

KIRIŞ BENZERİ BİR YAPININ FARKLI SAYIDA KURAL İÇEREN BULANIK MANTIK KONTROLCÜSÜ KULLANARAK VE PİZEOELEKTRİK UYARICILAR İLE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜNÜN PERFORMANS KIYASLAMASI

Erdem Rahmi ŞENÖZ¹

Aselsan, Ankara

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Melin ŞAHİN²

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada kirişin aktif titreşim kontrolünün bulanık mantık kontrolcüsü kullanarak sağlanması gösterilmiştir. Test düzeneği, bir ucu sabitlenmiş ve diğer ucu serbest olan alüminyum kirişin sabit ucuna yakın her iki yüzeyine simetrik ve yan yana yerleştirilmiş 4 adet piezoelektrik yamalardan elde edilmiş akıllı kirişten oluşmaktadır. Bu piezo-kiriş sistemi birinci rezonans frekansında bozucu sinyal ile titretilerek kontrolcü sinyali ile bastırılması amaçlanmıştır. Kontrolcü olarak alışagelmış geleneksel kontrolcüler yerine bulanık mantık kontrolcüsü tercih edilmiştir. Deneyim ve tecrübelerden yararlanarak hazırlanmış farklı sayıda kural içeren üç farklı bulanık mantık kontrolcüsü tasarlanmış ve sisteme verilen titreşimi başarılı sonuçlar ile farklı performanslarda sönümlemişlerdir.

GİRİŞ

Hafif sönüm içeren uçak, uydu ve diğer uzay yapıları, kanat sarsıntısıyla veya yorulmadan kaynaklı hasarlarla sonuçlanan ciddi titreşimlere maruz kalmaktadır. Pasif sönümleme metotları ağırlık kısıtlamasından dolayı bu tip yapılara uygun olmamaktadır. Ayrıca araştırmalar da gösterir ki pasif kontrol, düşük frekans modundaki titreşimleri sönümlemede etkili değildir [Brooks, L., Moreau, D., Hansen, C., Qiu, X., & Snyder, S., 2012]. Aktif titreşim kontrolü, düşük frekansta da etkili performans, boyutta ve ağırlıkta azalma ve kontrolcü tasarımında programlama esnekliği sağlamaktadır. Piezoelektrik malzemelerin küçük ve hafif olduğu kadar ekonomik olması da aktif titreşim kontrolü alanında yaygınca kullanılmasının yolunu açmıştır. Aynı zamanda bu malzemeler, mekanik hareketleri ve elektrik sinyalini birbirlerine dönüştürebildiği için sistem içerisinde hem uyarıcı hem de algılayıcı olarak kullanılmaktadır. Literatürde kirişin üzerine PZT yamalar yapıştırarak PID ve LQR kontrolcüler ile birinci rezonans frekans bölgesindeki titreşimlerinin bastırılmaya çalışılması oldukça yaygındır [Djojodihardjo, H. ve ark., 2015]. ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde ise akıllı yapıların uygulamaları konusu üzerindeki araştırma çalışmaları, piezoelektrik yamaların algılayıcı ve uyarıcı olarak kullanarak titreşimlerin daha etkili sönümlenmesi sağlamak üzere çeşitli kontrol metotları geliştirmiştir. C. Onat, M. Sahin, ve Y. Yaman, akıllı kiriş üstünde PID ve kesir dereceli kontrolcüsünü ve Luenberger gözlemcisini geliştirmişlerdir. Bu kontrolcülerin dışında başka bir metot olan bulanık mantık kontrol de aktif kontrol mekanizmasının bir parçası olabilmektedir. Bulanık mantık, insanın karar verme becerisini örnek alarak oluşturulmuş bir kontrol algoritmasıdır [Chen, G. ve Zhou, L., 2015]. Bulanık mantık

¹ Mekanik Tasarım Müh. E-posta: ersenoz@aselsan.com.tr, Yüksek lisans öğrencisi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü

² Doç. Dr., Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü E-posta: msahin@metu.edu.tr

