

# bir damıtma kulesinde üretim sürecinin eniyilenmesi ve tümleşik denetim

Kudret YURTSEVEN

UDK: 621-52 : 66.048

## ÖZET

Bu bildiri, bir küme ürünün bir damıtma kulesinde en iyi koşullarda üretilmesi problemi ele almaktadır. Matematiksel anlamda en iyi çözüm "olana dışı" dır. Bu nedenle problem, "üretimi sıraya dizme", "kararlı durum eniyilenmesi" ve "rastlansal uyarlamalı denetim" alt problemlerine bölünmektedir. Bu alt problemlerin çözümleri ana çizgileriyle sunulmakta ve geliştirilen "tümleşik denetim sistemi" nin yapısı tartışılmaktadır.

## SUMMARY

This paper is concerned with the optimal production of a group of batches on a distillation column. Due to the "impossibility" of finding an optimum solution, the problem is partitioned into the subproblems of "scheduling of production", "steady-state optimization" and "stochastic adaptive control". The Solutions of these subproblems are presented in general terms, and the structure of the developed "integrated control system" is discussed.

## 1. GİRİŞ

Bir endüstriyel sistemde üretim denetimi denilince, saptanan üretim hedeflerini gerçekleştirmek için sistemdeki hammadde, insan gücü ve makinelerin en iyi biçimde kullanımı anlaşılmaktadır.

M.K. Yurtseven, Dr., Hacettepe Üniversitesi  
İstatistik Bölümü

Bu çerçevenin içinde pazar çözümlenmeleri, envanter denetimi, üretim planlaması, çizelgeleme (*scheduling*), işletim denetimi (*operations control*), kalite sınamaları, depolama ve bu gibi konular yer almaktadır. Böylesine karmaşık bir problem bir bütün olarak ve matematiksel anlamda en iyi çözüm bulunamaz. Güçlük, problemin matematiksel bir biçimde tanımlanmasından gelmemektedir; kuramsal düzeyde modellemeden hatta çözümden söz edilebilir [1]. Ancak, somut olarak çözüm, en büyük bilgisayarlarla bile bulunamaz.

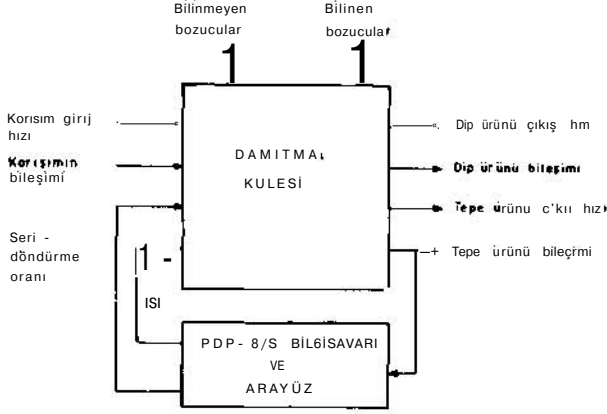
Üretim denetimine benzer karmaşıklıkta problemere çözüm, genel sistem yaklaşımı içinde, Çok Düzeyli Denetim (*Multilevel Control*) teknikleriyle bulunabilir [2]. Bu konudaki en ilginç örneklerden biri Haalman ve diğerlerinin bir petrokimyasal süreç (*process*) te kazancın en büyüklmesi için kurdukları denetim sistemidir [3]. Miller'in yaptığı bir çalışmada da, bir çelik fabrikasında siparişlerden malların teslimine kadar bilgisayarlarla özdevinsel denetim sunulmaktadır [4]. Diğer bir uygulama ise, bir enterkonnekte sistemde bölgesel ve merkezi bilgisayarlar yardımıyla elektrik enerjisi üretimi maliyetinin enazlanmasıdır [5].

Endüstriyel süreçlerde üretim denetimi aslında problemin zaman boyutunda da parçalanmasını içermektedir. İşin bu yönünü vurgulayan Milkievicz, Çok Düzeyli-Çok Ufuklu Üretim Denetimi (*Multilevel-Multihorizon Production Control*) teknikleri adıyla bir yaklaşım geliştirmiştir [1]. Bu bildirinin konusu olan problemin çözümünde sözü geçen yaklaşımdan yararlanılmaktadır. Çalışma deneysel bir süreç üzerinde yapıldığından, eniyileme problemi teknik bir düzeyde ele alınmaktadır. Bir başka deyişle, kurulan denetim sistemi işletmecilik düzeyini içermemektedir. Ancak, işletmecilik düzeyinden teknik düzeye olabilecek müdahaleleri gözönüne alan bir tasarım geliştirilerek, endüstride uygulama olanakları araştırılmaktadır.

