changes. A performance analysis tool is also developed and included in order to compare the performances of the designed controllers for better utilization.

Key Words: Control systems, linear system modeling, simulation, PID, fuzzy logic, controller, design, virtual control lab.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. İleri beslemeli sistemin genel blok diyagramı.....	8
Şekil 2.2. İleri beslemeli sistemin genel blok diyagramı.....	8
Şekil 2.3. Geri beslemeli sistemin genel blok diyagramı.....	9
Şekil 2.4. PID denetleyici blok diyagramı.....	10
Şekil 2.5. Transfer fonksiyonu $9/(s^2+4s+10)$ olan bir sitemin değişik K_p değerlerindeki basamak tepkeleri.....	12
Şekil 2.6. Transfer fonksiyonu $9/(s^2+4s+10)$ olan bir sitemin değişik K_i değerlerindeki basamak tepkeleri.....	13
Şekil 2.7. Transfer fonksiyonu $9/(s^2+4s+10)$ olan bir sitemin değişik K_D değerlerindeki basamak tepkeleri.....	14
Şekil 2.8. GENÇ klasik kümesinin üyelik fonksiyonu.....	16
Şekil 2.9. ÇOCUK,GENÇ,ORTA ve YAŞLI bulanık kümesinin üyelik fonksiyonu..	16
Şekil 2.10. Üyelik fonksiyon kısımları.....	17
Şekil 2.11a. Normal bulanık küme.....	18
Şekil 2.11b. Alt normal bulanık küme.....	18
Şekil 2.12a. Bükey bulanık küme.....	18
Şekil 2.12b. Bükey olmayan bulanık küme.....	18
Şekil 2.13. Üçgen üyelik fonksiyonu.....	19
Şekil 2.14. Gauss üyelik fonksiyonu.....	19
Şekil 2.15. Yamuk üyelik fonksiyonu.....	20
Şekil 2.16. Bulanık kümelerde kesişim işlemi.....	21
Şekil 2.17. Bulanık kümelerde birleşme işlemi.....	21
Şekil 2.18. Bulanık kümelerde değilleme işlemi.....	22
Şekil 2.19. Bulanık mantık denetim şeması.....	22
Şekil 2.20. Hata ve hata değişiminin zamana göre grafiği.....	25
Şekil 2.21. Hata ve hata değişim grafiği ile kural tablosu oluşturulması.....	27
Şekil 2.22. Maks-min e göre sonuç çıkarma.....	28
Şekil 2.23. Maks-çarpım a göre sonuç çıkarma.....	29
Şekil 2.24. Sıfıncı dereceden Sugeno metoduna göre sonuç çıkarma.....	30

Şekil 2.25.	Durulaştırma yöntemlerinin kabaca gösterilmesi	31
Şekil 2.26.	Ağırlık merkezi yöntemi	32
Şekil 2.27.	Bulanık mantık denetleyici tasarım diyagramı	33
Şekil 3.1.	İnteraktif sanal laboratuvar akış diyagramı	37
Şekil 3.2.	Yeni proje bloğu giriş ve çıkışı	39
Şekil 3.3.	Eski proje bloğu giriş ve çıkışları	39
Şekil 3.4.	İnteraktif sanal laboratuvar giriş ekranı	40
Şekil 3.5.	Oluştur bloğu giriş ve çıkışları	41
Şekil 3.6.	Değişken tanımlama penceresi	42
Şekil 3.7a.	Matematiksel ifadelerle durum-uzay tanımlama	42
Şekil 3.7b.	Değişkenler ve matematiksel ifadelerle durum-uzay tanımlama	42
Şekil 3.8.	Denetleyici tasarlama bloğu giriş ve çıkışları	43
Şekil 3.9.	Denetleyici tasarlama bloğu giriş ve çıkışları	44
Şekil 3.10.	Denetleyici tasarlama bloğu giriş ve çıkışları	44
Şekil 3.11.	Değişik tipte üyelik fonksiyon tanımlama örneği	45
Şekil 3.12.	Sistem simülasyonu bloğu giriş ve çıkışları	46
Şekil 3.13.	Sonuçlar bloğu giriş ve çıkışları	50
Şekil 3.14.	Osiloskop ekran görüntüsü	51
Şekil 3.15a.	İzleme ekranı-parametre ekleme	52
Şekil 3.15b.	İzleme ekranı-eklenmiş parametreler ve o anki değerleri	52
Şekil 3.16.	Doğrusal bir sistemin sistem dinamiklerinin gösterilmesi	53
Şekil 3.17.	Sallanan masa	55
Şekil 3.18.	Sallanan masa simülasyon diyagramı	57
Şekil 3.19.	Simülasyon diyagramında değişken atamaları	58
Şekil 3.20.	Kontrol blok diyagramı	60
Şekil 3.21.	DA motorunun eşdeğer elektromekanik şeması	61
Şekil 3.22.	Uyarma devresi sebep-sonuç diyagramı	62
Şekil 3.23.	Endüvi devresi sebep-sonuç diyagramı	63
Şekil 3.24.	Gerilim indüksiyonuna ilişkin sebep-sonuç diyagramı	64
Şekil 3.25.	DA motorları için geniş sebep-sonuç diyagramı	64
Şekil 3.26.	DA motorunun eşdeğer elektromekanik diyagramı	65
Şekil 3.27.	Endüvi kontrollü DA motoru için genel sebep-sonuç diyagramı	66
Şekil 3.28.	Endüvi kontrollü DA motorunun simülasyon diyagramı	68

Şekil 3.29.	Endüvi kontrollü DA motorunun hız grafiği.....	69
Şekil 3.30.	Endüvi kontrollü DA motorunun dinamik analiz grafikleri.....	70

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Kural tablosu	24
Tablo 2.2. e , Δe ve Δu işaretleri	26
Tablo 3.1. Osiloskop ızgara fonksiyonu	50
Tablo 3.2. Örnek simülasyon verileri	68

SEMBOLLER DİZİNİ

DA	Doğru akım
IE	Hatanın integrali
IAE	Hatanın mutlak değerinin integrali
ISE	Hatanın karesinin integrali
ITAE	Zaman ile çarpılmış hatanın mutlak değerinin integrali
ITSE	Zaman ile çarpılmış hatanın karesinin integrali
ISTE	Zamanın karesi ile çarpılmış hatanın karesinin integrali
K _i	PID denetleyicinin integral katsayısı
K _d	PID denetleyicinin türev katsayısı
K _p	PID denetleyicinin oransal katsayısı
MIMO	çok girişli çok çıkışlı
r	Sistem referans değeri
SKLA	Sanal kontrol laboratuvarı
e(t)	Zamanla değişen hata sinyali
$\Delta e(t)$	Zamanla değişen hata değişim sinyali
u(t)	Zamanla değişen giriş sinyali
y(t)	Zamanla değişen sistem çıkışı
$\mu(x)$	x noktasındaki üyelik derecesi
σ	Yayılma açısı
C _f	İleri beslemeli denetleyici bloğu
C _c	Hem ileri hem geri beslemeli denetimde kullanılabilen ardışıl denetleyici bloğu
G _p	Denetlenen sistem
H	lme ve düzenleme bloğu
u	Kontrol işareti

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

“Hayatta en hakiki mürşit ilimdir, fendir” derken Atatürk, başka bir konuşmasında da temel prensip olarak “Eğitim ve öğretim yönteminin işe ve uygulamaya dayanması ilkelerine uymak şarttır.” diye ekliyordu.

Eğitim ve öğretim, bir ülkenin gelişmesini sağlayan, muasır medeniyetler seviyesine çıkacak olan, milletleri hem kendilerinin hem de başka milletlerin kölesi olmaktan kurtaracak olan yegane araçtır. Günümüzde gelişmiş ülkeler incelendiğinde eğitim seviyelerinin yüksekliği ve ürettikleri bilgilerin kalitesi ortaya çıkmakta, gelişmişlikleri bunlara bağlanmaktadır. Ancak bu ülkeler bununla da yetinmeyip daha çok bilgi üretebilmek için çareler aramaktadır.

Son on yılda araştırmacılar var olan teknik kavramları süzmekte ve eğitim sürecini geliştirmeye destek vermek için yeni araçlar geliştirmektedir. Bu araçlardan biri olan bilgisayar destekli interaktif sistemlerle, öğretimin geleneksel şekli olan sınıfta öğretim birbirlerini tamamlayabilmektedir [1].

Hızla gelişen bilgisayarlar paralel olarak yaygınlaşmakta olan internet ağı, hem eğitimcilere hem de öğrencilere bilgiyi yaymak ve dünyanın her yerindeki bilgilerden istifade edebilmek için güçlü ve verimli bir ortam sunar. Bu ortam sanal eğitim sınıflarının ve sanal laboratuvarların kurulması ve yönetilmesi için en son medya teknolojileriyle kolayca işbirliği yapabilir. Medya teknolojileri ifadesi ile interaktif simülasyonlar, video ve sesler, veri tabanları, uzaktan kontrol araçları kastedilmektedir [2].

İnternet ortamı üzerinden sağlanan eğitim sistemlerinin temel avantajı zaman ve mekandan bağımsız olmaları, basit ve kullanışlı bir internet ara yüzüne sahip olmalarıdır [3].

Son yıllara kadar kontrol sistemleri eğitimi sınıf ortamında salt bilgi aktarımı şeklinde de tanımlanabilen, statik kavramlarla sunulan yöntemlerle veriliyordu. Bu kavramları dinamik ve interaktif olarak göstermek, geleneksel sınıf ortamında geleneksel anlatım şekilleri ve statik araçlar kullanarak yapmak genellikle zordur. Bu yüzden yeni nesil eğitim sistemi, mevcut yöntemleri geliştirerek, kontrol sistemleri eğitimini bilgisayar simülasyonları ve nesne tabanlı görsel araçlarla desteklenmeye çalışılmaktadır.

Teknik olan mühendislik konularını öğretmek veya öğrenmek genellikle karmaşıktır. Çünkü sistem içerisindeki parametrelerin değişmesi sistem davranışını çok farklı yönden etkileyebilmektedir. Ancak eğer bu tarz sistemlerin dinamik davranışları uygun yazılımlar kullanılarak değişkenlere doğru cevabı verebilecek interaktif sistemlerle anlatılabilirse kolaylıkla açıklanabilmekte ve anlaşılabilir. Bunun yanında, öğrenci öğrenirken pasif bir rol almak yerine, öğrenme sürecine aktif olarak katılmaya mecbur edilerek daha fazla öğrenme gerçekleştirilmiş olur.

Devre simülasyon programları bir çok mühendislik dersinin temel parçası haline gelmiştir. Bu programlar karmaşık devrelerin neredeyse tam gerçek davranışlarını sunduğu için mühendislik derslerinde tamamlayıcı olarak kullanılmaktadırlar. Bu programların bazıları kullanıcı bilgisayarına kurulumu gerektirir. Öğrenci, istenilen konuya çalışmaya başlamadan önce, bu simülasyon aracını nasıl kullanacağını öğrenmeye ihtiyaç duyar, hele ki öğrenci bu tarz bir simülasyonla ilk defa karşılaşılırsa bu ihtiyaç daha da artar.

Son yıllarda pek çok araştırmacı kontrol sistemlerini öğretmek için interaktif ve kullanımı kolay ayırışık çevresel araçlar geliştirmektedir. Bu araçları geliştirmek için Java, C, C++, C# ve MATLAB çok kullanılan yaygın platformlardandır. Bu bağlamda, interaktif araçların çoğu "etki-sonuç" ikilisinin sonucuna odaklanmıştır. "Ne olur? - Eğer" ikilisine cevap çeşitli devre parametrelerinin değerini arttırmakla veya azaltmakla bulunur. Başka bir ifade ile, devre simülasyonu devrenin gerçek parametrelerini kullanmadan gerçekleştirilir.

Bu tezin amacı, kontrol sistemleri eğitiminde öğrencilere görsel olarak geleneksel sınıf ortamında ve laboratuvarlarda gösterilmesi zor olan önemli kavramları gösterebilmek için kolay kullanımlı ve görsel arayüzlü bir simülatör tasarlamak ve öğrencilere daha verimli bir öğrenme ortamı oluşturmaktır.

Bu çalışmada fiziksel sistemlerin durum-uzay modellerinden hareketle dinamik davranışları incelenmekte ve uygun kontrol tasarımı yapılabilecek seçenekler sunulmaktadır. Öğrencinin hazırcılığa kaçmasını önlemek için sistem modellemesini yapıp durum-uzay formatında kullanıma hazır hale getirmesi istenmektedir. Öğrenci literatürde (ders kitaplarında) yer alan bilgileri kullanarak integro-diferansiyel denklemleri, transfer fonksiyonlarını ve diğer formatlardaki sistem denklemlerini durum-uzay formatına dönüştürdükten sonra bu çalışma kapsamında geliştirilen yazılımı kullanarak denetleyici tasarımı yapabilmekte ve sistemin denetimli ve denetimsiz davranışlarını zaman uzayında izleyebilmektedir.

Eğitim amaçlı ve kontrol sistemlerini daha iyi öğretmeyi amaçladığından, geliştirilen yazılım piyasada satılmakta olan paket programlara alternatif geliştirmek değil, öğrenciyi bu yazılımlardaki hazırcılıktan koparmak ve kendilerini içinde bulacakları, bazı safhalarını kendilerinin tasarlayacağı ve deneyeceği sanal bir ortam oluşturmaadır. Öğrenci kontrol sistemi tasarımının her safhasında kendisi bu yazılımın içinde olacak ve tasarımın her safhasını deneyerek öğrenme fırsatı bulacaktır.

1.2. Literatür Araştırması

Bilgisayar destekli mühendislik eğitimine son yıllarda büyük önem verildiği literatürde görölmektedir. Sırf bu konulardaki çalışmaların basıldığı uluslar arası dergiler bu konunun önemini zaten ortaya koymaktadır. IEEE Transaction on Education, Computer Applications in Engineering Education, Journal of Engineering Education ve International Journal of Electrical Engineering bunlardan sadece birkaçıdır.

Konuyla ilgili bütün yayınların burada irdelenmesi olanaksız, ancak çok yakın olan bazılarına değinmek faydalı olacaktır.

Gonçalves (2001) ve Canesin Güç Elektroniği dersi için ideal kontrolsüz tek faz ve üç faz doğrultucuların analizi ile ilgili interaktif görsel program hazırladılar. Java platformunu kullanarak hazırladıkları bu program ile öğrencilerin güç elektroniği dersini öğrenme hızını arttırmak için öğrencilere daha fazla araç sağlamayı amaçladılar. TCP/IP bağlantısı kullanarak hazırladıkları programı öğrencilere evrimii sunarak dersin daha akıcı olmasını sağladılar [4].

Yang (2003) ve Lee Süreç Kontrol eğitiminde öğrencilerin sınıf ortamında yapılan matematiksel modellemelerden ve blok diyagramlardan sıkıldığını belirtmekte. Yapılan modellemelerin sınırlı kaynak ve zamandan dolayı gereklenememesi üzerine Java platformunu kullanarak matematiksel modellemeleri yapılan sistemlerin bilgisayar ortamında sanal uygulamasını gerçekleştirmek için 10 ayrı modül hazırladılar. Yaptıkları bu çalışma ile öğrencilerden olumlu geribesleme aldıklarını ifade ettiler [5].

Viedma (2005) ve arkadaşları Geribeslemeli Sistemler dersi için internet üzerinden erişilebilen laboratuvar hazırladılar. Gerçek ekipmanlarla hazırladıkları laboratuvarı ğrencilere Java uygulamaları yardımıyla internet üzerinden denetleme imkanı sundular. Öğrencilere kendi aralarında belirledikleri zaman aralığında herhangi bir bilgisayardan laboratuvarı gerçekleştirme imkanı sağlayarak, hem deney ekipmanlarından ve deneyde

görevli yardımcı personel sayısından tasarruf sağladılar hem de öğrencilerin güvenli bir şekilde konuya hakim olana kadar laboratuvarı tekrar etmelerini sağladılar [6].

Mendez (2005) ve arkadaşları Kontrol Mühendisliği eğitiminde kullanılmak üzere internet tabanlı simülör geliştirdiler. Java uygulamalarını kullanarak hazırladıkları bu simülörle doğrusal kontrol sistemlerinin analizini ve simülasyonunu yaptırıldılar. Bu çalışmada ki amaçları temel kontrol mühendisliği derslerinin teorik kısımlarını simülasyonlarla destekleyerek öğrencilerin bu dersleri daha kolay ve etkin bir şekilde kavramalarını sağlamaktı. Öğrencilere simülör hakkında yaptıkları anket sonuçlarına göre simülörün öğrenciler üzerinde önemli derecede katkı sağladığını ve bu tür uygulamaların yaygınlaşması gerektiğini ifade ettiler [7].

Lundberg (2005) ve Williams Doğrusal Sistemler ve Geribeslemeli Kontrol Sistemleri üzerinde çalışan öğrenciler için Java uygulaması geliştirerek internet üzerinden kullanılmasını sağladılar. Uygulama ile öğrencilerin sıfır - kutup diyagramı çizmelerine, sıfır ve kutup noktalarını değiştirerek anlık değişimleri Bode, Nyquist ve Nichols diyagramlarında gözlemlenmelerine ve basamak tepkisini incelemelerine olanak sağladılar [8].

Altawil (2006) ve Hajier MATLAB yazılımının Grafiksel Kullanıcı Arayüzü fonksiyonlarını kullanarak sinüzoidal darbe genişlik modülasyonlu dalgalı gerilim düzenleyicileri öğretmek için bir simülör hazırladılar. Hazırladıkları bu simülörde AC gerilim kontrolörün güç devresindeki elemanların parametre değerlerine göre oluşan sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu çıkışını kullanıcılara sunarak kullanıcıların dalga şekillerini daha iyi analiz etmelerini sağladılar [9].

Altaş (2007) ve Aydar gerçek zamanlı, bilgisayar kontrollü bir Sanal Kontrol Laboratuvar Aracı (SKLA) geliştirdiler. Otomatik Kontrol Sistem dersleri için geliştirdikleri SKLA ile küçük boyutlu doğru akım (DA) motor hız kontrolü bulanık mantık denetleyicisinin yanı sıra oransal, integral, türevsel ve bunların birleşimiyle oluşturulacak denetleyicilerle gerçekleştirdiler. Kullanım kolaylığının ön planda tutulduğu SKLA' nın öğrencilere yapmış olduğu katkıyı ölçebilmek için 40 öğrenciyi 2 ayrı gruba ayırdılar. Her iki gruba da DA motor hız kontrolünü gerçek zaman bağlantısı olmayan bir dijital yazılım aracıyla çeşitli denetleyicilerle gerçekleştirmelerini proje olarak verdiler. Fakat grupların birine SKLA kullandırdılar. Daha sonra her iki gruba da sistem parametrelerinin ilk değerleri ve zaman alanındaki sistem çıktıları hakkında soru

sorduklarında SKLA kullanan grubun sistem parametrelerini ve çıktılarını %13 daha fazla kavradıklarını gördüler [10].

Dormido (2008) ve arkadaşları doğrusal olmayan çok girişli - çok çıkışlı (MIMO) sistem olan üçlü tank sistemini deneylerini gerçekleştirmek için internet tabanlı kontrol laboratuvarı geliştirdiler. Java platformunu kullanarak yaptıkları bu çalışmada öğrencilerin çok girişli - çok çıkışlı sistemlerde kontrol uygulamaları hakkında bilgi sahibi olmalarını amaçladılar. Uygulamayı kullanan öğrenciler üzerinde yaptıkları anket sonuçlarına göre öğrencilerin büyük çoğunluğunun hazırlanan Java uygulamasının öğrenmeyi kolaylaştırdığı ve öğrenmeye katkı sağladığı görüşünde birleştiğini belirttiler. Anket sonuçlarını göz önüne alarak kontrol sistemleri eğitiminde kullanılmak üzere temel ve ileri seviyede kontrol sistemlerini kapsayan sanal ve uzaktan erişimli laboratuvar kurmayı önerdiler [11].

Wu (2008) ve arkadaşları internet üzerinden erişilen programları ile robot kolu kontrolünü gerçekleştirmek için gerçek zamanlı deney ve simülasyon ortamı sağladılar. Yaptıkları bu çalışmada öğrencilere çevrimiçi PID denetleyici kullanarak robot kolu kontrolü simülasyonu ve deneyi yaptırıldılar. Uzaktan eğitim-öğretimin amaçlandığı bu çalışmalarında hem simülasyon hem de deney sonucunda elde edilen veriler veri tabanında saklanarak öğrencilerin yapmış olduğu deneyleri herhangi bir zamanda görmelerini sağladılar [12].

Bayındır (2008) ve arkadaşları reaktif güç kompanzasyonunda kullanılmak üzere yapay sinir ağları modeli tasarımı ve uygulamasını gerçekleştirmek için bir simülatör tasarladılar. Yapılan çalışmanın gerçek hayata kolaylıkla uygulanabileceği gibi eğitim amaçlı olarak da kullanılabileceğini belirttiler. Yapay zekanın kullanımına bir örnek vererek öğrencilerin teknik mühendislik eğitimindeki kontrol çalışmalarına farklı bir yaklaşım getirdiler [13].

Balestrino (2009) ve arkadaşları Pisa Üniversitesindeki ileri düzeyde robotbilimi ve kontrol sistemleri laboratuvarına internet üzerinden uzaktan erişimi sağlayacak ve hazırlanmış deneylerin gerçeklenmesini veya simülasyonunu sağlayacak Java uygulamalarını hazırladılar. Uzaktan erişimi sağlayarak öğrencileri deneyleri belli bir yerde ve saatte yapma zorunluluğundan çıkardılar ve böylece yapılacak olan deneyleri zorunlu halden öğrenilecek nesne haline dönüştürdüler. Eğer laboratuvar gerçek zamanlı deney yapmaya elverişli değil ise öğrencilerin öğrenme arzusunun azalmaması ve deneyi

daha fazla sayıda tekrar yapma imkanı sunmasından dolayı simülasyonların önemli olduğunu belirttiler [14].

Canesin (2010) ve arkadaşları Güç Elektroniği dersi için hazırladıkları Java uygulamasıyla kontrollü - kontrolsüz tek faz ve üç faz ideal doğrultucu simülasyonu gerçekleştirdiler. Simülasyon sonucunda elde ettikleri sonuçları PSpice 9.1 simülatörü ve laboratuvarında gerçekleştirilen deney sonuçları ile karşılaştırdılar. Yaptıkları uygulamanın öğrencilerin Güç Elektroniği dersi içeriğini öğrenme arzusunu arttırdığını belirttiler [15].

2. KONTROL SİSTEMLERİ

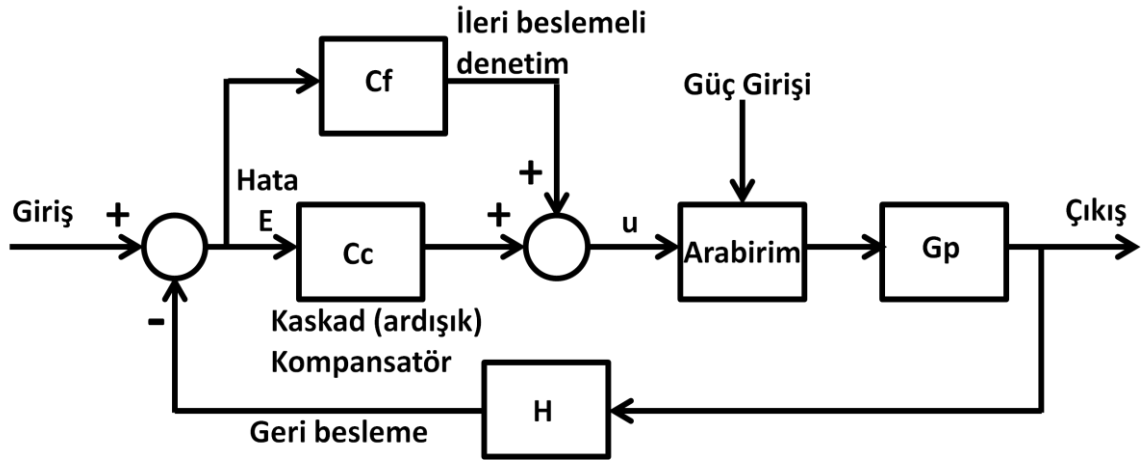
2.1. Giriş

Bir sistemin istenilen çıkışı vermesini sağlamak için kullanılan ek üniteye kontrolör, bu sistemin tümüne de kontrol sistemi denir. Aslında bir kontrol sisteminde denetlenen sistem ve denetleyen kontrolörün yanı sıra yardımcı arabirimler de mevcuttur. Bu arabirimler kontrolörden aldıkları küçük değerli işaretle denetlenen ve büyük güç ve enerji kullanan sistemlere bu güç ve enerjinin ayarlanarak verilmesini sağlar.

Açık çevrimli kontrol sistemleri, girişindeki kontrol işareti sistem çıkışından bağımsız olan bir kontrol sistemidir. Bu kontrol sisteminde sisteme etkiyen ve ölçülemeyen bozucu faktörlerden dolayı sistem çıkışında oluşabilecek etkiler düzeltilemez. Dolayısıyla sadece kararlı ve bozucu girişleri ölçülebilen sistemlerde kullanılırlar. Açık çevrimli kontrol sistemlerinin tercih edilmesi sistemin zaman karmaşıklığını ve maliyetini azaltmak içindir [17,18]. Klasik çamaşır makinesi ve trafik lambaları bu tür kontrol sistemlerine örnek olarak verilebilir.

Kapalı çevrimli kontrol sistemleri, referans ile sistem çıkışından aldığı geri beslemenin farkını kullanarak kontrol işareti üretir. Sisteme etkiyen bozucu faktörler geri besleme sayesinde bastırılabilirler. Değişken referans durumunda sistemin daha hızlı cevap vermesini ve daha kararlı olmasını da sağlarlar [16]. Sıvı seviye kontrolü, motor hız kontrolü, oda sıcaklık kontrolü bu tür kontrol sistemlerine örnek olarak verilebilirler.

Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 açık çevrimli kontrol sistemlerinin yapısı iki farklı blok diyagramı ile gösterilmektedir. Bozucu girişin denetlenen sistemi etkileme durumuna göre Şekil 2.1 ve Şekil 2.2' deki blok diyagramlarında değişiklikler olabilir. Bu şekillerde verilen arabirim elemanı kontrol işaretini kullanarak denetlenen sisteme giden gücü ayarlar ve gerekli denetimin yapılmasını sağlar. Kontrol Sistem teorisi anlatılırken bu arabirim genellikle gösterilmez. Fakat daima oradadır.



Şekil 2.1 İleri beslemeli sistemin genel blok diyagramı

Cf: İleri beslemeli denetleyici bloğu

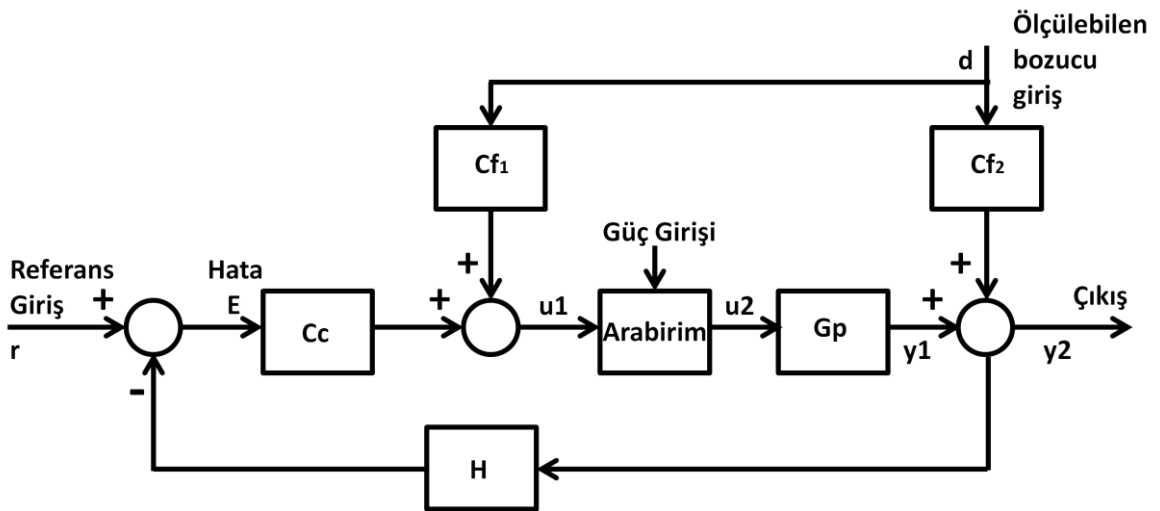
Cc: Hem ileri hem geri beslemeli denetimde kullanılabilen ardışıl kompanse-tör (denetleyici) bloğu

Gp: Denetlenen sistem

H: Ölçme ve düzenleme bloğu

u: Kontrol işareti

E: Hata işareti



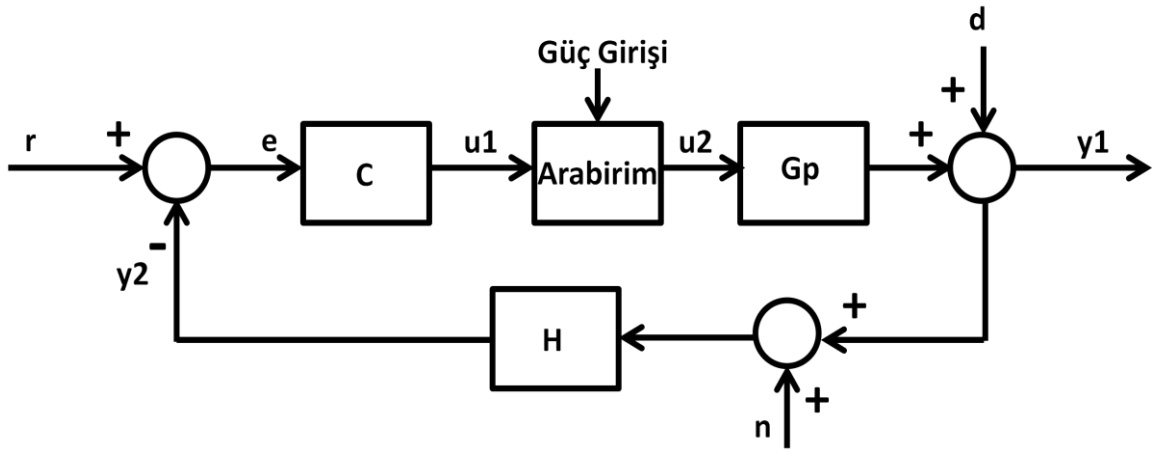
Şekil 2.2 İleri beslemeli sistemin genel blok diyagramı

r: Referans giriş

d: Ölçülebilir bozucu giriş

- C_c : Geri beslemeli denetleyici kompensatörü
 C_{f1} : İleri beslemeli denetleyici bloklarından biri
 C_{f2} : İleri beslemeli denetleyici bloklarından diğeri
 H : Ölçme ve düzenleme bloğu
 G_p : Denetlenen sistem
 y_1 : Denetlenmiş sistem çıkışı
 y_2 : Bozucu giriş etkisini de içeren sistem çıkışı

Geri besleme denetleyicinin genel yapısı da aslında Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 de verilmiştir. Bu şekillerdeki C_f , C_{f1} ve C_{f2} blokları ve ilgili bağlantı çizgileri kaldırılırsa geri beslemeli denetleyici yapısı kalır. Geri beslemeli bir sistemin genel blok diyagramı Şekil 2.3' de verilmektedir. Geri beslemeli kontrol sistemlerinde normal girişlerin yanı sıra bozucu giriş ve gürültü de dikkate alınır. Bozucu giriş genelde sistem çıkışını etkilerken gürültü ölçme işlemine etki yapar. Yani ölçülen sistem çıkışında gürültü de bulunur. Bazen bu gürültü değeri çok küçük olduğundan ihmal edilir. Lisans derslerinde gürültü genelde ihmal edilirken, araştırma amaçlı çalışmalarda eğer denetim işlemi hassas ise dikkate alınır.



Şekil 2.3 Geri beslemeli sistemin genel blok diyagramı

- r : Referans giriş
 e : Hata
 u_1 : Kontrol işareti
 u_2 : Kontrol edilmiş giriş

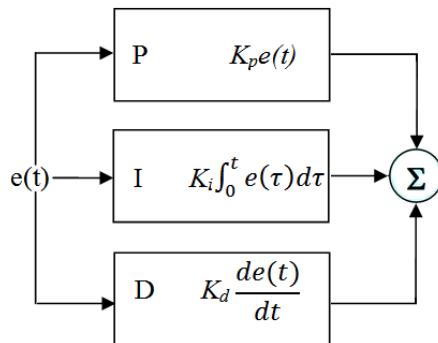
- d: Bozucu giriş
n: Gürültü
y1: Gerçek sistemin çıkışı
y2: Ölçülüp düzenlenmiş çıkış
C: Denetleyici
Gp: Denetlenen sistem
H: Ölçme ve düzenleme bloğu

2.2. PID Denetleyici ile Kontrol

PID ile kontrol sistemleri iyi bir şekilde bilinen basit yapısı sayesinde günümüz enstitüsünde temel kontrol teknolojisi olarak yaygınca kullanılır. Basit yapısının dışında, geri besleme sağlaması, integral etkisi sayesinde kalıcı durum kaymasını sınırlayabilmesi ve türevsel etkisi ile de geleceği tahmin edebilmesi PID denetleyicinin önemli özelliklerindedir [19,20].

PID hata sinyali $e(t)$ ' yi kontrol işareti $u(t)$ ' ye çeviren doğrusal bir denetleyici olduğu için zaman ve frekans bölgesinde incelenebilir. Denklem 2.1 zaman bölgesindeki $e(t)$ ile $u(t)$ arasındaki ilişkiyi, Şekil 2.4 de PID denetleyicinin blok diyagramını göstermektedir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$



Şekil 2.4 PID denetleyici blok diyagramı

Denklem 2.1 ve Şekil 2.4’ de de gözüken PID denetleyici katsayıları; oransal katsayı K_p , integral katsayı K_i ve türevsel katsayı K_d istenilen sistem performansı elde edilecek şekilde ayarlanarak denetleme yapılır. Bu parametrelerin belirlenmesi aslında Kontrol Sistemlerinin tasarım problemidir. Zaman ve frekans uzaylarında yapılan analiz ve tasarımlarla belirlenirler. Optimum PID denetleyici katsayılarını ayarlamak için kullanılan yöntemlerden bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- Ziegler - Nichols (Z - N) yöntemi
- Cohen - Coon (C - C) yöntemi
- IMC (internal model control) yöntemi
- G - P (gain-phase margin) yöntemi
- Nyquist çizimleri
- Routh-Hurwitz yaklaşımı
- Kutup yerleştirme yöntemi
- Performans ölçütlerinin kullanımı

Son yıllarda PID denetleyiciler Bulanık Mantık denetleyicilerle birlikte kullanılmaya başlanmıştır. Bu kullanım PID parametrelerini rastgele ayarlamak yerine bulanık mantık denetleyici kullanarak ayarlanmaya veya ikisini aynı anda kullanarak ortak bir kontrol sinyali üretmeyi amaçlamaktadır. PID parametrelerinin Bulanık Mantıkla ayarlanması hem diğer yöntemlerle harcanacak zamanı ortadan kaldırdığı hem de sabit bir parametrik değer belirlemek yerine değişken, adaptif yapıda parametre değeri belirleyebildiği için tercih edilmektedir.

2.2.1. Oransal Etki

Oransal denetleyici denetim hatasını doğrusal bir oranla çıkışına aktarır. Denetim hatası

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2.2)$$

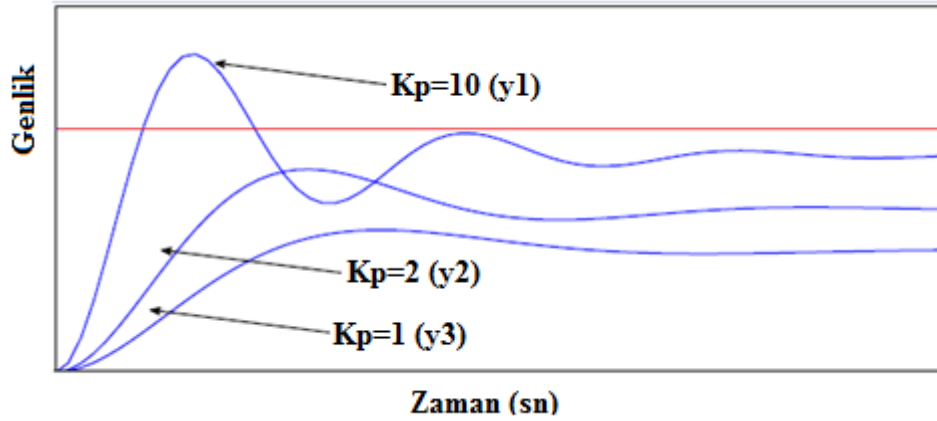
olarak tanımlanırsa oransal denetleyici çıkışı

$$u_p(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.3)$$

olarak ifade edilir.

Herhangi bir $e(t)$ hata işaretine yüksek bir K_p kazancı uygulanması, sistem çıkışında büyük ve hızlı bir değişime yol açar. Eğer K_p kazancı çok yüksek olursa sistem kararsız hale geçebilir. Fakat çok büyük K_p değerine ulaşamaz. Çünkü yükseltici opamp devresi doyuma gider. Çok küçük K_p kazanç değeri de sistemin bozucu faktörlere yavaş cevap vermesine neden olur.

Denetleyici sadece oransal etki gösterecek şekilde çalıştırılırsa tip sıfır sistemler için Şekil 2.5' de de görüleceği üzere kalıcı durum hatası tamamıyla yok edilemez.



Şekil 2.5 Transfer fonksiyonu $9/(s^2+4s+10)$ olan bir sistemin değişik K_p değerlerindeki basamak tepkeleri

2.2.2. İntegral Etki

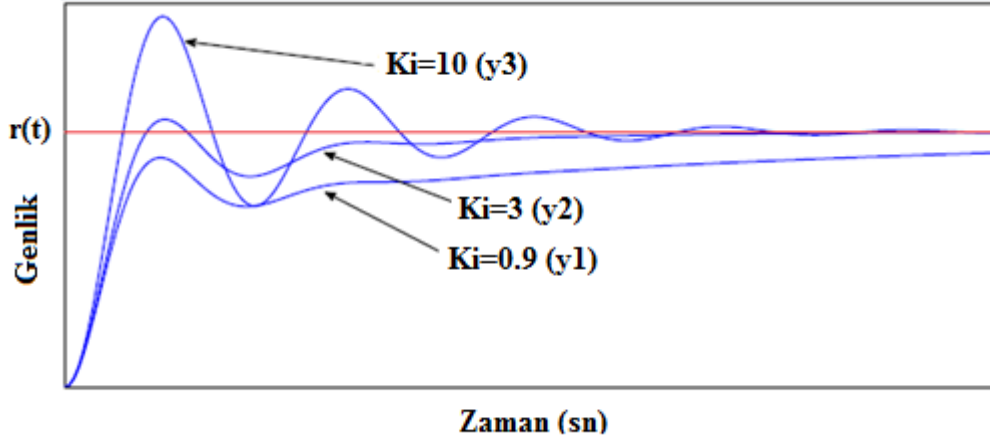
İntegral denetleyici denetim hatasının integralini alarak bir denetim işareti üretir. Denetleyici çıkışı $u_i(t)$ ' nin denklem 2.4' de verilmiştir.

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

Oransal etkinin yanında denetleyiciye integral etki de eklenirse tip sıfır sistemlerde kalıcı durum hatası yok edilecektir. Düşük integral etki, düşük K_i , kalıcı durum hatasını yavaşça yok edecektir. Fakat, K_i kazancı çok yüksek olursa da sistemin basamak girişe

cevabı salınımlı olacaktır. Şekil 2.6 değişik K_i değerlerine göre sistem cevabını göstermektedir.

Günümüzde endüstride kullanılan başlıca denetleyici türlerinden biri PI' dır [20].



Şekil 2.6 Transfer fonksiyonu $9/(s^2+4s+10)$ olan bir sistemin değişik K_i değerlerindeki basamak tepkeleri

2.2.3. Türevsel Etki

Türev denetleyici denetim hatasının türevini alarak bir denetim işareti üretir. Dolayısıyla hata zamanla değiştiği sürece türev denetleyici de bir çıkış üretir. Sürekli çalışma hatasında çıkış üretmez. Bu özelliği ile daha çok geçici durum performansı üzerinde etkilidir. Hatada değişim olduğunda çıkış ürettiği için konum kontrolü gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Türev denetleyicinin çıkış işareti

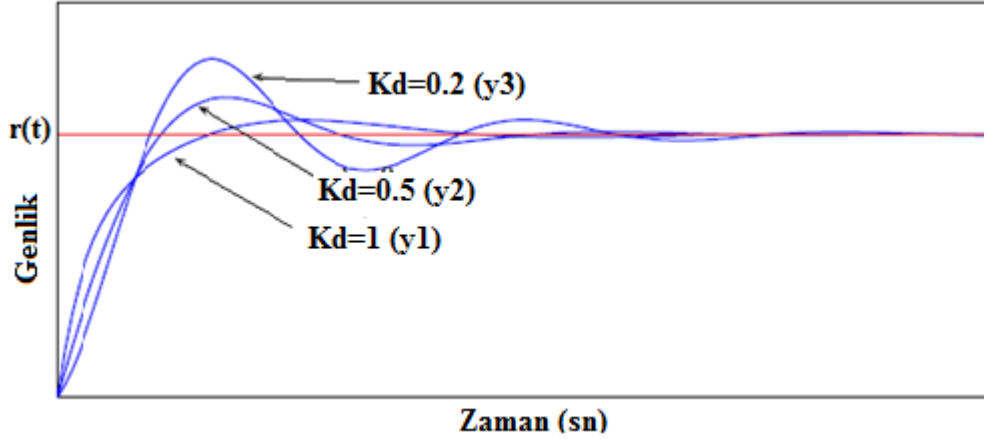
$$u_d = K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.5)$$

denklemleri ile ifade edilir. Türev alıcı devre gerçek uygulamalarda çıkış işaretine gürültü ekler. Giriş işaretindeki küçük salınımla çıkışa gürültü olarak aktarılır. Bu istenmeyen bir durum olduğundan türev alıcı devre uygulamada mümkün olduğunca kullanılmaz. Doğrudan türev alıcı devre yerine zaman sabiti çok küçük olan ve denklem 2.6' daki transfer fonksiyonu ile temsil edilebilen devreler kullanılır.

$$u_d(s) = \frac{K_D s}{1+s\tau} \quad (2.6)$$

Bu denklemde τ çok küçük olduğundan devre türev alıcı gibi davranırken gürültü etkisini de azaltır.

Geçici durum bölgesinde çıkış ürettiği için özellikle salınım ve aşmaların bastırılmasında etkilidir. İdeal türev denetleyicinin ikinci dereceden sönümlü bir sistem üzerindeki etkisi Şekil 2.7' de görülmektedir.



Şekil 2.7 Transfer fonksiyonu $9/(s^2+4s+10)$ olan bir sistemin değişik K_D değerlerindeki basamak tepkeleri

Oransal (P), integral (I) ve türev (D) denetleyiciler kendi aralarında birleştirilerek PI, PD, PID denetleyiciler oluşturulur.

PID denetleyicilerin yanısıra kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan iki tür denetleyici daha bulunmaktadır. Bunlar, faz ilerletici ve faz geriletici etki yapan Lead/Lag kompanseörler olarak isimlendirilir ve denklem 2.7 ile ifade edilir.

$$C(s) = K \frac{1+s\tau_1}{1+s\tau_2} \quad (2.7)$$

Burada K denetleyici kazancı, τ_1 ve τ_2 sırasıyla faz ilerletici ve faz geriletici zaman sabitleridir. $\tau_1 > \tau_2$ ise faz ilerletici, $\tau_1 < \tau_2$ ise faz geriletici etki oluşur.

Kontrol sistemlerinin fazını ileri veya geri alarak kararlılık marjinalarını iyileştirilmesinde etkin olarak kullanılırlar.

2.3. Bulanık Mantık ile Kontrol

2.3.1. Giriş

Proföser Lotfi A. Zadeh tarafından 1965 yılında ortaya atılan Bulanık Mantık (BM) teorisine göre insan düşüncesi 0 ve 1 ile temsil edilen mantık teorisine yeterli bir şekilde ifade edilememektedir [21]. Bulanık mantık teorisine göre kesin değerler yerine az, çok, sıcak, soğuk, uzun, kısa gibi belirsiz, kesinlik içermeyen durumların kullanılması gerekir.

1975 yılında Ebrahim Mamdani yaptığı buhar makinesinin kontrolünde bulanık mantık kullanarak bulanık mantık ile kontrolü gerçekleştirmiştir [22].

Matematiksel olarak ifade edilemeyen, doğrusal olmayan karmaşık problemlerin veya belirsizlik içeren problemlerin çözümünde bulanık mantık kullanmanın avantaj sağlayacağı bugüne kadar yapılan birçok çalışmada gösterilmiştir [23]. Belirsizlik içermeyen verilerin temsilinde ve kesin matematiksel ifadeleri bulunan problemlerin çözümünde bulanık mantık kullanımı gerekmez..

2.3.2. Bulanık Mantık Teorisi

Klasik küme teorisinde, küme elemanlarına 0 veya 1 üyelik derecesi, μ_c , atanarak o kümeye ait olup olmadıkları belirtilir. Örnek olarak GENÇ, ORTA YAŞLI ve YAŞLI diye 3 farklı küme ele alalım. Küme elemanları;

$$\mu_c(x) = \begin{cases} \text{GENÇ, } x < 25 \text{ için} \\ \text{ORTA YAŞLI, } 25 \leq x \leq 50 \text{ için} \\ \text{YAŞLI, } x > 50 \text{ için} \end{cases}$$

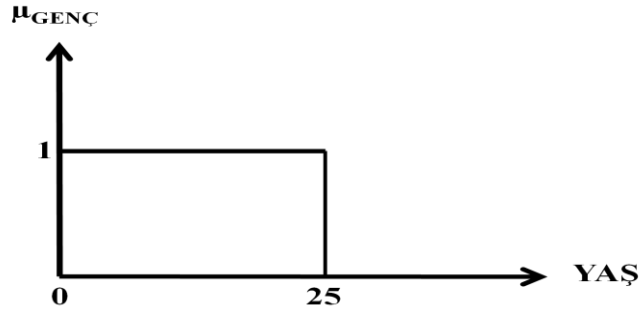
ile ifade edilsin. 25 yaşındaki bir kişi “orta yaş” grubuna girerken, 24 yaşındaki bir kişi “genç” grubuna girmektedir. Veya 50 yaşındaki bir kişi “orta yaş” grubuna girerken “51 yaşındaki bir kişi “yaşlı” grubuna girmektedir. Her iki grup arasında bu kadar hızlı geçiş olmaması için üyelik derecesinin 0 ile 1 arasında da atanması gerekir.

Klasik kümenin aksine bulanık küme kesin sınırlara ve kesin üyelik derecesine sahip değildir. Bulanık kümeler arasındaki geçiş yumuşaktır ve süreklilik arz eder. Bulanık küme üyelik derecesi, μ_B 0 ile 1 arasında değerler alır [21].

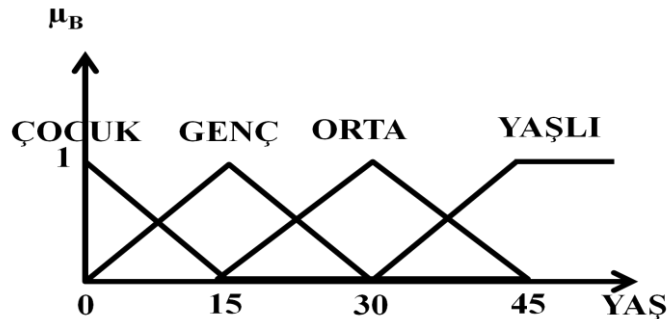
$$0 \leq \mu_B \leq 1 \quad (2.8)$$

Şekil 2.8 deki klasik küme ele alındığında 24 yaşındaki biri "genç" kümesine girmektedir.

Şekil 2.9 deki bulanık küme ele alındığında 24 yaşındaki biri hem "genç" hem de "orta yaş" grubuna farklı üyelik değerleriyle girmektedir. Yaş 0' dan 15'e doğru ilerledikçe "çocuk" grubu tam üyelikten sıfır üyeliğe ilerlerken "genç" grubu da sıfır üyelikten tam üyeliğe doğru üçgen üyelik fonksiyonu kullanıldığı için doğrusal bir şekilde ilerlemektedir.



Şekil 2.8 GENÇ klasik kümesinin üyelik fonksiyonu



Şekil 2.9 ÇOCUK, GENÇ, ORTA ve YAŞLI bulanık kümesinin üyelik fonksiyonu

2.3.2.1. Üyelik Fonksiyonları

Üyelik fonksiyonları, içerdiği değer aralığındaki elemanın o bulanık kümeyle olan üyelik derecesini verir. x-ekseni sözel değişkenlerin sınır noktalarını verirken, y-ekseni sözel değişkenler için üyelik değerlerini gösterir. Üçgen, yamuk, çan eğrisi, gauss, sigmoid sıkça kullanılan üyelik fonksiyon türleridir.

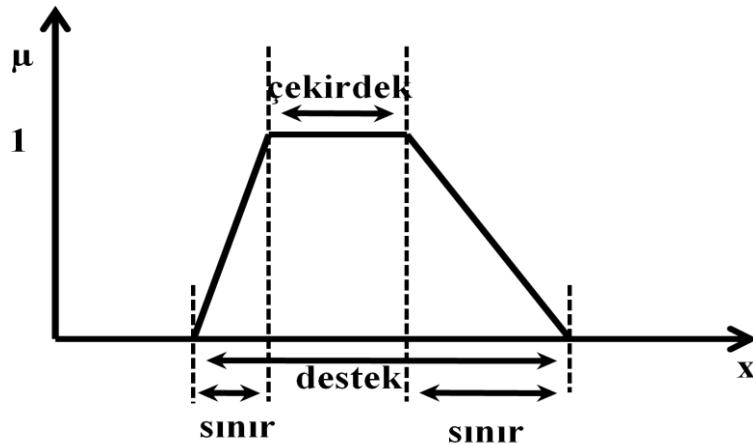
Üyelik fonksiyonlarının türü, sayısı ve sınır aralıkları kullanıcı tarafından sistem performansı göz önünde bulundurularak kendi deneyim ve bakış açısına göre belirlenir. Aynı problemin çözümünde farklı sayıda, farklı türde ve farklı sınır aralıklarında üyelik fonksiyonu kullanılabilir. Tek sayıda bulanık küme kullanarak bir bulanık kümeyi ortaya koymak, bulanık kümeleri simetrik olarak dağıtmak, bulanık küme sınırlarını belirlerken kümelerin kesişmesini göz önünde bulundurmamak sistem performansını belirlerken önemlidir.

Üyelik fonksiyonları çekirdek, destek ve sınır olmak üzere 3 kısımdan oluşur. (Şekil 2.10)

Çekirdek: Belirlenen uzayda bulanık kümenin tam üyelik gösterdiği bölge olarak tanımlanmaktadır. ($\mu(x) = 1$). Bu bölge bulanık değildir.

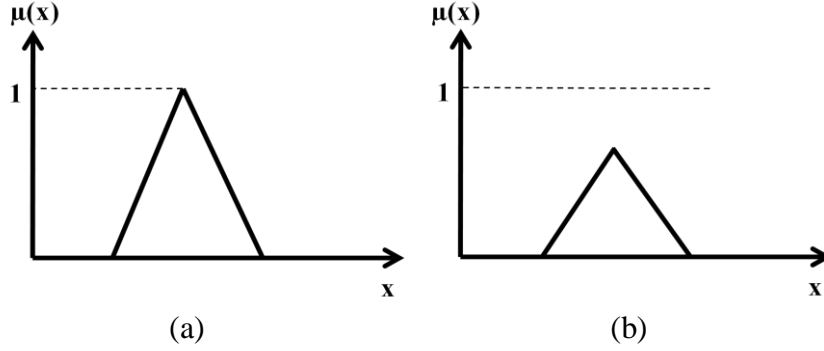
Destek: Bulanık kümede üyelik değeri 0 olmayan bölge olarak tanımlanmaktadır. ($\mu(x) > 0$).

