

Sualtı Algılayıcı Ağlarda Minimum Gecikme ve Maksimum Yaşam Süresi Ödünleşmesi Minimum Delay and Maximum Lifetime Trade-off in Underwater Sensor Networks

Hüseyin Uğur Yıldız
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
TED Üniversitesi
Ankara, Türkiye
hugur.yildiz@tedu.edu.tr

Özetçe —Sualtı Algılayıcı Ağlar (SAA) şiddetli yol kaybı, yüksek çevre gürültüsü, uzun yayılım gecikmesi gibi sualtı kanalında meydana gelen çeşitli zorluklara maruz kalmaktadır. Bu zorluklar içinde yayılım gecikmesi (daha genel olarak uçtan uca gecikme) özellikle zaman açısından kritik SAA uygulamaları için en önemli kısıtlamadır. Uçtan uca gecikmeyi minimize etmek için düğüm atlama sayısını düşürecek yönlendirme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir olup bu çözüm ile ağda haberleşme için uzun linklerin kullanılması zorlanmaktadır. Ancak bu çözüm maksimum ağ yaşam süresini garantilememektedir. Diğer taraftan, ağ yaşam süresinin uzatılması için veri paketleri kısa linkler üzerinden çoklu atlamalı bir şekilde merkezi bir baz istasyonuna iletilmelidir. Bu çözüm ise uçtan uca gecikmeyi arttırmaktadır. Bu çalışmada SAA'larda minimum uçtan uca gecikme ve maksimum ağ yaşam süresi ödünleşmesi incelenmiştir. Bu kapsamda şiddetli sualtı kanal koşullarını dikkate alan iki farklı tamsayılı doğrusal programlama (TDP) modeli geliştirilmiştir. Bu çalışma sonunda minimum uçtan uca gecikme yönteminin maksimum ağ yaşam süresinden en fazla %53.95 daha düşük ağ yaşam süresi sunduğu görülmüş olup minimum uçtan uca gecikmenin en fazla %48.18 oranında artırılması ile maksimum ağ yaşam süresine ulaşılabilirdiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler—sualtı algılayıcı ağlar, ağ yaşam süresi, uçtan uca gecikme, tamsayılı doğrusal programlama.

Abstract—Underwater Sensor Networks (USNs) are exposed to a variety of challenges in the underwater channel, such as severe path loss, high ambient noise, and long propagation delay. Within these challenges, propagation delay (more generally, end-to-end delay) is the most limiting constraint for time-critical USN applications. In order to minimize the end-to-end delay, minimum hop routing methods should be used which enforce data packets to use long links for communications. However, this solution does not guarantee maximum network lifetime. On the other hand, data packets must be transmitted over short links to a central base station in a multi-hop manner for prolonging the network lifetime. Nevertheless, this solution increases the end-to-end delay. In this study, minimum end-to-end delay and maximum network lifetime trade-off is investigated for USNs. We propose two integer linear programming (ILP) models that consider the severe underwater channel conditions. Our results reveal that minimum end-to-end delay strategy yields up to 53.95% lesser lifetimes than maximum network lifetimes while increasing the minimum end-to-end delay at most by 48.18% provides maximum network lifetimes.

Keywords—underwater sensor networks, network lifetime, end-to-end delay, integer linear programming.

I. GİRİŞ

Sualtı algılayıcı ağ (SAA) uygulamaları genel olarak zaman açısından kritik olan uygulamalar (örn. sahil güvenlik, denizaltı tespiti, askeri navigasyon vs.) ve zaman açısından kritik olmayan uygulamalar (örn. sualtı habitat izleme, okyanus sıcaklık takibi vs.) şeklinde kategorize edilebilir [1]. Bu kategorilerden bağımsız olarak SAA'lar uzun yayılım gecikmesi, düşük bant genişliği, yüksek yol kaybı ve sık paket düşüşleri gibi su altı ortamının sert koşullarından olumsuz etkilenmektedir [2]. Bu zorluklar içinde, özellikle, uzun yayılım gecikmesi zaman açısından kritik SAA uygulamaları için en büyük kısıtlamadır.

