

Optik WDM ağları için ayrıştırılmış kullanılabilirlik kısıtı altında yol ve dalgaboyu atama teknikleri

Burak KANTARCI^{*1}, Sema OKTUĞ¹, Hussein T. MOUFTAH²

¹İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

²Ottawa Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri ve Mühendislik Fakültesi, Ontario, Ottawa, Kanada

Özet

Dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) tekniği ile optik ağlar tarafından sunulan yüksek bandgenişliği, optik hatlarda veya ağ bileşenlerinde oluşabilecek hatalar karşısında da yoğun miktarda veri kaybı riskini beraberinde getirmektedir. Bu durumun önüne geçmek için, bağlantılar belirli bir sürdürülebilirlik politikası ile korunarak kurulmaktadır. Ağda oluşabilecek hata durumlarında da bağlantının kullanılabilir ve sunulan hizmetin kesintisiz olması kullanıcılar tarafından beklenmektedir. Bu nedenle, bağlantı istekleri kurulurken, yol ve dalgaboyu atamasında, ilgili sürdürülebilirlik politikası altında kullanılabilirlik kısıtının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çalışmada, paylaşımlı yol koruma politikası altında kurulan bağlantıların kullanılabilirlik isteklerini göz önünde bulundurarak yol ve dalgaboylarını atayan iki farklı teknik önerilmektedir. Bu tekniklerden ilki, G-DAP (Global Differentiated Availability-Aware Provisioning) sezgisel olarak yedek dalgaboyu kanalları üzerinde, her bir kullanılabilirlik sınıfı için global bir paylaşım derecesi kestirir. Diğer teknik LBL-DAP (Link-By-Link Differentiated Availability-Aware Provisioning) ise bir optimizasyon modeli kullanarak, her bir kullanılabilirlik sınıfı için yedek kanallar üzerindeki paylaşım derecesini, her bir optik hat için ayrıca hesaplar. Bağlantı isteklerinin %98, %99, %99.9, %99.99% ve %99.999 kullanılabilirlik düzeyinin birinden geldiği ortamda yapılan testlerde, önerilen teknikler yaygın olan CAFES (Compute-A-Feasible Solution) algoritmasıyla NSFNET ve EON topolojilerinde karşılaştırılmıştır. Bağlantıların sınıflar arasında düzgün ve heterojen dağıldığı ortamlarda toplanan sonuçlar, önerilen tekniklerin daha yüksek bağlantı kabul oranı ve kullanılabilirlik sağladığını göstermektedir. Ayrıca, yedek kaynak kullanım oranını düşürmesi nedeniyle LBL-DAP'ın en iyi başarıyı sağladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Optik ağlar, dalgaboyu bölmeli çoğullama, kullanılabilirlik, yol atama.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Burak KANTARCI. bkantarci@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 36 82

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Optik WDM ağlarında yol ve dalgaboyu atama ve sürdürülebilirlik" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 07.05.2009 tarihinde dergiye ulaşılmış, 10.09.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.08.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Kantarci, B., Oktuğ, S., Mouftah, H T., (2011) 'Optik WDM ağları için ayrıştırılmış kullanılabilirlik kısıtı altında yol ve dalgaboyu atama teknikleri', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 3, 37-48" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Availability constrained routing and wavelength assignment techniques for optical WDM networks

Extended abstract

As a result of the increase in the bandwidth demand of the next generation Internet applications, Optical Wavelength division Multiplexing (WDM) networks seem to be the most appropriate technology that can be deployed in the backbone. Optical WDM networks introduce the advantage of offering bandwidth partitioned into a number of gigabits per second wavelength channels. However, the advantage introduced by the huge bandwidth offer also introduces a disadvantage when the network experiences a failure. Service interrupts on any component along the lightpath may lead to significant amount of data loss since the fiber capacity is huge. Factors like multiple errors, long fault recovery duration, and component failure characteristics introduce availability constraint for the network elements, and also for the connections. Therefore, connections are required to be provisioned by taking availability constraint into consideration. In short, availability stands for the probability of a network component, a channel or a link being in the operational state at any time t .

Significant amount of the previous work is concerned with availability aware routing and wavelength assignment (RWA) under shared backup protection. The first and the most common availability aware routing scheme is compute-a-feasible-solution (CAFES). In this scheme, a number of candidate working paths are selected. For each working path, a corresponding backup path is selected by forcing the backup channels to be shared. The working and backup path pair that leads to the highest availability or another lowest cost metric is selected, and assigned to the incoming connection request.

In this work, we present two dynamic connection provisioning schemes for differentiated availability-constrained RWA. Both of the schemes are derived from the conventional reliable provisioning scheme CAFES. In the dynamic environment, connections arrive with the availability requirements of 98% (class-1), 99% (class-2), 99.9% (class-3), 99.99% (class-4), and 99.999% (class-5). First scheme is called Global Differentiated Availability-aware Provisioning (G-DAP). This scheme monitors the average availability per connection for each class and resource-overbuild throughout the network. In

order to enhance the performance of the connection provisioning, G-DAP also takes the advantage of the trade-off between resource overbuild and connection unavailability where resource overbuild is the ratio of the number of backup channels to the number of working channels in the network, and unavailability is one's complement of the availability. Based on the change in these two parameters it attempts to specify a feasible global sharing degree for all wavelength channels per availability class. The trade-off function is defined as the product of these two parameters. Hence, if the tradeoff is monitored to be decreasing for the related availability class, the last action (increment or decrement) taken on the sharing degree of that class is repeated; otherwise, it is reversed. The second scheme is called Link-by-Link Differentiated Availability-aware Provisioning (LBL-DAP). LBL-DAP estimates a separate feasible sharing degree per class for the channels of each link. It periodically runs an integer linear programming (ILP) function to obtain the feasible sharing degrees on each link. When searching for a backup RWA configuration, both schemes modify the link costs based on the feasible sharing degree obtained for the availability class of the incoming connection and current load for the connection's class on the link respectively.

Since we aim to improve the performance in terms of resource overbuild, connection availability, and blocking probability, we use the conventional reliable provisioning scheme, CAFES as a base in our simulations. Moreover, since connections arrive with differentiated availability requirements, we also modify CAFES to enable a connection to be provisioned unprotected if a selected working path can meet its availability requirement. Thus, resource consumption overhead of this scheme is modified for its favor. Performance of G-DAP and LBL-DAP are compared to that of CAFES by simulation under NSFNET and EON topologies. Simulation results are collected under two different conditions where the connection requests are distributed uniformly and heterogeneously among the availability classes. It is shown that the proposed schemes lead to enhanced blocking ratio and connection availability. Moreover, by taking the advantage of optimization and considering the feasible sharing degrees for the links separately, LBL-DAP also introduces significant decrease in resource overbuild.

Keywords: Optical networks, wavelength division multiplexing, availability, routing.