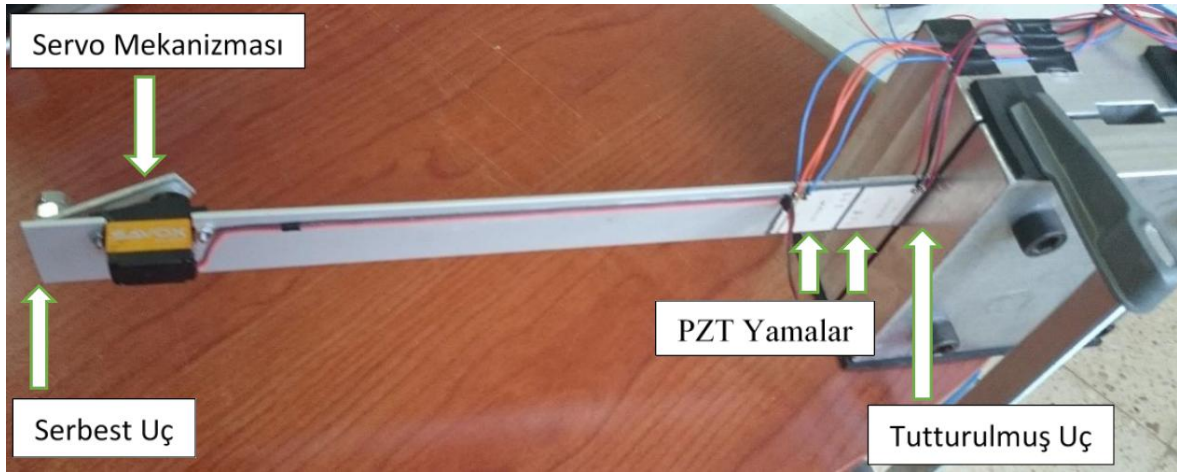
kontrolcü tasarımı, plantın matematik modeli bilinmeden de deneme yanılma ve tecrübe ile yapılabilir. Lin, J. ve arkadaşları [Lin, J. ve Liu, W. Z., 2006] bulanık mantık kontrolcüsünün klasik PD kontrolcüsüne olan üstünlüğünü deneysel olarak göstermiştir.

Bu çalışmada, akıllı bir kirişin birinci rezonans titreşimini bastırabilmek için farklı sayıda kural içeren 3 bulanık mantık kontrolcüsünün aktif titreşim sönümlemedeki performansları kıyaslanmaya çalışılmıştır.

YÖNTEM

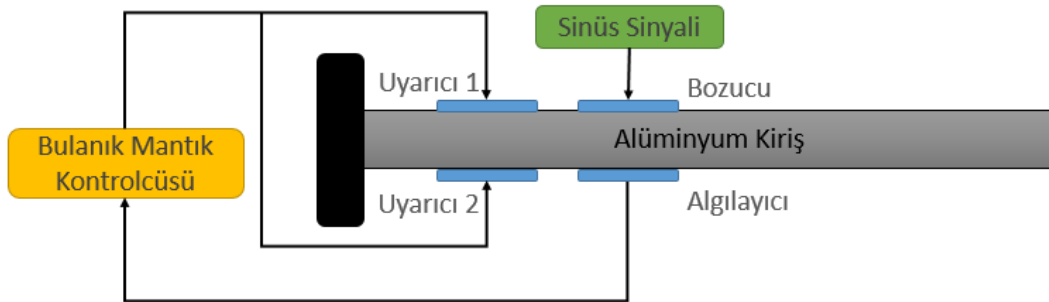
Deney Düzeneği

35 cm uzunluğunda, 3 cm genişliğinde ve 2 mm kalınlığında alüminyumdan yapılmış bir uçtan sabitlenmiş kişin sabit ucuna ikisi ön yüzeyde ikisi arka yüzeyde olmak üzere karşılıklı ve sıralı olarak dört adet piezoelektrik yamalar yapıştırılmıştır (Şekil 1). Bu piezoelektrik yamaların ikisi kontrolcü (uyarıcı), biri algılayıcı ve diğeri ise bozucu sinyal yaratmak görevinde bulunmaktadır.



Şekil 1: Akıllı Kiriş [Akın, O. ve Şahin, M., 2015]

Kontrolcü (uyarıcı) PZT yamalar, Şekil 2’de görüldüğü gibi kirişin ön ve arka yüzeyine simetrik olarak yapıştırılıp, etkisini artırmak amacıyla elektriksel bağlantısı bimerf konfigürasyonunda yapılmıştır. Kirişteki titreşimi ölçen algılayıcı PZT yama ile kirişin titreşim kaynağı görevi üstlenen bozucu PZT yamalar ise şekilde görüldüğü gibi yapıştırılmıştır.