Sınır: Bulanık kümede üyelik değeri 0 ile 1 arasında olunan bölge olarak tanımlanır. ($0 < \mu(x) < 1$). Bu bölge bulanıktır.



Şekil 2.10 Üyelik fonksiyon kısımları

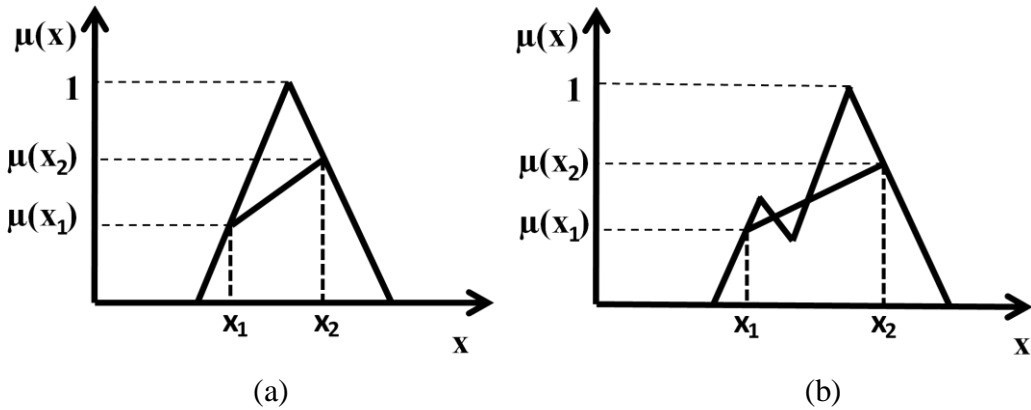
Üyelik fonksiyonu içerisinde, en az bir elemanın üyelik derecesi 1 olan bulanık kümeye normal bulanık küme, bu şartı sağlamayan kümeye de alt normal bulanık küme denir. Şekil 2.11 normal ve alt normal bulanık kümeleri göstermektedir.



Şekil 2.11. (a) normal bulanık küme, (b) alt normal bulanık küme

Bulanık küme kapsamındaki bütün kesin değerlerin o bulanık kümenin herhangi iki noktasını birleştiren doğru üzerinde üyelik dereceleri mevcutsa bu tür bulanık kümelere dış bükey küme denir. Bu koşulu sağlamayan kümeler de dış bükey değildir. Bükeylik denklem 2.9 ile belirlenir. Şekil 2.12' de bükey ve bükey olmayan bulanık kümelere örnek gösterilmektedir.

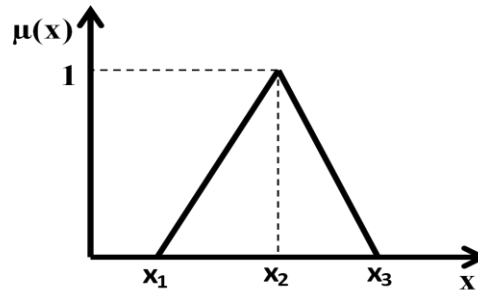
$$\mu_A[\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2] \geq \min[\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)] \quad (2.9)$$



Şekil 2.12. (a) bükey bulanık küme, (b) bükey olmayan bulanık küme

Üçgen Üyelik Fonksiyonu: Bu tip üyelik fonksiyonu $\{ x_1, x_2, x_3 \}$ gibi üç parametreyle tanımlanır. Denklem 2.10 üçgen üyelik fonksiyonu denklemini, Şekil 2.13 de üçgen üyelik fonksiyonunun şeklini göstermektedir.

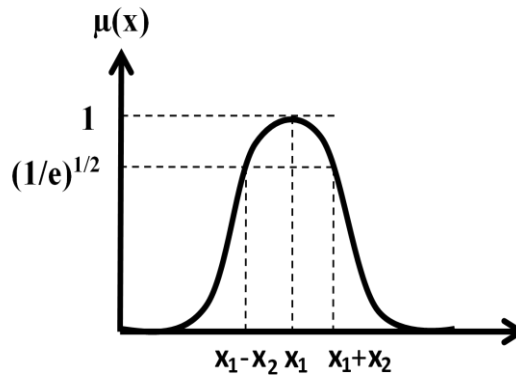
$$\mu(x, x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} 0, & x \leq x_1 \\ \frac{x-x_1}{x_2-x_1}, & x_1 \leq x \leq x_2 \\ \frac{x_3-x}{x_3-x_2}, & x_2 \leq x \leq x_3 \\ 0, & x_3 \leq x \end{cases} \quad (2.10)$$



Şekil 2.13. Üçgen üyelik fonksiyonu

Gauss Üyelik Fonksiyonu: Bu tip üyelik fonksiyonu $\{ x_1, x_2 \}$ gibi iki parametreyle tanımlanır. Denklem 2.11 gauss üyelik fonksiyonu denklemini, Şekil 2.14 de gauss üyelik fonksiyonunun şeklini göstermektedir.

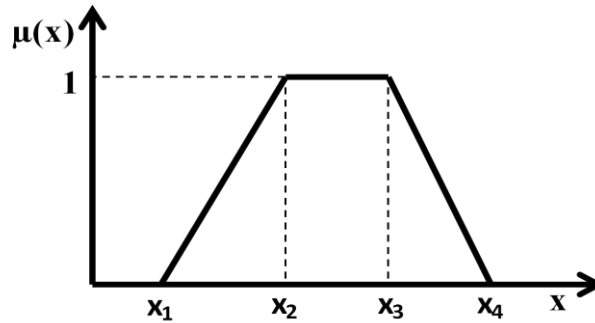
$$\mu(x, x_1, x_2) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_1}{x_2}\right)^2} \quad (2.11)$$



Şekil 2.14. Gauss üyelik fonksiyonu

Yamuk Üyelik Fonksiyonu: Bu tip üyelik fonksiyonu $\{ x_1, x_2, x_3, x_4 \}$ gibi dört parametreyle tanımlanır. Denklem 2.12 yamuk üyelik fonksiyonu denklemini, Şekil 2.15 de yamuk üyelik fonksiyonunun şeklini göstermektedir.

$$\mu(x, x_1, x_2, x_3, x_4) = \begin{cases} 0, & x \leq x_1 \\ \frac{x-x_1}{x_2-x_1}, & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 1, & x_2 \leq x \leq x_3 \\ \frac{x_4-x}{x_4-x_3}, & x_3 \leq x \leq x_4 \\ 0, & x_4 \leq x \end{cases} \quad (2.12)$$



Şekil 2.15. Yamuk üyelik fonksiyonu

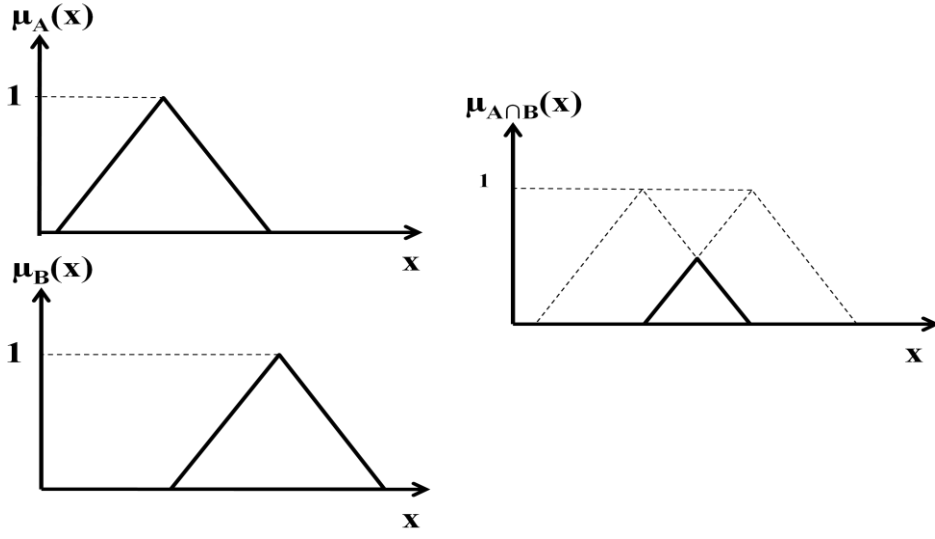
2.3.2.2. Bulanık Küme İşlemleri

Bulanık kümelerde de klasik kümelerde olduğu gibi kesişim, birleşim ve tümeleme işlemleri vardır.

Kesişim İşlemi: x değişken olmak üzere, $\mu_A(x)$ ve $\mu_B(x)$ üyelik fonksiyonlarına sahip olan A ve B gibi iki bulanık kümenin kesişmesi farklı bir C bulanık kümesi oluşturur. Denklem 2.13 kullanılarak elde edilen küme Şekil 2.16' da gösterilmiştir.

$$\mu_C(x) = \min[\mu_A(x) , \mu_B(x)] \quad (2.13)$$

Denklem içerisinde kullanılan işlem, min işlemidir.

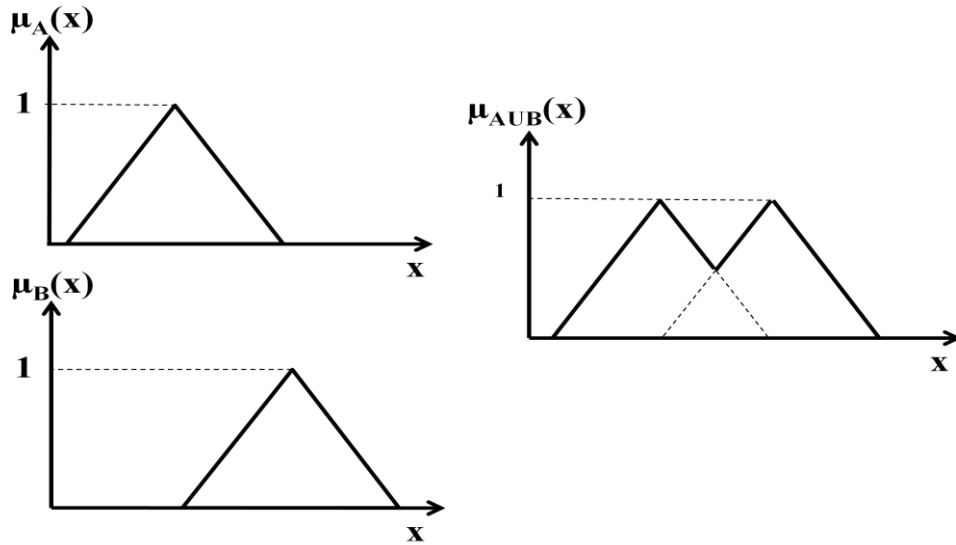


Şekil 2.16. Bulanık kümelerde kesişim işlemi

Birleşim İşlemi: x değişken olmak üzere, $\mu_A(x)$ ve $\mu_B(x)$ üyelik fonksiyonlarına sahip olan A ve B gibi iki bulanık kümenin birleşimi farklı bir C bulanık kümesi oluşturur. Denklem 2.14 kullanılarak elde edilen küme Şekil 2.17' de gösterilmiştir.

$$\mu_C(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.14)$$

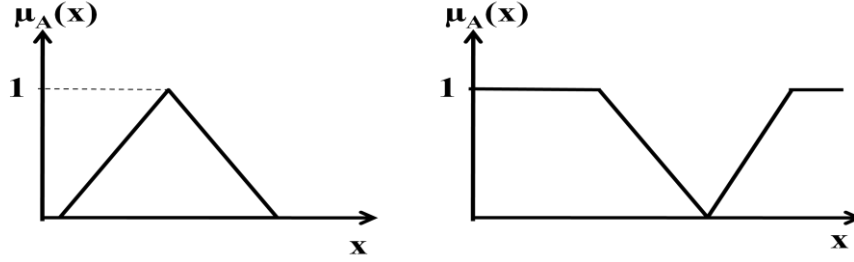
Denklem içerisinde kullanılan işlem, max işlemidir.



Şekil 2.17 Bulanık kümelerde birleşme işlemi

Değilleme İşlemi: $\mu_A(x)$ üyelik fonksiyonuna sahip A bulanık kümenin tümleyeni \bar{A} ile gösterilmekte olup üyelik fonksiyonu aşağıda verilmiştir. Denklem 2.15 kullanılarak elde edilen küme Şekil 2.18' de gösterilmiştir

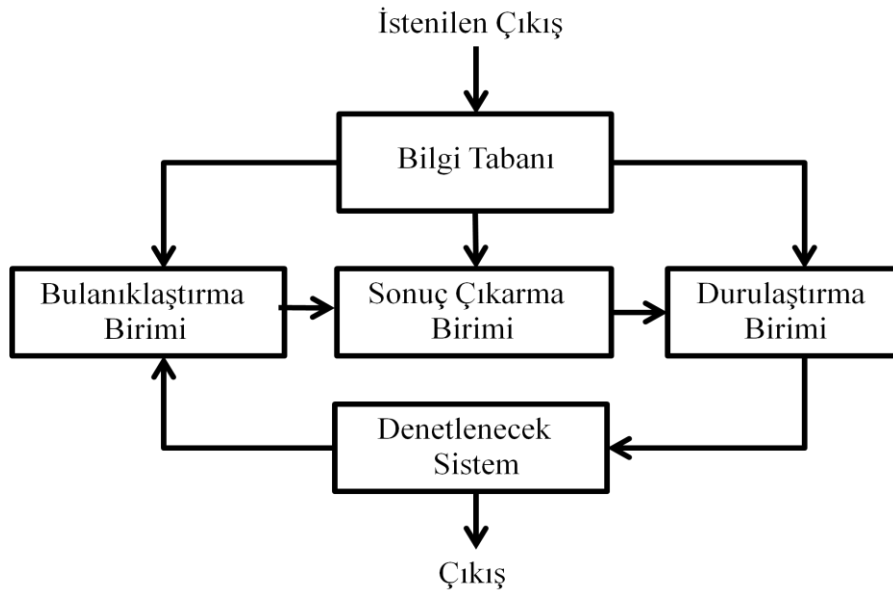
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.15)$$



Şekil 2.18 Bulanık kümelerde değilleme işlemi

2.3.2.3. Bulanık Mantık Kontrol

Bulanık mantık denetleyici bulanıklaştırma birimi, bilgi tabanı, sonuç çıkarma birimi ve durulaştırma birimi olmak üzere dört ana birimden oluşur. Bu dört ana birimin kendi aralarında ve kontrol edilecek sistem ile olan ilişkileri Şekil 2.19.' de gösterilmektedir.



Şekil 2.19. Bulanık mantık denetim şeması

2.3.2.3.1. Bulanıklaştırma Birimi

Sayısal yani kesin olan giriş verisinin sözel ifadelere dönüştürerek bulanıklaştırılmasının yapıldığı birimdir. Sözel ifadeye dönüştürülmüş olan veriye, bulunduğu bulanık küme içerisinde bir üyelik değeri ve bu küme dışında sıfır üyelik değeri atanır. Bu atama işlemi üyelik fonksiyonuyla yapılır. Sistem performansının yüksek olması için uygun üyelik fonksiyonu seçilmelidir.

Bulanık kural tablosu bulanıklaştırma biriminin oluşturduğu sözel ifadeleri kullanır.

2.3.2.3.2. Bilgi Tabanı

Bilgi tabanı, bulanıklaştırma birimi, sonuç çıkarma birimi ve durulaştırma biriminin düzgün çalışabilmesi için gerekli olan bilgileri içerir.

Bilgi tabanı kendi içinde veri tabanı ve kural tabanı olmak üzere ikiye ayrılır. Bulanık parametrelerin tanımlanması, her bir değişken için üyelik fonksiyonlarının tanımlanması veri tabanında gerçekleştirilirken, sözel kontrol kuralları da kural tabanında tutulur.

2.3.2.3.3. Sonuç Çıkarma Birimi

Sonuç çıkarma birimi, bulanıklaştırma biriminin oluşturduğu insan kararına benzeyen bulanık ifadelerden, kural tablosu sayesinde anlam çıkarma yeteneğine sahiptir. Kısacası, bulanık mantık kontrolün beynidir.

2.3.2.3.4. Durulaştırma Birimi

Durulaştırma birimi, sonuçlandırılmış bulanık kontrol eyleminden kesin yani sayısal kontrol eyleminin üretilmesini sağlar

2.3.2.4. Bilgi Tabanı ve Kural Tablosu

Veri tabanı, sözel değişkenlerin ve üyelik fonksiyonlarının tanımlandığı yerdir. Kural tablosu, oluşan koşullarda uygulanacak kuralları içerir.

Bir kural aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

Eğer $x_1=N$ ve $x_2=S$ ise, $u=N$ dir.

Yukarıdaki kuralda x_1 ve x_2 giriş değişkenlerini, u ise bulanık mantık denetleyicisinin çıkış değişkenini temsil eder. N ve S ise üyelik fonksiyonunu oluşturan bulanık kümelerin ikisidir.

Kural tablosunun oluşturulmasına örnek olarak giriş uzayları için 5 sözel değişken, çıkış uzayı içinde 7 sözel değişken seçelim.

Giriş uzayı için sözel değişkenler : { Pozitif büyük (PB), Pozitif küçük (PK), Sıfır (S), Negatif küçük (NK), Negatif büyük (NB)}

Çıkış uzayı için sözel değişkenler : { Pozitif çok büyük (PÇB), Pozitif büyük (PB), Pozitif küçük (PK), Sıfır (S), Negatif küçük (NK), Negatif büyük (NB), Negatif çok büyük (NÇB)}

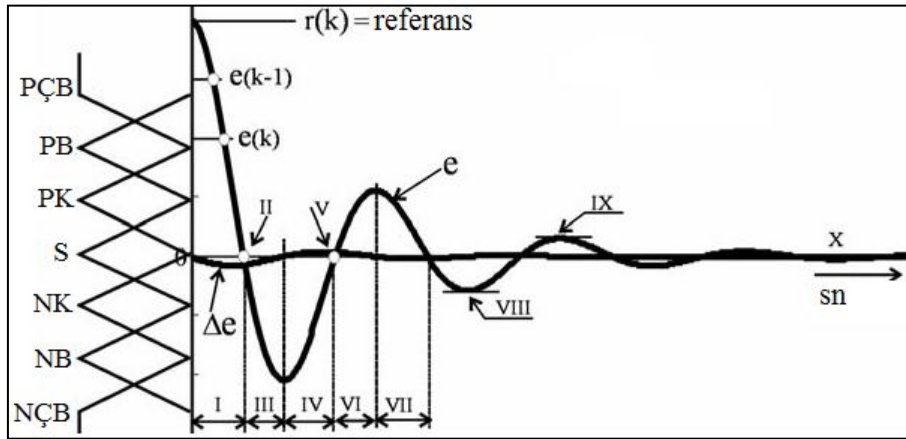
Bu örnekte her bir giriş için 5 değişken olduğu için toplamda 25 kural vardır. Bu kurallar, verilen kontrol hedeflerine bağlı olarak uzmanlar tarafından insan karar mekanizması ışığında oluşturulur. Tablo 2.1 oluşturulan kural tablosunu göstermektedir.

Tablo 2.1 Kural tablosu

$X_2 \backslash X_1$	PB	PK	S	NK	NB
PB	PÇB	PB	PK	PK	S
PK	PB	PK	PK	S	NK
S	PK	PK	S	NK	NK
NK	PK	S	NK	NK	NB
NS	S	NK	NK	NB	NÇB

Tablo 2.1 deki kural tablosunun oluşturulması aşağıdaki örnekle açıklanabilir.

Tablo 2.1 sistemin minimum hatada ve hızlı cevap vermesini sağlayacak şekilde ayarlanır. Denetleyici çıkışındaki değişim, Δu , 1. giriş uzayı hata ve 2. giriş uzayı hata değişimine göre azaltılarak veya artırılarak istenen sistem davranışı elde edilir. Yani hata ve hata değişimini gözlemleyerek Δu değişimine karar verilir. Şekil 2.20 ikinci dereceden salınımlı bir sistemin hata, e , ve hata değişimi, Δe ' nin zaman alanındaki değişimini göstermektedir.[24]



Şekil 2.20. Hata ve hata değişiminin zamana göre grafiği .[24]

Roma rakamlarıyla gösterilen bölgeler incelenecek olursa e ve Δe ' nin durumuna göre gerekli olan Δu aşağıdaki gibi belirlenir.

Bölge 1: e '+' ve Δe '-'. Hata pozitif ve sıfıra doğru azalıyor. Bu durumda Δu hatayı azaltmak için pozitif olur.

Bölge 2: e '0' ve Δe '-'. Hata sıfır fakat negatif yönde artış gösteriyor. Bu durumda Δu hatayı azaltmak için negatif olur.

Bölge 3: e '-' ve Δe '-'. Hata negatif ve artıyor. Bu durumda Δu hatayı azaltarak sıfıra götürmek için negatif olur.

Bölge 4: e '-' ve Δe '+'. Hata yine negatif fakat azalıyor. Bu durumda negatif Δu negatif hatayı azaltmak için uygulanmaya devam edilir.

Bölge 5: e '0' ve Δe '+'. Hata sıfır fakat pozitif yönde artış gösteriyor. Bu durumda Δu hatayı azaltmak için pozitif olur.

Bölge 6: e '+' ve Δe '+'. Hata pozitif ve artıyor. Bu durumda Δu hatayı azaltmak için pozitif olur.

Bölge 7: e '+' ve Δe '-'. Hata pozitif ve sifira doğru azalıyor. Bu durumda Δu hatayı azaltmak için pozitif olur.

Bölge 8: e '-' ve Δe '0'. Hata negatif ve Δe sıfır olduğu için değişmiyor. Bu durumda Δu hatayı azaltmak için negatif olur.

Bölge 9: e '+' ve Δe '0'. Hata pozitif ve Δe sıfır olduğu için değişmiyor. Bu durumda Δu hatayı azaltmak için pozitif olur.

Bölge 9: e '0' ve Δe '0'. Hata ve hata değişimi sıfır. Bu durumda sistem çıkışında herhangi bir değişikliğe ihtiyaç olmadığından Δu sıfır olur.

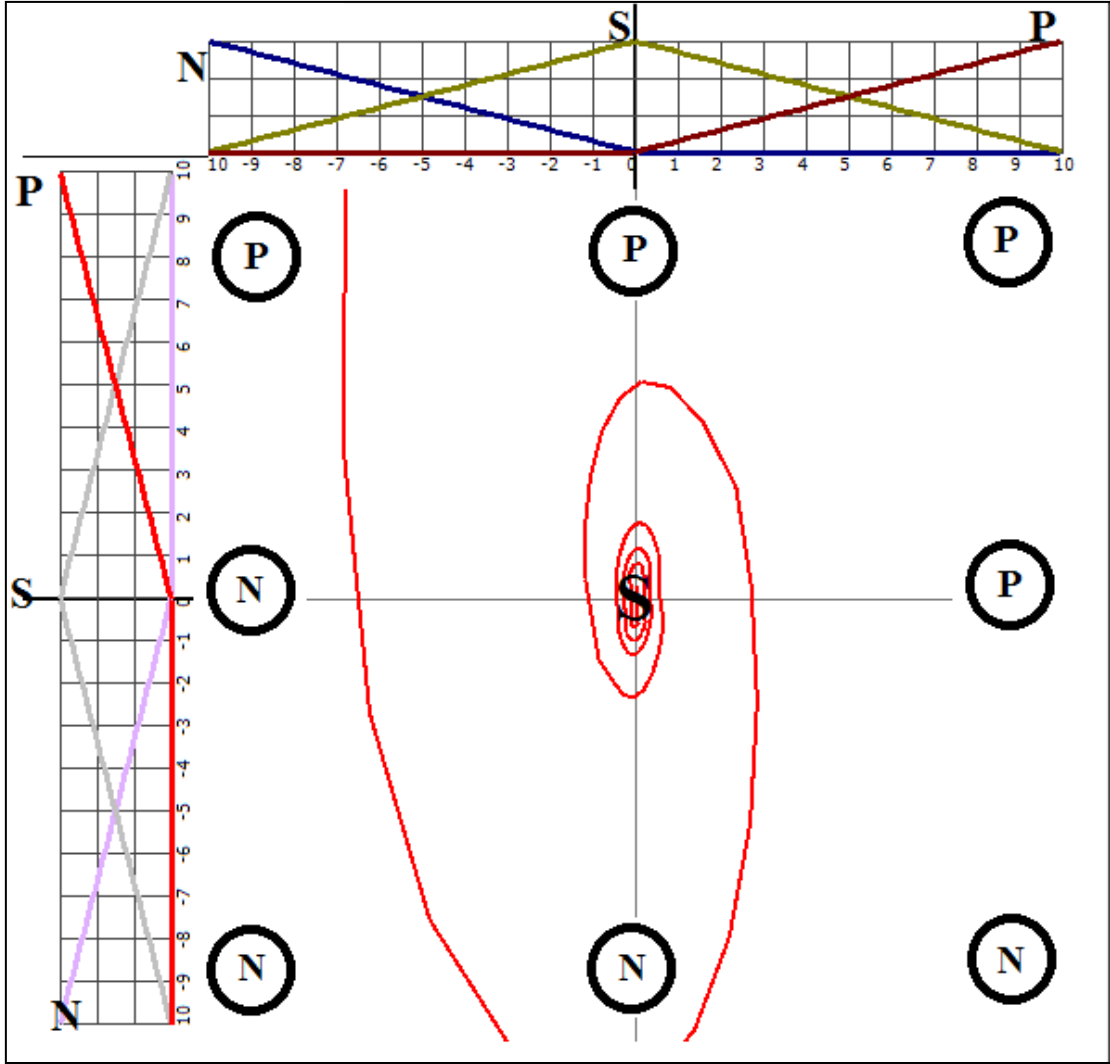
Her bölgenin e, Δe ve Δu işaretleri tablo 2.2 de gösterilmektedir.

Tablo 2.2 e, Δe ve Δu işaretleri

Bölgeler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
e	+	0	-	-	0	+	+	-	+	0
Δe	-	-	-	+	+	+	-	0	0	0
Δu	+	-	-	-	+	+	+	-	+	0

Yukarıdaki incelemelerden çıkan sonuç özetle şöyledir: Eğer hata sıfırsa Δu ' nun işareti Δe ' nin işaretiyle aynıdır. Diğer durumlarda Δu ' nun işareti e' nin işareti ile aynıdır.