Giriş

Optik dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) ağları, saniyede gigabitler düzeyinde veri iletimi sağlayan dalgaboyu kanallarını optik fiber üzerinde çoğullayarak ağları, internet uygulamalarının artan bantgenişliği karşısında en uygun çözüm olarak önerilmiştir (Mukherjee, 2006). Optik WDM ağlarının sağladığı bu avantaj, beraberinde sürdürülebilirlik ve güvenilirlik sorununu da getirmektedir. Ağdaki herhangi bir bileşende görülebilecek kısa süreli bir servis kesintisinde bile kaybedilecek veri miktarı fiberin yüksek taşıma kapasitesi kadar büyük olabilmektedir. Bu nedenle, optik WDM ağları, önceden kararlaştırılmış bir etkin sürdürülebilirlik politikası ile tasarlanmak zorundadır. Tasarım aşamasında belirlenen sürdürülebilirlik politikasının başarımından bağımsız olarak, çoklu hata durumları, yedek kaynaklara anahtarlanma sürelerinin uzunluğu, optik hatlar, düğümler ve dalgaboyu kanalları üzerindeki kimi kısıtlar, ağ üzerinde kurulan bağlantılar için kullanılabilirlik sorununu doğurmaktadır. Bu nedenle, bağlantılar kurulurken, bağlantı kullanılabilirliğini göz önünde bulunduran yol ve dalgaboyu atama yöntemleri kullanılmalıdır (Mouftah vd., 2003). Bağlantı kullanılabilirliği, ağdaki hataların yer ve sürelerine ilişkin değerleri, yedek kaynak miktarı, ve kullanılan sürdürülebilirlik politikasının fonksiyonudur. En basit ifadesiyle kullanılabilirlik, herhangi bir anda söz konusu sistemin çalışır durumda bulunma olasılığıdır. O halde, bağlantı kullanılabilirliği, rastgele bir anda, bağlantının kaynak ve hedef arasında veri akışını sürdürebilme olasılığıdır (Ou ve Mukherjee, 2005). Matematiksel olarak bir sistemin kullanılabilirlik (A) değeri;

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (1)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada, MTTF hata oluşuncaya kadar geçen ortalama süreyi (Mean time To Fail) 1/FIT (FIT: 10^9 saatte oluşabilecek hata sayısı) cinsinden gösterirken, MTTR hatanın onarılması için geçen ortalama süreyi saat cinsinden gösterir.

Seri ve paralel sistemlerin kullanılabilirlik hesaplaması (sırasıyla A_s ve A_p) 2 No.lu ve 2

No.lu denklemlerde verildiği gibidir (Arci vd., 2003). Buna göre, seri bir sistemi birbirine seri bağlı hatlardan oluşan yol olarak düşünürsek, yolun kullanılabilir olması için her hattın kullanılabilir olması gerekmektedir. Paralel bir sistemde, asal yol ve yalnızca kendine atanmış bir yedek yol tarafından korunan bağlantı olarak düşünülebilir. Şu halde, her iki yolun da kullanılamaz olma olasılığının tümleyeni, bağlantının kullanılabilirliğini verecektir.

$$A_s = \prod_i A_i \quad (2)$$

$$A_p = 1 - \prod_i (1 - A_i) \quad (3)$$

Kullanılabilirlik kısıtı altında yol ve dalgaboyu atama çalışmalarının büyük bölümü, bağlantıların paylaşımlı yol koruması politikası ile kurulduğunu varsaymaktadır. Güvenilir bağlantı kurma algoritmalarının en bilineni ve ilki CAFES (Compute-A-Feasible-Solution) algoritmasıdır (Ou ve Mukherjee, 2005). CAFES, optik hatlara atadığı farklı maliyet değerleri ile elde ettiği asal ve yedek yol alternatifleri arasından en yüksek bağlantı kullanılabilirliği değerini veren asal/yedek yol çiftini seçerek bağlantı kurar. CAFES'i temel alan veya CAFES'ten bağımsız olarak önerilen çok sayıda güvenilir bağlantı kurma algoritması bulunmaktadır (Tornatore vd., 2005; Babbitt vd., 2006; Zhang vd., 2003; Kantarcı vd., 2008). Tornatore ve diğerlerinin (2005) yaptığı çalışmada, iki aşamalı bağlantı kurma algoritması önerilmiştir. Sonsuz kaynaktan oluşan bir ağda statik trafik matrisi ile gelen bağlantı istekleri maksimum kullanılabilirlik hedefi ile kurulur. İkinci aşamada ise, her bir fiber geçici olarak pasifleştirilerek üzerinden geçen bağlantılar çözülür ve ilk aşamadaki kullanılabilirlik düzeyleri ihlal edilmeyecek şekilde alternatif bir yol ve dalgaboyu atama konfigürasyonu bulunması durumunda, pasifleştirilen fiber ağdan silinir. Babbitt ve diğerlerinin (2006) yaptığı çalışma, internet omurgası üzerinde kullanılabilirliğin korunmasına yönelik bir çalışma sunulmaktadır. Zhang ve diğerlerinin (2003) yaptığı çalışmada ise dinamik ortamda, farklı kullanılabilirlik istekleriyle gelen bağlantıların maksimum kullanılabilirlik hedefi ile ku-

rulması amaçlanmaktadır. Çavdar ve diğ erlerinin (2007) yaptığı çalışmada ise bu çalışmaya bağlantı servisi süresinin önceden bilinmesi durumunu göz önünde tutarak kaynak kullanımını azaltmayı hedeflenmektedir. Bir diğ er çalışma ise Velasco ve diğ erleri (Velasco vd., 2006) tarafından sunulmuş ve çalışmada, bağlantı isteklerine maksimum kullanılabilirlik değ erini veren asal yol atandıktan sonra, öncelikle çalışır durumdaki optik hatlar göz önünde bulundurularak yedek yol atanması denenmekte, başarılı olunmadığı takdirde, o an çalışır durumda olmayan optik hatlardan atama yapılmaya çalışılmaktadır. Bu yaklaşımın felsefesine göre, çalışır durumdayken seçilen asal yolda bir hata oluşunca ya kadar, yedek yoldaki çalışmayan hat veya hatların onarımının tamamlanmış olacağıdır. Zhang ve diğ erlerinin (2007) yaptığı bir diğ er çalışmada ise bağlantı istekleri öncelikle tek bağlantıya atanmış yedek yol koruması politikasına göre kurulmakta, sonrasında ise her bir optik hatta, yalnızca ilgili bağlantıya atanmış olan dalgaboyu kanalları bırakılarak, hattaki diğ er kanallardan paylaşılabilir durumda olanları sırayla denenmekte ve herhangi bir bağlantının kullanılabilirlik değ erini ihlal etmeyen dalgaboyu kanalları atanarak, ilk seçilen kanal bırakılmaktadır.

Önceki bir çalışmamızda (Kantarcı vd., 2008), bağlantı kullanılabilirliğini arttıran ve kaynak tüketimini kabul edilebilir bir aralıkta tutan iki yöntem önerilmektedir. Bağlantı istekleri herhangi bir kullanılabilirlik düzeyi belirlemeksizin gelmekte ve çok sayıda fiberden oluşan optik hatların bulunduğu ağda belirli bir süre kalıp çözülmektedir. Önerilen yöntemlerden ilki Global Paylaşılabilirlik Gözetimi (Global Shareability Surveillance, GSS) olarak adlandırılmakta ve periyodik olarak çalıştırdığı bir çelişki fonksiyonu ile dalgaboyu kanalları üzerindeki paylaşım derecesini kestirmeyi hedeflemektedir. İkinci yöntem olan Optik Hat Bazında Paylaşılabilirlik Gözetimi (Link-By-Link Shareability Surveillance, LSS) ise her bir optik hattaki dalgaboyu kanalları için olası bir paylaşım derecesi hesaplar. Bu noktada, paylaşım derecesinin, bir dalgaboyu kanalını yedek kaynak olarak paylaşan bağlantıların sayısına işaret ettiğini hatırlatmakta yarar görüyoruz.