Şekil 2: Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi

Kirişin serbest ucuna, sistemin transfer fonksiyonunu ağırlığın pozisyonuyla değiştirebilecek bir servo mekanizması yerleştirilmiştir. Fakat bu çalışmada ağırlık pozisyonu sabit tutularak, tek bir transfer fonksiyonuna göre farklı kontrolcü tasarımları yapılmıştır.

Sistem Modellenmesi

Deney düzeneğinde, 5 Hz - 30 Hz frekans aralığında kontrolcü PZT yama sistemi titreştirirken, algılayıcı PZT yama üzerine gelen cevabı ölçerek frekans cevap fonksiyonu elde edilmiştir.

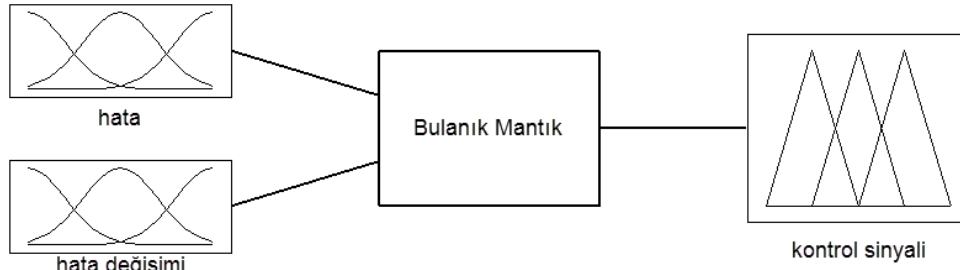
Ardından algılayıcı ve kontrolcü piezoelektrik yamalar arasındaki transfer fonksiyonu (1), Matlab yazılımındaki *fitfrd* ve *frd* komutları yardımıyla elde edilmiştir [Akin, O. 2015].

$$G(s) = \frac{0.01879s^3 + 0.1993s^2 + 310.7s + 1269}{s^3 + 20.58s^2 + 8214s + 1.539 \times 10^5} \quad (1)$$

Alıntı yapılan transfer fonksiyonu ile plant modeli Simulink ortamına aktarılmıştır. Simulink modelinde, planta bozucu piezoelektrik yama üzerinden birinci rezonans frekansında sinüs sinyali iletilmekte ve algılayıcıda oluşan sinyale göre de kontrolcünün cevapları uyarıcılar aracıyla kırışteki titreşim bastırılmaya çalışılmaktadır.

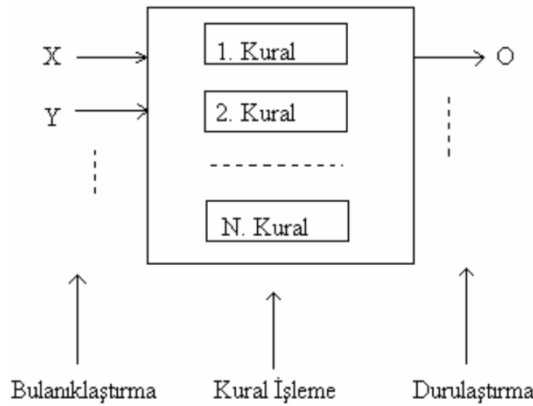
Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı

Bulanık mantık sistemi, hata ve hatadaki değişimini girdi bilgileri olarak alıp, çıktı olarak kontrol sinyalini hesaplayan bir algoritma olarak kullanılır (Şekil 3). Bulanık mantık kontrolcüsü, bozucu etkinin yarattığı deplasmanı hata olarak kabul edip, hata ve hatanın birim zamandaki değişim miktarına göre kontrol sinyali üretir. Üretilen sinyal PZT yamalara aktarılarak titreşim gerçek zamanlı olarak bastırılır.