Bu elde edilen sonuç Şekil 2.21' da olduğu gibi hata - hata değişim grafiğine de uygulanabilir. Şekil 2.21 P, S ve N olmak üzere 3 ayrı üyelik fonksiyonu içerir.



Şekil 2.21. Hata ve hata değişim grafiği ile kural tablosu oluşturulması

2.3.2.5. Sonuç Çıkarma

Bulanıklaştırma işlemi, sayısal değerlerin bulanık küme sözel ifadeleri için üyelik derecesine dönüştürülmesidir. Her sözel ifadeye üyelik derecesi ataması için üyelik fonksiyonu kullanılır. Sonuç çıkarma işlemi ise, giriş değerlerine göre kural tablosunun kullanılarak bulanık bir sonuç çıkarılmasıdır. Çıkan sonuç, yüksek değerli doğru kural sayısından etkilenir.

Bulanıklaştırma ve sonuç çıkarma işlemini daha iyi bir şekilde ifade etmek için bir örnek verelim. Hata (e) ve hata değişiminin (Δe) N (negatif) ve S (sıfır) bulanık kümelerin kesişim aralığında nümerik değerlere sahip olsun. e ve Δe ' nin bu değerleri kural tablosundaki kurallara göre değerlendirildiğinde aşağıdaki dört kuralın çalıştığı görülür.

Eğer $e=N$ ve $\Delta e =S$ ise, $\Delta u=N$ dir.

Eğer $e=S$ ve $\Delta e =S$ ise, $\Delta u=S$ dir.

Eğer $e=N$ ve $\Delta e =N$ ise, $\Delta u=N$ dir.

Eğer $e=S$ ve $\Delta e =N$ ise, $\Delta u=N$ dir.

Çalıştırılan kurallar sonrasında sonuç çıkarımı için maks-min, maks-çarpım ve Takagi- Sugeno – Kang metotları endüstriyel bulanık mantık denetleyicilerinde en çok kullanılan metotlardır.

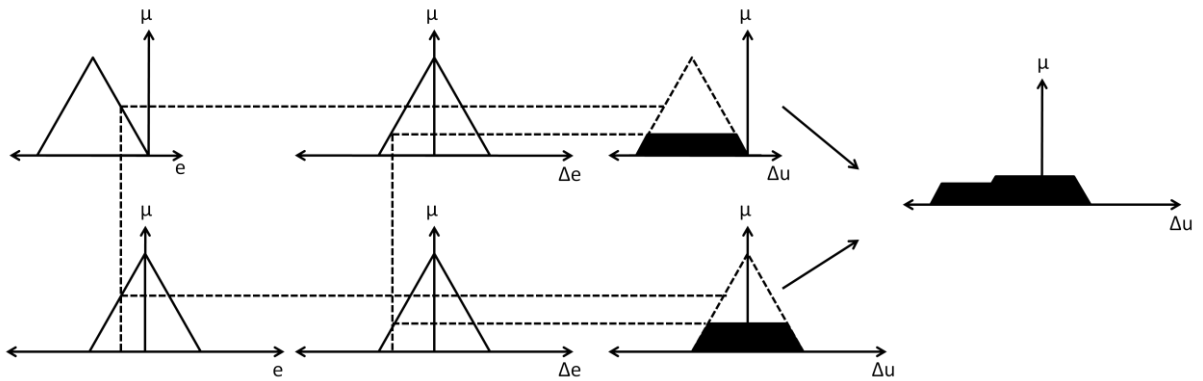
2.3.2.5.1. Maks - Min Metodu ile Sonuç Çıkarma

Bu metodun diğer bir adı da Mamdani sonuçlandırma metodudur. Maks-min metoduyla sonuç çıkarma işlemi yapılırken denklem 2.16 ve denklem 2.17 gerçekleştirilir.

$$\mu(y_j) = \min(\mu(x_1), \mu(x_2), \dots, \mu(x_n)) \quad (2.16)$$

$$\mu_{\text{çıkış}}(y) = \bigcup_{j=1}^r (\mu(y_1), \mu(y_2), \dots, \mu(y_r)) \quad (2.17)$$

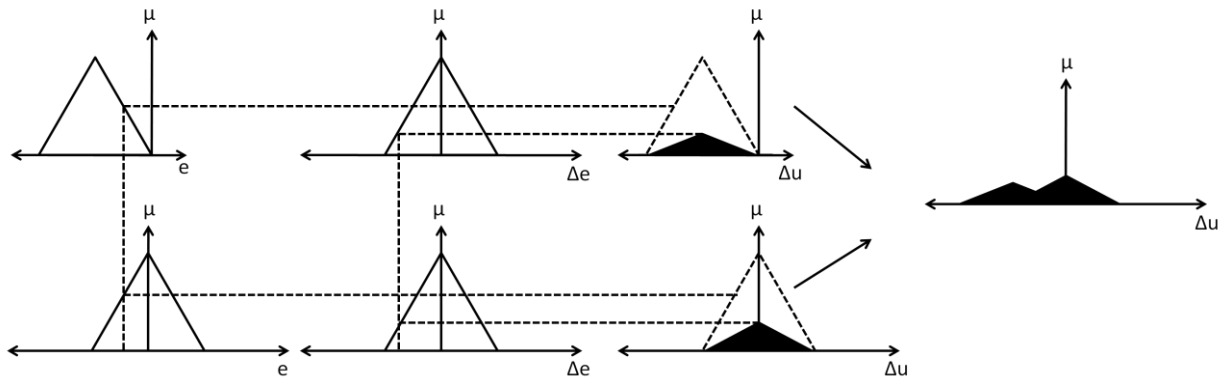
Yukarıda oluşturulan kurallardan ilk ikisi kullanılarak yapılan sonuç çıkarma işlemi Şekil 2.22’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.22 Maks-min e göre sonuç çıkarma

2.3.2.5.2. Maks - Çarpım Metodu ile Sonuç Çıkarma

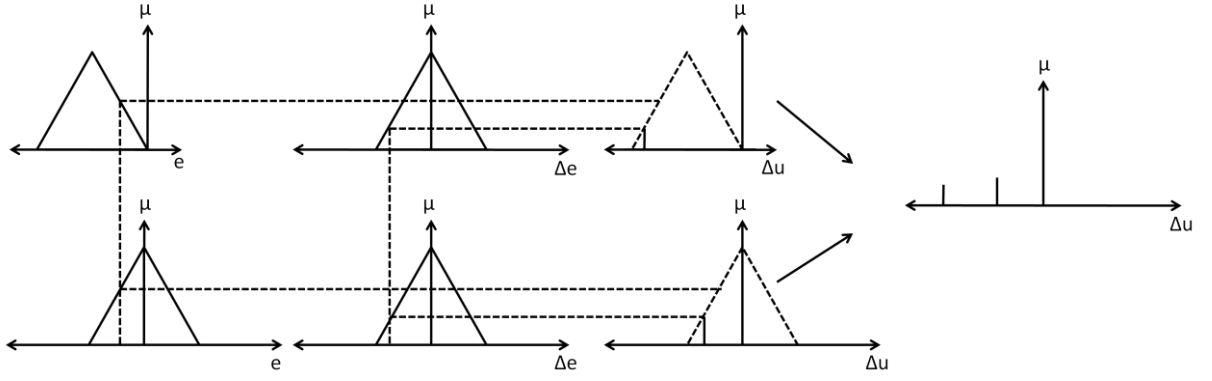
Bu yöntemin diğer bir adı da Lusing Larson metodudur. Bu metodun maks – min metodundan farkı denklem 2.17' yi farklı oluşturmasıdır. Her bir kuralın çıkış üyelik fonksiyonu Şekil 2.22' deki gösterildiği gibi tepeden kesilmek yerine, Şekil 2.23' de gösterildiği gibi [0-1] arasındaki ağırlık katsayısı ile çarpılarak merkeze doğru daraltılır ve normal altı bir kümeye dönüştürülür. Daraltılan sonuç üçgenin tepe değeri çarpımda kullanılan ağırlık katsayısı ile aynı olur.



Şekil 2.23 Maks-çarpım a göre sonuç çıkarma

2.3.2.5.3. Takagi- Sugeno – Kang Metodu ile Sonuç Çıkarma

Bu metodun maks-min ve maks-çarpım metodlarına göre farkı çıkış üyelik fonksiyonunun sabitlerden oluşması veya girişlerle doğrusal bir ilişkiye sahip olmasıdır. Eğer çıkış üyelik fonksiyonu, sabitlerden oluşuyorsa sıfırıncı dereceden Sugeno Metodu, girişlerle doğrusal bir ilişkiye sahipse birinci dereceden Sugeno Metodu denir. Şekil 2.24 sıfırıncı dereceden Sugeno metodu kullanılarak yapılan sonuç çıkarma işlemini göstermektedir.



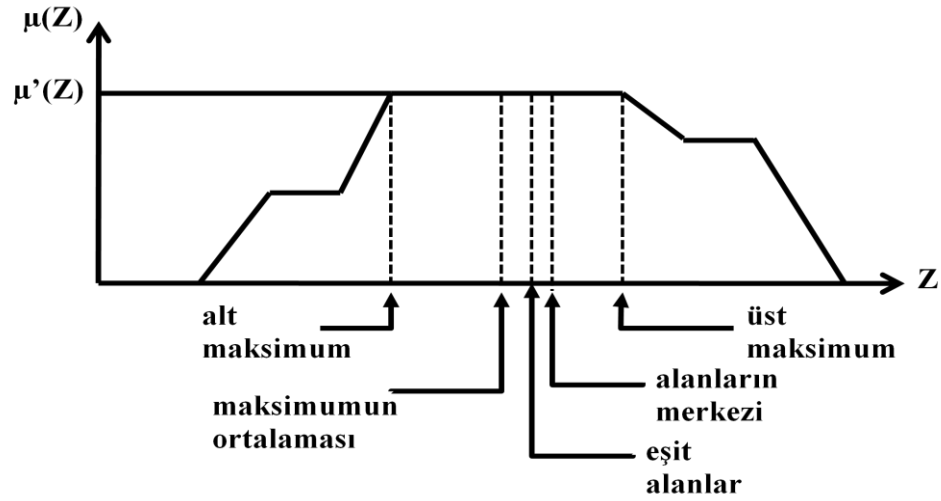
Şekil 2.24 Sıfırıncı dereceden Sugeno metoduna göre sonuç çıkarma

2.3.2.6. Durulaştırma

Uygun bir metotla bulanık sonuç çıkarma işlemi gerçekleştirildiğinde oluşan sonuç yani çıkış değeri bulanık bir kümedir. Elde edilen bu bulanık sonuç kümesinin nümerik yani kesin çıkış değerine dönüştürülmesi işlemine durulaştırma denir. Literatürde durulaştırma işlemi gerçekleştirilmek için birbirlerine karşı üstünlükleri olan birçok sayıda yöntem vardır. Fakat bu yöntemlerin seçimi için herhangi bir izlek yoktur. Sık kullanılan bazı durulaştırma metotları aşağıda sıralanmıştır.

- Maksimum yöntemi
- Eşit alanlar yöntemi
- Alanların merkezi yöntemi
- Ağırlıkların merkezi yöntemi

Şekil 2.25 yukarıda sıralanan durulaştırma yöntemlerini kabaca göstermektedir.



Şekil 2.25 Durulaştırma yöntemlerinin kabaca gösterilmesi

Maksimum Yöntem : Sonuç çıkarma işleminin ardından oluşan bulanık kümenin en yüksek dereceli elemanı kesin sonucu oluşturmak için kullanılır. Bu yöntem kendi içinde üç değişik yönteme ayrılarak, en yüksek dereceli elemanın birden fazla noktada maksimum değerinin olması durumunda oluşabilecek karar verme zorluğunu ortadan kaldırmaktadır. Örneğin, sonuç çıkarma işleminde maks-dot yöntemi kullanılmış ve çıkışta üçgen üyelik fonksiyonu elde edilmişse, bu üyelik fonksiyonun en yüksek dereceli elemanı üçgenin tepe noktasıdır. Fakat Şekil 2.25 ele alındığında en yüksek dereceli elemanı birden fazla nokta içermektedir. Bu durumda aşağıdaki yöntemlerden herhangi biri kullanılır.

1- Alt maksimum noktasının seçilir.

2- Üst maksimum noktasının seçilir.

3- Maksimuma ulaşan x tane nokta varsa maksimumların ortalaması denklem 2.18 deki gibi hesaplanarak kesin çıkış olarak kullanılır.

$$\text{Maksimumların ortalaması} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu'(Z_i)}{x} \quad (2.18)$$

Eşit Alanlar Yöntemi: Bu metot da Şekil 2.22' ye göre Z değeri bulanık kümeyi iki eşit alana ayıran nokta denklem 2.19 kullanılarak hesaplanır.

$$\int_{z_1}^{z_{EA}} \mu'(Z) dz = \int_{z_{EA}}^{z_2} \mu'(Z) dz \quad (2.19)$$

z_1 ve z_2 bulanık kümenin sınır değerleri z_{EA} ise bulanık kümeyi iki eşit alana bölen değerdir.

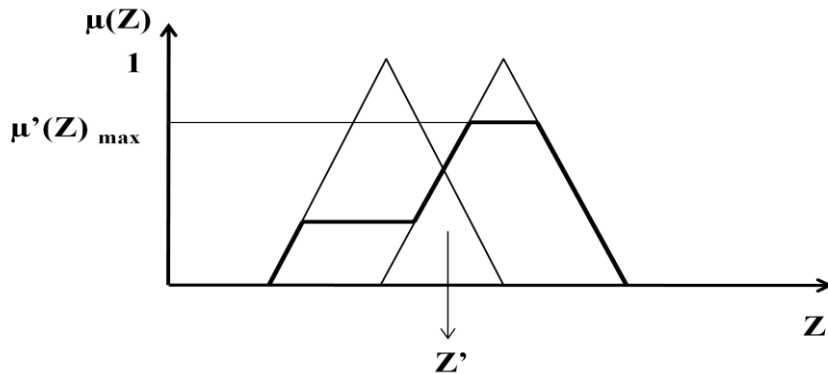
Alanların Merkezi Yöntemi: Bu metotta her bir kural için oluşan çıkış üyelik fonksiyonunun alan merkezi göz önünde bulundurulur. z noktası bu üyelik fonksiyonunun orta noktası ve $\mu(z)$ de z noktasındaki üyelik derecesi ise kesin çıkış değeri Z denklem 2.20 kullanılarak hesaplanır.

$$Z = \frac{\sum \mu(z).z}{\sum \mu(z)} \quad (2.20)$$

Ağırlıkların Merkezi Yöntemi: Bu metod her bir kural sonucu oluşturulmuş çıkış üyelik fonksiyonlarının birleştirilmesiyle oluşturulan bulanık çıkış üyelik fonksiyonun ağırlık merkezini hesaplar. Kesin değer Z' denklem 2.21 kullanılarak hesaplanır.

$$Z' = \frac{\int \mu(z).z dz}{\int \mu(z) dz} \quad (2.21)$$

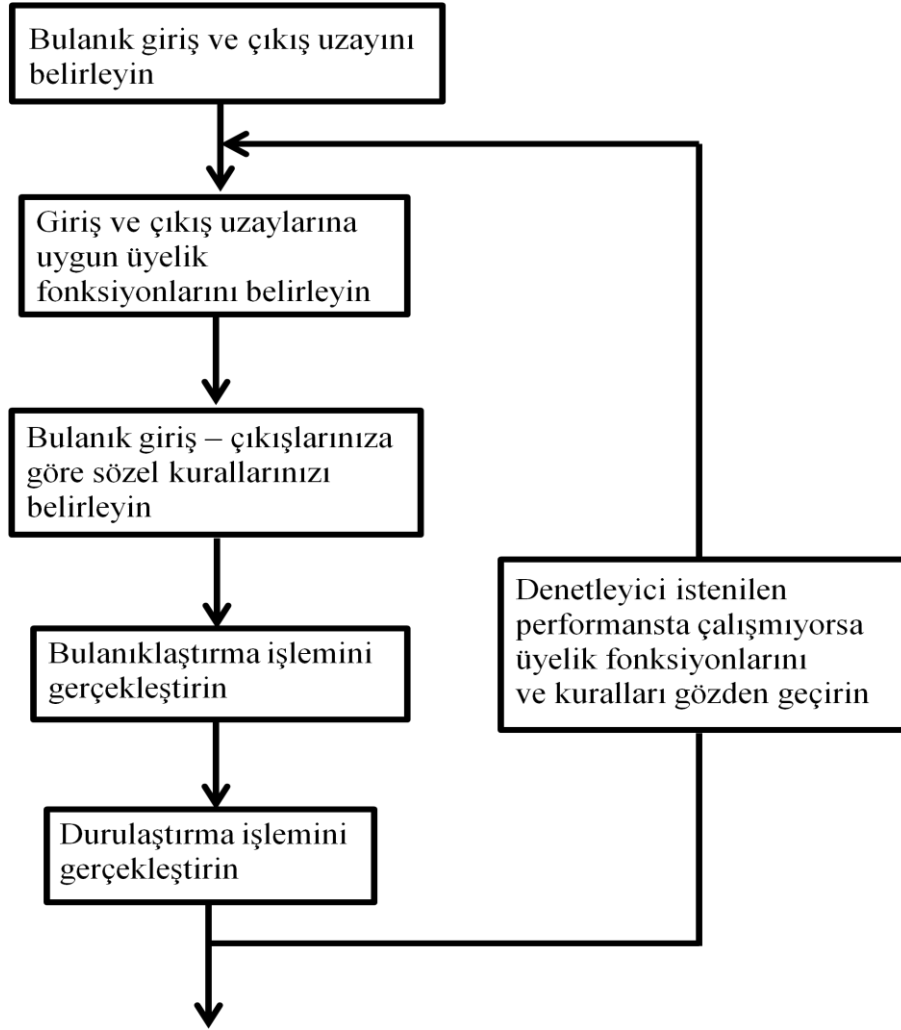
Şekil 2.26 ağırlık merkezi yöntemini göstermektedir.



Şekil 2.26 Ağırlık merkezi yöntemi

2.3.2.7. Bulanık Mantık Denetleyici Akış Şeması

Herhangi bir sistem denetiminde bulanık mantık denetleyicisi kullanılacak ise denetleyicinin tasarımı sırasında izlenecek adımlar Şekil 2.27 de gösterilmiştir.



Şekil 2.27 Bulanık mantık denetleyici akış şeması

2.4. Performans Analizi

Denetlenen sistemin istenilen dinamik davranışı gösterip gösteremediği çok önemlidir. Denetleyici parametreleri ayarlanarak istenilen davranışın elde edilmesi sağlanmalıdır. Bir çok uygulamada zaman kısıtlılığı ve kullanıcının yeterli bilgiye sahip olmamasından dolayı denetleyici parametreleri yeterince ayarlanmaz. Aslında büyük

sistemlerde yüzlerce kontrol döngüsü olduğu için kullanıcıların da bütün parametreleri manuel olarak ayarlaması mümkün değildir [25,26].

Kontrol sistemleri tasarımında denetleyici parametrelerinin belirlenmesi her zaman önemli bir konu olmuştur. Araştırmacılar değişik yöntemler uygulayarak en uygun parametrik değerleri bulmaya çalışmışlardır. En uygun parametrik değer belirlenmesinde uygulanan yöntemlerden birisi de hata enerjisinin minimizasyonuna dayalı optimal kontrol sistemi tasarım yöntemidir. Bu yöntemde hata işaretinin karesi ile zaman uzayında ifade edilen hata enerjisi minimum değerde kalacak şekilde optimum denetleyici parametreleri belirlenir. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken bir husus, hata enerjisi minimum yapılırken kontrol enerjisinin artmasıdır. Bu iki enerjinin de uygun değerde olacağı optimum denetleyici parametreleri belirlemek asıl konudur ve Optimal Kontrol Sistemlerinin temelini bu konu oluşturur.

Tasarlanan denetleyicinin optimum olma özelliği ise performans ölçütleri kullanılarak test edilir.

Geribeslemeli kontrol sistemlerinin temel amacı hatayı azaltarak olabildiğince hızlı bir şekilde sıfıra çekmektir. Bu yüzden sistem performansını ölçerken kullanılacak tüm metotlar hatayı göz önüne alarak zamanla ilişkilendirmelidirler. Performans analizinde kullanılan başlıca yöntemler aşağıda verilmiştir.

- IE - hatanın integrali (integral error)
- IAE - hatanın mutlak değerinin integrali (integral absolute error)
- ISE - hatanın karesinin integrali (integral of squared error)
- ITAE - zaman ile çarpılmış hatanın mutlak değerinin integrali (integral of time multiplied by absolute error)
- ITSE - zaman ile çarpılmış hatanın karesinin integrali (integral of time multiplied by squared error)
- ISTE - zamanın karesi ile çarpılmış hatanın karesinin integrali (integral of squared time multiplied by squared error)

Yukarıda listelenen metotların her biri kendi içinde bir değer döndürür ve bu değerler kendi aralarında kıyaslanamaz. Yani performans analizi sırasında IAE ve ISE kullanılmışsa IAE ve ISE' den elde edilen değerleri kıyaslamak doğru değildir. Her bir metotta kendi içinde kıyaslama yapılır ve elde edilen en küçük değerdeki sistem parametreleri en iyi

performansı elde etmek için kullanılır. Metotların döndüreceği değerler denklem 2.18' den denklem 2.23' e kadar olan denklemlerle hesaplanır. [25]

Kullanılabilecek metotlar arasında seçim yapmak da çok önemlidir. Eğer sistem cevabı kritik sönümlü ise IE IAE' ye eşit olur. Fakat sistem cevabı kritik altı sönümlü ise IE bu sistem için uygun olmaz. Sabit genlikli salınım oluşturan sistemlerde hatanın integrali alınırsa (IE) sıfır sonucu elde edilecektir. Elde edilebilecek en küçük değer olan sıfır elde edilmişse de böyle bir durumda IE' yi kullanmak hatalı olur.

IAE simülasyon ortamlarında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Fakat gerçek zamanlı uygulamalarda uygulanabilirliği olmadığı için ISE metodu kullanılarak IAE' nin bu eksikliği giderilir.

ITSE ve ITAE hızlı oturma süresi isteyen sistemlerde kullanılır. ITAE performans göstergesi IAE ve ISE' ye göre daha küçük aşma ve salınım oluşturma avantajına sahiptir. ITSE ise daha az hassastır ve hesaplanması da kolay değildir.

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (2.18)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.19)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (2.20)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2.21)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e(t)^2 dt \quad (2.22)$$

$$ISTE = \int_0^{\infty} t^2 e(t)^2 dt \quad (2.23)$$

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Kontrol sistemleri eğitiminde uygulamaya yönelik yapılan bu çalışmada sistem simülasyonu gerçekleştirmek, bulanık mantık ve PID denetleyiciler tasarlayarak sistemlerin analizi ve incelenmesini grafiksel ve sayısal olarak takip etmek için interaktif sanal laboratuvar hazırlanmıştır.

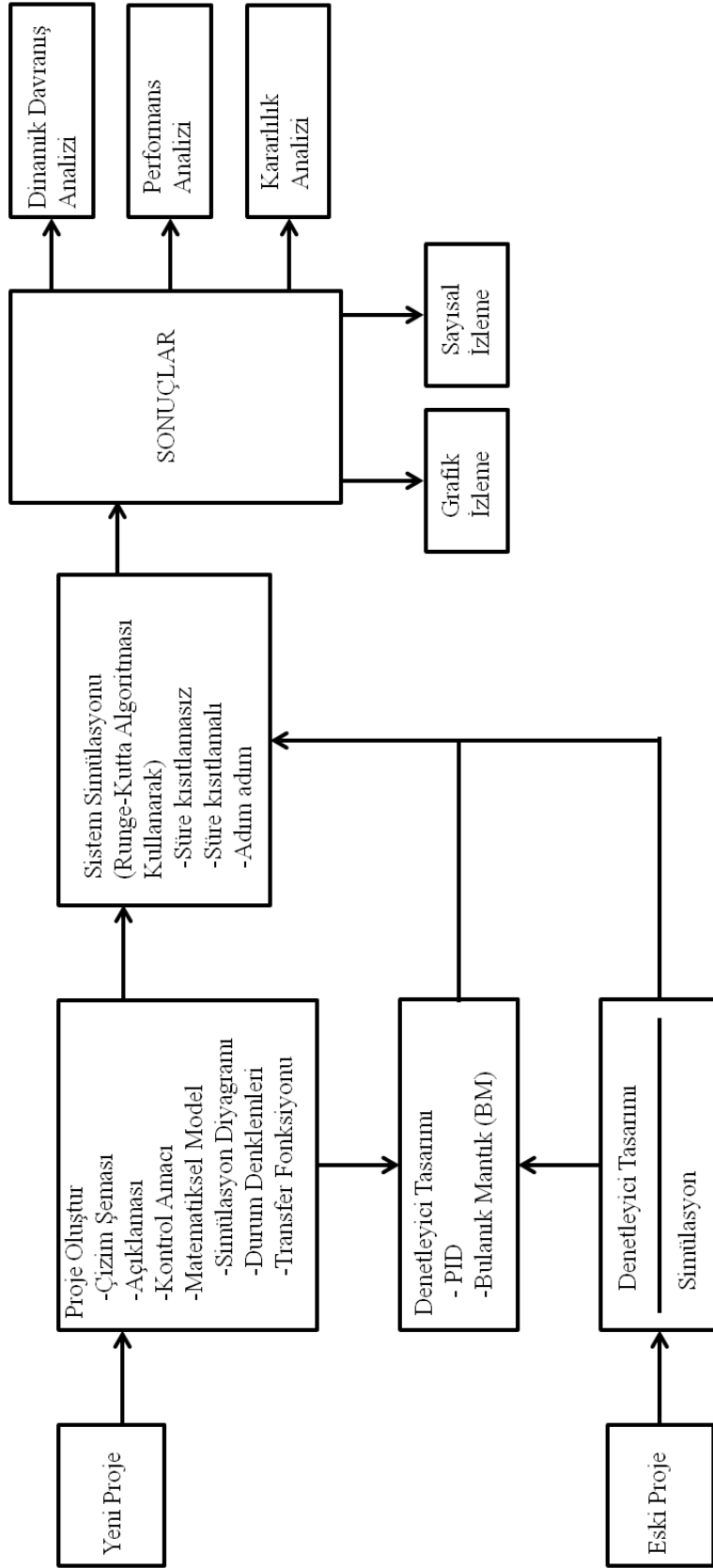
Bu çalışma ticari kaygıların ötesinde, tümüyle öğretim kaygıları düşünülerek yapılmıştır. Belirli bir sistem ya da konuya odaklanan akademik çalışmalardan da farklıdır. Burada genel bir kullanım alanı gözetilmiştir. Bu nedenle kullanıcıya problemini önceden hazırlama zorunluluğu bırakılmıştır. Uygun şekilde modellenen fiziki sistemler özelliği ya da uygulama alanına bağlı kalmadan burada uygulanabilmektedir.