Bu çalışmada, ayrıştırılmış kullanılabilirlik kısıtı altında bağlantı kurma için iki teknik tanıtılmaktadır. İlk olarak IEEE Globecom '08 konferansında tanıttığımız (Kantarcı vd., 2008) ve daha kısıtı altında test ortamında başarımlı ölçümü yaptığımız teknikleri bu makalede gerçeğe daha uygun bir benzetim ortamı ve parametreler ile değerlendirmekteyiz. Benzetim programı aracılığıyla yaratılan test ortamında, bağlantıların servis düzeyi anlaşması (Service Level Agreement-SLA) içinde belirtilen %98, %99, %99.9, %99.99 ve %99.999 kullanılabilirlik isteğiyle gelen beş farklı kullanılabilirlik sınıfı bulunmaktadır. Önerilen teknikler sırasıyla GSS ve LSS'den türetilmiş ve ayrıştırılmış bağlantı istekleri ile kaynak kısıtının bulunduğu ortamda çalışabilecek şekilde yeniden düzenlenmiştir. Tekniklerin ilki olan G-DAP (*Global Differentiated Availability-aware Provisioning*) her bir sınıf için bağlantı başına kullanılabilirlik ve yedek kaynak tüketimini sürekli izlemekte ve periyodik sezgisel bir çelişki fonksiyonu çalıştırarak, her bir kullanılabilirlik sınıfı için, dalgaboyu kanalları üzerindeki paylaşım derecesini kestirmeyi hedeflemektedir. Bir sonra tanıtılan LBL-DAP (*Link-by-Link Differentiated Availability-aware Provisioning*) ise aynı değ erleri sürekli izleyerek, periyodik olarak bir optimizasyon modeli oluşturarak çözmektedir. Çözülen optimizasyon modelinin çıktısı, her bir kullanılabilirlik sınıfı için her optik hat üzerindeki dalgaboyu kanallarındaki paylaşım derecesidir. G-DAP ve LBL-DAP'ta, kullanılabilirlik sınıfları için elde edilen paylaşım dereceleri, ilgili sınıftan gelen bağlantı isteğ inin kurulması için, asal yol kurulduktan sonra yedek yol ve dalgaboyu ataması sırasında optik hatlara maliyet atamada kullanılır. Önerilen yöntemler ve CAFES, NSFNET ve EON (European Optical Network) topolojileri altında çalıştırılarak başarımlı karşılaştırılmaları yapılmıştır. Benzetim senaryolarında, bağlantı isteklerinin kullanılabilirlik sınıfları arasında düzgün dağılımı ve heterojen dağılımı durumları da incelenmiştir. Tanıtılan teknikler, CAFES'in performansını bağlantı kabul oranı ve ortalama bağlantı kullanılabilirliği açısından iyileştirmektedir. Bir diğ er başarımlı parametresi olan yedek kaynak kullanımı ise, LBL-DAP tarafından gözle görülür ölçüde azaltılmaktadır.

Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde planlanmıştır. İkinci bölümde optik ağlarda kullanılabilirlik analizi ve güvenilir bağlantı kurma problemi açıklanmaktadır. Üçüncü bölüm, G-DAP ve LBL-DAP tekniklerinin ayrıntılarını anlatmaktadır. Dördüncü bölüm benzetim ortamının ayrıntıları ve benzetimlerden elde edilen sonuçları içermektedir. Raporun sonuç kısmı ise son bölümde yer almaktadır.

Optik ağlarda kullanılabilirlik analizi ve güvenilir bağlantı kurma

Kullanılabilirlik analizi

Optik ağlarda paylaşımlı yedek yol koruması politikası ile korunan bağlantıların kullanılabilirlik analizi için önerilen çok çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Arci vd., 2003; Ou vd., 2004, Mello vd., 2005). Yer kısıt nedeniyle bu yöntemlerin her birinden söz edememekteyiz. Bu çalışmada kullandığımız analizi yöntemi, matris tabanlı kullanılabilirlik analizidir (Mello vd., 2005). Söz konusu yöntemde, ağdaki optik hatlarda herhangi bir anda oluşan hata durumları ve durumlar arasındaki geçişleri bir Markov zinciri ile modellenmekte ve çoklu hata durumunu temsilen, ikili hata durumu göz önünde bulundurulur. Zincirde durumlar arası geçişlerde, π_i , i hattının kopması durumunu, π_{ij} , i hattının kopmasını j hattının kopmasının izlediği durumu gösterir. Markov zincirinin bu olasılıklara bağlı olarak oluşturulması ve denge denklemlerinin çözümü Mello ve diğerlerinin yaptığı çalışmada (Mello vd., 2005) ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Bu makalede ilgilenilen yalnızca, denge denklemlerinin çözülmesinin ardından elde edilen ardından kararlı durum olasılıkları ile bağlantı kullanılabilirliğinin hesaplanmasıdır. 4. No.lu denklemde, yedek yol ile korunan bir bağlantının kullanılabilirliğinin bu yöntemle hesaplanması gösterilmektedir. Denklemde, A_c c bağlantısının kullanılabilirliğini, W_c c bağlantısının asal yolu üzerindeki optik hatlar kümesini, B_c , c bağlantısının yedek yolu üzerindeki optik hatlar kümesini ve son olarak da S_c c bağlantısı ile en az bir dalgaboyu kanalını yedek kaynak olarak paylaşan bağlantıların asal yollarındaki hatların kümesini göstermektedir. Denklemdeki büyük parantez, bağlantının kullanılabilirliğinin tümleyenini, yani kullanılamazlığını göstermektedir. O halde, ilk terimde gösterildiği gibi asal ve yedek yoldan birer optik

hattın sırayla kopması durumunda bağlantı kullanılamazdır. İkinci terimde gösterilen durum ise, ilk hatanın yedek yolda veya paylaşım grubundaki hatlardan birinin asal yolunda oluşması, bunu da c 'nin asal yolundan bir hattın kopmasının izlemesi durumudur. Bu iki terim birlikte, c bağlantısının kullanılamazlık olasılığını gösterir.

$$A_c = 1 - \left[\sum_{k \in W_c, l \in B_c} \pi_{kl} + \sum_{k \in W_c, l \in (B_c \cup S_c)} \pi_{lk} \right] \quad (4)$$

Asal yolları aynı hat üzerindeki dalgaboyu kanallarından geçen bağlantıların, yedek kaynak olarak aynı kaynağı paylaşmalarına, bağlantıların kullanılabilirlikleri bozulmadığı sürece izin verilebilir. Ancak bir bağlantı ile aynı asal hat üzerinden geçen bağlantıların herhangi birinin asal yolundaki bir hata, ilgili bağlantının kullanılamaz varsayılmasına neden olacaktır. Bu çıkarım ile, korunan bağlantının kullanılabilirliğini 5 No.lu denklemdeki gibi kullanabiliriz. Denklemde W_{SC} , c bağlantısı ile asal yol üzerinde en az bir hattın birlikte geçen bağlantıların kümesini göstermektedir.

$$A_c = 1 - \left[\sum_{k, l \in (W_c, B_c)} \pi_{kl} + \sum_{k, l \in (W_c, (B_c \cup S_c))} \pi_{lk} + \sum_{k \in (W_c \cap W_{SC})} \pi_k \right] \quad (5)$$