Elektromanyetik dalgalar sualtı ortamında çabuk sönmeliğinden SAA'lar haberleşme için elektromanyetik dalgalarla daha yavaş ama sönmeme gibi etkilere karşı daha dayanıklı olan akustik (ses) taşıyıcı dalgaları kullanmaktadır [3]. Sualtı akustik haberleşmesi sırasında sesin sudaki hızından ötürü (yaklaşık olarak 1500 m/s) azımsanamayacak ölçüde yayılım gecikmesi (İng. propagation delay) meydana gelmektedir. Yüksek yayılım gecikmesi beraberinde uçtan uca gecikmeyi (İng. end-to-end delay) de arttırmaktadır. Uçtan uca gecikme bir veri paketinin kaynak düğümden merkezi bir toplayıcı düğüme iletilmesi için gereken süre olarak tanımlanmaktadır [4]. Bununla birlikte, SAA düğümlerinin maliyeti fazla olduğu için tipik bir SAA seyrek bir şekilde konuşlandırılmaktadır [5]. Bu durum hem enerji verimliliğini (dolayısıyla ağ yaşam süresini) hem de uçtan uca gecikmeyi olumsuz yönde etkilemektedir.

Enerji verimliliğini elde etmek ve ağ yaşam süresini uzatmak için olası bir yöntem, çoklu-atlama (İng. multi-hop) haberleşme tekniklerini kullanmaktır. Çoklu-atlama yönteminde veri paketleri birden fazla düğüm üzerinden atlayarak merkezi bir baz istasyonuna iletilir. Bu yöntem her ne kadar iletim için harcanan enerji miktarını düşürse de çoklu-atlama haberleşmede atlama sayısı (İng. hop count) arttığında uçtan uca gecikme de artar [6]. Diğer taraftan, minimum uçtan uca gecikmeye

ulaşmak için kullanılacak yönlendirme protokolleri düşük at-
lama sayısını sağlayan uzun linklerin kullanımını zorlamak-
tadır. Uzun linklerin kullanılması ise haberleşme için har-
canan enerjinin de artmasına neden olmaktadır. Özellikle sualtı
düğümlemleri genellikle haberleşme için Watt mertebelerinde güç
harcadıkları için bu durum ağ yaşam süresini olumsuz etkile-
mektedir. Böylece, minimum uçtan uca gecikme ile maksimum
ağ yaşam süresi arasında bir ödünleşme meydana gelmektedir.
Bu ödünleşmeye göre maksimum ağ yaşam süresi minimum
uçtan uca gecikmeyi sağlayan yönlendirme protokolleri ile elde
edilememektedir.

Literatürde zaman açısından kritik SAA'larda eniyileme
(İng. optimization) yöntemleri kullanılarak uçtan uca gecik-
meyi azaltmayı hedefleyen yönlendirme protokollerinin tasar-
lanması [6] ve optimum röle (İng. relay) düğüm konumlandırıl-
ması gibi konular üzerinde çalışılmıştır [3]. Mevcut çalış-
maların aksine, bu çalışma literatürde yer alan çalışmalardan
farklıdır. Bildiğimiz kadarıyla, SAA'larda minimum uçtan uca
gecikme ve maksimum ağ yaşam süresi arasındaki ödünleşme
daha önce literatürde detaylı bir şekilde araştırılmamıştır.

Bu çalışmada SAA'larda şiddetli sualtı kanal koşullarını
gözetken, uçtan uca gecikmeyi minimize eden ve ağ yaşam
süresini maksimize eden iki farklı tamsayılı doğrusal program-
lama (TDP) modeli geliştirilmiştir. TDP modelleri yardımı
ile SAA'larda minimum uçtan uca gecikme ve maksimum ağ
yaşam süresi arasındaki ödünleşme nicel olarak araştırılmıştır.