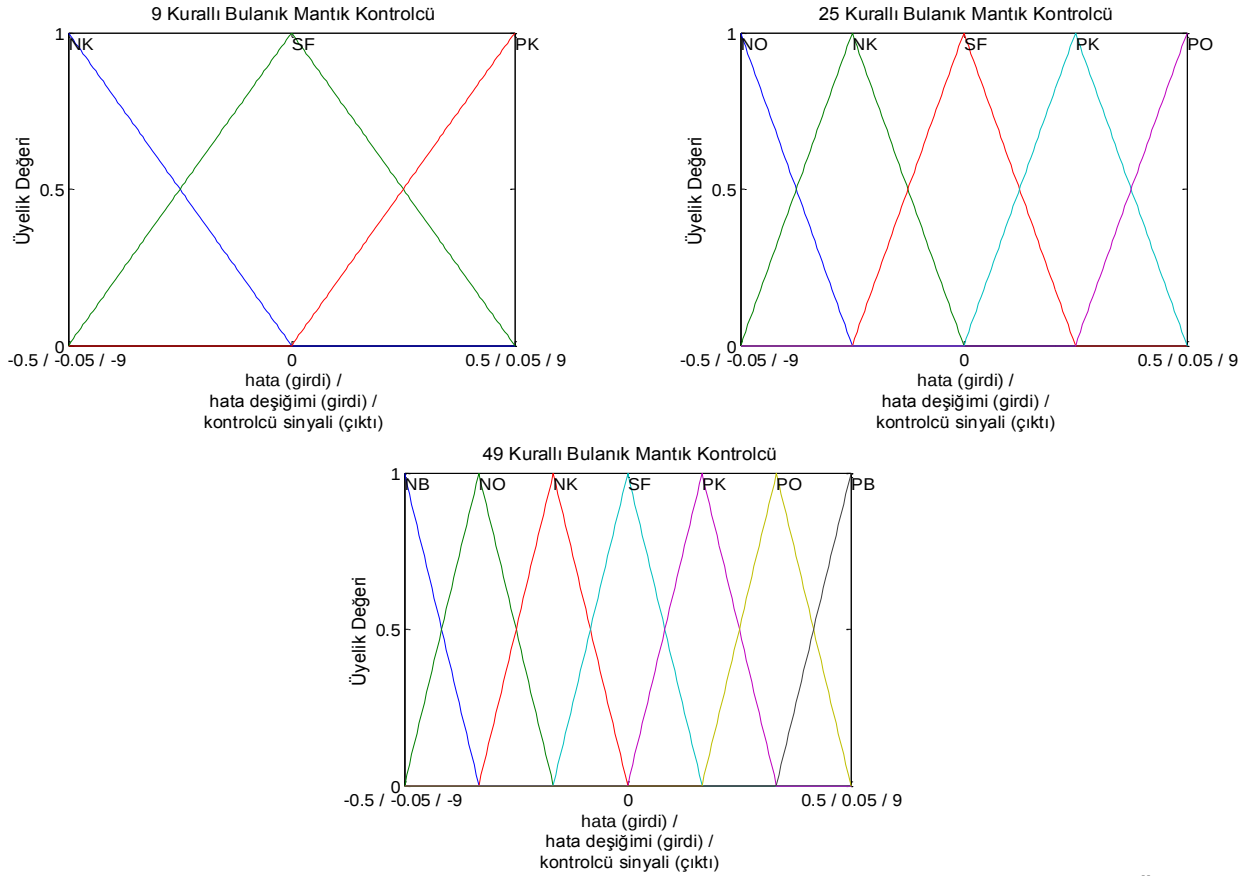
Şekil 3: Bulanık Mantık Sisteminin Girdi ve Çıktılarının Şematik Gösterimi

Bulanık mantık kontrolcüsünün yapısı, Şekil 4'te gösterildiği gibi bulanıklaştırma (*fuzzification*), kural işleme (*fuzzy rule*) ve durulaştırma (*defuzzification*) olmak üzere üç bölüme ayrılabilir [Kıyak, E., Kahvecioğlu, A., 2003]. Bu çalışmada, bulanık mantık kontrolcü performansının bulanık kümedeki parametre sayısı ve kural sayısı ile ilişkisini görebilmek için üç farklı sayıda kurala sahip olan kontrolcü tasarımları yapıldı.