Bağlantılar önceden belirlenmiş kullanılabilirlik düzeyi istekleriyle geldikleri için, asal yol tarafından kullanılabilirlikleri karşılanıyorsa, bir yedek yol kurulmasına gerek yoktur. Korumasız olarak kurulan bir bağlantının kullanılabilirliğinin hesabı farklı olacaktır, 6 No.lu denklemde, korumasız bir bağlantının kullanılabilirlik hesabı görülmektedir. Buna göre birinci toplam terimde gösterildiği gibi asal yol üzerinde bir hat çökmesi veya ikinci terimde gösterildiği gibi bir tanesi asal yol üzerinde olan iki hat çökmesi veya üçüncü toplam terimde gösterildiği gibi her ikisi de asal yol üzerinde olan iki hat çökmesi durumu korumasız bir bağlantının kullanılamaz durumda olmasına neden olur.

$$A_c = 1 - \left[\sum_{k \in W_c} \pi_k + \sum_{k, l \in (W_c, \overline{W_c})} (\pi_{lk} + \pi_{kl}) + \sum_{k, l \in W_c} \pi_{kl} \right] \quad (6)$$

Güvenilir bağlantı kurma

Kullanılabilirlik kısıtı altında bağlantı kurma algoritmalarının en bilineni ve gerçekleşmesi en basit olanı CAFES algoritmasıdır (Ou ve Mukherjee, 2005). CAFES gelen bağlantı isteği için K adet asal yol adayını arar. Bu çalışmada, önceki çalışmalarla uyumlu olması açısından yeterli sayılarak $K=3$ alınmakta ve yollar şu kriterlerle seçilmektedir: 1) En güvenilir (en düşük kullanılabilirlik değerine sahip olan) yol, 2) En güvenilir yolun en düşük kullanılabilirlik değerine sahip hattı silindikten sonra bulunan en güvenilir yol, 3) En az sekme sayısına sahip yol. En güvenilir yol için arama yapılırken, optik hatların maliyetleri, ilgili hat üzerindeki bir dalgaboyu kanalının kullanılabilirlik değerine eşitlenir ve minimum kullanılabilirlik değerini veren yol aranır. Her bir asal yol adayının ilgili yedek yolu aramasında 7 No.lu eşitlikteki maliyet atama yöntemi kullanılır.

$$C_e^{new} = \left\{ \begin{array}{ll} \infty & e \in W_c \vee \lambda_s + \lambda_f = 0 \\ \varepsilon \cdot C_e^{old} & \lambda_s > 0 \\ C_e^{old} & \text{diger} \end{array} \right\} \quad (7)$$

Eşitlikte görüldüğü gibi, asal yol aranırken kullanılan maliyet (C_e^{old}) ancak ve ancak, ilgili hat üzerinde yedek kaynak olan bir dalgaboyu kanalı varsa sifıra çok yakın bir ε değeri ile çarpılarak paylaşımaya zorlanır. Asal/yedek yol çiftleri içinden en düşük kullanılabilirlik değerini veren çift seçilerek bağlantıya atanır. Seçilen çift, bağlantının kullanılabilirlik isteğini karşılıyorsa, bağlantı bloke edilir.

Ayrıştırılmış kullanılabilirlik kısıtı altında çalışan adaptif yol ve dalgaboyu atama teknikleri

G-DAP (Global differentiated availability-aware provisioning)

G-DAP, CAFES'i temel alıp, sezgisel yaklaşım kullanarak yedek dalgaboyu kanalları üzerinde her bir sınıf için paylaşım derecesi elde etmeye çalışır. Paylaşım derecesi, bir dalgaboyu kanalını yedek kaynak olarak paylaşan bağlantı sayısını göstermektedir. G-DAP, sınıflar için paylaşım derecesi belirlemek amacıyla bir çelişki

fonksiyonu tanımlar. Ağdaki bağlantı trafiğinin etkilediği parametrelerin değişimini sürekli gözlemleyerek, her bir sınıf için ayrıca tanımladığı çelişki fonksiyonunu periyodik olarak çalıştırır. Kullanılabilirlik sınıflarının çelişki fonksiyonlarının sonuçlarının bir önceki değeriyle karşılaştırarak, ilgili sınıflar için dalgaboyu kanalları üzerindeki paylaşım derecelerini kestirmeyi hedefler. G-DAP'nin k kullanılabilirlik sınıfı için tanımladığı çelişki fonksiyonu 8 No.lu eşitlikte görülmektedir. Eşitlikte, $T_n^{(k)}$, çelişki fonksiyonunun k . sınıf için n . periyod sonunda elde edilen değerini, RO_{n-1} , son periyotta ağdaki yedek dalgaboyu kanallarının asal dalgaboyu kanallarının sayısına oranını gösteren özkaynak fazlası değerini, $A_{n-1}^{(k)}$ ise k . kullanılabilirlik sınıfının son periyottaki ortalama kullanılabilirlik değerini göstermektedir.

$$T_n^{(k)} = RO_{n-1} \cdot (1 - A_{n-1}^{(k)}) \quad (8)$$

Çelişki fonksiyonunun değeri enküçüklenmeye çalışılmaktadır. Bu durumda, fonksiyonun n . periyottaki değeri bir önceki periyottaki değerinden küçükse, önceki periyotta paylaşım derecesi üzerinde yapılan işlem tekrarlanır; paylaşım derecesi arttırılmışsa arttırılmaya devam edilir, azaltılmışsa, azaltılmaya devam edilir. Aksi halde, fonksiyonun değeri, önceki periyoda göre artmakta ise, önceki periyotta paylaşım derecesi üzerinde yapılan arttırma veya azaltma işlemi ters çevrilir.

G-DAP'nin gelen bir bağlantı isteğini kurma süreci CAFES ile aynıdır. 3 adet asal yol, CAFES'teki kriterlere göre seçilerek, yedek yolları aranır. Yedek yolların aranmasında, çelişki fonksiyonunun belirlediği paylaşım dereceleri kullanılır. 9 No'lu eşitlikte yedek yol aramasında G-DAP'nin kullandığı maliyet atama fonksiyonu görülmektedir. Denklemde S_k , k sınıfı için hesaplanan global paylaşım derecesini, $\lambda(w)$, w dalgaboyu kanalını yedek kaynak olarak paylaşan bağlantı sayısını göstermektedir. O halde, k sınıftan bir bağlantı kurulurken, bir optik hat üzerinde, yedek kaynak olarak en fazla (S_k-1) bağlantı tarafından paylaşılan bir dalgaboyu kanalı bulunuyorsa, optik hattın asal yol ararken kullanılan maliyeti $1/S_k$ oranında azaltılır. Asal

yol ararken 1 ve 2 numaralı alternatif yollarda kullanılan maliyet fonksiyonu hat üzerindeki kullanılabilirlik-yedek kaynak tüketimi çelişkisi olarak düşünülerek, A_e , e hattındaki bir dalgaboyu kanalının kullanılabilirliği, $\lambda_s(e)$, e hattındaki yedek dalgaboyu kanalları sayısı ve $\lambda_w(e)$, e hattındaki asal dalgaboyu kanalları sayısını göstermek üzere $(1-A_e).(\lambda_s(e)/\lambda_w(e))$ olarak atanmaktadır.

$$C_e^{new} = \left\{ \begin{array}{l} \infty \quad e \in W_c \vee \lambda_s + \lambda_f = 0 \\ \frac{1}{S_k} \cdot C_e^{old} \quad \lambda_s > 0 \wedge \exists w \in e : \lambda(w) < S_k \\ C_e^{old} \quad \text{diger} \end{array} \right\} \quad (9)$$

G-DAP'nin maliyet atama süresi, W , bir hattaki dalgaboyu kanalı sayısını, L ağdaki toplam optik hat sayısını göstermek üzere, $O(W.L)$ süresi içinde bulunur. Bu değer, CAFES ile aynıdır çünkü maliyet ataması sırasında en kötü durumda, her bir hat üzerindeki dalgaboyları sırayla sınanmaktadır. Dalgaboyu atama sırasında ise, bir optik hattaki dalgaboyu kanalları öncelikle, asal, yedek ve boş dalgaboyu kanalları olarak gruplanmakta ve ardından en küçük paylaşım dereceli dalgaboyu kanalı bağlantıya atanmaktadır. O halde, bir optik hatta dalgaboyu seçimi en kötü durumda $O(W)$ süresi içinde yapılmaktadır.

