

Gizli Dinlemeye Karşı Önlemlerin Kablosuz Algılayıcı Ağ Yaşam Süresine Etkisi

The Impact of Mitigation of Eavesdropping on Wireless Sensor Networks Lifetime

Yıldız Karakurt
Elektrik-Elektronik Müh.
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Ankara, Türkiye
ycanbilen@etu.edu.tr

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

Bülent Tavlı
Elektrik-Elektronik Müh.
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Ankara, Türkiye
btavli@etu.edu.tr

Özetçe —Kablosuz algılayıcı ağlar (KAA) belirli bir coğrafi alana dağılmış küçük algılayıcı düğümlerden oluşmaktadır. Hedeflenen düğüm çiftleri dışında diğer düğümlerin haberleşme menziline girmesi gizli dinleme (kulak misafirliği) olarak bilinmektedir. Gizli dinleme KAA'lara karşı bir saldırı olarak nitelendirilmekte olup KAA'nın güvenli biçimde çalışması için gizli dinleme riskinin en aza indirilmesi gerekmektedir. KAA'ların en önemli performans metriklerinden birisi ağ yaşam süresidir. Gizli dinlemeyi azaltmak adına düğümlerin iletim güç seviyelerinin düşürülmesi en iyi olmayan yönlendirme kararlarının kullanılmasına bu da ağın yaşam süresinin olumsuz etkilenmesine yol açar. Bu çalışmada, gizli dinlemeyi en aza indirmeye ve ağ yaşam süresini belirli bir gizli dinleme kısıtı altında en büyükmeye yönelik iki eniyileme modeli tasarlanmıştır. Gizli dinleme ve ağ yaşam süresi arasında ilişkinin analizi tasarlanan eniyileme modelleri yardımı ile incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda, gizli dinlemeyi minimuma indirmenin ağ yaşam süresinde azımsanmayacak ölçüde düşüşe neden olduğu gözlenmiş olup gizli dinleme sınırı belli miktarda genişletildiğinde ağ yaşam süresinin maksimum seviyeye çıktığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler—kablosuz algılayıcı ağlar, gizli dinleme, ağ yaşam süresi, iletim gücü, eniyileme.

Abstract—Wireless sensor networks (WSNs) consist of tiny sensor nodes distributed over a specific geographical area. Eavesdropping can be considered as an attack against WSNs when an adversary node overhears the transmissions among the sensor nodes. Hence a WSN needs to minimize the risk of overhearing in order to operate safely. One of the most important performance metrics of WSNs is network lifetime. Decreasing the transmission power levels of the nodes in order to reduce the overhearing can negatively affect the network lifetime due to the suboptimal routing paths that are used. In this study, two optimization models are developed to jointly reduce eavesdropping and increase the network lifetime. The analysis of the relationship between eavesdropping and network lifetime is investigated by using the proposed optimization models. As a result of this study, it was observed that the minimum reduction of eavesdropping causes a significant decrement in network lifetime and when the overhearing limit is extended to a certain level, the network lifetime converges to the maximum.

Keywords—wireless sensor networks, eavesdropping, network

lifetime, transmission power, optimization.

I. GİRİŞ

Kablosuz algılayıcı ağlar (KAA) belirli bir coğrafi alana rastgele biçimde yerleştirilmiş, birbirleriyle bilgi alışverişi yapabilen çok sayıda düğümden oluşmaktadır. Algılayıcı düğümler çevrelerinden topladıkları çeşitli fiziksel verileri merkezi bir baz istasyonuna çok atlamalı veya tek atlamalı yöntemlerle iletmektedir [1]. KAA'lar gerek sivil gerek ticari, gerekse askeri uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Özellikle askeri uygulamalarda kullanılan KAA'lar için güvenlik kritik bir parametredir. Tasarsız yapısı gereği KAA'lar karıştırma (İng. jamming) ve gizli dinleme (İng. eavesdropping) gibi aktif ve pasif tehditlere açıktır [2].