Tasarlanan bu interaktif sanal laboratuvar Kontrol Sistemleri derslerinde kullanılmak üzere işlevsellik ve görsellik ön plana çıkacak şekilde hazırlanmıştır.

3.2. Tasarlanan İnteraktif Sanal Laboratuvar

Öğrenciyi problem çözümü için gerekli modelleme ve formül oluşturma aşamalarından koparmadan, doğrusal sistemlerin durum uzayı modellerini ve transfer fonksiyonlarını test edebileceği, sonuçlarını grafiksel ve sayısal olarak gözlemleyebileceği ve bu sistemlere klasik ya da bulanık mantık tabanlı denetleyiciler tasarlayabileceği görsel özellikli bir interaktif sanal laboratuvar ortamı geliştirilmiştir. Şekil 3.1 interaktif sanal laboratuvarının kullanım akış diyagramını göstermektedir. Aşağıdaki satırlarda Şekil 3.1 kısaca özetlenmiştir.

Şekil 3.1' de görüldüğü üzere sanal laboratuvarın yeni proje ve eski proje olmak üzere 2 farklı girişi, ara işlem blokları ve çıkış olarak da sonuçların gözlemleneceği sayısal ve grafiksel sonuç pencereleri, dinamik davranış, performans ve kararlılık analiz pencereleri vardır.



Şekil 3.1. İnteraktif sanal laboratuvar akış diyagramı

Gerekli modelleme ve formül oluşturma işlemleri tamamlandıktan sonra yeni proje oluşturma aşamasına geçilir. Proje oluştururken "proje oluşturma" bloğunda gözükten adımlar isteğe bağlı olarak ya o anda ya da ilerleyen aşamalarda tekrar yapılabilir.

"Proje oluşturma" bloğunda, incelenecek olan sistemin şeması yüklenir. Sistemi tanımlayan açıklamalar girilir. Sistemin kontrol amacı belirtilir. Formülü oluşturulmuş matematiksel modelin simülasyon diyagramı resim olarak yüklenir, durum denklemleri veya transfer fonksiyonu girilir.

Proje oluşturma aşamasından sonra sistemin denetimsiz davranışını görmek için direk olarak sistem simülasyonuna geçilir.

Eğer denetleyici tasarlanarak sistem denetimi yapılmak isteniyorsa proje oluşturma aşamasından sonra denetleyici tasarlama aşamasına geçilir. Denetleyici türü olarak PID veya bulanık mantık denetleyici seçilir, denetleyici türüne göre parametreleri girilerek sistem simülasyonu aşamasına geçilir.

Sistem simülasyonu 4 adımlı runge-kutta algoritması kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sistem simülasyonuna başlamadan önce simülasyon süresi 3 farklı şekilde seçilebilir. Bunlar süre kısıtlaması olmadan sürekli zamanda simülasyon, belli bir süre boyunca simülasyon ve adım adım simülasyondur. Sistem simülasyonu sonucunda elde edilen sonuçlar bir sonraki blok olan "sonuçlar" bloğuna iletilir.

"Sonuçlar" kısmı kendi içerisinde ikiye ayrılmıştır. Bunlardan birincisi analiz kısmı diğeri ise grafik ve sayısal sonuç olarak gözlemlenebilen işlenmemiş sonuçlardır. Analiz kısmında dinamik davranış analizi, performan analizi ve kararlılık analizi yazılım tarafından otomatik olarak bulunmakta ve öğrenciye sunulmaktadır. İkinci kısımda ise grafik ve sayısal izleme ile sistem değişkenleri öğrenciye işlenmeden sunulmaktadır.

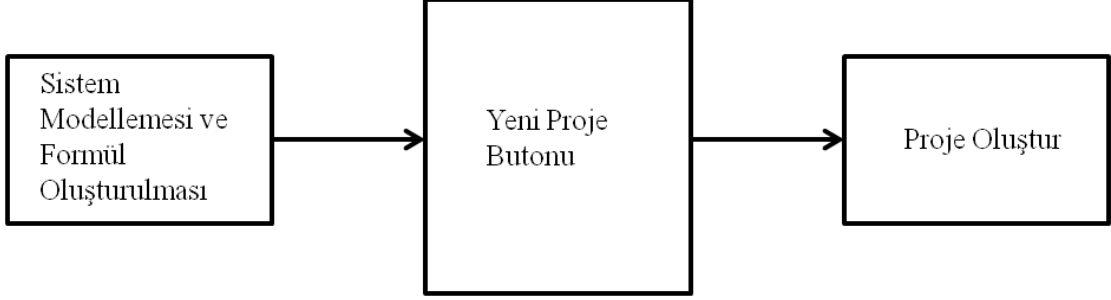
Eğer daha önce oluşturulmuş bir proje üzerinde çalışılacaksa eski proje sekmesinden çalışılacak olan proje seçilir. Açılan proje de denetleyici tasarımı yapılmışsa direk olarak sistem simülasyonuna gidilebileceği gibi denetimsiz sistem davranışı da gözlemlenebilir. Veya denetleyici tasarlanarak sistem simülasyonu gerçekleştirilir.

Şekil 3.1 de gösterilen oklar veri akış yönünü göstermektedir. Bloklar arası geçiş her zaman yapılabilir ve o ana kadar yapılmış olan işlemler kaydedilebilir.

3.2.1. İnteraktif Sanal Laboratuvar Akış Diyagram Bileşenleri

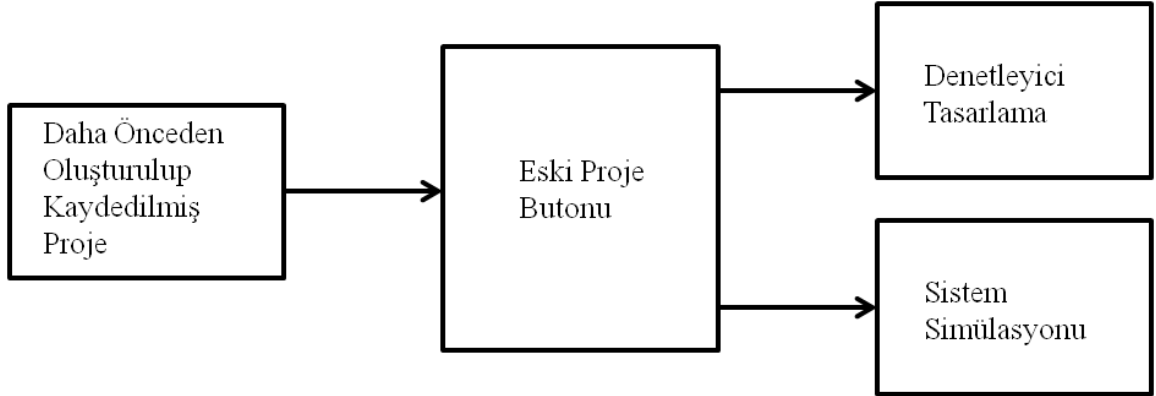
Şekil 3.1' de gösterilen akış diyagramının detaylı anlatımı bu bölümde yapılmıştır.

Yeni proje: Gerekli modelleme ve formül oluşturma aşamaları tamamlandıktan sonra Şekil 3.2 de gösterildiği üzere projenin tanımlaması, simülasyon diyagramının yüklenmesi ve matematiksel modelinin girilmesi tamamlandıca "proje oluşturma" bloğuna geçilir.



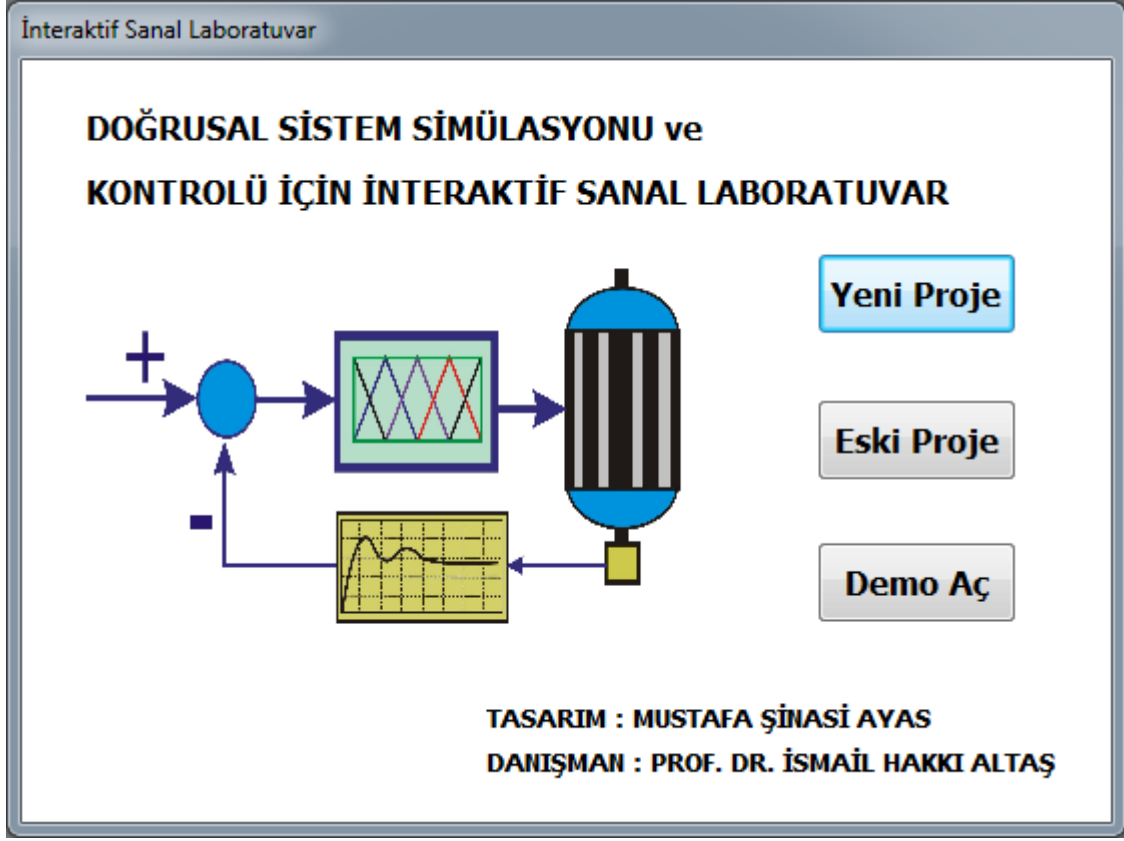
Şekil 3.2. Yeni proje bloğu giriş ve çıkışı

Eski proje: Şekil 3.3 de gösterildiği gibi daha önce oluşturulmuş bir proje üzerinde çalışılacaksa eski proje butonu tıklanarak çalışılacak olan proje seçilir. Açılan proje de denetleyici tasarımı yapılmışsa direk olarak "sistem simülasyonuna" gidilebileceği gibi denetimsiz sistem davranışı da gözlemlenebilir. Veya denetleyici tasarlanarak sistem simülasyonu gerçekleştirilir.



Şekil 3.3. Eski proje bloğu giriş ve çıkışları

Şekil 3.4 tasarlanan sanal laboratuvarın açılış ekranını göstermektedir. Bu ekranda yeni proje, eski proje ve demo aç butonlarıyla kullanıcı yönlendirilmektedir.



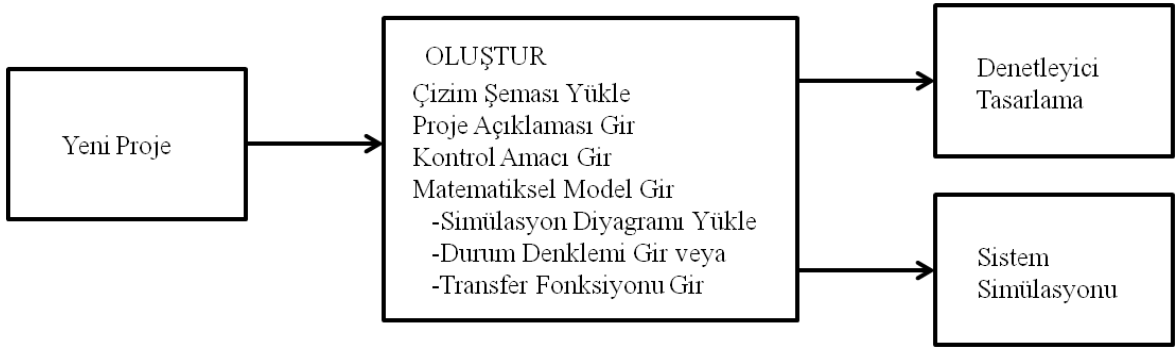
Şekil 3.4. İnteraktif sanal laboratuvar giriş ekranı

Proje Oluştur: "Proje oluştur" bloğunda proje ile ilgili tanımlamalar ve veri girişleri yapılır. Şekil 3.5 oluştur bloğu içeriğini ve giriş ve çıkışlarını göstermektedir. Bu blok içinde girilen veriler belli bir rapor formatında .pdf uzantısı ile kaydedilir ve böylelikle kullanıcı sistem denetimi ve kontrolü için rapor hazırlarken veya yaptığı bu çalışmayı başkalarıyla paylaşırken proje çizim şeması, proje açıklaması, kontrol amacı, sistemin matematiksel blok diyagramı, durum denklemleri ve transfer fonksiyonu hazır bir şekilde yayınlanmış olur. Kullanıcıya sadece tasarlanan denetleyiciden ve elde edilen sonuçlardan bahsetmek kalır.

Öncelikle bu blokta, denetlenmesi planlanan veya simülasyonu gerçekleştirilecek olan sistemin şeması çizim şeması kısmından sistemin varolan veya kullanıcı tarafından sistemi ifade etmek için çizilmiş resmi seçilerek yüklenir.

Daha sonra bu sistemi tanıtmak için gerekli bilgiler proje açıklaması kısmından verilir. Kontrol amacı kısmında ise böyle bir sistem denetimine neden ihtiyaç duyulduğundan bahsedilmelidir.

Matematiksel model verisi girme bölümünde öncelikle ileri ve geri beslemeli yolları içeren sistem simülasyon diyagramı yüklenir. Bu diyagram sanal laboratuvar ile çalışmaya başlamadan önce çizilmelidir. Simülasyon diyagramı yüklendikten sonra sistemi matematiksel olarak ifade eden durum denklemleri veya transfer fonksiyonu girilir. Eğer transfer fonksiyonu girilerek simülasyon veya denetim yapılacak ise transfer fonksiyonundan otomatik olarak hesaplanacak olan durum denklemlerinin gözlemci (observer) veya kontrolcü (controller) kanonik formda olacağı seçilir.



Şekil 3.5. Oluştur bloğu giriş ve çıkışları

Durum denklemleri

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.1)$$

$$y = Cx + Dy \quad (3.2)$$

şeklinde tanımlanır. Burada X, Y ve U matrisleri zamana bağlıdır. Kullanıcının tanımlayacağı matrisler A, B, C ve D matrisleridir. Burada, A, durum matrisi; B, giriş matrisi; C, çıkış matrisi; D, ileri besleme matrisi; x, durum değişken vektörü; y, çıkış vektörü ve u, giriş vektörüdür. Bu matrislerin tanımlanacağı bölge akıllı kutulardan oluşmaktadır. Bu akıllı kutular sayesinde kullanıcı bu matrislere değer girerken sayısal değer yerine matematiksel denklem ve daha önce tanımlanmış olduğu değişkenleri de kullanabilir. Kullanılabilecek matematiksel ifadeler Ek 1. de verilmiştir.

Şekil 3.7a durum denklemleri tanımlanırken matematiksel denklem kullanımına örnektir. Yazılan uzun denklemler yer sıkıntısından dolayı sadece fare ile akıllı kutunun

üzerine gelindiği zaman denklem sonucu ile birlikte Şekil 3.7a' da gözüktüğü gibi kullanıcı ekranına çıkmaktadır.

Şekil 3.6 kullanıcı tarafından tanımlanmış değişkenlere örnektir. Tanımlanmış a, b ve c değişkenlerinin değerleri sırasıyla 5, -5, 3.005 dir. Burada tanımlanan değişkenler akıllı kutulara girildiğinde akıllı kutular değişkenlerin sayısal karşılıkları ile işlem yapacaktır. Şekil 3.7b' de olduğu gibi kullanıcı bu değişkenleri matematiksel denklem içinde kullanabilir. Böylelikle kullanıcı bu değişkenlerin değerlerini değiştirerek durum denklemini değiştirmiş olacak, matematiksel denklemi tekrar hesap edip akıllı kutulara yazma gereksiniminde bulunmayacaktır.

Değişken		
Değişken	Değer	Kaydet
a	5	SİL
b	-5	
c	3,005	

Şekil 3.6 Değişken tanımlama penceresi

Durum Denklemleri

Durum Denklemi

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100,1 & -3 \\ \sin(\pi)*3/2 + \text{pow}(8*(3+2*5-\text{sqrt}(100,)),2)=576 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 100 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 100 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Durum Denklemleri

Durum Denklemi

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a/b & 0 \\ c*a/b=-3,005 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

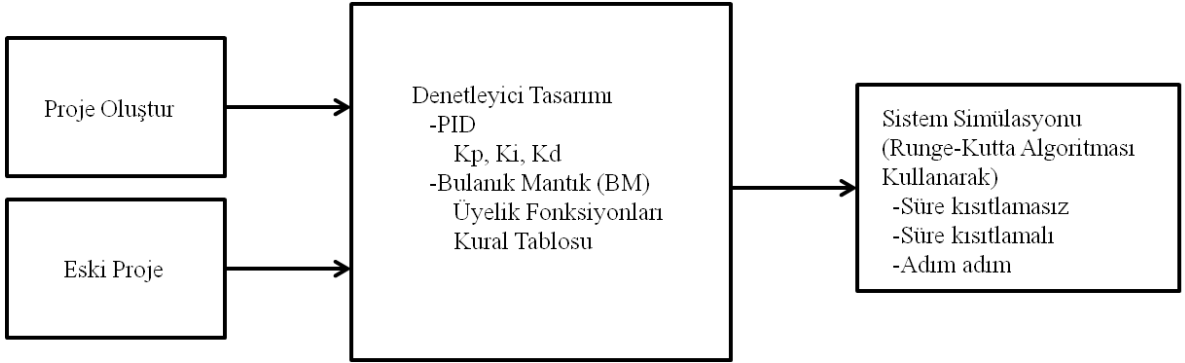
(a)
(b)

Şekil 3.7 Durum -uzay tanımlama (a) matematiksel ifadelerle;
(b) değişkenler ve matematiksel ifadelerle

"Proje oluştur" bloğuna veri girilirken daha sonra rapor oluşturma gereksinimi doğduğunda kullanılabilir veya projenin başkası tarafından kullanılabilir unutulmamalıdır. Bu nedenle bu kısımda projeyi tanıtan yeterli açıklamalar yapılmalıdır.

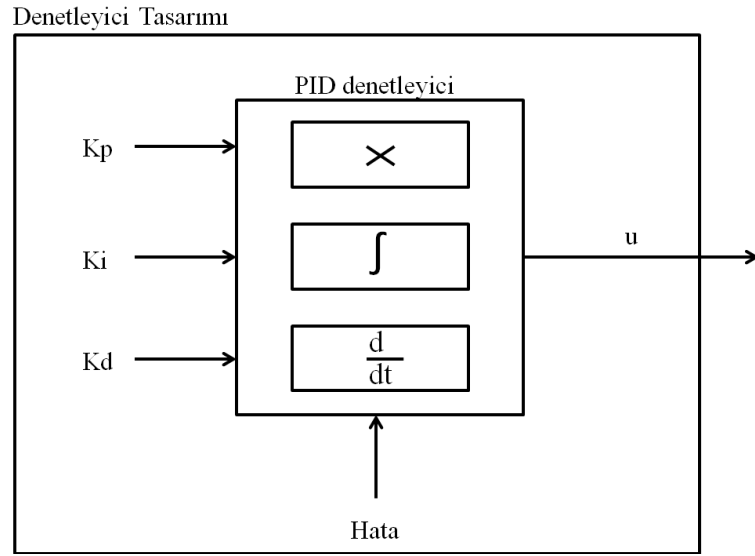
Şekil 3.5'de gösterildiği üzere "proje oluştur" bloğu tamamlandıktan sonra denetimsiz sistem davranışını incelemek için simülasyon yapılacak ise "sistem simülasyonu" bloğuna gidilir. Eğer denetimli sistem davranışı incelenecek ise "denetleyici tasarlama" bloğuna gidilerek denetleyici tasarımı gerçekleştirilir.

Denetleyici tasarımı: Proje oluşturulduktan sonra veya kaydedilmiş eski proje açıldıktan sonra denetimli sistemin davranışı incelenecekse denetleyici tasarımı gerçekleştirilir. Şekil 3.8 denetleyici tasarım bloğu girişlerini ve çıkışını göstermektedir. Bu blokta "PID" ve "bulanık mantık denetleyici" olmak üzere iki farklı türde denetleyici yapılabilir.

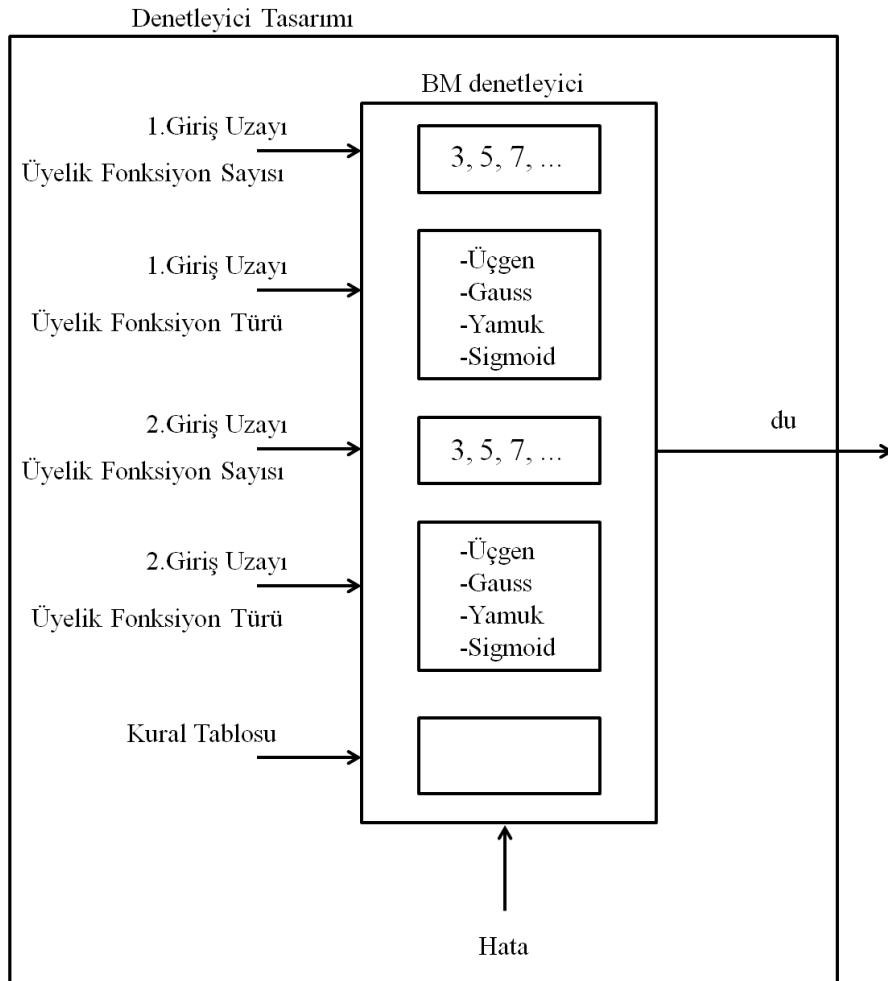


Şekil 3.8. Denetleyici tasarlama bloğu giriş ve ıkışları

Şekil 3.9 PID denetleyici tasarımı için gerekli parametreleri göstermektedir. K_p oransal sabit, K_i integral sabiti ve K_d türevsel sabit kullanıcı tarafından bölüm 2.2' de anlatılan yöntemler kullanılarak belirlendikten sonra girilir. Hata değerini yazılım tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır.

