

İnsansız Su Altı Araçlarında Derinlik Kontrolüne PID ve Bulanık Mantık Yaklaşımları

Depth Control in Autonomous Underwater Vehicles: PID and Fuzzy Logic Approaches

Bünyamin Bilal Erkan¹, Mehmet Tuğrul Aksu², Muhammet Yaser Öztürk³, Hüseyin Metin Ertunç⁴

^{1, 2, 3, 4} Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

Özetçe

İnsansız su altı araçlarının (ISA) performansı, derinlik kontrolü gibi kritik problemlerle doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada, MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak bir ISA modeli tasarlanmıştır ve kontrolü, PID ve Bulanık Mantık yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir.

PID ve Bulanık Mantık kontrol yöntemlerinin optimize edilmesi, kontrol performansını artırmak için önemlidir. PID kontrol yöntemi, belirli senaryolarda daha etkin sonuçlar sağlarken, Bulanık Mantık kontrolü karmaşık çevresel koşullarda daha esnek bir çözüm sunmuştur.

Bu bulgular, ISA'ların kontrol stratejilerinde PID ve Bulanık Mantık yöntemlerinin uygun alanlarda birlikte kullanılabilceğini göstermektedir.

Abstract

Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) rely heavily on effective depth control for their operational success and safety. Depth control directly influences stability and maneuverability, especially in complex underwater environments. In this study, an AUV model was designed using MATLAB/Simulink and was controlled using two different approaches: the PID control method and the Fuzzy Logic control method. The performance of these methods was compared to determine their effectiveness in AUV depth control.

The findings indicate that while the PID control method demonstrated superior performance under certain operational conditions, the Fuzzy Logic control method offered greater flexibility and adaptability in dynamic underwater environments. This study highlights the importance of selecting appropriate control strategies tailored to specific scenarios in AUV operations.

1. Giriş

Son yıllarda insansız su altı araçları (ISA) üzerinde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları hızla

artmaktadır. Bu araçlar, denizaltı keşiflerinden askeri operasyonlara kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle otonom özellikleri ve yüksek manevra kabiliyetleri sayesinde ISA'lar, hem sivil hem de askeri uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Denizaltı operasyonlarında karşılaşılan zorlu çevresel koşullar, bu araçların güvenilirliğini ve kontrol kabiliyetlerini geliştirmeye ihtiyacını artırmıştır.

İnsansız su altı araçlarının en önemli kontrol parametrelerinden biri, derinlik kontrolüdür. Derinlik kontrolü, araçların stabilitesini koruyarak, istenilen derinlikte görev yapmalarını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, ISA'lar çeşitli sensör teknolojileri, haberleşme protokollerleri ve gelişmiş kontrol algoritmaları ile donatılmaktadır. Bu sistemler, denizaltı ortamını algılayarak çevresel değişimlere uyum sağlayabilme kabiliyetine sahiptir.

Son yıllarda elektromekanik sistemlerden akıllı kontrol sistemlerine doğru bir dönüşüm yaşanmıştır. Bu gelişme, ISA'larda daha sofistikte kontrol mekanizmalarının uygulanmasına olanak tanımaktadır. Özellikle PID ve Bulanık Mantık kontrol yöntemleri, ISA'ların derinlik kontrolünde sıkılıkla kullanılan iki ana yöntemdir. PID kontrol yöntemi, basit yapısı ve kolay uygulanabilirliği ile öne çıkarken, Bulanık Mantık kontrol yöntemi, değişken ve belirsiz koşullarda daha iyi performans sunmaktadır.

