

Ters Sarkacın Bulanık Mantık Esaslı Denetimi Fuzzy Logic Based Control of Inverted Pendulum

Ahmet Gani¹, Hakan Açıkgöz², Erdal Kılıç³, Sami Şit¹,

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
ahmet_gani87@hotmail.com , samisit@hotmail.com

²Elektrik Programı Bölümü, Kilis Meslek Yüksekokulu, Kilis 7 Aralık Üniversitesi
hakanacikgoz@kilis.edu.tr

³Elektrik Programı Bölümü, Afşin Meslek Yüksekokulu, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
ladrekilic@hotmail.com

Özet

Ters sarkaç sistemi, denetleyici tiplerini test etmek için literatürde bilinen klasik materyallerdendir. Ters sarkaç birçok denetim uygulamalarında örnek sistem olarak kullanılmaktadır. Ters sarkacın matematiksel modelinin, roketlerin yükselirken dikey olarak yükselmesini açıklayan modele ve insan yürüyüşünü açıklayan modele benzerliği, ters sarkacın örnek sistem olarak önemini artırmaktadır. Sistem yapısı kararsız, hızlı ve minimum olmayan evreli yapıdadır ve ayrıca güçlü doğrusal olmayan bozucu unsurlar da içermektedir. Sistemin doğrusal olmayan dinamik yapısından dolayı bulanık mantık esaslı denetim klasik denetim yöntemlerine göre daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışmada ters sarkacın bulanık mantık esaslı denetimi yapılmıştır. Analiz çalışmaları ve performans artırıcı çalışmalara imkân verdiği için benzetim Matlab/Simulink'te gerçekleştirilmiştir.

Abstract

The inverted pendulum system is known conventional materials in the literature for testing types of controller. The inverted pendulum is used as sample system in many control applications. The mathematical model of inverted pendulum, rocket rise vertically while explaining the model is similar to the model that describes the human gait, and inverted pendulum example increasing importance as the system. System structure is unstable, fast and non-minimum-phase structure, and also includes a powerful non-linear disturbance elements. Due to nonlinear dynamic structure of the system fuzzy logic based control is more preferred than conventional control methods. Fuzzy logic based control of inverted pendulum is made in this study. Simulation has been realized in Matlab/Simulink because it allows analyzing work and performance enhancing activities.

1. Giriş

Ters sarkaç sistemi, kontrol teorisinde denetim sistemlerinin üzerinde test edildiği, özellikle eğitim amaçlı kullanılan bir sistemdir. Araştırma literatüründe sarkaç tabanlı özellikle ters sarkaç sistemleri konusunda oldukça yoğun çalışmalar vardır [1-5]. Doğrusal olmayan modeli, kararlı ve

kararsız denge noktaları ve yetersiz uyarımlı yapısı yeni kontrol yöntemlerinin testi sırasında önemli bir dinamik zenginlik sağlamaktadır.

Ters sarkaç sistemlerinin roket, uçak, tek-link robot kolu [1], yürüyen robot [2] gibi başka sistemlerde alt model oluşturması araştırma amaçlı tercih edilmesinin önemli nedenlerinden biridir. Bu uygulamalarda, fiziksel sistemin modellenmesi, modelin test edilmesi, belli çalışma noktaları etrafında doğrusal yaklaşımının bulunması, sistemin yapısal kısıtları ve denetim girdileri ile ilgili kısıtların belirlenmesi gibi konularının görsel yorumlanabilirliği yüksek olan ters sarkaç sistemi üzerinde daha kolay anlaşılabilir olması sarkaç sistemleri deneylerini kontrol mühendisliğinde üst düzey popülariteye ulaştırmıştır [3].