Şekil 4: Bulanık Mantık Sistem Yapısının Genel Gösterimi

Bulanıklaştırma bölümünde, 0 ve 1'den oluşan iki değerli klasik mantığı bulanıklaştırarak, üyelik derecesi [0,1] aralığında olan sonsuz değerli mantık elde edilir. Kontrolcüye giren bilgilere, hata ve hata değişimine, ayrı ayrı üyelik fonksiyonlarla ve dilsel olarak ifade edilen bulanık kümelerle hesaplanan üyelik değeri atanır. Bu çalışmada, girdi ve çıktı değişkenlerinin üyelik fonksiyonları Şekil 5'te de görülebileceği gibi üç farklı kontrolcüde de *üçgen* kullanılmıştır. Ancak bulanık kümedeki değişkenler, 9 kurallı yapabilmek için NK (*negatif küçük*), SF (*sıfır*), PK (*pozitif küçük*), 25 kurallı yapabilmek için NO (*negatif orta*), NK, SF, PK, PO (*pozitif orta*), 49 kurallı yapabilmek için NB (*negatif büyük*), NO, NK, SF, PK, PO, PB (*pozitif büyük*) olarak seçilmiştir.



Şekil 5: 9, 25 ve 49 Kurallı Bulanık Mantık Sistemlerinin Girdi ve Çıktı Değişkenlerinin Üyelik Fonksiyonları

Kural işleme bölümünde, birçok deneme yanılma, tecrübeyle eğer-ise kuralları oluşturulur. Bulanıklaştırma bölümünde elde edilen her bir üyelik değeri, ilgili kural içinde hesaplanarak bulanık sonuç elde edilir. Bu çalışmada, öncelikle Negatif Büyük (NB), Negatif Orta (NO), Negatif Küçük (NK), Sıfır (SF), Pozitif Küçük (PK), Pozitif Orta (PO) ve Pozitif Büyük (PB) olmak üzere 7 değişkene sahip bulanık kümeyle 49 kural Çizelge 1'deki gibi hazırlanmıştır. Bu kuralları oluştururken kirişin titreşim hareketi analiz edilmiştir. Örneğin, eğer hata (deplasman) negatif büyük ve hata değişimi de negatif büyük ise kirişin ucu denge pozisyonundan oldukça aşağıdadır ve yukarı yönde bir kontrolcü kuvvetin oluşturmak için kontrolcü çıktısı negatif büyük seçilir. Böylelikle referans değerinden kontrolcü çıktısı farkını alınca pozitif yönde büyük bir kontrolcü kuvveti elde edilecektir. Buna benzer birkaç kural belirli durumlara göre yazılıp, geri kalan kurallar da tablo üzerinden simetriyi bozmayacak şekilde belirlenmiştir. 7 değişkenin negatif büyük ve pozitif büyük değişkenlerini atarak, 5 değişkenli bulanık kümeyle 25 kural (Çizelge 2), negatif orta ve pozitif orta değişkenlerini de atarak 3 değişkenli bulanık kümeyle 9 kural (Çizelge 3) oluşturulmuştur. İç içe oluşturulan bu kurallar ile değişken sayısının kontrolcünün performansına etkisi gözlemlenmeye çalışılmıştır.

Çizelge 1: Kontrolcü Sinyali için 49 Kurallı Bulanık Mantık Kural Tablosu

hata	hata değişimi						
	NB	NO	NK	SF	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NO	NO	NK	SF
NO	NB	NO	NO	NO	NK	NK	SF
NK	NO	NK	NK	NK	SF	SF	SF
SF	NK	NK	NK	SF	PK	PK	PK
PK	SF	SF	SF	PK	PK	PK	PO
PO	SF	PK	PK	PO	PO	PO	PB
PB	SF	PK	PO	PO	PB	PB	PB

