

# Sualtı Akustik Algılayıcı Ağlarının Performansının Çeşme Kodları ile İyileştirilmesi

## Improvement of Underwater Acoustic Sensor Networks Performance with Fountain Codes

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

**Özetçe** —Sualtı akustik algılayıcı ağ (SAAA) düğümlerinin yaşam sürelерinin uzatılması ve güvenilir bir haberleşme performansının sağlanması, sualtı akustik kanalının şiddetli doğası nedeniyle zorlu konulardır. Otomatik tekrarlama isteği (İng. Automatic Repeat Request – ARQ) gibi yeniden iletim kullanarak haberleşme güvenilirliğini sağlayan geleneksel yöntemler, enerji verimli olmadıkları için SAAA’ların yaşam süresini olumsuz yönde etkilemektedir. Bir ileri hata düzeltme tekniği olan Çeşme kodları (İng. Fountain Codes – FC), ARQ yönteminin enerji verimliliği sorununu, orijinal veri paketi ve bazı yedek paketleri yeniden iletim kullanmadan ağıda birlikte ileterek çözümeyi amaçlamaktadır. İletilecek olan yedek paket sayısı, alıcı düğümde önceden belirlenmiş bir güvenilirlik kriteri sağlamak için dinamik olarak ayarlanmaktadır. Bu çalışmada, FC yöntemini kullanarak SAAA’ların yaşam süresini maksimize eden bir tamsayılı doğrusal programlama (TDP) yöntemi önerilmiştir. Sonuçlarımız, FC yönteminin geleneksel ARQ yöntemininden daha iyi performans ölçütleri (örn. ağ yaşam süresi, uçtan uca gecikme ve enerji tüketimi) sağladığını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler**—sualtı akustik algılayıcı ağlar, ağ yaşam süresi, otomatik tekrarlama isteği, çeşme kodları, eniyileme.

**Abstract**—Prolonging the lifetime and providing a reliable communication performance of underwater acoustic sensor network (UASN) nodes are challenging issues due to the severe nature of the underwater acoustic channel. Traditional methods that ensure the reliability of communications by using retransmissions such as automatic repeat request (ARQ) negatively affect the lifetime of UASNs since they are not energy efficient. Fountain codes (FC), which is a forward error correction technique, aim to solve the energy efficiency problem of ARQ method by transmitting the original data frame and some redundant frames together in the network without using retransmissions. The number of redundant frames to be transmitted is dynamically adjusted to achieve a predetermined reliability criterion at the receiver node. In this study, an integer linear programming (ILP) method is proposed which maximizes the lifetime of UASNs by using FCs. Our results show that FC method provides better performance metrics (e.g., network lifetime, end-to-end delay, and energy consumption) than the traditional ARQ method.

**Keywords**—underwater acoustic sensor networks, network lifetime, automatic repeat request, fountain codes, optimization.

### I. GİRİŞ

Sualtı akustik algılayıcı ağlar (SAAA’lar), sualtı habitat izleme, okyanuslarda veri toplama, askeri destekli navigasyon ve mayın keşifleri gibi çeşitli ticari ve askeri su uygulamalarında kullanılan bir teknolojidir [1]. SAAA’lar genellikle çok sayıda algılayıcı düğüm ve baz istasyonu görevini üstlenen bir sonarlı şamandıradan (İng. sonobuoy) oluşmaktadır. Elektromanyetik dalgalar suda çabuk sökünlendiğinden dolayı, SAAA düğümleri haberleşme için akustik (ses) dalgalarını kullanmaktadır. Akustik dalgalar, düşük bant genişliği, uzun yayılım gecikmesi, yüksek zayıflama vb. özelliklere sahiptir. Sualtı ortamının zorlu koşullarından ötürü SAAA’larda güvenilir bir haberleşme performansını sağlayarak ağ yaşam süresini uzatmak zorlu bir araştırma konusudur.