LBL-DAP (Link-by-link differentiated availability-aware provisioning)

G-DAP'a benzer bir şekilde çalışan ancak birkaç noktada farklı gösteren LBL-DAP, kullanılabilirlik sınıfları için belirlenen paylaşım derecelerini, her bir optik hat için ayrı ayrı kestirmeyi hedefler. Bu kestirim LBL-DAP'ta sezgisel yolla değil, doğrusal bir optimizasyon modeli aracılığıyla yapılır. 8 No.lu denklemde görülen çelişki fonksiyonu doğrusal değildir. Bu nedenle, yedek kaynak kullanım oranı ve ortalama bağlantı kullanılabilirliği değerlerinin önceki periyottaki değerleri de kullanılarak yeni bir çelişki fonksiyonu tanımlanır. Tanımlanan çelişki fonksiyonu k sınıfı için, 10 No.lu eşitlikte görülmektedir. Eşitlikte A_k , k sınıfı için ortalama kullanılabilirlik değerini, RG_k ise k sınıfı bağlantıların yedek kanalları optimizasyon modeli sonunda ortaya çıkan paylaşım dereceleri dikka-

te alınıp dağıtılırsa ortaya çıkacak olan kaynak farkını (resource gain) göstermektedir.

$$\text{Tradeoff}_k^{LBL-DAP} = RG_k \cdot A_k' + RG_k' \cdot A_k \quad (10)$$

11 No.lu denklem ile 19 No.lu denklem arasında LBL-DAP tarafından kurulan optimizasyon modeli görülebilir. 10 No.lu eşitlikteki çelişki fonksiyonu minimize edilmek istenmekte ve optimizasyon modelinin amaç fonksiyonu olarak 11 No.lu denklemde görünmektedir. 12 No.lu kısıt denkleminde, $S_k^{(b)}$, b hattı üzerinde k . sınıf için paylaşım değerini göstermektedir ve bu kısıt fonksiyonu bağlantı kullanılabilirlik ve kullanılamazlık değerleri toplamının 1 olduğunu göstermektedir. Bu haliyle 4 No.lu denklemdeki kullanılabilirlik hesaplamasıyla bire bir aynı olmasa da, daha çok paylaşım derecesinin daha düşük kullanılabilirliğe karşılık düştüğünü göstermekte ve çift hata durumunu da içermektedir. 13 No.lu kısıt k sınıfı için bağlantı başına kullanılabilirliği, 14 No.lu kısıt k sınıfı için ortalama paylaşım derecesini göstermektedir. 15 No.lu kısıtta, 1 hattı üzerinde k . kullanılabilirlik sınıfı için hesaplanan paylaşım derecesinin, o hattan geçen tüm bağlantıların isteklerini karşılamaya olanak sağlaması kısıtı gösterilmiştir. RG ile gösterilen kaynak fazlasının matematiksel ifadesi 16 No.lu kısıtta gösterilmektedir. 17 No.lu kısıt ise, üzerindeki toplam yedek kaynak yükünün yedek kaynak miktarına oranı eşit olan optik hatlara eşit paylaşım dereceleri atanmasını sağlamaktadır. Son olarak 18 ve 19 No.lu kısıtlar sınır değerler ve pozitiflik kısıtlarıdır.

Amaç Fonksiyonu:

$$\min \sum_k RG_k' \cdot A_k + RG_k \cdot A_k' \quad k = 1, 2, \dots \quad (11)$$

Kısıtlar:

$$A_c + \sum_{p,b \in (W_c, B_c)} \pi_{pb} \cdot S_k^{(b)} + \sum_{p,b \in (W_c, B_c)} \pi_{bp} \cdot S_k^{(b)} = 1 \quad \forall c, k \quad (12)$$

$$A^{(k)} = \frac{1}{|C_k|} \sum_k A_c, \quad \forall k \quad (13)$$

$$S_{avg}^{(k)} = \frac{1}{|L_b|} \sum_{l \in L_b} S_l^k \quad \forall k \quad (14)$$

$$SC_l \cdot S_l^k \geq |l_c^k| \quad \forall k \quad (15)$$

$$|L_b| \cdot S_{avg}^k - Hops_k \cdot |C^{(k)}| = RG_k \quad \forall k \quad (16)$$

$$S_l^{(k)} = S_m^{(k)} \quad \forall l, m \in L_b \quad \frac{\rho_l}{SC_l} = \frac{\rho_m}{SC_m} \quad (17)$$

$$DOWNLIMIT \leq S_k^{(b)} \leq UPLIMIT, \quad \forall k, l \quad (18)$$

$$RG_k \geq 0, \quad \forall k \quad (19)$$

LBL-DAP yukarıdaki optimizasyon modelini periyodik olarak çalıştırır ve S_l^k değerleri için çözer. Asal yollar için optik hatlara maliyet atamasını CAFES ile aynı şekilde yapar. Yedek yol seçiminde ise 20 No.lu maliyet atama fonksiyonunu kullanır. Buna göre, bir optik hatta, k sınıfından gelen bir bağlantı isteği için asal yolda kullanılan maliyet değeri, sözkonusu hatta S_k^e -1 bağlantı tarafından yedek kaynak olarak kullanılan dalgaboyu kanalı varsa, paylaşım derecesi ve yedek kanal sayısı ile orantılı olarak küçük bir değer atanır. Aksi halde optik hattın seçilme olasılığının mümkün olduğunca azaltılması için oldukça büyük bir değere eşitlenir.

$$C_e^{new} = \left\{ \begin{array}{l} \infty \quad e \in W_c \vee \lambda_s + \lambda_f = 0 \\ \frac{1}{S_k^{(e)} \cdot \lambda_s(e)} \quad \lambda_s > 0 \wedge \exists w \in e : \lambda(w) < S_k^e \\ UPLIMIT \quad \text{diğer} \end{array} \right\} \quad (20)$$

LBL-DAP, maliyet ataması süresi için ek bir yük getirmemekte, diğer teknikler gibi O(W.L) içinde çalışmaktadır. Dalgaboyu ataması için de en az kullanılan dalgaboyundan başlayarak atamaya çalıştığı için O(W) süre de tıpkı diğer tekniklerde olduğu gibi LBL-DAP'ta da görünür. LBL-DAP'ın en önemli sorunu gibi görünen optimizasyon modelinin çözüm süresi benzetim çalışmalarında da görüleceği gibi, bağlantının hizmet süresinin de çok altındadır olup periyodik olarak modelin krulup fonksiyonun çalıştırılmasında sakınca yoktur.