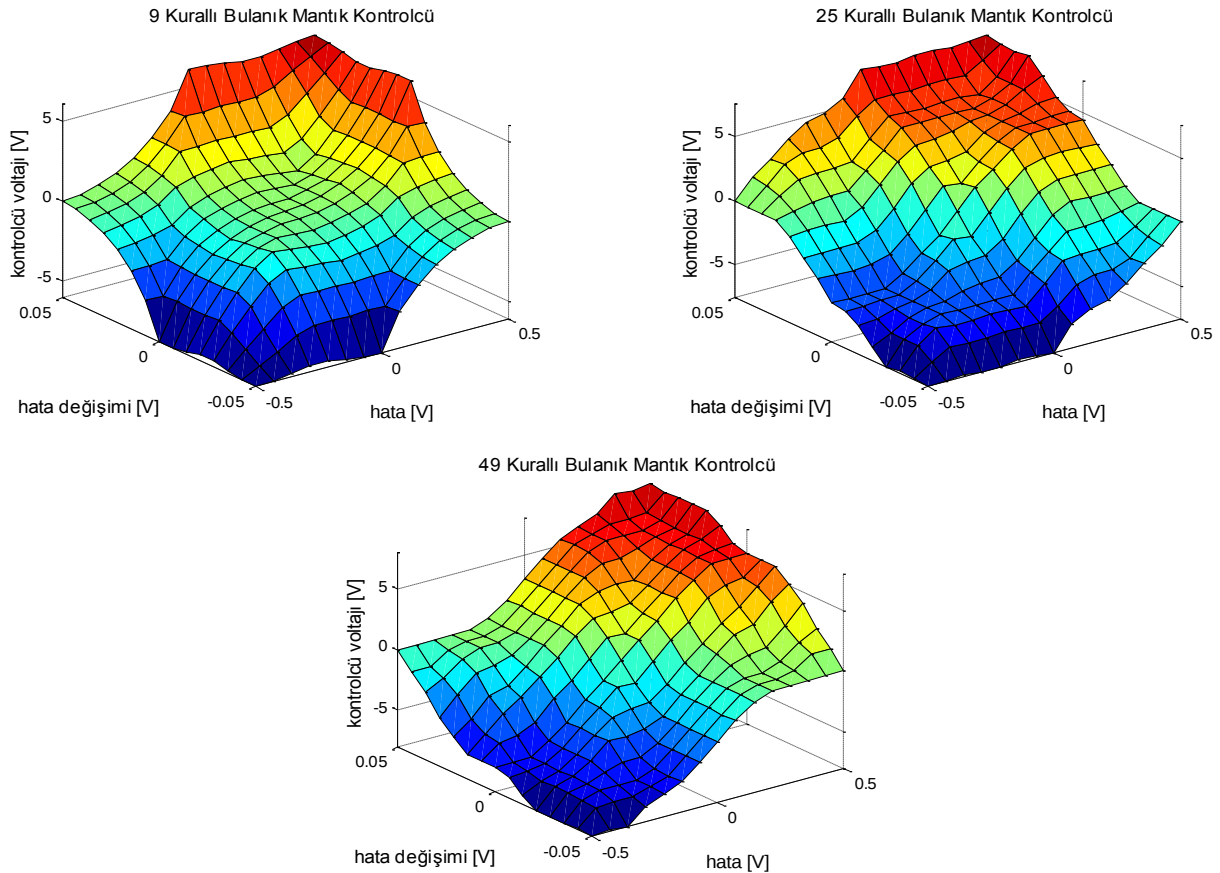
Çizelge 2: Kontrolcü Sinyali için 25 Kurallı Bulanık Mantık Kural Tablosu

hata	hata değişimi				
	NO	NK	SF	PK	PO
NO	NO	NO	NO	NK	NK
NK	NK	NK	NK	SF	SF
SF	NK	NK	SF	PK	PK
PK	SF	SF	PK	PK	PK
PO	PK	PK	PO	PO	PO

Çizelge 3: Kontrolcü Sinyali için 9 Kurallı Bulanık Mantık Kural Tablosu

hata	hata değişimi		
	NK	SF	PK
NK	NK	NK	SF
SF	NK	SF	PK
PK	SF	PK	PK

Durulaştırma bölümünde, kural işleme bölümünden gelen bulanık sonuçlar farklı metotlar kullanarak kesin sonuçlara dönüştürülür. Bu çalışmadaki her üç kontrolcünde, durulaştırma metodu olarak yaygın kullanılan ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır. Bu bölümde elde edilen kesin sonuç doğrudan kontrolcü çıktısı olarak titreşimi bastırmada kullanılacaktır.