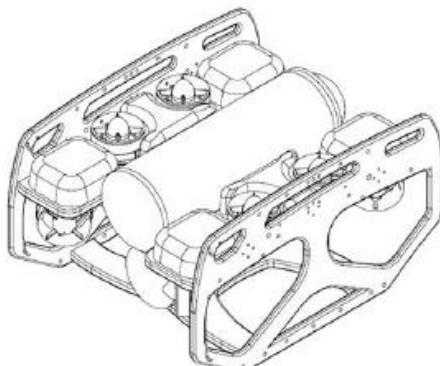


Figure 1

ISA'ların derinlik kontrolünde karşılaşılan temel sorunlar arasında, değişken çevresel koşullar, su altı akıntıları ve sensör doğruluğu bulunmaktadır. Ayrıca, sistemdeki mekanik elemanların eskimesi ve aşınması, kontrol performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Modern ISA'lar, bu tür sorunların üstesinden gelmek için daha gelişmiş sönümleme elemanları ve kontrol algoritmaları ile tasarlanmaktadır. Bu tür gelişmeler, ISA'ların operasyonel başarılarını artırmak ve daha zorlu görevlerde kullanılabilirliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, ISA'lar için tasarlanan bir derinlik kontrol sistemi ele alınmış ve bu sistemin performansı PID ve Bulanık Mantık kontrol yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem de MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve çeşitli simülasyon senaryolarında test edilmiştir. Sonuçlar, farklı koşullarda her iki yöntemin avantajlarını ve dezavantajlarını ortaya koymaktadır.

2. Aracın Modellemesi

Projenin hedefi, temelde aracın dinamik modelinin çıkarılmasıdır. Bu çıkarım için T. I. Fossen'in, Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control kitabından yararlanılacaktır [1]. Sname notasyonu kullanılan denklemlerde uygulanabilirlik anlamında ise Chu-Jou Wu'nun makalesinden yararlanılacaktır [2,3]. Kodların . AUV'un kontrolü için temel fizik teorileri kullanılarak bir matematiksel model oluşturulacaktır. Fossen'in kaynağına göre bu teoriler, tüm deniz araçlarının modellenmesi için uygulanabilir niteliktedir. Yapılan tüm modelleme ve hesaplamalar MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilecektir.

ROV'un hareket denklemlerini tanımlamak için NED ve Gövde (Body) olmak üzere iki referans sistemi atanması gerekmektedir. Sonrasında bu iki koordinat sistemi arasında doğrusal ve açısal hız, Euler açı dönüşümleri ile çözümler yapılacaktır. Bu çözümlemeler sonucunda aracın kinematik model denklemlerine (2.1) erişilecektir.

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b^n(\theta) & 0_{3x3} \\ 0_{3x3} & T_\theta(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^b \\ \omega^b \end{bmatrix} \quad 2.1$$

Newton-Euler formülasyonu kullanılarak dinamik denklemler 2.2'deki gibi elde edilebilir.

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v + M_A\dot{v}_w + C_A(v_w)v_w + D(v_w)v_w + g(\eta) = \tau \quad 2.2$$

Denklemden görüldüğü üzere rıjıt cisim (rigid body) dinamigi iki matris ile ifade edilmektedir. İlk matris, Newtoneyen formülasyon kullanılarak çıkarılacaktır. Formülasyonun basitleştirilmesi için üretilicek aracın eksen takımları simetrik olacak ve kullanılacak gövde

referans çerçevesi (body frame), aracın geometrik merkezine konumlandırılacaktır.

Sonuç olarak, kütle matrisi aşağıdaki gibi elde edilmektedir. Ancak cismin geometrik merkezi ile ağırlık merkezi arasında bir mesafe bulunabileceği unutulmamalıdır. Tüm bunların neticesinde, matris 2.3'deki gibi çıkmaktadır.

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & 0 \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -mz_g & 0 & I_x & 0 & 0 \\ mz_g & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad 2.3$$

Rıjıt cisim dinamığının ikinci elemanı olan Coriolis-merkezil matris, sistemin atalet matrisinden türetilerek 2.4'deki gibi ifade edilir.

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & mw & -mv & 0 & l_z r & -l_y q \\ -mw & 0 & -mu & -l_z r & 0 & l_x p \\ mv & -mu & 0 & l_y q & -l_x p & 0 \end{bmatrix} \quad 2.4$$

Aracın hidrodinamik denklemlerinde, hidrodinamik terimler açısından eklenen kütle matrisi (Ma) ve eklenen kütle Coriolis ve merkezil matrisi (Ca(v)), Kirchhoff denklemlerine dayanan bir enerji yaklaşımı kullanılarak Fossen'in kitabında türetilmiştir. Aynı zamanda, çoğu pratik uygulamada Ma matrisinin köşegen dışındaki elemanları köşegendeki elemanlara kıyasla küçük olacağından, ek kütle matrisi ve Coriolis matrisi 2.5 ve 2.6'daki gibi basitleştirilmiş olarak kullanılacaktır.

$$M_A = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & z_w w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -z_w w & 0 & -X_u u \\ 0 & -z_w w & Y_v v & 0 & -N_r r & M_q q \\ z_w w & 0 & -X_u u & N_r r & 0 & -K_p p \\ -Y_v v & X_u u & 0 & -M_q q & K_p p & 0 \end{bmatrix} \quad 2.5 \quad 2.6$$