Bulanık mantık tabanlı modelleme ve denetim yöntemleri, son yıllarda, hem üniversite çevrelerinde hem de endüstride gittikçe artan oranda benimsenen ve kullanılan uygulamalar haline gelmiştir. Klasik denetim sistemlerinin aksine bu tip yöntemlerde, sistemlerin matematiksel modeline gerek duymadan sadece istenilen çıkışı oluşturacak şekilde kontrol edilen sisteme uygulanan denetim işaretleri ayarlandığı için bulanık denetimin işlemesi tıpkı usta bir insanın (uzman) o sistemi denetlemesine benzer [4]. Bulanık mantık denetleyicisi geliştirmek, matematiksel ifadeler gerektirmediği için kolaydır. Bu yüzden bulanık mantık doğrusal olmayan karmaşık sistemlerde kolaylıkla kullanılabilir [5-7].

2. Ters Sarkaç Sistemi Modeli

Ters sarkaç sistemi şekil 1'deki gibi uzunluğu l , kütlesi m olan uç noktasında yoğunlaştırılmış kabul edilen çubuğun, M kütleli bir aracın üzerine P noktasından monte edilmesinden oluşmaktadır. Çubuğun P noktasından geçen dikey doğrultu ile yaptığı açı θ ve yatay ekseninde belirli bir referans noktasına olan uzaklığı x değişkenleri ile temsil edilmektedir. Çubuk hareketi xy düzlemine kısıtlanmış olup monte edildiği araç sadece x ekseninde boyunca hareket edebilmektedir. Bu kısımda, ters sarkacın doğrusal olmayan modeli Newton yasaları kullanılarak bulunmakta ve tanımlanan çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmaktadır [9]. Newton'un ikinci kuralı x yönündeki harekete uygulandığında;

$$(M+m)\ddot{x} - m l (\sin \theta) \dot{\theta}^2 + m l (\cos \theta) \ddot{\theta} = u \quad (1)$$

olarak yazılabilir. İkinci olarak m kütleinin P noktası etrafındaki hareketine Newton'un ikinci kuralını uygulanıp gerekli sadeleştirmeler yapıldığında;

$$m \ddot{x} \cos \theta + ml \ddot{\theta} = mg \sin \theta \quad (2)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik (1) ve (2) ile verilen doğrusal olmayan sistem modeli durum uzayı formunda aşağıdaki şekilde yazılabilir:

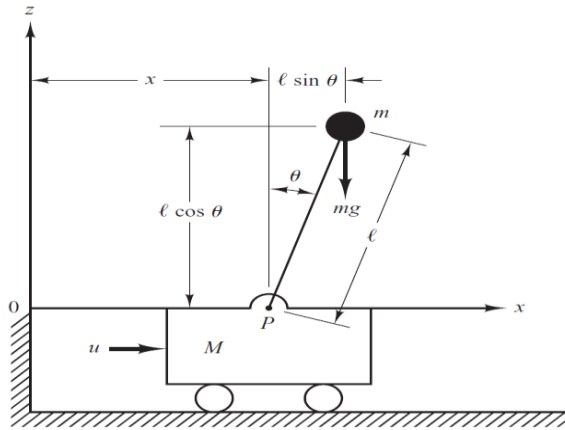
$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{ml \sin(x_3) x_4^2 - mg \sin(x_3) \cos(x_3) + u}{M + m - m \cos(x_3)^2} \quad (4)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (5)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{-ml \sin(x_3) \cos(x_3) x_4^2 + (M + m) g \sin(x_3) - u \cos(x_3)}{l(M + m - m \cos(x_3)^2)} \quad (6)$$

Buradan, $x_1 := x$, $x_2 := \dot{x}$, $x_3 := \theta$, $x_4 := \dot{\theta}$ olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1: Ters sarkaç kontrol sistemi

