

78136

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OTOMATİK YÖNLENDİRMELİ BİR ARACIN
BULANIK MANTIK İLE DENETİMİ

Elektronik Mühendisi Birol SOYSAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Elektronik Yüksek Mühendisi”
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29.05.1998

Tezin Savunma Tarihi : 27.07.1998

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Saadettin AKSOY

Jüri Üyesi : Doç. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Adnan CORA

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Asım KADIOĞLU

Trabzon 1998

ÖNSÖZ

Fabrika otomasyonunda otomatik yönlendirmeli yük araçları ve bunların otomatik denetimi büyük önem taşır. Bu çalışmada son on yılda kullanımı yaygınlaşan bulanık mantık yöntemi ile otomatik yönlendirmeli araçlar için bir denetleyici tasarlanmış ve klasik denetim yöntemlerine göre üstünlükleri incelenmiştir.

Yüksek lisans tez danışmanlığımı üstlenerek çalışmaların yürütülmesi sırasında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Saadettin AKSOY'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Ayrıca, her konuda yapıcı eleştirilerinden yararlandığım Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi sayın Yrd. Doç. Dr. Adnan DERDİYOK'a ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Biol SOYSAL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLolar DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ.....	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....	3
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	5
2.1. Sistemin Tanıtımı.....	5
2.2. Sistemin Kinematığı.....	5
2.3. Sistemin Dinamiğı.....	8
2.4. Sistemin Denetimi.....	14
2.4.1. PID Denetleyici.....	15
2.4.1.1. PID Denetleyicinin Özellikleri.....	16
2.4.2. Bulanık Mantık Denetleyici.....	17
2.4.3. Bulanık Mantık Denetleyicinin Tasarlanması.....	18
2.4.4. Bulanık Mantık Denetleyicinin Özellikleri.....	22
3. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	23
3.1. Bulanık Mantık Denetleyici ile PID Denetleyicinin Karşılaştırılması.....	23
3.2. Bulanık Mantık Denetleyici ile Yörünge Takibi.....	30
4. SONUÇLAR.....	45
5. KAYNAKLAR.....	46
6. ÖZGEÇMİŞ.....	50

ÖZET

Fabrika otomasyonunda otomatik yönlendirmeli araçlar ve bunların denetimi oldukça önemlidir. Bu çalışmada otomatik yönlendirmeli bir araç için bulanık mantık yönteminin kullanıldığı bir denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyici PID denetleyici ile karşılaştırılarak üstünlüğü gösterilmiştir. Denetleyicinin bilgisayarda simülasyonu yapılmış ve sonuçları verilmiştir.

Otomatik yönlendirmeli yük araçları için denetleyici tasarlarken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, yüke bağlı olarak aracın bazı parametrelerinin (atalet gibi) değişebileceğidir. Dolayısıyla aracın dinamiği de değişebilir. Bu yüzden tasarlanacak olan denetleyici bu değişimlere karşı duyarsız olmalıdır. Bulanık mantık denetleyicinin ani yük değişmelerine karşı oldukça duyarsız olduğu gözlenmiştir.

Diğer bir önemli nokta da aracın istenilen yere, istenilen yörüngeyi takip ederek ulaşabilmesidir. Geliştirilen bulanık mantık denetleyici bu konuda da arzulanan sonuçları vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Otomatik Yönlendirmeli Araç, Bulanık Mantık, PID Denetleyiciler, Yörünge Takibi.

SUMMARY

Fuzzy Logic Control of An Automated Guided Vehicle

Automated guided vehicles (AGV) are very important in factory automation. In this work, a controller is designed for an AGV by fuzzy logic control theory. The results of controller are compared with the results of PID controller. The controller is simulated in PC and results are given.

When designing a controller for AGV, the most important point is that the some parameters of AGV (i.e. inertia) change with load changes and cause change of dynamic behaviour of vehicle. Therefore, the controller should be designed to overcome any parameter changes. The fuzzy logic controller is designed to control the AGV robustly against sudden load changes.

The other important point is that the vehicle should arrive to desired place but to track the desired trajectory. The designed controller provides this necessity successfully.

Key Words: Automated Guided Vehicle, Fuzzy Logic, PID Contollers, Trajectory Tracking.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Aracın modeli ve koordinat sistemi.....	6
Şekil 2. Aracın anlık hareketi.....	7
Şekil 3. Tekerlek ve sürücü düzeneği.....	8
Şekil 4. Sistemin genel blok şeması.....	14
Şekil 5. PID denetleyicinin yapısı.....	16
Şekil 6. Bulanık mantık denetleyicinin blok şeması.....	19
Şekil 7. Tanımlanan üyelik fonksiyonları.....	21
Şekil 8. Referansların sabit olması durumunda PID denetleyicinin cevabı.....	23
Şekil 9. Referansların sabit olması durumunda bulanık mantık denetleyicinin cevabı.....	24
Şekil 10. Hıza ait referansın değiştirilmesi karşısında PID denetleyicinin cevabı.....	25
Şekil 11. Hıza ait referansın değiştirilmesi karşısında bulanık mantık denetleyicinin cevabı.....	25
Şekil 12. Açıya ait referansın değiştirilmesi karşısında PID denetleyicinin cevabı.....	26
Şekil 13. Açıya ait referansın değiştirilmesi karşısında bulanık mantık denetleyicinin cevabı.....	26
Şekil 14. Ani yük değişimi karşısında PID denetleyicinin cevabı.....	27
Şekil 15. Ani yük değişimi karşısında bulanık mantık denetleyicinin cevabı.....	27
Şekil 16. Hız, açı ve yükün aynı anda değişmesi karşısında PID denetleyicinin cevabı.....	28
Şekil 17. Hız, açı ve yükün aynı anda değişmesi karşısında bulanık mantık denetleyicinin cevabı.....	28
Şekil 18. Açıya ait referansın zamanla değişmesi halinde PID denetleyicinin cevabı....	29
Şekil 19. Açıya ait referansın zamanla değişmesi halinde bulanık mantık denetleyicinin cevabı.....	30
Şekil 20. Sabit açılı yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi.....	31

Şekil 21. Sabit açılı yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değişimleri.....	31
Şekil 22. Sabit açılı yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri.....	32
Şekil 23. Sabit açılı yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları.....	32
Şekil 24. Düz-sinüsoidal-düz yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi.....	33
Şekil 25. Düz-sinüsoidal-düz yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değişimleri.....	33
Şekil 26. Düz-sinüsoidal-düz yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri.....	34
Şekil 27. Düz-sinüsoidal-düz yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları.....	34
Şekil 28. Sinüzoidal yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi.....	35
Şekil 29. Sinüzoidal yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değişimleri.....	35
Şekil 30. Sinüzoidal yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri.....	36
Şekil 31. Sinüzoidal yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları.....	36
Şekil 32. Merdiven yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi.....	37
Şekil 33. Merdiven yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değişimleri.....	37
Şekil 34. Merdiven yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri.....	38
Şekil 35. Merdiven yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları.....	38
Şekil 36. Karesel yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi.....	39
Şekil 37. Karesel yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değişimleri.....	39
Şekil 38. Karesel yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri.....	40
Şekil 39. Karesel yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları.....	40
Şekil 40. Eliptik yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi.....	41
Şekil 41. Eliptik yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değişimleri.....	41

Şekil 42. Eliptik yörünge durumunda hız ve açıya ait hataların değişimleri.....	42
Şekil 43. Eliptik yörünge durumunda hız ve açıya ait denetleyicilerin çıkışları.....	42
Şekil 44. S biçimli yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi.....	43
Şekil 45. S biçimli yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değişimleri.....	43
Şekil 46. S biçimli yörünge durumunda hız ve açıya ait hataların değişimleri.....	44
Şekil 47. S biçimli yörünge durumunda hız ve açıya ait denetleyicilerin çıkışları.....	44



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Bulanık mantık kural tablosu..... 19



SEMBOLLER DİZİNİ

AGV	: Automated Guided Vehicle
B	: Denetleyici giriş matrisi
B_2, B_m	: Sürtünme katsayısı
d	: Türev operatörü
de	: Hata değişimi
du	: Denetim işareti değişimi
e	: Hata
e_m	: Endüvi devresinde endüklenen zıt e.m.k.
g	: Sistem durumları fonksiyonu
I_e	: Endüvi devresi akımı
J_2, J_m	: Atalet momenti
K_d	: Türev kazancı
K_e	: Motor sabiti
K_i	: İntegral kazancı
K_p	: Oran kazancı
L	: İki tekerlek arasındaki uzaklık
L_e	: Endüvi devresi endüktansı
n	: Dişli oranı
OYA	: Otomatik Yönlendirmeli Araç
R	: Tekerlek yarıçapı
R_e	: Endüvi devresi direnci
S_L	: Sol tekerleğin yer değiştirmesi
S_R	: Sağ tekerleğin yer değiştirmesi
sign	: İşaret fonksiyonu
t	: Zaman
T_1, T_2	: Momentler
T_m	: Motor momenti
T_y	: Yük momenti

T_c	: Coulomb sürtünme momenti
T_L	: Sol tekerlek momenti
T_R	: Sağ tekerlek momenti
u	: Denetleyici ıkış işareti
u_c	: Endüvi devresi besleme gerilimi
u_v	: Hıza ait denetleyici çıkışı
u_φ	: Açıya ait denetleyici çıkışı
v	: Aracın doğrusal hızı
v_L	: Sol tekerleğin doğrusal hızı
v_R	: Sağ tekerleğin doğrusal hızı
v_x	: Doğrusal hızın x bileşeni
v_y	: Doğrusal hızın y bileşeni
v_r	: Referans hız
$x_{i=1,3}$: Sistem durum değişkenleri
$\alpha_{i=1,3}$: Sistem dinamiğinin parametreleri
φ	: Aracın açısı
φ_r	: Referans aı
ω_m	: Motor milinin açısal hızı
ω_L	: Sol tekerleğin açısal hızı
ω_R	: Sağ tekerleğin açısal hızı
μ	: yelik derecesi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Mühendislik biliminde ortaya çıkan yeni gelişmeler pek çok sektörü etkilemekte olup, daha ileri teknolojilerin üretimine ve kullanılmasına imkan sağlamaktadır. Bunun kaçınılmaz bir sonucu olarak makinalaşma artmakta, fabrikalarda insanların yerini robotlar almakta ve verim yükselmektedir. Her ne kadar bu gelişmelerin işsizliği arttıracığı akla gelse de, yine bu gelişmeler sayesinde yeni iş alanları açılmaktadır. Bu, gelişmenin doğal bir sonucudur.

Otomatik Yönlendirmeli Araç (OYA), fabrika otomasyonunda en önemli elemanlardan biridir. OYA, Elektromagnetik veya optik algılayıcılarla donatılmış, önceden tanımlanmış bir yolu takip ederek bir noktadan başka bir noktaya varabilen, programlanabilen ve başka özel fonksiyonları da olabilen bir sistem olarak tanımlanabilir. Bu araçlar tamamen bilgisayar denetimli olup sürücüye ihtiyaç duymazlar. Bir düzlem içerisinde bir yerden başka bir yere malzeme taşınmasında, yüklenmesinde kullanılabilirler. Bir OYA'dan beklenen şey, aldığı yükü istenilen yere ve istenilen yolu takip ederek ulaştırabilmesidir. Böyle bir işlem herhangi bir robot veya yük taşıma bandı (konveyör) ile kolayca gerçekleştirilemez. Çünkü robotlar fazla yük taşıyamazlar ve bantlar da esnek bir yapıya sahip değildirler.

Fabrikalarda OYA kullanmanın önemli faydaları şöyle sıralanabilir [1]:

a) Pek çok yük taşıma sistemi içerisinde OYA'lar en ekonomik olanıdır. Kısa bir sürede kendilerini amorti ederler.

b) OYA'lar diğer taşıma sistemlerinin konveyör, üretim bantları, otomatik yükleme/boşaltma birimleri, asansör ve kapı gibi alt birimleriyle etkileşimli olarak çalışabilecek şekilde tasarlanabilirler.

c) Bilgisayarlı denetim sayesinde istasyonlar arasında mal takibine ve tesliminin

gerçek zamanda doğrulanmasına imkan tanır.

d) Sürücüsüz araç kullanmaktan dolayı iş gücü gereksinimini azaltırken, karmaşık mal takibi işlemlerini ortadan kaldırdığı için de hızı ve verimliliği arttırmaktadır.

e) Fabrika içerisinde mal akışının değişmesi veya taşınan malın boyutlarının artması gerekebilir. Bu durumda OYA'ların kapasitesi düşük maliyetle kolayca genişletilebilir ve yeni yükleme/boşaltma noktaları tanıtılabilir.

f) OYA'lar limitsiz yükleme ve boşaltma noktası için tasarlanabilirler.

g) Yapılan çalışmalar göstermektedir ki, OYA'lı yük taşıma sistemlerinde ürün ve teçhizat tahribatı daha az olmaktadır.

h) Bir fabrikanın yük taşıma sistemi bir çok OYA'dan oluşabilir. Bir OYA'nın bakıma ihtiyaç duyması halinde diğerleri bundan etkilenmezler. Dolayısıyla da sistem kapasitesinde bir düşme olmaz.

i) OYA'ların işletilmesi için fazla enerjiye ihtiyaç yoktur. Gürültülü değildirler.

j) OYA sistemlerinin kurulması diğer sistemlere göre daha az vakit alır.

k) Mevcut bir yapıya, çalışmakta olan sistemi çok fazla engellemeden kolayca monte edilebilirler.

OYA'lar daha pek çok alanda kullanılabilirler. İnsanların çalışmasının sakıncalı olduğu kimyasal gazlar veya radyasyon tehlikesi olan ortamlarda, aşırı sıcak ve aşırı soğuk ortamlarda ve askeri amaçlı olarak özel teçhizatlar eklenerek kullanılabilirler. 1997 yılında NASA tarafından Mars yüzeyine indirilen ve başarılı araştırmalar yapan "Pathfinder" çok gelişmiş ve oldukça özellikli bir OYA'dan başka bir şey değildir.

OYA'ların taşıyacağı yük kesin çizgilerle belirlenemez. Bazen çok hafif yükler

taşıması istenir, bazen de ağır. İşte bu belirsizlik OYA'nın denetimini oldukça zorlaştırır. Çünkü, sistemin ataleti ve sistemle zemin arasındaki sürtünme direk olarak yüke bağlıdır. Yük değişken olunca bu parametreler de değişken olacaktır. Dolayısıyla sistemin dinamiği de değişken olacaktır. Eğer kullanılan denetleyici bu değişimlere karşı duyarsız değil ise, denetleyici parametrelerinin yüke göre ayarlanması gerekecektir. Bu da iyi bir çözüm değildir.

Bu çalışmada, bir OYA için parametre değişimlerinden etkilenmeyen, ani değişikliklere karşı duyarsız bir denetleyici tasarlanması amaçlanmıştır. Bu denetleyici aynı zamanda sistemin matematiksel modelinden de bağımsız olmalıdır. Böyle bir denetleyicinin zeki denetim algoritmaları ile gerçekleştirilebileceği açıktır. Yapay sinir ağları, kayan kipli denetim, bulanık mantık denetim gibi yöntemler içerisinde diğer avantajları da dikkate alınarak bulanık mantık yöntemi tercih edilmiştir.

1.2. Daha Önce Yapılan Çalışmalar

OYA'lar ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Çalışmalar daha çok OYA'ların fabrikalarda kullanılmaları ve organizasyonları konusunda yoğunlaşmıştır [1-13]. Yapıları [14,15] ve özellikle denetimleri konusunda fazla çalışma yoktur [16,17]. Yine OYA'larla ilgili olarak yörünge takibi [18-20] ve görme özelliği olan hareketli robotlar [21] konularında da çalışmalar mevcuttur.

Bu çalışmada bulanık mantık denetleyici tercih edilmesinin bir nedeni de, klasik mantıktan farklı olarak 0 ile 1 arasındaki bütün gerçek sayıların kullanılabilmesidir [22,23]. Bu da daha hassas denetim yapabilme imkanı sağlamaktadır. Bu özelliğinden dolayı bulanık mantık tabanlı denetleyicilerin kullanımı oldukça artmıştır. Servo sistemlerin denetiminden [24] hareketli araçların takip sistemlerinin denetimine [25], ev ısıtma sistemlerinin denetiminden [26] endüstriyel süreçlerin denetimine [27], motorlardaki moment dalgalanmasının giderilmesinden [28,29] motor ve motor sürücü düzeneklerinin denetimine [30-32] kadar pek çok alanda kullanılmaktadır.

