

Bant Genişliği Kısıtı Altında Videonun En İyi İletimi (Türkçe) Optimal Streaming Under Rate Constraints (İngilizce)

Eren Gurses, Gozde Bozdagi Akar

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye
gurses,bozdagi@eee.metu.edu.tr

Nail Akar

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye
akar@ee.bilkent.edu.tr

Abstract

In this paper, we propose an optimal video streaming framework using retransmissions based on the theory of Markov Decision Processes (MDP). Using MDPs, we calculate average reward optimal policies so as to maximize the on time delivery probability of video frames in the transmission window while conforming to network-imposed available bandwidth constraints. The effectiveness of the proposed approach is validated by comparing the results with theoretically obtained rate-distortion curves corresponding to the optimal policies by using the distortion model in [2]

Özetçe

Bu çalışmada, Markov Karar Süreçlerini (MDP) kullanarak videonun yeniden gönderimler yoluyla paket ağlarda en iyi iletimini sağlayan özgün bir uygulama çerçevesi önerilmiştir. Önerilen yöntem ile ağın bant limitlerine uyan ve iletim penceresi içerisindeki video çerçevelerinin zamanında ulaşma ihtimalini ortalama ödül kriterine göre en büyüten iletim politikaları elde edilmiştir. Hesaplanan en iyi politikalar ile elde edilen sonuçlar, bu politika ile erişilebilen hata oranında teorik olarak [2] elde edilebilecek PSNR sonuçları ile karşılaştırılarak önerilen algoritmanın etkinliği gösterilmiştir.

1. Giriş

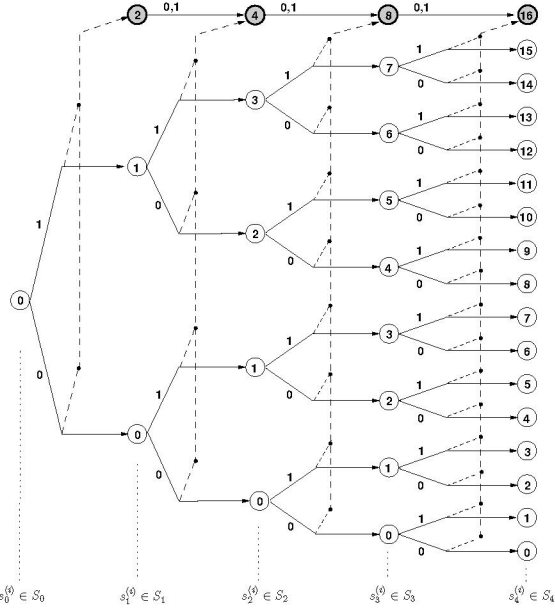
Son yıllarda, kodlama ve iletişim teknolojilerindeki gelişmeler ve Internet'in yaygınlaşmasına bağlı olarak ağ üzerinden iletilen video trafiğinde ciddi bir artış yaşanmaktadır. Kayıplı bir paket ağı olan Internet'in dinamik doğası sebebiyle, bir oturumun kullandığı kanalın bant genişliği ve karakteri kısa ve uzun zaman ölçeklerinde değişerek video iletimini çözülmesi zor bir kontrol problemi haline getirmektedir. Bu sebeple, ağ koşullarındaki değişikliklere uyum sağlayan ve en iyi uçtan uca iletim performansını sağlayan *ağa uyarlanabilir* video iletim yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek gecikmeye sahip kanallarda genelde gönderme yönünde hata düzeltimi (FEC) ve çoğul tanımlı (MD) kodlama kullanılmaktadır. Fakat bahsedilen kodlamaların getirdiği artıklık yüzünden hız-bozunum performansında kayıp oluşmaktadır, bu sebeple daha yüksek performans sağlanabilen akıllı otomatik tekrarlamaya isteği (ARQ) algoritmalarına ilgi artmaktadır. Zakhor [1]'de çerçevelerin oynatma zamanına

