

ARAŞTIRMA MAKALESİ/RESEARCH ARTICLE

BİRDEN FAZLA ZAMAN GECİKMESİNE SAHİP VERİ İLETİŞİM AĞLARINDA AKIŞ KONTROLÜ İÇİN μ KONTROLÖR TASARIMI **Banu ATAŞLAR¹**

ÖZ

Belirsiz ve zamanla değişen birden fazla zaman gecikmesine sahip veri iletişim ağlarında ortaya çıkan debi tabanlı akış kontrolü probleminin çözümü için μ kontrolör tasarımı yapılmıştır. Ele alınan sonsuz boyutlu sistemde var olan gecikmeler yerine yaklaşıklık kullanılması ile sistem sonlu boyuta indirgenerek D-K iterasyon yöntemi ile μ kontrolörler tasarlanmıştır. Elde edilen μ kontrolörlerin performanslarını gözlemlemek amacıyla benzetim çalışmaları da yapılmıştır. Bu çalışmalarda da μ kontrolörlerin zamanla değişen zaman gecikmelerine karşı gürbüzlük gösterdikleri, darboğazdaki kuyruk uzunluğunu istenen yatışkın değere asimtotik olarak yaklaştırdıkları ve ağırlıklı eşitlik ilkesini sağladıkları görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Veri iletişim ağları, Akış kontrolü; Zaman gecikmeli sistemler; Gürbüz kontrol, μ sentezi.

μ SYNTHESIS BASED FLOW CONTROLLERS FOR DATA COMMUNICATION NETWORKS WITH MULTIPLE TIME DELAYS

ABSTRACT

This study is about μ controller design for the solution of a flow control problem for data communication networks which have uncertain time varying multiple time delays. After the statement of the problem, the time delays in the model are approximated in order to have a finite dimensional model. By applying D-K iteration method to the finite dimensional model, μ controllers are obtained. In order to illustrate the performance of the μ controllers, some simulation studies are done. The simulation results show that the controllers are robust to uncertain time-varying multiple time-delays, force the queue length at the bottleneck node to the desired steady-state value asymptotically, and also satisfy the weighted fairness condition.

Keywords: Data communication Networks, Flow control; Time-delay systems, Robust control; μ synthesis.

1. GİRİŞ

Veri iletişim ağlarının etkin şekilde kullanılabilmesi için kaynak yönetimi yöntemlerine gereksinim

vardır. Kaynak yönetimi yöntemlerinin en önemlilerinden biri akış kontrolüdür. Akış kontrolü, trafik sıklığını önlemek amacıyla, veri paketlerinin ağa giriş debilerini belirleme problemidir. Etkin bir akış kont-

¹ Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 26470 Eskişehir, Türkiye
E-posta: bataslar@anadolu.edu.tr **Tel:** 222-321 3550 / 6469

rolü için ise geri besleme gereklidir. Bu amaçla iki tür geri besleme kullanılmaktadır: pencere tabanlı ve debi tabanlı geri besleme. Pencere tabanlı geri besleme Internet protokolünün bir parçası olduğundan günümüzde önemini korumaktadır. Ancak, son yıllarda debi tabanlı geri beslemenin daha etkin olabileceği ortaya çıkmış ve bu tür geri besleme Asenkron Transfer Modu (ATM) ağlarının standardı olarak da kabul görmüştür (ATM Forum Traffic Management AF-TM-0056.000, 1996). Bugüne kadar veri-iletişim ağlarında akış kontrolü üzerine pek çok çalışma yapılmış ve çeşitli algoritmalar önerilmiştir (Altman ve Başar, 1997; Altman vd., 1997; Benmohamed ve Meerkov, 1993; Bonomi ve Fendick, 1995; Parekh ve Gallager, 1994; Ramakrishnan ve Newman, 1995; Rohrs ve Berry, 1997; Özbay vd., 1998 ve Özbay vd., 1999).

Ağdaki sıkışıklığın en aza indirilmesi anlamında en iyi akış kontrolünün bulunması sırasında karşılaşılan en önemli problem, geri besleme döngüsünde bulunan gecikmelerdir. Eğer kaynakların ağa göndereceği veri debisini belirleyen kontrolörler darboğaz nodunda gerçekleştiriliyorsa, böyle sistemlerde veri debisini belirleyen komutun kontrolörde belirlenmesi ile kaynak tarafından kabul edilmesi arasında bir zaman gecikmesi ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde, kaynağın veri göndermesi ile verinin darboğaz noduna gelmesi arasında da bir zaman gecikmesi söz konusudur. Bu iki durumda ortaya çıkan gecikmelerin toplamı veri döngü-gecikmesi olarak düşünülebilir. Veri iletişim ağları için bahsedilmiş olan bu gecikmelerin büyüklüğü genellikle önceden bilinmemekte ve dahası bunlar her kanalda farklılık göstermekte ve zaman içinde değişebilmektedirler. Bu durumda sistemdeki belirsizliklere karşı gürbüz kararlılık gösterebilen gürbüz kontrolörlere gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca, zaman gecikmesinin varlığı akış kontrolü problemini sonsuz boyutlu yapmaktadır. Zaman gecikmesine sahip sonsuz boyutlu sistemlerin gürbüz kontrolü için günümüze kadar çok sayıda H_∞ kontrol tasarımı çalışması yapılmıştır (Mirkin ve Tadmor, 2002). Frekans düzleminde yapılan ilk çalışmalarda (Foiyas vd., 1997) zaman gecikmeli sistemler sonsuz boyutlu olarak ele alınmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda bu konuda oldukça önemli yol alınmıştır. Örneğin, Meinsma ve Zwart (2000)'de zaman gecikmeli sistemlere ait karma hassasiyet probleminin bir rasyonel fonksiyon ile bir FIR filtre içeren blokun geribeslemeli yapısından oluşan basit bir formda çözümünü bulunmuştur. Ancak yapılan çalışmalar çoğunlukla tek kanal gecikme problemleri ile sınırlı kalmıştır. Bundan çok kısa bir zaman öncesinde Meinsma ve Mirkin, (2003)'de yapılan bir çalışmada ise, birden fazla giriş/çıkış gecikmesine sahip sistemlerde gürbüz tasarım için bir yöntem geliştirilmiştir.

Gürbüz kontrol tasarım çalışmalarında eğer ele alınan problemdeki belirsizliğin yapısı hakkında da hiç bir şey bilinmemekte ise, H_∞ kontrol tasarım yöntemi gürbüz kontrol açısından olabilecek en iyi sonucu vermektedir. Ancak, eğer sistemde yer alan belirsizlik yapısal ise yani belirsizliğin yapısı biliniyor ise, H_∞ kontrol tasarımı yöntemi ile elde edilen kontrolör tutucu kalmaktadır. Sistemde yapısal belirsizliğin yer aldığı bu problemlerde μ sentezi yöntemi (Doyle, 1982) daha etkin olmaktadır. μ sentezi kullanılarak geliştirilmiş olan kontrolörler son yıllarda özellikle uçaklar için uçuş kontrolünde oldukça fazla kullanılmaktadır (Amato vd., 2004).

Bu çalışmada, belirsiz ve zamanla değişen birden fazla zaman gecikmesine sahip veri iletişim ağları için debi tabanlı akış kontrolörü tasarımı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bunun için temel olarak Özbay vd. (1998), Özbay vd. (1999), Ataşlar vd. (2000) ve Quet vd. (2002)'de yapılan çalışmalar ele alınmıştır. Özbay vd. (1998)'de gecikmelerin zaman içinde değişmediği kabul edilerek H_∞ kontrolör tasarlanmış ve ardından da Özbay vd. (1999)'da yapılan çalışmada kontrolörün kararlı bir şekilde gerçekleştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Bu iki çalışmada yukarıda bahsedildiği gibi zaman gecikmelerinin zamanla değişmediği kabul edilmiş ve ayrıca kanallardaki nominal zaman gecikmeleri eşitlenmiştir. Ardından Quet vd. (2002)'de yapılan çalışmada ise, kanallarında zamanla değişen ve birbirinden farklı zaman gecikmesine sahip veri iletişim ağları için gürbüz H_∞ kontrol tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan kontrolör darboğazdaki kuyruk uzunluğunu istenen yatışkın değere asimtotik olarak yaklaştırmaktadır. Ayrıca, geliştirilen kontrolör ağırlıklı eşitlik olarak tanımlanan mevcut kapasitenin yatışkın durumda farklı kaynaklara önceden belirlenen ağırlıklarla paylaştırılabilmesi ilkesini sağlamaktadır. Kontrolör her bir kanal için zamanla değişen zaman gecikmelerine karşı gürbüzlük göstermektedir. Ancak, yapılmış olan bu çalışmada, sistemdeki gecikmelere ait belirsiz kısım yapısal olmasına rağmen yapısal olmadığı varsayılarak gürbüz kararlılık için H_∞ kontrol tasarım yöntemi kullanılmıştır. Dolayısıyla da, elde edilen kontrolörün tutucu olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada ise, yukarıda bahsedilmiş olan kanallarında zamanla değişen, belirsiz ve birbirinden farklı zaman gecikmesine sahip veri iletişim ağları için tanımlanmış olan akış problemi ele alınmıştır. Sistemdeki zaman gecikmelerine ait belirsizliğin yapısal olduğu dikkate alınarak μ sentezi yöntemi yardımıyla kontrolör tasarlama çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmada μ sentezi kullanılarak kontrolör tasarımının günümüzdeki en yaygın yöntemi olan D-K iterasyon algoritması (Doyle, 1985) kullanılmıştır. D-K

iterasyon algoritmasının uygulaması halen sadece sonlu boyutlu sistemler için bulunmakta olduğundan yapılmış olan bu çalışmada gecikmeler yerine sonlu boyutlu yaklaşımları kullanılmıştır. Elde edilmiş olan μ kontrolörler için benzetim çalışmaları da yapılmıştır. Bu çalışmalarda da μ kontrolörlerin darboğazdaki kuyruk uzunluğunu istenen yatışkın değere asimtotik olarak yaklaştırdığı ve yukarıda bahsedilmiş olan ağırlıklı eşitlik ilkesini de sağladığı görülmüştür. Ayrıca, kontrolörlerin zamanla değişen zaman gecikmelerine karşı gürbüzlük gösterdikleri ve birbirlerinden farklı zaman gecikmelerine sahip her kanal için ayrı seçilmiş olan ağırlıklar dikkate alınarak tasarlanmış olmalarının performanslarındaki etkileri gözlemlenmiştir.

2. μ KONTROLÖRLERİN TASARIMI

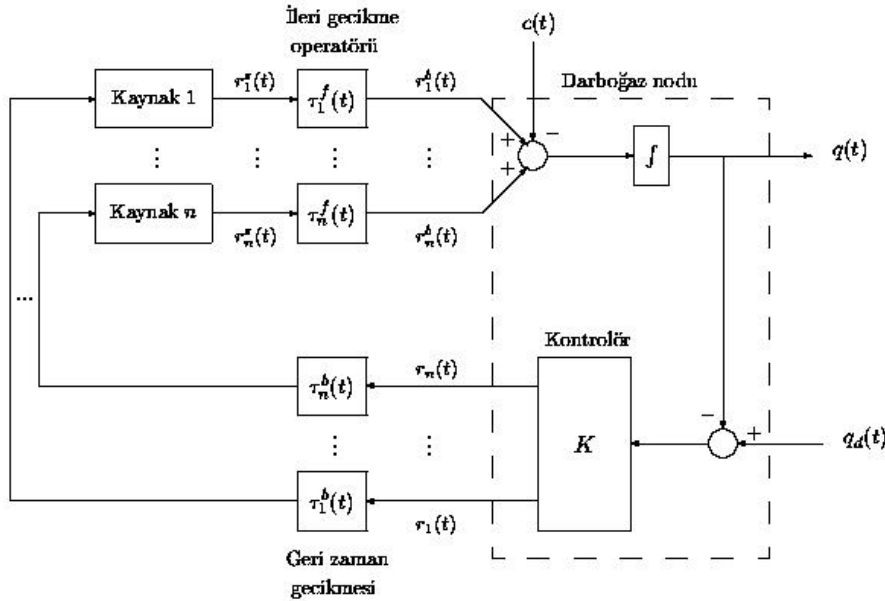
Quet vd. (2002)'de birden çok kanala sahip tek darboğazlı, kanallarında birbirinden farklı, belirsiz ve zamanla değişen zaman gecikmelerine sahip veri iletişim ağları için akış kontrolü problemi tanımlanmış ve

ardından sistemdeki gecikmelerin yapısal olduğu göz ardı edilerek H_∞ çözümü bulunmuştur. Yapılmış olan bu çalışmada ise Quet vd. (2002)'de tanımlanmış olan bu akış kontrolü probleminin çözümü için sistemdeki belirsizliklerin yapısal olduğu dikkate alınarak μ sentezi yöntemi ile kontrolör tasarımı önerilmiştir.