SAAA düğümleri genellikle seyrek biçimde konuşlandırılmakta olup uzun akustik bağlara (İng. link) sahip olup bu bağlarda iletim hataları kaçınılmazdır [2]. SAAA bağlarının güvenilirliğini sağlamak için genellikle iki yöntem kullanılmaktadır. İlk yöntem otomatik tekrarlama isteği (İng. Automatic Repeat Request – ARQ) olup bu yöntemde iletilen her bir veri paketi, bir teyit (İng. acknowledgement – ACK) paketi ile onaylanmaktadır. ARQ yöntemi, haberleşme güvenilirliğini garanti etse de enerji verimli değildir. Bunun sebebi, veri veya teyit paketlerinde bir hata olduğunda yeniden iletme (İng. retransmission) ihtiyaç duyulması olup yeniden iletimler özellikle seyrek bir şekilde konuşlandırılan algılayıcı düğümlerinin daha fazla enerji tüketmesine neden olmaktadır [3]. Bununla birlikte, yeniden iletimler yüzünden ağdaki uçtan uca gecikme (bir veri paketinin bir kaynak düğümden alıcı düğüme iletilmesi için geçen süre) ciddi boyutlarda artmaktadır [4].

Sualtı akustik kanalların haberleşme güvenilirliğini artırmak için kullanılan diğer bir yöntem, bir ileri hata düzeltme tekniği olan Çeşme kodları (İng. Fountain codes – FC). FC yönteminde iletilecek olan mesaj paketi,  $M$  küçük parçaya bölünür ve bu  $M$  tane paket,  $N \geq M$  tane paket olarak kodlanarak ağıda toplu bir şekilde ilettilir. Alıcı düğüm, gönderilen  $N$  tane paket içinden en az  $M$  tanesini başarılı aldığı takdirde yüksek bir olasılıkla orijinal veri paketini geri çözebilir [5]. FC yöntemi, ARQ yöntemi gibi haberleşme güvenilirliğini tam olarak sağlamasa da ağın uçtan uca gecikmesini ve düğümlerin enerji tüketimini azaltmaktadır [6].

Bu çalışmada, sualtı akustik kanalın fiziksel karakteristiklerini gözetlen ve veri bağı katmanında FC yöntemini kullanarak ağ yaşam süresini maksimize eden bir tamsayılı doğrusal programlama (TDP) yöntemi önerilmiştir. Önerilen TDP modeli yardımcı ile ağ yaşam süresinin maksimize edildiği durumda ağıda harcanan enerji ve ağın uçtan uca gecikmesi hesaplanmıştır. Son olarak, FC yöntemi kullanılarak elde edilen ağ performans metrikleri (örn. ağ yaşam süresi, uçtan uca gecikme ve ağdaki enerji tüketimi), ARQ yöntemi ile elde edilen ağ performans metrikleri ile karşılaştırılmıştır.

## II. SİSTEM MODELİ

Sistem modelinin geliştirilmesi sırasında Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) tarafından geliştirilen Micromodem düğümlerinin güç tüketim değerleri kullanılmıştır [7].

### A. Sualtı Yayılım Modeli

$(i, j)$  sualtı bağında meydana gelen yol kaybı,  $\overline{A_{ij}(f)}$  dB, olarak tanımlanmış olup Urick'in empirik formülüne [8] göre  $\overline{A_{ij}(f)} = \overline{A_0} + 10\kappa \log_{10}(d_{ij}) + d_{ij} \times 10^{-3} \times \overline{\alpha(f)}$ , (1)

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemde  $\overline{A_0} = 30$  dB yol kaybı anomalisini,  $\kappa = 1.5$  yayılım faktörünü,  $d_{ij}$  ise bağlı uzunluğunu metre cinsinden ifade etmektedir [9].  $\overline{\alpha(f)}$  dB/km emilim katsayısını temsil etmekte olup  $f = 25$  kHz WHOI Micromodem'in merkezi çalışma frekansını göstermektedir [7]. Thorp'un empirik formülüne göre emilim katsayısı [9]