göre buluşsal bir önceliklendirme algoritması önermiştir. Buna karşın [3]'de Chou hız-bozunum optimizasyonu (RaDiO) yaparak gönderim yöntemini ortaya koymuştur. Bu algoritma ile hız-bozunum, kanal istatistiği, paket oynatma zamanı ve iletim geçmişi bilgilerini kullanarak hesaplanan bir Lagrange maliyet fonksiyonunu enküçütlen paket iletim politikaları bulunmuştur. Oldukça popüler olan RaDiO iletimi fikri [5]'te yol çeşitlemesi senaryosuna, [6]'te ise artan artıklık (IR) olarak da bilinen bir karma FEC/ARQ iletimi senaryosuna uyarlanmıştır. RaDiO iletim algoritmasının performansı sistemin gözlenebilirliğine bağlıdır ve gözlenebilirlik alındı (ACK) mesajları ile sağlanmaktadır. Son olarak ise [7]'te gönderen tarafında alıcının durumu bir olasılık dağılım fonksiyonuna göre tahmin edilip, en iyi politikalar kısmen gözlenebilir MDP (POMDP) modeli kullanarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada sabit oynatma gecikmesi kullanan, etkileşimsiz video iletimi uygulamalarına odaklanılmış ve iletilecek videonun hızının ağdaki tahmini bant genişliği tarafından sınırlandırıldığı varsayılmıştır. Pratikte bant genişliği tahmini, uygulama veya iletim katmanında çalışan sıkışıklık kontrolü algoritmaları ile yapılmaktadır. Daha önceki bir çalışmamızda [9] TCP protokolünün sıkışıklık kontrol algoritmasıyla sıkı sıkıya ilişkili bir video iletim uygulaması önerilmesine rağmen, bu araştırma kapsamında ağdaki tahmini bant genişliği bilgisinin kullanılan iletim protokolü tarafından sağlandığı varsayılmaktadır. Sonuç olarak bu çalışmada, bant genişliği kısıtı altında MDP teorisi kullanarak en iyi video iletimi politikaları hesaplanmış ve bu sayede alıcı tarafında izlenen video kalitesi (PSNR) en büyütülmüştür. Önerilen yöntem, hiç bozunum kontrolü yapmayan ve sabit FEC kodu kullanarak bozunum kontrolü yapan sistemler ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 2'de önerilen MDP modeli ve çözüm yöntemi anlatılmış, Bölüm 3'te simülasyon sonuçları anlatılmış ve son olarak bu çalışmada varılan sonuçlar Bölüm 4'te değerlendirilmiştir.

2. Sistem Mimarisi

Bu çalışmada B bit hızına ayarlanabilir ve $1/\Delta T$ çerçeve hızı ile kodlanmış bir videonun iletimi için MDP modeli kullanarak en iyi yeniden gönderim politikalarını hesaplayan bir algoritması önerilmiştir. Bu önerilen algoritma, hem gerçek zamanda kodlanan videoların, hem de ölçeklenebilir olarak önceden kodlanmış videoların iletiminde kullanılabilir. Her iki



Şekil 1: $M = 5$ için durum değişkenleri $(s_0^{(i)}, s_1^{(i)}, \dots, s_{M-1}^{(i)})$

senaryoda da INTRA periyodu T olan I-P-P olarak kodlanmış videoların sabit T_p oynatma gecikmesi kullanılarak iletildiği varsayılmıştır. Ayrıca sistemin analizini kolaylaştırmak için video çerçeveleri sadece bir pakete denk gelecek şekilde paketlenmiştir, dolayısıyla yazının geri kalanında paket ve çerçeve birbirinin yerine kullanılabilir. Kanalda $[0, 0.1]$ aralığında hata olabileceği ve ağdan kaynaklı bant genişliği kısıtının C ile gösterildiği varsayılmaktadır. Genelde sıkışıklık kontrolü algoritmaları tarafından bulunan C 'nin hesaplanması bu çalışmanın kapsamı dışında düşünülmüş ve bu bilginin uygulamaya sağlandığı varsayılmıştır. Bu durumda video-nun B bit hızında kodlandığı düşünülürse $C - B$ kadar bir bant genişliğinin yeniden iletimler için kullanılabileceği ve $\lambda = C/B > 1$ 'nin ise her gönderim fırsatında ortalama olarak gönderilen paket sayısını vereceği öngörülmektedir. Bu bağlamda verilen bir λ için bulunan en iyi politikalar, bu kısıt altında yeniden iletimlerin nasıl yapılacağını belirleyecektir. Problemin diğer bir ilginç boyutu ise PSNR'ı en büyüyen λ^* 'ın bulunmasıdır. Sonuç olarak, önerilen algoritmanın sadece C ve B 'nin oranına bağlı olması sayesinde, kanal istatistikleri aynı kaldığı sürece ağdaki bant genişliği değişikliklerinden etkilenmeyen politikalar elde edilebilmektedir.