Quet vd. (2002)'de tanımlanmış olan akış kontrolü problemi Şekil 1'de görülmektedir. Bu modelde darboğazdaki kuyruk uzunluğunun dinamiği

$$\dot{q}(t) = \sum_{i=1}^n r_i^b(t) - c(t) \tag{1}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada, $q(t)$: t anında darboğazdaki kuyruk uzunluğunu, $r_i^b(t)$: t anında i inci kaynaktan darboğaza gelen veri debisini, $c(t)$: t anında darboğazdan ayrılan veri debisini göstermektedir.



Şekil 1. Akış kontrolü problemi (Quet vd., 2002)

Kanallardaki zaman gecikmeleri ileri ve geri yönde olmak üzere ikiye ayrılmıştır. İleri yöndeki gecikmeler verinin kaynaklardan ayrılması ile darboğaza varışı arasında geçen süredir. Geri yöndeki gecikmeler ise, darboğazda veri debisi komutunun kontrolör tarafından hesaplanması ile bu komutun kaynaklara ulaşması arasında geçen süredir. h_i^f ve h_i^b sırasıyla i kanalı için ileri ve geri yöndeki sabit değerli nominal zaman gecikmesini, $\delta_i^f(t)$ ve $\delta_i^b(t)$ sırasıyla i kanalı için ileri ve geri yöndeki zaman gecikmelerine ait belirsizliği göstermek üzere, i kanalı için ileri ve geri yöndeki zaman gecikmeleri sırasıyla $\tau_i^f(t) := h_i^f + \delta_i^f(t)$ ve $\tau_i^b(t) := h_i^b + \delta_i^b(t)$ şeklinde

tanımlanmıştır. Bu tanımlardan yararlanılarak i kanalı için nominal zaman gecikmesi $h_i := h_i^f + h_i^b$, zaman gecikmesi belirsizliği $\delta_i(t) := \delta_i^f(t) + \delta_i^b(t)$ ve son olarak toplam zaman gecikmesi $\tau_i(t) := \tau_i^f(t) + \tau_i^b(t)$ olmaktadır.

Şekil 1'den de görülebileceği gibi $r_i(t)$ t zamanında kontrolör tarafından hesaplanmış olan veri debisi komutu olmak üzere, (Quet vd., 2002)'de

$$r_i^b(t) = \begin{cases} (1 - \delta_i^f(t))r_i(t - \tau_i(t)), & t - \tau_i^f(t) \geq 0 \\ 0, & t - \tau_i^f(t) < 0 \end{cases} \tag{2}$$

- Belirsizliğe ait blok yapı $\Delta = \frac{1}{\sqrt{2}} \Delta_{LTV}^0$ şeklinde tanımlanmıştır.
- Şekil 4'deki sistemde Δ belirsizlik bloğu ve K kontrolörü dışında kalan blok yapıların tamamı P genelleştirilmiş sistemi oluşturur. Genelleştirilmiş sistemde yer alan ağırlık fonksiyonları ise aşağıdaki gibi seçilmiştir:

$$W_1(s) = \sqrt{2} \bar{W}(s) = \sqrt{2} [\bar{W}_1(s) \Lambda \bar{W}_n(s)],$$

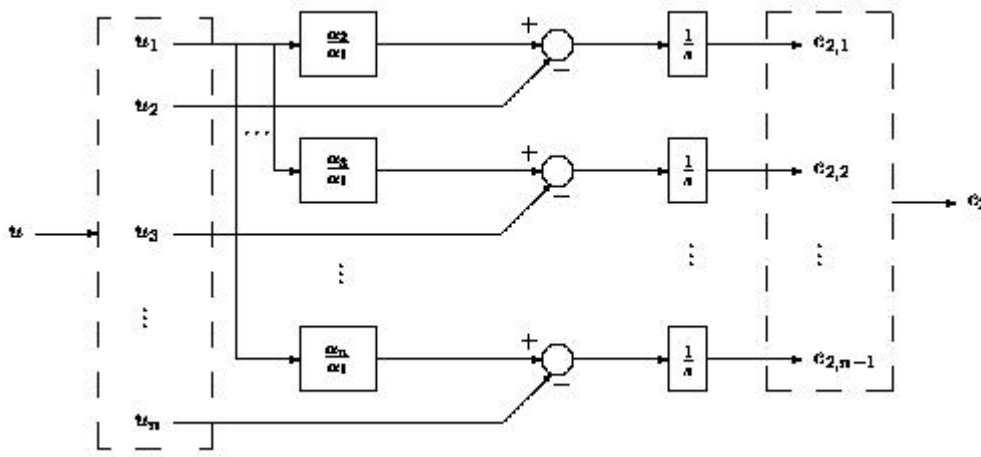
$$\bar{W}_i(s) = \begin{bmatrix} \frac{\varphi_{i,1}}{s} & \varphi_{i,2} \end{bmatrix},$$

- $W_2(s) = \frac{1}{s}$ ((Quet vd., 2002)'de ortaya konan problemde nominal performans için $W_s(s) = \frac{1}{s^2}$ olarak belirlenmiş olan hassasiyet ağırlık fonksiyonu buradaki problemde $\frac{1}{s} W_2(s)$ 'e karşılık

geldiğinden $W_2(s)$ ağırlık fonksiyonu $\frac{1}{s}$ olarak seçilmiştir.),

- $W_3(s)$ 'nin yapısı ise Şekil 5'de sunulmuştur. Yatışkın durumda kanallar arası eşitliği sağlayan ağırlık olan $W_3(s)$ ayrıca aşağıdaki ifade ile özetlenebilir:

$$W_3(s) = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} \frac{\alpha_2}{\alpha_1} & -1 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha_3}{\alpha_1} & 0 & -1 & 0 \\ M & M & 0 & 0 \\ \frac{\alpha_n}{\alpha_1} & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$



Şekil 5. $W_3(s)$ 'nin gerçekleştirilmesi

Şekil 4'de tanımlanmış olan bu μ sentezi problemi aşağıdaki ifadeye karşılık gelmektedir:

$$\min_{K \in \Psi} \max_{\omega} \mu_{\Delta}(F_l(P, K)(j\omega)) \quad (4)$$

Burada Ψ ifadesi kapalı döngü sistemi kararlı kılan kontrolörler kümesini göstermektedir.

μ 'nün üst sınırının ve D ölçekleme matrisinin kullanılması ile (4)'e karşılık gelen problem

$$\min_{K \in \Psi} \min_{D \in \Omega} \|DF_l(P, K)D^{-1}\|_{\infty}$$

şekindedir (Zhou vd., 1996). Burada Ω ifadesi kararlı ve minimum-faz rasyonel fonksiyonlar kümesini göstermektedir. Ayrıca, $F_l(P, K)$ ifadesi P 'nin K üzerinden alt yöndeki *doğrusal ve oransal dönüşümünü* (Lower Linear Fractional Transformation (lower LFT)) göstermektedir ve yukarıdaki sistem için $S := (1 + PK)^{-1}$ olmak üzere aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$F_l(P, K) = \begin{bmatrix} KSW_1 & KS \frac{1}{s} \\ W_2SW_1 & W_2S \frac{1}{s} \\ W_3KSW_1 & W_3KS \frac{1}{s} \end{bmatrix}$$

Tanımlanmış olan bu probleme D-K iterasyon algoritması uygulanırken iterasyonun H_∞ kontrolör tasarımı yapılan K adımlarında sistem yapısının sağlanması gereken bazı kabullenmeler bulunmaktadır (Zhou vd., 1996). Bu kabullenmelerin sağlanması için gerçekleştirilen basit blok şema işlemleri ile sistem Şekil 6'daki yapıya dönüştürülmüştür. Buradaki giriş/çıkış sinyalleri ve belirsizlik bloğu tanımları bir önceki yapıdaki ile aynıdır. Sistemdeki diğer değişkenler ise,

- Kontrolör: $\hat{K}(s) = \frac{s}{s + \varepsilon} K(s)$,
- Genelleştirilmiş sistemde (P) yer alan fonksiyonlar:

$$-\tilde{N}(s) = \tilde{M}(s)P_0(s) = \frac{1}{s + \varepsilon} \left[e^{-h_1 s} \Lambda e^{-h_n s} \right],$$

$$-(\tilde{M}(s) := \frac{s}{s + \varepsilon}, \text{ bkz. (Quet vd., 2002)})$$

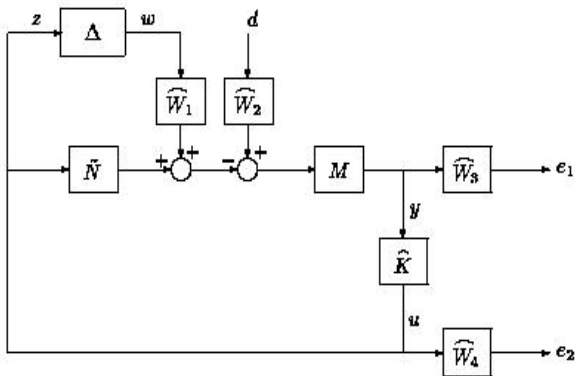
$$-M(s) = \frac{(s + \varepsilon)^2}{s^2},$$

$$-\hat{W}_1(s) = W_1(s)\tilde{M}(s) = [\hat{W}_1(s) \Lambda \hat{W}_n(s)], \quad \hat{W}_i(s) = \begin{bmatrix} \frac{\varphi_{i,1}}{s + \varepsilon} & \frac{\varphi_{i,2}s}{s + \varepsilon} \end{bmatrix},$$

$$-\hat{W}_2(s) = \frac{1}{s + \varepsilon},$$

$$-\hat{W}_3(s) = \frac{1}{s + \varepsilon},$$

$$-\hat{W}_4(s) = W_3(s) \text{ (Yapısı Şekil 5'de sunulmuştur.)}$$



Şekil 6. μ sentezi problemi için eşdeğer sistem

Optimal μ sentezi probleminin kesin çözümü bulunmadığından (Toker ve Özbay, 1998), bir alt-optimal çözüm bulmak amacıyla tanımlanmış olan probleme MATLAB “ μ Analysis and Synthesis Toolbox” (Balas vd., 1995)'da yer alan D-K iterasyonu (D-K iteration) yöntemi uygulanmıştır.

Ancak, Balas vd. (1995)'deki D-K iterasyonu prosedürünün uygulanabilirliği sonlu boyutlu sistemler için mümkün olmaktadır. Bu sebeple yapılan bu çalışmada öncelikle tanımlanmış olan problemde var olan sonsuz boyutlu gecikmeler yerine onlara karşılık gelen sonlu boyutlu yaklaşıklıklar kullanılmıştır. Bu çalışmada sistemdeki gecikmeler yerine Padé yaklaşıklığı kullanılmıştır. Çalışmalar sırasında genel olarak beşten daha küçük dereceli yaklaşıklıklar kullanıldığında elde edilen kontrolörler üzerinde önemli değişiklik olduğu, beşten daha büyük dereceli yaklaşıklıklar kullanıldığında ise farkedilebilir bir değişiklik olmadığı gözlemlendiği için, beşinci dereceden bir yaklaşıklığın uygun olduğuna karar verilmiştir. Ancak çalışmalar sırasında birkaç durum için kullanılması gereken Padé yaklaşıklığı derecesi için bir sonuca ve/veya bir alt/üst limite ulaşılamamıştır. Bu konuda daha detaylı bilgi için bkz. (Ataşlar, 2004).