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

olarak hesaplanmaktadır. Çevresel gürültünün (örn. türbülans, gemicilik faaliyeti, dalgalar ve termal gürültü) güç spektral yoğunluğu yaklaşık olarak

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

ile ifade edilmektedir [8]. Sırasıyla,  $i$  ile  $j$  düğümleri verici ve alıcı düğümler olarak modellendiği takdirde alıcı düğümdeki sinyal-gürültü gücü oranı (SNR)

$$\overline{\gamma_{ij}} = \overline{SL} - \overline{N(f)} - \overline{A_{ij}(f)}, \quad (4)$$

olarak tanımlanmaktadır [9]. Bu denklemde,

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

ses kaynak seviyesi (akustik iletim gücü) olup birimi dB re  $1\mu\text{Pa}$  olarak ifade edilmektedir [10]. Bununla birlikte,  $I_0 = 0.67 \times 10^{-18}$  referans yoğunluğu [9],  $h = 1000$  metre suyun derinliğini [10] ve  $P_{tx} = 8$  W ise WHOI Micromodem'in elektriksel iletim gücünü modellemektedir [7]. WHOI Micromodem ikili faz kaydırmalı anahtarlama (Ing. binary phase shift keying) modülasyonunu desteklemekte olup Rayleigh sönümleme kanalı için bit hata olasılığı

$$p_{ij}^b = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma_{ij}}{1 + \gamma_{ij}}}, \quad (6)$$

olarak hesaplanmaktadır [9]. Bu denklemde,  $\gamma_{ij}$ , SNR ifadesinin doğrusal olarak edilmiş halidir.

### B. Veri Bağlantı Katmanı Enerji Tüketim Modelleri

Veri bağlantı katmanında ağ yaşam süresi eşit süreleri turlara bölünmüş olup her bir turun  $T_R = 100$  saniye sürdüğü varsayılmıştır. Her bir turda her bir algılayıcı düğüm  $L_D = 1024$  bit büyüklüğünde veri üretmekte olup bu veriler merkezi sonarlı şamandıraya iletilmektedir [6].

1) *Çeşme Kodları (FC)*: FC yönteminde her turda üretilen 1024 bit uzunluklu veri,  $M = 4$  eşit parçağa bölünmektedir. Verici düğümde  $M$  paket olarak bölünen orijinal veri,  $N \geq M$  paket olarak kodlanarak alıcı düğüme iletilmektedir. Buna göre, FC yöntemi için paket uzunluğu  $L_{FC} = L_D/M = 256$  bit olup her bir paketin  $(i, j)$  bağı üzerinde başarılı iletılma olasılığı

$$p_{ij}^{FC} = (1 - p_{ij}^b)^{L_{FC}}, \quad (7)$$

şeklinde tanımlanmıştır.  $j$  alıcı düğümünde,  $N$  tane paket içinden en az  $M$  tanesi başarılı olarak alınırsa FC iletimi başarı ile tamamlanır. FC yönteminin başarılı olma olasılığı

$$P_{ij}^{FC} = \sum_{m=M}^N \binom{N}{m} (p_{ij}^{FC})^m (1 - p_{ij}^{FC})^{N-m}, \quad (8)$$

olarak hesaplanmaktadır [8]. Bu denklemde önceden hedeflenen bir güvenilirlik kriterinin ( $\mathcal{P}_{tgt}^*$ ) sağlanması için  $\mathcal{P}_{ij}^{FC} \geq \mathcal{P}_{tgt}^*$  şartını sağlayacak en küçük  $N$  değerinin ( $N_{ij}^*$ ) her  $(i, j)$  bağı için tespit edilmesi gerekmektedir.  $i$  düğümünde  $N_{ij}^*$  değeri belirlendikten sonra bu bağda gözlenen toplam gecikme

$$t_{ij}^D = N_{ij}^*(L_{FC}/R) + d_{ij}/c, \quad (9)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklemde  $N_{ij}^*(L_{FC}/R)$  ifadesi,  $L_{FC}$  bit uzunluklu  $N_{ij}^*$  tane veri paketinin toplam iletim süresini göstermekte olup  $R = 5$  kbps WHOI Micromodem'in veri hızını temsil etmektedir [7].  $d_{ij}/c$  ifadesi ise  $N_{ij}^*$  tane veri paketinin topluca iletirken yaşadığı yayılım gecikmesini modellemekte olup  $c \approx 1500$  m/s sesin sudaki nominal hızını göstermektedir [9].

