

DAMITMA KOLONLARININ BULANIK DENETLEYİCİLERLE DENETİMİ

Halil Murat Öztürk¹, H. Levent Akın²

¹ Sistem ve Kontrol Mühendisliği Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi, 80815 Bebek, İstanbul
² Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi, 80815 Bebek, İstanbul

Özet

Bulanık denetleyicilerin, doğrusal olmayan, modellenmesi güç süreçleri denetlemede oldukça başarılı oldukları son yıllardaki uygulamalarda gösterilmiştir. Damıtma Kolonları bu tür sistemlere örnek olarak gösterilebilir. Bu çalışmada nitel modelleme ile damıtma kolonları için iki bulanık denetleyici geliştirilmiştir ve bir PI denetleyicisinden daha etkin olduğu gösterilmiştir.

1. Giriş

Damıtma kolonlarını denetimi, doğrusal olmayan yapıları ve damıtık ürünle alt ürün arasındaki etkileşim nedeniyle oldukça güçtür [1]. Bulanık denetleyicilerin, doğrusal olmayan, modellenmesi güç süreçleri denetlemede oldukça başarılı oldukları son yıllardaki uygulamalarda gösterilmiştir. Ancak bulanık denetleyicileri geliştirmenin en büyük zorluğu, bulanık kuralların ve üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasıdır. Sugeno ve Yasukawa tarafından geliştirilen *Nitel Modelleme* (Qualitative Modelling) yöntemi [2] bulanık denetleyici tasarımında göreceli olarak kolaylık sağlamaktadır. Bu çalışmada [3], bahsedilen yöntem kullanılarak Damıtma Kolonları için iki bulanık denetleyici geliştirilmiştir.

2. Damıtma Kolonu

Damıtma kolonu iki yada daha fazla sıvı karışımını, buharlaşma noktaları farkından yararlanarak ayırmak için kullanılır. İkili damıtma kolonu, bir girdi karışımına karşılık, çıktı olarak iki sıvıyı ayırır. Hafif olan, düşük kaynama noktalı ürün, damıtılmış ürün, *D*, olarak adlandırılırken; daha ağır olan ürün alt ürün, *B*, olarak adlandırılır[5].

Kolonun en önemli özelliklerinden biri zaman gecikmeli yapısıdır. Giren karışım ancak belirli bir zaman sonra damıtılmış olarak dışarı verilmektedir. Ayrıca, alt ürün kalitesi

ile damıtılmış ürün kalitesi arasında ilişki vardır. Birini kontrol etmeye çalışırken diğeri bozulabilir. İkisini birden kontrol etmek zor bir işlem olduğundan genelde ürünlerden biri denetim için seçilir.

D ve B nin istenen referans noktasına ulaşabilmesi için sisteme verilen ısı ile orantılı olarak değişen buhar akışı V ve damıtılmış ürünün kolona geri dönüş miktarı R kontrol edilir. Eğer damıtılmış ürünün kalitesi beğenilmezse, tekrar kolona geri gönderilir ve tekrar damıtılması sağlanır. Damıtma kolonunun kontrolü, kontrol değişkenleri (V,R) ve ürün arasındaki ilişki doğrusal olmadığı için, oldukça zordur. Bu zorluk nedeniyle, bir çok farklı denetleme yöntemi kullanılmaktadır.

3. Bulanık Küme ve Bulanık Mantık

Bulanık kümeler alışılmış kümelerin genellemesidir. Alışılmış kümelerde bütün üyeler kesin olarak kümenin elemanı iken, bulanık kümelerde bu durum üyelik değeri 0 ve 1 ile temsil edilir[4].

Bulanık kümelerde de geleneksel kümelerdeki gibi küme işlemleri tanımlanmıştır. Örneğin:

$$\text{Birleşim} \quad : \mu_{A+B}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad (1)$$

$$\text{Kesişim} \quad : \mu_{A*B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad (2)$$

$$\text{Değil} \quad : \mu_{\sim A}(x) = \{1 - \mu_A(x)\} \quad (3)$$

Bulanık kümele kullanarak *Nitel* bilgi temsil edilebilir. "Yüksek sıcaklık", "hızlı değişim" bu çeşit bilgilere örnektir. Bulanık kurallar ise sistem girdileri ile çıktıları arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılır. Örneğin, bu ilişki yakıt girdisi ve sıcaklık arasında şu şekilde olabilir:

$$\text{EĞER } \{ \text{Yakıt girdisi } \textit{yüksekse} \} \text{ O HALDE } \{ \text{Sıcaklık } 100^\circ\text{C} \text{ den } \textit{çok büyük olur} \} \quad (4)$$

Genel olarak, bir sistemi bulanık kurallarla temsil etmek istersek, birden fazla kural gerekir. Her bir kural, verilen girdi değeri için çıktı değeri üretir ve bütün çıktı değerlerinin bileşkesi alınır. Bu kurallar bütünü, Zadeh tarafından *bulanık algoritma* olarak adlandırılır. Bu algoritma bir sistemi modellemek için kullanılabilir.