Doğrusal sistemlerin analizi ve bunlar için denetleyici tasarımı belirli bir olgunluğa erişmiş ve iyi anlaşılmış bir konu olduğundan, sarkacı dikey konumunda dengeleme tasarımı sistem in doğrusal yaklaşımından faydalanılmaktadır [3]. Ters sarkaç sisteminde kontrol amacı sarkacı dikey tutmak olarak belirlendiği durumu ele alalım. Bu durumda ters sarkaç sisteminin kontrol amacına uygun yörüngelerinin $(x_3, x_4) = (0, 0)$ çalışma noktası komşuluğuna ulaşması beklenmektedir. Bu çalışma noktası için doğrusal model;

$$\dot{x} = \frac{\partial f}{\partial x} \bigg|_{(x_3, x_4) = (0, 0)} x + \frac{\partial f}{\partial u} \bigg|_{(x_3, x_4) = (0, 0)} u \quad (7)$$

işlemi sonucunda aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (8)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{mg}{M} x_3 + \frac{1}{M} u \quad (9)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (10)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{(M + m)g}{Ml} x_3 - \frac{1}{Ml} u \quad (11)$$

Bu ifadeler matris formda yazılırsa eşitlik (12) elde edilir.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{(M+m)g}{Ml} & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 1 \\ -\frac{1}{Ml} \end{bmatrix} u \quad (12)$$

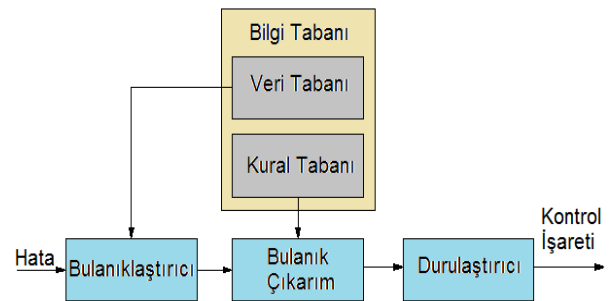
Çizelge 1'de tipik bir ters sarkaç sistemi parametre değerleri vardır.

Çizelge 1: Ters sarkaç için kullanılan parametrik değerler

Parametreler	Sembol	Değeri	Birimi
Aracın Kütle	M	3	kg
Ters Sarkacın kütle	m	0.5	kg
Ters Sarkacın uzunluğu	l	0.5	m
Yerçekimi ivmesi	g	9.8	m/sn ²

3. Bulanık Mantık Denetleyici

Bir Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) blok diyagramı şekil 2'de verilmiştir. BMD, genel yapısıyla bulandırma, bulanık çıkarım, durulama ve bilgi tabanı olmak üzere dört temel bileşenden oluşmuştur.



Şekil 2: Bulanık mantık denetleyici yapısı

Bulandırma birimi, sistemden alınan giriş bilgilerini dilsel niteleyiciler olan sembolik değerlere dönüştürme işlemidir.

Bulanık çıkarım birimi, bulandırma biriminden gelen bulanık değerleri, kural tabanındaki kurallar üzerinde uygulayarak bulanık sonuçlar üretilmektedir. Bulanık çıkarım yöntemleri içerisinde en yaygın kullanılanı ve bu çalışmada da kullanılan yöntem Mamdani yöntemidir.

Durulama birimi, karar verme biriminden gelen bulanık bir bilgiden bulanık olmayan ve uygulamada kullanılacak gerçek değer elde edilmesini sağlar. Durulama, bulanık bilgilerin kesin sonuçlara dönüştürülmesi işlemidir.

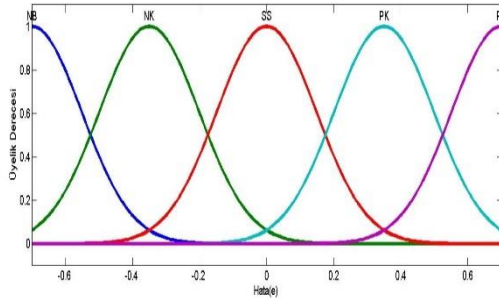
Bilgi tabanı, denetlenecek sistemle ilgili bilgilerin toplandığı bir veri tablosundan ibarettir. Girişler ve çıkışlar arasındaki bağlantılar, kural tabanındaki kurallar kullanılarak sağlanır. Bir sistem için kural tabanı geliştirilirken, sistem çıkışını etkileyebilecek giriş değerleri tespit edilmelidir. Bulanık kontrol kuralları genellikle uzman bilgisinden türetilir [8-14].