$i$  düğümünün  $j$  düğümüne  $N_{ij}^*$  tane  $L_{FC}$  bit uzunluklu veri paketini iletmesi için harcayacağı enerji

$$E_{ij}^{tx} = [N_{ij}^*(L_{FC}/R)]P_{tx}, \quad (10)$$

ile gösterilmiştir. Diğer taraftan, FC yöntemine göre  $N_{ij}^*$  tane gönderilen paket veri paketinin  $j$  alıcı düğümünde alınması için harcanacak maksimum enerji ise

$$E_{ji}^{rx} = [N_{ji}^*(L_{FC}/R)]P_{rx}, \quad (11)$$

olarak tanımlanmış olup  $P_{rx} = 1$  W WHOI Micromodem için alma enerjisini göstermektedir [7].

2) *Otomatik Tekrarlama İsteği (ARQ)*: ARQ yönteminde iletilen her bir veri paketi başarılı bir şekilde alıcı düğümde aldığı takdirde bir ACK paketi ile teyit edilmektedir. Bu yöntemde FC yönteminde olduğu gibi, orijinal veri paketi  $M$  tane küçük boyutlu pakete bölünmemektedir.  $i$  düğümünden iletilen  $L_D = 1024$  bit uzunluklu veri paketinin  $j$  düğümünde başarılı bir şekilde alınma olasılığı

$$p_{D,ij}^{ARQ} = (1 - p_{ij}^b)^{L_D}, \quad (12)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Diğer taraftan, ARQ yönteminde kullanılan ACK paket uzunluğu,  $L_A = 64$  bit olarak kabul

edilmiş olup [9],  $j$  düğümünden iletilen ACK paketinin  $i$  düğümünde başarılı bir şekilde alınma olasılığı

$$p_{A,ji}^{ARQ} = (1 - p_{ji}^b)^{L_A}, \quad (13)$$

olarak hesaplanmaktadır. Hem veri paketi hem de ACK paketi ilgili düğümlerde başarılı alındığı zaman, tokalaşma (Ing. handshake) başarılı bir şekilde tamamlanmaktadır. Diğer türlü, yeniden iletim kullanılarak tokalaşmanın tekrar edilmesi gerekmektedir. Tokalaşmanın başarılı olması için tokalaşma işleminin ortalamada

$$\varphi_{ij} = 1/[p_{D,ij}^{ARQ} \times p_{A,ji}^{ARQ}], \quad (14)$$

kere tekrar edilmesi gerekmektedir. ARQ yöntemine göre yeniden iletimler gözetilerek  $(i, j)$  bağı için toplam gecikme

$$t_{ij}^D = [L_D/R + L_A/R + 2d_{ij}/c] \times \varphi_{ij}, \quad (15)$$

şeklinde hesaplanmakta olup  $L_D/R$  ve  $L_A/R$ ;  $L_D$  ve  $L_A$  bit uzunluklu veri ile ACK paketlerinin iletimi için gereken süreleri,  $2d_{ij}/c$  ise iki yönlü yayılım gecikmesini modellemektedir.