II. SİSTEM MODELİ

A. Enerji Modeli

Fiziksel katmanda sualtı kanal modeli Urick'in yol kayıp
modeline göre tasarlanmıştır [7]. Bu modele göre (i, j)
linkinde meydana gelen yol kaybı $\overline{A_{ij}(f)}$ dB cinsinden
aşağıdaki denklemde ifade edilmektedir.

$$\overline{A_{ij}(f)} = \overline{A_0} + 10\kappa \log_{10}(d_{ij}) + d_{ij} \times 10^{-3} \times \overline{\alpha(f)}. \quad (1)$$

Bu denklemde $\overline{A_0} = 30$ dB yol kaybında meydana gelen
anomalide modellemekte [7], $\kappa = 1.5$ pratik uygulamalar için
yayılm faktörünü temsil etmekte, d_{ij} metre cinsinden bir
 (i, j) linkinin uzaklığını göstermekte ve $\overline{\alpha(f)}$ dB/km cinsin-
den emilim katsayısını modellemekte olup Thorp'un ampirik
formülüne göre $\overline{\alpha(f)}$ aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\overline{\alpha(f)} = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 2.75 \cdot 10^{-4}f^2 + 0.003. \quad (2)$$

Bu denklemde $f = 25$ kHz kullanılan modem platformu-
nun merkezi çalışma frekansını temsil etmektedir [7]. Çevre-
sel gürültü; türbülans, gemicilik faaliyeti, dalgalar ve termal
gürültü olmak üzere dört temel kaynaktan oluşmaktadır. Çevre
gürültüsünün güç spektral yoğunluğu [7]

$$\overline{N(f)} \approx 50 - 18 \log_{10}(f), \quad (3)$$

şeklinde yaklaşık olarak hesaplanmaktadır. Sualtı ses
yayılmını modellemek için pasif sonar denklemi bu çalışma
kapsamında kullanılmıştır. Bu modelde, göndermeç düğüm,
düğüm- i olarak ve almaç düğüm, düğüm- j olarak modellendiği
takdirde almaç düğümdeki sinyal-gürültü oranı $(\text{SNR}_{ij}(f))$
aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$\overline{\text{SNR}_{ij}(f)} = \overline{\text{SL}(f)} - \overline{N(f)} - \overline{A_{ij}(f)}. \quad (4)$$

Bu denklemde $\overline{\text{SL}(f)}$ ses kaynak seviyesini (dB re $1\mu\text{Pa}$)
göstermekte olup

$$\overline{\text{SL}(f)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{tx}}{2\pi H I_0} \right), \quad (5)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Bu denklemde $I_0 = 0.67 \times 10^{-18}$ referans yoğunluğu [7], $H = 1000$ metre suyun der-
rinliğini [8], $P_{tx} = 8$ W ise elektriksel iletim gücünü temsil
etmektedir [9]. Bu çalışma kapsamında ikili faz kaydırmalı
anahtarlama (İng. binary phase shift keying) modülasyonu
kullanılmış olup Rayleigh sönümlenme kanalı için bit hata
olasılığı aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilmiştir [7].

$$p_{ij}^b(f) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\text{SNR}_{ij}(f)}{1 + \text{SNR}_{ij}(f)}}. \quad (6)$$

Bu denklemde $\text{SNR}_{ij}(f)$ değeri sinyal-gürültü oranını
doğrusal olarak ifade etmektedir. $L_P = 1024$ bit uzunluklu bir
veri paketinin başarılı bir biçimde (i, j) linkinde iletilmesinin
olasılığı [7]

$$p_{ij}^D(f) = (1 - p_{ij}^b(f))^{L_P}, \quad (7)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Dur ve bekle otomatik tekrarlamaya is-
teği (İng. stop-and-wait automatic repeat request) protokolüne
göre veri paketlerinin başarılı bir şekilde almaç düğümüne
iletilmesi için gereken toplam iletim sayısı aşağıdaki gibidir.

$$\mu_{ij}(f) = \frac{1}{1 - p_{ij}^D(f)}. \quad (8)$$

L_P bit uzunluklu bir veri paketinin i düğümünden j düğümüne
gönderilmesi için gereken ortalama enerji

$$E_{ij}^{tx}(f) = \mu_{ij}(f) \times (P_{tx} \frac{L_P}{R}), \quad (9)$$

Joule olup bu denklemde $R = 2500$ bps veri hızını temsil
etmektedir [7]. Benzer biçimde, j düğümünde paket alınması
için

$$E_{ji}^{rx}(f) = \mu_{ji}(f) \times (P_{rx} \frac{L_P}{R}), \quad (10)$$

Joule enerji harcanmaktadır. Bu denklemde $P_{rx} = 1$ W alma
için harcanan güçtür [7].