Bulanık mantığın diğeri bir kullanım alanı ise bulanık denetleyicilerdir. Bu durumda çıktı değerlerinin kesin rakamlarla ifadesi gerekir. Bunun için bir çok *durulaştırma* metodu olmasına rağmen, en çok kullanılanı *ortalama alma* metodudur.

$$T_{çıkış} = \frac{\int \mu(T) T dT}{\int \mu(T) dT} \quad (5)$$

Bir bulanık kural kullanılarak, girdi değerinin tanımlandığı aralık dışındaki değerlerde de bir çıktı üretmesi *bulanık birleştirme* olarak adlandırılır. Bulanık birleştirme şu şekilde tanımlanabilir:

$$\mu Y(T) = \max_F \{ \min \{ \mu_X(F), \mu_R(F, T) \} \} \quad (6)$$

veya daha genel olarak

$$Y = X \circ R. \quad (7)$$

Örneğin bulanık birleştirme metodunu kullanarak, Eşitlik (4) te verilen kural örneğiyle , orta yakıt girdisi için sıcaklık çıktısı almak mümkündür.

Bulanık Denetleyiciler kullanılarak herhangi bir operatörün denetleme kuralları, bulanık kurallara aktarılabilir. Bulanık denetleyicilerde genellikle kuralların girdi değişkenleri sistem hakkında bilgi verirken, çıktı değişkenleri sistemin kontrol hareketlerini üretir. Mamdani tarafından verilen denetleyicide parametreler (kurallar, kazanç faktörleri gibi) bir araya getirilerek, girdi ve çıktı arasındaki ilişki, *Bulanık Denetleyici İlişki Tablosu* ile ifade edilir. Bu tablo kullanılarak sayısal girdi değerlerine karşılık sayısal çıktı değerleri elde edilir.

Genelde bulanık denetleyici parametreleri, deneme-yanılma yolu ile elde edilir. Önce ilk yapı oluşturulur, sonra kontrol sonuçlarına göre bu yapıda düzenlemeler yapılır. Fakat bu yöntem genelde zor ve zaman isteyen bir yöntemdir.

Dilsel yöntemde ise sistemin modeli, konuşma dilindeki ifadelerle çıkarılır. Burada bulunan kurallarla sistemi etkileyen kontrol değişkenlerinin nasıl olması gerektiğine karar verilir.

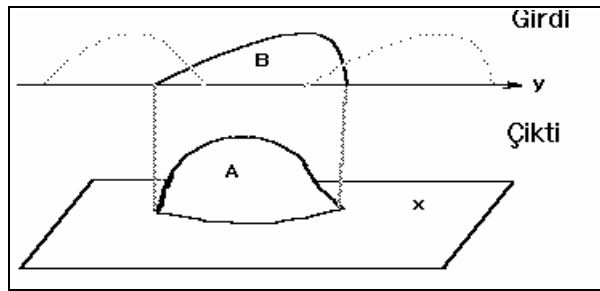
4. Nitel Modelleme

Bu yöntem, Sugeno ve Yasukawa tarafından geliştirilmiş olup elde var olan girdi-çıkı verilerini kullanarak sistemin modelinin çıkarılmasını sağlamaktadır. Bu yöntem iki adımdan oluşmaktadır:

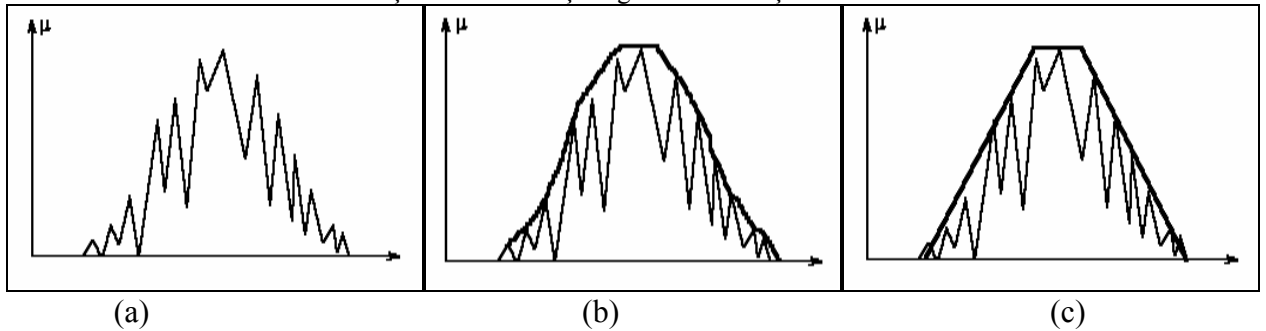
- Yapısal tanımlama ve
- Parametre tanımlaması.