Bu problemin çözümü için bir yandan bant genişliği sınırlamasına uyarken, bir yandan da ortalama ödül kriterine göre iletim penceresindeki çerçevelerin zamanında alıcıya ulaşma ihtimallerini en büyütülmesine çalışılacaktır. Bu sistem MDP olarak modellendikten sonra LP ile sürekli rejim çözümleri elde edilecektir. MDP modelinin kullandığı Markov zinciri $\mathbf{X} = \{X_n : n \in \mathbb{Z}^+, X_n \in \mathcal{I}\}$ olarak gösterildiğinde, sistemin n . karar anında bulunduğu durum X_n olarak belirtilir. Sistem $X_n = i \in \mathcal{I}$ durumunda iken $A_n = a \in \mathcal{A}$ eylemini seçerek yeni $X_{n+1} = j \in \mathcal{I}$ durumuna $P_{ij}(a)$ olasılıkla ulaşır.

M tane çerçeveden oluşan iletim penceresi sistem durumunu $i = X_n$ belirler. Öyle ki, bu penceredeki her çerçeveye ait iletim ve gözlem geçmişi ilgili bir durum değişkeni $s_k^{(i)}$ ile gösterilir. Bu durum değişkenindeki $k \in$

$\{0, \dots, M-1\}$, iletim penceresindeki kaçınıcı eski çerçeveden bahsedildiğini ifade eder. Bu tanımın ardından sistemin durumu $i = (s_0^{(i)}, s_1^{(i)}, \dots, s_{M-1}^{(i)})$ olarak ifade edilir. $s_k^{(i)}$ durum değişkenlerinin neye karşılık geldiğini $M = 5$ için çizilen ve $S_0 = \{0\}$, $S_1 = \{0, 1, 2\}$, $S_2 = \{0, \dots, 4\}$, $S_3 = \{0, \dots, 8\}$, ve $S_4 = \{0, \dots, 16\}$ olarak tanımlandığı Şek. 1'den görebiliriz. Bunu takiben, durum uzayı $\mathcal{I} = S_0 \times S_1 \times \dots \times S_{M-1}$ olarak gösterilir ve $i \in \mathcal{I}$ durumundayken seçilecek eylem $a_k \in \{0, 1\}$ için $a = [a_0 \dots a_{M-1}]$ olarak ifade edilir. Burada 1 çerçeveyi göndermek 0 ise göndermemek anlamına gelmektedir.

Verilen bir durum eylem çifti (i, a) için ödül fonksiyonu $r(i, a)$, iletim penceresindeki en eski çerçevenin oynatılma zamanına kadar alıcıya ulaştırılma olasılığı olarak belirtilmiştir.

$$r(i, a) = 1 - \epsilon_{s_{M-1}^{(i)}}(a, M-1), \quad (1)$$

Burada, $\epsilon_{s_k^{(i)}}(a, k)$ ise i durumundaki iletim penceresinin k . çerçevesinin a eylemi sonunda hata olasılığıdır.

$$\epsilon_{s_k^{(i)}}(a, k) = \begin{cases} \prod_{m=0, q_{s_k^{(i)}}(a, m)=1}^k P\{FTT > T_p - m\Delta T | RTT > (k-m)\Delta T\} & , s_k^{(i)} \text{ son değil} \\ 0 & , s_k^{(i)} \text{ son} \end{cases} \quad (2)$$

Durum geçiş olasılığı $P_{ij}(a) = \prod_{k=0}^{M-1} P_{ij}(a, k)$ ise çerçeve başına düşen durum geçiş olasılıklarının $P_{ij}(a, k)$ çarpımına eşittir.