Başarılı bir tokalaşmada,  $i$  verici düğümü ( $L_D/R$ ) $P_{tx}$  Joule enerjiyi  $L_D$  bit uzunluklu veri paketini  $j$  düğümüne göndermek için harcamaktadır. Bununla birlikte, ( $L_A/R$ ) $P_{rx}$  Joule enerjiyi de  $j$  düğümünden gönderilen ACK paketini almak için harcamaktadır. Yeniden iletimlerin dahil edilmesi ile  $i$  düğümünün harcadığı toplam enerji

$$E_{ij}^{tx} = [(L_D/R)P_{tx} + (L_A/R)P_{rx}] \times \varphi_{ij}, \quad (16)$$

olarak gösterilmiştir. Diğer taraftan,  $j$  alıcı düğümü,  $i$  düğümünden gönderilen verinin alınması için ( $L_D/R$ ) $P_{rx}$  Joule enerji harcarken ( $L_A/R$ ) $P_{tx}$  Joule enerjiyi ACK paketi göndermek için harcanmaktadır.  $j$  alıcı düğümünde harcanan toplam enerji aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$E_{ji}^{rx} = [(L_D/R)P_{rx} + (L_A/R)P_{tx}] \times \varphi_{ji}. \quad (17)$$

### C. Tamsayılı Doğrusal Programlama (TDP) Modeli

$$\text{Maksimum } N_R \times T_R \quad (18a)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{\substack{j \in V \\ i \neq j}} f_{ij}^l - \sum_{\substack{j \in W \\ i \neq j}} f_{ji}^l = \begin{cases} N_R & \text{eğer } i = l \\ -N_R & \text{eğer } i = 1 \\ 0 & \text{diğer türlü} \end{cases}, \quad (18b)$$

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

$$\mathcal{T}_i = \sum_{l \in W} \sum_{j \in V} f_{ij}^l t_{ij}^D + \sum_{l \in W} \sum_{j \in W} f_{ji}^l t_{ji}^D, \quad \forall i \in W \quad (18c)$$

$$\mathcal{T}_i \leq N_R \times T_R, \quad \forall i \in W \quad (18d)$$

$$\sum_{l \in W} \sum_{j \in V} f_{ij}^l E_{ij}^{tx} + \sum_{l \in W} \sum_{j \in W} f_{ji}^l E_{ji}^{rx} = E_i, \quad \forall i \in W \quad (18e)$$

$$E_i \leq \xi, \quad \forall i \in W \quad (18f)$$

$$f_{ij}^l = 0 \text{ eğer } d_{ij} > R_{maks}, \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in W \quad (18g)$$

$$f_{ij}^l \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in W \quad (18h)$$

Bu çalışma kapsamında ele alınan SAAA,  $|W|$  tane algılayıcı düğüm ve bir sonarlı şamandıradan (düğüm-1) oluşmaktadır. Ağdaki tüm düğümlerin sayısı  $|V| = |W| + 1$  olarak temsil edilmiştir.  $W$  kümesi ağdaki tüm algılayıcı düğümleri içeren kume olarak;  $V$  kümesi ise ağdaki tüm düğümleri (sonarlı şamandıra dahil olmak üzere) içeren kume olarak tanımlanmıştır. Ağdaki yönlü bağlar,  $A$  kumesi ile ifade edilmiştir. TDP modelinin karar değişkenleri  $f_{ij}^l$ ,  $\mathcal{T}_i$ ,  $E_i$  ve  $N_R$  olarak tanımlanmıştır.  $f_{ij}^l$ , ağ yaşam süresi boyunca  $l$  düğümünün ürettiği ve  $(i, j)$  bağı üzerinde aktarılan toplam iletim sayısını<sup>1</sup> temsil eden tamsayılı pozitif bir değişkendir.  $\mathcal{T}_i$ , ağ yaşam süresi boyunca  $i$  düğümünün yaşadığı toplam gecikmeyi (saniye cinsinden) ifade eden pozitif bir değişkendir.  $E_i$ , ağ yaşam süresi boyunca  $i$  düğümünün tükettiği toplam enerjiyi Joule cinsidinden göstermektedir. Son olarak,  $N_R$ , tur cinsinden ağ yaşam süresini temsil eden serbest değişkendir.