## 2. DAMITMA KULESİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

incelenen süreç su ve etanol ikili (*binazy*) karışımını damtan pilot ölçekte bir kuledir [ö]. Kuleye düşük etanol yüzdeli (hacimsal olarak % 10-20 dolaylarında) bir karışım beslenmekte, çıkışta yüksek etanol yüzdeli (hacimsal olarak % 60-80 dolaylarında) ürün elde edilmektedir. Dip kaynağıyla buharlaştırılan ve tepeye çıkan karışım, soğutucudan geçtikten sonra bir geri-döndürme düzenine (*reflux mechanism*) gelmektedir. Bu düzen, belirli bir zaman döneminin bir bölümünde karışımı dışarıya ürün olarak vermekte, diğer bölümünde ise kuleye geri beslemektedir.

Sürecin bir öbek çizimi Şekil 1'de görülmektedir. Kuleye beslenen karışımın bileşimi ve giriş hızı önceden saptanmakta ve üretim süresince değiştirilmemektedir. Buna karşın ısı girdisi ve geridöndürme oranı (*reflux ratio*), bir PDP-8/S bilgisayarı ve arayüz (*interface*) kanalıyla, tepe ürün bileşiminin çevrim-içi (*on-line*) denetiminde kullanılmaktadır. Tepe ürün çıkış hızını, dip ürün bileşimi ve çıkış hızını doğrudan denetim olanağı yoktur. Süreçteki bilinmeyen bozucular (*disturbances*), beslenen karışımın yüzdesindeki yada giriş hızındaki istenmeyen değişimlerden, sürece



Şekil 1. Kulenin bir öbek çizimi.

özgü gürültüden (*process noise*), ölçmedeki gürültüden (*measurement noise*) ve çevre ısısındaki değişmelerden kaynaklanmaktadır. Bilinen bozucular ise kuleye beslenen karışımın yüzdesi ve giriş hızındaki istenen kalıcı (*step*) değişmelerle, işletmecilik katından gelen ekonomik kaynaklı müdahaleleri içermektedir.

### 3. SİSTEMİN ÇÖZÜMLENMESİ

#### 3.1. Problemin Tanıtımı

Buradaki denetim sistemi tasarımıdan amaç, özellikleri belli bir küme ürünün en kazançlı biçimde üretilmesidir. İlk bakışta problemin iki bileşeni olduğu göze çarpmaktadır:

- Üretim sırasının saptanması,
- Üretim boyunca kule girdi ve çıktılarının izleyecekleri yörüngelerin (*trajectory*) hesaplanması.

Aslında birbirinin içine geçmiş bu iki problemden birincisini bir an için yok sayarsak, ikinci problem için en doğal çözüm şu olabilir: yörüngelerin, üretim süresince kuleyi tam sığada çalıştıracak biçimde-saptanması. Ancak kuleğin donanımı böyle bir çözümü engellemektedir [6]. Ayrıca bu tür bir çözüm kulenin kararsız durumda (*unsteady state*) çalışmasını gerektirmektedir. Böylesine bir yol, özellikleri doğrusal olmaktan çok uzak olan damıtma süreci için çok karmaşık modelleme ve eniyileme tekniklerinin kullanılması demektir. Sonuç olarak, yukarıdaki iki neden, üretimin kararlı durumda (*steady-state*) yapılması koşulunu belirlemektedir. Bunun dışında, aşağıdaki varsayımlar problemin çerçevesini daha belirgin duruma sokmaktadır:

- Ürünlerin özelliklerini kule tepesinden alınan karışımın bileşimi ve hacmi belirlemektedir. Kule dibinden çıkan (yaklaşık) damıtık su, sisteme geri beslendiğinden, ne ürün ne de kayıptır. Dip-ürünün bileşimi doğrudan denetlenmemekte, ancak belirli sınırlar içinde kalması istenmektedir.
- Eniyileme işlemi özellikleri belli bir küme üzerinde yapılmakta ve bunlar bitmeden başka üretim düşünülmemektedir.

3) Kule sürekli olarak üretime hazırdır.

4) Ürünlerin bitiriliş zamanlarına ilişkin koşullar konulmamıştır.