Kontrolör tasarım yönteminin geliştirilmesinin ardından elde edilen kontrolörlerin performansını gözlemlemek için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle elde edilen kontrolörlerin frekans tepkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar (Quet vd., 2002)'deki yöntem ile elde edilen H_∞ kontrolörler ve ayrıca Padé yaklaşıklığı kullanılmış sonlu boyutlu sistem için Doyle vd. (1989)'deki yöntem ile elde edilen H_∞ kontrolörler ile karşılaştırılmıştır. Ardından ise elde edilen μ kontrolörler kullanılarak problem için zaman bölgesinde benzetim çalışmaları yapılmış ve bu çalışmalardan da elde edilen sonuçlar da yukarıda bahsedilen H_∞ kontrolörlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yer darlığı sebebiyle bu çalışmada belirli sayıda durum için elde edilen sonuçların sunumu yapılabilecektir. Daha fazla inceleme için (Ataşlar, 2004) incelenebilir.

2.1 μ Kontrolörlerin Frekans Tepkilerinin İncelenmesi

Bu alt-bölümde, tasarım parametreleri açısından farklı durumlar için elde edilmiş μ kontrolörlerin frekans tepkileri incelenmiştir. İncelemeler için Tablo 1'de sunulmuş olan 4 farklı durum ele alınmıştır. Her bir durum seçilen tasarım parametrelerinin kontrolörler üzerindeki etkisini göstermesi açısından anlamlıdır. Sonlu boyutlu sistemler için elde edilmiş olan bu μ kontrolörlerin frekans tepkileri aynı durumlar için elde edilen H_∞ kontrolörlerin frekans tepkileri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapmak amacıyla hem Quet vd., (2002)'de önerilen yöntem kullanılarak sonsuz boyutlu sistem (Şekil 2'deki yapı) için elde edilen H_∞ kontrolörler ve hem de Doyle vd. (1989)'daki standart H_∞ kontrolör tasarım yöntemi kullanılarak Padé yaklaşıklığı ile sonlu boyuta indirgenmiş sistem (Şekil

6'daki yapı) için elde edilen H_∞ kontrolörler ele alınmıştır. Tablo 1'deki her bir durum için elde edilen μ ve H_∞ kontrolörlere ait Bode grafikleri sırasıyla Şekil 7–10'da yer almaktadır. Sunulmuş olan Bode grafiklerinde büyüklük birimi dB, faz birimi derece ve frekans birimi rad/sn'dir.

Tablo 1. Tasarım Parametreleri

	h_1	h_2	α_1	α_2	δ_1^+	δ_2^+	$\varphi_{1,1}$	$\varphi_{2,1}$
Durum 1	1	3	1/2	1/2	1	1	0.116	0.116
Durum 2	1	1	1/5	4/5	1	1	0.116	0.116
Durum 3	2	2	1/2	1/2	4	1	0.116	0.116
Durum 4	1	1	1/2	1/2	1	1	0.116	1.406

Şekil 7 incelendiğinde, farklı kanallardaki farklı zaman gecikmelerinden elde edilen $K(s) = [K_1(s) \ K_2(s)]^T$ kontrolörlerin birinci ve ikinci kısımları olan $K_1(s)$ ve $K_2(s)$ 'de yüksek frekanslarda farklı davranışlara sebep olduğu gözlemlenmektedir. μ kontrolörlerde bahsedilen bu durumda yüksek zaman gecikmesinden dolayı $K_2(s)$ 'nin kazancı $K_1(s)$ 'ninkinden daha düşüktür. Benzer şekilde sonlu boyutlu sistem için Şekil 6'da tanımlanmış olan problemin çözümünden elde edilen kontrolörlerde de $K_2(s)$ 'nin kazancı $K_1(s)$ 'ninkinden daha düşüktür. Öte yandan, (Quet vd., 2002)'de önerilen yöntem ile elde edilen H_∞ kontrolörlerin yüksek frekans tepkisi anlatılanın tam tersi olarak görülmektedir.

Tasarım parametrelerinden biri olan α_i 'lerin elde edilen kontrolörlerin frekans tepkilerine olan etkisi Şekil 8'de gözlemlenebilmektedir. Hem μ ve hem de H_∞ kontrolörlerde $\lim_{s \rightarrow 0} \alpha_1^{-1} K_1(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \alpha_2^{-1} K_2(s)$ eşitliğinin sağlandığı görülmektedir. Bu da, yatışkın durum ağırlıklı eşitlik ilkesinin sağlandığını göstermektedir.

Belirsizlik ağırlıkları δ_i^+ ve $\varphi_{i,1}$ 'lerin etkileri incelendiğinde ise μ kontrolörlerin H_∞ kontrolörlere göre önemi belirgin olmaktadır. μ sentezi yönteminde sistemdeki belirsizliğin yapısı dikkate alınmakta olduğu için elde edilmiş olan kontrolörler belirsizlik ağırlığındaki farklılıklara tepkili olmaktadır. Oysa diğer taraftan H_∞ kontrolörler belirsizlik ağırlıkları δ_i^+ ve $\varphi_{i,1}$ değerlerindeki farklılıklara karşı tepkisiz kalmaktadır. Bunun da sebebi, H_∞ kontrol tasarım yönteminde sistemde yer alan belirsizliklerin yapılarının bilinmediği

kabul edildiğinden belirsizliğe ait ağırlıklar ayrı ayrı ele alınmamaktadır. Benzer şekilde, Quet vd., (2002)'de yapılan H_∞ kontrol tasarımı çalışmasında tüm kanallardaki δ_i^+ ve $\varphi_{i,1}$ tasarım parametreleri gürbüzlük ağırlığındaki tek bir parametrede birleştirilmişlerdir. δ_i^+ 'lerin etkisi Şekil 9'da görülmektedir. μ kontrolörlerin orta-ve-yüksek frekans kazançları incelendiğinde $K_1(s)$ 'ninki $K_2(s)$ 'ninkine göre oldukça düşüktür. Bu beklenen sonucun sebebi ise Durum 3'de $\delta_1^+ > \delta_2^+$ olmasıdır. Benzer olarak, Durum 4'de, $\varphi_{2,1} > \varphi_{1,1}$ olduğu için, μ kontrolörlerde $K_2(s)$ 'nin orta-ve-yüksek frekans kazancı $K_1(s)$ 'ninkinden daha düşük olduğu Şekil 10'da görülmektedir. Yapılan incelemelerde, yukarıda bahsedildiği gibi H_∞ kontrolörler açısından, farklı δ_i^+ veya $\varphi_{i,1}$ değerlerine sahip olmanın $K_1(s)$ ve $K_2(s)$ için bir farklılık yaratmadığı görülmüştür.

2.2 Zaman Bölgesinde Benzetim Çalışmaları

Bu alt-bölümde elde edilmiş olan μ kontrolörler kullanılarak yapılmış olan zaman bölgesi benzetim çalışmalarının sonuçları sunulacak ve elde edilen sonuçlar bir önceki alt-bölümde olduğu gibi hem Quet vd., (2002)'de önerilen yöntem kullanılarak sonsuz boyutlu sistem için elde edilen H_∞ kontrolörler ve hem de Doyle vd., (1989)'daki standart H_∞ kontrolör tasarımı yöntemi kullanılarak Padé yaklaşıklığı ile sonlu boyuta indirgenmiş sistem için elde edilen H_∞ kontrolörlerin zaman bölgesi benzetim çalışmalarının sonuçları ile karşılaştırılacaktır. Benzetim çalışmaları bir önceki bölümde frekans tepkileri incelenmiş olan ve tasarım parametreleri Tablo 1'de görülen 4 farklı durum için sunulacaktır. Benzetim çalışmalarında uygulanan gerçek zaman gecikmelerinin belirsiz kısımlarına ait ifadeler ise Tablo 2'de yer almaktadır. Durum 1'den 4'e kadar olan her bir durumda 3 farklı kontrolör tipi için elde edilen kuyruk uzunluğu grafikleri sırasıyla Şekil 11–14 arasında sunulmuştur.

Tablo 2. Gerçek zaman gecikmeleri

	i	$\delta_i^b(t)$	$\delta_i^f(t)$
Durum 1	1, 2	$0.1+0.5 \sin(2\pi/50 t)$	$0.1+0.1 \sin(\pi/50 t)$
Durum 2	1, 2	$0.5+0.1 \sin(2\pi/50 t)$	$0.1 \sin(\pi/50 t)$
Durum 3	1, 2	$0.2+0.25 \sin(2\pi/50 t)$	$0.05 \sin(\pi/50 t)$
Durum 3.b	1	$0.4+0.5 \sin(2\pi/50 t)$	$0.1 \sin(\pi/50 t)$
	2	$0.1+0.125 \sin(2\pi/50 t)$	$0.025 \sin(\pi/50 t)$
Durum 4	1	$0.1+0.01 \sin(2\pi/50 t)$	$0.01 \sin(\pi/50 t)$
	2	$1.2+0.12 \sin(2\pi/50 t)$	$0.12 \sin(\pi/50 t)$

Kanallardaki gecikmelere ait tasarım parametreleri olan h_i , δ_i^+ ve $\varphi_{i,1}$ 'lerin birbirinden farklı olduğu durumlar incelendiğinde her bir kanalı ayrı olarak ele alan μ kontrolörün önemi ortaya çıkmaktadır. Durum 1, 3 ve 4'den elde edilen sonuçlar incelendiğinde genel olarak μ kontrolörün H_∞ kontrolörlere göre daha hızlı olduğu söylenebilir. Ayrıca, kanallardaki farklı tasarım parametrelerini kontrolör sentezi sırasında dikkate alınması sonucu elde edilmiş olan μ kontrolörler farklı gerçek gecikmelere karşı daha etkili tepkiler vermektedir. Örneğin, Durum 3'den elde edilen sonuçlar incelendiğinde μ kontrolörün kararsızlığı çağrıştıracak kadar salınımlı olduğu görülmektedir. Bu duruma ait tasarım parametreleri dikkate alınır ise aslında kontrolörlerin tasarım sırasında tasarım parametreleri sebebiyle birinci kanalda ikinciye göre dört kat daha fazla ($\delta_1^+ = 4\delta_2^+$) belirsizlik beklentisi ile tasarlanmış olduğu görülmektedir. Ancak ardından benzetim çalışmaları sırasında uygulanmış olan değerler incelenirse gerçek $\delta_i^b(t)$ ve $\delta_i^f(t)$ her iki kanalda da eşittir. Bu durumun ne kadar etkili olduğunu daha iyi görebilmek için $\delta_i^b(t)$ ve $\delta_i^f(t)$ değerleri Durum 3.b'deki gibi değiştirilmiştir. Bu yeni durumda gerçek gecikmelerin belirsizlik kısımları birinci kanalda ikincinin 4 katı kadardır. Bu durumda, kanallardaki belirsizliklerin toplamı Durum 3'e göre artmasına rağmen, yeni durum için elde edilen Şekil 15'deki sonuçlar incelendiğinde μ kontrolör sonucunun Durum 3'dekine göre daha iyileştiği görülmektedir. Öte yandan, H_∞ kontrolörlerin sonucunda Durum 3'e göre kayda değer bir değişiklik olmamıştır. Bölüm 2.1'de de belirtildiği gibi H_∞ kontrolör tasarımında tüm kanallardaki toplam belirsizlik için tasarım yapıldığı için bu beklenen bir sonuçtur. Öte yandan μ kontrolör tasarımında ise her bir kanal ayrı ayrı ele alınmaktadır.