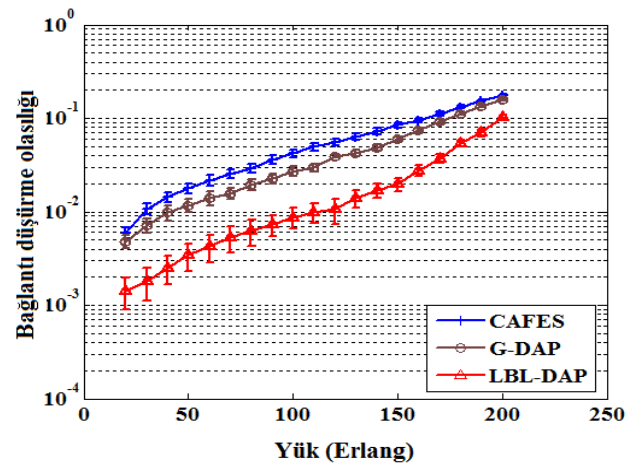
Benzetim çalışmaları

Benzetim ortamı Visual C++ kullanılarak yazılmış, LBL-DAP'taki optimizasyon modelleri-

nin çözümü için de CPLEX aracı kullanılmıştır. Alınan ölçümlerde 14 düğümlü NSFNET (Toratore vd., 2005) ve 28 düğümlü EON (Maesschalk vd., 2003) topolojileri kullanılmıştır. Bağlantı istekleri 5 adet kullanılabilirlik sınıfından birine (0.98, 0.99, 0.999, 0.9999, 0.99999) ait olarak gelmektedirler. Yapılan testlerde bağlantı istekleri kullanılabilirlik sınıfları arasında düzgün ve heterojen dağıtılarak sonuçlar ayrı ayrı gözlemlenmiştir. Optik hatların kullanılabilirlik değerleri {0.999, 0.9999, 0.99999} kümesi üzerinde düzgün dağılmıştır. Hatların ortalama onarım süresi (MTTR) 12 saat olarak alınmış ve iki hata arasında geçen ortalama süre (MTTF), hattın kullanılabilirlik değeri ve MTTR kullanılarak elde edilmiştir. Her bir optik hat üzerinde 16 dalgaboyu kanalı bulunduğu varsayılmaktadır. Grafiklerdeki sonuçlar bir senaryonun beş farklı kez çalıştırılmasının ortalamasını temsil etmektedir. Ayrıca test sonuçları grafiklerde %90 güven aralıkları ile birlikte verilmektedir.

Sınıflar arası düzgün dağılım

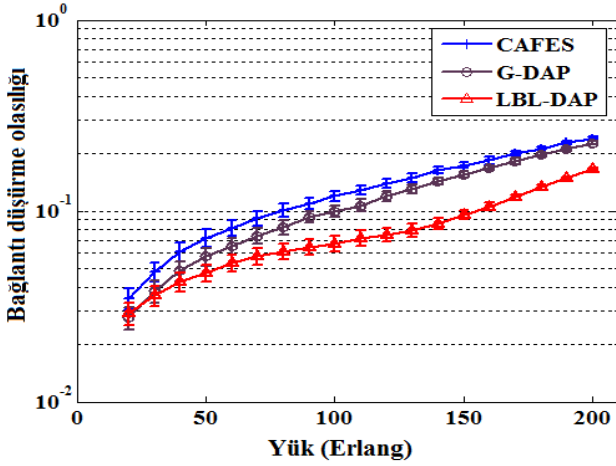
Benzetim çalışmalarının ilk bölümünde, bağlantı istekleri beş kullanılabilirlik arasında eşit olasılıklarla dağıtılmıştır. İlk sınanan sonuçlar bağlantı düşürme olasılığıdır. Öncelikle NSFNET topolojisinde test edilmiş olan sonuçlara bakıldığında (Şekil 1) önerilen tekniklerin, CAFES'in başarımını gözle görülür biçimde arttırdığı açıktır. G-DAP'nin bağlantı düşürme olasılığı CAFES'inkine yüksek trafik yükü altında yaklaşmakta olsa da LBL-DAP'nin bağlantı düşürme olasılığı açısından sağladığı iyileşme her noktada sürmektedir.



Şekil 1. NSFNET'te bağlantı düşürme olasılığı

G-DAP ve CAFES'in başarımlarının yüksek trafik yükü altında birbirine yaklaşmasının nedeni, G-DAP'nin sınıflar için paylaşım derecesini global olarak belirlemesi ve yüksek trafik yükü altında bazı optik hatlar fazla trafik taşıyarak, bazılarının daha az trafik taşınması ve böylece bir durumda paylaşım derecesini global değil her bir hat için bağımsız değerlendirmenin daha doğru olacağından kaynaklanmaktadır.

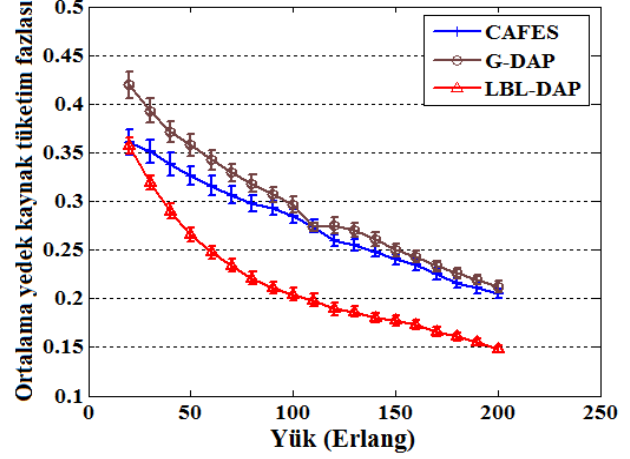
Bağlantı düşürme olasılığı açısından EON topolojisi altında alınan sonuçlara bakıldığında (Şekil 2), tüm tekniklerin davranışlarının NSFNET'teki davranışlarıyla benzeştiği görülmektedir. Yine burada da G-DAP ve LBL-DAP daha az bağlantı düşürmekte, ancak LBL-DAP'nin bağlantı düşürme olasılığı açısından getirdiği kazanım daha fazla olmaktadır.



Şekil 2. EON'de bağlantı düşürme olasılığı

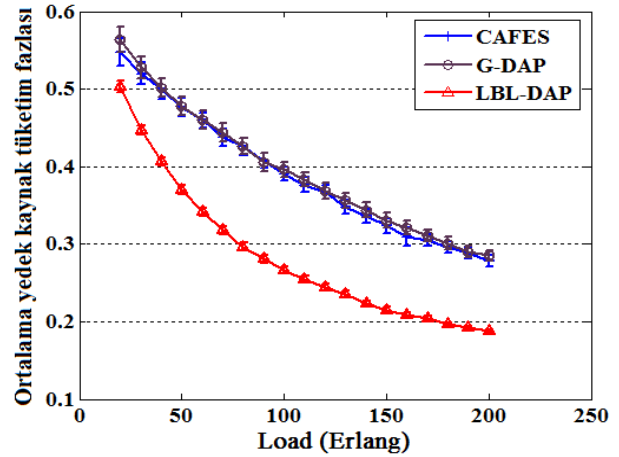
Bir diğer başarımlar parametresi ise ortalama kaynak tüketim fazlasıdır. Kaynak tüketim fazlası, ağdaki yedek dalgaboyu kanallarının asal dalgaboyu kanallarına oranıdır. G-DAP ve LBL-DAP, geleneksel güvenilir bağlantı kurma algoritması CAFES ile kaynak tüketim fazlası açısından NSFNET topolojisi altında karşılaştırıldığında (Şekil 3), LBL-DAP'nin, kaynak tüketim fazlası ve kullanılabilirlik parametrelerini sınıf bazında gözeterek her bir optik hattaki dalgaboylarını yedek kaynak olarak paylaşabilecek bağlantı sayılarını ayrı ayrı belirlemesi ve yol seçimi sırasında optik hatlar üzerindeki yedek kaynak yükünü de göz önünde bulundurması nedeniyle yedek kaynak tüketim fazlasını dü-

şürmektedir. G-DAP ise yüksek yük altında CAFES'e yakın başarımlar izlemekte; düşük yük altında, daha fazla bağlantı kurup daha fazla kaynak tüketmektedir.