#### 3.2. Problemin Parçalanması

Parçalama işlemi, Milkiewicz'in ortaya koyduğu "Çok Düzeyli-Çok Ufuklu Üretim Denetimi Teknikleri"ne [1] dayanarak yapılmaktadır. İşlemin felsefesi, ana problemi hem denetim vektörü uzayında hem de zaman boyutunda çözülebilir parçalara ayırmaktadır. Her zaman bölümü için değişik denetim ve durum vektörlü ve defişik duyarlılık matematiksel modeller kurulmaktadır. Modeller uzun zaman bölümleri için basit olup, zaman bölümleri kısaltıkça karmaşıklaşmaktadır. Öncelikle en uzun zaman bölümü için çözüm bulunmakta ve sonuçlar ondan sonraki zaman bölümü için kullanılmaktadır. Böylece, en küçük zaman bölümüne kadar olan problemler sırayla çözülmektedir. Doğal olarak bu denetim politikası, çok düzeyli bir karar hiyerarşisi yardımıyla uygulamaya sokulmaktadır.

Eldeki problem, yukarıdaki yaklaşımla zaman boyutunda şu şekilde parçalanmıştır:

- Kümedeki tüm ürünler için üretim planlaması (süre olarak 1-2 hafta),
- Bir ürün için planlama ve denetim (süre olarak bir saat ile bir gün arası),
- Damıtma kulesinin döngü-içi denetimi (süre olarak bir saatin altında).

Denetim vektörü uzayındaki parçalama ise şöyledir:

Düzye II- Üretimi Planlama Düzye

Aradüzye 2- Kararlı durum üretim sürecinin eniyilenmesi

Aradüzye 1- Üretimin sıraya dizilmesi

Düzye I- üretim Faaliyetini Eniyileme Düzye

Aradüzye 2- Üretimin istenen kalite ve miktarda yapılması

Aradüzye 1- Kulenin yukarıda saptanan çalışma noktasına getirilmesi ve o noktada kararlı üretim (çevrim-içi).

Buna göre en uzun zaman bölümüne ilişkin problemler, iki alt düzey olarak, Düzye II'de ele alınmakta, ikinci ve üçüncü zaman aralıklarına ilişkin problemler ise yine iki aradüzye yardımıyla Düzye I'de çözülmektedir. Düzye II planlamanın, Düzye I ise gerçek üretimin yapıldığı yer olmasıdır.

### 4. DENETİM SİSTEMİNİN TASARIMI

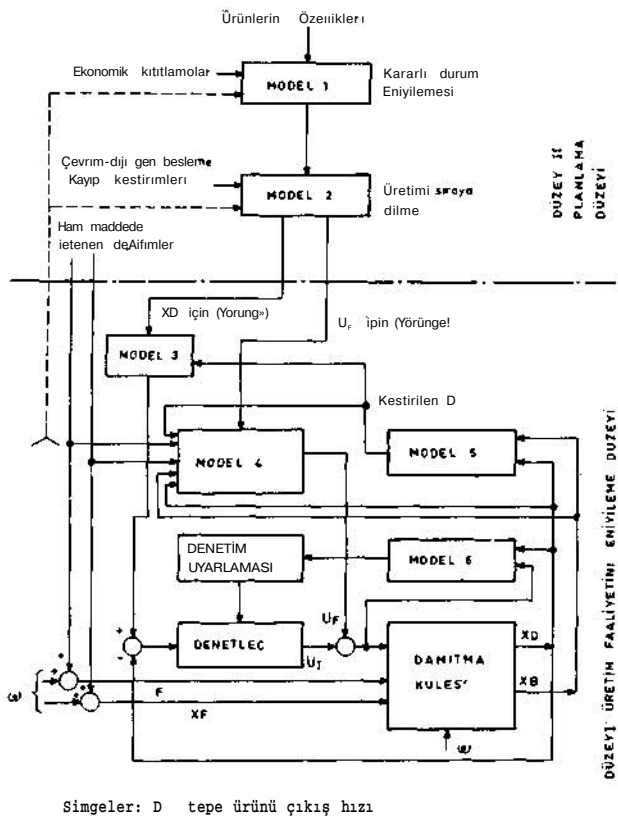
Bölüm 3'deki çözümlerden çıkan sonuç şu üç alt problemde özetlenebilir:

- Kümedeki tüm ürünler için eniyi kararlı durum üretim koşullarının saptanması.
- Üretimin sıraya dizilmesi ve bu şekilde ürünler arası geçişlerden kaynaklanan toplam üretim kaybının en düşük düzeyde tutulması.
- Kule çıkışının (tepe ürünü bileşimi) istenen düzeyde tutulması ve çalışma noktası değişiminin en düşük maliyetle yapılması için çevrim-içi denetim.