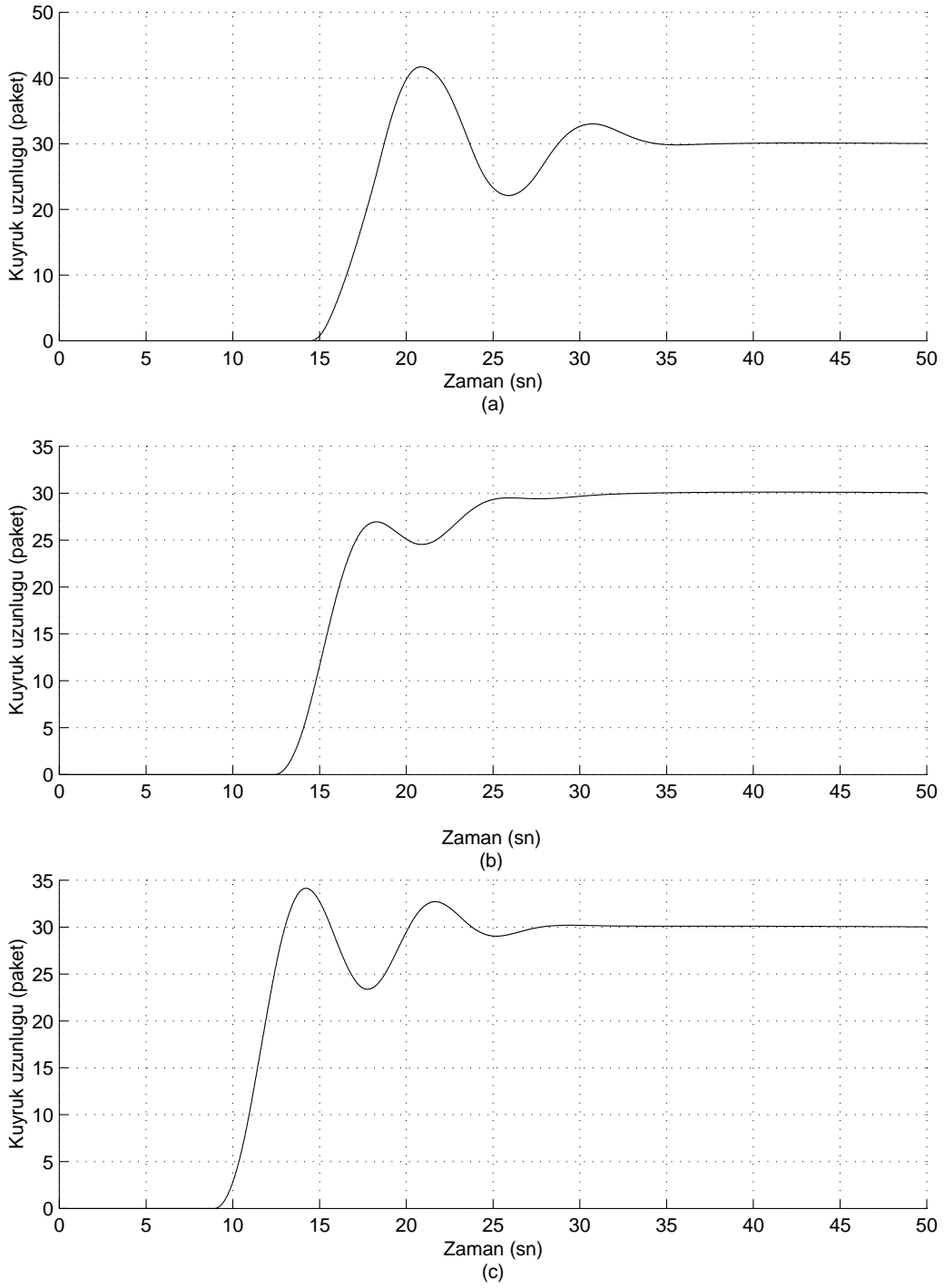
Durum 2 için kanallardaki akış debisi grafikleri Şekil 16'da sunulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde ise tasarım parametrelerinden biri olan ve kanallar arasında ağırlıklı eşitlik ilkesini sağlayan α_i parametresinin etkisi her üç kontrolör tipi için de görülmektedir. Beklenildiği gibi değişik α_i 'lerden kaynaklanan farklılık kanallardaki akış debilerine ait grafiklerde ortaya çıkmakta ve kapasite yatışkın durumda önceden belirlenmiş oranlarda kaynaklara paylaştırılmaktadır.

3. SONUÇLAR

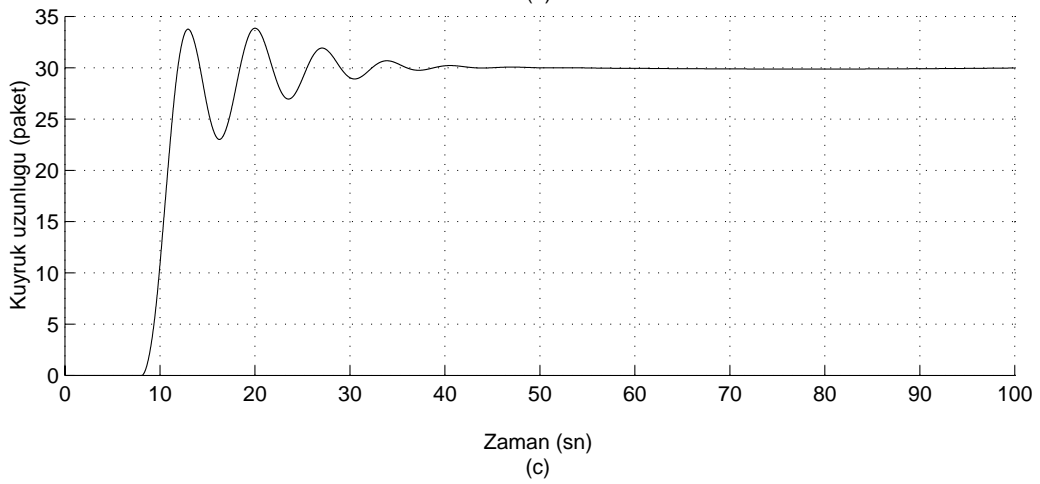
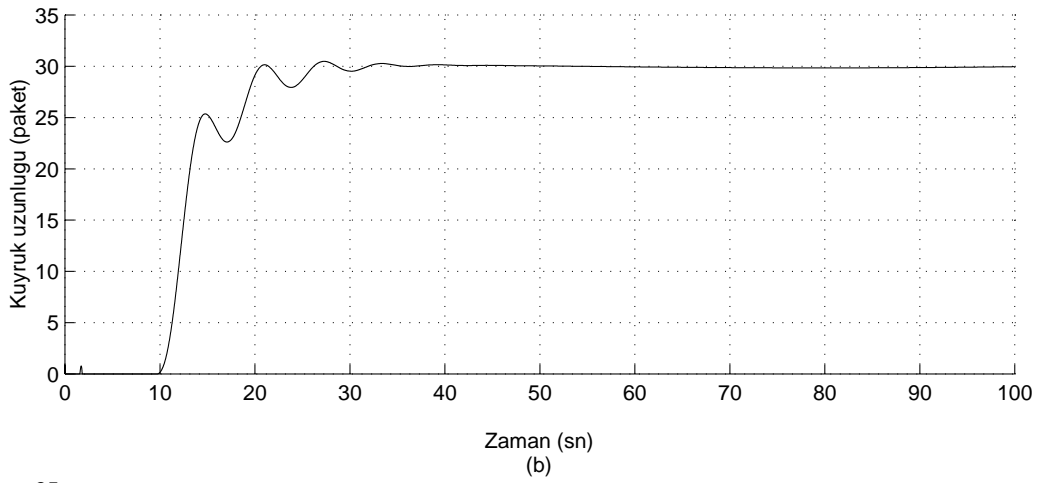
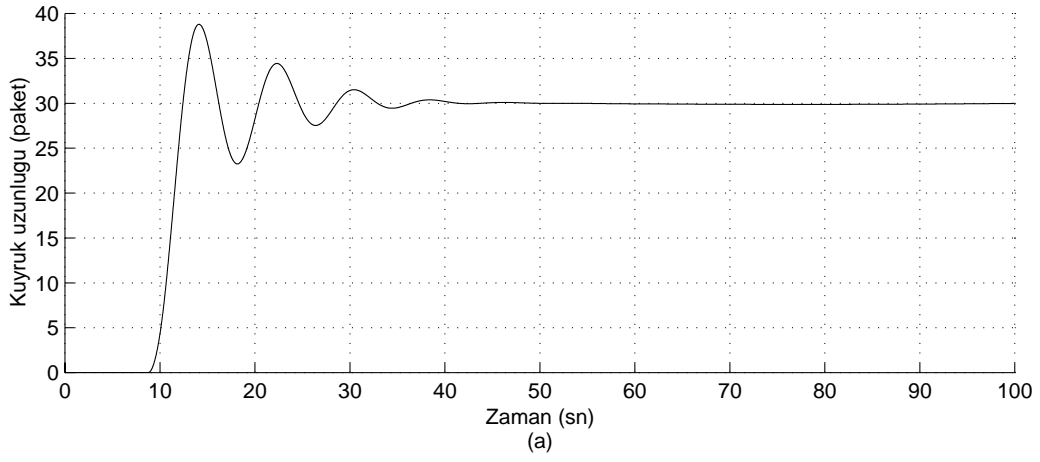
Bu çalışmada, belirsiz ve zamanla değişen birden fazla zaman gecikmesine sahip veri iletişim ağları için debi tabanlı akış kontrolörü tasarımı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bunun için (Quet vd., 2002)'de tanımlan-

mış olan akış kontrolü problemi ele alınmıştır. Tanımlanmış olan problemdeki belirsizliğin yapısal olduğu dikkate alınarak problem μ kontrolörü tasarımı için uygun yapıya dönüştürülmüştür. Elde edilmiş olan μ sentezi probleminde yer alan gecikmeler yerine yaklaşıklık kullanılarak sistem sonlu boyuta indirgenmiş ve ardından D-K iterasyonu algoritması kullanılarak μ kontrolörler elde edilmiştir. Elde edilmiş olan μ kontrolörler darboğazdaki kuyruk uzunluğunu istenen yatışkın değere asimtotik olarak yaklaştırmaktadır. Ayrıca, geliştirilen kontrolör ağırlıklı eşitlik olarak tanımlanan mevcut kapasitenin farklı kaynaklara farklı debilerde paylaştırılabilmesi ilkesini sağlamaktadır. Kontrolör her bir kanal için zamanla değişen zaman gecikmelerine karşı kararlı gürbüzlük göstermektedir.