B. Eniyileme Modelleri

Bu bölümde uçtan uca gecikmeyi minimize eden ve uç-
tan uca gecikme sınırlandırılmadığı zaman ağ yaşam süresini
maksimize eden TDP modelleri sunulmuştur. Bu çalışmada
düşünülen SAA, $|W|$ tane algılayıcı düğümünden ve de merkezi
bir baz istasyonundan oluşmaktadır. Bu tanımda W algılayıcı
düğümlemler kümesini sembolize etmekte olup baz istasyonu
düğüm-1 olarak belirtilmiştir. Bununla birlikte $V = W \cup \{1\}$
kümesi baz istasyonu dâhil olmak üzere tüm düğümlerin
kümesini ifade etmektedir. Son olarak, yönlü linklerin kümesi
 E ile gösterilmiştir.

1) *Minimum Uçtan Uca Gecikme:* Uçtan uca gecikmeyi
minimize eden TDP modeli (11)'de sunulmuştur. Bu TDP
modelinin amaç fonksiyonu uçtan uca gecikmenin minimize
edilmesi olup minimum uçtan uca gecikme, τ_{min} değişkeni ile
modellendirilmiştir (bkz. (11a)). TDP modelinin karar değişken-
leri x_{ij}^l tamsayılı değişken ile gösterilmiş olup bu tanım l

düğümünde üretilen ve de (i, j) linkinde aktarılan L_P uzunluklu veri paket sayısı olarak tanımlanmıştır.

Minimum τ_{min} (11a)

Kısıtlar:

$$\sum_{\substack{j \in V \\ i \neq j}} x_{ij}^l - \sum_{\substack{j \in W \\ i \neq j}} x_{ji}^l = \begin{cases} 1 & \text{if } i = l \\ -1 & \text{if } i = 1 \\ 0 & \text{o.w.} \end{cases}, \quad (11b)$$

$\forall i \in V, \forall l \in W$

$$\sum_{j \in W} x_{jl}^l = 0, \quad \forall l \in W \quad (11c)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij}^l \times \mu_{ij}(f) \times \left(\frac{L_P}{R} + \frac{d_{ij}}{c} \right) \leq \tau_{min}, \quad \forall l \in W \quad (11d)$$

$$x_{ij}^l = 0 \text{ eğer } d_{ij} > R_{max}, \quad \forall (i, j) \in E, \forall l \in W \quad (11e)$$

$$x_{ij}^l \geq 0, \quad \forall (i, j) \in E, \forall l \in W \quad (11f)$$

(11b) numaralı kısıt akış dengeleme kısıdı olup kaynak düğümde ($i = l$), baz istasyonunda ($i = 1$) ve röle düğümlerde akımlarının dengelendiğini vurgulamaktadır. (11c) numaralı kısıt l kaynak düğümünde üretilen verinin tekrardan aynı düğüme dönemeyeceğini ifade eden döngü önleme kısıdır. (11d) numaralı kısıt her bir algılayıcı düğümün uçtan uca gecikmesinin τ_{min} 'den daha küçük olması gerektiğini ifade eden kısıttır. Bu denklemde $\mu_{ij}(f) \times \left(\frac{L_P}{R} + \frac{d_{ij}}{c} \right)$ ifadesi, (i, j) linkinin toplam gecikmesi olarak ifade edilmiş olup $c \approx 1500$ m/s sesin sudaki nominal hızını temsil etmektedir [7]. (11e) numaralı kısıt maksimum iletim menziline ($R_{max} = 5$ km [10]) daha uzağa veri gönderilemeyeceğini gösteren kısıttır. Son olarak (11f) numaralı kısıt veri miktarının negatif olamayacağını vurgulayan kısıttır.

2) **Maksimum Ağ Yaşam Süresi:** Uçtan uca gecikmenin sınırlandırıldığı durumda ağ yaşam süresini (t) maksimize etmeyi hedefleyen TDP modeli (12)'de sunulmuştur. Ağ yaşam süresi, ağdaki ilk düğümün enerjisini tamamen tükettiği zaman olarak tanımlanmıştır.