Bu çalışmada tasarlanan denetleyici için iki tane giriş seçilmiştir. Bu girişler hata ve hata değişimidir. Hata (e), istenen seviye değeri (r) ile gerçek seviye değeri (y) arasındaki farktır. Hata değişimi de(k), mevcut hata e(k) ile önceki hata e(k-1) arasındaki farktır. k simülasyon programındaki iterasyon sayısını göstermek üzere hata ve hata değişiminin ifadesi eşitlik (13) ve (14)'deki gibi olacaktır.

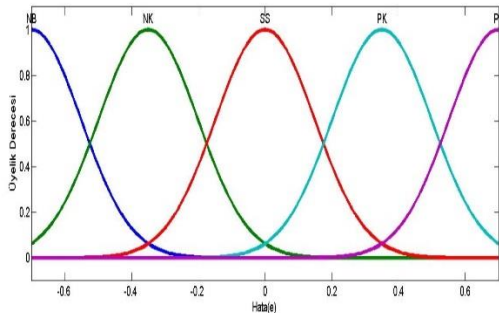
$$e(k)=r(k)-y(k) \quad (13)$$

$$de(k)= e(k)-e(k-1) \quad (14)$$

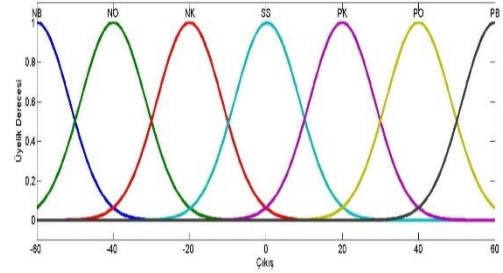
BMD'nin bulandırma işleminde giriş ve çıkış değişkenleri sembolik ifadelerle dönüştürülmektedir. Tasarlanan denetleyicide kullanılan dilsel değişkenleri NB (Negatif Büyük), NO (Negatif Orta), NK (Negatif Küçük), SS (Sıfır), PK (Pozitif Küçük), PO (Pozitif Orta) PB (Pozitif Büyük) olmak üzere yedi değişken kullanılmıştır. Sisteme verilen her bir giriş için üyelik fonksiyonlarının seçimi tamamen keyfi olmakla birlikte bu sistem için gauss üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan üyelik fonksiyonları şekil 3-5'de gösterilmiştir.



Şekil 3: Gauss üyelik fonksiyonu için hata



Şekil 4: Gauss üyelik fonksiyonu için hata değişimi

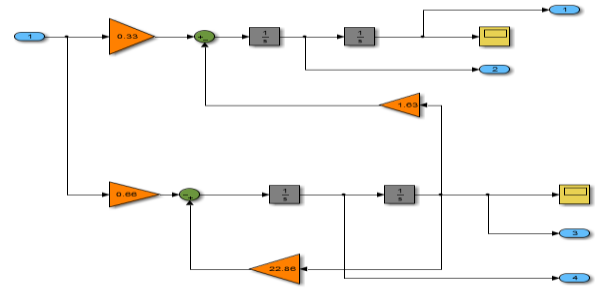


Şekil 5: Gauss üyelik fonksiyonu için çıkış

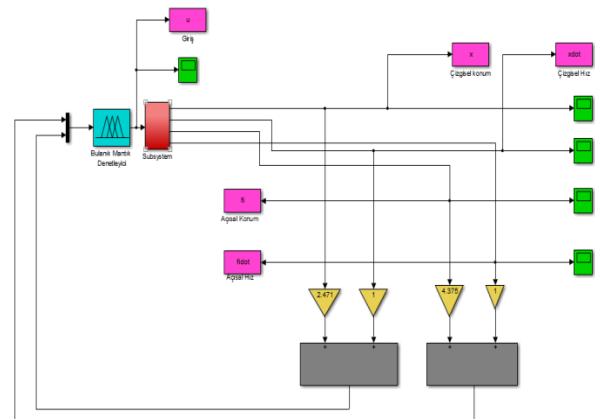
Denetleyicinin bulanık çıkarım biriminde girişlerin çıkış ile olan ilişkisi uzman bilgisinden faydalanılarak belirlenen kurallarla sağlanır. Çalışmada kurallar belirlenirken AND (ve) bulanık operatörü kullanılmıştır. Bu kurallar “Eğer e NB ve de PB ise u SS” şeklinde oluşturulmuştur. Bu çalışmada tüm dilsel değişkenler kullanılarak yirmi beş tane kural oluşturulmuştur. Durulama biriminde, her kural için hata ve hata değişiminin üyelik ağırlık değerleri bulunarak, bu iki değer en az üyelik ağırlığı ve buna göre çıkış üyelik (u) değerleri tespit edilir. Durulama biriminin çıkışında elde edilen sayısal değer sisteme uygulanır [13-15].