Bir diğer hidrodinamik bileşen ise hidrodinamik sönümdür. Fossen'in kaynaklarında deniz araçları için hidrodinamik sönümlün dört ana kaynağı bulunmaktadır. Projede potansiyel sönümlü ve dalga sürüklemesi sönümlünün etkilerini göz arı ederek, yüzey sürtünmesinden kaynaklanan doğrusal bir sönümlü terimi ve esas olarak vortex shedding nedeniyle oluşan doğrusal olmayan bir sönümlü terimi ile hidrodinamik sönümlü D(v) yaklaşık olarak 2.7'deki gibi hesaplanacaktır.

$$D(v) = \begin{bmatrix} X_u + Y_v |v| |u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Z_w |v| |v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + Z_u |v| |w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p + K_{p|p}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q + M_{q|q}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r + N_{r|r}|r| \end{bmatrix} \quad 2.7$$

Hidrostatik bileşenler, ağırlık ve kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan kuvvetler olarak sınırlanabilir. Kolaylık sağlamak amacıyla, aracın gövde çerçevesinin merkezi kaldırma merkezi olarak yerleştirilir. Ayrıca, aracın ağırlık merkezinin sadece z yönünde değiştigini belirtmişit. Bu şartlar altında, genel geri yükleme kuvveti vektörü $\mathbf{g}(\eta)$, Euler açı dönüşümü kullanılarak 2.8'deki gibi hesaplanabilir:

$$\mathbf{g}(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ z_g W \cos \theta \sin \phi \\ z_g W \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad W = mg$$

$$B = \rho g \nabla \quad 2.8$$

Üretilenek aracın modellenmesi ve simüle edilmesi için en önemli başlıklardan bir diğeri, iticilerin modelidir. Üretilenek araçta toplam 8 motor bulunacak ve bu motorların hangi açılarda çalışacağı önceden belirlenmiştir. Bu şartlar altında, araçta 8 adet kuvvet ve 8 adet kontrol girişi uygulanacaktır. Bu kontrol girişlerinin, kuvvet vektörünün anlamlı bir elemanına dönüşebilmesi için, diagonal bir itiş katsayı matrisi türetilmektedir.

Aracın gövde çerçevesine etki eden kuvvet ve momentler ile ifade edilmektedir. Bu çerçevenin oluşumu ise her bir motorun gövde çerçevesi üzerindeki kuvvet ve moment etkileri ile hesaplanmaktadır. Sonuç olarak, 2.9'daki gibi denklemlerle pervane itki modeli ortaya çıkmaktadır.

$$\tau = \begin{bmatrix} f \\ r \times f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ F_z l_y - F_y l_z \\ F_x l_z - F_z l_x \\ F_y l_x - F_x l_y \end{bmatrix}$$

$$\tau = T(\alpha)F = T(\alpha)Ku$$

$$T = [t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8] \quad 2.9$$

Modellemenin çalıştırılması için Simulink'i seçmemizin nedeni, çok kapsamlı ve müdahele edilebilir toolbox'lar içermesidir. Örneğin, çizilen araç modeli Multibody Toolbox ile MATLAB Simulink ortamında kullanılacaktır. Bunun yanı sıra, gerçeye yakın bir simülasyon elde etmek için çıkarılan matematiksel denklemlerin simülasyona aktarılması Simulink ile kolaylaşmaktadır.

2.1 MATLAB/Simulink Ortamında Aracın Modelinin Oluşturulması

MATLAB/Simulink matematiksel olarak denklemler ile ifade edilebilen sistemlerin modellenmesine olanak vermektedir. Denklemler kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında yapılan modelleme Şekil 2.1.1'de yer almaktadır. Bu modelleme yapılrken kullanılan sistem parametreleri Tablo 2.1.1'de gösterilmiştir.