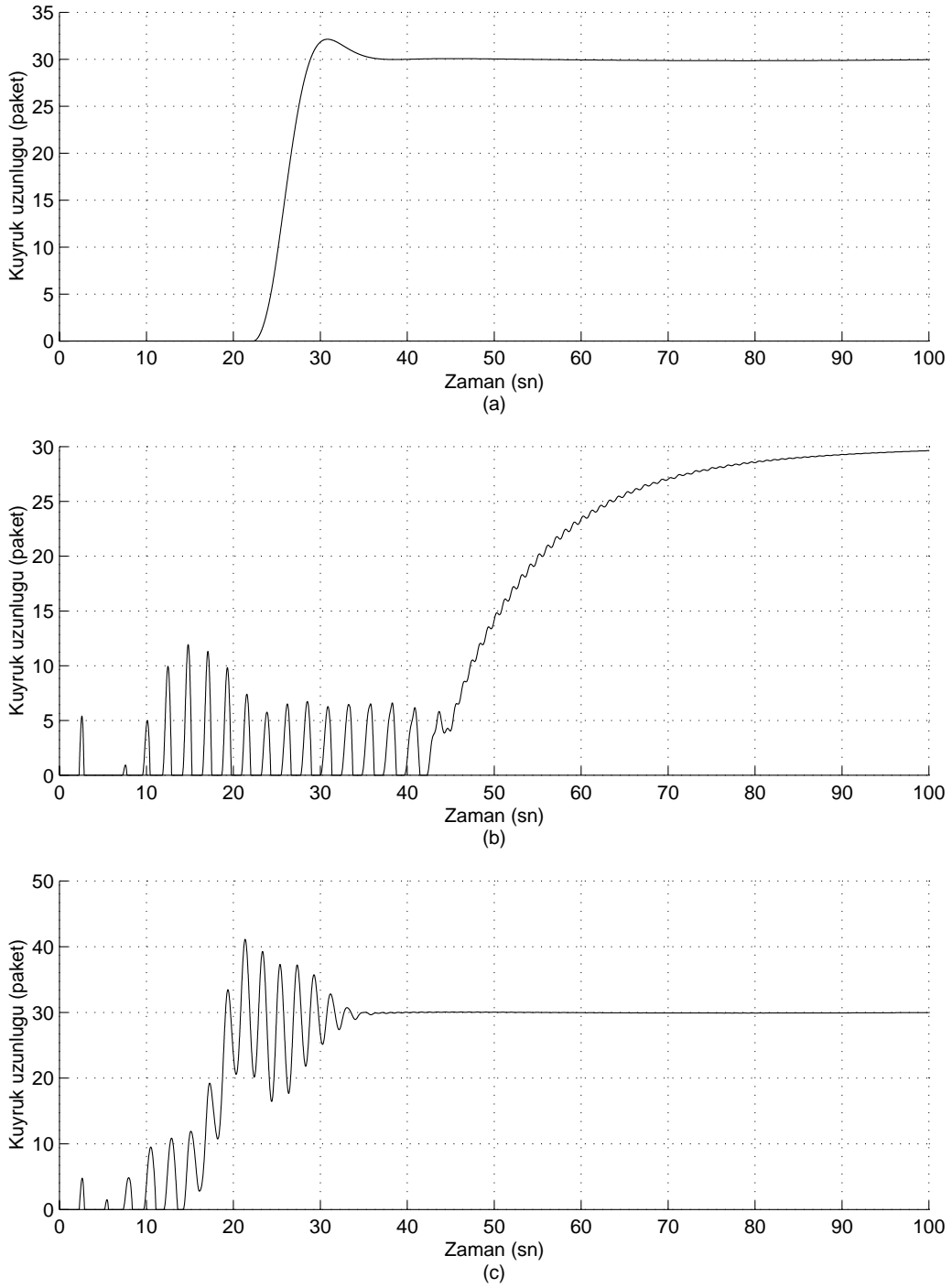
Yapılan benzetim çalışmaları ile elde edilen kontrolörlerin hem frekans tepkileri ve hem de zaman bölgesindeki performansları incelenmiş ve sonuçlar (Quet vd., 2002)'deki yöntem ile elde edilen H_∞ kontrolörler ve ayrıca Padé yaklaşıklığı kullanılmış sonlu boyutlu sistem için (Doyle vd., 1989)'daki yöntem ile elde edilen H_∞ kontrolörler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda beklenildiği gibi μ kontrolör kanallardaki gecikmelerin belirsiz kısımlarının birbirlerine göre farklılık gösterdiği durumlarda H_∞ kontrolörlere göre daha iyi sonuç vermektedir. H_∞ kontrolör ise tutucu kalmaktadır.



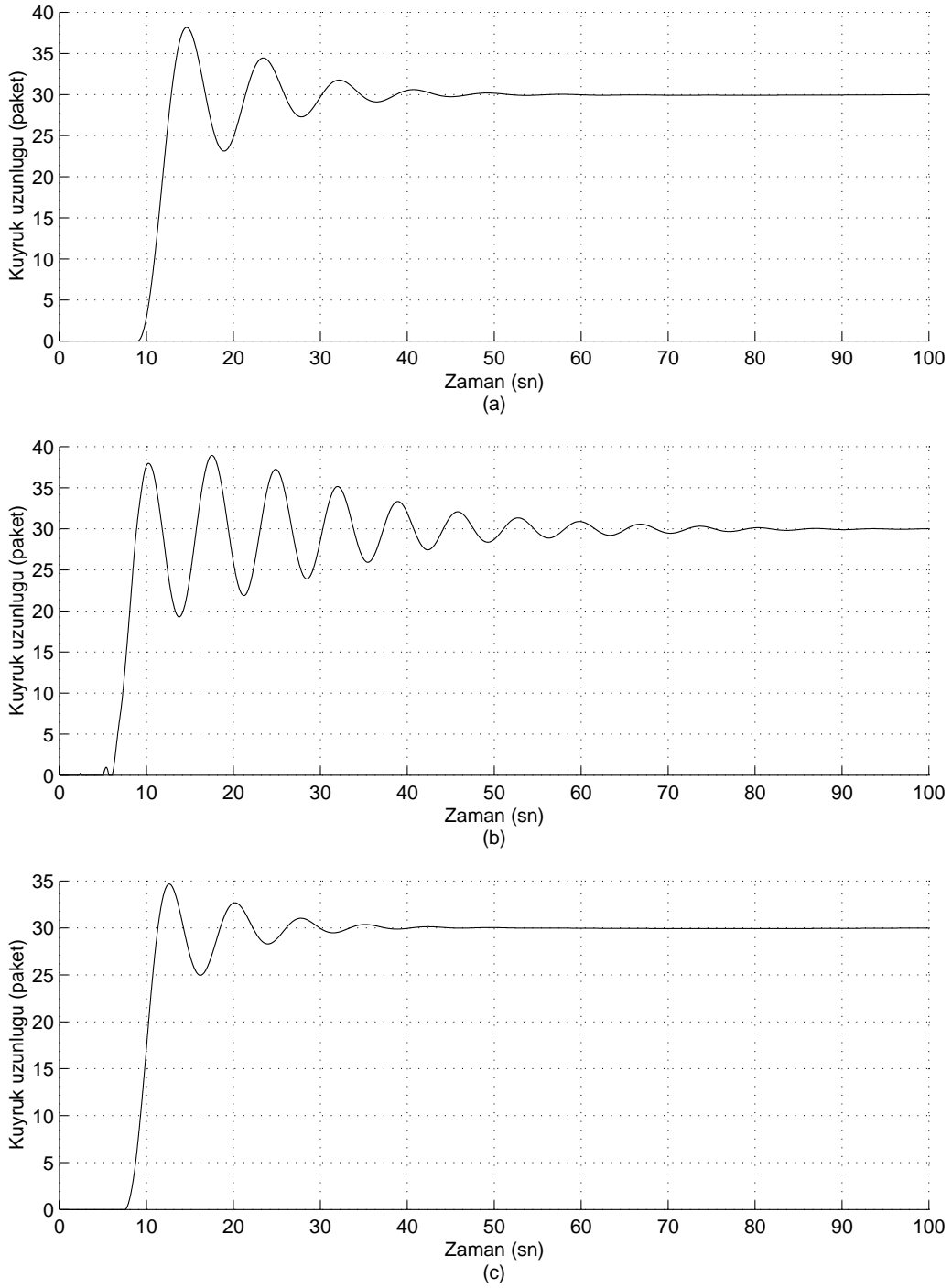
Şekil 11: Durum 1 için a) (Quet vd., 2002)'de önerilen yaklaşımla tasarlanan H_{∞} , b) Padé yaklaşıklığı kullanılarak tasarlanan H_{∞} , c) μ kontrolör için elde edilen kuyruk uzunluğu



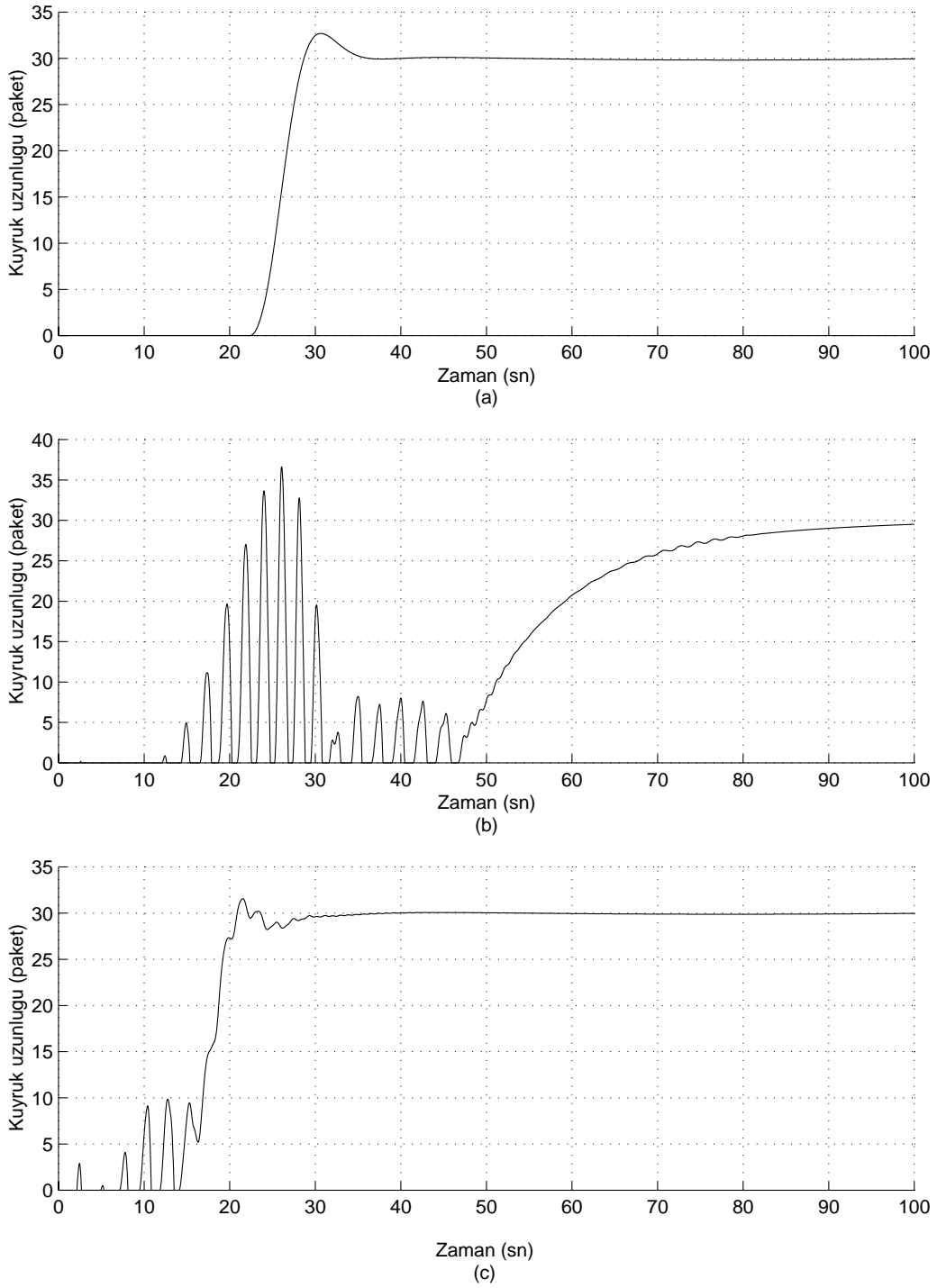
Şekil 12: Durum 2 için a) (Quet vd., 2002)'de önerilen yaklaşımla tasarlanan H_{∞} , b) Padé yaklaşımlığı kullanılarak tasarlanan H_{∞} , c) μ kontrolör için elde edilen kuyruk uzunluğu