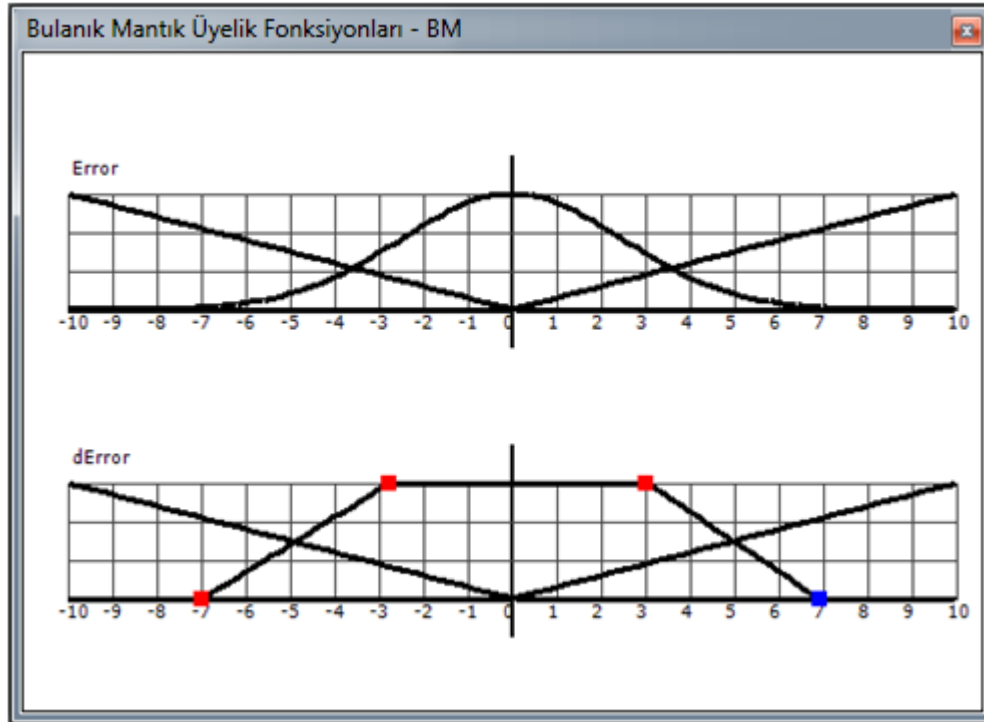


Şekil 3.9. PID denetleyici tasarlama bloğu giriş ve çıkışları



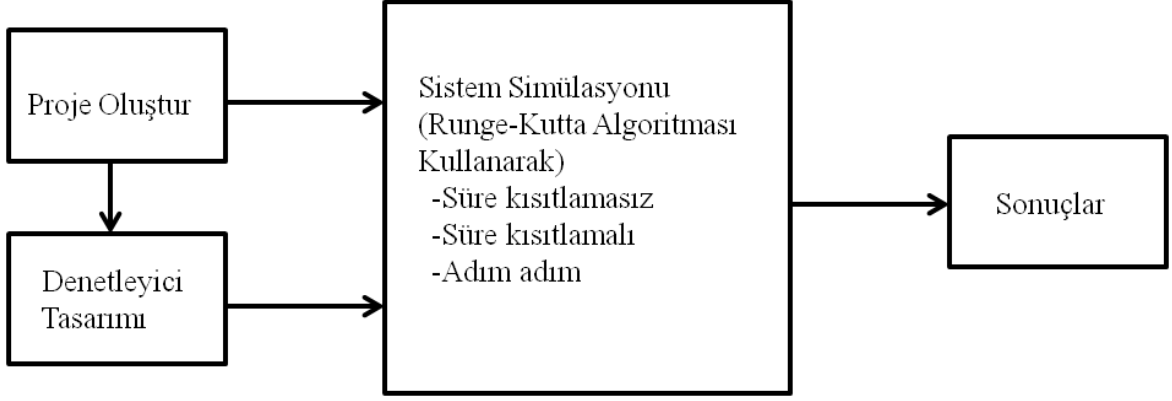
Şekil 3.10. BM denetleyici tasarlama bloğu giriş ve çıkışları

Şekil 3.10 bulanık mantık denetleyici tasarımında uygulanacak adımları göstermektedir. Bulanık mantık denetleyici tasarımında öncelikle 1. ve 2. giriş uzayları için kullanılacak bulanık küme sayıları belirlenir. Üyelik fonksiyonu sayısı belirlendikten sonra üyelik fonksiyonu türleri belirlenir. Üçgen, gauss, yamuk ve sigmoid üyelik fonksiyonları kullanılabilir türlerdir. Her iki giriş uzayı için farklı yapıda üyelik fonksiyonu türleri seçilebilir. Ayrıca giriş uzaylarının kendi içlerinde de farklı türden üyelik fonksiyonları seçilebilir. Örneğin her iki giriş uzayı için üçerli üyelik fonksiyonları kullanılmaya karar verilsin. Birinci giriş uzayı sırasıyla üçgen, gauss ve üçgenden oluşurken ikinci giriş uzayı üçgen, yamuk ve tekrar üçgen üyelik fonksiyonundan oluşturulabilir. Bu örnekte tanımlanan üyelik fonksiyonları Şekil 3.11' da gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Değişik tipte üyelik fonksiyon tanımlama örneği

Sistem simülasyonu: Sistem simülasyonu gerçekleştirmek için öncelikle proje oluşturma aşaması tamamlanmalıdır. Proje oluşturulduktan sonra denetleyici tasarlamadan direk olarak denetimsiz sistem simülasyonu gerçekleştirilebileceği gibi denetleyici tasarlayarak denetimli sistem simülasyonu da gerçekleştirilebilir. Sistem simülasyonundan elde edilen sonuçlar bir sonraki bloğa, "sonuçlar" bloğuna gönderilir. Şekil 3.12 sistem simülasyonu bloğunun iç yapısını ile giriş ve çıkışlarını göstermektedir.



Şekil 3.12. Sistem simülasyonu bloğu giriş ve çıkışları

Sistem simülasyonu 3 farklı modda yapılır. Birinci modda sistem simülasyonu süre kısıtlaması olmaksızın, simülasyonu kullanıcı durdurana kadar devam eder. İkinci modda kullanıcı tarafından belirtilen süre boyunca sistem simülasyonu devam eder. Üçüncü modda ise kullanıcı adım boyu aralıklarıyla simülasyonu adım adım gerçekleştirir.

Sistem simülasyonu denklem 3.1 ve denklem 3.2 nin çözülmesiyle gerçekleştirilir. Zamana bağlı \dot{x} , x , y ve u matrisleri elde edilerek sonuç bloğuna iletilir. Denklem 3.1 de verilen doğrusal adi diferansiyel denklemin sayısal çözümünde 4 adımlı Runge-Kutta yöntemi kullanılmıştır.

4 adımlı Runge-Kutta yöntemi dışında başka yöntemler de kullanılabilir. Doğrusal sıradan sistemlerin çözülmesinde genellikle aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır.

- Taylor serisi yöntemi
- Euler ve Modified Euler yöntemi
- 2 adımlı Runge-Kutta yöntemi
- 4 adımlı Runge-Kutta yöntemi
- Multistep yöntemi
- Milne yöntemi
- Adams-Moulton yöntemi

Bu yöntemler arasında kullanımı en yaygın olanı 4 adımlı Runge-Kutta yöntemi olduğundan bu çalışmada da çözüm algoritması 4 adımlı Runge-Kutta yöntemi üzerine kurulmuştur.

Runge-Kutta yönteminin teorik olarak elde edilmesi sayısal çözümlene kitaplarında detaylı verilmektedir [27, 28]. Bu nedenle burada sadece bu çalışma kapsamında nasıl kullanıldığı gösterilecektir.

Aşağıda iki tane birinci dereceden adi diferansiyel denklem verilmektedir.

$$\frac{di(t)}{dt} = x_i i(t) + y_i \omega(t) + z_i \quad (3.3)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = x_\omega i(t) + y_\omega \omega(t) + z_\omega \quad (3.4)$$

Bu denklemler aslında akım ve hızın değişken olarak alındığı bir sürekli mıknatıslı DA motorunun denklemleridir. Akıma bağlı katsayılar i indisi, hıza bağlı katsayılar ω indisi verilmiştir. Dolayısıyla burada $x_i = -Ra/La$, $y_i = Kv/La$, $z_i = Va/La$, $x_\omega = Kv/Jm$, $y_\omega = -Bm/jm$ ve $z_\omega = T_l/Jm$ dir.

Denklem 3.3 ve denklem 3.4 daha genel bir formatta aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{di}{dt} = f(t, i(t), \omega(t)) \quad (3.5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = f(t, i(t), \omega(t)) \quad (3.6)$$

Burada $t = t_0$ anındaki başlangıç değerleri $i = i_0$, $\omega = \omega_0$ bilinmektedir.

Denklem 3.5 ve denklem 3.6 nın çözümü için 4 adımlı Runge-Kutta yöntemi aşağıdaki gibi uygulanır.

$$i_{k+1} = i_k + \frac{1}{6} (A_i + 2B_i + 2C_i + D_i) \quad (3.7)$$

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \frac{1}{6} (A_\omega + 2B_\omega + 2C_\omega + D_\omega) \quad (3.8)$$

Burada i_{k+1} ve ω_{k+1} değerleri $(k+1)$ inci iterasyon değerlerdir. Ayrıca,

$$A_i = dt \cdot f(t_k, i_k, \omega_k) \quad (3.9)$$

$$A_{\omega} = dt \cdot f(t_k, i_k, \omega_k) \quad (3.10)$$

$$B_i = dt \cdot f\left(t_k + \frac{dt}{2}, i_k + \frac{A_i}{2}, \omega_k + \frac{A_{\omega}}{2}\right) \quad (3.11)$$

$$B_{\omega} = dt \cdot f\left(t_k + \frac{dt}{2}, i_k + \frac{A_i}{2}, \omega_k + \frac{A_{\omega}}{2}\right) \quad (3.12)$$

$$C_i = dt \cdot f\left(t_k + \frac{dt}{2}, i_k + \frac{B_i}{2}, \omega_k + \frac{B_{\omega}}{2}\right) \quad (3.13)$$

$$C_{\omega} = dt \cdot f\left(t_k + \frac{dt}{2}, i_k + \frac{B_i}{2}, \omega_k + \frac{B_{\omega}}{2}\right) \quad (3.14)$$

$$D_i = dt \cdot f(t_k + dt, i_k + C_i, \omega_k + C_{\omega}) \quad (3.15)$$

$$D_{\omega} = dt \cdot f(t_k + dt, i_k + C_i, \omega_k + C_{\omega}) \quad (3.16)$$

denklemleri kullanılarak denklem 3.3 ve denklem 3.4 de verilen 4 adımlı Runge-Kutta yönteminin genel formu aşağıdaki gibi hesaplanır.

Birinci Adım:

$$t_k = t_0$$

$$i_{Ak} = i_0$$

$$\omega_{Ak} = \omega_0$$

$$A_i = dt (X_i i_{Ak} + 2Y_i \omega_{Ak} + Z_i)$$

$$A_{\omega} = dt (X_{\omega} i_{Ak} + 2Y_{\omega} \omega_{Ak} + Z_{\omega})$$

İkinci Adım:

$$i_{Bk} = i_0 + A_i/2$$

$$\omega_{Bk} = \omega_0 + A_{\omega}/2$$

$$B_i = dt (X_i i_{Bk} + 2Y_i \omega_{Bk} + Z_i)$$

$$B_{\omega} = dt (X_{\omega} i_{Bk} + 2Y_{\omega} \omega_{Bk} + Z_{\omega})$$

Üçüncü Adım:

$$i_{Ck} = i_0 + B_i/2$$

$$\omega_{Ck} = \omega_0 + B_\omega/2$$

$$C_i = dt (X_i i_{Ck} + 2Y_i \omega_{Ck} + z_i)$$

$$C_\omega = dt (X_\omega i_{Ck} + 2Y_\omega \omega_{Ck} + z_\omega)$$

Dördüncü Adım:

$$i_{Dk} = i_0 + C_i$$

$$\omega_{Dk} = \omega_0 + C_\omega$$

$$D_i = dt (X_i i_{Dk} + 2Y_i \omega_{Dk} + z_i)$$

$$D_\omega = dt (X_\omega i_{Dk} + 2Y_\omega \omega_{Dk} + z_\omega)$$

Dördüncü adımdan sonra elde edilen değerler denklem 3.6 ve denklem 3.7 de yerine yazılır.

$$i_{k+1} = i_0 + \frac{1}{6} (A_i + 2B_i + 2C_i + D_i)$$

$$\omega_{k+1} = \omega_0 + \frac{1}{6} (A_\omega + 2B_\omega + 2C_\omega + D_\omega)$$

$$t_k = t_0 + dt$$

(k+2)nci iterasyon için

$$t_0 = t_{k+1}$$

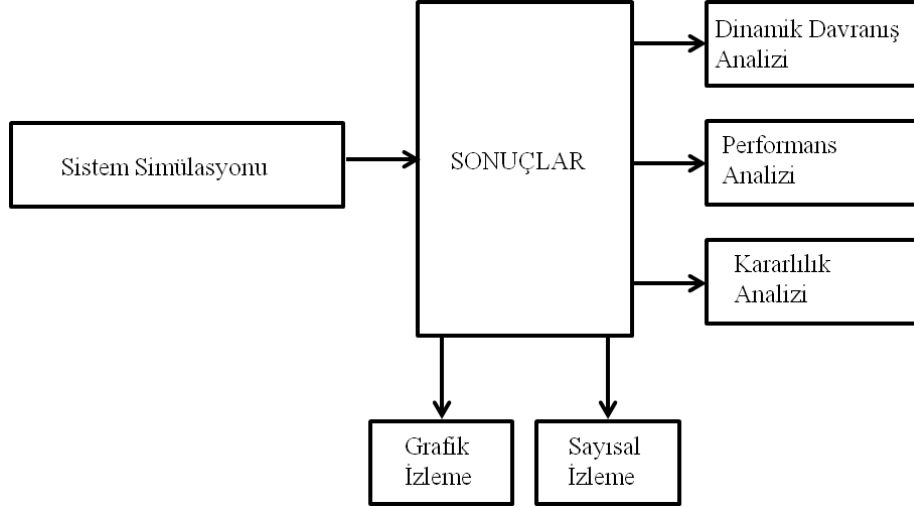
$$i_0 = i_{k+1}$$

$$\omega_0 = \omega_{k+1}$$

ataması gerçekleştirilmelidir.

Sonuçlar: "Sonuçlar" bloğu sistem simülasyonu bloğundan aldığı verileri işleyerek grafiksel ve sayısal olarak kullanıcıya sunar. Grafik ve sayısal izleme pencerelerince simülasyonu gerçekleştirilmiş sistem parametrelerinin sırasıyla grafiksel ve sayısal değerleri gösterilir. Analiz pencerelerinde ise dinamik davranış analizi, performans analizi ve kararlılık analizi olmak üzere 3 farklı analiz yapılmaktadır. Bu analizler sonuçlar

bloğundan gelen verilerin otomatik olarak işlenmesiyle elde edilir. Şekil 3.13 "sonuçlar" bloğunun giriş ve çıkışlarını göstermektedir.



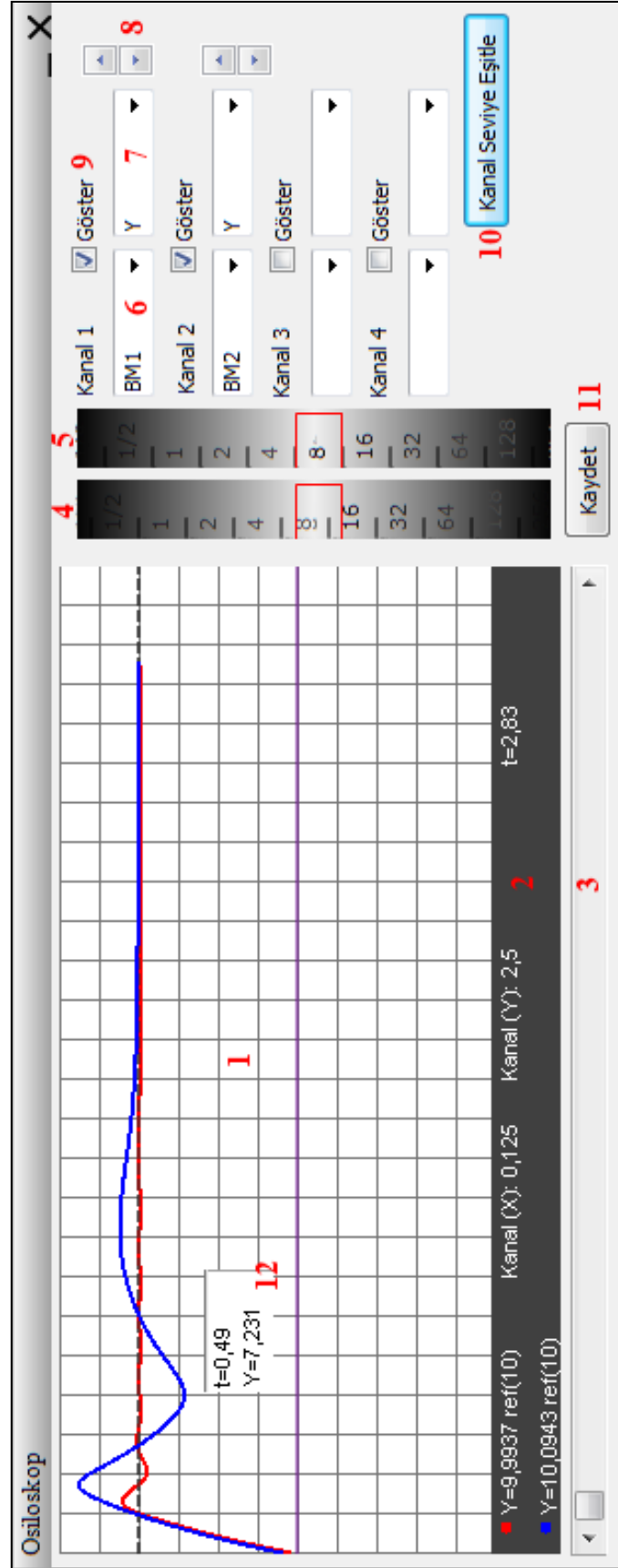
Şekil 3.13. Sonuçlar bloğu giriş ve çıkışları

"Grafik izleme" bloğunun içinde Şekil 3.14 de gösterilen tasarlanmış fonksiyonel osiloskop bulunmaktadır. Osiloskop ekranından durum değişkenleri, çıkış, hata, hata değişimi ve kontrol işareti gibi zamana bağlı değişkenler grafiksel olarak izlenir. Şekil 3.14 üzerinde yapılan numaralandırmalar grafik izleme ekranının kullanımı ile ilgilidir ve Ek 2. de açıklanmıştır. Tablo 3.1 osiloskop ızgarası çizilirken kullanılan fonksiyonu göstermektedir.

Tablo 3.1. Osiloskop ızgara fonksiyonu

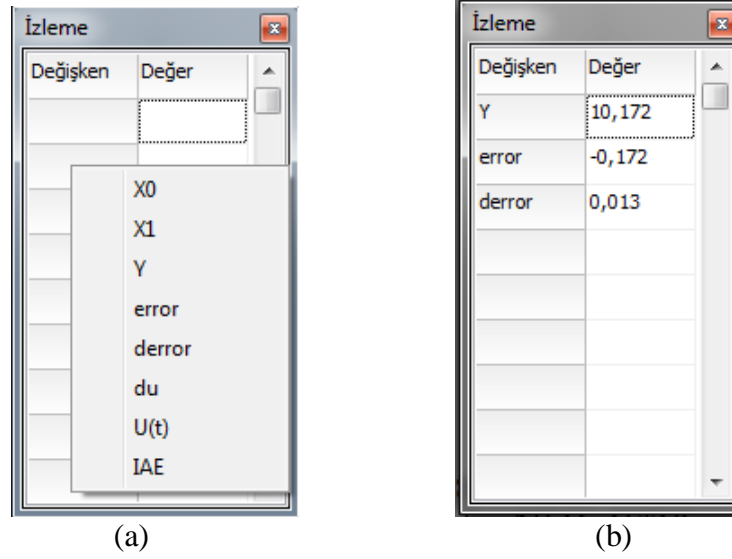
```

inline void oscilloscope::drawGrids() {
    gridPainter->FillRectangle(app_bgBrush, 0, 0, realW, realH);
    for (int i = 0; i < 14; i++) {
        gridPainter->DrawLine(gridPen, 0, i * 20, realW, i * 20);
    }
    for (int i = 0; i < 25; i++) {
        gridPainter->DrawLine(gridPen, i * 20, 0, i * 20, realH);
    }
}
  
```

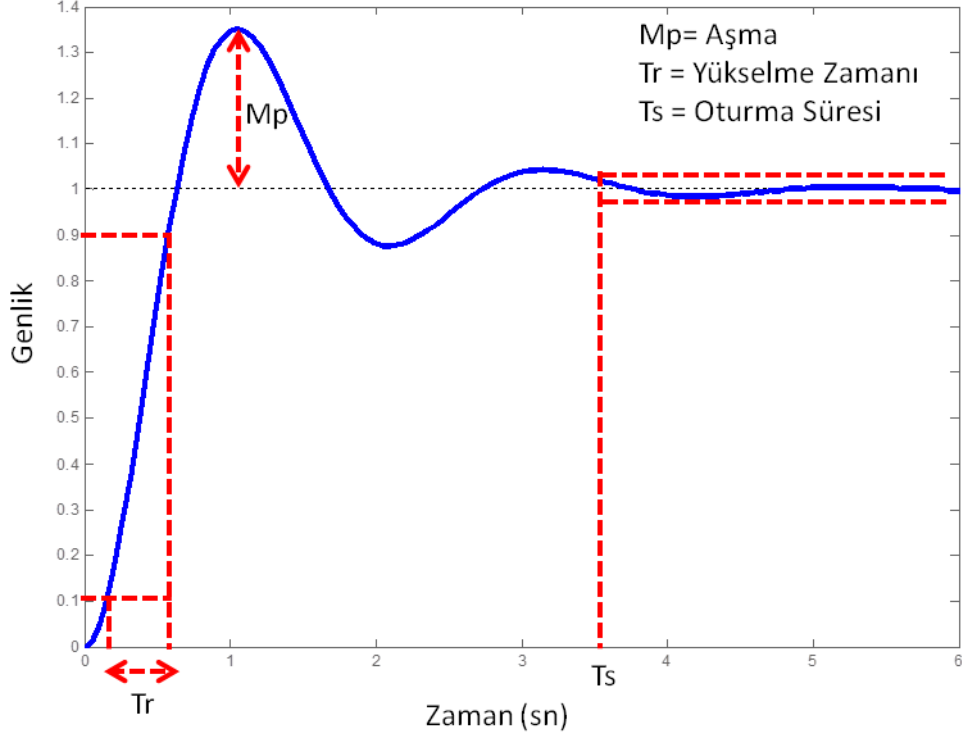
Şekil 3.14 Osiloskop ekran görüntüsü

"Sayısal izleme" bloğunda sistem çıkışı Y, durum - uzay değişkeni X, hata, hata değişimi, giriş U(t), denetleyicinin ürettiği giriş çarpanı du ve performans ölçme metodu olan IAE izleme penceresine eklenerek değerleri takip edilebilir. Bu pencereden en fazla şekilde yararlanabilmek için sistem simülasyonu süre kısıtlamalı veya süre kısıtlamasız çalışma modunda değilde adım adım çalışma modunda gerçekleştirilmelidir.. Şekil 3.15a izleme penderesine parametre eklemeyi, Şekil 3.15b eklenmiş parametreleri ve o anki değerlerini gösterir.



Şekil 3.15 İzleme ekranı (a) parametre ekleme;
(b) eklenmiş parametreler ve o anki değerleri

Dinamik davranışları analiz bloğunda yükselme zamanı, maksimum aşma miktarı ve oturma süresi grafiksel ve sayısal olarak gösterilir. Yükselme zamanı, sistem çıkışının istenilen referans değerine ulaşırken referans değerinin %10 u ile %90 ı arasında geçirdiği süredir. Maksimum aşma miktarı, sistem çıkışının istenilen referans değerine ulaşırken referans değerini aşıp geri dönmeye başladığı noktadır. Oturma süresi, sistem çıkışının istenilen referans değerini %2 lik dilim arasında yakaladığı süredir. Şekil 3.16 doğrusal bir sistemin maksimum aşma miktarını, yükselme zamanı ve oturma süresini göstermektedir.



Şekil 3.16 Doğrusal bir sistemin sistem dinamiklerinin gösterilmesi

Performans analizi bloğunda bölüm 2.4 de açıklanmış olan yöntemlerle yapılmış hesaplamaların sonuçları sayısal olarak gösterilir.

Kararlılık analizi bloğunda proje oluşturma kısmında transfer fonksiyonu girilmiş olan sisteme Nyquist kararlılık kriteri uygulanır. Nyquist kararlılık kriteri aşağıda anlatılan şekilde uygulanır.

Transfer fonksiyonu s uzayında tanımlanmış bir sistem ele alalım. S uzayında tanımlanmış $G(s)$ transfer fonksiyonu frekans uzayına çevrilerek $G(j\omega)$ elde edilir. Denklem 3.9 frekans uzayındaki transfer fonksiyonunu kompleks bileşenleri ile Kartezyen formatta ifade etmektedir.

$$G(j\omega) = G_R + j G_I \quad (3.17)$$

Burada G_R transfer fonksiyonunun gerçel kısmı, G_I ise transfer fonksiyonunun sanal kısmıdır.

Transfer fonksiyonunun genliği ve fazı sırasıyla denklem 3.18 ve denklem 3.19 kullanılarak hesaplanır.

$$|G(j\omega)| = \sqrt{GR^2 + GI^2} \quad (3.18)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{GI}{GR}\right) \quad (3.19)$$

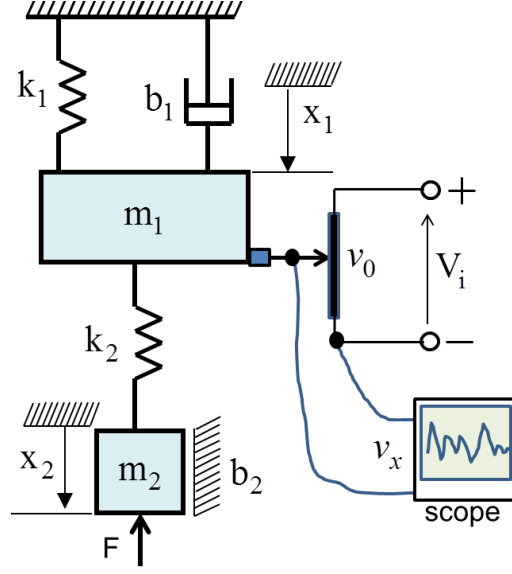
Transfer fonksiyonunun genliği ve faz açısının değerleri, frekansın (ω) değeri 0 dan sonsuza gidecek şekilde hesaplanır ve kutupsal koordinatlarda $GH(j\omega)$ düzleminde çizdirilir.

3.3. Tasarım Örnekleri

3.3.1. Tasarım Örneği-1

şekil 3.17 da sallanan masa olarak da isimlendirilen, yer sarsıntılarını algılamak üzere oluşturulmuş bir sistem görölmektedir. Bu sistemde F kuvveti m_2 kütesine etkiyen kuvvet olmak üzere, x_1 mesafesi m_1 kütesinin yer değiştirme mesafesini, x_2 de m_2 kütesinin yer değiştirme mesafesini temsil etmektedir. k_1 ve k_2 yay sabitleri b_1 ve b_2 sürtünme sabitleridir. Başlangıçta m_2 kütesinin konumu $v_x=v_0$ volt olacak şekilde ayarlanmış, oluşacak gerilim değişimi de $\Delta v_x=A_v x_I$ bağıntısı ile ifade edilmektedir. Böylece bir F kuvveti oluştuğunda Scope $v_x=v_0+A_v x_I$ değerini gösterecektir.