Şekil 3. NSFNET'te kaynak tüketim fazlası

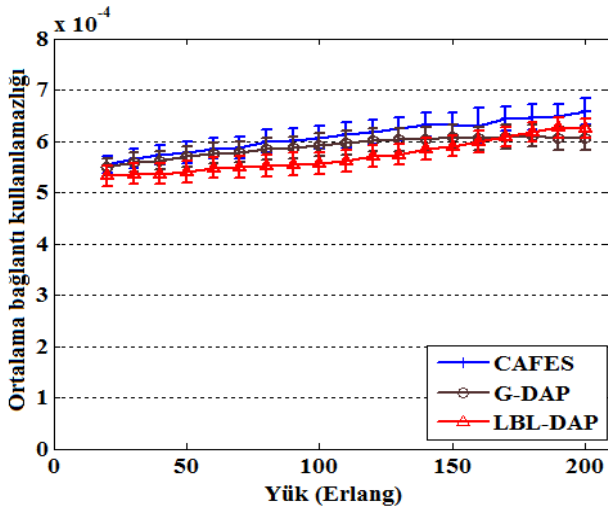
Söz konusu teknikler EON topolojisi altında karşılaştırıldığında (Şekil 4), LBL-DAP'nin benzer bir davranış gösterdiği, G-DAP'nin ise her trafik yükü altında CAFES ile benzer bir kaynak tüketimi göstererek, bağlantı kabul oranında sağladığı (Şekil 2) iyileştirmeyi kaynak tüketim fazlası olarak geri döndürmediği görülmektedir.



Şekil 4. EON'de yedek kaynak tüketim fazlası

Kullanılabilirlik kısıtı altında bağlantı kurma konusundaki bir diğer başarımlar parametresi de ortalama bağlantı kullanılabilirliğidir. Kullanılabilirlik değeri bire çok yakın değerler aldığı

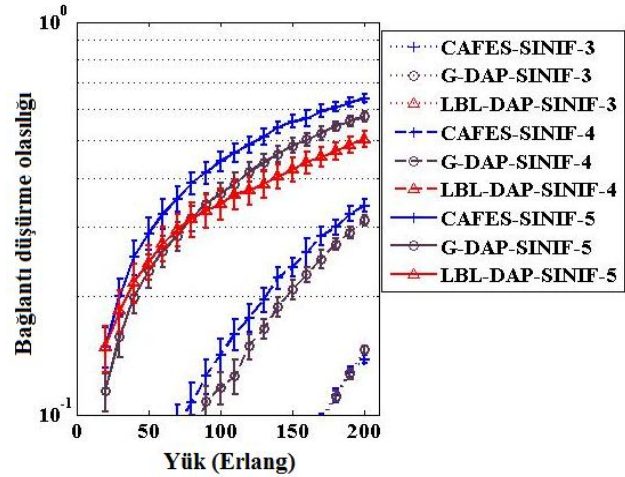
için, bu parametrenin tümleyeni, yani kullanılabilirlik da zaman zaman kullanılmaktadır. Bu çalışmada da, bağlantı kullanılabilirlik parametresi kullanılmıştır. Bağlantı kullanılabilirliği için EON'da alınan ölçümler (Şekil 5) gösterilmektedir, NSFNET altında alınan sonuçlar, EON'da alınan sonuçlarla benzer davranış göstermektedir ancak yer kısıtı nedeniyle makaleden çıkarılmıştır. Şekilde, önerilen adaptif güvenilir bağlantı kurma tekniklerinin, CAFES'in kullanılabilirlik değerinin üzerinde bir noktada hiçbir trafik yükü altında bulunmadığı görülmektedir. Bu durum, gerek G-DAP'nin gerek LBL-DAP'nin yedek kaynak yolu seçiminde kullandıkları çelişki fonksiyonlarının ortalama bağlantı kullanılabilirliğini de içermesinden kaynaklanmaktadır. O halde önerilen tekniklerin, bağlantıların düşürülme olasılığını azalttıkları halde, bağlantı kullanılabilirliğinde bir düşüşe neden olmadıkları için de tercih edilebilir oldukları söylenebilir.



Şekil 5. EON'de bağlantı kullanılabilirliği

Adaptif güvenilir bağlantı kurma tekniklerinin bağlantı düşürme olasılıkları, kullanılabilirlik sınıfları bazında da test edilmiştir (Şekil 6). En yüksek olasılıkla düşürülen bağlantılar, en yüksek kullanılabilirlik sınıfından olanlar olacaktır. 1 ve 2.sınıfa ait bağlantıların kullanılabilirlik istekleri daha düşük olduğu için, kaynak kısıtıyla da karşılaşmadan, çoğu kez yalnızca bir asal yol ile kurulabilmektedirler. Dolayısıyla şekilde en yüksek üç kullanılabilirlik sınıfına ait düşürülme olasılıkları gösterilmiştir. 5.sınıf için dü-

şürüme olasılığı, tüm bağlantıların düşürme olasılıkları ile (Şekil 2) aynı davranışı göstermektedir. Bu sınıflar için düşürülen bağlantıların sırası da tüm bağlantıların dikkate alındığı sonuçlardaki davranışla aynıdır. 3 ve 4.sınıf bağlantılar için G-DAP, CAFES'ten daha az bağlantıyı bloke etmekte, LBL-DAP ise bu sınıflardan bağlantıları 3.sınıf bağlantıları da az bir oranda düşürerek yine en iyi başarıyı göstermektedir.

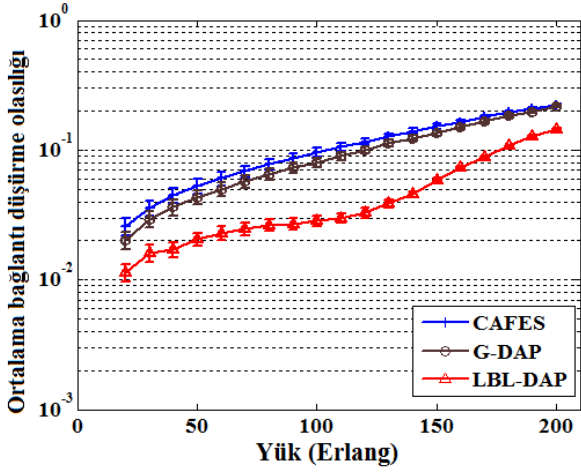


Şekil 6. EON'de sınıf başına düşürme olasılıkları

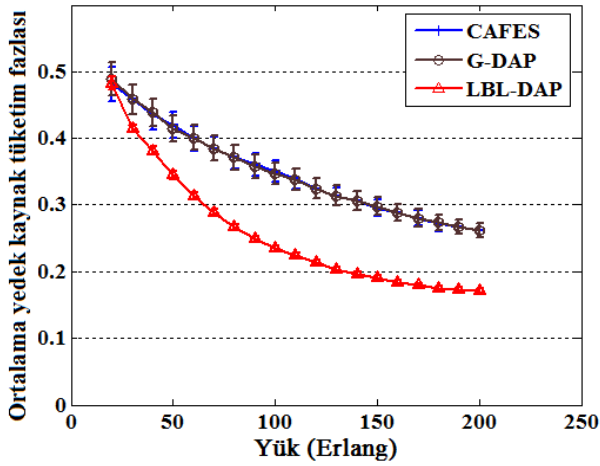
Sınıflar arası heterojen dağılım

Bu bölümdeki sonuçlar, bağlantı isteklerinin kullanılabilirlik sınıfları arasında heterojen dağıldığı senaryolar altında alınmıştır. Buna göre, istekler sırasıyla %12, %25, %32, %23 ve %8 oranında beş sınıf arasında dağılmaktadır. Burada, yer kısıtından ötürü, yalnızca EON topolojisinde alınan sonuçlar gösterilmektedir.