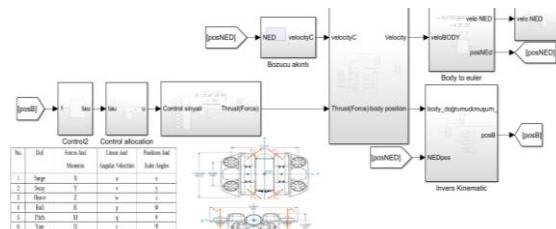


Figure 2.1.1

Ti	Aracın Fiziksel Özellikleri		
	lx _i (mm)	ly _i (mm)	lz _i (mm)
T1	-50,42	100,38	-125,14
T2	50,42	100,38	125,14
T3	-50,42	100,38	-125,14
T4	50,42	100,38	125,14
T5	0	100,38	0
T6	0	100,38	0
T7	0	100,38	0
T8	0	100,38	0

Aracın Boyutları	Aracın Boyutları		
	En	Yükseklik	Uzunluk
En	343,87mm		
Yükseklik	253,85mm		
Uzunluk	457,13mm		

Ağırlık Merkezi	Ağırlık Merkezi		
	X	Y	Z
X	0		
Y	0		
Z	392mm		

Yoğunluğu	Yoğunluğu		
	Hacim	Aracın Toplam Ağırlığı	
980 kg/m ³	10290 cm ³	10500 g	
Birincil Eylemsizlik Momentleri			
I _x	=0,1011kg·m ²		
I _y	=0,1159kg·m ²		
I _z	=0,1615kg·m ²		

Table 2.1.1

Bir kontrol sistemi, kontrol edilen sistemin davranışını anlamalı ve çıkış sinyaline göre gerekli değerlendirme ve ayarlamaları yapmalıdır. Bu amaçla, kontrol sistemlerinde geri besleme mekanizması kullanılmaktadır. Geri besleme mekanizması olmayan sistemlerde istenen parametreler kontrol edilemez ve bu durumda yalnızca sistemin açık çevrim, yani kontrollsüz cevabı elde edilebilir.

Bir sistemin kontrol edilebilirliği ve bu kontrolün etkin bir şekilde sağlanması, mühendislik açısından büyük önem taşımaktadır. Geri beslemenin eksik olduğu durumlarda, sistemin davranışını öngöremeyen ve kontrollsüz bir yapıya sahip olabilir. Örneğin, Şekil 2.1.2'de insansız su altı aracı (ISA) derinlik kontrol sistemi için açık çevrim cevabı gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi, geri besleme olmadığı için sistem kontrollsüz bir davranış sergilemiştir.

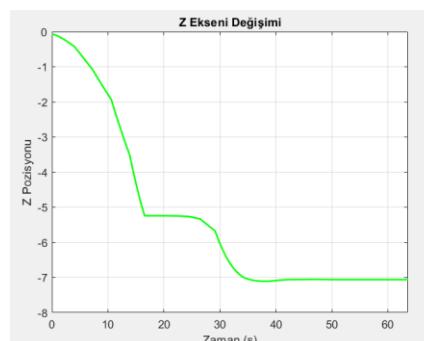


Figure 2.1.2

2.2 PID Denetleyici

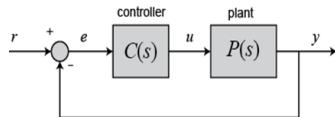


Figure 2.2.1

Şekil 2.2.1'te, birim geri beslemeli olarak kontrol edilen bir sistemin blok diyagramı gösterilmektedir. Bir sisteme uygulanan PID denetleyici sayesinde, sistemin giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan transfer fonksiyonu elde edilebilir. Bu transfer fonksiyonu, istenen bir sistem davranışını sağlamak veya belirli bir transfer fonksiyonu elde etmek için PID denetleyicinin tasarlanmasına olanak tanır.

Bu işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için, PID denetleyicinin çalışma prensiplerinin ve giriş-çıkış fonksiyonları arasındaki ilişkinin doğru bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. PID denetleyicinin zaman uzayındaki davranışını, aşağıda detaylı olarak sunulmuştur.

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

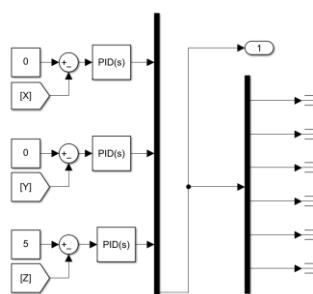
2.10

PID denetleyicinin matematiksel modeli yukarıda verilmiştir. Uygulanan sistem için istenilen giriş sinyali ile ifade edilerek referans olarak sisteme uygulanmaktadır (2.10). Hata sinyali, PID denetleyici ile oransal, türevsel ve integral işlemlerinden geçirilerek istenilen çıkış sinyali elde edilmeye çalışılmaktadır.