Yapısal Tanımlama: Bu adımda, önce modellemede yer alacak bulanık kuralların sayısı belirlenir. Bu sayıyı bulmak için sonuç uzayı gruplara ayrılır. Gruplara ayırırken kullanılan ölçüt, sonuç değişkeninin yoğun olduğu bölgelerde bir bulanık deyim tanımlanmasıdır.

Çıkı uzayı gruplandıktan sonra, karşı gelen girdi uzayı gruplara bölünebilir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, girdi grubu A'nın x_1, x_2 eksenleri üzerindeki izdüşümü ile bulanık küme A_1 ve A_2 elde edilir.



Şekil 1 Bulanık çıkı grubunun izdüşümü



Şekil 2 Üyelik fonksiyonunun oluşturulması: (a) girdi grubu (b) benzetilen dışbükey bulanık küme (c) benzetilen yamuk bulanık küme.

Çıkı uzayının gruplara bölünmesi ile oluşan şekiller dışbükey olduğu halde, girdi uzayı gruplarının üyelik fonksiyonu, testereye daha çok benzemektedir. Bu şeklin düzeltilip yamuğa benzetilmesi gerekir (Şekil 2). Çıkı grupları zaten dışbükey oldukları için düzeltilmeleri gerekmez.

Daha sonraki aşama, sistemdeki gerçekten etkili değişkenlerin bulunmasıdır. Sistemin modeli çıkarılırken bazı değişkenlerin sistem üzerinde etkisi olup olmadığına karar verilir. Değişkenler, bir ağaç yapısı kurularak incelenir. Önce her bir değişkenin sisteme tek başına etkisi ölçülür. Değişkenler içinde en küçük farkı veren en etkili değişken olarak kabul edilir. Bir değişken bulunduktan sonra, sisteme ikinci değişken eklenir ve en küçük farkı veren ikinci değişken bulunur. Bu işlem tekrarlanır. Ne zaman fark büyümeye başlarsa işlem sona erer. Burada kullanılan ölçüt, sisteme girdi için gerçekte oluşan çıktı ve bulanık modelin verdiği çıktı arasındaki farktır.

Son olarak, *parametre tanımlama* bölümünde, oluşturulan üyelik fonksiyonlarının şeklinde değişiklik yaparak, model ile gerçek sistem arasındaki fark en küçüğe indirilmeye çalışılır.

5. Bulanık Denetleyici Geliştirilmesi

Bulanık denetleyiciyi geliştirebilmek için ilk aşama, kontrol değişkenleri ile sistemin durumunu gösteren değişkenler arasında ilişki kurabilmektir. Bu amaç için, daha önce bahsedildiği gibi Sugeno ve Yasukawa'nin niteliksel modellemesi kullanılmıştır.

5.1. Veri Kümesi Üretilmesi

İlk önce, denetleyiciye kontrol hareketlerini aktarabilmek için PI denetleyicisinin benzetimi kullanıldı. Damıtma kolonunda, V ve R kontrol değişkenleri PI ile kontrol edilmiş, kolonun durumunu gösteren on beş ölçülebilir değişken o anki t değerinden on dört adım geriye kadar sonraki aşamaya aktarılmıştır. Bu şekilde, kontrol değeri ile geçmiş sistem değerleri arasına da ilişki olabileceği göz önüne alınmıştır.

Bir sonraki bölüm için yaklaşık 160 örnekleme yapılmış ve bu örnekleme sırasında düzensizlik nedeni olarak z (giren karışımın oranı) önce 0.50 ten 0.70'e sonra da 0.30'a değiştirilmiştir.

Burada PI denetleyicisinin kullanılması zorunlu değildir. Aksine, rasgele kontrol değerlerinin kullanılması tercih edilir. Fakat, bu durumda bu kontrol değerlerinden bir kısmı Bulanık Denetleyici'yi oluşturmak için kullanılmalıdır. Bu kontrol değerlerinin alternatifleri arasında en iyi sonucu veren olması gerekir. Bunun içinde milyonlarca deneme yapma gerekebilir.

5.2. Üyelik Fonksiyonlarının Oluşturulması

Daha sonraki aşamada, bu veriler kullanılarak bulanık denetleyicinin kural sayısı tespit edilmiş ve çıktı uzayı gruplara ayrılmıştır. Bu aşamada ortaya çıkan problemlerden birisi farklı aralıktaki değişkenlerin aynı program tarafından ele alınma zorunluluğudur. Örneğin, *Hata* değişkeni, *EB*, [-0.50,0.50] aralığında yer alırken, *V* değişkeni [150,202] aralığındadır. Bu nedenle bütün değişkenler [0,2] aralığına doğrusal olarak aktarılmıştır¹.