Gizli dinleme saldırıları genel olarak saldırganın düğümler arası haberleşmeyi belirli bir mesafeden gizli biçimde dinlemesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu durum algılayıcı düğümler arasındaki haberleşmenin gizliliğini ihlal etmektedir [3], [4]. Literatürde gizli dinleme riskini azaltmaya yönelik farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan bir tanesi verinin kriptografik yöntemlerle şifrelenerek iletilmesi şeklinde gerçekleştirilmesidir [5], [6]. Ancak bu yöntemin dezavantajı batarya kısıdına sahip algılayıcı düğümlerde kriptografik işlemler için harcanan hesaplama enerji maliyetidir [6]. Bu durum enerji verimliliğini düşürerek ağ yaşam süresini olumsuz etkilemektedir. Başka bir yöntem ise karıştırıcı dost sinyallerin kullanılması ile haberleşme kanalının güvenliğinin sağlanmasıdır [7]. Bu yöntemin sıkıntısı ise karıştırıcı dost sinyallerin aslında her zaman dost olmaması ile kablosuz kanalın normalden daha fazla gürültüye maruz kalmasıdır. Bu yöneme alternatif olarak düğümlerin iletim menzillerinin, iletim gücünün azaltılmasıyla, düşürülerek saldırganın ağdaki haberleşmeden haberdar olmasını engellemektir [8]. Bu teknik algılayıcı düğümlere herhangi bir hesaplama maliyeti bindirmemekle birlikte kablosuz kanalın gürültüye maruz kalmasını da önlemektedir. Ancak bu durum çok atlamalı haberleşme sıklığını artırarak, ağ yaşam süresini maksimize edecek en iyi

TABLE I: Mica2 düğüm platformu için 26 farklı güç seviyesi (N_l), iletim enerji tüketimi ($E_{tx}(l)$ – nJ/bit) ve iletim menzili ($R_{maks}(l) - m$) [10].

l	$E_{tx}(l)$	$R_{maks}(l)$	l	$E_{tx}(l)$	$R_{maks}(l)$
1	671.88	19.3	14	843.75	41.19
2	687.50	20.46	15	867.19	43.67
3	703.13	21.69	16	1078.13	46.29
4	705.73	22.69	17	1132.81	49.07
5	710.94	24.38	18	1135.42	52.01
6	723.96	25.84	19	1179.69	55.13
7	726.56	27.39	20	1234.38	58.44
8	742.19	29.03	21	1312.50	61.95
9	757.81	30.78	22	1343.75	65.67
10	773.44	32.62	23	1445.31	69.61
11	789.06	34.58	24	1500.01	73.79
12	812.50	36.66	25	1664.06	78.22
13	828.13	38.86	26	1984.38	82.92

yönlendirme kararının uygulanamamasına da neden olabilmektedir [9].

Bu çalışmada, gizli dinleme saldırılarını minimuma indirgeyen ve verilen bir gizli dinleme kısıtı altında ağ yaşam süresini enbüyükleyen bir eniyileme çerçevesi geliştirilmiştir. Geliştirilen eniyileme çerçevesi kullanılarak gizli dinleme ve ağ yaşam süresi arasındaki ilişki incelenmiştir.

II. SİSTEM MODELİ

Bu çalışmada KAA merkezi bir baz istasyonu etrafında rastgele dağılan $|W|$ tane algılayıcı düğümden oluştuğu varsayılmıştır. Bu tanımda W kümesi baz istasyonu dışında kalan algılayıcı düğümleri gösteren küme olup KAA, $G(V, A)$ şeklinde yönlü bir grafik olarak modellenmiştir. Bu tanımda V ve A kümeleri sırasıyla ağdaki tüm düğümleri ve linkleri temsil etmektedir. Mica2 model algılayıcı düğüm platformu bu çalışma kapsamında kullanılmakta olup bu düğüm platformu 26 ayrıık iletim güç seviyesine sahiptir [10]. Mica2 düğüm platformuna ait güç seviyeleri (l) ve bu seviyelere ait iletim güç ($E_{tx}(l)$) ile menzil ($R_{maks}(l)$) değerleri Tablo I’de sunulmuştur [10]. İletim güçleri N_l kümesi ile ifade edilmiş olup alma için harcanan enerji miktarı sabittir ($E_{rx} = 0.922 \mu J/bit$).