Bu denklemin parametreleri şunlardır:

- : Oransal PID kazancı/katsayı,
- : İntegral PID kazancı/katsayı,
- : Türevsel PID kazancı/katsayı.

MATLAB/Simulink PID denetleyici bloğu, Şekil 2.2.2'te gösterilmektedir. Şekil X'te, X, Y ve Z eksenlerinde PID ile kontrol gerçekleştirılmıştır.



2.2.2

PID denetleyici ile kontrol yönteminde, denetleyici ve sistem geri beslemeli kontrol uygulamalarında olduğu gibi seri olarak tasarlanmıştır. PID denetleyicide kullanılan parametreler ise Tablo 2.2.1'te sunulmuştur.

PID Parametreleri	Değer
K_p	42
K_i	0.1
K_d	32

Table 2.2.1

PID denetleyici kullanılarak yapılan kontrol uygulamasının sonuçları Şekil 2.2.3 'da gösterilmektedir. Sistem çıkış sinyali, istenilen derinlik olan hedef değere inmektedir. Bu durum, insansız su altı aracının derinlik kontrolünün başarıyla sağlandığını ve aracın stabil bir şekilde hedef derinlikte kalabildiğini göstermektedir. Kontrol performansı, ilerleyen bölümlerde bulanık mantık denetleyici ile karşılaştırılarak detaylı bir şekilde değerlendirilmektedir.

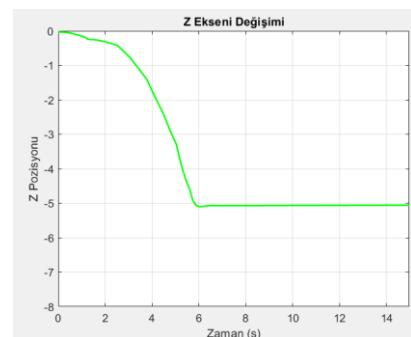


Figure 2.2.3

2.3 Bulanık Mantık Denetleyici

Bulanık mantık, klasik mantığın aksine yalnızca 1 ve 0 gibi iki seviyeli değildir, daha fazla seviye ile çalışabilir. Genellikle 5 seviye kullanımı tercih edilir: NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZO (Zero), PS (Positive Small) ve PB (Positive Big). Bulanık mantık, karmaşık sistemlerde klasik yöntemlere göre daha etkili bir kontrol yaklaşımı sunar. Dinamik davranışları kontrol etmek için üyelik fonksiyonları ve kural tabanları kullanılır.

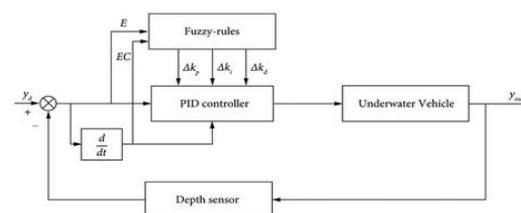


Figure 2.3.1

Bu çalışmada, PID katsayıları (K_p , K_i , K_d) için ayrı ayrı bulanık mantık denetleyiciler tasarlanmıştır [7]. Her bir katsayı, bulanık mantık ile optimize edilerek kontrol performansı artırılmıştır. MATLAB/Simulink kullanılarak kontrol modeli oluşturulmuş ve test edilmiştir. Sonuçlar, bulanık mantık denetleyicilerin PID kontrolünde esnek ve adaptif bir performans sağladığını göstermektedir. Bu yaklaşım, manuel PID parametre ayarlamalarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır. Şekil 2.3.2, tasarlanan kontrol modelini ve blok diyagramlarını göstermektedir.

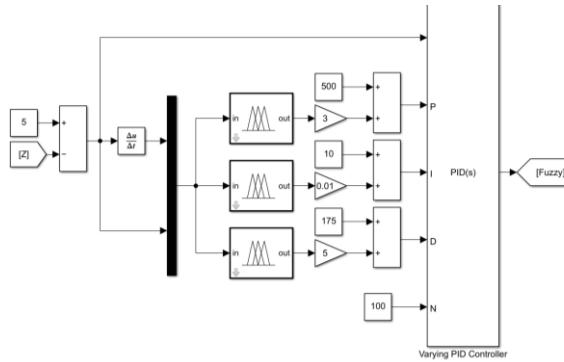


Figure 2.3.2

Üyelik fonksiyonlarının tanımlanması, bulanık mantık denetleyici tasarımları için kritik bir adımdır. Bu çalışmada, giriş değişkenleri için -6 ile +6 arasında tanımlanan üçgen üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Beş dil değişkeni tanımlanmıştır: NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZO (Zero), PS (Positive Small), ve PB (Positive Big). ZE (Zero) üyelik fonksiyonu, daha yüksek hassasiyet sağlamak için keskin bir yapıdadır.