Bu örnek için *altı* adet kural oluşturulmuştur. Fakat denetleyicinin geliştirilmesi sırasında en büyük sorun değişkenlerin üyelik fonksiyonlarının testere biçiminde olmasıdır. Bu değişkenlerin tek tek düzeltilmesi oldukça zordur ve her deneme için yaklaşık 180 değişkenin düzeltilmesi gerekmektedir. Bunun yerine, aşağıdaki yöntem geliştirilmiştir:

$Değ_n$ değişkeni üzerindeki her x_n noktası için, komşuları arasına en yüksek üyeliğe sahip noktanın üyeliği kabul edilmiştir. Matematiksel olarak temsil edersek:

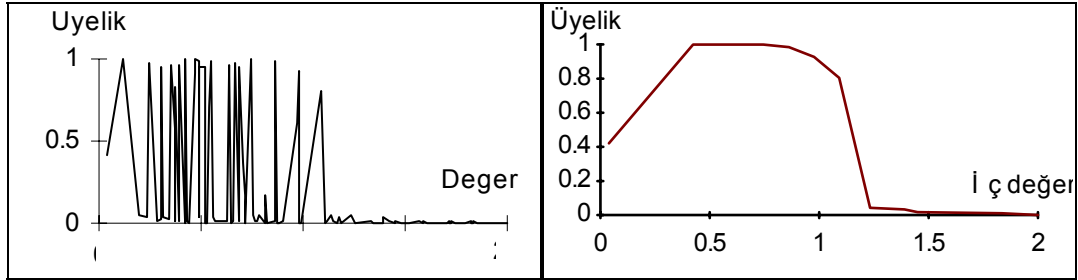
$$\underline{\mu}(x_n) = \max (\mu(\eta(x_n))) \quad (9)$$

burada

$$\eta(x_n) = [x_n - \underline{m} * L(x_n), x_n + \underline{m} * L(x_n)] \quad (10)$$

$$L(x_n) = \mathbf{max}(x_n) - \mathbf{min}(x_n). \quad (11)$$

\underline{m} ise 0 ile 1 arasında bir parametredir.



Şekil 3 D(t-11) Girdi Değişkeninin üyelik fonksiyonunun düzenlenmesi.

Şekil 3, bu düzeltmenin bu yöntemle yapılmasını göstermektedir. Bu örnekte m 0.20 olarak seçilmiştir.

¹Bulanık modellemede kullanılan değişkenlerin listesi EK A da verilmiştir.

5.3. Kural Tabanının Oluşturulması

Üyelik fonksiyonlarında belirlendikten sonra, bulanık kurallar, sistemin denetlenmesini etkileyebilecek bütün değişkenleri içerirler ve bunlar arasından gerçekten sistemi denetlemede kullanılabilecek değişkenlerin seçilmesi gerekir.

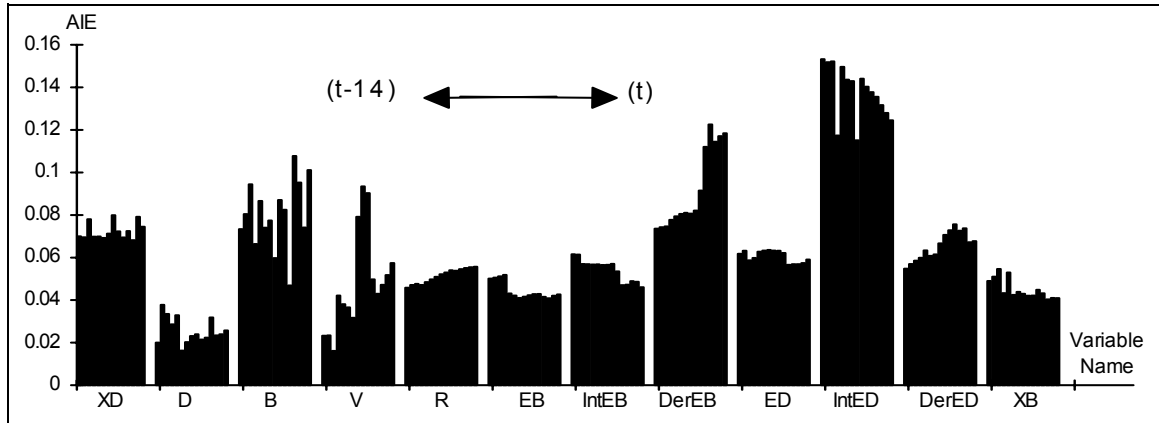
Bulanık kurallarımızda girdi bölümü, sistemin o anki ve daha önceki ölçülebilir değerleridir. Çıktısı ise $V(t+1)$ kontrol değeridir. Alt ürünün kontrolü bulanık denetleyici ile yapılırken, damıtık ürünün kontrolü PI denetleyicisi ile yapılmaktadır.

Aslında bu aşamada etkili değişkenleri bulmak demek, V çıktı uzayı ile Deg_n girdi uzayı arasında bir ilişki kurmak demektir. Bu ilişki kurulduğunda, kontrol değişkeni Deg_n 'e göre ayarlanabilir. Mamdani'nin denetleyicisi gibi yalnızca *Hata* ve *Hatanın değişimine* bakmak yerine bu sistemi etkileyebilecek bütün değişkenlere göre kontrol daha başarılı olabilir. Referanstan sapma gerçekte başka nedenlerden kaynaklanabilir ve denetleyicinin bu nedenlere bakarak karar verebilmesi kontrol işlemini güçlendirir ve basitleştirir. Bu yüzden, bu yöntem aslında geniş uygulama alanına sahiptir.