Dikkat edilecek olursa, yukarıdaki üç alt problemin çözümlerinin bütünleştirilmesi, başta belir-

tilen "üretim süresince elde edilecek kazancın ençoklanması" amacına ikinci dereceden eniyi bir yanıt getirmektedir.

Öngörülen tümleşik denetim sistemi Şekil 2'de görülmektedir. Model 1 yardımıyla tüm ürünler için en iyi kararlı durum üretim koşulları ve üretim süreleri hesaplanmaktadır. Model 2'de ise üretim sırası saptanarak denetim vektörü ( $U_p$ ) ve tepe ürünü bileşimi (XD) yörüngeleri PDP-8/S bilgisayarına aktarılmaktadır. Düzey II'deki işlemler bütünüyle çevrim-dışı (*off-line*) yapılmakta, Düzey I'de ise hem çevrim-dışı hem de çevrim-içi yöntemler kullanılmaktadır. Model 3 hangi ürünün kuleye ne zaman yüklenip bitirileceğine ilişkin zamanlamayı yapan işlemsel (*procedural*) niteliktedir. Model 4 ise ön-beslemeli denetim (*feed-forward control*) için düşünülmüştür. Bu model yardımıyla şu durumlarda sürece yeni bir çalışma noktası seçilmektedir: (i) ham maddenin bileşimi ya da giriş hızında değişiklik yapıldığında, (ii) dip ürününün değeri daha önceden belirlenen sınırları aştığında, (iii) o andaki çalışma noktasından daha ekonomik bir noktaya gelme olasılığı belirdiğinde [6]. Model 5, tepe ürünü çıkış hızının doğrudan ölçülebilmesi nedeniyle, eldeki ölçülerden bu değişkenin kestirimini yapmaktadır [6]. Model 6, "Denetim Uyarlaması" ve "Denetleç" öğeleri de



Şekil 2. Tümleşik denetim sistemi.

rastlansal uyarlamalı denetimi gerçekleştirmektedirler.

Aşağıdaki bölümlerde, tasarımdaki üç önemli problemin çözümü ve tümleşik denetim sorunu daha ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

#### 4.1. Kararlı Durum Eniyilemesi

Burada, sürecin fiziko-kimyasal ayrıntılarına girmeden, bir ekonomik işletme modeli (*operating economic model*) kurulmuştur. Süreç ekonomisini belirleyen ana değişkenler seçilerek bunlar ham maddenin bileşimi ve giriş hızı, ısı girdisi, tepe ürününün bileşimi ve çıkış hızı olmaktadır. Bir marjinal kazanç işlevi oluşturulmuştur. Değişkenler arasındaki matematiksel bağıntıları, süreci çeşitli çalışma noktalarında temsil eden duruk (statik) özellikler oluşturmaktadır. Bunlara fiziksel-ekonomik kısıtlar da eklenerek doğrusal olmayan bir matematiksel programlama problemi elde edilmiştir. Problem bir "Doğrudan Araştırma (*Direct Search*)" algoritmasıyla çözülmektedir. Benzetimle alınan sonuçlar, sürecin doğrusal olmama özelliklerinin ihmal edilebilir olduğunu -salt bu düzeydeki modelleme açısından- göstermektedir. Çözüm bir doğrusal programlama probleminde olduğu gibi kısıtların sınırında çıkmaktadır; en çok kazanç en çok üretimle olmaktadır. Kuleye beslenen karışımın bileşimi ve giriş hızı tüm üretim süresince aynı olacağından, çözüm kümedeki ürünlerin hepsi için bir anda bulunmaktadır. Yukarıdaki sözü geçen "doğrusallığın" sonucu, üretim hızındaki kısıtlamayı bileşimi en düşük ürün belirlemede ve problem basitleşmektedir [6,7],