Şekil 1’de ağdaki toplam gizli dinleme sayısını (c_{min}) minimize etmeyi amaçlayan eniyileme modeli sunulmuştur. Bu modelde f_{ij}^k , k düğümünün oluşturduğu; i düğümünden j düğüme aktarılan veri paket sayısını temsil etmektedir. Kısıt 1, her algılayıcı düğümden akış dengeleme kısıdı olup her düğümden bir birim veri paketi üretildiği varsayılmıştır. Kısıt 2, bir k düğümünün kendisine veri gönderemeyeceğini ifade eden kısıttır. Kısıt 3, k düğümünün ürettiği ve l güç seviyesinde i düğümünden iletilen veri paket miktarını w_{il}^k tamsayı değişkeni yardımıyla göstermektedir. Bu kısıtta γ_{ij}^l ifadesi, i düğümünden j düğüme en az l güç seviyesi ile veri iletebiliyorsa 1; iletelemiyorsa 0 değerini alan bir parametredir. Kısıt 1’de verilen akış dengeleme kısıdından ötürü w_{il}^k değişkeni ya 0 ya da 1 değerini almaktadır. Kısıt 4 ve 5, $w_{il}^k > 0$ iken h_{il}^k ikili değişkenini 1 yapmakta; $w_{il}^k = 0$ iken $h_{il}^k = 0$ yapmaktadır. Bu kısıtta kullanılan $M_1 = |W|$, w_{il}^k değişkenin üst sınırını göstermektedir. Kısıt 6, k düğümünde üretilen ve j düğüme aktarılan veri paket miktarını (g_{kj}) hesaplamaktadır. Bu kısıtta z_{ij}^l ifadesi i düğümünden l güç seviyesinde iletim yapıldığı zaman j düğümünde veri paketi alınabilirse değeri 1 olan parametredir. Kısıt 7 ve 8 ile $g_{kj} > 0$ durumunda $a_{kj} = 1$; $g_{kj} = 0$ iken $a_{kj} = 0$ olmaktadır. Benzer bir şekilde,

Minimum c_{min}
Kısıtlar:

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

$$\sum_{j \in W} f_{jk}^k = 0, \quad \forall k \in W \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} f_{ij}^k \gamma_{ij}^l = w_{il}^k, \quad \forall (i, k) \in W, \quad \forall l \in N_l \quad (3)$$

$$w_{il}^k \leq M_1 \times h_{il}^k, \quad \forall (i, k) \in W, \quad \forall l \in N_l \quad (4)$$

$$w_{il}^k \geq h_{il}^k, \quad \forall (i, k) \in W, \quad \forall l \in N_l \quad (5)$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{l \in N_l} h_{il}^k \times z_{ij}^l = g_{kj}, \quad \forall k \in W, \quad \forall j \in V \quad (6)$$

$$g_{kj} \leq M_2 \times a_{kj}, \quad \forall k \in W, \quad \forall j \in V \quad (7)$$

$$g_{kj} \geq a_{kj}, \quad \forall k \in W, \quad \forall j \in V \quad (8)$$

$$\sum_{j \in V} a_{kj} = b_k, \quad \forall k \in W \quad (9)$$

$$\sum_{k \in W} b_k = c_{min} \quad (10)$$

$$f_{ij}^k \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A, \quad \forall k \in W \quad (11)$$

$$w_{il}^k \geq 0, \quad \forall (i, k) \in W, \quad \forall l \in N_l \quad (12)$$

$$g_{kj} \geq 0, \quad \forall k \in W, \quad \forall j \in V \quad (13)$$

$$b_k \geq 0, \quad \forall k \in W \quad (14)$$

$$a_{kj} \in \{0, 1\}, \quad \forall (k, j) \in W \quad (15)$$

$$h_{il}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, k) \in W, \quad \forall l \in N_l \quad (16)$$

Şekil 1: KAA’daki toplam gizli dinleme sayısını (c_{min}) minimize etmeyi amaçlayan eniyileme modeli.

M_2 sabit büyük bir sayı olup g_{kj} değişkeninin üst sınırını göstermektedir. Kısıt 9 ile k düğümünün ürettiği verinin kaç algılayıcı düğüm tarafından gizlice dinlenebileceği b_k tamsayı değişkeni ile hesaplanmıştır. Kısıt 10, KAA’da meydana gelen toplam gizli dinleme sayısını (c_{min}) hesaplamaktadır. Son olarak, Kısıt 11–16 kullanılan değişkenlerin sınırlarını ifade etmektedir.