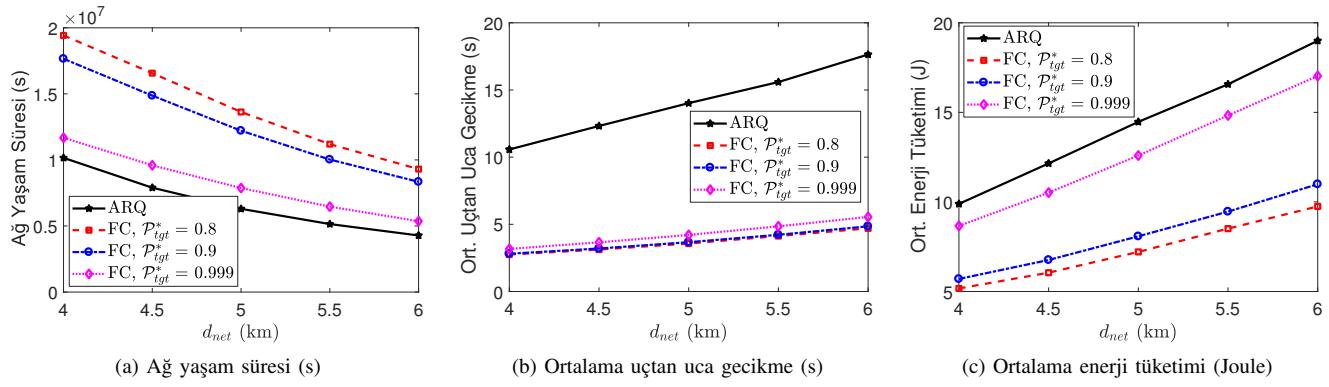
Ağ yaşam süresini maksimize etmeyi amaçlayan TDP modeli (18)'de sunulmuştur. Ağ yaşam süresi, ağdaki ilk düğümün batarya enerjisi tüketene kadar geçen zaman olarak tanımlanmaktadır. TDP modelinin amaç fonksiyonu (18a)'da sunulmuş olup bu amaç fonksiyonunda ağ yaşam süresinin,  $N_R \times T_R$  (saniye cinsinden), maksimize edilmesi hedeflenmektedir. TDP modelinin kısıtları (18b)–(18h) arasında tanımlanmıştır. (18b) numaralı kısıt her kaynak düğümde ( $i = l$ ), sonarlı şamandırade ( $i = 1$ ) ve rôle düğümlerde iletimlerin dengelendiği kısıttır. (18c) numaralı kısıt,  $i$  düğümü için toplam gecikmeyi ( $\mathcal{T}_i$ ) hesaplamakta olup (18d) numaralı kısıtta  $i$  düğümünün toplam gecikmesinin ağ yaşam süresinden daha düşük olması zorlanmaktadır. (18e) numaralı kısıt  $i$  düğümünün ağ yaşam süresi boyunca harcadığı enerjiyi ( $E_i$ ) hesaplayan kısıt olup (18f) numaralı kısıtta bir algılayıcı düğümün harcadığı enerjinin o düğümün batarya enerjisinden ( $\xi = 100$  KJ) daha düşük olması gerektiği ifade edilmektedir. (18g) numaralı kısıt menzil kısıdı olup düğümlerin  $R_{maks} = 5$  km'den daha uzağa veri iletmeyeceğini söylemektedir. Son olarak, (18h)'de iletim sayılarının negatif olamayacağı ifade edilmektedir.

FC yöntemi (veya ARQ yöntemi) ile ağ yaşam süresinin maksimize edilmesi için (18)'de sunulan TDP modelinde yer alan  $t_{ij}^D$ ,  $E_{ij}^{tx}$  ve  $E_{ji}^{rx}$  parametrelerinin önceden hesaplanması gerekmektedir. FC yöntemi için  $t_{ij}^D$ ,  $E_{ij}^{tx}$  ve  $E_{ji}^{rx}$  parametreleri Denklem (9)'da, (10)'da ve (11)'de; ARQ yöntemi için Denklem (15)'te, (16)'da ve (17)'de tanımlanmıştır.