Bu çalışmada öngörülen bulanık mantık denetleyicinin PID denetleyici ile hız ve aı takibi bakımından karşılaştırılması yapılıp, değişik yörüngeler için elde edilen simülasyon sonuçları incelenmiştir. Tasarlanan bulanık mantık denetleyicinin PID denetleyiciden daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Sistemin Tanıtımı

Otomatik yönlendirmeli araç (OYA) için değişik yapılar söz konusu olabilir. Bu değişik yapılar; önde iki arkada bir tekerlek, önde ve arkada ikişer tekerlek veya önde bir arkada iki tekerlek olacak biçimde tasarlanabilir. Bu tasarımlardan daha çok dört tekerlekli yapı ile önde iki, arkada bir tekerlekli yapıda olanlar tercih edilmektedir. Bu tercih yapılırken göz önünde bulundurulması gereken husus, tekerleklerin denetleyici mekanizması ve elde edecek mekanik momenttir. Önde bir, arkada iki tekerlek bulunduran yapının dezavantajı şudur: Öndeki tekerlek yönlendirme görevini yerine getireceği için bir motor bu işe ayrılmak zorundadır. İleri veya geri hareketi sağlamak için ise arka tekerleklere döndürme momenti uygulayacak bir tahrik sistemine ihtiyaç vardır. Tek bir motor yeterli momenti sağlamayabilir. Moment sağlansa bile momentin büyük oluşu boyutların büyütülmesini gerektireceğinden tercih edilmez. Bu yüzden, kullanılacak motorlar yönlendirme işini yerine getirirken aynı zamanda ileri ve geri hareketi sağlayacak momenti de üretmelidirler. Bunu sağlayan yapı da önde iki tekerlek bulunduran yapıdır.

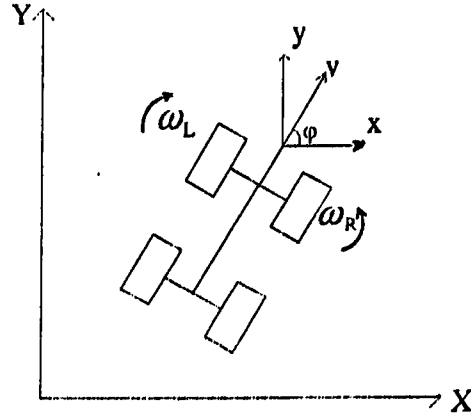
Bu çalışmada önde ve arkada iki tekerlek bulunduran yapı ele alınmıştır.

2.2. Sistemin Kinematiği

Denetimi amaçlanan OYA'nın önündeki iki tekerlek, birbirinden bağımsız olarak denetlenen edilen doğru akım motorlarına bağlıdır. Dolayısıyla tekerleklerin hareketleri birbirlerini etkilemezler. Farklı devirlerde hatta ters yönde dönebilirler. Fakat bu tekerleklerin sağa veya sola dönmesi söz konusu değildir. Arka tekerlekler ise, yine birbirlerinden bağımsız olarak her yöne dönebilmektedirler.

Ön tekerlekler, aracı ileri ve geri hareket ettirirken aynı zamanda farklı devirlerde dönerek aracın yön değiştirmesini de sağlamaktadırlar. Böylece yönlendirme için ayrı bir

motor kullanmaya gerek duyulmamaktadır. Bu da hem maliyeti düşürmekte hem de boyutların küçültülmesini sağlamaktadır.



Şekil 1. Aracın modeli ve koordinat sistemi

Şekil 1'deki aracın kinematik denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

Sağ tekerleğin doğrusal hızı :

$$v_R = R \cdot \omega_R \quad (1)$$

Sol tekerleğin doğrusal hızı :

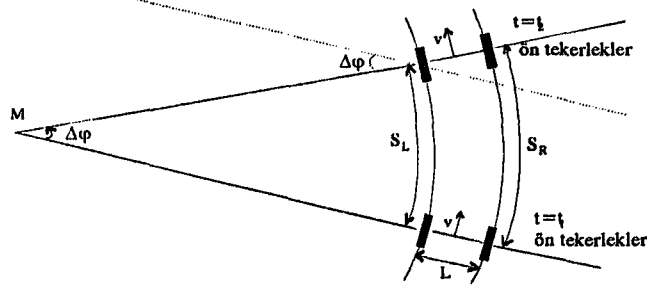
$$v_L = R \cdot \omega_L \quad (2)$$

Aracın doğrusal hızı :

$$v = \frac{v_R + v_L}{2} = \frac{R}{2} (\omega_R + \omega_L) \quad (3)$$

Burada R tekerlek yarıçapı, ω_R ve ω_L sırasıyla sağ ve sol tekerleklerin açısal hızlarıdır.

Şimdi yönlendirme açısını belirleyebilmek için aracın bir anlık hareketini göz önüne alalım. Şekil 2’de de görüldüğü gibi, Δt zaman aralığında sağ tekerlek S_R , sol tekerlek de S_L kadar yer değiştirmiş olsun.



Şekil 2. Aracın anlık hareketi

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (4)$$

olmak üzere, sağ ve sol tekerleklerin Δt süresinde aldıkları yol

$$S_R = v_R \cdot \Delta t, \quad S_L = v_L \cdot \Delta t \quad (5)$$

Eğer $\Delta\varphi$ yeterince küçük kabul edilirse, $\tan(\Delta\varphi) \cong \Delta\varphi$ olur. Bu noktadan hareketle

$$\Delta\varphi \cdot L \cong S_R - S_L = (v_R - v_L) \cdot \Delta t = R \cdot (\omega_R - \omega_L) \cdot \Delta t \quad (6)$$

elde edilir. Son denklemin her iki yanını $\Delta t \cdot L$ ile bölünürse

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{R}{L} (\omega_R - \omega_L) \Rightarrow \frac{d\varphi}{dt} = \frac{R}{L} (\omega_R - \omega_L) \quad (7)$$

olarak aracın açısını belirleyen denklem elde edilmiş olur. Hızın x ve y bileşenleri için ise

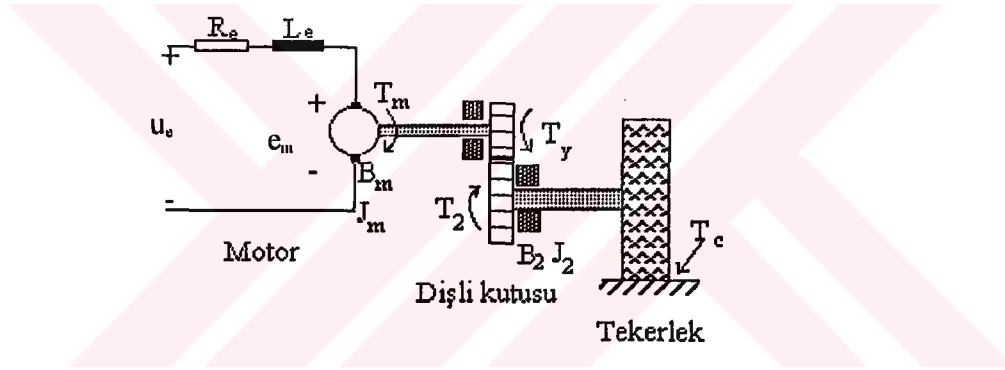
$$\frac{dx}{dt} = v_x = v \cdot \cos(\varphi) = \frac{R}{2} (\omega_R + \omega_L) \cos(\varphi) \quad (8)$$

$$\frac{dy}{dt} = v_y = v \cdot \sin(\varphi) = \frac{R}{2} (\omega_R + \omega_L) \sin(\varphi) \quad (9)$$

yazılabilir. (3), (7), (8) ve (9) denklemleri aracın kinematikini belirleyen denklemlerdir.

2.3. Sistemin Dinamiği

Şekil 3'te ön tekerleklerden birinin modeli ve sürücü düzeneği verilmiştir. Diğer tekerlek için de aynı model geçerlidir. Burada kullanılan motor serbest uyarımalı doğru akım motorudur. Motorun ürettiği moment, bir dişli kutusu üzerinden tekerleğe iletilmektedir.



Şekil 3. Tekerlek ve sürücü düzeneği

Sistemin dinamiğini çıkarırken motorun ve tekerleğin dinamiğini ayrı ayrı ele almak gerekir. Motorun endüvi devresi denklemini için [33]

$$u_c = R_c I_c + L_c \frac{dI_c}{dt} + e_m \quad (10)$$

yazılabilir. Sürekli durumda bu denklem

$$u_e = R_e I_e + e_m \quad (11)$$

şekline dönüşür. Bu denklemin her iki yanını I_e ile çarpılırsa

$$u_e I_e = R_e I_e^2 + e_m I_e \quad (12)$$

elde edilir. Bu denklem, endüvi devresine ilişkin güç denklemidir. Denklemin sol yanını endüvi devresinin çektiği gücü, sağ yanını ise endüvi devresi direncinde kaybolan gücü ve mekanik güce çevrilen gücü göstermektedir. Dolayısıyla mekanik güç için

$$T_m \omega_m = e_m I_e \quad (13)$$

yazılabilir. Endüvi devresinde endüklenen zıt elektromotor kuvvet endüvinin açısal hızıyla orantılıdır. Buradan hareketle

$$e_m = K_e \omega_m \quad (14)$$

yazılabilir ve bu (13) eşitliğinde yerleştirilirse

$$T_m = K_e I_e \quad (15)$$

elde edilir. Üretilen momente ait denklem elde edildikten sonra, motordan dişli kutusuna ve oradan da tekerleğe aktarılan moment için

$$T_m = J_n \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_y \quad (16)$$

yazılabilir. n , dişli dönüşüm oranı ve T_c Coulomb sürtünme momenti [34] olmak üzere yük momenti

$$T_y = n T_2 = n^2 J_2 \frac{d\omega_m}{dt} + n^2 B_2 \omega_m + n T_c \frac{\omega_m}{|\omega_m|} \quad (17)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifade bir önceki denklemden yerine yazılırsa

$$T_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + n^2 J_2 \frac{d\omega_m}{dt} + n^2 B_2 \omega_m + n T_c \frac{\omega_m}{|\omega_m|} \quad (18)$$

elde edilir. Bu denklem düzenlenirse

$$T_m = J_{eş} \frac{d\omega_m}{dt} + B_{eş} \omega_m + T_{ceş} \frac{\omega_m}{|\omega_m|} \quad (19)$$

bulunur. Burada

$$J_{eş} = J_m + n^2 J_2, \quad B_{eş} = B_m + n^2 B_2, \quad T_{ceş} = n T_c \quad (20)$$

Dikkat edilirse

$$\frac{\omega_m}{|\omega_m|} = \text{sign}(\omega_m) \quad (21)$$

dir. Eğer $\omega_m \geq 0$ ise $\text{sign}(\omega_m) = 1$, $\omega_m < 0$ ise $\text{sign}(\omega_m) = -1$ şeklinde tanımlanır. Bu, (19) denkleminde yazılırsa

$$T_m = J_{eş} \frac{d\omega_m}{dt} + B_{eş} \omega_m + T_{ceş} \text{sign}(\omega_m) \quad (22)$$

elde edilir. Tekrar düzenleme yapılırsa tekerlek sürücü sisteminin dinamik denklemi

$$\alpha_1 = \frac{B_{eş}}{J_{eş}}, \quad \alpha_2 = \frac{T_{ceş}}{J_{eş}}, \quad \alpha_3 = \frac{1}{J_{eş}} \quad (23)$$

olmak üzere

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\alpha_1 \omega_m - \alpha_2 \text{sign}(\omega_m) + \alpha_3 T_m \quad (24)$$

Böylece sistemin dinamik ve kinematik denklemleri elde edildikten sonra, durum uzayı modeline geçilebilir. Takip etmekte kolaylık sağlaması için denklemlerin burada tekrar yazılmasında fayda vardır.

Kinematik denklemleri:

$$v = \frac{R}{2} (\omega_R + \omega_L) \quad (25)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{R}{L} (\omega_R - \omega_L) \quad (26)$$

ve bu denklemlerden

$$\omega_R = \frac{1}{R} v + \frac{L}{2R} \dot{\varphi} \quad (27)$$

$$\omega_L = \frac{1}{R} v - \frac{L}{2R} \dot{\varphi} \quad (28)$$

elde edilir.

Dinamik denklem:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\alpha_1 \omega_m - \alpha_2 \text{sign}(\omega_m) + \alpha_3 T_m \quad (29)$$

ve bu denklemden

$$\dot{\omega}_R = -\alpha_1 \omega_R - \alpha_2 \text{sign}(\omega_R) + \alpha_3 T_R \quad (30)$$

$$\dot{\omega}_L = -\alpha_1 \omega_L - \alpha_2 \text{sign}(\omega_L) + \alpha_3 T_L \quad (31)$$

elde edilir. Denklem (25) ve (26)'nın türevleri alınırsa OYA'nın hız ve açısına ilişkin aşağıdaki diferansiyel denklemler elde edilir:

$$\dot{v} = \frac{R}{2} (\dot{\omega}_R + \dot{\omega}_L) = \frac{R}{2} [-\alpha_1 (\omega_R + \omega_L) - \alpha_2 (\text{sign}(\omega_R) + \text{sign}(\omega_L)) + \alpha_3 (T_R + T_L)] \quad (32)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{R}{L} (\dot{\omega}_R - \dot{\omega}_L) = \frac{R}{L} [-\alpha_1 (\omega_R - \omega_L) - \alpha_2 (\text{sign}(\omega_R) - \text{sign}(\omega_L)) + \alpha_3 (T_R - T_L)] \quad (33)$$

Burada

$$v = x_1, \quad \dot{\varphi} = x_2, \quad \varphi = x_3 \quad (34)$$

şeklinde bir dönüşüm yapılır ve (32), (33) denklemleri düzenlenirse sisteme ait durum denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{x}_1 = -\alpha_1 x_1 - \alpha_2 \frac{R}{2} \{ \text{sign}[f_1(x)] + \text{sign}[f_2(x)] \} + \alpha_3 \frac{R}{2} (T_R + T_L) \quad (35)$$

$$\dot{x}_2 = -\alpha_1 x_2 - \alpha_2 \frac{R}{L} \{ \text{sign}[f_1(x)] - \text{sign}[f_2(x)] \} + \alpha_3 \frac{R}{L} (T_R - T_L) \quad (36)$$

$$\dot{x}_3 = x_2 \quad (37)$$

Burada

$$f_1(x) = \frac{1}{2}x_1 + \frac{L}{2R}x_2 \quad (38)$$

$$f_2(x) = \frac{1}{2}x_1 - \frac{L}{2R}x_2 \quad (39)$$

olduğuna dikkat etmek gerekir. Durum denklemleri matrisel formda yazılırsa

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 x_1 - \alpha_2 \frac{R}{2} \{ \text{sign}[f_1(x)] + \text{sign}[f_2(x)] \} \\ -\alpha_1 x_2 - \alpha_2 \frac{R}{L} \{ \text{sign}[f_1(x)] - \text{sign}[f_2(x)] \} \\ x_2 \end{bmatrix} + \alpha_3 R \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/L & -1/L \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_R \\ T_L \end{bmatrix} \quad (40)$$

elde edilir. Sistemin doğrusal olmadığı açıkça görülebilmektedir. Genel bir ifadeyle sistem

$$\dot{x} = g(x) + Bu \quad (41)$$

yapısına sahiptir. Burada

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T, \quad u = [T_R \quad T_L]^T \quad (42)$$

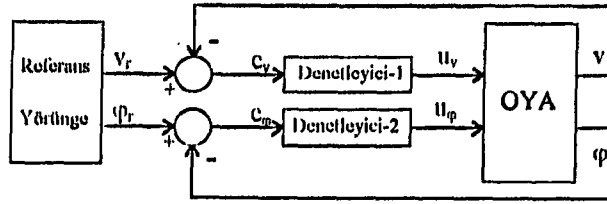
$$g(x) = \begin{bmatrix} -\alpha_1 x_1 - \alpha_2 \frac{R}{2} \{ \text{sign}[f_1(x)] + \text{sign}[f_2(x)] \} \\ -\alpha_1 x_2 - \alpha_2 \frac{R}{L} \{ \text{sign}[f_1(x)] - \text{sign}[f_2(x)] \} \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$B = \alpha_3 R \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/L & -1/L \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

dir.

2.4. Sistemin Denetimi

OYA'ların verilen yörüngeyi takip ederek istenilen noktaya varması arzu edilir. Bunun sağlanabilmesi için aracın hem hızının hem de açısının denetim altında tutulması gerekir. Bu yüzden OYA denetim sistemi Şekil 4'te de görüldüğü gibi iki ayrı denetleyiciden meydana gelir. Bir tanesi hız denetimi diğeri açı denetimini sağlar. Hız ve açı birbirlerine bağlı büyüklükler olduklarından sistemin denetim girişlerinde, her iki denetleyicinin çıkışı da belli oranda bulunmalıdır.