#### 4.2. Üretimin Sıraya Dizilmesi

Sıralama işleminin, özellikleri belirli bir kime ürün üzerinde yapılması problemi duruklaşmaktadır. Bu nedenle çözüm de oldukça kolaydır. Ancak sürecin doğrusal olmama özellikleri, geçiş kayıplarının niteliklerini katı bir şekilde üretim sırasına bağlı kılmaktadır. Duruk sıraya dizme tekniklerinin salt Gezgin Satıcı Tekniği, geçiş sürelerini (yada maliyetlerini) üretim sürelerinden (yada maliyetlerinden) bağımsız olarak değerlendirmekte ve eniyileme işlemini bu değişkenler üzerinde yapmaktadır [8]. Gezgin Satıcı Problemi, bir satıcının n sayıda kenti her kente bir kez gidecek şekilde dolaşarak çıktığı kente dönmesi ve bunu yaparken aldığı yolun (sürenin yada gezinin maliyetinin) en küçük tutulmasıdır. Benzerlik kurulduğunda, her ürün bir kente ve kentler arasındaki uzaklıkta ürün değişikliği sırasındaki kayıplara karşılık gelmektedir. Çözüm, bir "Dal-ve-Sınır (*Branch-and-Bound*)" algoritmasıyla bulunmaktadır. Programa kulenin üretime başlamadan ve üretim bittikten sonraki durumları da eklenerek, işlem daha da genelleştirilebilmektedir. Benzetimle alınan sonuçlar, ürünler arası geçişlerden kaynaklanan toplam kayıpta önemli bir düşme (bazı durumlarda % 30'un üzerinde) sağlandığını göstermektedir [6,9].

Bölüm 3.2 de verilen 2, 3 ve 4 sayılı varsayımlar aslında endüstriyel bir sistem için çok kısıtlayıcıydı ve gerçekçi değildir. Örneğin, kulenin çalışmasında bir aksama olduğunda sıraya dizme işlemini yeniden yapmak zorunluluğu doğar. Bu katı varsayımların kaldırılması ve devinik bir sırala-

maya geçiş için bazı somut öneriler ana çalışmada verilmektedir [ö].

#### 4.3. Rastlansal Uyarlanabilir Denetim

Buradaki amaç, daha önceden saptanan denetim politikasını üretim sırasında gerçekleştirmektedir. Üretim boyunca kule deviniklerinin sürekli değişmesi, sistemdeki bozucuların etkisi ve sürecin doğrusal olmaması uyarlanabilir denetimi gerektirmektedir. Çözüm, Smith ve Armando'nun önerdiği yaklaşımla [10], bir Nodel-Dayanaklı Uyarlanabilir (Model-Reference Adaptive) sistem tasarımıyla sağlanmaktadır. Bu amaçla kulenin oldukça basit bir devinik, kesik-zamanlı (discrete-time) modeli kurulmuştur. Model, iki girdi (ısı ve geri-dön-dürme oranı) bir çıktı (tepe ürünü bileşimi) ile birlikte ölçülen ve ölçülemeyen bozucuları, model parametre belirsizliklerini içermektedir. Modelin durum değişkenleri, bazı parametreleri ve ölçülemeyen kalıcı bozucular (kuleye beslenen karışımın bileşimi ve giriş hızındaki kalıcı değişimler) Genişletilmiş Kalman Süzgeci (Extended Kalman Filter) ile çevrim-içi kestirilmektedir. Denetim problemi doğrusal olmadığından ve rastlansal olduğundan, eniyi çözüm olarak dışıdır [11]. Bu durumda "Belirlilik Eşitliği (Certainty Equivalence)" ilkesinden yararlanılarak, basit bir uyarlanabilir algoritması ve devinik programlama tekniğiyle yaklaşık bir çözüme gidilmiştir [6, 12]. Alınan benzetim sonuçları, ölçülemeyen bozucuların kestiriminin güçlüğü dışında, gerek çalışma noktasının değiştirilmesi gerekse belirli bir çalışma noktasında kararlı üretim konularında tasarımın başarılı olduğunu göstermektedir [6, 12, 13].

#### 4.4. Tümlşik Denetim Sorunları

Tümlşik denetimden kasıt, parça parça bulunan çözümlerin bütünlleştirilmesi ve sistemin uyumlu çalışmasının sağlanmasıdır. Bunun içinde düzeyler ve ara düzeyler arasındaki geri besleme döngülerinin verimli çalışması gerekmektedir. PDP-8/S gibi küçük bir bilgisayar bu işin hepsini yüklenemeyeceğinden, çevrim-içi denetimin çevrim-dışı yöntemlerle desteklenmesi zorunlu olacaktır. Bu yönde geliştirilen bazı somut öneriler ana çalışmada tartışılmaktadır [ö]. Burada şunu belirtmek yeterlidir: sistemin çalışmasındaki aksaklıklar, maliyetin büyük olması nedeniyle, en çok üst düzeylerde kendini gösterecektir. Bu sorun, kuleyle denetim sistemi arasındaki geri besleme döngülerinin verimli bir biçimde çalıştırılmasıyla çözümlenebilir.