Sistem parametreleri $m_1=10$ kg, $m_2=0.1$ kg, $g=9.8$ m/s², $b_1=10$ Ns/m, $b_2=2$ Ns/m, $k_1=10$ N/m, $k_2=0.00205$ N/m, $A_v=0.2$, $V_0=5$ V, $V_i=10$ V alınmıştır.



Şekil 3.17 Sallanan masa

Bu sistemin incelenebilmesi için önce matematik modelinin çıkarılması gerekir. Matematik modellemenin yapılmasında izlenen yol temel fizik yasalarına dayanır. Newton'un 2. Yasasına göre bir kütleye uygulanan kuvvetlerin toplamı o kütlenin momentumunun değişim oranına eşittir ve denklem 3.12 ile ifade edilir.

$$\frac{dp}{dt} = f \quad (3.12)$$

$$p = m\dot{x} \quad (3.13)$$

olduğundan;

$$\frac{dp}{dt} = m\ddot{x} \quad (3.14)$$

yazılır. Buradan da

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = f \quad (3.15)$$

elde edilir. Burada m kütle (kg), x yer değiştirme miktarı (m), f de uygulanan kuvvettir (N).

Böylece fiziğin bu temel yasasından yararlanılarak verilen sistemin matematik denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$m_1\ddot{x}_1 = -k_1x_1 - k_2(x_1 - x_2) - b_1\dot{x}_1 - m_1g \quad (3.16)$$

$$m_2\ddot{x}_2 = F - k_2(x_2 - x_1) - b_2\dot{x}_2 - m_2g \quad (3.17)$$

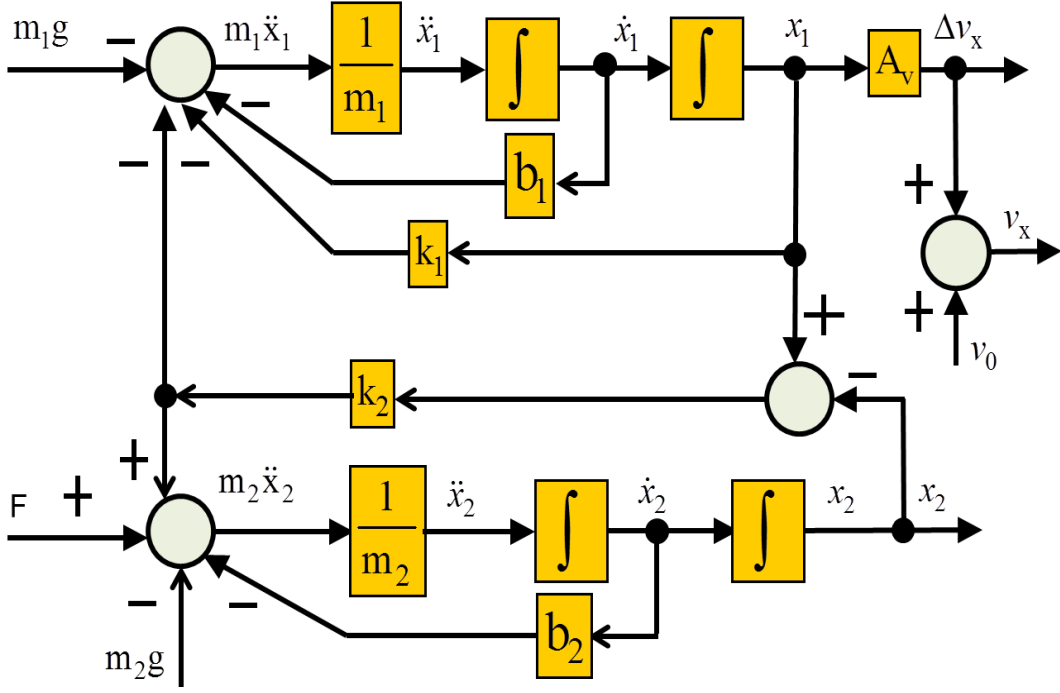
$$m_2\ddot{x}_2 = F + k_2(x_1 - x_2) - b_2\dot{x}_2 - m_2g \quad (3.18)$$

$$v_x = v_0 + \Delta v_x \quad (3.19)$$

$$\Delta v_x = A_v x_1 \quad (3.20)$$

$$v_x = v_0 + A_v x_1 \quad (3.20)$$

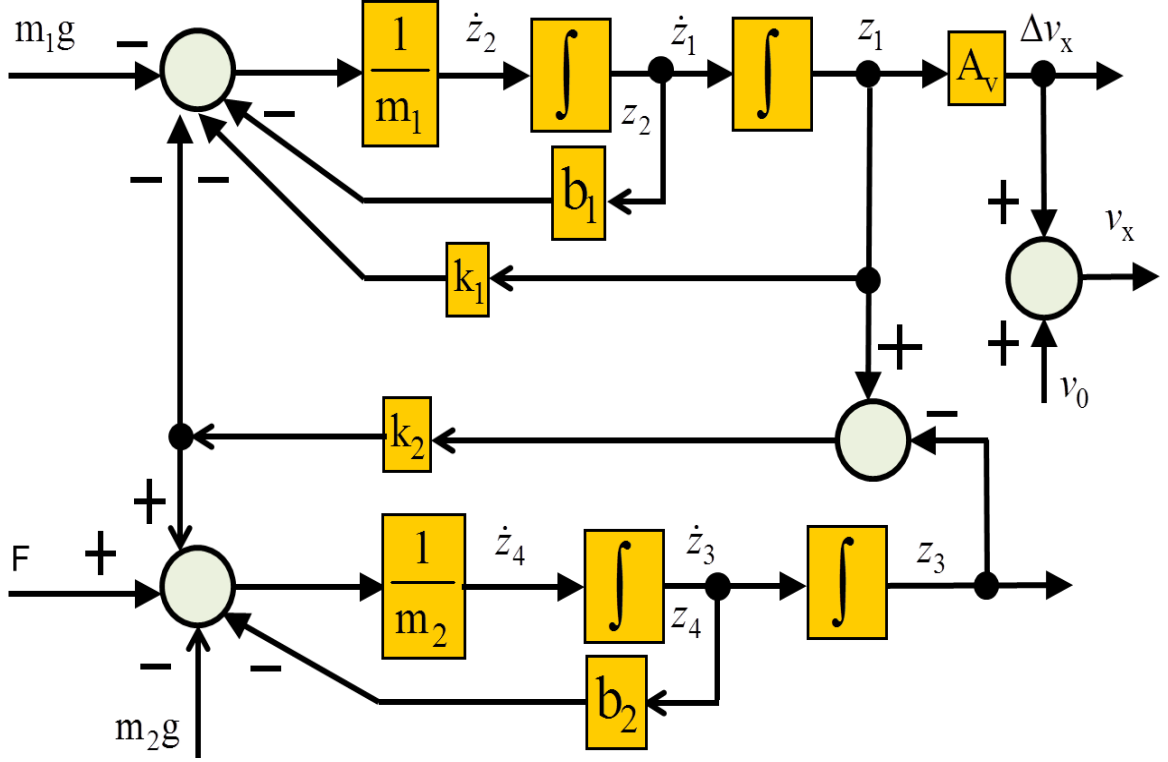
Verilen sistem aynı zamanda Şekil 3.18 deki simülasyon diyagramı ile de temsil edilebilir. Bu diyagram oluşturulduktan sonra nesneye dayalı yazılım özellikleri kullanılarak bir çözüm arayüzü oluşturulabilir. Ancak burada öğretim temel hedef olduğundan öğrencinin kendi çözümünü üretebilmesi gerekir. Bunun için de nesneye dayalı yazılımların arka planda yaptıklarını ön planda göstermek gerekir.



Şekil 3.18 Sallanan masa simülasyon diyagramı

Aslında nesneye dayalı yazılımlar geri planda bu sistemlerin durum uzayı modellerini oluşturup, çözümü de bu denklemler üzerinden Runge-Kutta algoritmaları gibi integro-diferansiyel denklem çözüm yöntemlerini uygulayarak çözmektedirler. Burada da öğrencinin verilen sisteme ilişkin durum-uzayı denklemlerinin nasıl elde edilebileceği aşağıda verilmektedir. Durum-uzayı denklemleri denklem 3.16, denklem 3.17 ve denklem 3.18 kullanılarak da elde edilebilir. Ancak denklemlerin dereceleri arttıkça bu tür denklemlerden durum uzayı modeline geçmek güçleşir. Önce simülasyon diyagramını oluşturup, sonra da bu simülasyon diyagramından durum uzayı modelini elde etmek işlem sürecinde kolaylık sağlayacaktır.

Simülasyon diyagramından durum uzayı modeline geçmek için Şekil 3.19 da verildiği gibi her integratörün çıkışına bir değişken atanır. İntegratörün girişi bu değişkenin türevi olacağından, durum değişkenleri doğrudan şekil üzerinden yazılabilir. Şekil 3.19 da değişken harfi olarak z kullanılmış, değişkenler de z_1 , z_2 , z_3 ve z_4 olarak işaretlenmiştir.



Şekil 3.19 Simülasyon diyagramında değişken atamaları

Şekil 3 den aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (3.21)$$

$$z_2 = \frac{1}{m_1} (-k_1 z_1 - b_1 z_2 - k_2 (z_1 - z_3) - m_1 g) \quad (3.22)$$

$$\dot{z}_3 = z_4 \quad (3.23)$$

$$z_4 = \frac{1}{m_2} (-b_2 z_4 + k_2 (z_1 - z_3) - m_2 g + F) \quad (3.24)$$

$$v_x = v_0 + A_v z_1 \quad (3.25)$$

Denklemler düzenlenirse,

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (3.26)$$

$$\dot{z}_2 = \frac{1}{m_1}(-k_1 z_1 - b_1 z_2 - k_2 z_1 + k_2 z_3) - m_1 g \quad (3.27)$$

$$\dot{z}_3 = z_4 \quad (3.28)$$

$$\dot{z}_4 = \frac{1}{m_2}(-b_2 z_4 + k_2 z_1 - k_2 z_3 - m_2 g + F) \quad (3.29)$$

$$v_x = v_0 + A_v z_1 \quad (3.30)$$

yazılabilir. Matris formuna sokabilmek için durum değişkenlerini katsayılarla çarpım şekline gelecek şekilde yeniden düzenlenir ve bu denklemler matris biçiminde yazılırsa durum uzayı denklemleri yazılmış olur.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{(k_1+k_2)}{m_1} & -\frac{b_1}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{m_2} & 0 & -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{b_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & \frac{1}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ F \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$v_x = [A_v \quad 0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} + v_0$$

Bu denklemler de çok iyi bilinen biçimiyle kapalı formda yazılabilir.

$$\dot{z} = Az + Bu \quad (3.1)$$

$$y = Cz + Dw \quad (3.2)$$

Sallanan masa sistemindeki x_1 ve x_2 yer değiştirme mesafeleri ile karıştırılmaması için modellemeye kullanılan durum uzayı değişkenleri z harfi ile gösterilmiştir. Burada $z_1 = x_1$ ve $z_3 = x_2$ dir.

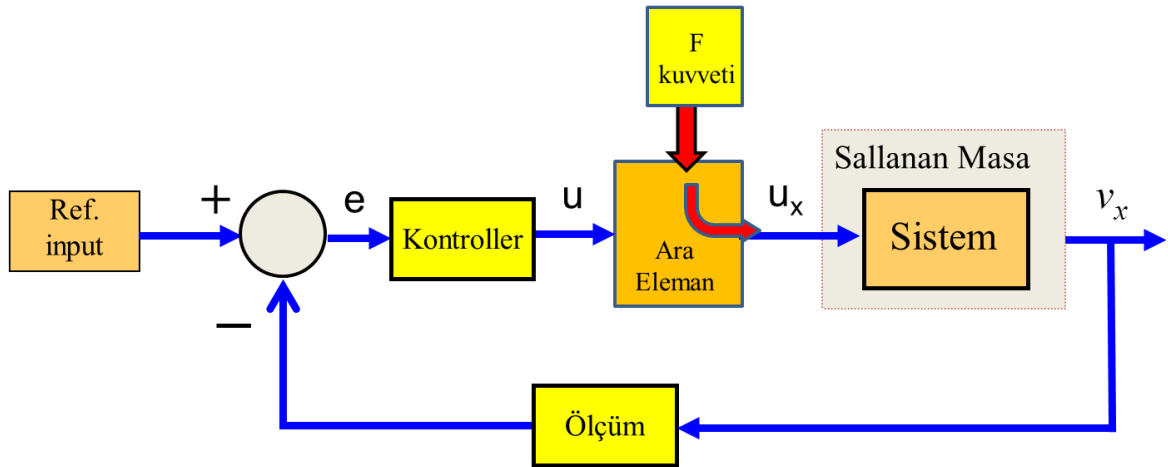
Burada \dot{z} durum vektörü, z durum değişkenleri vektörü, A durum matrisi, B giriş matrisi, u giriş ya da kontrol vektörü, y çıkış vektörü, C çıkış matrisi, D ileri besleme matrisi ve w ileri besleme giriş vektörü olarak isimlendirilir.

Verilen örnek sistemin simülasyonu durum uzayı modeli kullanılarak yapılabilir. Tasarımın bir sonraki adımı bu sisteme denetleyici tasarlamaktır. Denetleyicinin amacı masanın sallanmasına yol açan F giriş kuvvetinin etkisini azaltacak ara yüz için uygun işaret üretmektir. İşlemin basitliği açısından

$$u_x = uF \quad (3.33)$$

alınabilir. Kontrolör olarak da PID, Faz ilerletici/Faz geriletici veya bulanık mantık denetleyici seçilebilir. Burada uygun kontrollör tercihi ve kontrollör parametrelerinin belirlenmesi ayrıca açıklanması gereken bir konu olup, ayrı bir başlık altında tartışılmalıdır.

Şekil 3.20 sistemin kontrol blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 3.20 Kontrol blok diyagramı

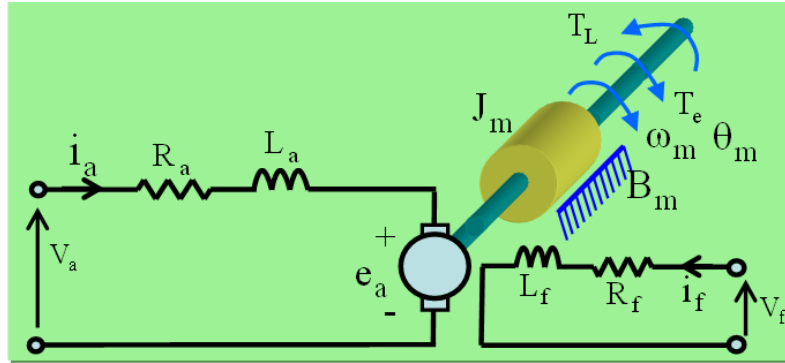
3.3.2. Tasarım Örneği-2

Bu tasarım örneğinde kullanılan problem [29] ve [30] dan alınmıştır.

3.3.2.1 Doğru Akım Hız ve Motor Kontrolü Modelleme Aşaması

Doğru akım (DA) motorları endüstriyel ve kontrol uygulamalarında hala vazgeçilmez elemanların başında gelmektedirler. Güç elektroniğindeki gelişmelere paralel olarak DA motorlarının hız kontrolü de kolaylaşmış ve daha esnek hale gelmiştir. Bunun sonucu olarak da ulaşım sistemlerinden fabrika otomasyon sistemlerine bir çok alanda uygulanmaya devam etmektedir. Özellikle küçük güç düzgün hız ve konum gerektiren uygulamalarda oldukça geniş biçimde kullanılmaktadır.

DA makinaları endüvi ve uyarma devresi olmak üzere iki elektriki kısım ile moment aktarımının yapıldığı bir mekanik kısımdan oluşur. Generatör çalışmada moment DA makinasına uygulanırken motor çalışmada moment mile bağlı yüke aktarılır. Motor çalışma durumunda bir DA makinası Şekil 3.21 de verilen genel eşdeğer elektromekanik sistem ile temsil edilebilir.



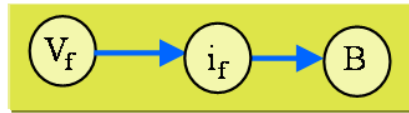
Şekil 3.21 DA motorunun eşdeğer elektromekanik şeması

Generatör çalışma durumunda i_a endüvi akımının ve ω_m açısal hızının yönü değişir. Dolayısıyla Şekil 3.21 de verilen elektromekanik diyagram şeması gerekli yönleri dikkate almak üzere hem motor hem de generatör çalışma durumları için kullanılabilir. Bu şekilde T_e makina tarafından üretilen moment, T_L yük momenti (generatör çalışmada yönü ters), e_a zıt elektromotor kuvvet (emk), i_a endüvi devresi akımı (generatör çalışmada yönü ters), V_a endüvi devresi gerilimi, V_f uyarma gerilimi ve i_f uyarma akımıdır. R_a ve L_a sırasıyla endüvi sargısının direnci ve endüktansı, R_f ve L_f de sırasıyla uyarma sargısının direnci ve endüktansıdır. J_m rotor kütlelerinin başlangıç atalet momenti, B_m milin Viscous sürtünme sabiti ve θ_m rotor milinin konum açısıdır.

DA motoruna uygulanan gerilim, akan akım, oluşan manyetik alan, ve moment arasında motor parametreleri üzerinden sebep-sonuç ilişkileri doğar ve bu ilişkiler matematiksel denklemler ile ifade edilirler. Bunlar genellikle diferansiyel denklemler biçiminde ya da transfer fonksiyonları olarak karşımıza çıkar. DA makinalarına ait durum denklemleri elde edilirken genellikle elektrik devre denklemleri ve moment denklemleri kullanılarak sonuca gidilir. Bu yöntem belki daha kısa ve doğrudan sonuca giden bir yaklaşım olabilir. Fakat özellikle lisans düzeyindeki öğrencilerin konuyu daha iyi anlayabilmeleri için sebep-sonuç ilişkilerinden yola çıkmak konunun anlaşılmasına önemli katkı sağlayacaktır. Bu nedenle burada doğrudan matematik denklemler kullanmak yerine sebep-sonuç diyagramları kullanılarak gerekli modelleme yapılmaktadır.

DA motorlarının çalışması basitçe iki temel yasa kullanılarak açıklanabilir. Amper yasasına göre içerisinde i akımı akan l uzunluğunda bir iletken düzgün B manyetik alanı içerisine yerleştirilirse bu iletken $f = Bil$ gibi bir kuvvete maruz kalır. Faraday'ın gerilim indüksiyon yasasına göre de düzgün B manyetik alanı içerisinde v hızıyla hareket eden l uzunluğundaki iletken $e = B\ell v$ gerilimi indüklenir. Bu iki yasaya dayalı olarak DA motorları için nitel bir model geliştirilebilir. Nitel model, sistemi karakterize eden değişik büyüklükler arasındaki sebep-sonuç ilişkileriyle elde edilen yönlendirilmiş grafikler biçiminde gösterilir. Nitel model elde edilirken DA motorundaki dört farklı işlem durumunu ele almak gerekir.

Durum 1. Uyarma devresine V_f uyarma gerilimi uygulanırsa bu devreden i_f akımı akmaya başlar ve uyarma sargılarının bulunduğu kutuplar arasında B manyetik akı yoğunluğunun oluşmasını sağlar. Şekil 2 de uyarma devresinin sebep-sonuç diyagramı verilmektedir.



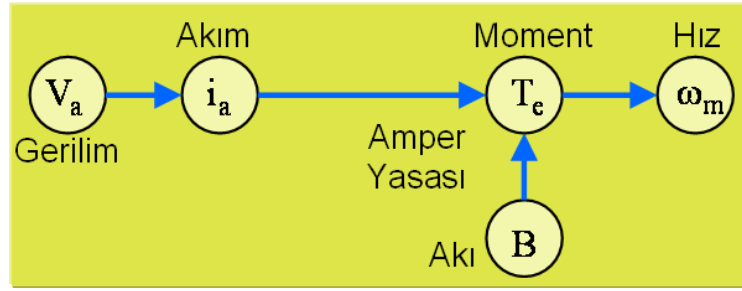
Şekil 3.22 Uyarma devresi sebep-sonuç diyagramı

Endüvi kontrollü DA motorlarının modellenmesinde uyarma devresi gerilimi sabit tutulduğundan manyetik akı yoğunluğu B sabit olur. Bu durumda Şekil 3.22 ile verilen diyagram yerine manyetik akı yoğunluğu B sabit bir değer olarak alınır.

Durum 2. Endüvi devresi hareketsizken bu devreye bir gerilim uygulandığında aşağıdaki sebep-sonuç ortaya çıkar.

- Endüvi devresine uygulanan v_a gerilimi bu devreden i_a akımının akmasına sebep olur.
- İletkenden i_a akımının akmasıyla B manyetik alanı etkisindeki bu l uzunluğundaki iletkende $f = Bi_a l$ kuvveti oluşur.
- r yarıçaplı l uzunluğundaki rotor (endüvi) üzerindeki N sarımlı bobin $T_e = NB l i_a r$ momentini üretir.
- Üretilen bu moment rotorun ω_m açısal hızıyla dönmesine sebep olur.

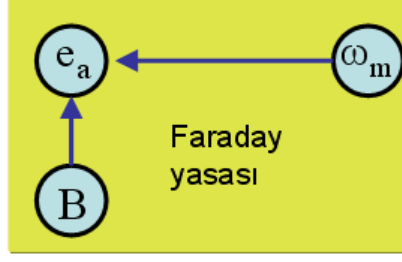
Sıralanan bu sebep-sonuç ilişkileri Şekil 3.23 deki grafikte temsil edilebilir.



Şekil 3.23 Endüvi devresi sebep-sonuç diyagramı

Durum 3. Endüvi açısal hızla dönmeye başlayınca endüvi sargısındaki iletkenler manyetik alan tarafından kesilmeye başlanır. Bu durumda endüvi sargılarında zıt elektromotor kuvvet (emk) adı verilen ve e_a ile gösterilen bir gerilim indüklenir.

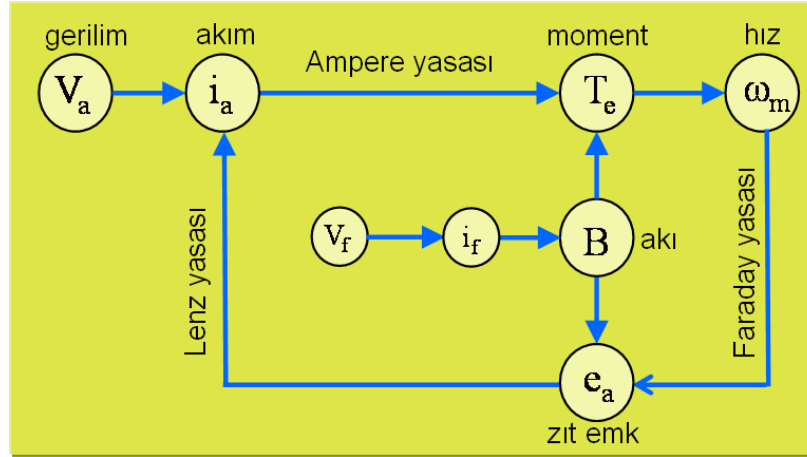
Doğrusal hız ile açısal hız arasındaki ilişki $v=r\omega_m$ bağıntısı ile ifade edilirse indüklenen zıt emk'in değeri $e_a = B l r \omega_m$ olarak yazılabilir. Şekil 3.24 de bu sebep-sonuç ilişkileri grafik olarak verilmektedir.



Şekil 3.24 Gerilim indüksiyonuna ilişkin sebep-sonuç diyagramı

Durum 4. Endüvi sargılarında indüklenen gerilim kendisinin oluşum sebebi olan ilk hareketin üretilmesine yol açan gerilime zıt yönlü olacaktır. Bu olay Lenz yasasıdır ve aslında enerjinin korunumu ilkesinin bir sonucudur.

Daha önceki ilk iki durumda verilen sebep-sonuç ilişkileri bu son durumda tarif edilenle birleştirilirse Şekil 3.25 deki sebep-sonuç diyagramı elde edilir. Bu diyagram genel anlamda DA motorunu temsil eder. Ancak DA motor türlerine göre değişik kontrol parametreleri söz konusu olduğundan motor türü ve hız kontrol yöntemine bağlı olarak bu diyagramda değişiklikler gerekir.



Şekil 3.25. DA motorları için genel sebep-sonuç diyagramı

3.3.2.2 DA Motoru Kontrol Seçenekleri

DA motorlarının kullanıldığı uygulamalar genellikle üç başlık altında toplanabilir.

- Hız kontrolü

- Konum kontrolü
- Moment kontrolü

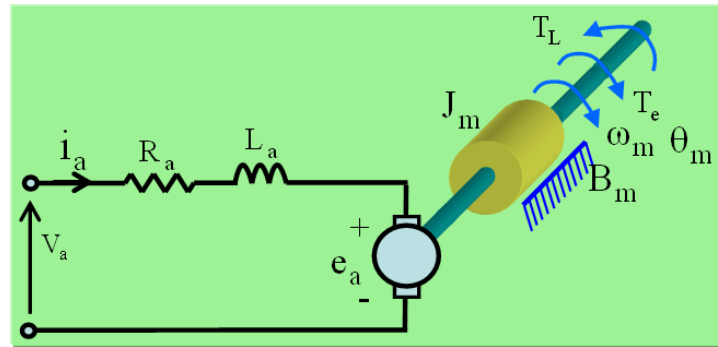
Bu uygulamalarında gerekli amaca ulaşabilmek için uygun DA motorları parametresinin kontrol edilmesi gerekir. DA motorlarının kontrolü üç temel biçimde yapılabilir.

- Endüvi devresi üzerinden kontrol
- Uyarma devresi üzerinden kontrol
- Hem endüvi hem de uyarma devresi üzerinden birleşik kontrol

Motorun matematiksel modeli elde edilirken uygulanacak kontrol işleminin hangi devre üzerinden yapılacağı dikkate alınmalıdır.