Şekil 4. Sistemin genel blok şeması

Her bir tekerleğe ait moment ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

Açı farkına neden olan moment:

$$u_{\phi} = T_R - T_L \quad (45)$$

Doğrusal hızı oluşturan moment:

$$u_v = T_R + T_L \quad (46)$$

Buradan sağ ve sol tekerleklerin her birine uygulanması gereken momentler aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$T_R = \frac{1}{2}(u_v + u_\varphi) \quad (47)$$

$$T_L = \frac{1}{2}(u_v - u_\varphi) \quad (48)$$

Bu çalışmada hem klasik denetleyici (PID) hem de güçlü bir bulanık denetleyici kullanılarak sistemin performansı incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2.4.1. PID Denetleyici

Şekil 5'te de görüldüğü gibi PID denetleyici üç denetim etkisinin (P: oran, I: integral, D: türev) birleşiminden oluşur. Buna göre PID denetleyicinin çıkışı

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (49)$$

şeklinde verilebilir. Burada K_p , τ_i , τ_d denetleyici parametreleridir. Denetleyicinin transfer fonksiyonunun Laplace dönüşümü

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (50)$$

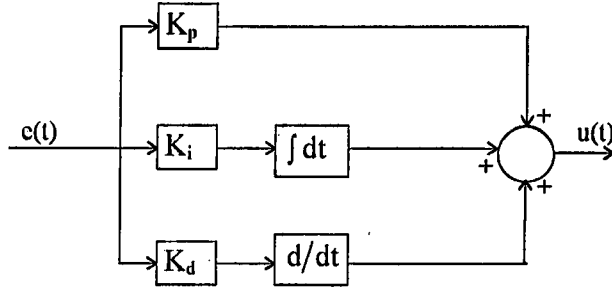
olarak yazılabilir. Burada

K_p : orantı kazancı

K_i : integral kazancı

K_d : türev kazancı

olmaktadır.



Şekil 5. PID denetleyicinin yapısı

2.4.1.1. PID Denetleyicinin Özellikleri

Denetlenecek sistemin dinamik yapısı göz önüne alınarak çözüm olacak şekilde üç temel denetleyiciden gerekli olanlar alınarak esas denetleyici tasarlanır. Sadece P veya PI denetleyici yeterli oluyorsa PID kullanmak gereksizdir. Bu yüzden temel denetleyicilerin ve bunların bileşimlerinin ayrı ayrı özelliklerini incelemek faydalı olacaktır. PID denetleyicinin transfer fonksiyonu tekrar ele alınırsa

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (51)$$

a) P denetleyici: Transfer fonksiyonuna bakıldığında $\tau_i \rightarrow \infty$ ve $\tau_d \rightarrow 0$ için denetleyici sadece P etki ile çalışır. P denetleyici kullanılması durumunda denetlenen çıkış büyüklüğünde sürekli hal hatası meydana gelir. Çünkü P denetleyici o an ki hata ile orantılı bir kontrol işareti üretir. Hatanın geçmişini göz önüne almaz. K_p ayarı ile duyarlılığı arttırılabilir ama yeterli olmaz. Genellikle K_p oranı bandı cinsinden verilir. Örneğin oranı bandının (PB) %25 olması demek $K_p = 4$ olması demektir. P denetleyici çok yavaş değişen sistemler dışında yalnız başına pek kullanılmaz.

b) PI denetleyici: Orantı etkiye integral etkinin ilavesi ile elde edilir. Yapısı basit olmakla beraber hatanın geçmişini de göz önünde bulundurduğu için sürekli hal hatasını

ortadan kaldırır. Çok yaygın olarak kullanılır. Bozucu etkilere karşı da duyarsızdır. Sistemde ortaya çıkan gürültü işaretlerini de ortadan kaldırır. İstenmeyen tarafı ise kararlı duruma geçiş süresinin biraz uzun olmasıdır.

c) PD denetleyici: Orantı etkiye türev etkinin ilavesi ile elde edilir. PD denetleyici sürekli hal hatasını ortadan kaldıramamasına rağmen kararlı duruma geçiş süresi PI denetleyiciye nazaran çok daha kısadır. Bu denetleyicinin en önemli sakıncası ise gürültü işaretlerini de kuvvetlendirmesidir.

d) PID denetleyici: PI ve PD denetleyicilerin iyi taraflarını toplayan ve kötü taraflarını ortadan kaldıran denetleyici şeklindedir. PD denetleyiciye göre sürekli hal hatasını ortadan kaldırırken, PI denetleyiciye göre de daha hızlı kararlı duruma ulaşmaktadır. Özellikle uzun ölü zaman gecikmesine sahip sistemlerin denetlenmesinde kullanılır.

2.4.2. Bulanık Mantık Denetleyici

Klasik mantıkta bir önerme eğer doğru değilse yanlıştır. Kısmen doğru veya kısmen yanlış olamaz. Oysa fiziksel veya sosyal olaylarda önermeleri bu kadar kesin çizgilerle yanlış veya doğru olarak yorumlamak mümkün değildir. Örnek vermek gerekirse, 20 yaşındaki bir kişi 'genç', 60 yaşındaki bir kişi 'yaşlı' olarak nitelendirilirse, 40 yaşındaki bir kişi için 'yaşlı' veya 'genç' nitelendirmesi tam doğru olmayacağı gibi tam yanlış da olmaz. İşte bu noktadan itibaren işin içine 'bulanık mantık' olarak adlandırılan, önermelere 0 ile 1 arasında üyelik değerleri verebilen kavram girmektedir. 0 ile 1 arasında değerler alabilen önermelerin oluşturduğu kümelere de 'bulanık küme' denilmektedir.

Bulanık küme kavramı ilk olarak L. A. Zadeh [22] tarafından kullanılmıştır. Zadeh'e göre, insanların bazı sistemleri makinelerden daha iyi denetleyebilmelerinin nedeni kesin olmayan ifadeler kullanarak karar verme özelliğine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Zadeh, eğer bu özellik sistem denetleyicilere kazandırılabilirse, performanslarının daha da artması sağlanabilir düşüncesindeydi. Bu konuda çalışmalar artarak devam etmiş ve bugünkü

noktaya gelinmiştir.

Bulanık mantık denetleyici sistemi insanın bir sistemi denetlerken kullandığı ifadelerin bulanık mantık teorisine göre modellenmesine dayanır. Örneğin, "eğer çıkış büyüklüğü istenilen değerden çok küçük ise giriş büyüklüğünü çok artır, yok eğer çıkış büyüklüğü istenilen değerden az küçük ise giriş büyüklüğünü az artır" gibi ifadelerin bilgisayar veya mikroişlemcilerin yorumlayabileceği şekilde modellenmesi ile bulanık mantık denetleyici tasarlanır.

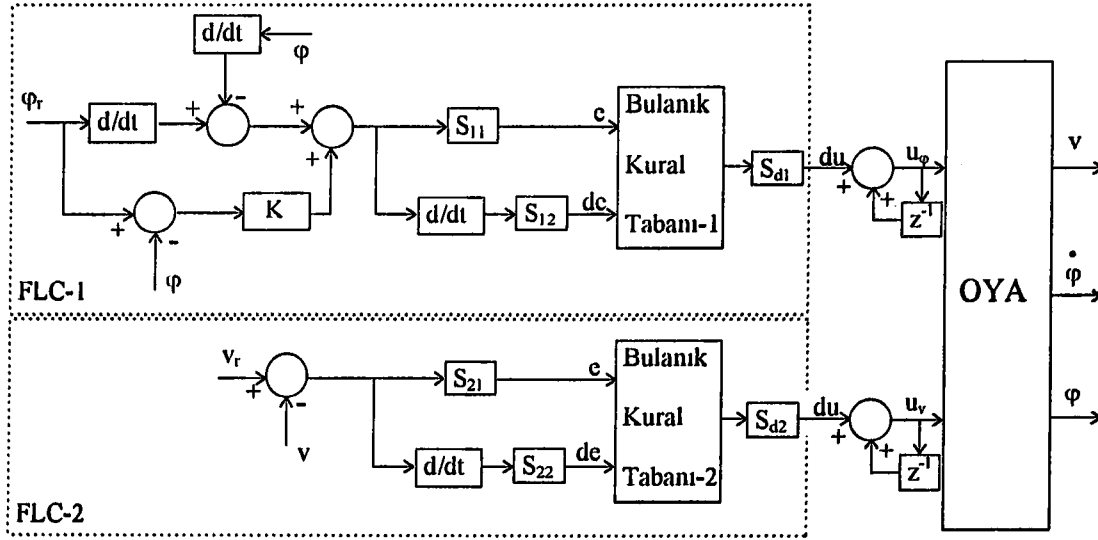
2.4.3. Bulanık Mantık Denetleyicinin Tasarlanması

Bulanık mantık denetleyici tasarlanmanın birinci aşamasını, denetlenecek sistemin giriş ve çıkış büyüklüklerine üyelik fonksiyonlarını tayin etmek oluşturur. Bir üyelik fonksiyonu x-y düzleminde bir eğri ile gösterilir. x eksenini giriş ve çıkış büyüklüklerinin değer aralığını, y eksenini de bu değişkenlerin üyelik derecesini gösterir.

Şekil 6'da OYA'ya için önerilen bulanık mantık denetleyicinin blok şeması görülmektedir. Önerilen denetleyici iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım (FLC-I) açılı hatasını işlemekte ve ikinci kısım (FLC-II) hız hatasını işlemektedir. Her iki denetleyici aynı kural çizelgesini kullanmakta ancak yapıları birbirinden farklıdır. Birinci denetleyici için zamana göre değişen bir hata yüzeyi denklemi tanımlanmış ve bu yapı ikinci denetleyiciden oldukça farklıdır. Sistemin zamana göre değişimlerini dikkate almaktadır.

Sistemin hareketi daha önce belirtildiği gibi her iki denetleyicinin çıkışları yorumlanarak denetlenmektedir. Denetleyici girişine sistemin hatası (e) ile bu hatanın değişimi (de) gelmektedir. Denetleyici çıkışında ise denetlenen sistemin girişine uygulanacak denetim işareti vardır. Hata (e(k)) ile hata değişimi (de(k)) bulanıklaştırma işlemine tabi tutularak, bulanık kümelerine göre üyelik dereceleri belirlenir. Bu üyelik derecelerine göre denetim işaretinin ne kadar artırılması veya azaltılması gerektiğini belirleyen $du(k)$ 'nın üyelik derecesi bulunur. Daha sonra durulaştırma işlemi ile $du(k)$ hesaplanır. Son adımda ise

bir önceki denetim işareti $u(k-1)$ ile $du(k)$ toplanarak denetim işareti $u(k)$ hesaplanmış olur.



Şekil 6. Bulanık mantık denetleyicinin blok şeması

İkinci denetleyici (FLC-II) için V , sistem çıkışını ve V_r , referansı göstermek üzere,

$$e(k) = V_r - V(k), \quad de(k) = e(k) - e(k-1) \quad (52)$$

şeklinde hesaplanır. Denetlenecek sistemin yapısına bağlı olarak kural çizelgesi, $e(k)$ ve $de(k)$ girişlerine göre denetleyici çıkışının ne olması gerektiğine karar verilen bir çizelgedir. Çizelge 1'de üzerinde çalışılan sistem için meydana getirilen kural çizelgesi görülmektedir [35]. Yedi adet üyelik fonksiyonu tanımlandığı için çizelge 49 kuraldan oluşmuştur.

Çizelge 1. Bulanık mantık kural çizelgesi

$de \ e$	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NO	NK	NK	S
NO	NB	NO	NO	NO	NK	S	PK
NK	NB	NO	NK	NK	S	PK	PO
S	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
PK	NO	NK	S	PK	PK	PO	PB
PO	NK	S	PK	PO	PO	PO	PB
PB	S	PK	PK	PO	PB	PB	PB

Hata, hata değişimi ve denetim işareti değişimi için kullanılan yedi üyelik fonksiyonları ve kısaltmaları şoyledir:

NB: Negatif Büyük

NO: Negatif Orta

NK: Negatif Küçük

S : Sıfır

PK: Pozitif Küçük

PO: Pozitif Orta

PB: Pozitif Büyük

Buna göre kural izelgesi şöyle oluşturulur:

Kural 1: Eğer hata NB ve hata değişimi NB ise, ıkış NB olsun.

Kural 2: Eğer hata NO ve hata değişimi NB ise, ıkış NB olsun.

Kural 3: Eğer hata NK ve hata değişimi NB ise, ıkış NB olsun.

Kural 4: Eğer hata S ve hata değişimi NB ise, ıkış NO olsun.

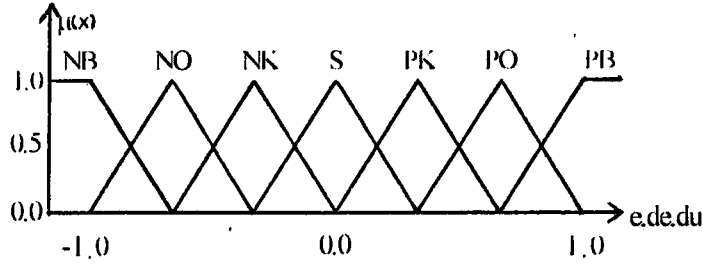
⋮

Kural 47: Eğer hata PK ve hata değişimi PB ise, ıkış PB olsun.

Kural 48: Eğer hata PO ve hata değişimi PB ise, ıkış PB olsun.

Kural 49: Eğer hata PB ve hata değişimi PB ise, ıkış PB olsun.

Hata (e), hata değişimi (de) ve denetim işareti değişimi (du) için tanımlanan üyelik fonksiyonları da şekil 7'de görölmektedir.



Şekil 7. Tanımlanan üyelik fonksiyonları

Şekil 7'den de görüldüğü gibi e, de, du için aynı üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Gerçekte bu büyüklükler kendilerinin tepe değeri ile normalize edilmişlerdir. Bulanık mantık denetleyici çıkışında elde edilecek denetim işareti değişimi normalize değer olacaktır. Bu yüzden gerçek denetim işareti değişimini elde etmek için normalize değer ölçeklendirme faktörü ile çarpılmalıdır. Denetleyici girişleri S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} ile ve denetleyici çıkışları S_{d1} , S_{d2} ölçeklendirme faktörleri ile normalize edilmişlerdir.

Denetleyici girişine gelen $e(k)$ ve $de(k)$ 'nin üyelik dereceleri üyelik fonksiyonları yardımıyla tespit edildikten sonra, hangi denetim kurallarının uygulanacağı bulanık mantık kural çizelgesinden kolayca belirlenebilir. Aynı anda birkaç kural aktif olabileceği gibi tek bir kural da aktif olabilir. Hiç bir kuralın aktif olmaması gibi bir durum olamaz. Aktif olan her kuralın denetim işaretine etkisi olacaktır. Bu etki, sistemin özelliklerine de bağlı olarak şu şekilde hesaplanır:

$$\mu[du(k)] = \min\{\mu[e(k)], \mu[de(k)]\} \quad (53)$$

Daha sonra aktif olan kuralların etkisinin birleştirilmesine sıra gelir. Bunun için genelde bir çok farklı algoritma uygulanmaktadır. Bu çalışmada daha hassas sonuçlar verdiği için dolay alanların merkezi (Center of Area-COA) yöntemi kullanılmıştır. COA algoritması şöyle tanımlanır:

$$du^*(k) = \frac{\sum_{i=1}^{49} \mu_i[du(i)] du(i)}{\sum_{i=1}^{49} \mu[du(i)]} \quad (54)$$

Elde edilen du^* değeri ölçekleme faktörü ile çarpıldıktan sonra denetim işareti değişimi bulunmuş olur. Burada $\mu[du(i)]$, i. kural sonucu elde edilen denetim işareti değişimi üyelik derecesi ve $du(i)$ de üyelik fonksiyonunun e, de, du eksenindeki merkezidir. du^* değeri bir önceki denetim giriş işaretine eklenerek asıl denetim giriş işareti elde edilmiş olur.

$$u(k) = u(k-1) + du(k) \quad (55)$$

Eğer denetim giriş işareti için sınır değerler var ise ve hesaplanan denetim giriş işareti bu sınırların dışına taşıyorsa kolayca sınırlanabilir.