$$P_{ij}(a, k) = \begin{cases} 1 & , s_k^{(i)} \text{ son} \\ 1 - p_{s_k^{(i)}}(a, k), & s_k^{(i)} \text{ son değil, } s_{k+1}^{(j)} \text{ son değil} \\ p_{s_k^{(i)}}(a, k) & , s_k^{(i)} \text{ son değil, } s_{k+1}^{(j)} \text{ son değil} \\ 0 & , s_{k+1}^{(j)} \text{ durumuna } s_k^{(i)} \text{'den ulaşamaz} \end{cases} \quad (3)$$

Burada $p_{s_k^{(i)}}(a, k)$ ise a eylemini kullanarak k . çerçeve için son duruma (koyu renkli daireler Şek. 1) ulaşamama olasılığını verir.

$$p_{s_k^{(i)}}(a, k) \triangleq \prod_{m=0, q_{s_k^{(i)}}(a, m)=1}^k P\{RTT > (k-m+1)\Delta T | RTT > (k-m)\Delta T\} \quad (4)$$

Son olarak Denk. 4 ile bir çerçeveye ait iletim geçmişi kolaylık olsun diye bir tane $q_{s_k^{(i)}}(a, m)$ değişken içinde toplanabilir.

$$[q_{s_k^{(i)}}(a, 0) \dots q_{s_k^{(i)}}(a, k)] \triangleq \begin{cases} [h_{s_k^{(i)}}(0) \dots h_{s_k^{(i)}}(k-1), a_k] & , s_k^{(i)} \text{ son değil} \\ \text{tanımlı değil} & , \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (5)$$

Maliyet fonksiyonu ise durum geçişi olurken iletim fırsatlarında gönderilen paketlerin toplamı olarak $c(i, a) = \sum_{k=0}^{M-1} a_k$ tanımlanır. Daha sonra, $\lambda = C/B$ bu çalışmada çözülecek olan kısıtlı en iyileme probleminin maliyet fonksiyonuna, $c(i, a)$, bir kısıt olarak getirilecektir.

Kanal istatistiklerinin, ödül-maliyet fonksiyonları, oynatma gecikmesi ve λ 'nın bilinmesi durumunda LP kullanarak eniyi politikalar π^* Denk. 6, 7 gösterildiği gibi bulunabilir. Burada $\pi_a(i)^*$ politikası $a \in A(i)$ eylemini seçme olasılığına, x_{ia} ise sürekli rejimde (i, a) çiftine uğranması olasılığına karşılık gelir. Ayrıca Denk. 6 verilen amaç fonksiyonu, bir paketin zamanında ulaşma olasılığını $P_{succ}(\lambda) = \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{a \in A(i)} x_{ia}^* r(i, a)$ olarak verir.

Adım 1. Simplex algoritması ile en iyi temel çözümü x_{ia}^* hesapla

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{a \in A(i)} r(i, a) x_{ia} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{a \in A(i)} c(i, a) x_{ia} \leq \lambda \\ \sum_{a \in A(j)} x_{ja} - \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{a \in A(i)} P_{ij}(a) x_{ia} = 0, j \in \mathcal{I} \\ \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{a \in A(i)} x_{ia} = 1 \\ x_{ia} \geq 0, \text{ bütün } i, a \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

Adım 2. Herhangi $i \in I_0 = \{i \mid \sum_{a \in A(i)} x_{ia}^* > 0\}$ durumu için karar:

$$\pi_a(i)^* = \begin{cases} x_{ia}^* / \sum_{a' \in A(i)} x_{ia'}^*, & a \in A(i) \text{ ve } i \in I_0 \\ \text{rastgele}, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (7)$$