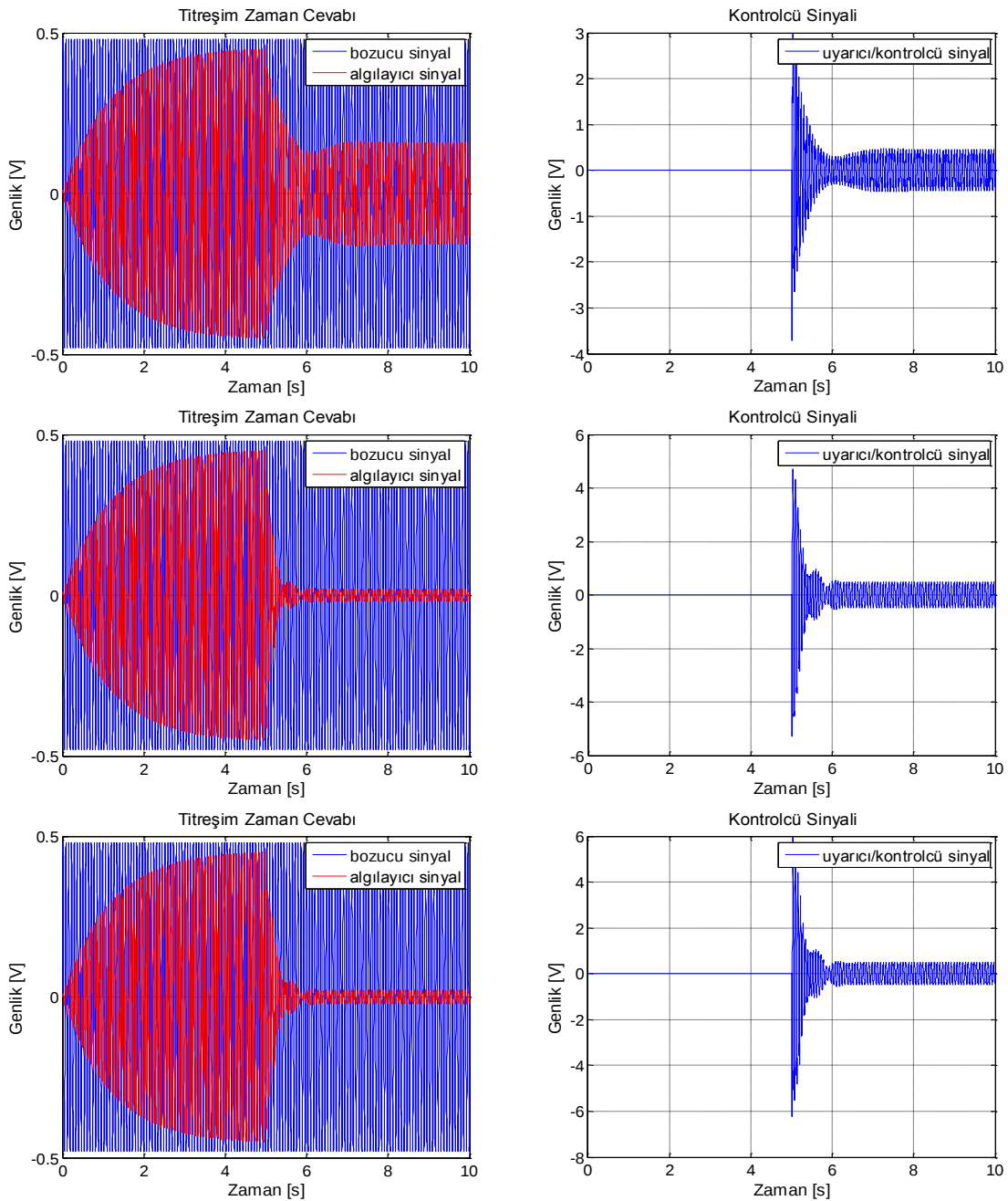


Şekil 6: 9, 25 ve 49 Kurallı Bulanık Mantık Sisteminin Yüzey Grafikleri

Hazırlanan üç farklı kontrolcünün, hata ve hata değişimi girdilerine göre kontrolcü çıktısının yüzey grafikleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Yüzey grafiklerin görünüşleri birbirine benzese de aralarında detay farklılıklar bulunmaktadır. Tüm grafiklerde, kontrolcü çıktısının pozitif büyük değeri, 0.5 hata ve 0.05 hata değişiminde yani pozitif büyük hata ve hata değişiminde oluşmaktadır. Ancak, kontrolcüdeki kural sayısını artırdığımızda bu en fazla değerin arttığını gözlemlenmiştir.

UYGULAMALAR

Çalışmada, akıllı kirişin birinci rezonans frekansı 14.38 [Hz] olarak bulunmuş ve bu frekansta 0.48 volt genliğinde sinüs sinyali bozucu PZT yama ile sistem titretilmeye başlatılmıştır. Sistem yaklaşık 4 saniye sonra kararlı durumu algılayıcı PZT yamadan ölçülen 0.45 volt genliğinde aldıktan sonra, 5. saniyeden sonra ayrı denemelerde üç farklı bulanık mantık kontrolcülerini devreye alınmıştır.