Şekil 2’de ağda toplam gizli dinleme sayısı sınırlandırıldığı zaman (c_{min} ile) ağ yaşam süresini (t_{min}) maksimize etmeye çalışan eniyileme modeli sunulmuştur. Kısıt 17, ağ yaşam süresi boyunca her düğümden gerçekleştirilen akış dengeleme kısıtıdır. Bu kısıtta her birim zamanda her düğümün 1 veri paketi ürettiği varsayılmıştır. Kısıt 18, her düğümün veri iletmeye ve alma için harcamaya enerji miktarı düğümün batarya enerjisinden ($\xi = 25$ KJ) daha küçük olması gerektiğini belirten kısıttır. Bu kısıtta $L_P = 1$ KB veri paket boyutunu göstermektedir. İletim için harcanan optimum enerji değeri ($E_{tx,ij}^{opt}$) düğümler arası uzaklığa (d_{ij}) bağlı olarak Tablo I’de açıklandığı şekilde

Maksimum t_{min}

Kısıtlar:

$$\sum_{\substack{j \in V \\ i \neq j}} f_{ij}^k - \sum_{\substack{j \in W \\ i \neq j}} f_{ji}^k = \begin{cases} t_{min} & \text{if } i = k \\ -t_{min} & \text{if } i = 0 \\ 0 & \text{o.w.} \end{cases} \quad \forall i \in V, \forall k \in W \quad (17)$$

$$L_P \sum_{k \in W} \left(\sum_{j \in V} E_{tx,ij}^{opt} f_{ij}^k + E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji}^k \right) \leq \xi, \quad \forall i \in W \quad (18)$$

$$\sum_{k \in W} b_k \leq c_{min} \quad (19)$$

(2)–(9) ile (11)–(16) numaralı kısıtlar

Şekil 2: Ağ yaşam süresini (t_{min}) kısıtlı gizli dinleme ile maksimize eden eniyileme modeli.

denklem 20 yardımıyla hesaplanmaktadır. Kısıt 19, ağdaki toplam gizli dinleme sayısını c_{min} ile sınırlandırmaktadır. Şekil 1’de sunulan eniyileme modelinde yer alan 2–9 ile 11–16 numaralı kısıtlar aynı zamanda bu modelin de kısıtları arasında yer almaktadır.

$$E_{tx,ij}^{opt} = \begin{cases} E_{tx}(1) & \text{eğer } d_{ij} \leq R_{maks}(1) \\ E_{tx}(l+1) & \text{eğer } R_{maks}(l) < d_{ij} \leq R_{maks}(l+1) \\ \infty & \text{eğer } d_{ij} > R_{maks}(26) \end{cases} \quad (20)$$

III. ANALİZ

Bu bölümde Şekil 1’de ve 2’de sunulan eniyileme modellerinin çözümleri sunularak ağdaki toplam gizli dinleme sayısı ile ağ yaşam süresi arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu kapsamda eniyileme modelleri GAMS ile tasarlanarak CPLEX ile çözdürülmüştür. KAA, R_{net} yarıçaplı bir disk şeklinde kurgulanmış olup $|W|$ tane algılayıcı düğüm bu disk içinde düzgün bir biçimde dağılmıştır. Baz istasyonu R_{net} yarıçaplı dairenin merkezinde yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında algılayıcı düğüm sayısı 10 ile 20 arasında alınmıştır ($10 \leq |W| \leq 20$). Bununla birlikte ağdaki düğüm yoğunluğunun etkilerinin incelenmesi için $R_{net} = 60, 100$ ve 140 metre olacak şekilde üç farklı ağ yarıçapı bu çalışma kapsamında ele alınmıştır. Şekil 3’te ve 4’te sunulan her bir veri noktası 20 rastgele topoloji ile elde edilen sonuçların ortalamalarıdır.