2.4.4. Bulanık Mantık Denetleyicinin Özellikleri

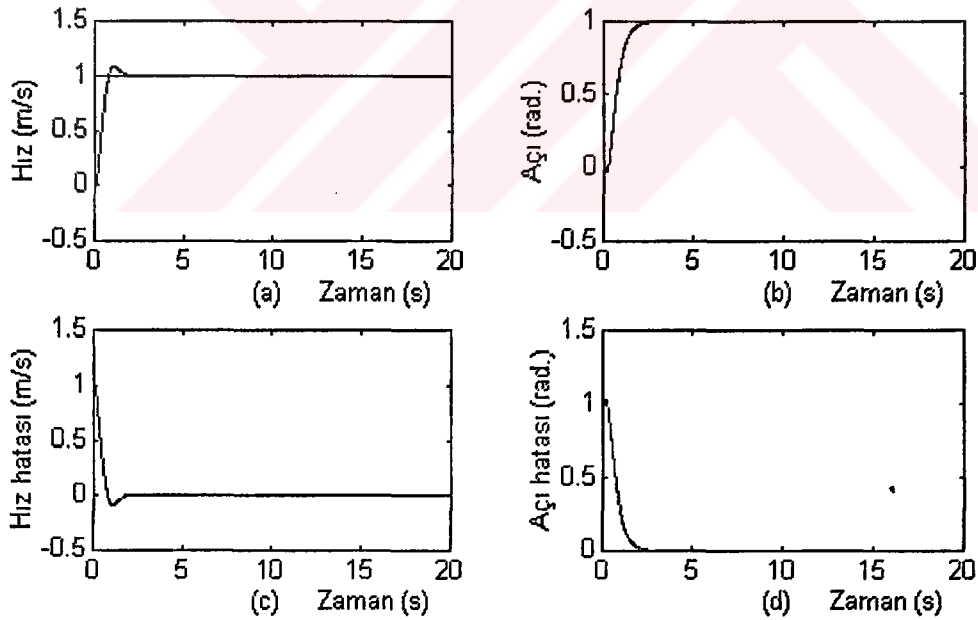
- a) Bulanık mantık denetleyiciler, insanın bir sistemi denetlerken kullandığı mantık kurallarının modellenmesine dayandığı için tasarlanmaları oldukça kolaydır.
- b) Bir sistemin denetlenebilmesi için giriş ile çıkış arasındaki matematiksel ilişkinin bilinmesine gerek duymazlar. Yani sistemin matematiksel modeli gerekli değildir.
- c) Zamanla değişen sistemlere kolayca uygulanabilirler. Parametre değişiklikleri karşısında yeniden tasarlanmayı gerektirmezler. Oysa aynı durumda P, PI veya PID tipi denetleyicilerin parametrelerinin sürekli ayarlanması gerekir.
- d) Bulanık mantık denetleyiciler klasik denetleyicilere göre daha kısa yerleşme zamanına sahiptirler. İstenilen çıkışı aşmaları ve istenilen çıkış etrafında salınımları ise çok küçüktür.
- e) Sistemde meydana gelebilecek ani yük değişimlerine karşı davranışları çok daha iyidir. Ani değişimleri karşılayabilmek için denetleyici çıkışlarını diğer denetleyicilerden daha az yüklerler.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde öncelikle PID denetleyici ile bulanık mantık denetleyicinin çeşitli durumlar için cevapları verilerek karşılaştırılmıştır. Daha sonra bulanık mantık denetleyicinin değişik yörüngeler için cevapları verilip değerlendirilmiştir.

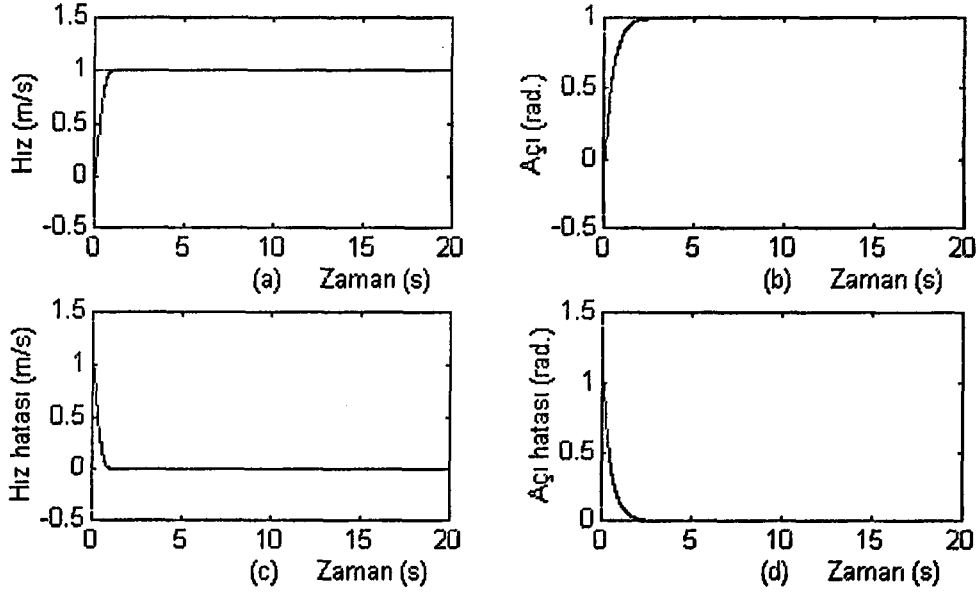
3.1. Bulanık Mantık Denetleyici ile PID Denetleyicinin Karşılaştırılması

Bulanık mantık denetleyici ile PID denetleyicinin performanslarını daha iyi tetkik edebilmek için, sistemde herhangi bir bozucu etki olmadan ve bozucu etki olduğu durumlar için hız ve açı takibini ayrı ayrı incelemek yararlı olacaktır.



Şekil 8. Referansların sabit olması durumunda PID denetleyicinin cevabı

- Referans hız ve istenilen hızın değişimi
- Referans açı ve istenilen açının değişimi
- Hız hatasının değişimi
- Açı hatasının değişimi

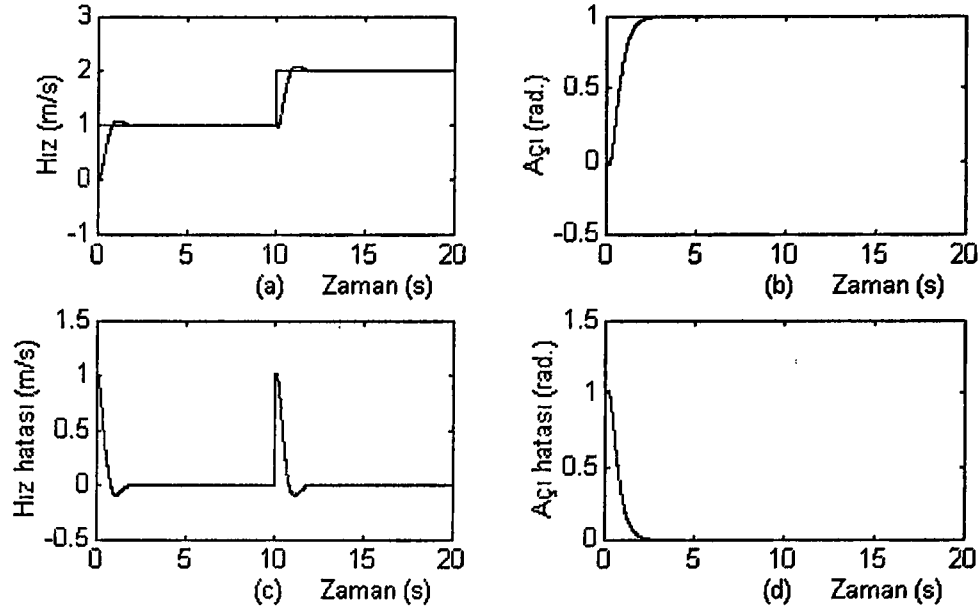


Şekil 9. Referansların sabit olması durumunda bulanık mantık denetleyicinin cevabı

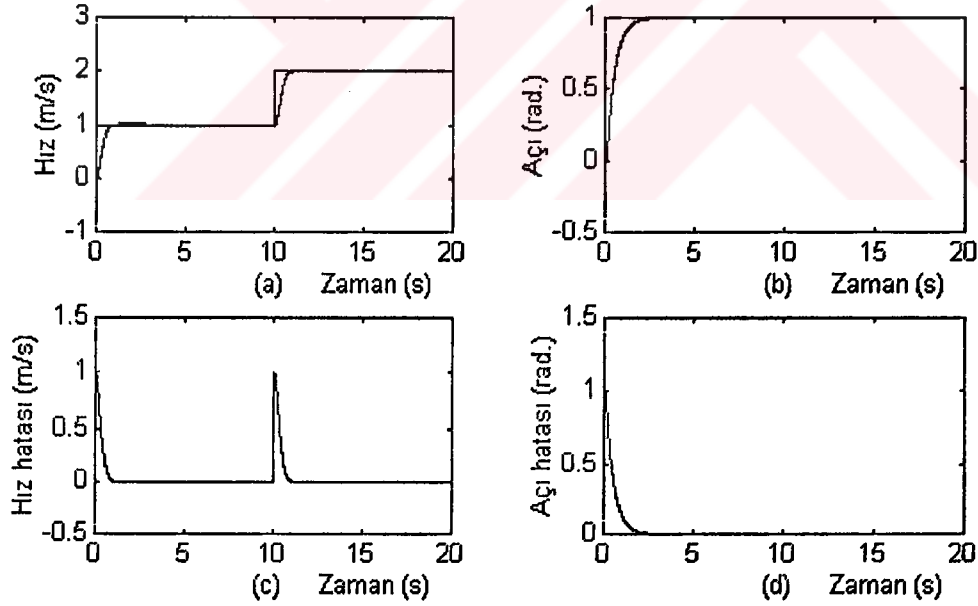
- (a) Referans hız ve istenilen hızın değişimi
- (b) Referans açı ve istenilen açının değişimi
- (c) Hız hatasının değişimi
- (d) Açı hatasının değişimi

Şekil 8 ve Şekil 9'da PID ve bulanık mantık denetleyicilerin sabit ($v_r = 1$ m/s ve $\varphi_r = 1$ rad.) referansları, herhangi bir bozucu etki olmadan nasıl takip ettikleri görülmektedir. Referans hızı yakalama bakımından bulanık mantık denetleyicinin daha hızlı ve aşma meydana gelmeden istenilen değere ulaştığı açıkça izlenmektedir. Hıza ait hata işaretleri incelendiğinde PID denetleyicinin istenen değere daha geç ulaştığı ve bu değer etrafında salınım yaptığı görülmektedir. PID'de de aşma önlenemez ancak, yerleşme zamanı veya referansı yakalama zamanı oldukça uzar.

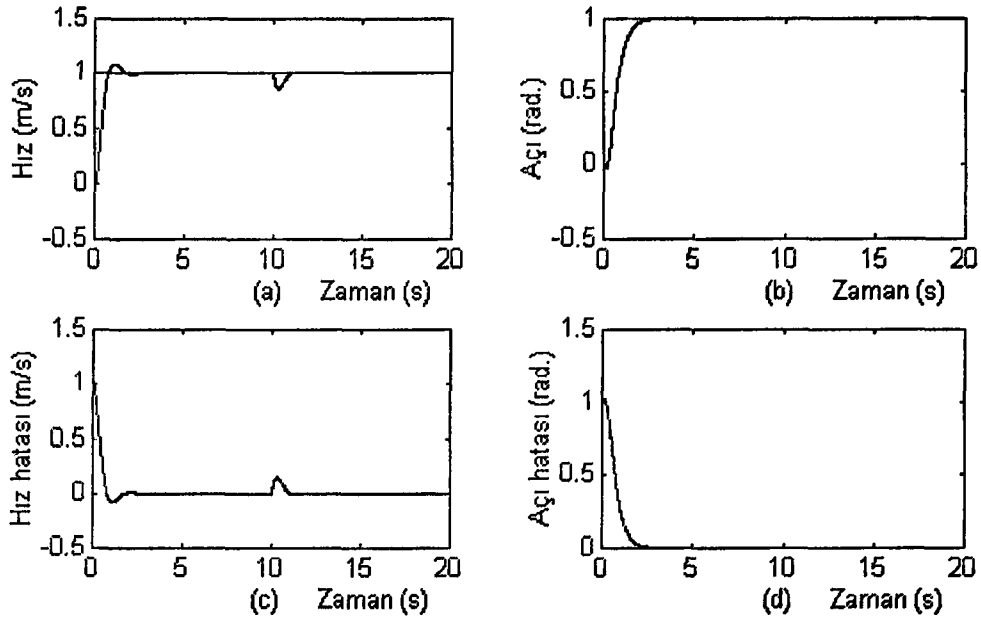
Şekil 10'dan Şekil 13'e kadar ise hareket devam ederken referansların ani olarak değiştirilmesi karşısında denetleyicilerin nasıl davrandıkları görülmektedir. Hıza ait referansın değişmesi açı takibini etkilemezken, bulanık mantık denetleyicinin PID denetleyiciye göre üstünlüğü görülmektedir. Şekil 14'den Şekil 17'ye kadar değişik durumlar için denetleyicilerin nasıl davrandıkları görülmektedir. Şekil 18 ve Şekil 19'da ise, 10. saniyede yük 40 kat artırılarak zamanla değişen referanslar için denetleyicilerin cevapları verilmiştir.



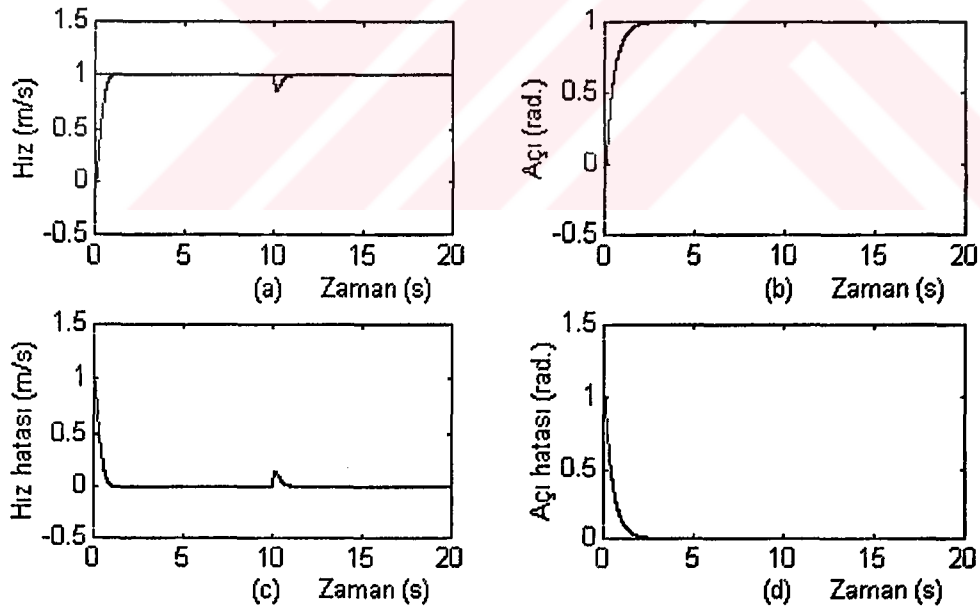
Şekil 10. Hıza ait referansın değiştirilmesi karşısında PID denetleyicinin cevabı
 (a) Referans hız ve istenilen hızın değişimi
 (b) Referans açı ve istenilen açının değişimi
 (c) Hız hatasının değişimi
 (d) Açıl hatasının değişimi



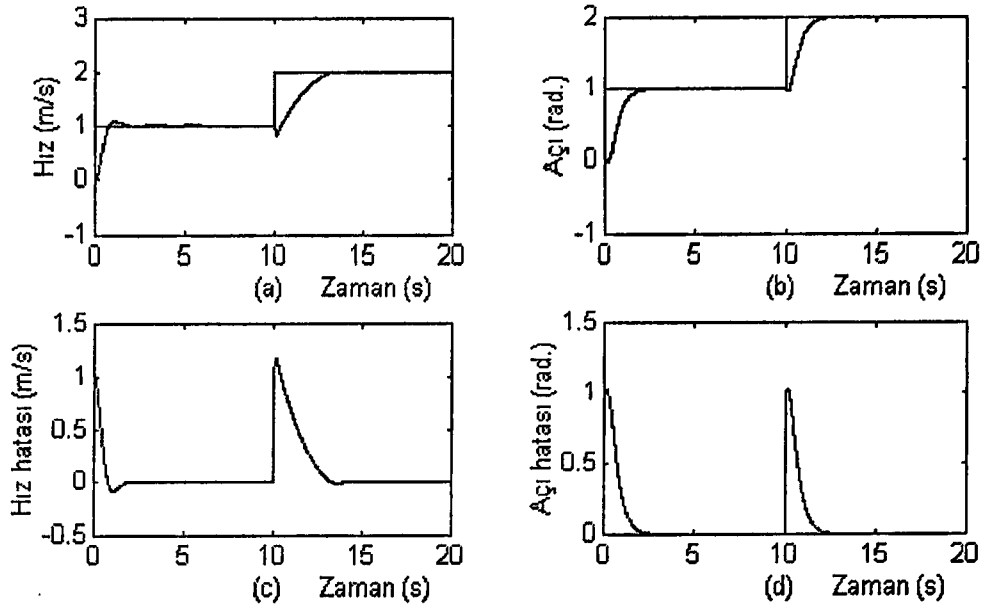
Şekil 11. Hıza ait referansın değiştirilmesi karşısında bulanık mantık denetleyicinin cevabı
 (a) Referans hız ve istenilen hızın değişimi
 (b) Referans açı ve istenilen açının değişimi
 (c) Hız hatasının değişimi
 (d) Açıl hatasının değişimi