Maksimum t (12a)

Kısıtlar:

$$\sum_{\substack{j \in V \\ i \neq j}} x_{ij}^l - \sum_{\substack{j \in W \\ i \neq j}} x_{ji}^l = \begin{cases} t & \text{if } i = l \\ -t & \text{if } i = 1 \\ 0 & \text{o.w.} \end{cases}, \quad (12b)$$

$\forall i \in V, \forall l \in W$

$$\sum_{j \in W} x_{jl}^l = 0, \quad \forall l \in W \quad (12c)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij}^l \times \mu_{ij}(f) \times \left(\frac{L_P}{R} + \frac{d_{ij}}{c} \right) \leq \tau \times t, \quad \forall l \in W \quad (12d)$$

$$\sum_{i \in W} \left(\sum_{j \in V} x_{ij}^l E_{ij}^{tx}(f) + \sum_{j \in W} x_{ji}^l E_{ji}^{rx}(f) \right) \leq \chi, \quad \forall i \in W \quad (12e)$$

$$x_{ij}^l = 0 \text{ eğer } d_{ij} > R_{max}, \quad \forall (i, j) \in E, \forall l \in W \quad (12f)$$

$$x_{ij}^l \geq 0, \quad \forall (i, j) \in E, \forall l \in W \quad (12g)$$

(12b) numaralı kısıt ağ yaşam süresi boyunca her algılayıcı düğümde gerçekleştirilen akım dengeleme kısıdır. (12c) numaralı kısıt (11c) numaralı kısıt ile aynı işleve sahiptir. (12d) numaralı kısıt bir düğümün uçtan uca gecikmesinin τ parametresi ile sınırlandırıldığını belirtmektedir. (12e) numaralı kısıt her bir düğümün harcadığı toplam iletim ve alma enerjisinin batarya enerjisinden ($\chi = 100$ KJ [3]) küçük olması gerektiğini vurgulayan enerji kapasite kısıdır. Son olarak (12f) ve (12g) numaralı kısıtlar (11e) ile (11f) aynı fonksiyona sahiptir.

C. Yöntem

Bu çalışmada dört farklı performans metriği incelenmiştir. Bunlar; minimum uçtan uca gecikme (τ_{min}), ağdaki uçtan uca gecikme sınırlandırılmadığı zaman elde edilen maksimum ağ yaşam süresi (t_{maks}), minimum uçtan uca gecikme kısıdı altında elde edilen ağ yaşam süresi (t_{min}) ve maksimum ağ yaşam süresine ulaşmak için gereken uçtan uca gecikme (τ_{maks}). Bu değerler aşağıdaki belirtilen yöntemler ile elde edilmiştir.

- τ_{min} : (11)'deki TDP modelinin çözümü ile elde edilir.
- t_{maks} : (12)'deki TDP modelinde (12d) numaralı kısıdın çıkarılması ile elde edilir.
- t_{min} : (12)'deki TDP modelinde (12d) numaralı kısıtta $\tau = \tau_{min}$ şartı altında elde edilir.
- τ_{maks} : (12)'deki TDP modelinin amaç fonksiyonu "Minimum τ_{maks} " şeklinde düzenlenerek t değişkenleri t_{maks} parametresi ile; τ parametresi ise τ_{maks} değişkeni ile yer değiştirilmesi sonucu elde edilir.