Bulanık mantık denetleyicilerde, giriş ve çıkış arasındaki ilişki IF-THEN kuralları ile oluşturulur[4]. Kurallar, sistemin kontrol performansını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Ancak, dil değişkenlerinin sayısının çok fazla olması kural setinde karmaşaklığa ve artan işlem yüküne neden olabilir. Bu nedenle, optimum bir denge sağlanarak beş dil değişkeni ile kontrol tasarımları yapılmıştır. Bu çalışmada oluşturulan kural tablosu[5], sistem performansını artırmak amacıyla dikkatle hazırlanmıştır ve Tablo 2.3.1'de gösterilmektedir.

Üyelik fonksiyonlarının üçgen formu, tasarımın basitliğini koruyarak hesaplama karmaşaklığını azaltmıştır. Bu yaklaşım, bulanık mantık denetleyicinin hem giriş hem de çıkış değişkenleri için etkili bir kontrol sağlamıştır.

Table 1. Fuzzy rules table Δk_p .

	Δk_p	EC				
		NB	NS	ZO	PS	PB
E	NB	PB	PB	PS	PS	NS
	NS	PB	PS	PS	NS	NB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	NB	NS	PS	PS	PS	PB
PB	NS	PS	PB	PB	PB	PB

Table 2. Fuzzy rules table Δk_i .

	Δk_i	EC				
		NB	NS	ZO	PS	PB
E	NB	PB	PB	PS	NS	NB
	NS	PB	PS	PS	NS	NB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	NB	NS	PS	PS	PS	PB
PB	NS	NS	PS	PS	PB	PB

Table 3. Fuzzy rules table Δk_d .

	Δk_d	EC				
		NB	NS	ZO	PS	PB
E	NB	PB	PS	NB	NB	NS
	NS	PB	PS	NS	PS	PB
ZO	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	NS
PS	PB	PS	NS	PS	PS	PB
PB	NS	NB	NB	PB	PB	PB

Table 2.3.1

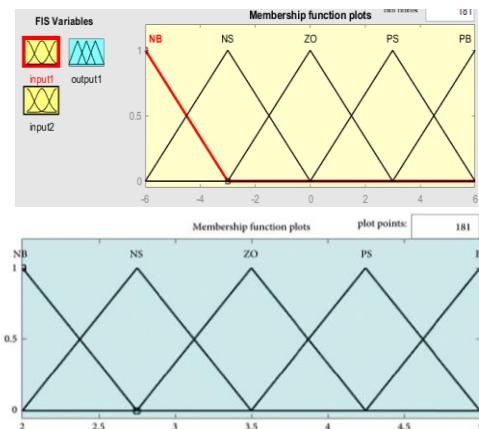


Figure 2.3.3

Bu çalışmada kullanılan üyelik fonksiyonları [6], FIS editörü üzerinde Şekil 2.3.3'de gösterilmektedir. Belirtilen kurallar ve üçgen üyelik fonksiyonları kullanılarak tasarlanan bulanık mantık denetleyicinin performansı, giriş ve çıkış sinyallerinin karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. Bulanık mantık denetleyici ile kontrol edilen sistemin kapali çevrim cevabı ise Şekil 2.3.4'da sunulmaktadır.