4. Benzetim Çalışmaları

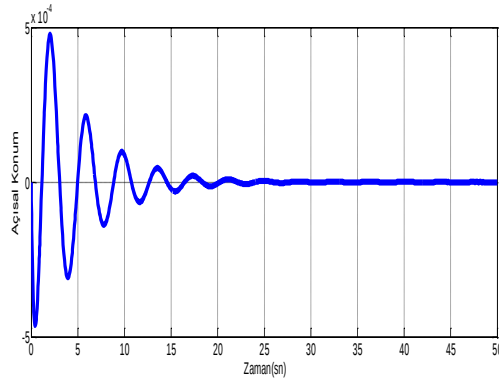
Tasarlanan bu sistemde, ters sarkacın açılma konum denetimi bulanık mantık denetleyici ile Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Matlab/Simulink ortamında hazırlanan ters sarkaç modeli şekil 6'da verilmiştir. Şekil 7'de ise Matlab/Simulink ortamında hazırlanan ters sarkaç denetim sistemi modeli verilmiştir. Benzetim çalışmaları sonuçları şekil 8-10'da verilmiştir.



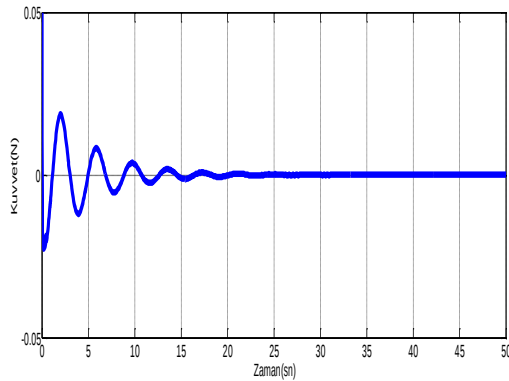
Şekil 6: Ters sarkaç simulink modeli



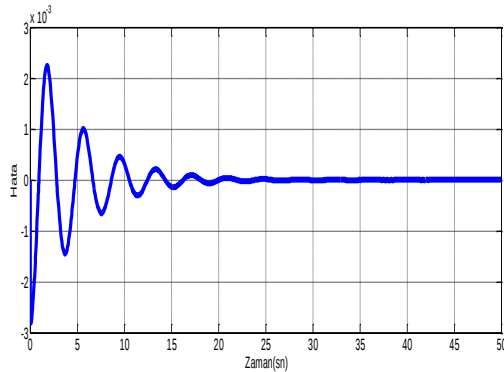
Şekil 7: Ters sarkaç denetim sistemi modeli



Şekil 8: Açısal konum-zaman grafiği



Şekil 9: Kuvvet-zaman grafiği



Şekil 10: Hata-zaman grafiği

5. Sonuçlar

Yapay zekâ tekniklerinin ortaya çıkması ile insan düşüncesinin mantıksal ve sezgisel ya da objektif taraflarını kullanan metotlar geliştirildi. Bu tekniklerden biri olan bulanık mantık birçok alanda kullanıldığı gibi özellikle doğrusal olmayan sistemlerin etkili bir şekilde kontrolüne de olanak sağlamıştır. Bu çalışma ile bu alanda yapılacak olan gerçek zamanlı uygulamalara bir temel oluşturmak hedeflenmiştir. Modellemesi ve denetimi yapılan bu sistemde benzetim çalışmaları sonuçları incelendiğinde sistem 25. saniyede dengeye gelmiştir. Bulanık kural sayısı artırılarak ve farklı üyelik fonksiyonları kullanılarak sistem cevabı iyileştirilebilir. Bu şartlarda benzetim çalışmalarına göre bulanık mantık denetleyicinin sistem üzerinde oldukça etkili ve tatmin edici sonuçlar verdiği kanısına varılmıştır.