III. ANALİZ

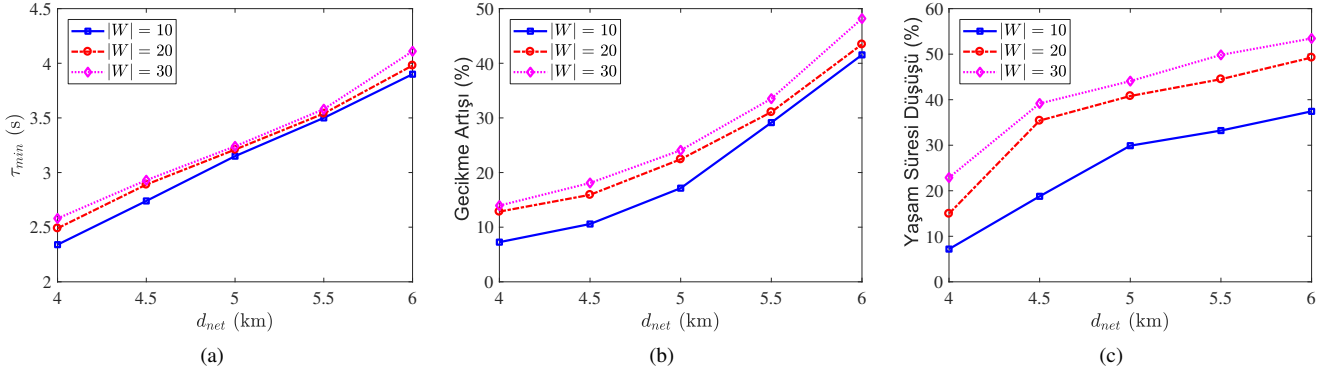
Bu bölümde minimum uçtan uca gecikme ve maksimum ağ yaşam süresi arasındaki ödünleşme bir önceki bölümde tanımlanan TDP modelleri yardımı ile incelenmiştir. Bu bağlamda ağdaki toplam düğüm sayısı $|W| = 10, 20$ ve 30 olarak alınmış olup bu düğümler $d_{net} \times d_{net}$ alanı içerisine düzgün rastgele dağılıma göre bırakılmıştır. Merkezi baz istasyonu bu kare alanın ortasında yer almaktadır. Sualtı ortamının derinliği $H = 1000$ metre [8] olup her bir algılayıcı düğüm düzgün dağılıma sahip derinliklere sahiptir. Bununla birlikte, tüm düğümlerin (baz istasyonu dâhil olmak üzere) okyanusun dibine çapa ile sabitlendiği varsayılmıştır. $d_{net} = 4$ ilâ 6 km arasında varsayılmıştır. Bölüm II-A'da sunulan enerji modeli MATLAB¹ ortamında geliştirilmiş olup Bölüm II-B'de sunulan eniyileme modelleri GAMS² yardımı ile modellendikten sonra CPLEX 12³ çözücüsü ile çözdürülmüştür. Topolojide meydana gelen değişimlerin etkilerinin incelenmesi için rastgele yaratılan 100 farklı topoloji bu çalışma dâhilinde dikkate alınmıştır. Son olarak, Şekil 1'de sunulan sonuçlar 100 farklı topolojinin ortalaması şeklinde sunulmuştur.

Şekil 1a'da minimum uçtan uca gecikme (τ_{min}), d_{net} 'e bağlı olarak üç farklı düğüm sayısı ($|W|$) için sunulmuştur. Topolojiden bağımsız olarak minimum uçtan uca gecikmenin 2.34 saniye ilâ 4.11 saniye arasında olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, d_{net} arttığı zaman (yani ağdaki düğüm

¹<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

²www.gams.com

³https://www.gams.com/latest/docs/S_CPLEX.html



Şekil 1: Minimum uçtan uca gecikme (a), maksimum ağ yaşam süresine ulaşmak için minimum uçtan uca gecikmenin artışı miktarı (b), minimum uçtan uca gecikme kullanıldığı zaman maksimum ağ yaşam süresinde meydana gelen düşüş (c).

yoğunluğu seyrekleştiği zaman) yayılım gecikmesi, ($\frac{d_{ij}}{c}$), arttığı için uçtan uca gecikmenin de yükseldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, ağdaki düğüm sayısı arttığı zaman da atlama sayısı artacağı için uçtan uca gecikmenin yükseldiği gözlenmiştir.

Şekil 1b’de maksimum ağ yaşam süresine (t_{maks}) ulaşmak için minimum uçtan uca gecikmenin ne kadar artırılması gerektiği (yüzde olarak) sunulmuştur. Bu grafikte elde edilen sonuçlar

$$\frac{\tau_{maks} - \tau_{min}}{\tau_{min}}, \quad (13)$$

formülü ile elde edilmektedir. Buna göre, minimum uçtan uca gecikme stratejisi uygulandığı takdirde maksimum ağ yaşam süresini elde edebilmek için τ_{min} değeri %7.26 ilâ %48.18 kadar artırılmalıdır. d_{net} yükseldiği zaman t_{maks} değerine ulaşabilmek için τ_{min} değerinin daha da artırılması gerekmektedir. Benzer bir şekilde, $|W|$ büyüdüğü zaman da τ_{min} değerinin daha da artırılması gerekmektedir.