#### 5. SONUÇ

Sunulan çalışma endüstriyel sistemlerde üretim denetiminin karmaşıklık derecesini sergilemektedir. Problemin deneysel bir sistemde ve teknik düzeyde ele alınması doğal olarak büyük kolaylıklar sağlamıştır. Ancak, gerek çözümleme gerekse tasarımın her evresinde kullanılabilecek matematiksel bir yöntem bilimin (metodoloji) eksikliği bu çalışmada da hissedilmiştir. Her ne kadar sistem felsefesi genelde çözümün ana çizgilerini veriyorsa da, kullanılacak model ve teknikler ancak sistemin en ince ayrıntısına kadar anlaşılmasıyla belirlenebilmektedir. Buraya kadar olan değerlendirme, benzetimle alınan sonuçlara dayanmaktadır. Tasarlanan sistemin gerçek bir değerlendirmesi, kuşkusuz, kule üretimdeyken yapılmalıdır.

#### KAYNAKLAR

- [1] Milkiewicz F., "Multilevel-Multihorizon Production Control", Symposium on Systems Approach to Developing Countries, s.377-384, Cezayir, Mayıs 1973.
- [2] Mesarovic M.D., "Multilevel Systems and Concepts in Process Control", Proc. IEEE, Cilt 58, s.116-125, Ocak 1970.
- [3] Haalman K., K.Hoogendorn, V.M.J.Evers, "On-Line Computer Control of Ethylene Production", Proc. IFAC/IFIP Conf.on Computer-Control Toronto-Kanada, 1968.
- [4] Miller W., "Systems Engineering in the Steel Industry", IEEE Trans. on Systems Science and Cybernetics, Cilt SSC-2, s.9-15, Ağustos 1966.
- [5] Kirchmager L.K., N.J.Fieder, "Automation Developments in the Control of Interconnected Electric Utility Systems", IFAC/IFIP Conf. on Computer-Control, Toronto, Kanada, 1968.
- [6] Yurtsever M.K., "Optimization of Batch Production and Control Policy on a Pilot-Scale Distillation Column", Doktora Tezi, University of London, Haziran 1976.
- [7] Yurtsever M.K., "Bir Damıtma Kulesinde Kararlı Durum Üretim Sürecinin Eniyilenmesi" TÜBİTAK VI.Bilim Kongresi, Matematik-Astronomi Sektörünü, Ankara, Ekim 1977.
- [8] Conway R.W., W.L.Maxwell, L.W.Miller, "Theory of Scheduling", Addison-Wesley Publishing Company, 1967.
- [9] Yurtsever M.K., "Ürün Sıralamada Bir Bilgisayar Modeli-Gezgin Satıcı Tekniğinin Bir Uygulaması", Ankara, Bilişim Dergisi, Sayı: Yaz 1977.
- [10] Smith C.L., B.C.Armando, "On-Line Identification of Distillation Column Dynamics", Proc. 12 th Ann. ISA Chem. and Pet. Inst., Symposium, Dist. Cont.Prob. in the Chem. and Pet. Ind., Houston, Tex. USA, s.19-21, Nisan 1971.
- [11] Jffittenmark B., "Stochastic Adaptive Control Methods: A Survey", Int. J.Control, Cilt 21, s.705-730, 1975.
- [12] Jenkins K.W., "A Design Procedure for Discrete-Time Adaptive Control Systems", Preprint JACC, s.624-33, 1966.
- [13] Yurtsever M.K., "Bir Damıtma Kulesinde Rastlansal Adaptif Denetimin Benzetimi I-Kule Dinamiklerinin Genişletilmiş Kalman Süzgeciyle Tanıtılması", 3.Ulusal Yöneylem Araştırma Kongresi, İzmir, Mayıs 1977.
- [14] Yurtsever M.K., "Bir Damıtma Kulesinde Rastlansal Adaptif Denetimin Benzetimi II-Denetim ve Adaptasyon Algoritması", 3.Ulusal Yöneylem Araştırma Kongresi, İzmir, Mayıs 1977.