Şekil 14. Ani yük değişimi karşısında PID denetleyicinin cevabı
 (a) Referans hız ve istenilen hızın değişimi
 (b) Referans açı ve istenilen açının değişimi
 (c) Hız hatasının değişimi
 (d) Açı hatasının değişimi

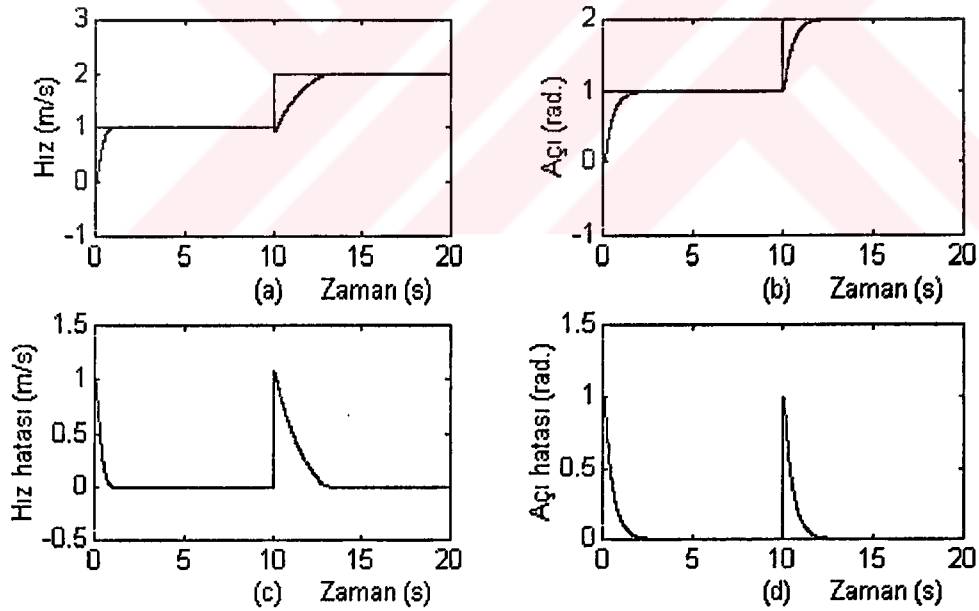


Şekil 15. Ani yük değişimi karşısında bulanık mantık denetleyicinin cevabı
 (a) Referans hız ve istenilen hızın değişimi
 (b) Referans açı ve istenilen açının değişimi
 (c) Hız hatasının değişimi
 (d) Açı hatasının değişimi



Şekil 16. Hız, açı ve yükün aynı anda değişmesi karşısında PID denetleyicinin cevabı

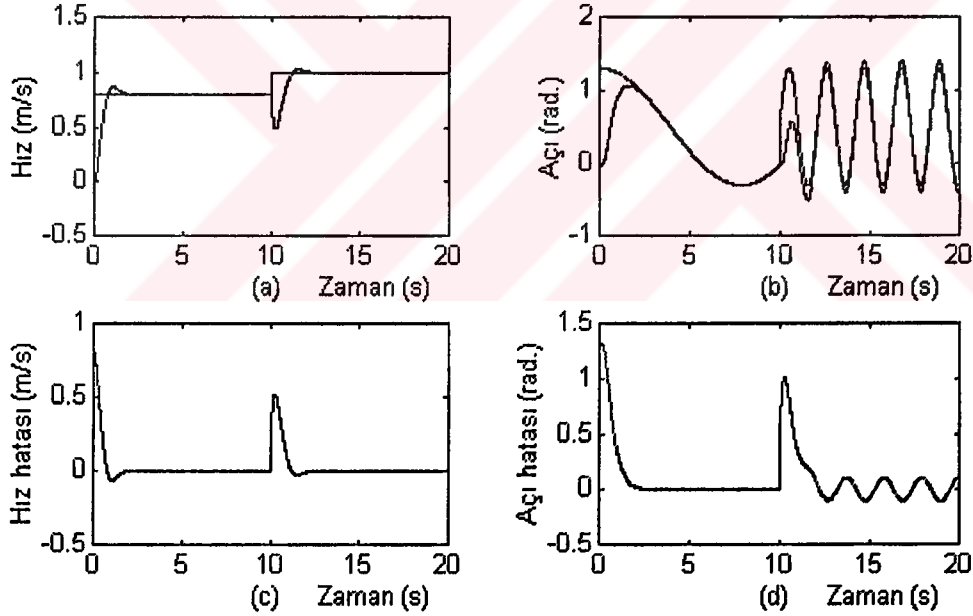
- (a) Referans hız ve istenilen hızın değişimi
- (b) Referans açı ve istenilen açının değişimi
- (c) Hız hatasının değişimi
- (d) Açıl hatasının değişimi



Şekil 17. Hız, açı ve yükün aynı anda değişmesi karşısında bulanık mantık denetleyicinin cevabı

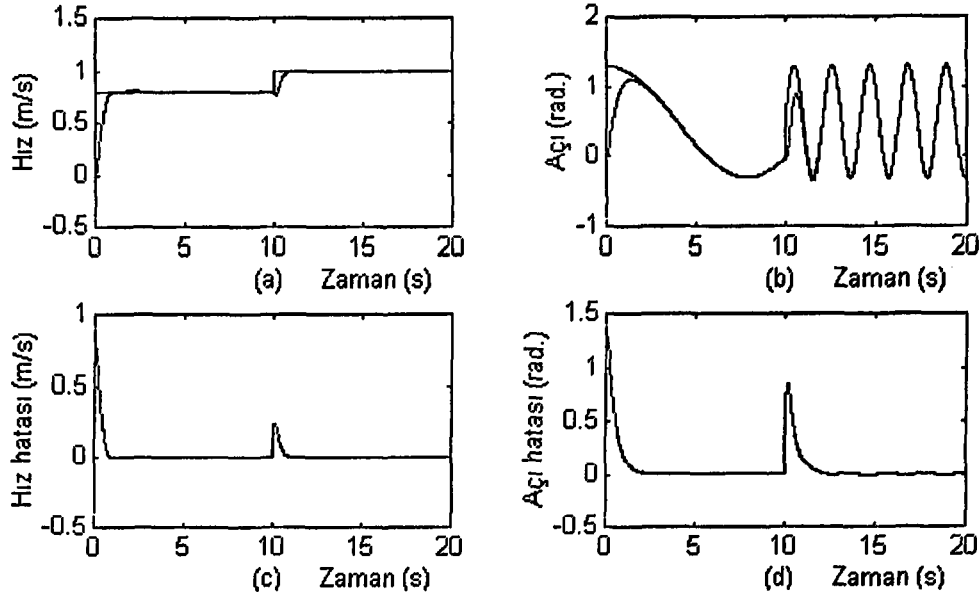
- (a) Referans hız ve istenilen hızın değişimi
- (b) Referans açı ve istenilen açının değişimi
- (c) Hız hatasının değişimi
- (d) Açıl hatasının değişimi

Aşağıda, Şekil 18 ve Şekil 19’da referansların zamanla hızlı olarak değişmesi durumunda PID ve bulanık mantık denetleyicilere ait sonuçlar verilmiştir. Şekil 18 ve Şekil 19’da açığa ait referans ilk 10 saniyede zamanla değişmekle beraber, bu değişim hızı yavaştır. Denetleyiciler kısa sürede referansı yakalamakta ve takip edebilmektedirler. 10. saniyeden itibaren referans hız 1.25 katına, açı referansının değişim hızı 7.5 katına ve yük de yaklaşık 40 katına çıkarılmıştır. Bu durumda şekillerden de görüldüğü gibi PID denetleyici değişim hızına ayak uyduramamakta ve referansı tam takip edememektedir. Şekil 18 (d)’de PID denetleyicinin açı hatasını gideremediği açıkça görülmektedir. Aynı durumda bulanık mantık denetleyici çok daha iyi sonuç vermiştir. Şekil 19 (d)’den de görüldüğü gibi, PID denetleyiciye nazaran bulanık mantık denetleyicinin açı hatası çok küçüktür. Referansların zamanla değişmesi karşısında ve ani yük değişiklikleri karşısında, bulanık mantık denetleyicinin PID denetleyiciye göre çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Üzerinde çalışılan sistemin mekanik bir sistem olduğu göz önünde bulundurulursa, bulanık mantık denetleyicinin ani değişimlere karşı oldukça duyarsız olduğu söylenebilir.



Şekil 18. Açığa ait referansın zamanla değişmesi halinde PID denetleyicinin cevabı

- (a) Referans hız ve istenilen hızın değişimi
- (b) Referans açı ve istenilen açının değişimi
- (c) Hız hatasının değişimi
- (d) Açı hatasının değişimi



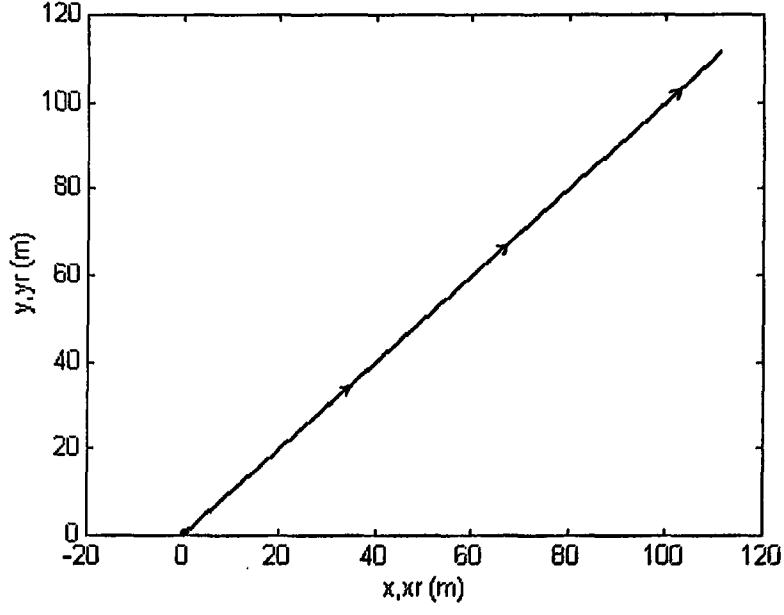
Şekil 19. Açığa ait referansın zamanla değişmesi halinde bulanık mantık denetleyicinin cevabı

- (a) Referans hız ve istenilen hızın değişimi
- (b) Referans açı ve istenilen açının değişimi
- (c) Hız hatasının değişimi
- (d) Açı hatasının değişimi

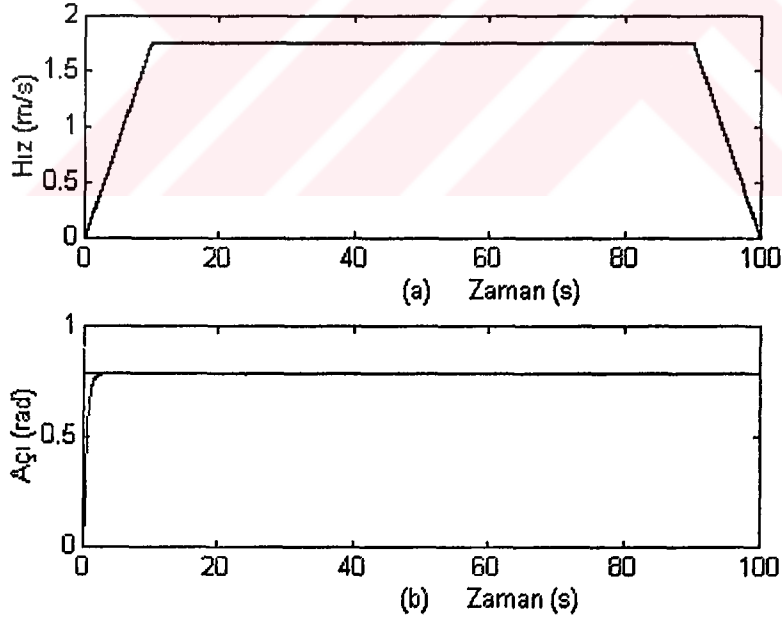
3.2. Bulanık Mantık Denetleyici ile Yörünge Takibi

OYA'ların takip edeceği yörünge genelde sabittir. Nerede ne kadar bekleyeceği, ne kadar hız yapacağı, nerede yavaşlamaya başlayıp nerede duracağı ve bu işlemlerin ne kadar zaman alacağı denetim algoritması ile belirlenir. Aracın istenilen yere varabilmesi için, takip edeceği yörüngeye bağlı olarak verilen hız ve açı referanslarını çok iyi takip etmesi gerekir. Hız için en basit referans trapez biçimli olanıdır. Araç belirlenen maksimum hızına ulaşıncaya kadar hızını arttıracak, bir süre maksimum hızla yol alacak, varacağı yere yaklaşınca yavaşlayacak ve durması gereken yere gelmiş ise duracaktır. Açı için bu kadar basit ve genel bir referans tanımlamak güçtür. Yörüngeye bağlı olarak araç açısını devamlı değiştirip varması istenilen noktaya doğru yol almalıdır.

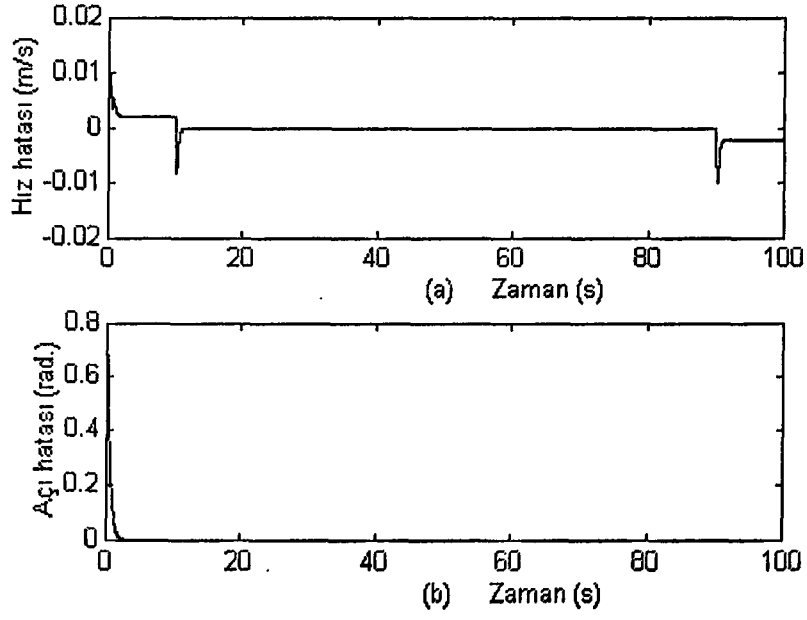
Çeşitli yörüngeler için bulanık mantık denetleyicinin verdiği sonuçlar, hatalar ve denetim işaretleri Şekil 20 - Şekil 47'de ayrıntılı olarak verilmektedir.