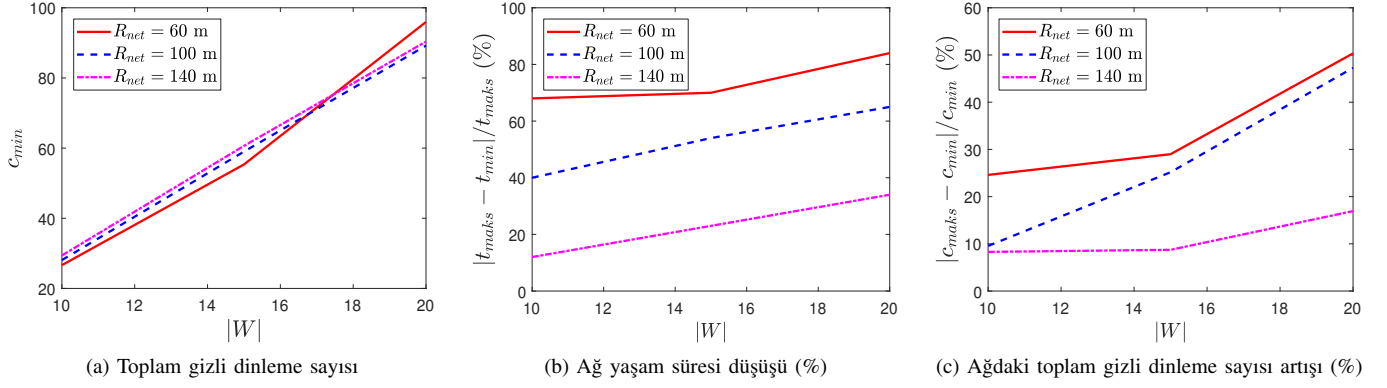
Şekil 1’de tasarlanan eniyileme modelinin çözümü Şekil 3a’da sunulmuştur. Bu grafikte x eksenini ağdaki düğüm sayısını göstermekte ve üç farklı R_{net} değeri için ağdaki toplam gizli dinleme sayısı (c_{min}) y ekseninde gösterilmiştir. Buna göre ağ yarıçapı en küçük olduğu durumda ve $|W| < 15$ iken c_{min} en küçük değerleri almaktadır ($26 \leq c_{min} \leq 55$). Bunun sebebi $R_{net} = 60$ m iken KAA’nın düğüm yoğunluğu fazla olduğu için ağdaki toplam gizli dinleme sayısını azaltacak kısa uzunlukta alternatif birçok yönlendirme yollarının bulunmasıdır. Bununla birlikte, $R_{net} = 100$ m ve 140 m iken KAA’nın düğüm yoğunluğu benzer olacağı için c_{min} değerleri de birbirlerine oldukça yakındır. Örneğin, $R_{net} = 100$ m iken $28 \leq c_{min} \leq 89$ ve $R_{net} = 100$ m iken $29 \leq c_{min} \leq 90$ olarak

gözlenmiştir. KAA’da 20 düğüm olduğu zaman, $R_{net} = 60$ m için toplam gizli dinleme sayısı en yüksek değere ($c_{min} = 95$) ulaşmaktadır. Bu durum KAA’nın düğüm yoğunluğundan ötürü düğümler arası mesafenin azalmasından ve dolayısıyla diğer düğümlerin de potansiyel gizli dinleme yapmasındandır.