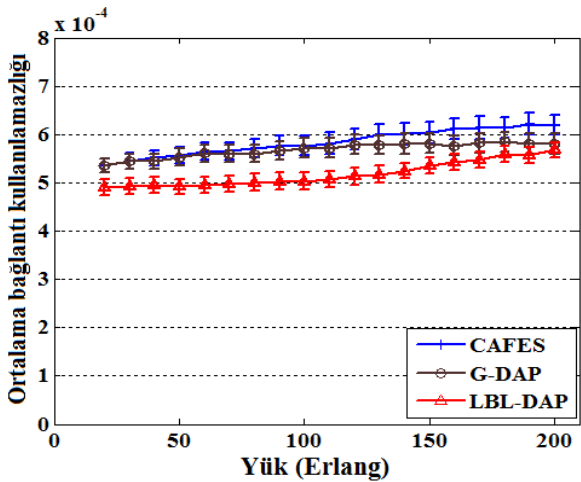
Bağlantı isteklerinin kullanılabilirlik sınıfları arasındaki heterojen dağılımı altında alınan sonuçlar, bağlantı düşürme olasılığı (Şekil 7), yedek kaynak tüketim fazlası (Şekil 8), ve ortalama bağlantı kullanılabilirliği (Şekil 9) açısından homojen dağılım altında alınan sonuçlara benzer davranış sergilemektedir. LBL-DAP her üç parametre açısından da en iyi başarıyı göstermektedir. G-DAP ise yedek kaynak tüketimi fazlasında artışa neden olmamakta, bağlantı düşürme olasılığı ve bağlantı kullanılabilirliği açısından LBL-DAP ile CAFES arasında başarıyla çalışmaktadır.



Şekil 7. Heterojen dağılmış bağlantı istekleri için düşürme olasılıkları



Şekil 8. Heterojen dağılmış bağlantı istekleri için yedek kaynak tüketim fazlası



Şekil 9. Heterojen dağılmış bağlantı istekleri için bağlantı kullanılamazlığı

Bu bölümde yapılan bir diğer ölçümde ise, yer kısıtından dolayı makalede içerilmemekte karşılaştırılan üç tekniğin bağlantı düşürme nedenlerinin görüntülenmektedir. Artan trafik yükü altında G-DAP ve LBL-DAP CAFES'e göre daha az sayıda bağlantıyı kullanılabilirlik isteğinden dolayı düşürmektedirler. Bu da, bağlantı kullanılabilirliğini CAFES'in sağladığı kullanılabilirlikten daha kötü bir düzeye taşımadıklarını gördüğümüz sonuçlarla (Şekil 9) uyumluluk göstermektedir.

Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Kullanılabilirlik kısıtı altında bağlantı kurma için, G-DAP ve LBL-DAP adında iki adaptif teknik önerilmiştir.
- G-DAP her SLA sınıfı için global bir paylaşım derecesi hesaplar. LBL-DAP ise, her hat için bu değerleri ayrıca hesaplar.
- Önerilen adaptif teknikler, geleneksel ve temel güvenilir bağlantı kurma algoritması CAFES ile farklı ortamlarda ve iki farklı topoloji altında karşılaştırılmıştır. Adaptif teknikler daha düşük bağlantı düşürme olasılığı ve kullanılamazlık değerine neden olmaktadır.
- LBL-DAP, yedek kaynak tüketim fazlasını da gözle görülür biçimde azaltarak bu çalışmada yer alan teknikler içinde en iyi başarımla sonuçlanmaktadır.

Kaynaklar

- Arci, D., Pattavina, A. ve Petecchi, D., (2003). Availability Models for Protection Techniques in WDM Networks, *Proceedings, Workshop on Design of Reliable Communication Networks*, 158-166.
- Babbitt, J. ve Best, R., (2006). Maintaining availability in an optical network backbone network, *Proceedings, Optical Fiber Communications Conference*, 1-3.
- Cavdar, C., Song, L., Tornatore, M. ve Mukherjee, B., (2007). Holding-time-aware and availability-guaranteed connection provisioning in optical WDM mesh networks, *Proceedings, International Symposium on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies*, 1-5.
- Kantarci, B., Mouftah, H. T. ve Oktuğ, S., (2008). Connection provisioning with feasible shareability determination for availability-aware design of

- optical networks, *Proceedings, International Conference on Transparent Optical Networks*, **3**, 19-22.
- Kantarcı, B., Mouftah, H. T. ve Oktuğ, S., (2008). Differentiated availability-aware connection provisioning in optical transport networks, *Proceedings, IEEE Global Communications Conference*, 1-5.
- Maesschalk, S., Colle D., Lievens, I., Pickavet, M., Demeester, P., Mauz, C., Jaeger, M., Inkret, R., Mikac, B. Ve derkacz, J., (2003). Pan-european optical transport networks: An availability-based comparison. *Springer-Photonic Network Communications*, **5**, 203-225.
- Mello, D. A. A., Schupke, D. A. veWaldman, H., (2005). A matrix-based analytical approach to connection unavailability estimation in shared backup path protection. *IEEE Communications Letters*, **9**, 9, 844-846.
- Mouftah, H. T. and Ho, P-H., (2003). *Optical Networks: Architecture and Survivability*, Kluwer Academic Publishers, USA.
- Mukherjee, B., (2006). *Optical Networks*, 1st Edition, Springer, USA.
- Ou, C. S. ve Mukherjee, B., (2005). *Survivable Optical WDM Networks*, Springer, USA.
- Ou, C., Zhang, J., Zhang, H., Sahasrabudde, L. H. ve Mukherjee, B., (2004). New and improved approaches for shared-path protection in wdm mesh networks. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, **22**, 1223-1232.
- Tornatore, M., Maier, G., ve Pattavina, A., (2005). Availability design of optical transport networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **24**, 1520-1532.
- Velasco, L., Sparado, S., Comellas, J. ve Junyent, G., (2006). Failure aware diverse routing: A novel algorithm to improve availability in ASON/GMPLS networks, *Proceedings, International Conference on Transport Optical Networks*, **3**, 195-198.
- Zhang, J., Zhu, K., Zang, H. ve Mukherjee, B., (2003). A new provisioning framework to provide availability-guaranteed service in wdm mesh networks, *Proceedings, International Communications Conference*, **2**, 1484-1488.
- Zhang, J., Zhu, K, Zhang H., Matloff N. S. ve Mukherjee, B., (2007). Availability-Aware Provisioning Strategies for Differentiated Protection Services in Wavelength-Convertible WDM Mesh Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **15**, 1177-1190.