V çıktı değişkeni ile Deg_n girdi değişkeni arasındaki ilişki, denetleyicinin yalnızca bu değişkenlerin varlığındaki başarısı ile kontrol edilir. Kurulan denetleyici, benzetimi kontrol etmeye çalışır. Başarı ölçütü *AIE* (*Mutlak Hata Toplamı*) dir. Damıtık ve alt ürün için *AIE*'yi yazarsak:

$$AIE = \sum_{t=0}^{t_1} |RN - x(t)| \quad (12)$$

Burada, RN referans noktası olup alt ürün için 0.02 ve Damıtık için 0.98 dir.



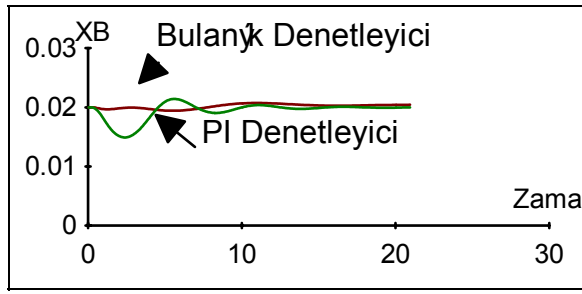
Şekil 4 . $z=0.40$ için her değişkenin tek başına yarattığı AIE_B değerleri.

Yapılan denemelerde önce düzensizlik kaynağı olarak $z=0.40$ seçilmiştir. Bu düzensizlik için on dakikalık AIE_B değerleri Şekil 4'de verilmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi en küçük AIE_B değeri $V(t-12)$ değişkeni ile elde edilmiştir. Fakat girdi değişkeni olarak $V(t-12)$ yi seçmek, kontrol hareketlerimizin her zaman $V(0)$ ' a bağımlı kılabilir. Daha sonraki etkili değişken $D(t-9)$ ' dur ve ürettiği *Mutlak Hata Toplamları*, PI denetleyicisinden daha iyidir. $D(t-9)$ etkili değişken olarak bulunduktan sonra, diğer etkili değişkenler $V(t-7)$ ve $V(t-1)$ olarak bulunur (Bkz. Tablo 1). Bulanık kuralların listesi EK B de verilmiştir.

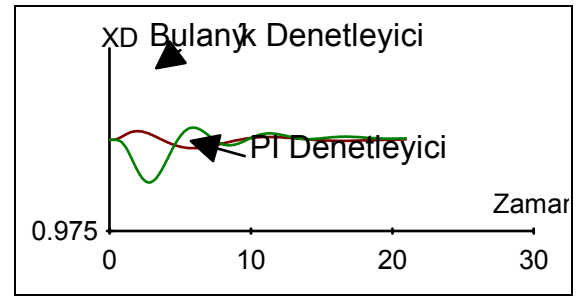
Tablo 1. Bulanık Denetleyici ve PI denetleyicilerin karşılaştırılması.

Denetleyici	AIE_B	AIE_D
PI	0.016793	0.007013
$D(t-9)$	0.016303	0.007810
$D(t-9), V(t-7), V(t-1)$	0.003002	0.002129

Şekil 5 ve Şekil 6 da sistemin bulanık denetleyici ile kontrolünün sonuçları görülmektedir.



Şekil 5. Alt ürünün $D(t-9), V(t-7), V(t-1)$ değişkenleri ile kontrolü. ($z=0.40$)

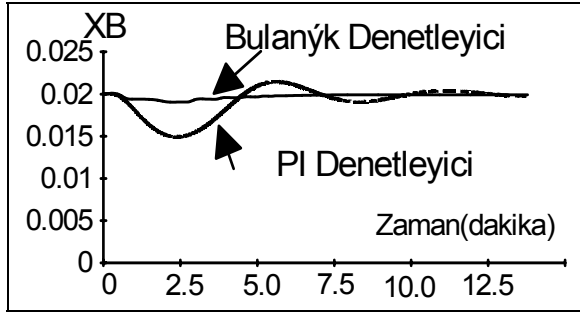


Şekil 6. Alt ürünün bulanık kontrolü.