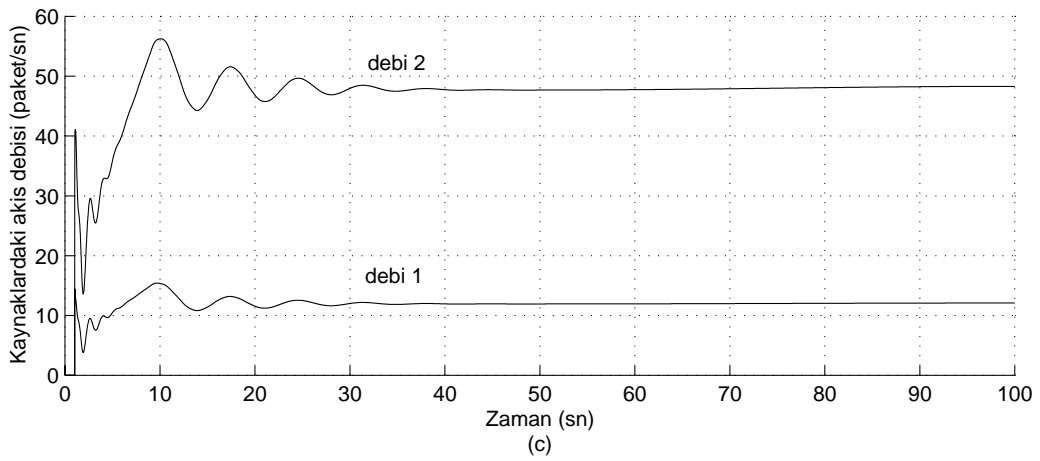
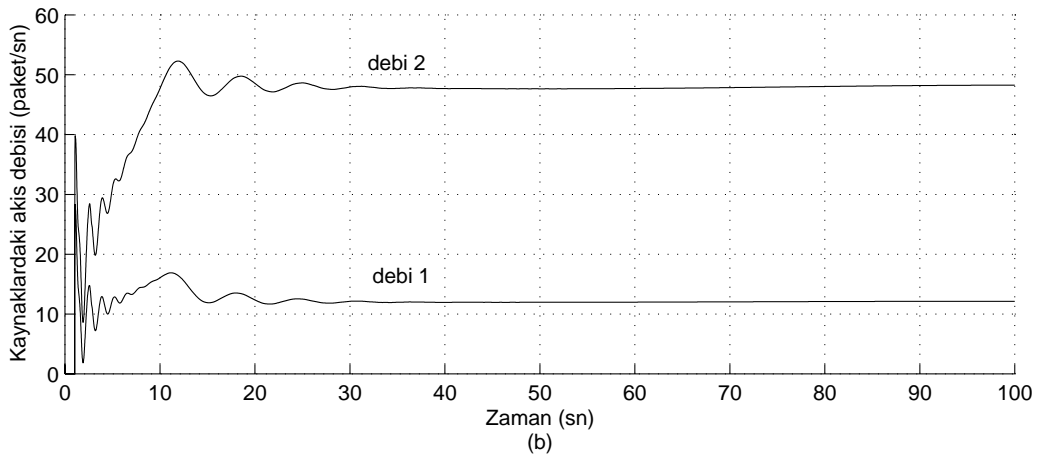
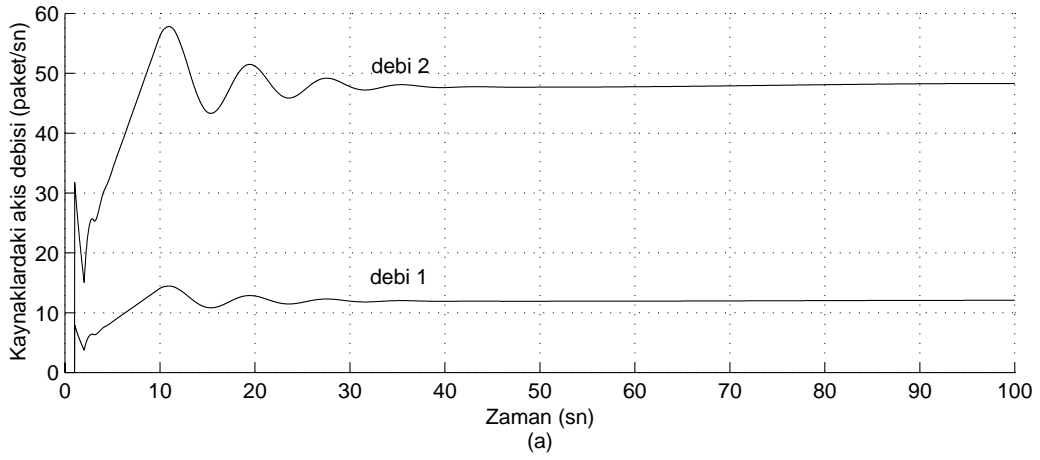
Şekil 13: Durum 3 için a) (Quet vd., 2002)'de önerilen yaklaşımla tasarlanan H_{∞} , b) Padé yaklaşımlığı kullanılarak tasarlanan H_{∞} , c) μ kontrolör için elde edilen kuyruk uzunluğu



Şekil 14: Durum 4 için a) (Quet vd., 2002)'de önerilen yaklaşımla tasarlanan H_{∞} ,
b) Padé yaklaşıklığı kullanılarak tasarlanan H_{∞} , c) μ kontrolör için elde edilen kuyruk uzunluğu



Şekil 15: Durum 3.b için a) (Quet vd., 2002)'de önerilen yaklaşımla tasarlanan H_{∞} , b) Padé yaklaşıklığı kullanılarak tasarlanan H_{∞} , c) μ kontrolör için elde edilen kuyruk uzunluğu



Şekil 16: Durum 2 için a) (Quet vd., 2002)'de önerilen yaklaşımla tasarlanan H_{∞} , b) Padé yaklaşımı kullanılarak tasarlanan H_{∞} , c) μ kontrolör için elde edilen kaynaklardaki akış debisi

KAYNAKLAR

- ATM Forum Traffic Management AF-TM-0056.000 (1996). *The ATM Forum Traffic Management Specification Version 4.0*.
- Altman, E. ve Başar, T. (1997). Multi-user rate-based flow control with action delays: a team-theoretic approach, *Proc. of 36th Conference on Decision and Control*, San Diego CA, A.B.D., 2916–2921.
- Altman, E., Başar, T. ve Srikant, R. (1997). Multi-user rate-based flow control with action delays: a team-theoretic approach, *Proc. of 36th Conference on Decision and Control*, San Diego CA, A.B.D., 2387–2392.
- Amato, F., Ciniglio, U., Corrado, F. ve Iervolino, R. (2004). ' μ Synthesis for a small commercial aircraft: design and simulator validation, *Journal of Guidance, Control and Dynamics* 27, 3, 479–490.
- Ataşlar, B. (2004). Veri iletişim ağlarında gürbüz akış kontrolü, *Doktora Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.
- Ataşlar, B., Quet, P. F., İftar, A., Özbay, H., Kang, T. ve Kalyanaraman S. (2000). Robust rate-based flow controllers for high-speed networks: The case of uncertain time-varying multiple time-delays, *Proc. of the American Control Conference*, Chicago, IL, A.B.D., 2804–2808.
- Balas, G. J., Doyle, J. C., Glover, K., Packard, A. ve Smith, R. (1995). *μ Analysis and Synthesis Toolbox: User's Guide*, The MathWorks, Inc., Natick, MA, A.B.D.
- Benmohamed, L. ve Meerkov, M. (1993). Feedback control of congestion in packet switching networks: the case of a single congested node *IEEE/ACM Trans. on Networking* 1, 693–707.
- Bonomi, F. ve Fendick, K. W. (1995). The rate-based flow control framework for the available bit rate ATM service, *IEEE Network* 25–39, Mart/Nisan.
- Doyle, J. C. (1982). Analysis of feedback systems with structured uncertainties, *IEE Proceedings*, 129, 242–252.
- Doyle, J. C. (1985). Structured uncertainty in control system design, *Proceedings of the 24th IEEE Conference on Decision and Control*, Ft. Lauderdale, FL, A.B.D., 260–265.
- Doyle J. C., Glover, K., Khargonekar, P. P. Francis, B. A. (1989). State-space solutions to standart H_2 and H_∞ control problems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34, 831–847.
- Foias, C., Özbay, H. ve Tannenbaum, A. (1996). *Robust Control of Infinite Dimensional Systems: Frequency Domain Methods*, Lecture notes in control and information sciences, No. 209, Londra: Springer-Verlag.
- Kimura, H. (1995). *Chain-Scattering Approach to H_∞ Control*, Boston: Birkhäuser.
- Meinsma, G. ve Mirkin, L. (2003). H_∞ control of systems with multiple I/O delays, *Proc. of the 4th IFAC Workshop on Time-Delay Systems (TDS'03)*, Rocquencourt, Fransa.
- Meinsma, G. ve Zwart, H. (2000). On H_∞ control for dead-time systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* 45, 272–285.
- Mirkin, L. ve Tadmor, G. (2002). H_∞ control of systems with I/O delay: A review of some problem-oriented methods, *IMA J. Math. Control Information*, 19, 185–199.
- Özbay, H., Kalyanaraman, S. ve İftar, A. (1998). On rate-based congestion control in high-speed networks: Design of an H_∞ based flow controller for single bottleneck, *Proc. of the American Control Conference*, Philadelphia, PA, A.B.D., 2376–2380.
- Özbay, H., Kang, T., Kalyanaraman, S. ve İftar, A. (1999). Performance and robustness analysis of an H_∞ based flow controller, *Proc. of the Conference on Decision and Control* Phoenix, AZ, A.B.D., 2691–2696.
- Parekh, A. K. ve Gallager, R. G. (1994). A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: the multiple node case, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2, 137–150.
- Quet, P. F., Ataşlar, B., İftar, A., Özbay, H., Kalyanaraman S. ve Kang, T. (2002). Rate-based flow controllers for communication networks in the presence of uncertain time-varying multiple time-delays, *Automatica*, 38, 917–928.
- Ramakrishnan, K. K. ve Newman, P. (1995). Integration of rate and credit schemes for ATM flow control *IEEE Network*, 49–56, Mart/Nisan.
- Rohrs, C. E. ve Berry, R. A. (1997). A linear control approach to explicit rate feedback in ATM networks, *Proc. of INFOCOM '97*, Kobe, Japonya, 277–282.

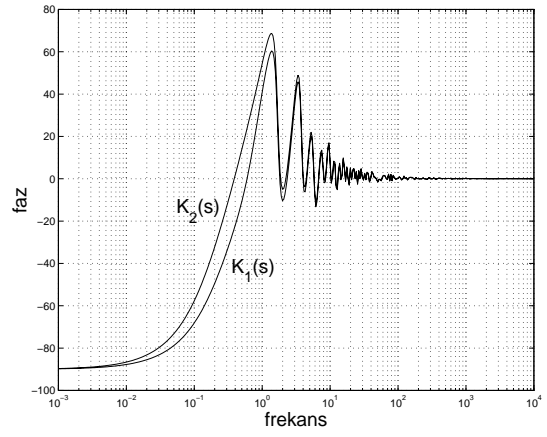
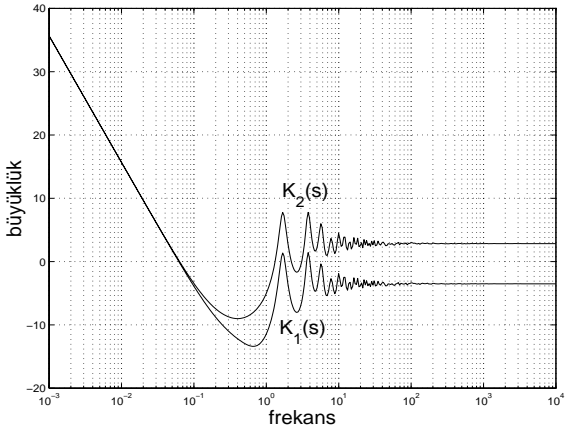
Toker, O. ve Özbay, H. (1998). On the complexity of purely complex μ computation and related problems in multidimensional systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* 43, 409–414.

Zhou, K., Doyle, J. C., Glover, K. (1996). *Robust and Optimal Control*, Prentice-Hall.