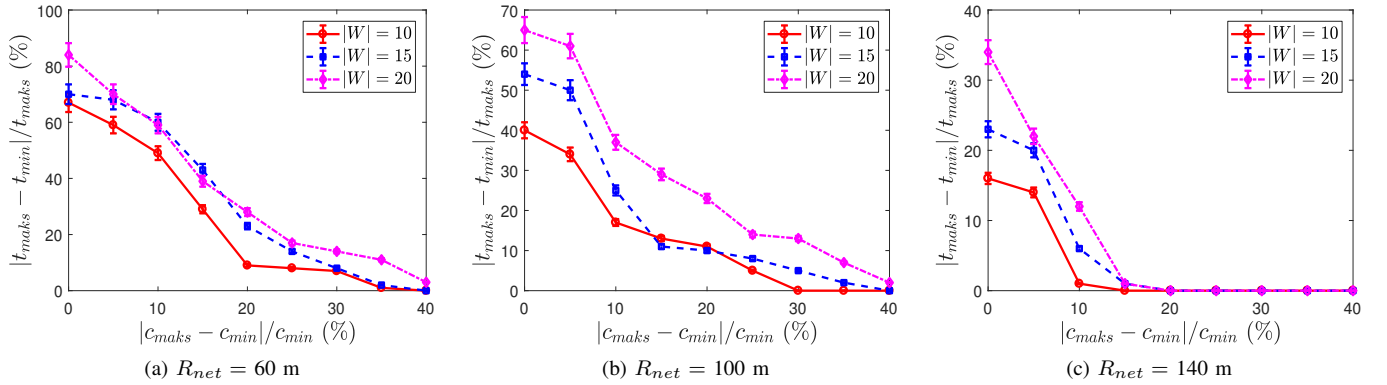
Şekil 3b’de düğüm sayısına bağlı olarak ağdaki toplam gizli dinleme sayısının kısıtlanmasıyla maksimum ağ yaşam süresinde meydana gelen düşüş gösterilmiştir. Bu grafikte verilen her bir $|W|$ değeri için maksimum ağ yaşam süresi (t_{maks}), Şekil 2’de sunulan modelde 19 numaralı toplam gizli dinleme sayı kısıdının kaldırılması ile elde edilmektedir. Özetle, Şekil 3a’da elde edilen c_{min} değerleri 19 numaralı kısıtın sağ tarafında kullanıldığı zaman elde edilen ağ yaşam süresi t_{min} olarak ifade edilmiştir. $t_{min} \leq t_{maks}$ olduğu için ağ yaşam süresinde meydana gelen düşüş, $\frac{t_{maks}-t_{min}}{t_{maks}}$ şeklinde hesaplanmaktadır. Bu şeklin y ekseninde bu düşüş % olarak gösterilmiştir. Buna göre, düğüm sayısının artması ile ağ yaşam süresinde meydana gelen düşüş de artmaktadır. Ağ yaşam süresindeki düşüşün $R_{net} = 60$ m için en yüksek olduğu gözlenmiştir (%68–%84 arası). Bu durum sebebi, $R_{net} = 60$ m için elde edilen c_{min} değerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte $R_{net} = 140$ m için düşüş %12–%34 arasında gözlenmiştir.

Şekil 3c’de maksimum ağ yaşam süresine ulaşmak için ağdaki toplam gizli dinleme sayısının yüzde olarak ne kadar artırılması gerektiği sunulmuştur. Bu değerlerin tespit edilebilmesi için Şekil 2’deki eniyileme modelinin amaç fonksiyonu: “Minimum c_{maks} ” şeklinde tanımlanıp modelde yer alan t_{min} değişkenleri daha önce hesaplanan t_{maks} parametresi ile; kısıt 19’da yer alan c_{min} değişkeni c_{maks} değişkeni ile değiştirilmiştir. Elde edilen yeni c_{maks} değerlerinin c_{min} değerlerinden yüzde olarak ne kadar büyük olduğu $\frac{c_{maks}-c_{min}}{c_{min}}$ formülü ile hesaplanarak bu şeklin y ekseninde sunulmuştur. Bu grafikte görüleceği üzere $R_{net} = 60$ m iken c_{min} değeri %24–%50 aralığında artırıldığı zaman t_{maks} değeri elde edilmektedir. Bilindiği üzere $R_{net} = 60$ m iken ağdaki toplam gizli dinleme sayısı minimum olmakla birlikte maksimum ağ yaşam süresinden çok daha düşük ağ yaşam süreleri elde edildiği için toplam gizli dinleme sayısı fazlaca artırıldığında maksimum ağ yaşam süresi elde edilmektedir.