Şekil 7: Piezoelektrik Yamalardan Alınan Zamana Bağlı Cevaplar

Şekil 7’de görüldüğü üzere, üç farklı sayıda bulanık kurala sahip olan bulanık mantık kontrolcüsü, beşinci saniyede devreye girdikten sonra titreşimi 0.45 volt genliğinden daha düşük genliklere çekerek Tablo 4’teki oranlarla sönümlendirdiği gözlemlenmiştir. Titreşim sönümlemede 25 ve 49 kurallı kontrolcünün performansının 9 kurallıya göre çok başarılı olduğu görülmüştür. Kontrolcü sinyali en fazla 49 kurallı kontrolcüde tespit edilmiştir. Bu değerler kıyaslandığında en iyi performans gösteren 25 kurallı kontrolcü, 49 kurallı kontrolcünün en yüksek sinyalinden %15 daha az bir sinyal üretmektedir.

Tablo 4: Kontrolcü Tiplerinin Karşılaştırılması

Kontrolcü Tipi	En Yüksek Kontrolcü Sinyali [V]	Titreşim Sönümleme Oranı[%]
9 Kurallı	3.71	64.75
25 Kurallı	5.27	95.60
49 Kurallı	6.24	95.38

SONUÇ

Bu çalışmada üzerine piezoelektrik yamalar yapıştırılarak akıllandırılmış bir kirişin birinci rezonans frekansındaki titreşimin 9, 25 ve 49 kurallı bulanık mantık kontrolcüsü kullanarak sönümlendirilmesi kıyaslanarak gösterilmiştir. Bir ucundan sabitlenmiş kirişin birinci rezonans frekansındaki titreşimi bastırmak için basit denemelerden ve yorumlamalardan elde edilen 25 kurallı bir bulanık mantık kontrolcünün yeterli olacağı görülmüştür. Fazla sayıda kuraldan oluşan kontrolcünün performansı iyileştirmede etkili olmadığı anlaşılmıştır.

İleriki çalışma olarak, bu çalışmada en iyi performans gösteren 25 kurallı bulanık mantık kontrolcünün, kirişin serbest ucundaki kütlelerin değişik konumlarda oluşturduğu farklı sistem parametrelerindeki performansının kıyaslaması yapılabilir.

Kaynaklar

- Akın, O.2015, *Active Neuro-Adaptive Control of a Smart Beam Having Uncertainties in Structural Dynamics*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi
- Brooks, L., Moreau, D., Hansen, C., Qiu X., & Snyder S., 2012, *Active Control of Noise and Vibration*,(s.699) (Second Edition). CRC Press
- Chen, G. & Zhou, L., 2015. *Intelligent Vibration Control for High-Speed Spinning Beam Based on Fuzzy Self-Tuning PID Controller*, Shock and Vibration, vol. 2015, Article ID 617038. doi: 10.1155/2015/617038
- Onat, C., Şahin M., & Yaman, Y., 2010, *Active Vibration Suppression of a Smart Beam via PI λ D μ Control*, International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators. Antalya, Turkey.
- Onat, C., Şahin M., & Yaman, Y., 2011, *Piezoelektrik Yamalara Sahip Akıllı Bir Kirişin Titreşimlerinin Kesir Dereceli Bir Denetçi Yardımıyla Aktif Denetimi*, Mühendis ve Makina, 52(613): 52-58.
- Onat, C., Şahin M., & Yaman, Y., 2013, *Optimal Control of a Smart Beam by Using a Luenberger Observer*, 3rd International Conference of Engineering Against Failure.
- Kıyak, E., Kahvecioğlu, A., 2003, *Bulanık Mantık ve Uçuş Kontrol Problemine Uygulanması*, Havacılık ve Uzak Teknolojileri Dergisi, Cilt 1 Sayı 2, 63-72.
- Djojodihardjo, H., Jafari, M., Wiriadidjaja, S., Ahmad, K. A., 2015, *Active Vibration Suppression of an elastic piezoelectric sensor and actuator fitted cantilevered beam configurations as a generic smart composite structure*, Composite Structures, 132: 848-863.
- Lin, J., Liu, W. Z., 2006, *Experimental Evaluation of a Piezoelectric Vibration Absorber Using a Simplified Fuzzy Controller in Cantilever Beam*, Journal of Sound and Vibration, 296: 567-582.