2.1. Video Bozunum Modeli ve λ^* 'in Hesaplanması

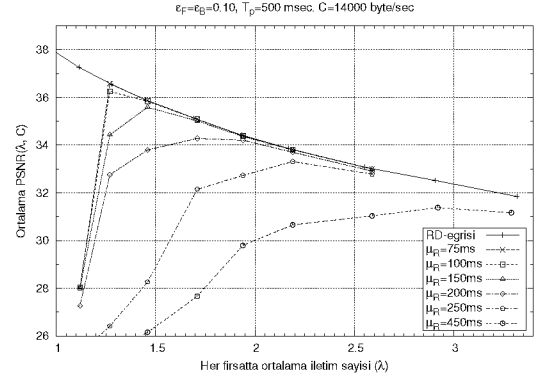
Video kalitesindeki toplam bozunum, sıkıştırma ve kanal kayıplarından kaynaklı D_e ve D_v bozunumlarının toplamına eşittir. Bu çalışmada basit bir hata kamufleji yöntemi olan kayıp çerçeveyi bir öncekiyle değiştirme kullanılmıştır ve σ_{u0}^2 bu kamuflejden kaynaklı, zaman ortalaması alınmış MSE'yi (ortalama karesel hata) vermektedir. Hatanın diğer çerçevelere olan etkisini incelemek için, T 'lik bir intra periyodunun ilk çerçevesinin ($k = 0$) kaybolmasıyla oluşan hata sinyali Denk. 8'de $\sigma_v^2[k]$ olarak verilmiştir [2]. Burada $k \in [0, T-1]$ çerçeve numarası ve $1 - P_{succ}(\lambda)$ ortalama çerçevenin zamanında ulaştırılmama olasılığı olarak verilmiştir.

$$\sigma_v^2[k] = \sigma_{u0}^2(1 - P_{succ}(\lambda)) \frac{1 - \gamma^k}{1 - \beta^k}, \text{ for } k \in [0, T-1] \quad (8)$$

Öteki parametreler $\beta = 1/T$ intra çerçeve oranına ve γ ise kaçak faktörüne karşılık gelmekte olup ve $\beta, \gamma \in [0, 1]$ olarak tanımlıdır. Nümerik en küçültme yöntemi ile verilen video için $\gamma = 0.4$ olarak hesaplanmıştır. Son olarak $D_v(\lambda)$, T tane hata sinyalinin üstdüşümü olarak Denk. 9 gibi hesaplanır [2].

$$D_v(\lambda) = \sigma_{u0}^2(1 - P_{succ}(\lambda)) \sum_{t=0}^{T-1} \frac{1 - \gamma^t}{1 - \beta^t} \quad (9)$$

Diğer taraftan, $D_e(B)$ 'nin değeri videonun kodlama bit hızına B bağlıdır ve $B = C/\lambda$ olduğu için, $D_e(B) = D_e(\lambda, C)$ olarak gösterilebilir. Sonuç olarak hesaplanan görüntü kalitesi $PSNR(\lambda, C) = 10 \log(\frac{255^2}{D_e(\lambda, C) + D_v(\lambda)})$



Şekil 2: Sabit C 'de farklı μ_R 'ler için hesaplanan $PSNR(\lambda, C)$

olarak ifade edilir. Bütün bu tanımlardan sonra, en iyi seçilebilecek hız oranı (kısıtı) λ^* , video kalitesini, $PSNR(\lambda, C)$, en büyüten değer olarak bulunabilir Denk. 10.

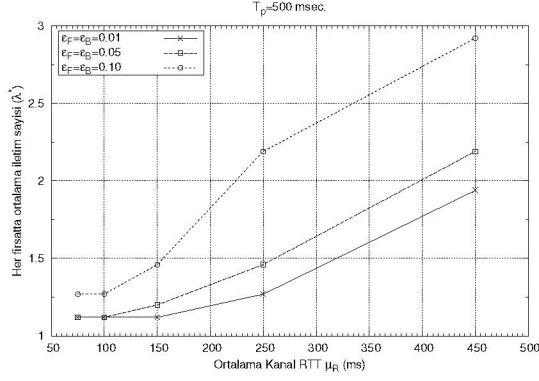
$$\lambda^* = \arg \max_{\lambda} PSNR(\lambda, C) \quad (10)$$