6. Kaynaklar

- [1] Yeung K. S. and Chen Y. P., "Sliding-mode Controller Design of a Single Link Flexible Manipulator Under Gravity," *Int. J. Contr.*, v. 52, no. 1, s.101–117, 1990.
- [2] Seven U., Taskiran E., Koca Ö., Erbatur K., Ters Sarkaç Modeli ve Salınan Bacak Telafisi ile Oluşturulan Yürüyen Robot Referans Yörüngeleri, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK'08, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.
- [3] Hovland, G., "Evaluation of an Online Inverted Pendulum Control Experiment", *IEEE Transactions on Education*, v. 51, Issue 1, s.114 -122, 2008.
- [4] İsmail H. ALTAŞ, "Bulanık Mantık : Bulanıklık Kavramı" *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, Temmuz 1999, Sayı 62, Sayfalar:80-85, Bileşim Yayıncılık A.Ş., İstanbul, 1999.
- [5] Zadeh, L.A.: "Outline of New Approach to Analysis of Complex Systems and Decision Processes" *IEEE Trans. Syst. Man&Cybern*, 1973.
- [6] Mamdani, E.H., Assilian, S., "An experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller" *International Journal of Machine Studies*, 7, 1-13, 1975.
- [7] Lee, C., "Fuzzy Logic in Control Systems Fuzzy Logic Controller, " Parts I and II. *IEEE Trans. Syst. Man&Cybern*, 20, 404-435, 1990.
- [8] Gülez, K., "Asenkron Motorun Dsp (Sayısal İşaret İşlemci) Tabanlı Bir Kontrol Sistemi Kullanılarak Ysa (Yapay Sinir Ağları) İle Performansının Arttırılması", Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul-1999.
- [9] Şekkel, M., Yıldız, C., Özçalık H.R., "Bulanık Mantık ve PI Denetimli DC-DC Konvertör Modellenmesi ve Dinamik Performans Karşılaştırılması", 4. otomasyon sempozyumu, Samsun, Mayıs 2007.
- [10] Özek, A., Sinecen, M., "Klima Sistem Kontrolünün Bulanık Mantık ile Modellenmesi", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt: 10, Sayı: 3, Sayfa: 353-358, Yıl: 2004.
- [11] Özçalık, H.R., Türk, A., Yıldız, C., Koca, Z., "Katı Yakıtlı Buhar Kazanında Yakma Fanının Bulanık Mantık Denetleyici ile Kontrolü", *KSÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 2008.
- [12] Özkop, E., Altaş, İ.H., "Bulanık Mantık Denetleyici ile Aktif Otomobil Süspansiyon Denetimi" XII. EEBB Mühendisliği Ulusal Kongresi Ve Fuarı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir. Kasım 14–18, 2007.
- [13] Arulmozhiyal, R., Baskaran, K., "Space Vector Pulse Width Modulation Based Speed Control of Induction Motor using Fuzzy PI Controller", *International Journal Computer and Electrical Engineering*, Vol.1, No.1, April 2009.
- [14] Şit, S., "Üç Fazlı Sincap Kafesli İndüksiyon Motorunun Bulanık Mantık Esaslı Yöntemler Kullanılarak Denetimi" *KSÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş-2013.
- [15] Gani, A., Kılıç, E., Yılmaz, Ş., "Bulanık Mantık Esaslı Sıvı Seviye Denetimi İçin Sugeno Çıkarım Yönteminin Performansının İncelenmesi", *İBK 2013*, 14-16 Haziran 2013, Ankara.