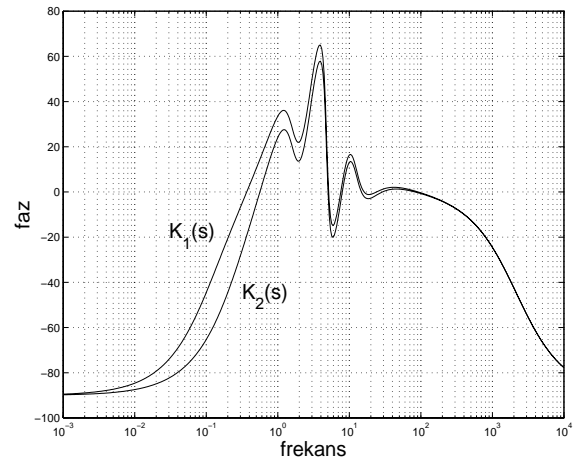
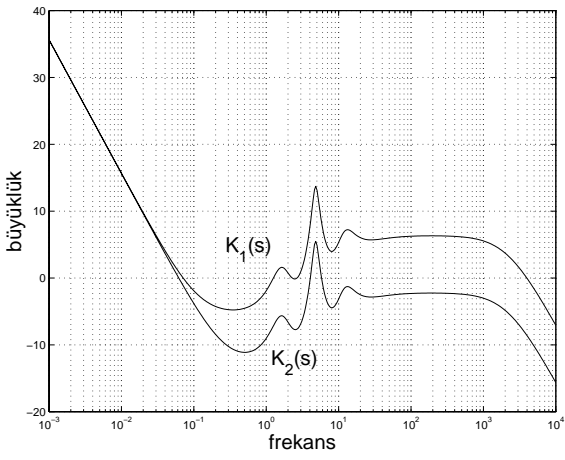


Banu Ataşlar, 1973 yılı Eskişehir doğumlu. Lisans, Yüksek Lisans ve doktora derecelerini Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden sırasıyla 1994, 1998 ve 2004 yıllarında aldı. Kendisi ayrıca 1994 yılından bu yana Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde araştırma görev-

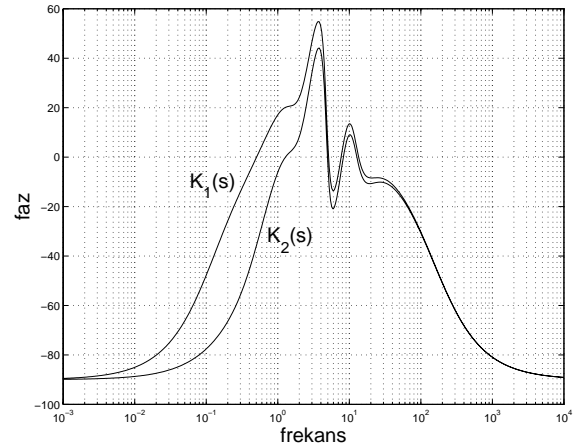
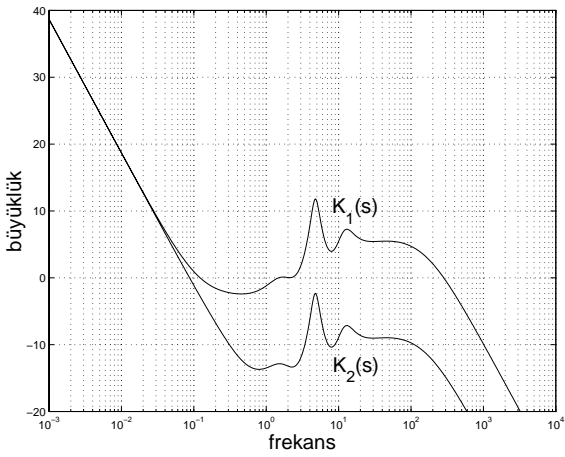
lisi olarak görev yapmaktadır. İlgili alanları: Büyük ölçekli sistemlerde (özellikle veri-iletişim ağlarında ve trafik ağlarında) yönlendirme ve akış kontrolü; Gürbüz kontrol.



(a)

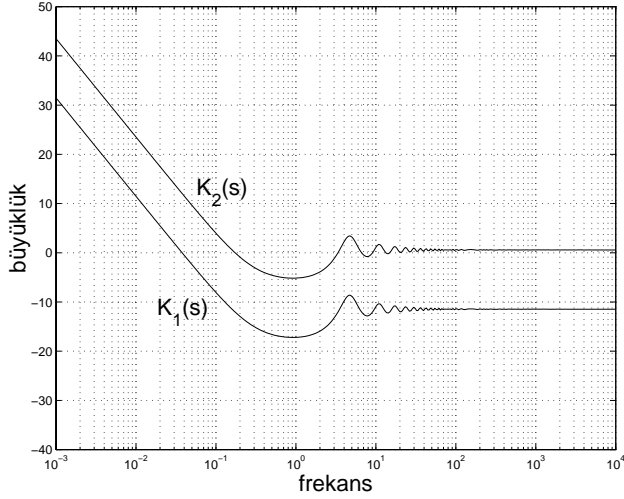


(b)

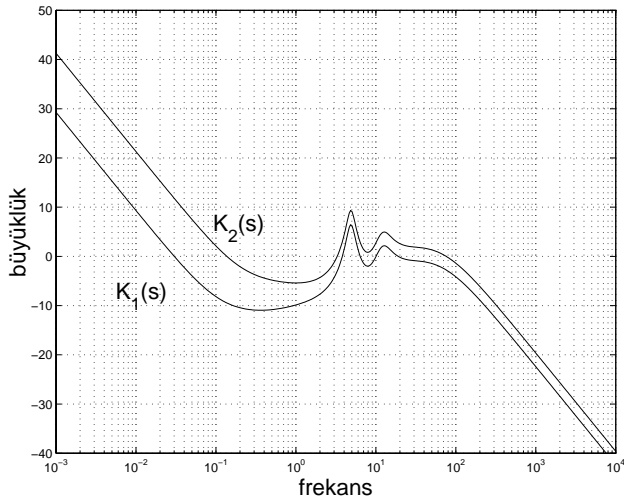
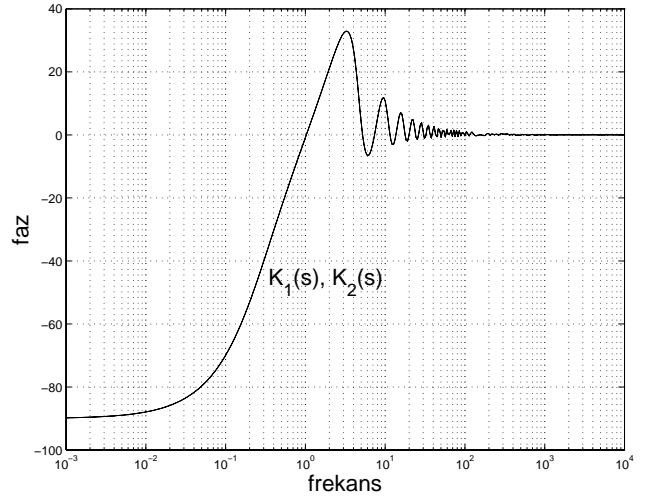


(c)

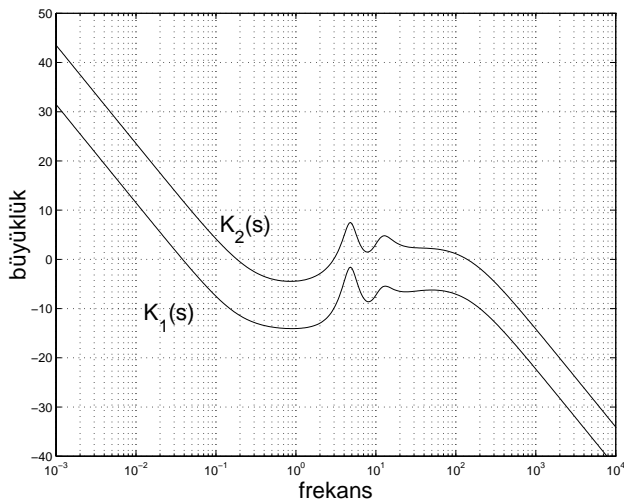
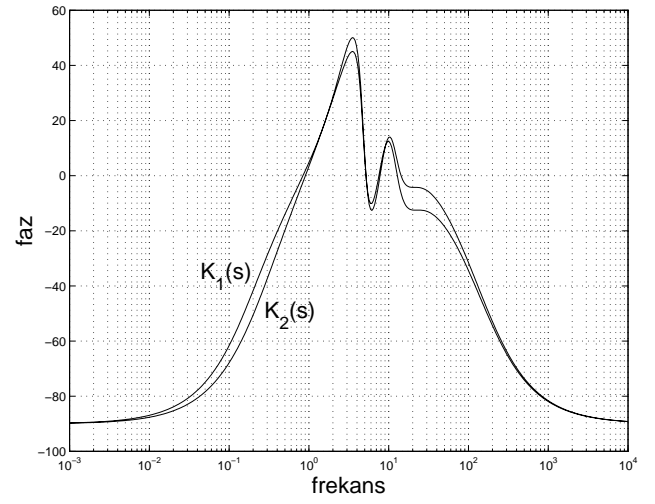
Şekil 7: Durum 1 için a) (Quet vd., 2002)'de önerilen yaklaşımla tasarlanan H_∞ , b) Padé yaklaşımlığı kullanılarak tasarlanan H_∞ , c) μ kontrolörün frekans tepkisi



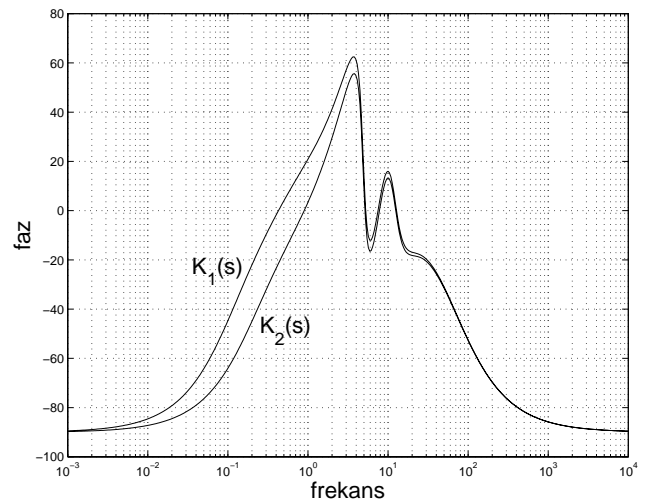
(a)



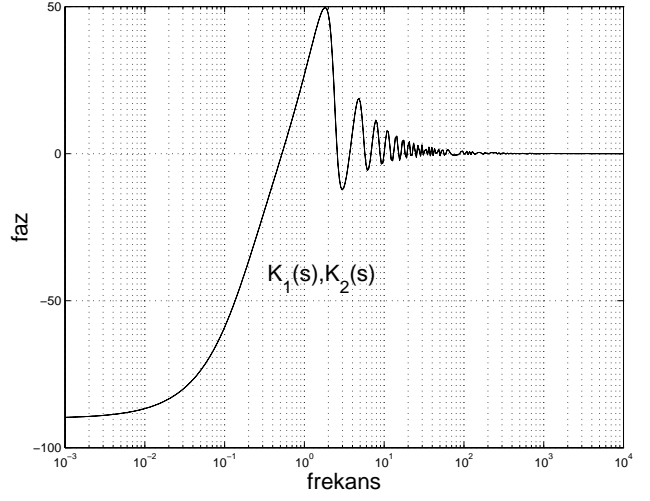
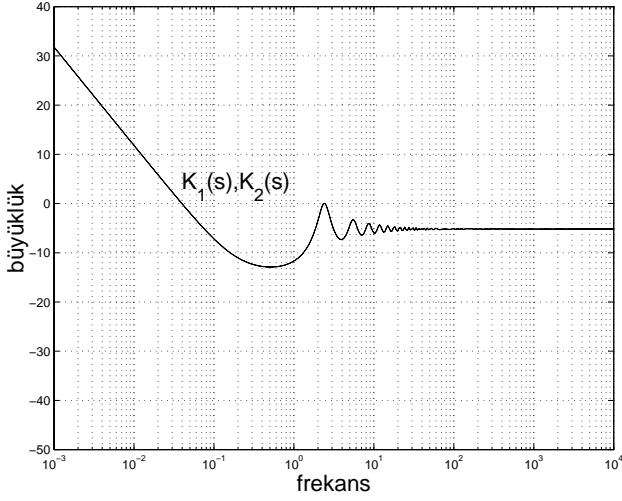
(b)