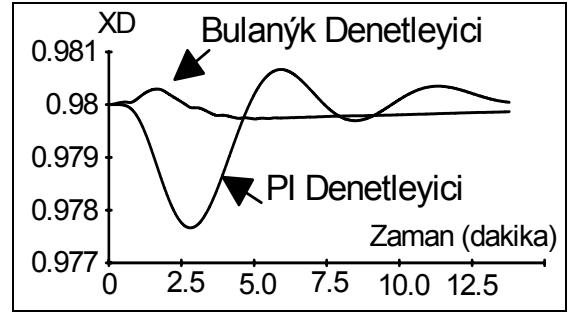
Kurulan bir başka denetleyici şekli ise Mamdani'nin denetleyicisine benzemektedir. Burada yalnızca *Hata* değeri, EB , kullanılmakta ve daha önce yaratılan bulanık kurullarla uygulanmaktadır. Önceki kontrolden farklı olarak hata değeri bir *Kazanç Faktörü* ile çarpılmakta, daha sonra denetleyici çıktısı bulunmaktadır. Matematiksel olarak gösterirsek:

$$\mu_{yeni}(EB_i) = \mu(EB_i * KF) \quad (13)$$

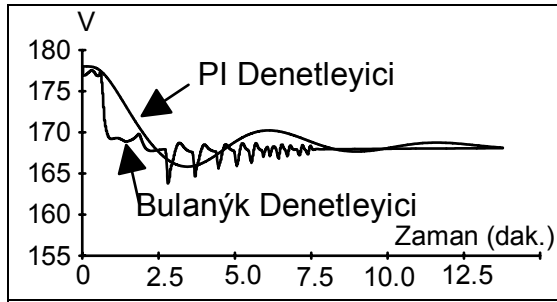
Kazanç faktörü önce 10 olarak seçildi. Daha sonra, sistem durağan çıktı değerine ulaşıncaya dışardan arttırıldı. Bu tarz kontrol $z=0.40$ düzensizlik olarak seçildi. Şekil. 8-10.de de görülebileceği gibi, bulanık denetleyici oldukça başarılı oldu.



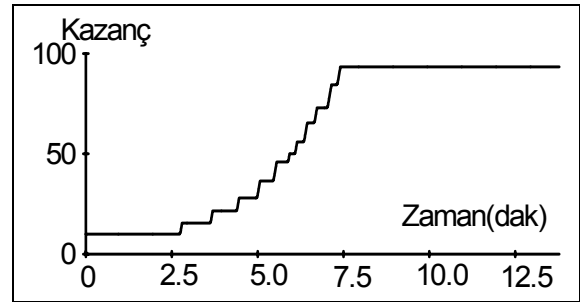
Şekil 7. Alt ürünün (Hata * Kazanç Faktörü) değişkeni ile denetimi ($z=0.40$).



Şekil 8. Alt ürünün $z=0.40$ için (Hata * Kazanç Faktörü) ile denetimi



Şekil 9. $z=0.40$ için kullanılan $V(t+1)$ kontrol değişkeni değerleri



Şekil 10. $z=0.40$ için kullanılan Kazanç Faktörünün değişimi

6. Sonuç

Damıtma kolonlarını denetimi, doğrusal olmayan yapıları ve damıtık ürünle alt ürün arasındaki etkileşim nedeniyle oldukça güçtür. Bu çalışmada iki tür bulanık denetleyici geliştirilmiştir. Birinci türde sistemin ölçülebilir değişkenleri ile $V(t+1)$ arasında bir ilişki kurmaya çalışılmış ve $z=0.40$ için oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır. İkinci denetleyici Mamdani'nin denetleyicisine daha fazla benzemektedir. Burada kullandığımız KF dışarıdan elle değiştirilmekle birlikte, algoritması oldukça basittir ve bir bulanık kurallar bileşkesi olarak ifade edilebilir.

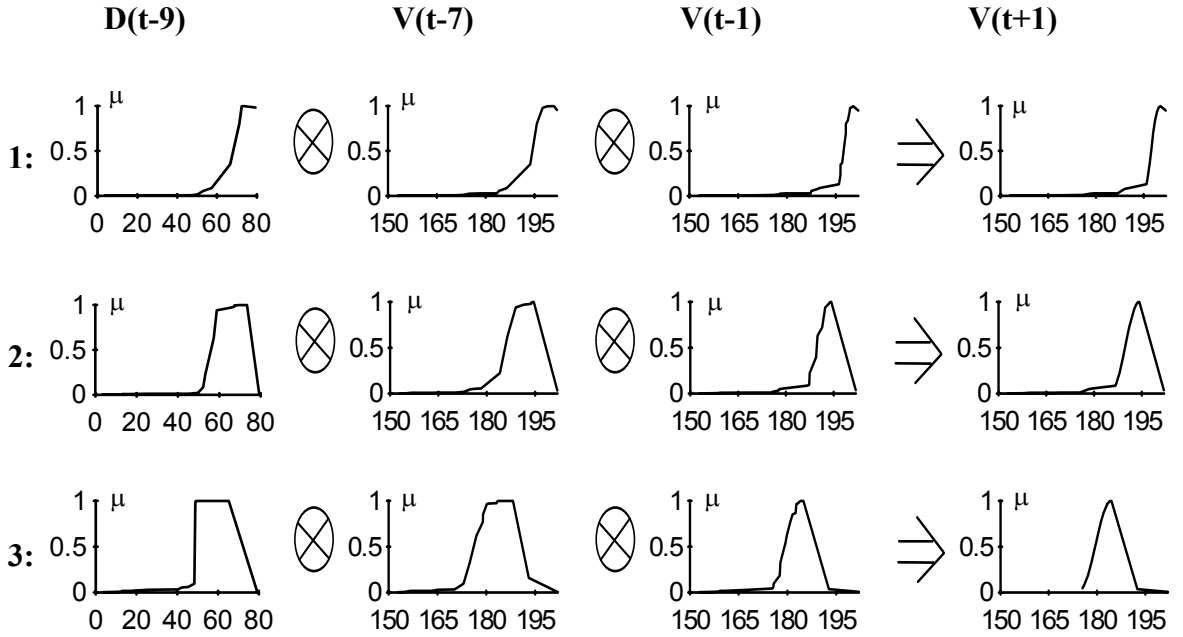
Damıtma kolonlarının en önemli sorunlarından biri Damıtık ve Alt ürün kalitelerinin birbirine bağlı olmasıdır. Bu nedenle ikisinin aynı anda kontrolü oldukça zordur. Bu sorunu aşmak için, çıktı uzayını iki boyutlu seçip ($V(t+1)$ ve $R(t+1)$), iki boyutlu bir gruplamaya gidilirse, her iki üründe kontrol edebilen tek bir bulanık denetleyici elde edilebilir.