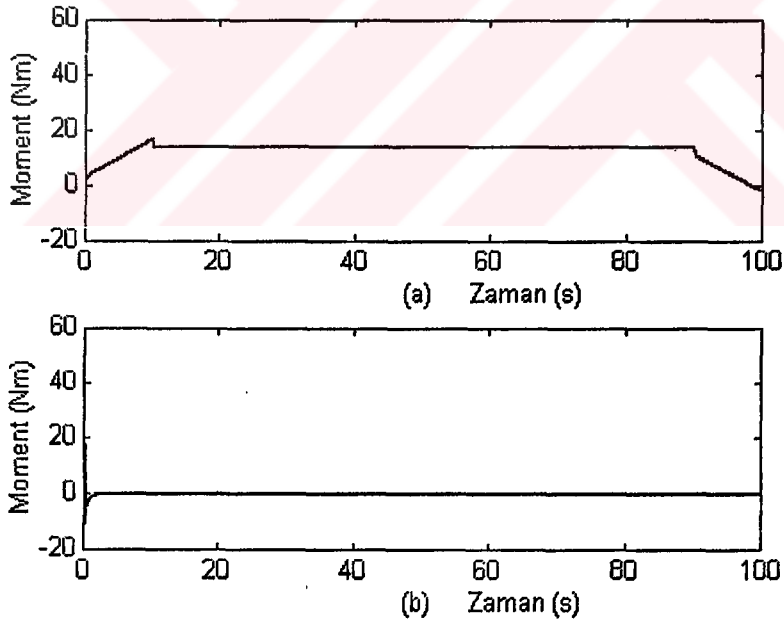
Şekil 20. Sabit açılı yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi



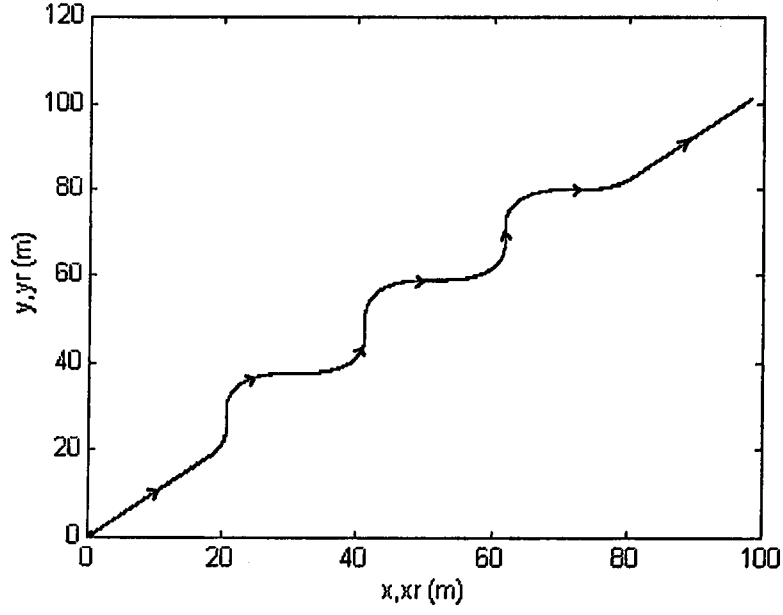
Şekil 21. Sabit açılı yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değişimleri



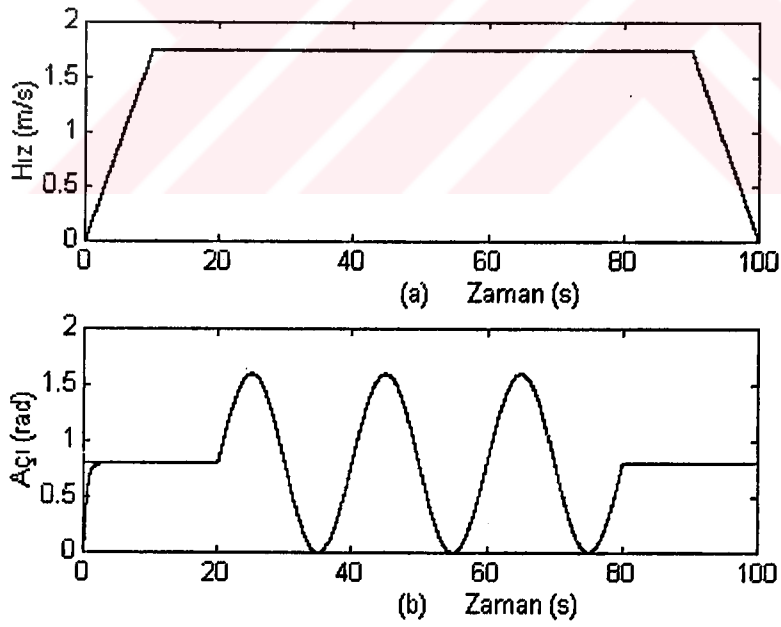
Şekil 22. Sabit açılı yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri



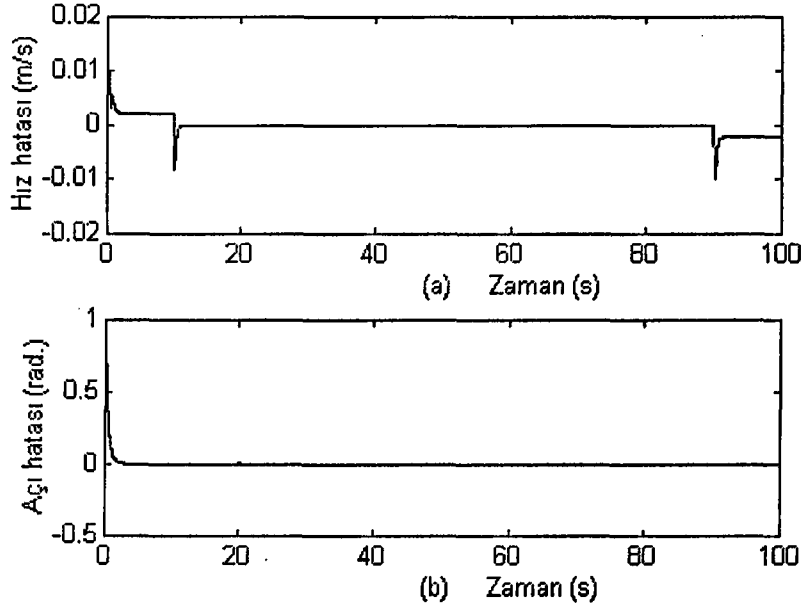
Şekil 23. Sabit açılı yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları



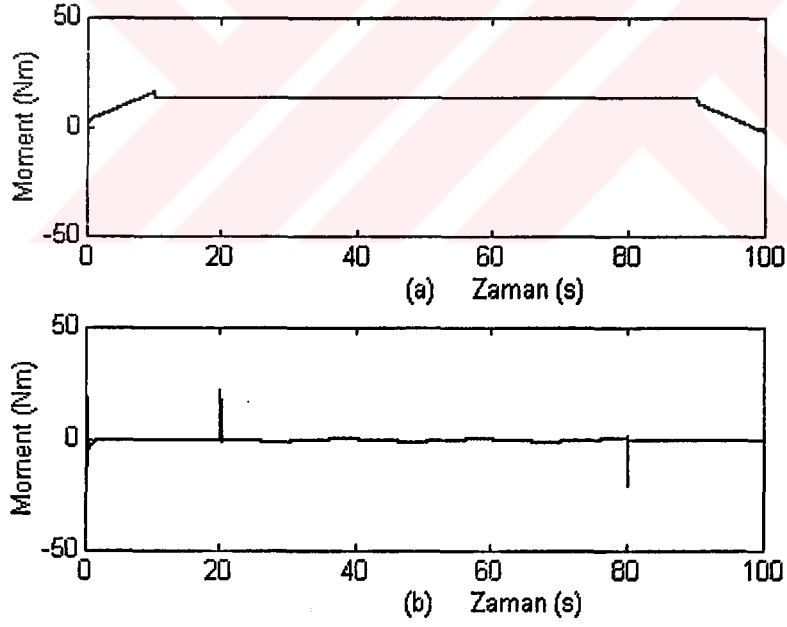
Şekil 24. Düz-sinüsoidal-düz yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi



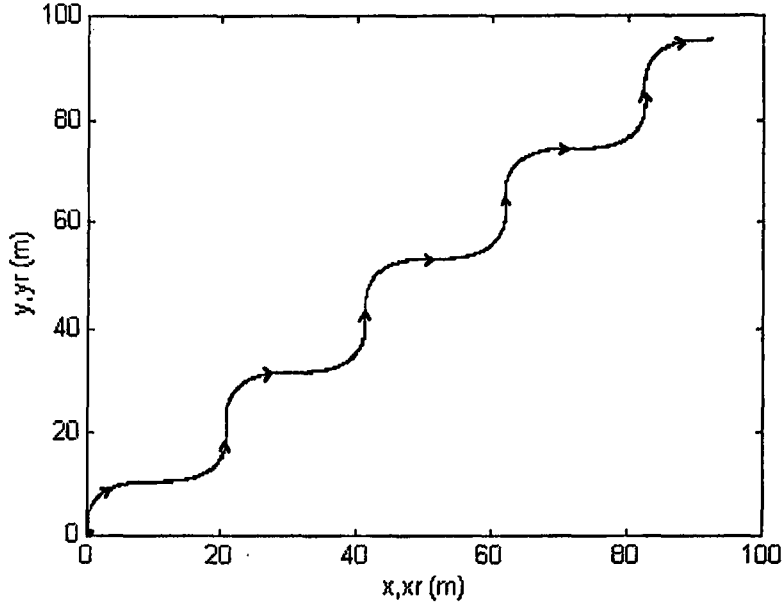
Şekil 25. Düz-sinüsoidal-düz yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değerleri



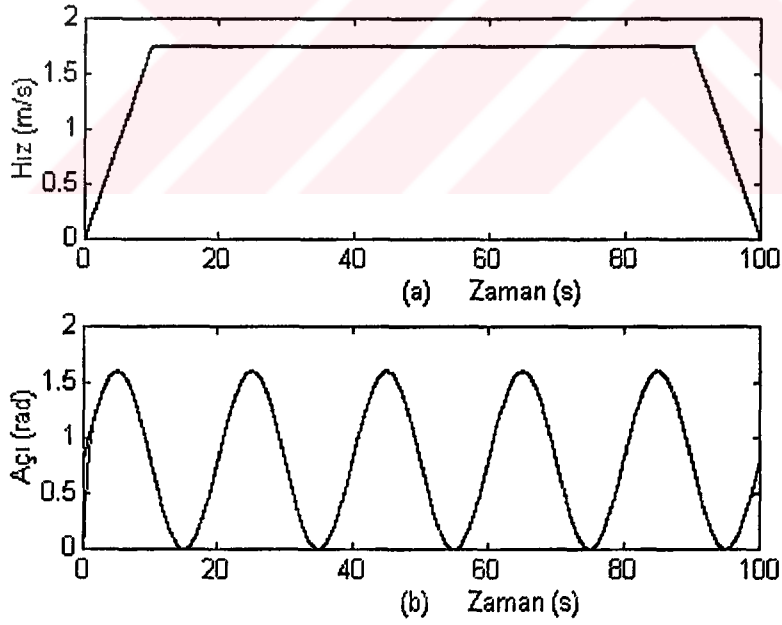
Şekil 26. Düz-sinüzoidal-düz yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri



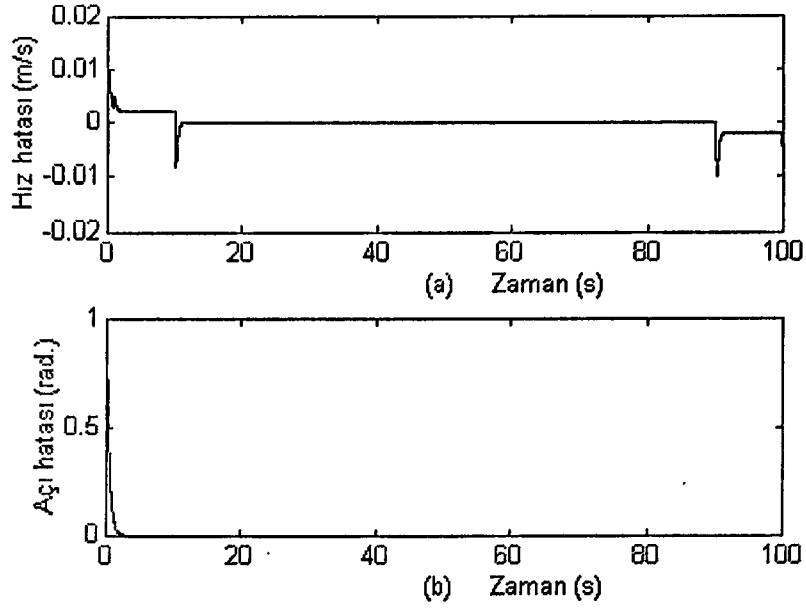
Şekil 27. Düz-sinüzoidal-düz yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları



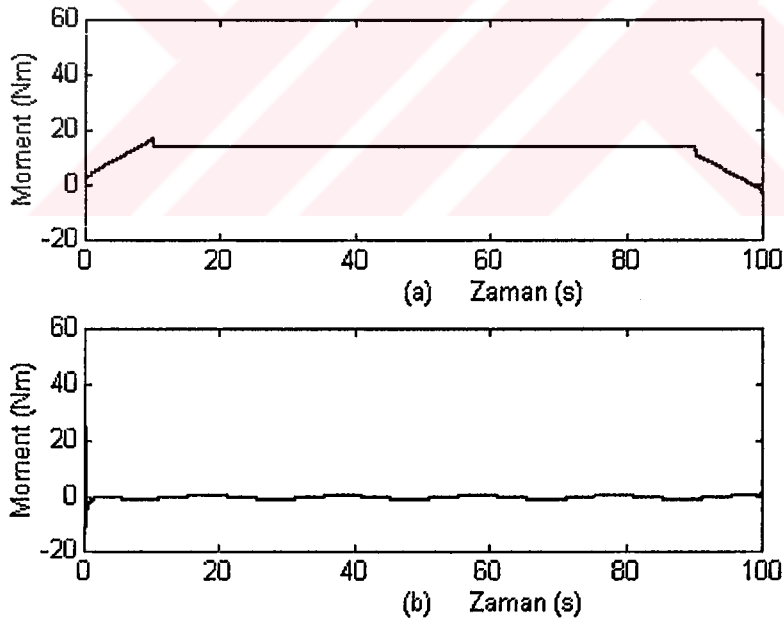
Şekil 28. Sinüzoidal yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi



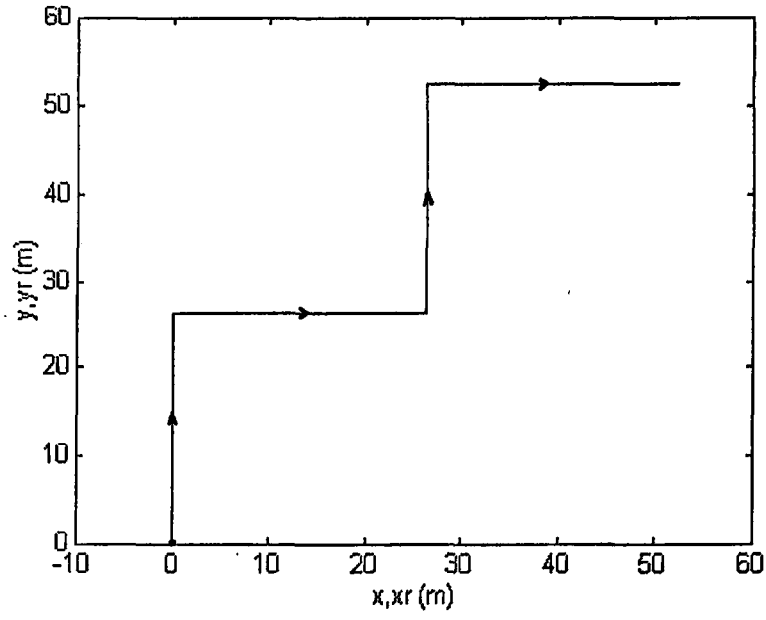
Şekil 29. Sinüzoidal yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değişimleri



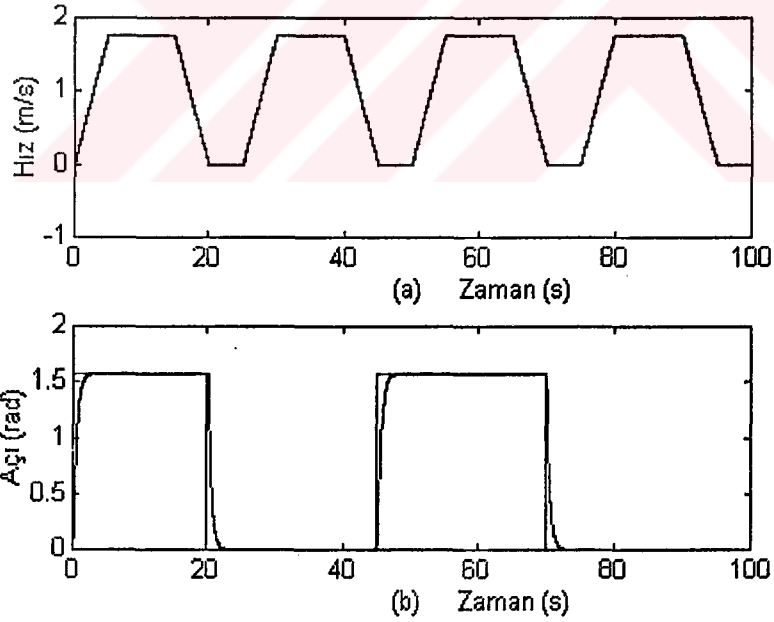
Şekil 30. Sinüzoidal yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri



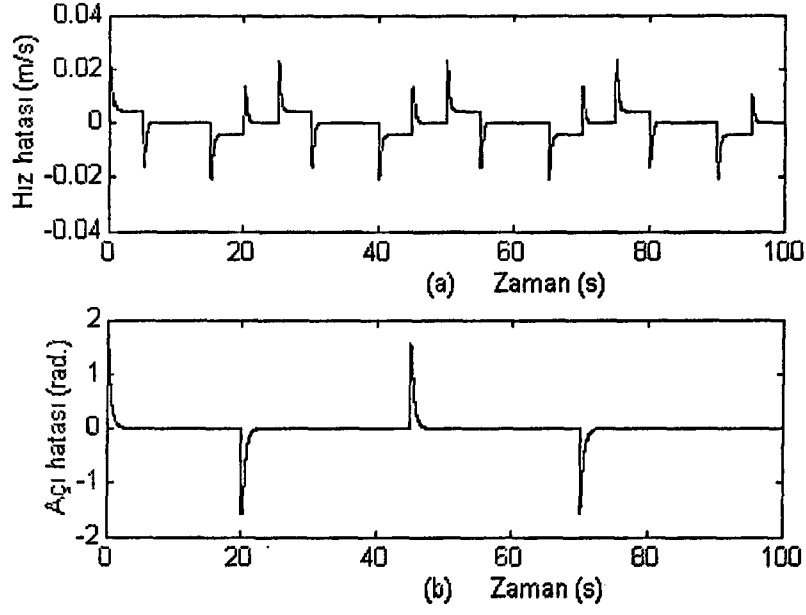
Şekil 31. Sinüzoidal yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları



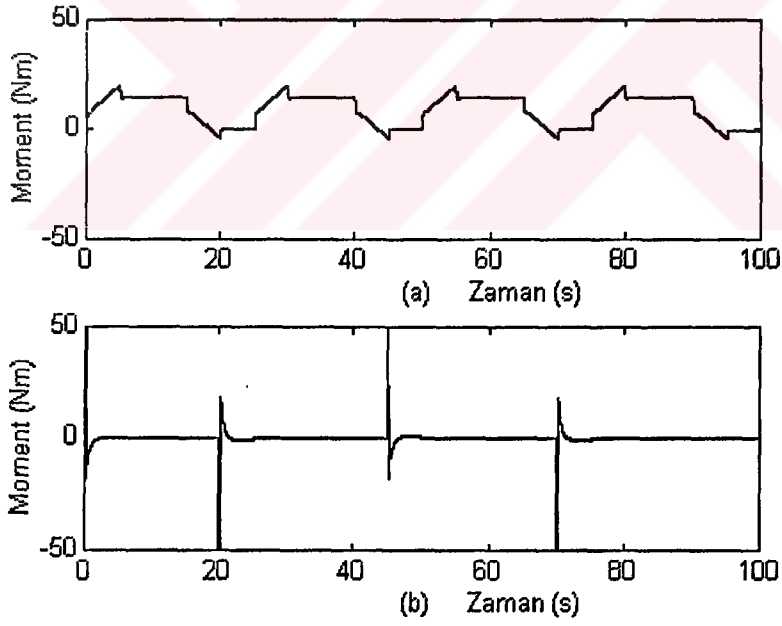
Şekil 32. Merdiven yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi



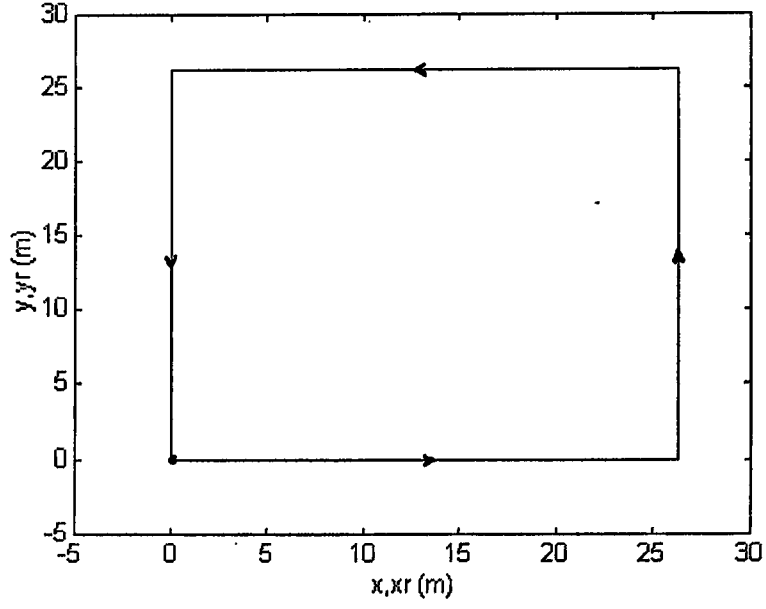
Şekil 33. Merdiven yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değerleri



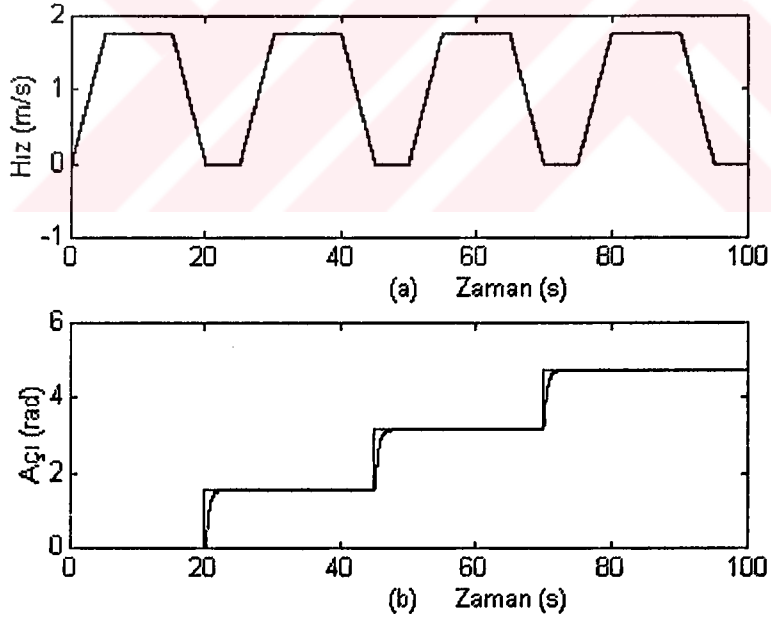
Şekil 34. Merdiven yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri



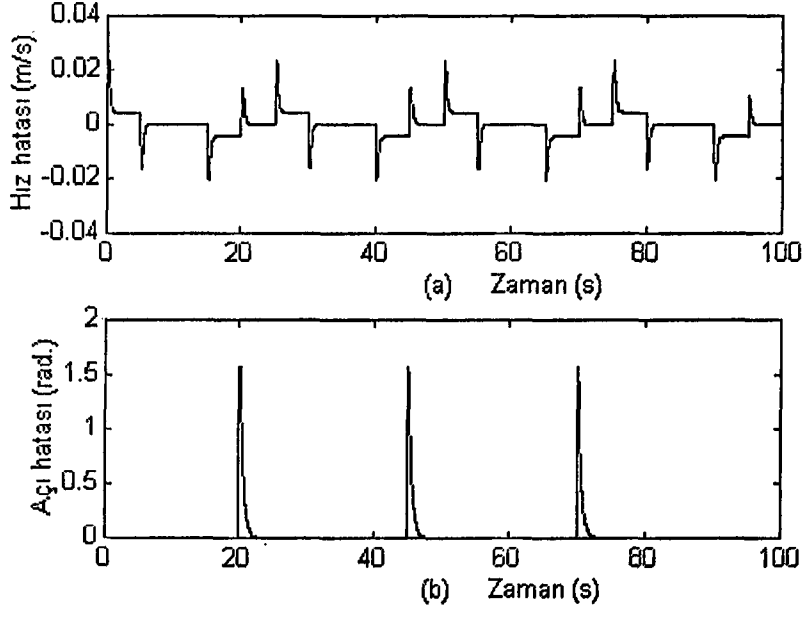
Şekil 35. Merdiven yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları



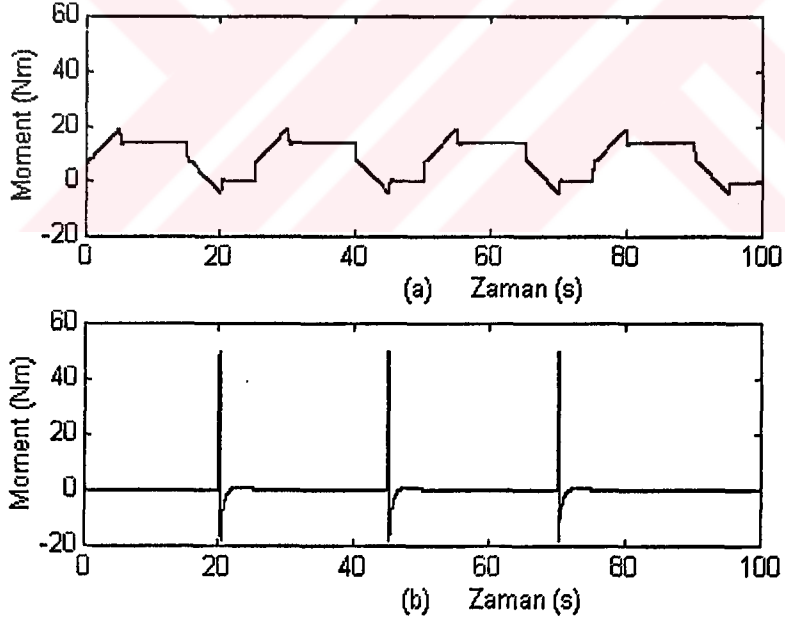
Şekil 36. Karesel yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi



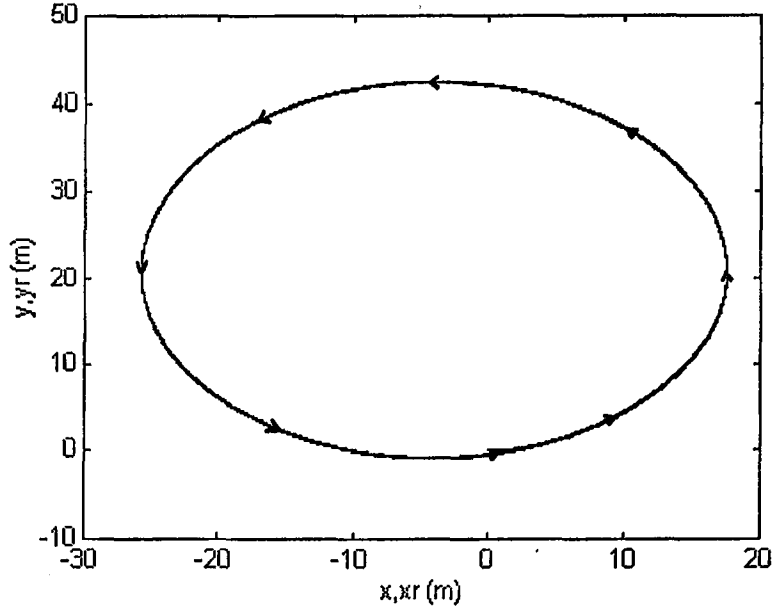
Şekil 37. Karesel yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değerleri



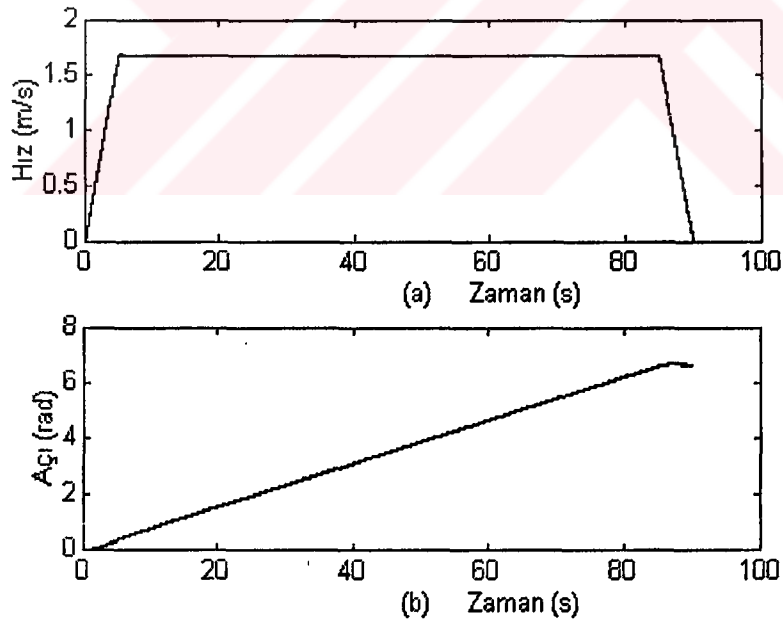
Şekil 38. Karesel yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri



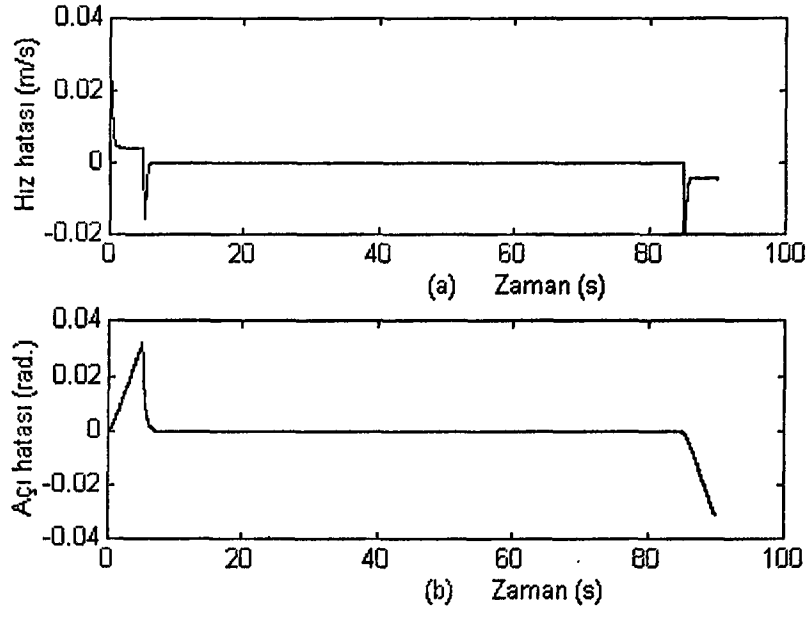
Şekil 39. Karesel yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları



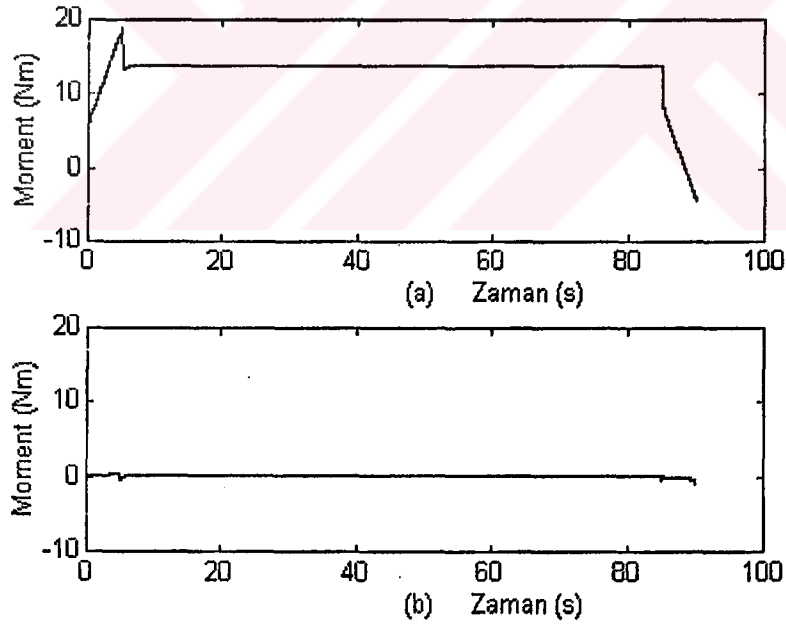
Şekil 40. Eliptik yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi



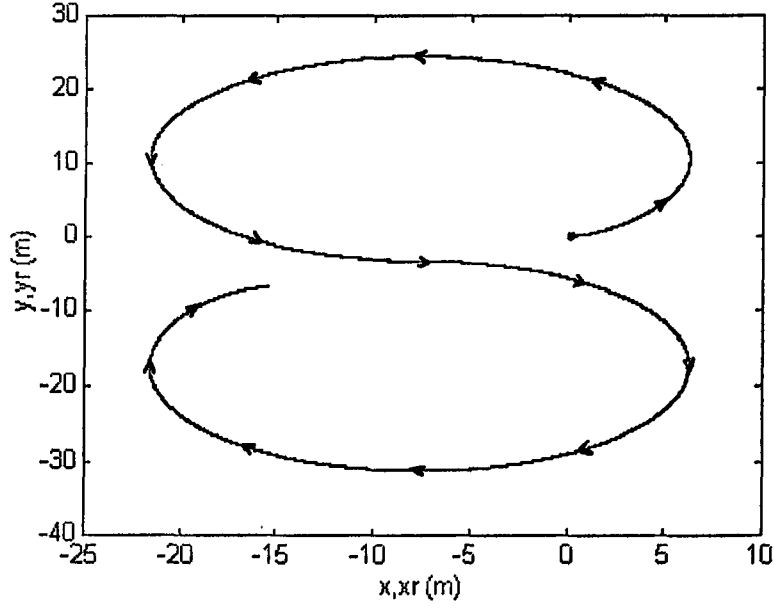
Şekil 41. Eliptik yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değişimleri



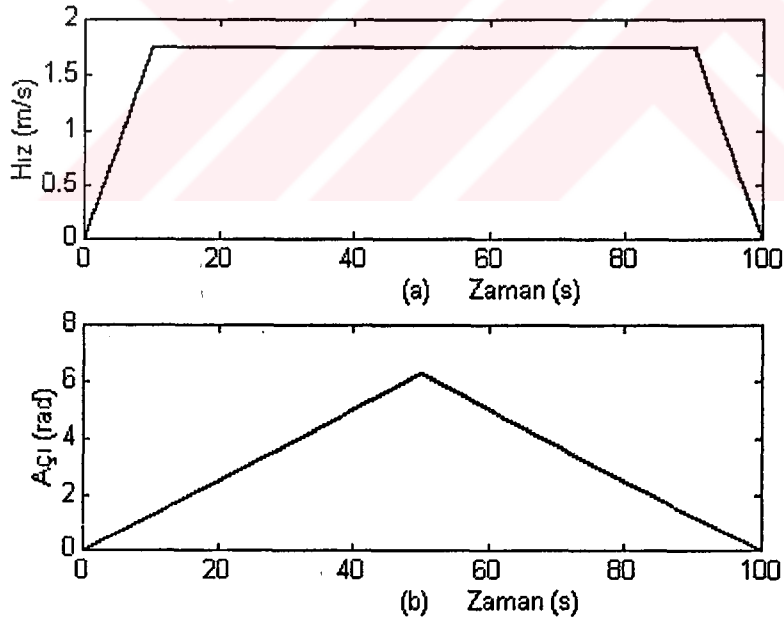
Şekil 42. Eliptik yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri



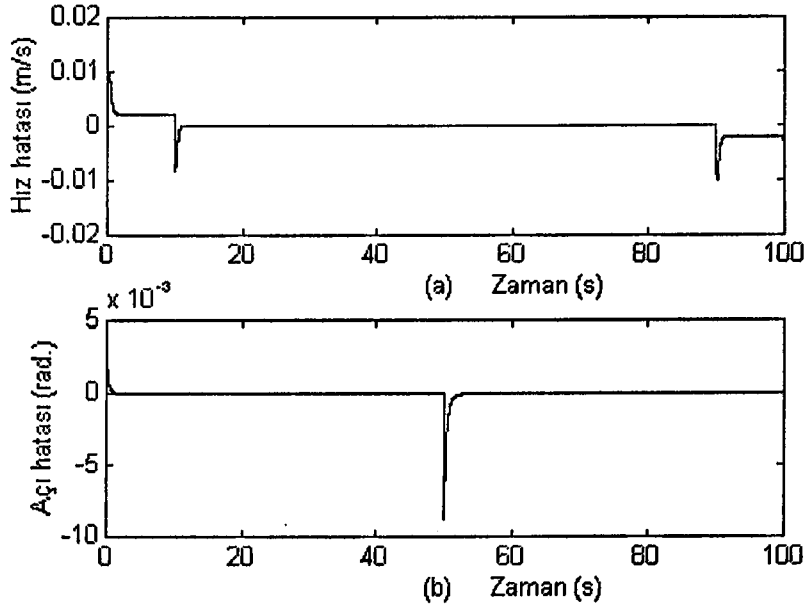
Şekil 43. Eliptik yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları



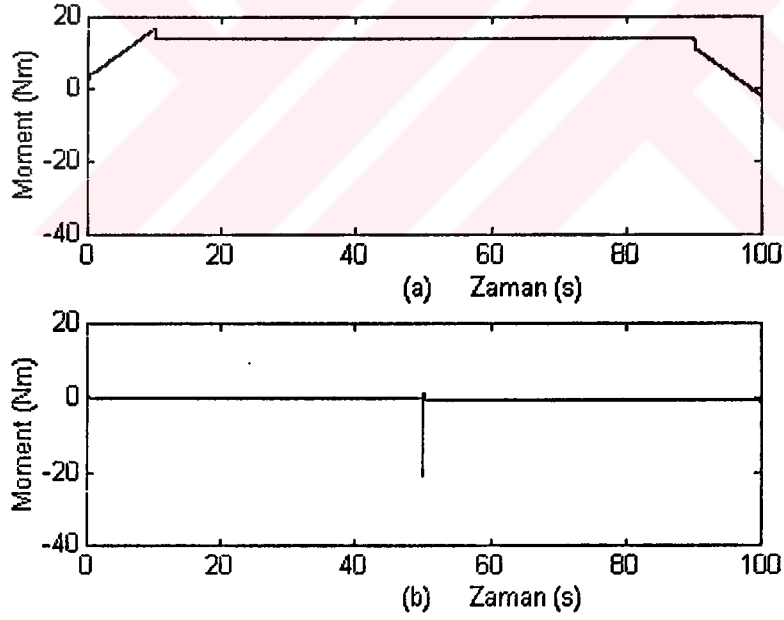
Şekil 44. S biçimli yörünge durumunda X-Y düzleminde referans yörünge ve aracın hareketi



Şekil 45. S biçimli yörünge durumunda hız ve açının referans ve gerçek değişimleri



Şekil 46. S biçimli yörünge durumunda hız ve açığa ait hataların değişimleri



Şekil 47. S biçimli yörünge durumunda hız ve açığa ait denetleyicilerin çıkışları

4. SONUÇLAR

Otomatik yönlendirmeli araç için bulanık mantık denetleyici tasarlanmış ve çeşitli durumlar için simülasyon sonuçları verilmiştir.

Aracın dinamik denklemleri yüke bağlı olarak değişebilen bazı parametreler içerir. En büyük belirsizlik ise aracın taşıyacağı yüküdedir. Çünkü, aracın kullanım amacı çok küçük yüklerden çok büyük yüklere değişik büyüklükte yükleri taşıyabilmektir. Yükün değişken olması sistemin denetimi açısından bazı zorlukları beraberinde getirmektedir. Özellikle atalet ve sürtünmede meydana gelecek değişiklikler sistemin dinamiğine de yansımaktadır. Dinamiği yüke göre değişen bir aracı denetlemek gibi bir zorunluluk doğmaktadır.

Her yük durumu için denetleyici parametrelerini değiştirmek pek uygun bir yöntem değildir. Yapılması gereken şey, parametre değişimlerinden etkilenmeyen bir denetleyici tasarlamaktır. Bu amaçla, aracın parametrelerinden yani matematiksel modelinden bağımsız bir denetleyici tasarlamak için bulanık mantık yöntemi seçilmiştir.

Tasarlanan bulanık mantık denetleyicinin performansı, bir çok farklı referans için gözlemlenmiş ve klasik PID denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Referansların sabit olması durumunda denetleyiciler referansları yakalayıp takip etmekte zorlanmamaktadırlar. PID denetleyicinin doğasından kaynaklanan gecikmeler söz konusu olmaktadır. Bulanık mantık denetleyicide iyi tasarlanmış bir kural çizelgesi ve uygun seçilmiş üyelik fonksiyonları ile bu problemi aşmak mümkündür. Referansların hareket esnasında değişmesi karşısında ise yine bulanık mantık denetleyicinin PID denetleyiciye nazaran yeni referansları çok daha iyi yakaladığı görülmüştür. Referansların zamana bağlı olarak değişmesi durumunda bulanık mantık denetleyicinin üstünlüğü açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Özellikle ani referans ve ani yük değişimlerine karşı bulanık denetleyicinin çok daha güçlü ve duyarsız olduğu, sistemi istenilen noktaya hızla taşıdığı görülmüştür.

5. KAYNAKLAR

- [1]. Miller, R.K., Automated Guided Vehicles and Automated Manufacturing, Society of Manufacturing Engineers Publications Development Department Marketing Division, 1987.
- [2]. Bozer, Y.A. and Srinivasan, M.M., Tandem Configurations for Automated Guided Vehicle Systems and The Analysis of Single-Vehicle Loops, IIE Transactions, 23, 1, (1991).
- [3]. Bartholdi, J.J. and Platzman, L. K., Decentralized Control of Automated Guided Vehicles on a Simple Loop, IIE Transactions, 21, 1, (189), 76-81.
- [4]. Bohlander, R.A. and Heider, W., Control Considerations When Planning AGVS Installations, Proceedings of AGVS'88, September 1988, MHI, Cincinnati, OH.
- [5]. Co, C.G. and Tanchoco, J.M.A., A Review of Research on AGVS Vehicle Management, Engineering Cost and Production Economics, 21, (1991), 35-42.
- [6]. Egbelu, P.J., The Use of Non-Simulation Approaches in Estimating Vehicle Requirements in Automated Guided Vehicle Based Transport System, Material Flow, 4, (1987), 17-32.
- [7]. Egbelu, P.J. and Tanchoco, J.M.A., Operational Considerations for the Design of Automated Guided Vehicle Material Handling Systems, Technical Report 8201, Department of Industrial and Operations Research, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1982.
- [8]. Egbelu, P.J. and Tanchoco, J.M.A., Characterization of Automatic Guided Vehicle Dispatching Rules, International Journal of Production Research, 22, 3, (1984), 359-374.
- [9]. Gaskins, R.J. and Tanchoco, J.M.A., Flow Path Design for Automated Guided Vehicle Systems, International Journal of Production Research, 25, 5, (1987), 667-676.
- [10]. Gaskins, R.J., Tanchoco, J.M.A. and Taghaboni, F., Virtual Flowpaths for Free-Ranging Automated Guided Vehicle Systems, International Journal of Production Research, 27, (1989), 91-100.

- [11]. Kouvelis, P., Guiterrez, G.J. and Chiang, W., Heuristic Unidirectional Flowpath Design Approaches For Automated Guided Vehicle Systems, *International Journal of Production Research*, 30, 6, (1992), 1327-1351.
- [12]. Özden, M., A Simulation Study of Multiple-Load-Carrying Automated Guided Vehicles in a Flexible Manufacturing System, *International Journal of Production Research*, 26, 8, (1988), 1353-1366.
- [13]. Tanchoco, J.M.A. and Sinriech, D., OSL - Optimum Single-Loop Guide Paths for AGVS, *International Journal of Production Research*, 30, 3, (1992), 665-681.
- [14]. Sandler, B.Z., *Robotics, Designing the Mechanism for Automated Machinery*, Prentice-Hall International Editions, 1991.
- [15]. Mantel, R. and Landeweerd, H., Design and Operational Control of AGV System, *Proceedings of the 1994 International Material Handling Research Colloquium*, Grand Rapids, Michigan, June 1994.
- [16]. Ertuğrul, M., Şabanoviç, A. and Kaynak, O., Various VSS Techniques on the Control of Automated Guided Vehicles and Autonomous Mobile Robots, Project Report of CAD/CAM Robotics Dept. TÜBİTAK Marmara Research Center, Gebze-Kocaeli, Turkey, October, 1994.
- [17]. Yuasa, N., Shioya, M. and Kimura, G., Follow-up Characteristics of a Small Automatic Guided Vehicle System with Fuzzy Control, *National Convention Record of IEE JAPAN*, (1991), 56-61.
- [18]. Freund, E. and Mayr, R., Nonlinear Path Control in Automated Vehicle Guidance, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13, 1, (1997).
- [19]. Shiller, Z., Dynamic Motion Planning of Autonomous Vehicles, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7, 2, (1991).
- [20]. Leonard, J.J., Durrant-Whyte, H.F. and Cox, I.J., Dynamic Map Building for an Autonomous Mobile Robot, *The International Journal of Robotics Research*, 11, 4, (1992), 286-298.
- [21]. Baumgartner, E.T. and Skaar, S.B., An Autonomous Vision-Based Mobile Robot, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39, 3, (1994).
- [22]. Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, *Information and Control*, 8, (1965), 338-353.

- [23]. Zadeh, L. A., Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, IEEE Transactions on Systems, Management and Cybernetics, 3, 1, (1973), 28-44.
- [24]. Li, Y.F. and Lau, C. C., Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems, IEEE Control System Magazine, (1989), 65-72.
- [25]. Altaş, İ.H., A Fuzzy Logic Controlled Tracking System for Moving Targets, 12th IEEE International Symposium on Intelligent Control, 16-18 July 1997, İstanbul, Turkey.
- [26]. Altrock, C.V. and Arend, H.O., Adaptive Fuzzy Control Applied to Home Heating System, Fuzzy Sets Syst., 61, (1994), 29-35.
- [27]. Ralston, P.A.S. and Ward, T.L., Fuzzy Control of Industrial Processes, Applications of Fuzzy Set Methodologies in Industrial Engineering, ELSEVIER, Tokyo, 1989.
- [28]. Derdiyok, A., İnanç, N., Özbülür, V., Pastacı, H. and Bilgiç M.O., Fuzzy Logic Based Control of Reluctance Motor to Reduce Torque Ripple, Proceedings of the Computational Intelligence, International Conference, 5th Fuzzy Days, April 1997, 484-491, Germany.
- [29]. Derdiyok, A., İnanç, N., Özbülür, V. and Özoğlu, Y., Optimal Phase Current Profiling of SRM by Fuzzy Logic Controller to Minimize Torque Ripple, Proceedings of the 12th IEEE International Symposium on Intelligent Control, 16-18 July 1997, İstanbul, Turkey.
- [30]. Gilberto, C.D. and Bose, B.K., A Fuzzy Set Theory Based Control of a Phase-Controlled Converter DC Machine Drive, IEEE Trans. on Ind. Appl., 30, 1, (1994).
- [31]. Gürleyik, S.S., Akpınar, S. and Altaş, İ.H., Hız Ölçmeksizin Sürekli Mıknatıslı Doğru Akım Motoru Yük Kestirimi ve Bulanık Denetimi, 2. Endüstriyel Otomasyon Sempozyumu , 1995, Bildiriler Kitabı, 335-344.
- [32]. Hassan, M.A.M., Malik, O.P. and Hope, G.S., A Fuzzy Logic Based Stabilizer for a Synchronous Machine, IEEE Trans. on Energy Conver., 6, (1991), 407-413.
- [33]. Akpınar, S., Elektrik Mühendisliğinin Temelleri II, İkinci Baskı, K.T.Ü. Basımevi, Trabzon, 1994.
- [34]. Kuo, B.C., Automatic Control Systems, Third Edition, Prentice-Hall, Inc., U.S.A., 1964

- [35]. Derdiyok, A., İnanç, N., Özbülür, V., Köklükaya, E., Position Control of SRM by Fuzzy Logic Controller, 3rd International Mechatronic Design and Modelling Workshop, Sep. 1997, METU, Ankara, Turkey.



6. ÖZGEÇMİŞ

1966 yılında Bayburt'un Yelpınar Köyü'nde doğdu. İlkokulu burada bitirdikten sonra İstanbul Şirinevler Ortaokulu ve İstanbul Büyükçekmece Lisesi'ni bitirdi. 1984 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 1989 yılında 'Elektronik Mühendisi' ünvanı alarak mezun oldu. Yüksek öğrenimi sırasında P.T.T.'den burslu olduğu için, mecburi hizmetini yerine getirmek üzere Erzurum P.T.T Başmüdürlüğü'nde elektronik mühendisi olarak çalışmaya başladı. Vatani görevini kısa dönem erbaş olarak 1990 yılında tamamladı. P.T.T.'de 1994 yılı sonuna kadar çalıştı. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi'nin açmış olduğu araştırma görevliliği sınavını kazanarak, Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü Devreler ve Sistemler Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi oldu. Halen bu görevini sürdürmekte olup, İngilizce bilmektedir.