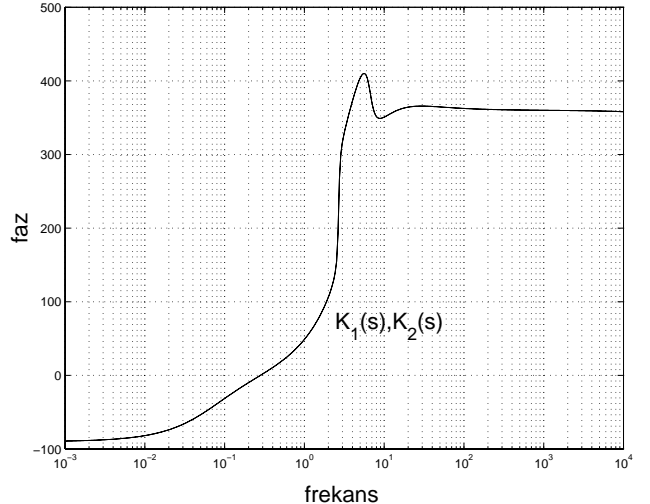
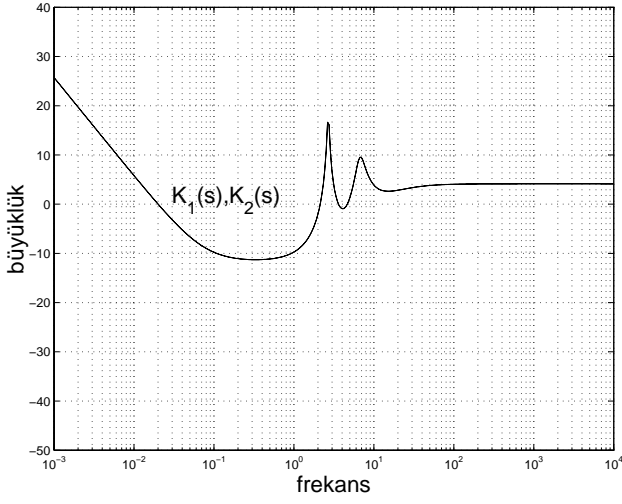
(c)



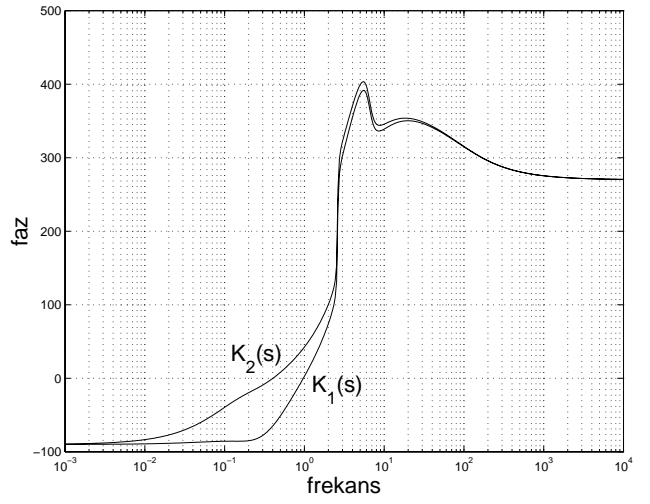
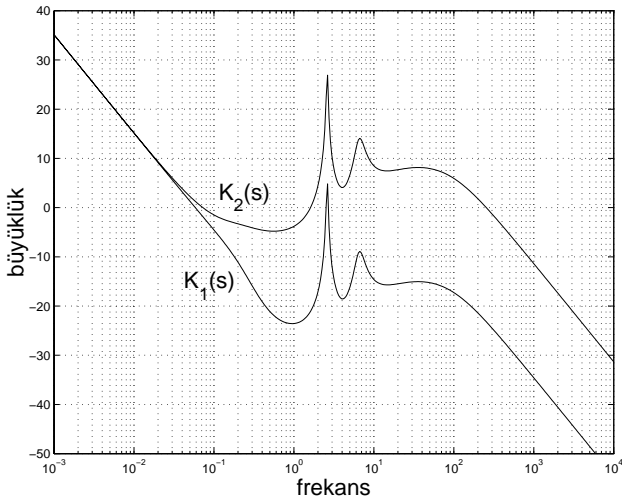
Şekil 8: Durum 2 için a) (Quet vd., 2002)'de önerilen yaklaşımla tasarlanan H_{∞} , b) Padé yaklaşıklığı kullanılarak tasarlanan H_{∞} , c) μ kontrolörün frekans tepkisi



(a)

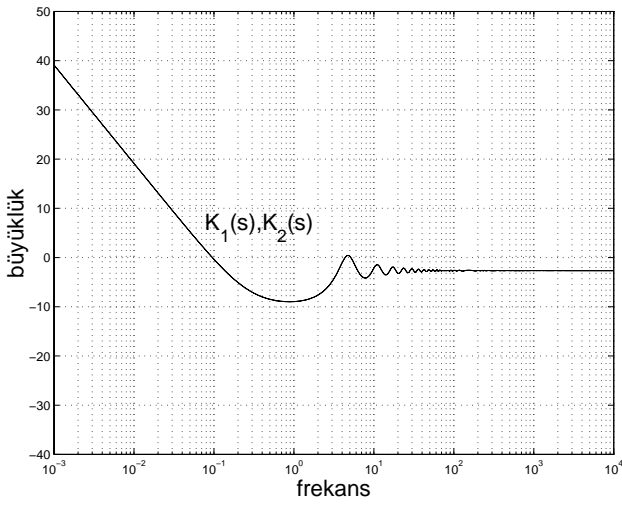


(b)

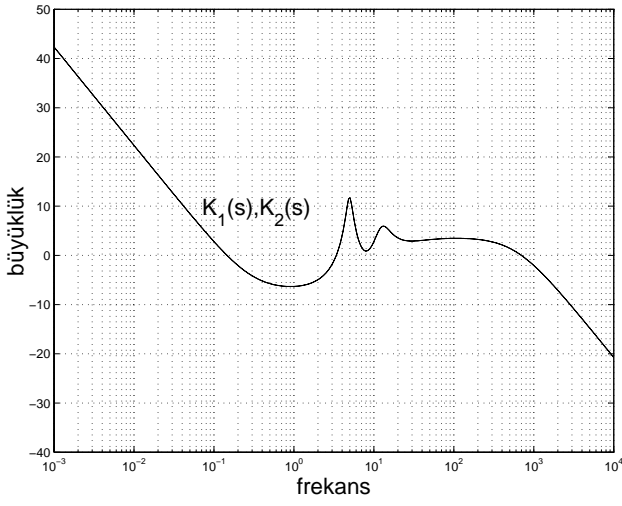
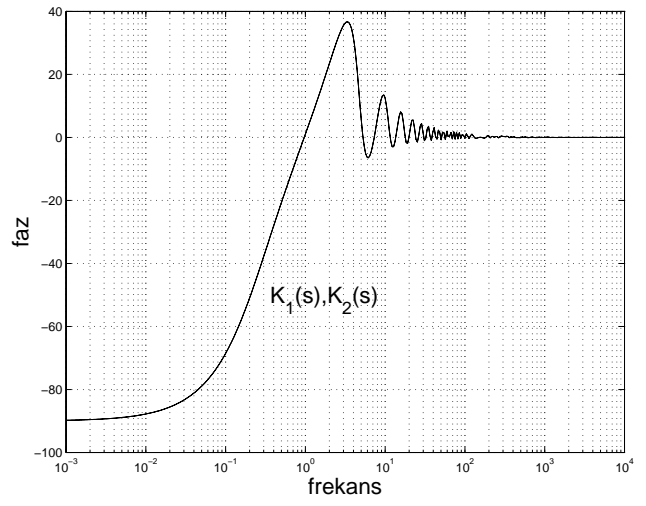


(c)

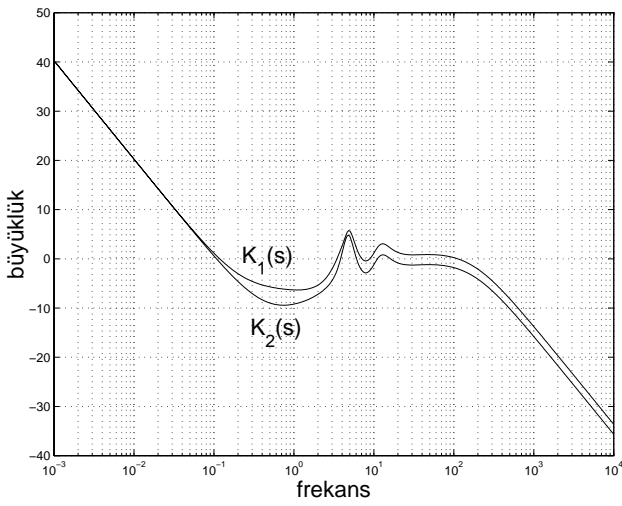
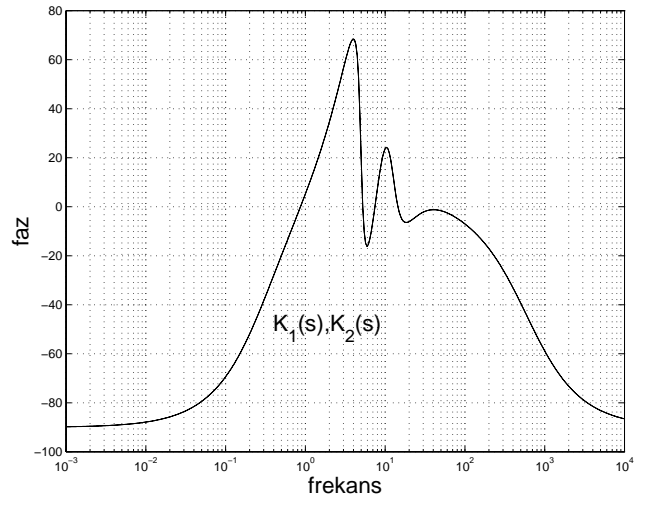
Şekil 9: Durum 3 için a) (Quet vd., 2002)'de önerilen yaklaşımla tasarlanan H_∞ , b) Padé yaklaşıklığı kullanılarak tasarlanan H_∞ , c) μ kontrolörün frekans tepkisi



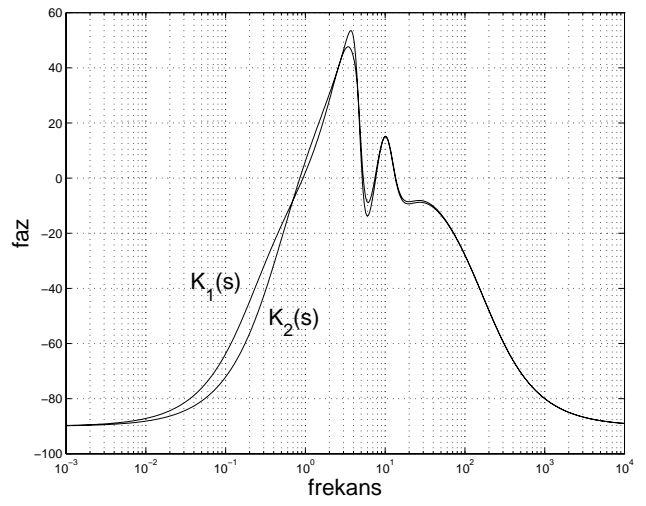
(a)



(b)



(c)



Şekil 10: Durum 4 için a) (Quet vd., 2002)'de önerilen yaklaşımla tasarlanan H_∞ , b) Padé yaklaşımı kullanılarak tasarlanan H_∞ , c) μ kontrolörün frekans tepkisi