EK A: Bulanık modelleme için üretilen değişkenlerin listesi.

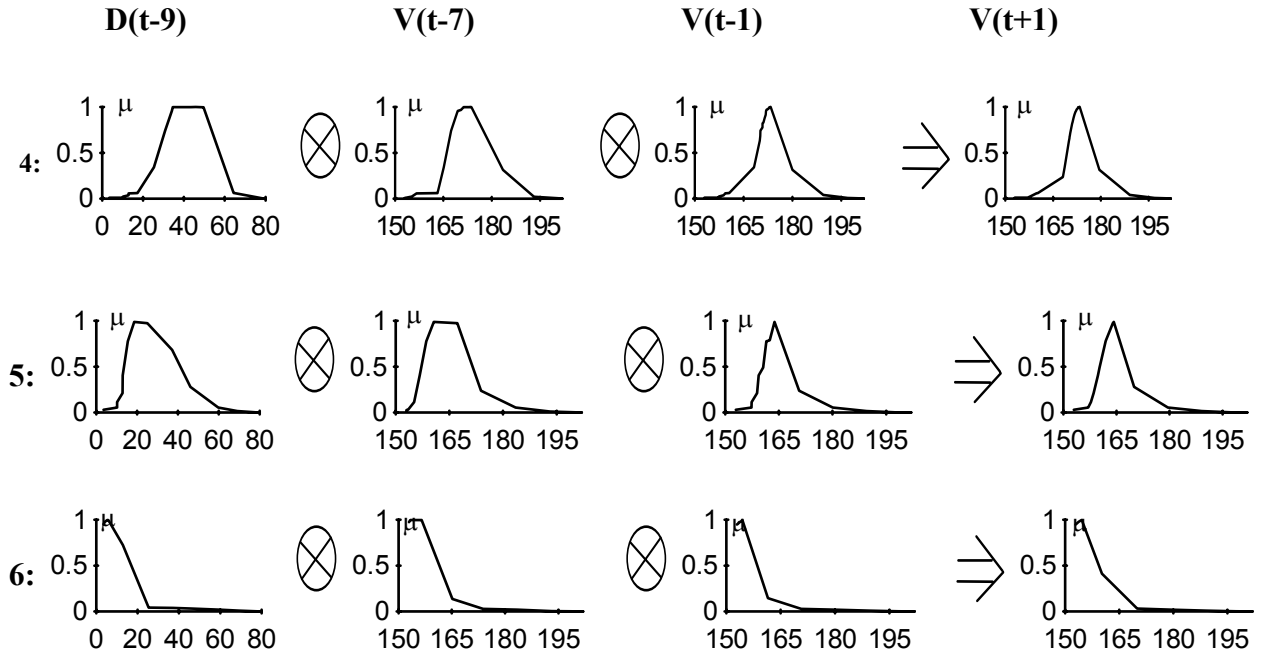
XD	Damıtığın içeriği (oran cinsinden)
XB	Alt ürünün içeriği
V	Kontrol edilen buhar akışı
R	Kontrol edilen Damıtığın geri aktarılan kısmının akış miktarı
F	Giren karışımın akışı
Z	Giren karışımın oranı
B	Alt ürünün akış miktarı
D	Damıtığın çıkış miktarı
EB	Alt ürünün referans noktasından sapma miktarı (Hata miktarı)
IntEB	Alt ürünün hatasının integrali
DerEB	Alt ürünün hatasının türevi
ED	Damıtığın referans noktasından sapma miktarı (Hata miktarı)
IntED	Damıtığın hatasının integrali
DerED	Damıtığın hatasının türevi
V(t+1)	t anında üretilen V için kontrol çıktısı.