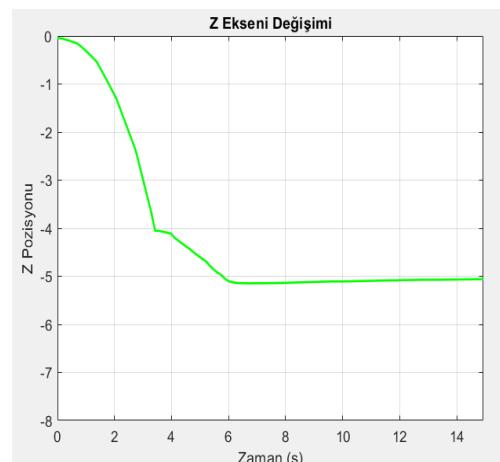


Figure 2.3.4

3. PID ve Bulanık Mantık Denetleyicisinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada, PID ve bulanık mantık denetleyicilerinin sabit derinlik kontrol performansı Z ekseni üzerinde analiz edilmiştir. İlk grafikte PID denetleyici ile kontrol edilen sistemin performansı gözlemlenmektedir. PID kontrol yöntemi başlangıçta hızlı bir yanıt vermiş, ancak hedef derinliğe ulaşırken belirgin aşım ve salınımlar oluşmuştur. Bu salınımlar, sistemin kararlı bir duruma geçmeden önce bir süre dalgalı bir hareket sergilemesine neden olmuştur. PID denetleyici ile sistem yaklaşık 6 saniye içinde kararlı bir hale gelmiştir. Bu durum, PID kontrolün sabit derinlik kontrollünde yeterli olmakla birlikte, dinamik değişimlere karşı sınırlı bir performans sergilediğini göstermektedir.

Bulanık mantık denetleyici ile kontrol edilen sistemin performansı ise ikinci grafikte sunulmaktadır. Bulanık mantık kontrol yöntemi, daha hızlı bir yanıt süresiyle 5 saniyeden daha kısa bir sürede hedef derinliğe ulaşmıştır. Ayrıca, sistem salınımları büyük ölçüde azaltılarak geçiş daha yumuşak hale getirilmiştir. Bu durum, bulanık mantık denetleyicinin değişken çevresel koşullara ve sistem parametrelerindeki değişikliklere daha etkili bir şekilde uyum sağlayabildiğini göstermektedir. Özellikle ZO (Zero) bölgesindeki hassas kontrol kapasitesi, sistemin hedef derinlige hızla ve kararlı bir şekilde ulaşmasına olanak tanımıştır. Yapılan bu karşılaştırma kontrol performans parametreleri göz önüne alınarak yapılmış ve karşılaştırma sonuçları Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Performans Kriterleri	PID	FLC
Aşım [%]	1.8	2.0
Yükselme Zamanı [s]	3.9	3.5
Oturma Zamanı [s]	5.5	4.8
Kalıcı Durum Hatası [cm]	0.06	0.02

Table 3.1

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, insansız su altı araçlarının derinlik kontrolü için PID ve Bulanık Mantık (FLC) denetleyicilerin performansı değerlendirilmiştir. Karşılaştırma, yükselme zamanı, oturma zamanı, kalıcı durum hatası ve aşım oranı gibi kritik parametreler üzerinden yapılmıştır.

Sonuçlar, FLC'nin PID kontrolöre kıyasla daha düşük oturma zamanı, daha hızlı yükselme zamanı ve daha hassas kontrol sağlayarak üstün performans sergilediğini göstermektedir. PID kontrolör ise temel kontrol

İhtiyaçlarını karşılamakta yeterli olsa da hassasiyet ve hız gerektiren durumlarda sınırlı kalmıştır.

Bu bulgular, FLC yönteminin karmaşık ve dinamik sistemlerde PID kontrolöre kıyasla daha verimli olduğunu, özellikle insansız su altı araçlarının sabit derinlik kontrolü gibi uygulamalarda etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Sensör Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Sensör Laboratuvarı araştırma ve geliştirme grubuna katkılarından dolayı teşekkürler.

Kaynakça

- [1] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control: Fossen/Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [2] Chu-Jou Wu, B.Eng. 6-DOF Modeling and Control of a Remotely Operated Vehicle Engineering Discipline College of Secience and Engineering, Flinders University July, 2018
- [3] Sname, T. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. *Soc. Nav. Archit. Mar. Eng. Tech. Res. Bull.* 1950, 1–5.
- [4] Ghamari S. M., Narm H. G., and Mollaee H., Fractional-order fuzzy PID controller design on buck converter with antlion optimization algorithm, *IET Control Theory & Applications*. (2021) 16, no. 3, 340–352,
- [5] Shengbo Z., Baoan Y., and Zhikun S., Simulation of small ROV fixed depth motion control based on fuzzy PID, *Modern Electronic Technology*, 2020, 43, no. 2, 20–23.
- [6] Yahya L., Nick A., and Leandros M., A mamdani type fuzzy inference system to calculate employee susceptibility to phishing attacks, *Applied Sciences*. (2021) 11, no. 19.
- [7] H. Muhammad, Y. Jiang, J. Zhou, I. Hussain, and M. Abubakr, "Adaptive PID-based depth control of autonomous underwater vehicles using fuzzy logic," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 20, no. 1, 2023. [Online].