Şekil 4’te üç farklı R_{net} değeri için ağdaki toplam gizli dinleme sayısı artışına (x eksen) bağlı olarak ağ yaşam süresinde meydana gelen düşüş (y eksen) yüzde olarak üç farklı düğüm sayısı ($|W| = 10, 15$ ve 20) için incelenmiştir. Bu grafiklerde sunulan veri noktalarında 20 rastgele topoloji için elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri birlikte gösterilmiştir. Buna göre, ağdaki toplam gizli dinleme sayısı artışı 0 olduğu zaman (yani $c_{maks} = c_{min}$), maksimum ağ yaşam süresinde meydana gelecek düşüş $|W| = 10$ için %16–%67 arasında tespit edilmiştir. Bununla birlikte ağ yarıçapı arttığı zaman bu düşüş %16’lara kadar gerilemektedir. $|W| = 15$ ve 20 için maksimum ağ yaşam süresinde meydana gelecek düşüşler sırasıyla %23–%70 ve %34–%84 aralıklarında gözlenmiştir. Bununla birlikte, ağdaki toplam gizli dinleme sayısı artışı ile ters orantılı olarak ağ yaşam süresinde meydana gelen düşüş beklendildiği üzere azalmaktadır. Örneğin, $R_{net} = 60$ m iken $\frac{c_{maks}-c_{min}}{c_{min}} = \%40$ artış ile t_{maks} değeri elde edilirken, $R_{net} = 100$ m ve 140 m için c_{min} değerinin sırasıyla %30 ve %20 artması ile t_{maks} değeri elde edilebilmektedir.



Şekil 3: (a) Ağdaki düğüm sayısına ($|W|$) bağlı olarak üç farklı ağ yarıçap değeri için (R_{net}) ağdaki toplam gizli dinleme sayısı, (b) maksimum ağ yaşam süresinde meydana gelen yüzdesel düşüş ve (c) maksimum ağ yaşam süresine ulaşabilmek için ağdaki toplam gizli dinleme sayısının yüzdesel artışı.



Şekil 4: Ağdaki toplam gizli dinleme sayısı artışına (%) bağlı olarak üç farklı düğüm sayısı ($|W|$) ve ağ yarıçapı için (R_{net}) maksimum ağ yaşam süresinde (t_{maks}) meydana gelen düşüş (%).

IV. SONUÇ

KAA'larda gizli dinleme potansiyelinin azaltılmasının ağ yaşam süresine olan etkileri geliştirilen özgün bir eniyileme çerçevesi vasıtasıyla sistematik biçimde incelenmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre gizli dinleme yapan düğüm sayısının sınırlandırılmasının ağ yaşam süresini önemli miktarda düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ağdaki toplam gizli dinleme sayısının %40 artırılması ile en yüksek yaşam süresinin elde edilebileceği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, maksimum ağ yaşam süresinde meydana gelebilecek düşüş miktarı ağ yoğunluğuyla doğru orantılı olarak artış göstermektedir (örneğin %90 seviyelerine varan yaşam süresi azalmaları gözlemlenmiştir).

KAYNAKLAR

- [1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [2] L. Pang and Z. Xue, "A novel anti-jamming method in wireless sensor networks: Using artificial noise to actively interfere the intelligent jammer," in *Proc. Int. Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, 2017, pp. 954–959.
- [3] Y. Zou and G. Wang, "Intercept behavior analysis of industrial wireless sensor networks in the presence of eavesdropping attack," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 780–787, 2016.
- [4] V. N. Vo, T. G. Nguyen, C. So-In, and D. B. Ha, "Secrecy performance analysis of energy harvesting wireless sensor networks with a friendly jammer," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 25 196–25 206, 2017.
- [5] Q. Chi, H. Yan, C. Zhang, Z. Pang, and L. D. Xu, "A reconfigurable smart sensor interface for industrial wsn in iot environment," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1417–1425, 2014.
- [6] L. Yuan, K. Wang, T. Miyazaki, S. Guo, and M. Wu, "Optimal transmission strategy for sensors to defend against eavesdropping and jamming attacks," in *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017, pp. 1–6.
- [7] Z. Han, N. Marina, M. Debbah, and A. Hjørungnes, "Physical layer security game: Interaction between source, eavesdropper, and friendly jammer," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2009, no. 1, p. 452907, 2010.
- [8] B. Tavli, M. M. Ozciloglu, and K. Bicakci, "Mitigation of compromising privacy by transmission range control in wireless sensor networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 1104–1106, 2010.
- [9] H. U. Yildiz, M. Temiz, and B. Tavli, "Impact of limiting hop count on the lifetime of wireless sensor networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 4, pp. 569–572, 2015.
- [10] H. U. Yildiz, B. Tavli, and H. Yanikomeroglu, "Transmission power control for link-level handshaking in wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 561–576, 2016.