Son olarak, Şekil 1c’de minimum uçtan uca gecikme stratejisi uygulandığı takdirde maksimum ağ yaşam süresinde (t_{maks}) ne kadar bir düşüş olduğu (yüzde olarak) sunulmuştur. Maksimum ağ yaşam süresinde meydana gelen düşüş

$$\frac{t_{maks} - t_{min}}{t_{maks}}, \quad (14)$$

formülü yardımı ile hesaplanmaktadır. Buna göre, minimum uçtan uca gecikme ağda uygulandığı zaman maksimum ağ yaşam süresinde meydana gelen düşüş %7.19 ilâ %53.45 arasında değişmektedir. Şekil 1b’de açıklanan yorumlar bu kısımdaki analizler için de geçerlidir. Yani, d_{net} veya $|W|$ arttığı zaman maksimum ağ yaşam süresinde meydana gelen düşüş de artmaktadır.

IV. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında SAA’larda minimum uçtan uca gecikmenin ağ yaşam süresine olan etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda sualtında meydana gelen zorlu kanal koşullarını dikkate alan bir enerji modeli kullanılarak TDP tabanlı iki farklı eniyileme modeli tasarlanmıştır. Bu modellerden birincisi, bir SAA’nın minimum uçtan uca gecikmesini hesaplarken

ikinci TDP modeli SAA’nın uçtan uca gecikmesini sınırlandırarak ağ yaşam süresini maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışma sonunda minimum uçtan uca gecikmeyi hedefleyen SAA uygulamalarında maksimum ağ yaşam süresinden en az %7.19–%22.18; en fazla %37.44–%53.45 daha düşük yaşam sürelerinin elde edildiği gözlenmiş olup minimum uçtan uca gecikmenin en az %7.26–%13.95 oranında; en fazla %41.54–%48.18 oranında gevşetilmesi (arttırılması) ile ancak maksimum ağ yaşam sürelerine ulaşılabilirdiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, “Underwater acoustic sensor networks: research challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257–279, 2005.
- [2] H. Alhumyani, R. Ammar, A. Alharbi, and S. Tolba, “Efficient surface-level gateway deployment using underwater sensing and processing networks,” in *Proc. MTS/IEEE OCEANS - Washington*, 2015, pp. 1–6.
- [3] H. Alhumyani, R. Ammar, R. Elfouly, and A. Alharbi, “Heuristic approaches for underwater sensing and processing deployment,” in *Proc. Int. Computer Engineering Conf. (ICENCO)*, 2015, pp. 86–91.
- [4] H. Alhumyani, R. Ammar, H. Albarakati, and A. Alharbi, “Deployment strategies for underwater sensing and processing networks,” in *Proc. IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*, 2016, pp. 358–363.
- [5] J. J. Kartha and L. Jacob, “Delay and lifetime performance of underwater wireless sensor networks with mobile element based data collection,” *Int. Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 5, p. 128757, 2015.
- [6] M. Zorzi, P. Casari, N. Baldo, and A. F. Harris, “Energy-efficient routing schemes for underwater acoustic networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 9, pp. 1754–1766, 2008.
- [7] J. U. Khan and H. S. Cho, “A data gathering protocol using AUV in underwater sensor networks,” in *Proc. OCEANS - TAIPEI*, 2014, pp. 1–6.
- [8] M. Felemban and E. Felemban, “Energy-delay tradeoffs for underwater acoustic sensor networks,” in *Proc. Int. Black Sea Conf. on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2013, pp. 45–49.
- [9] F. de Souza, R. Souza, G. Brante, M. Pellenz, F. Rosas, and B. Chang, “Code rate optimization for energy efficient delay constrained underwater acoustic communications,” in *Proc. OCEANS - Genova*, 2015, pp. 1–4.
- [10] W. Alsalihi, H. Hassanein, and S. Akl, “Delay constrained placement of mobile data collectors in underwater acoustic sensor networks,” in *Proc. IEEE Conf. on Local Computer Networks (LCN)*, 2008, pp. 91–97.