3. Simülasyon Sonuçları

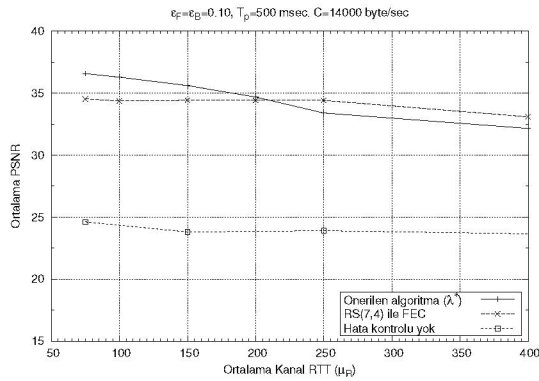
Bu bölümdeki sonuçlar, belirlenen bir kanal modeline göre kanal hatası ve gecikmesi yaratabilen bir simülatör kullanarak elde edilmiştir. Bütün simülasyonlarda κ kadar kaydırılmış gamma dağılımlı kanal gecikmesi kullanılmış ve gamma dağılımının $p_R(\tau | \text{not lost}) = \frac{\alpha}{\Gamma(n)} (\alpha(\tau - \kappa))^{n-1} e^{-\alpha(\tau - \kappa)}$ diğer parametreleri olan n ve α ise RTT'nin gözlenmesi ile edilmiştir. Bu doğrultuda, $\alpha = (\mu - \kappa)/\sigma_R^2$ ve $n = (\mu_R - \kappa)\alpha$ olarak elde edilmiştir. Diğer taraftan kanal hataları (ϵ_F ve ϵ_B), gecikme dağılımına ∞ 'de bir dürtü olarak eklenmiştir [3]. Sonuç olarak bütünsel kanal gecikmesi $p_R(\tau) = (1 - \epsilon_R) \cdot p_R(\tau | \text{not lost})$ olarak ifade edilmiştir. Simülasyonlarda hata ve ortalama gecikme $\epsilon_F, \epsilon_B \in [0.01, 0.10]$, $\mu_R \in [50, 450]$ ms. olarak ve standart sapma $\sigma_R = 0.35(\mu_R - \kappa)$ seçilmiştir.

Bu çalışmada ölçeklenebilir video yerine, gerçek zamanlı olarak kodlanan ve nicemleme parametrelerini (QP) değiştirerek hız ayarlaması yapabilen video kullanılmıştır. Bütün deneylerde H.264 kodlayıcısı [10] ile intra periyodu $T = 50$ çerçeve olan ve I-P-P olarak kodlanmış video kullanılmıştır. Kodlayıcının QP parametreleri [25, 34] arasında seçilmiş ve FOREMAN, CARPHONE videolarından 522 çerçeve 10 fps ile örneklendikten sonra kodlanmıştır. Kısa gibi görünen bu çerçeve sayısı, videoları başa sararak istenilen süreye kadar uzatılabilmektedir. Böylece deneylerde 1000 sn'lik simülasyonlar yapılmış ve toplam 10000 çerçeve kullanılmıştır. Ayrıca deneylerde $C = 14000$ bytes/sec, oynatma gecikme süresi $T_p = 500$ ms olarak belirlenmiş ve buna karşılık gelen $M = 5$ iletim fırsatı kullanılmıştır.

İlk deneyde belli bir $\mu_R \in [75, 450]$ aralığı ve $\lambda \in \{1.12, 1.27, 1.46, 1.71, 1.94, 2.19, 2.59, 2.92, 3.29\}$ değerleri için LP problemi çözülmüş ve verilen λ kısıtı altında bulunan en iyi politikanın bozunum kontrol performansı gösterilmiştir. Kanal hatasını $\epsilon_F = \epsilon_B = 0.10$ olarak belirledikten sonra



Şekil 3: Farklı kanal hata ve gecikmeleri için λ^* değerleri



Şekil 4: Farklı gecikmeler için algoritmaların karşılaştırılması

verilen λ ile elde edilebilecek $1 - P_{succ}(\lambda)$ hesaplanmış ve sonrasında Böl. 2.1 anlatılan bozunum modelini kullanarak Şek. 2'deki $PSNR(\lambda, C)$ sonuçları elde edilmiştir. Eşitliklerden de anlaşılacağı gibi önerilen sistemin başarılı iletime performansı olan $P_{succ}(\lambda)$, C 'den bağımsız olmakla beraber, seçilebilecek en iyi kısıt olan λ^* değeri, $PSNR(\lambda, C)$ fonksiyonundaki $D_e(\lambda, C)$ bozunum fonksiyonu yüzünden C 'ye bağlıdır. Bu bilgi ışığında ve Denk 10 kullanılarak λ^* değeri hesaplanmıştır. Şek. 2'den de görüleceği üzere, sabit bir C bant genişliği için hesaplanan λ^* değerinden daha düşük λ (yüksek kalite) kısıtına göre kodlanmış bir video, bu kısıt için hesaplanan en iyi politika kullanılarak gönderilse bile, toplamda daha düşük kalite elde edilecektir. Ayrıca, λ^* 'ın kanal koşullarından nasıl etkilendiğinin anlaşılabilmesi için farklı ϵ_F, ϵ_B hata oranları ve değişen μ_R değerleri için hesaplanan λ^* değeri Şek. 3'de gösterilmiştir. Şekilden gözlemlendiği üzere artan μ_R durumunda sistemin gözlenebilirliği azaldığı için bütün kanal kayıp oranları için benzer bir performans düştüğü gözlenmektedir.