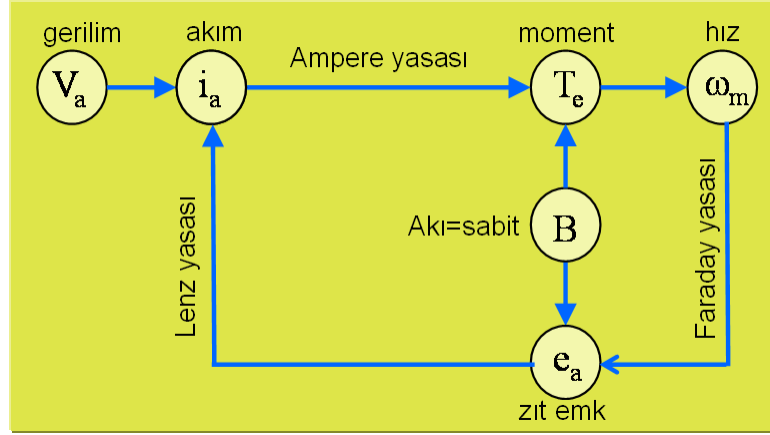
3.3.2.2.1 Endüvi Kontrollü DA Motoru

Bu çalışma koşulunda uyarma akımı dolayısıyla B manyetik akı yoğunluğu sabit tutulup, endüvi devresi gerilimi ayarlanmaktadır. Böylece Şekil 1 de uyarma devresine ait kısmın sabit manyetik akı yoğunluğunu ürettiği varsayılarak bu kısım çıkarılırsa endüvi kontrollü DA motorunun eşdeğer elektromekanik diyagramı Şekil 3.26 deki halini alır. Bu çalışma koşulu ile elde edilecek model, uyarması sabit tutulan serbest uyarmalı DA motoru ve sürekli mıknatıslı DA motoru için kullanılabilir.



Şekil 3.26 DA motorunun eşdeğer elektromekanik diyagramı

Endüvi kontrollü DA motorunun matematik denklemleri Şekil 3.27 de verilen elektriksel sistem, elektromanyetik etkileşim ve mekanik sistem dikkate alınarak elde edilir. Matematik denklemlerin elde edilmesinde sebep-sonuç diyagramlarının kullanılması kolaylık sağlar. Uyarmanın sabit olduğu dikkate alınır Şekil 3.25 deki genel sebep-sonuç diyagramı Şekil 3.27 de verilen diyagrama dönüşür. Bu diyagram kullanılarak endüvi kontrollü DA motorunun matematik modeli simülasyon diyagramı elde edilebilir.



Şekil 3.27 Endüvi kontrollü DA motoru için genel sebep-sonuç diyagramı

Elde edilen son sebep-sonuç diyagramından görüleceği gibi endüvi devresine uygulanan V_a gerilimi ile e_a zıt emk farkı endüvi devresinden i_a akımının akmasına neden olmaktadır. Bu akım endüvi devresi sargısından akar ve sargı direnci R_a ile endüktansı L_a nedeniyle bir gerilim düşümüne yol açar. Bunun matematiksel ifadesi;

$$v_a - e_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (3.34)$$

olarak yazılabilir. Endüvi devresinden akan i_a akımı ve B manyetik akı yoğunluğu T_e elektriksel momentinin üretilmesini sağlar.

$$T_e = B k_t i_a \quad (3.35)$$

Endüvi kontrollü DA makinasında B manyetik akısı sabit olduğundan bu denklem daha da kısaltılabilir.

$$T_e = k_m i_a \quad (3.36)$$

Burada $k_t = \ell N r$ ve $k_m = B k_t$ olarak tanımlanır. ℓ endüvi boyu, r endüvi yarıçapı ve N endüvi sargısının sarım sayısıdır.

Üretilen T_e momentinin etkisiyle endüvi sargılarını taşıyan rotor ω_m açısal hızıyla dönmeye başlar. Dönen endüvi sargılarında B manyetik alanının da etkisiyle e_a zıt emk'i endüklenir.

$$e_a = B k_t \omega_m \quad (3.37)$$

$$e_a = k_m \omega_m \quad (3.38)$$

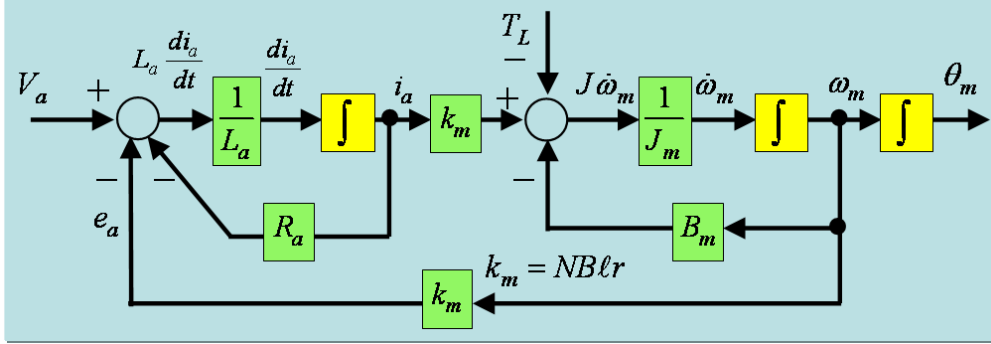
Elde edilen bu zıt emk başlangıçta kendi oluşumuna yol açan V_a gerilimine zıt yönlü olup denklem 3.34 de kullanıldığı gibi V_a ile zıt emk arasındaki fark endüvi devresini süren etkin gerilimdir. Motor hareketsizken hız sıfır olduğundan e_a zıt emk gerilimi de sıfırdır. Bu anda V_a uygulandığında $V_a - e_a$ farkı maksimum değerinde olacağından endüvi devresinden akan akım da maksimum değerinde olur. Bu nedenle yol verme sırasında dikkatli olmak ve kontrollü yol vermek gerekir. Motorun dönmesini sağlayan moment, i_a endüvi akımına bağlı olarak üretilen momenttir ve bu akımın başlangıçtaki yüksek değeri motorun ataletini, yük momentini ve sürtünme momentini yenerek dönmeye başlamasını sağlayan T_e momentinin de yüksek değerinde olmasına yol açar.

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - B_m \omega_m - T_L \quad (3.39)$$

3.3.2.3 Simülasyon Diyagramı ve Durum Denklemleri

Yukarıda verilen denklemler kullanılarak endüvi kontrollü DA motorunun simülasyon diyagramı rahatlıkla elde edilebilir. Denklem 3.34, denklem 3.36, denklem 3.38 ve denklem 3.39 kullanılarak Şekil 8 deki simülasyon diyagramı elde edilebilir. Şekil

3.28 deki simülasyon diyagramına hızın entegrali alınmak suretiyle milin konumu da eklenmiştir.



Şekil 3.28. Endüvi kontrollü DA motorunun simülasyon diyagramı

Endüvi kontrollü DA motorunun durum denklemleri Şekil 3.28 den doğrudan yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\theta_m}{dt} \\ \frac{d\omega_m}{dt} \\ \frac{di_a}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & \frac{k_m}{J_m} \\ 0 & -\frac{k_m}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{J_m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_L \\ V_a \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

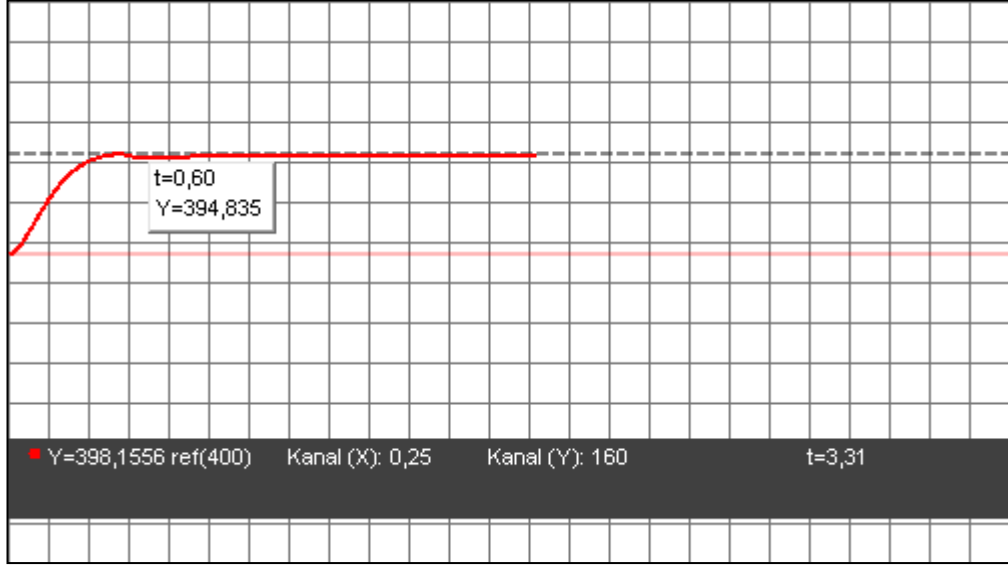
3.3.2.4 Örnek Simülasyon

Şekil 3.27 de verilen simülasyon diyagramı tablo 3.2 de verilen veriler kullanılarak hazırlanan interaktif sanal laboratuvar ortamında gerekli simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.2. Simülasyon verileri

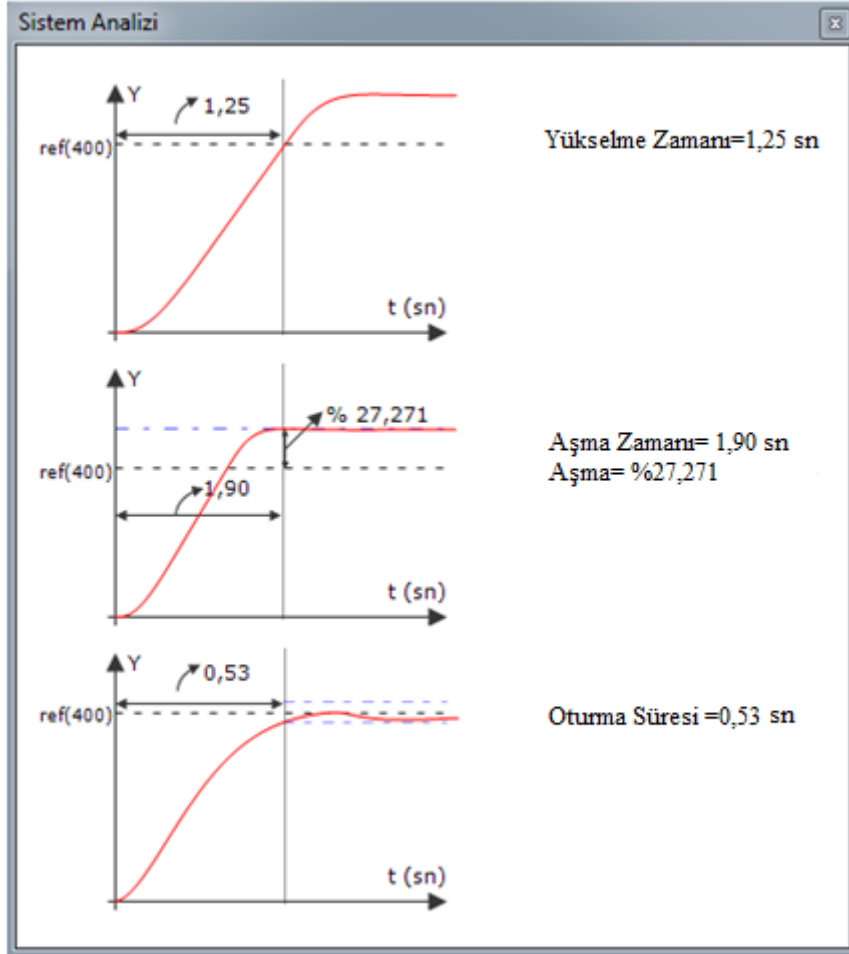
$V_a=200$ V	$B_m=0.04$
$V_f=200$ V	$J_m=0.6$
$R_a=0.1$ Ω.	$T_L=10$ Nm
$L_a=0.01$ H	$L_f=0.2$ H
$R_f=200$ Ω	$k_m=0.489$

Elde edilen DA motorunun hız grafiği Şekil 3.29 da gösterilmiştir. Şekil 3.29 sanal laboratuvarın grafik izleme ekranı için tasarlanmış olan osiloskobun çizim ekranıdır. Çizilen grafiğin üzerine fare ile gelindiğinde o noktanın zaman ve genlik değeri gösterilmiştir. 0,6. saniyede motor hızı 384,8 devir/dk dır. Şekil 3.29 un alt kısmında gösterilen kanal(X) ile bir karenin x eksenindeki boyu, kanal(Y) ile de bir karenin y eksenindeki boyu gösterilmektedir. Bu örnekten bir karenin x eksenindeki değeri 0,25 birim, y eksenindeki değeri 160 birimdir. $t=3,31$. saniyede motor hızı 398,1 devir/dk dır. Ekran zerindeki grafiği daha ayrıntılı bir Şekilde analiz etmek için Ek-2 de belirtilen osiloskop özellikleri kullanılır.



Şekil 3.29. Endüvi kontrollü DA motorunun hız grafiği

Şekil 3.30 da endüvi kontrollü DA motorunun dinamik analiz grafikleri gösterilmiştir. Referans değeri 400 devir/dk ya göre elde edilen yükselme zamanı, aşma miktarı ve oturma süresi grafikleri Şekil 3.30 da gösterilmektedir.



Şekil 3.30. Endüvi kontrollü DA motorunun dinamik analiz grafikleri

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında doğrusal sistem simülasyonu ve denetimini yapmak için interaktif sanal bir laboratuvar geliştirilmiştir. Baştan sona öğrenciyi yönlendirerek kolay kullanım imkanı sunulmuştur. Sistem simülasyonu ve denetimi için gerekli matematiksel modelin öğrenci tarafından oluşturulması sağlanarak öğrencinin problem formülasyonu ve çözümü aşamasında proje içinde tutulması sağlanmıştır.

Parametrik olarak verilen doğrusal bir sistemin PID ve Bulanık Mantık denetleyicisi ile kontrolünün tüm adımları incelenmiş, elde edilen tüm veriler hem sayısal hem de grafik olarak kullanıcıya sunulmuştur.

Bölüm 3.3 de verilen iki ayrı tasarım örneği öğrencilere yol göstererek bir sistemin simülasyona ve denetimine geçilmeden önce yapılması gerekenlere örnek teşkil etmektedir.

Tasarım aşamasından sonra sistem simülasyonu, anlık ve belirli süreler arasında koşturulup elde edilen veriler grafiksel ve sayısal olarak kullanıcıya sunulmuştur. Koşturulan sanal laboratuvar kullanıcıya, anlık sistem çıkış değerlerini, sistem dinamik davranış analizini, performans analizini, kararlılık analizini, hata-hata değişim grafiklerini çeşitli pencerelerle ortaya koymuştur. Sistem çıkış değerleri çeşitli zaman aralılarında ölçeklenip birer birer incelenmiştir. Sonuçları grafiklerle göstermek için tasarlanan ve yazılım olarak gerçekleştirilen osiloskop üzerinde birden çok kanal gösterimi sağlanarak farklı projelerin çıkışların aynı ekran üzerinden kıyaslanabilmesi sağlanmıştır. Bu sayede kullanıcı simülasyonunu gerçekleştirdiği veya denetimini yaptığı sistemin farklı parametrelerle vereceği tepkeleri aynı ekran üzerinde gözleyip inceleyebilmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada, doğrusal bir sistemin simülasyonunu ile bulanık mantık ve PID denetleyicilerle denetimini gerçekleştirmek için gerekli tasarım ve analizlerin yapılabileceği, kontrol sistemleri derslerinde yardımcı ders aracı olarak kullanılacak sanal bir ortam oluşturulmuştur.

5. ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışması simülasyon amaçlı olduğu için herhangi bir deneysel uygulama yapılmamıştır. Sistem parametreleri bilinen fiziksel araçları bilgisayarla haberleştirerek hem gerçek zamanlı uygulama yapılabilir hemde elde edilen sonuçlar simülasyon sonuçları ile karşılaştırılabilir. Bu yönde yapılacak bir çalışma için yazılıma dış dünya ile haberleşmesini sağlayacak bazı bileşenler eklenmelidir.

Doğrusal sıradan diferansiyel denklemlerin çözümünde 4 adımlı Runge-Kutta algoritması dışında diğer doğrusal diferansiyel denklem çözüm algoritmaları da yazılıma eklenerek kullanıcıya çözüm yöntemi seçme seçeneği sunulması bu çalışmayı daha iyi bir düzeye getirecektir.

Ayrıca interaktif sanal laboratuvar geliştirilerek bulanık mantık ve PID denetleyici dışında kalan yapay sinir ağları, genetik algoritmalar ve kayan kipli denetleyiciler de entegre edilebilir.

Bu proje biraz daha ileriye götürülerek, uzaktan eğitim platformları için sanal kontrol laboratuvarına dönüştürülebilir.

Fakat öncelikli olarak şuan ki haliyle öğrenciler üzerinde yeterli testler gerçekleştirilmeli ve varsa eksiklikleri giderilmelidir.

6. KAYNAKLAR

1. Bengu, G. ve Swart, W., A Computer-Aided, Total Quality Approach To Manufacturing Education İn Engineering, IEEE Transaction Education, 39, 8 (1996) 415-422.
2. Latchman, H.A., Salzman, C., Gillet, D. ve Bouzekri, H., Information Technology Enhanced Learning İn Distance And Conventional Education, IEEE Transaction Education, 42, 11 (1999) 247-254.
3. Wirthlin, M.J. ve McMurtrey, B., Web-Based IP Evaluation And Distribution Using Applets, IEEE Transaction Computer Aided Design Integrated Circuits Systems, 22, 8 (2003) 985-994.
4. Gonvalves, F.A.S. ve Canesin, C.A., JAVA Applets For A WWW-HTML-Based Course İn Power Electronics, Power Electronics Specialists Conference, 6 (2001) 85-90.
5. Yang, D.R. ve Lee, J.H., Java Applet Modules For Undergraduate Process Control Education, American Control Conference, 6 (2003) 694-699.
6. Viedma, G., Dancy, I.J. ve Lundberg, K.H., A Web-Based Linear-Systems Ilab, American Control Conference, 7, 6 (2005) 5139-5144.
7. Mendez, J. A., Lorenzo, C., Acosta, L., Torres, S. ve Gonzalez, E., A Web-Based Tool For Control Engineering Teaching, Computer Applications in Engineering Education, 14, 9 (2005) 177-187.
8. Lundberg, K.H. ve Williams, B.F., An Educational Java Applet For Linear Systems, American Control Conference, 7, 6 (2006) 5150-5155.
9. Altawil, I.A. ve Hajier, O.I., Teaching the PWM AC Voltage Controller Using Matlab Graphical User Interface, Universities Power Engineering Conference, 9 (2006) 1101-1106.
10. Altaş, İ. H. ve Aydar, H., A Real-Time Computer-Controlled Simulator: For Control Systems, Computer Applications in Engineering Education, 16, 3 (2008) 115-126.
11. Dormido, R., Vargas, H., Duro, N., Sanchez, J., Dormido, C., S., Farias, G., Esquembre, F. ve Dormido, S., Development of a Web-Based Control Laboratory for Automation Technicians: The Three-Tank System, IEEE Transactions on Education, 51, 2 (2008) 35-44.
12. Wu, M., She, J. H., Zeng, G. X. ve Ohyama, Y., Internet-Based Teaching and Experiment System for Control Engineering Course, Industrial Electronics, IEEE Transactions on 55, 6 (2008) 2386-2396.

13. Bayındır, R., Demirbaş, Ş. ve Sesveren, Ö., Reaktif Güç Kompanzasyonu İçin Zeki Bir Simülator Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi, Gazi Üniversitesi. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23 (2008) 681-688.
14. Balestrino, A., Caiti, A. ve Crisostomi E., From Remote Experiments to Web-Based Learning Objects: An Advanced Telelaboratory for Robotics and Control Systems, IEEE Transactions On Industrial Electronics, 56, 10 (2009) 4817-4825.
15. Canesin, C.A., Gonçaves, F. A. S. ve Sampaio, L.P., Simulation Tools for Power Electronics Courses Based on Java Technologies , IEEE Transactions On Education, 53, 11 (2010) 580-586.
16. Şahin, Y., Scara Tip Bir Robotun Yörünge Kontrolünde PID Kontrol Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006.
17. Yağsan, O., Bir Operatörsüz Vinç İçin PID ve Genetik Algoritma Temelli Minimum Salımlı Konum Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
18. Wang, L.Y. ve Yin, G., Time Complexity Of Closed-Loop Identification, Decision and Control, proceedings of the 40th IEEE Conference, 2, 12 (2001) 2007-2012.
19. Masanori, Y., Takashi, S. , Yasushi, B. ve Fumia, K., A Two Degrees of Freedom PID Control System, its Features and Applications, Control Conference, 7 (2004) 456-459.
20. Aström, K. J. ve Hagglund, T., Advanced PID Control. 1. Baskı, ISA - Instrumentation, Systems and Automation Society, 2006.
21. Zadeh, L.A, Fuzzy Sets, Information and Control., 8 (1965) 338-353.
22. Mamdani, E.H., Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of, 12 (1974) 1585-1588.
23. Ayas, M.Ş. ve Altaş, İ.H., Design of a Fuzzy Logic Controller for Light Tracking Servo Systems, INISTA, (2011) 239-243.
24. Altaş, İ. H. ve Sharaf, A. M., A Generalized Direct Approach for Designing Fuzzy Logic Controllers in Matlab/Simulink GUI Environment, International Journal of Information Technology and Intelligent Computing, 1 (2007).
25. Tan, W., Liu, J., Chen, T. ve Marquez H. J., Comparison of Some Well-known PID Tuning Formulas, Computer and Chemical Engineering, 30, 5 (2006) 1416-1423.
26. Tavazoei, M. S., Notes On Integral Performance Indices in Fractional-Order Control Systems, Journal of Process Control, 20, 9 (2010) 285–291.
27. Chapra, S. C., Canale, R. P., Numerical Methods For Engineers, Second, Edition, McGraw-Hill Book Co., Newyork, 1988.

28. Gerald, C. F., Wheatley, P. O., Applied Numerical Analysis, Fourth Edition, Addison-Wesley Publishing Co., 1989.
29. Altaş, İ. H., Endüvi ve Uyarma Birleşik Kontrollü DA Motorlarının Modellenmesinde Sebep-Sonuç Yaklaşımı, Otomasyon, 189, 3 (2008) 102-110.
30. Altaş, İ. H., Endüvi Kontrollü DA Motorlarının Modellenmesinde Sebep-Sonuç Yaklaşımı, Otomasyon, 187, 1 (2008) 186-190.

7. EKLER

Ek 1. Durum-Uzay Denkleminde Kullanılabilecek Matematiksel İşlemler

- $+$: Toplama operatörüdür.
- $-$: Fark alma operatörüdür.
- $*$: Çarpma operatörüdür.
- $/$: Bölme operatörüdür.
- $\sin(x)$: Radyan cinsindeki x değerinin sinüsünü döndürür.
- $\cos(x)$: Radyan cinsindeki x değerinin cosinüsünü döndürür.
- $\tan(x)$: Radyan cinsindeki x değerinin tanjantını döndürür.
- $\text{asin}(x)$: arcsin operatörüdür.
- $\text{acos}(x)$: arccos operatörüdür.
- $\text{atan}(x)$: arctan operatörüdür.
- $\sinh(x)$: sinüs hiperbolik fonksiyonudur.
- $\cosh(x)$: cosinüs hiperbolik fonksiyonudur.
- $\tanh(x)$: tanjant hiperbolik fonksiyonudur.
- $\text{pow}(x,y)$: x^y değerini döndürür.
- $\text{sqrt}(x)$: x değerinin karekökünü döndürür.
- $\text{exp}(x)$: e^x değerini döndürür.
- $\ln(x)$: x değerinin e tabanına göre logaritmasını döndürür.
- $\log(x)$: x değerinin 10 tabanına göre logaritmasını döndürür.
- $\text{max}(x,y)$: x ve y değerlerinden büyüğünü döndürür.
- $\text{min}(x,y)$: x ve y değerlerinden küçüğünü döndürür.
- $\text{abs}(x)$: x değerinin mutlak değerini döndürür.

Ek 2. Grafik İzleme Ekranı Özellikleri

- 1- Grafiklerin çizildiği paneldir.
- 2- Osiloskopta çizdirilen kanalların t anındaki değerlerini ve herbir karenin x ve y eksenlerindeki boyunu verir. Kanal (X) bir karenin x eksenindeki uzunluğunu gösterirken, Kanal (Y) de karenin y eksenindeki uzunluğu gösterir. t ise simülasyonun en son ulaştığı zamanı gösterir.
- 3- Kaydırma çubuğu ile ekran sağa - sola kaydırılır.
- 4- Çizilmiş olan grafiği y ekseninde genişletip daraltır.
- 5- Çizilmiş olan grafiği x ekseninde genişletip daraltır.
- 6- Osiloskopta çizdirilecek olan projenin seçildiği açılır kutudur.
- 7- Osiloskopta çizdirilecek olan proje elemanının seçildiği açılır kutudur. Bu elemanlar Y, X0, X1, error, U(t) olabilir.
- 8- Aşağı - yukarı oklarla ile kanal y eksenini boyunca kaydırılır.
- 9- Kanalı osiloskopta gözükmesi veya gözükmemesi ayarlanır.
- 10- Bütün kanalları aynı seviyeye getirir.
- 11- Osiloskop ekranı bmp uzantısı ile kaydedilir.
- 12- Çizilmiş olan grafiklerin üzerine gelindiği zaman o noktadaki zaman ve grafiğin y eksenindeki değerini gösterir.

ÖZGEÇMİŞ

10.11.1987 Tarihinde Trabzon'da doğdu. İlk, ortaokul ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2005 yılında başladığı Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik–Elektronik Mühendisliği Bölümünden 2009 yılında Elektrik–Elektronik Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans öğreniminin bir senesini Erasmus öğrenci değişimi programı kapsamında İsveç Halmstad Üniversitesinde geçirdi. 2009 Kasım ayından itibaren, Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Yabancı dil olarak, iyi derecede İngilizce bilmektedir.