### III. ANALİZ

Bu bölümde FC yöntemi kullanılarak elde edilen ağ performans metrikleri, ARQ yöntemi ile elde edilen ağ performans metrikleri ile karşılaştırılmıştır. Analizler kapsamında ele alınan SAAA,  $|W| = 30$  algılayıcı düğüm ve bir tane sonarlı şamandıradan oluşmaktadır. Algılayıcı düğümler, derinliği  $h = 1000$  m [10] olan  $d_{net} \times d_{net}$  kare alanı içine düzgün bir şekilde rastgele olarak bırakılmıştır. Sonarlı şamandıra su yüzeyinde yer almaktı olup ( $h = 0$  m) koordinatları ( $d_{net}, d_{net}, 0$ ) olarak tanımlanmıştır. Tüm düğümlerin suyun tabanına çapa ile sabitlendiği varsayılmıştır.  $d_{net}$  4 ilâ 6 km arasında değişmektedir. Topolojik değişimlerin etkilerinin incelenmesi için 100 tane rastgele topoloji yaratılmıştır. (18)'de kurulan TDP

<sup>1</sup>FC yöntemi için bir iletim,  $N_{ij}^*$  tane veri paketinin toplu olarak iletılmesini temsil ederken ARQ yöntemi için bir iletim, bir veri paketi ve bu pakete bağlı ACK paketinin iletılmesini temsil etmektedir.



Şekil 1: FC ve ARQ yöntemleri ile elde edilen üç farklı performans metriğinin karşılaştırmalı analizi.

modeli GAMS<sup>2</sup> yardımı ile modellendikten sonra CPLEX<sup>3</sup> çözümü ile çözülmüştür. Analizler sırasında üç farklı güvenilirlik kriteri dikkate alınmış olup bu değerler  $\mathcal{P}_{tgt}^* = 0.8, 0.9$  ve 0.999 olarak kabul edilmiştir [6].

Şekil (1)'de FC ve ARQ yöntemleri ile elde edilen üç farklı performans metriğinin karşılaştırmalı analizi sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında ele alınan üç performans metriği aşağıdaki gibi formülize edilmiştir.

- 1) Ağ yaşam süresi:  $N_R \times T_R$  saniye.
- 2) Ortalama uçtan uca gecikme:  $\frac{\sum_{l \in W} \sum_{(i,j) \in A} f_{ij}^l t_{ij}^D}{\sum_{l \in W} \sum_{(i,j) \in A} f_{ij}^l}$ .
- 3) Ortalama enerji tüketimi:  $\frac{\sum_{i \in W} E_i}{|W| \times N_R}$ .

Şekil (1a)'da FC ve ARQ yöntemleri için ağ yaşam süreleri gösterilmiştir. Buna göre ARQ yöntemi, en düşük ağ yaşam süresine sahiptir ( $4.28 \times 10^6$ – $1.02 \times 10^7$  saniye).  $\mathcal{P}_{tgt}^*$  değerinden bağımsız olarak, FC yöntemi ARQ yöntemine göre daha yüksek ağ yaşam süreleri sunmuştur ( $5.36 \times 10^6$ – $1.94 \times 10^7$  saniye). FC yöntemi için güvenilirlik kriterinin sıkışması ( $\mathcal{P}_{tgt}^*$  değerinin artması), ağıda iletlenen paket sayısını ( $N_{ij}^*$ ) artırmaktadır. Bu durum düğümlerde hem enerji tüketimini hem de uçtan uca gecikmeyi artıracığı için ağ yaşam sürelerinde düşüş gözlenmektedir. Özette, FC yöntemi ARQ yöntemine göre en az %14.96 daha yüksek ağ yaşam süreleri sunmuştur. Şekil (1b)'de FC ve ARQ yöntemleri için ortalama uçtan uca gecikme değerleri sunulmuştur. ARQ yönteminde yeniden iletimler kullandığı için bu yöntem en yüksek gecikmeye sahiptir (10.57–17.64 saniye). FC yöntemi ARQ yöntemine göre en az %68.54 daha düşük gecikme değerleri sunmaktadır. FC yöntemi ile elde edilen gecikme değerleri 2.75–5.55 saniye olarak ölçülmüştür.  $\mathcal{P}_{tgt}^*$  değerinin artması uçtan uca gecikmeyi de artırmaktadır. Son olarak, Şekil (1c)'de bir düğümün bir turda tükettiği ortalama enerji değerleri sunulmuştur. Buna göre, ARQ yönteminin enerji tüketimi 9.89–19.00 Joule arasındadır. FC yöntemi ile bir düğümün enerji tüketimi ARQ'ya göre en az %10.37 daha düşürmektedir. FC yönteminde ortalama enerji tüketimi 5.17–17.03 Joule olarak gözlenmiştir.  $\mathcal{P}_{tgt}^*$  değerinin artması düğümlerin enerji tüketimini de artırmaktadır.