İkinci deneyde ise, önerilen en iyi gönderim algoritması ile hiç bozunum kontrolü yapılmaması ve Reed-Solomon kodları ile statik FEC koruması [4] yapılması durumları karşılaştırılmıştır. Hiç bozunum kontrolü yapılmaması durumu, bu video için oluşabilecek bozunum sınırını göstermek için verilmiştir. Diğer iki algoritma, hız bozunum yapılmaması du-

rumuna göre 10 dB'den fazla kazanç sağlamaktadır. Öteki taraftan FEC ve önerilen en iyi gönderim algoritması karşılaştırıldığında, ortalama RTT değeri T_p 'nin %40'ına kadar olması durumunda önerilen algoritma FEC'e göre avantaj sağlamaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada, bant genişliği kısıtına göre en iyi iletim politikalarını bulan, ölçeklenebilir ve değişimlere karşı dayanıklı ve uyarlanabilir bir algoritma önerilmiştir. Algoritmanın gerçekleştirilebilmesi için ağız gecikmesi ve hatasını kaydırılmış bir gamma dağılımı ile modellenenbildiği varsayılmış ve yeniden iletimlere dayalı video gönderimi bir MDP problemi olarak ifade edilmiştir. MDP problemi verilen ortalama bant genişliği kısıtına göre çözümlenerek, değişen video bit hızları için geçerli olan en iyi politikalar çevrimdışı olarak elde edilmiştir. En iyi video bit hızı olan λ^* 'ın seçiminin, MDP çözümünün dışında tutulması sayesinde, sistemin MDP olarak modellenip sürekli rejim çözümünün elde edilebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada, yeniden iletime dayalı en iyi iletim sistemleri ile T_p 'ye göre düşük kanal gecikmesi koşullarında FEC'e göre iyi performans verdiği gösterilmiştir.

5. Kaynakça

- [1] S. H. Kang, A. Zakhori, "Packet scheduling algorithm for wireless video streaming," in *Packet Video Works.*, 2002.
- [2] K. Stuhlmüller et.al., "Analysis of video transmission over lossy channels," *IEEE JSAC*, vol. 18, no. 6, pp. 1012 - 1032, June 2000.
- [3] P. Chou and Z. Miao, "Rate-distortion optimized streaming of packetized media," *Microsoft Research Tech. Rep.*, MSR-TR-2001-35, Feb. 2001.
- [4] P. Chou et.al., "Error Control for Receiver-Driven Layered Multicast of Audio and Video," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 3, no. 1, pp. 108-122, March 2001.
- [5] J. Chakareski and B. Girod, "Rate-distortion optimized packet scheduling and routing for media streaming with path diversity," in *Proc. IEEE Data Compression Conference*, Snowbird, UT, April 2003.
- [6] J. Chakareski and P. A. Chou, "Application layer error correction coding for rate-distortion optimized streaming to wireless clients," in *IEEE Trans. Comm.*, vol. 52, no. 10, pp. 1675- 1687, 2004.
- [7] D. Tian et.al., "Optimal packet scheduling for wireless video streaming with error-prone feedback," in *Proc. IEEE Wireless Comm. and Net. Conf.*, Atlanta, Mar. 2004.
- [8] A. Mukherjee, "On the dynamics and significance of low frequency components of internet load," *Internetworking: Res. Experience*, vol. 5, pp. 163-205, Dec. 1994.
- [9] E. Gurses et.al., "A simple and effective mechanism for stored video streaming with TCP transport and adaptive frame discard," in *Computer Networks*, vol. 48, pp. 489-501, 2005.
- [10] ITU-T, "Advanced video coding for generic audiovisual services," *ITU-T Recommendation H.264*, May 2003.