EK B: Bulanık Kural Listesi

Aşağıda en iyi sonucu veren değişkenin kullanıldığı denetim sonucunda elde edilen bulanık kuralları görebilirsiniz. V(t-7), V(t-1) ve V(t+1) arasındaki benzerlik yöntemimizin başarılı olduğunu göstermektedir. V(t+1) çıktı uzayının parçalanması ile elde edilmişken, V(t-7), V(t-1), izdüşüm ile bulunmuştur.

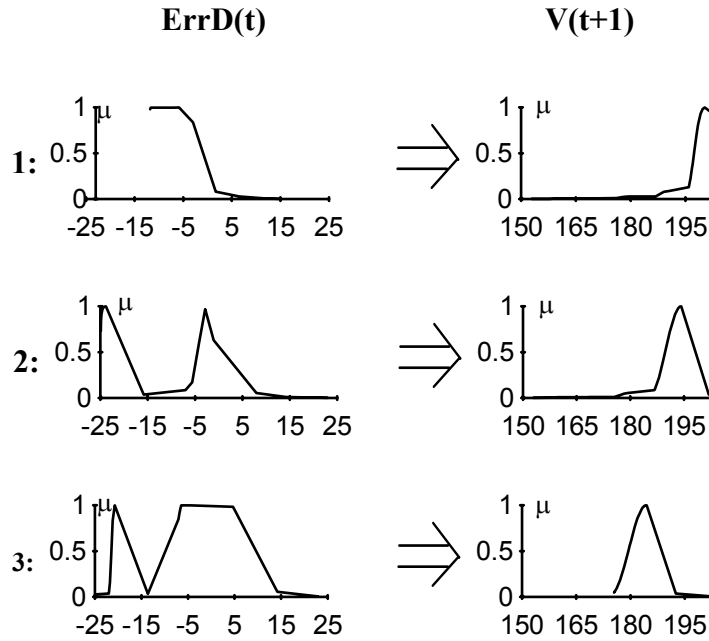


Şekil 11. En iyi denetim sonucunu veren değişkenlerin kural listesi.

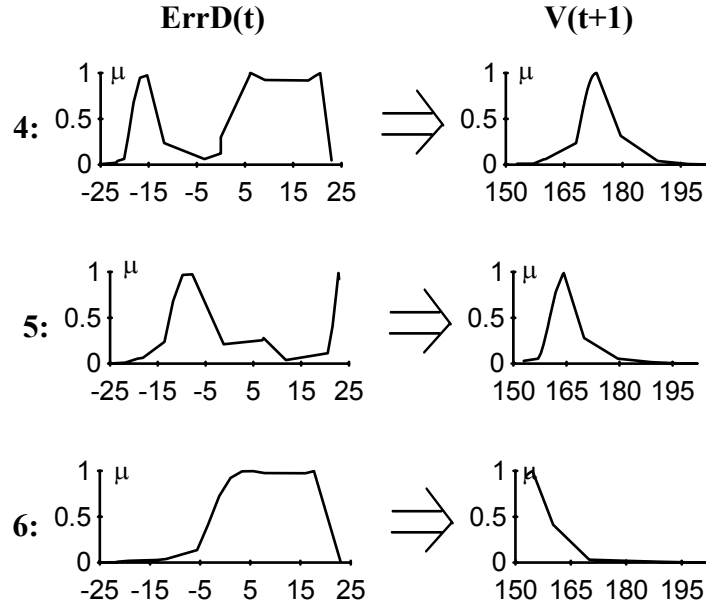


Şekil 11. En iyi denetim sonucunu veren değişkenlerin kural listesi (devam).

Aşağıda hata miktarıyla yapılan denetim sonucunda elde edilen bulanık kuralları verilmiştir. Bu kurallar ErrXB(t) değişkeni ve V(t+1) denetleyici çıktısından oluşmaktadır. Bu değişkenlerin üyelik fonksiyonları üzerinde biraz düzgünleştirmeye ihtiyaç vardır.



Şekil 12. Hata miktarı ve kazanç faktörüyle denetimde kural listesi.



Şekil 12. Hata miktarı ve kazanç faktörüyle denetimde kural listesi (devam).

Kaynaklar

- [1] R. K. WOOD and M. W. Berry, "Terminal Composition Control of Binary Distillation Column," *Chemical Engineering Science*, Vol. 28, pp.1707-1717., 1973.
- [2] M.SUGENO, T.YASUKAWA, " A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitative Modelling", *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, Vol:1, No:1, February 1993.
- [3] H. M. ÖZTÜRK, "Development of a Fuzzy Logic Controller for a Distillation Column," M.Sc. Thesis, Boğaziçi University, 1995.
- [4] R.M.TONG "A Control Engineering Review of Fuzzy Systems", *Automatica*, Vol:13, pp:559-569, Pergaman Press,1977
- [5] William L. LUYBEN, *Process Modelling, Simulation and Control For Chemical Engineers*, McGraw-Hill Book Company,1973, USA, Second Edition.