#### IV. SONUÇ

Bu çalışmada, FC yöntemini kullanarak SAAA'ların yaşam süresini maksimize eden bir TDP yöntemi önerilmiştir. Önerilen TDP modeli, sualtı ortamında meydana gelen yol kayiplarını dikkate almakla birlikte veri bağı katmanında FC ve ARQ yöntemlerinin enerji tüketim karakteristiklerini gözetmektedir. TDP modeli kullanılarak, FC yöntemi kullanılarak elde edilen ağ performans metrikleri, ARQ yöntemi ile elde edilen ağ performans metrikleri ile karşılaştırılmıştır. FC yönteminin ARQ yöntemine göre ağ yaşam süresini en az %14.96 uzattığı, uçtan uca gecikmeyi en az %68.54 düşürdüğü ve düğümlerin bir turda harcadığı enerjiyi en az %10.37 azalttuğu gözlenmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Y. Xing and C. Tapparello, "Dynamic fountain codes for energy efficient data dissemination in underwater sensor networks," in *Proc. OCEANS 2017 - Anchorage*, 2017, pp. 1–6.
- [2] Y. Cui, J. Qing, Q. Guan, F. Ji, and G. Wei, "Stochastically optimized fountain-based transmissions over underwater acoustic channels," *IEEE T. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 5, pp. 2108–2112, 2015.
- [3] X. Du, K. Li, X. Liu, and Y. Su, "RLT code based handshake-free reliable MAC protocol for underwater sensor networks," *J. Sensors*, vol. 2016, no. 3184642, pp. 1–11, 2016.
- [4] W. Chen, H. Yu, Q. Guan, F. Ji, and F. Chen, "Reliable and opportunistic transmissions for underwater acoustic networks," *IEEE Network*, pp. 1–6, 2018.
- [5] H. U. Yıldız, "Maximization of underwater sensor networks lifetime via fountain codes," *IEEE T. Ind. Inform.*, pp. 1–1, 2019.
- [6] G. Barreto, D. H. Simao, M. E. Pellenz, R. D. Souza, E. Jamhour, M. C. Penna, G. Brante, and B. S. Chang, "Energy-efficient channel coding strategy for underwater acoustic networks," *Sensors*, vol. 17, no. 4, Article No: 728, 2017.
- [7] L. Freitag, M. Grund, S. Singh, J. Partan, P. Koski, and K. Ball, "The WHOI micro-modem: an acoustic communications and navigation system for multiple platforms," in *Proc. MTS/IEEE OCEANS*, vol. 2, 2005, pp. 1086–1092.
- [8] D. H. Simao, B. S. Chang, G. Brante, R. D. Souza, F. A. de Souza, and M. E. Pellenz, "Energy consumption analysis of underwater acoustic networks using fountain codes," in *Proc. MTS/IEEE OCEANS - Monterey*, 2016, pp. 1–4.
- [9] 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.
- [10] 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.

<sup>2</sup><https://www.gams.com/>

<sup>3</sup>[https://www.gams.com/latest/docs/S\\_CPLEX.html](https://www.gams.com/latest/docs/S_CPLEX.html)