

# Kritik Düğümlerin Etkisizleştirilmesinin Kablosuz Algılayıcı Ağ Yaşam Süresi Azalmasına Etkileri

## Assessment of Wireless Sensor Network Lifetime Reduction due to Elimination of Critical Node Sets

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

Bülent Tavlı ve Behnam Ojaghi Kahjogh  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
{btavli,bojaghi}@etu.edu.tr

**Özetçe** —Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA) askeri güvenlik ve çevre gözetleme vb. kritik kontrol etme uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Bu tip kritik uygulamalarda algılayıcı düğümler düşman saldırıları için potansiyel birer hedeftir. KAA'ların en önemli performans ölçütlerinden birisi ağ yaşam süresi olduğu için çeşitli saldırılarla algılayıcı düğümlerden en kritik olanlarının ele geçirilmesi ve işlevsiz hale getirilmesi ağ yaşam süresini ciddi miktarda etkilemektedir. Bu çalışmada Doğrusal Programlama (DP) tabanlı iki tane özgün algoritma geliştirilmiş olup kritik düğümlerin ele geçirilmesinin KAA yaşam süresine olan etkileri sistematik biçimde ele alınmıştır. Bu çalışma sonucunda kritik düğümlerin ele geçirilmesinin ağ yaşam süresini ciddi ölçüde düşürdüğü sonuçlarına varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler**—kablosuz algılayıcı ağlar, doğrusal programlama, ağ yaşam süresi, servis kesintisi, fiziksel saldırı

**Abstract**—Wireless Sensor Networks (WSN) are used in various critical monitoring applications such as military safety, environmental surveillance, etc. In such scenarios, it is common that WSN nodes are threatened by potential adversaries. Since the network lifetime is known to be the one of the most important performance metrics in WSNs, capturing the most critical nodes and incapacitating these nodes by various attacks may significantly reduce network lifetime. WSN lifetime reduction due to the elimination of the most critical sensor node set has never been investigated in the literature. In this study, we proposed two Linear Programming (LP) based algorithms to analyze the impact of capturing multiple critical nodes on WSN lifetime through numeric evaluations. Our results reveal that capturing the multiple critical nodes in WSN degrades the network lifetime greatly.

**Keywords**—wireless sensor networks, linear programming, network lifetime, denial of service, physical attack

### I. GİRİŞ

Algılama yeteneğine sahip çoklu sayıda düşük maliyetli ve küçük boyutlu cihazların, konumları önceden belirlenmiş bir alana bırakılması ve çevrelerinde meydana gelen olayların algılanarak merkezi bir düğüme iletilmesi Kablosuz Algılayıcı

Ağlar (KAA) olarak bilenen algılama sistemini oluşturmaktadır [1]. KAA'ların uygulama alanları arasında uzaktan izleme, askeri uygulamalar, otomasyon sistemleri, akıllı şebekeler, su altı gözetimi ve tarım uygulamalarıdır [2], [3]. Bu tip uzun süreli gözleme yeteneği KAA'ların vezgeçilmez bir özelliği olup ağ yaşam süresi KAA'ların en önemli hizmet kalitesi özelliğidir [4].

Diğer ağ haberleşme sistemleri gibi, KAA'lar da potansiyel güvenlik tehditlerine karşı korunmak zorundadırlar. KAA'ların kısıtlı kaynakları, tasarsız şekilde çalışmaları ve sert çevre koşullarından dolayı fiziksel korunmaları olmadığı için KAA'lar fiziksel katmandan uygulama katmanına kadar çeşitli tip saldırılara maruz kalabilir [5]. KAA tasarımıındaki en önemli amaç ağ yaşam süresini uzatmak olduğu için KAA enerji verimliliğini düşürmeye yönelik gerçekleştirilen güvenlik saldırıları KAA litetaturünde büyük bir önem arz etmektedir.

KAA'ların yaşam süresini uzatmak için algılayıcı düğümler çevrelerinden topladıkları verileri merkezi bir baz istasyonuna iletirken işbirliği yapmak zorundadırlar. Optimal enerji dengelemesine ulaşmak için kritik olan düğüm grubunun etkisiz (işlevsiz) hale getirilerek KAA'da kullanılan düğümlerin ömrünü azaltan çeşitli özgün saldırı yöntemleri tasarlamak mümkündür. Bu tip saldırıların etkisiz hale getirilen düğüm sayısı ile orantısız olarak ağ yaşam süresini düşürdüğü gözlenmiştir [6]. Düğümlerin etkisiz hale getirilmesi kısıtlı sayıdaki kritik düğümlerin fiziksel olarak yok edilmesi veya uzaktan düğümlerin ele geçirilmesi şeklinde düşman tarafından gerçekleştirilebilir. Ayrıca, deprem, sel vb. doğa olayları ile de kritik düğümlerin etkisiz hale gelmesi de mümkündür. Bu çalışmada bahsi geçen kritik düğümler, KAA literatüründe genel olarak kullanılan kritik düğüm tanımından farklıdır. KAA literatüründe kritik düğümlerin etkisiz hale getirilmesi ile ağda bağlantı kesilmesi meydana gelmekte olup [7] bu çalışmada KAA'nın güçlü bir şekilde bağlı olduğu varsayılmıştır. Bu yüzden birkaç düğümün etkisiz hale getirilmesi ağın bölünmesine yol açmamaktadır. Kritik algılayıcı düğümlerin etkisiz hale getirilmesinin ağ yaşam süresine olan etkilerini incelemek adına bu çalışmada Doğrusal Programlama (DP) yöntemi kullanılarak iki farklı algoritma geliştirilmiştir.

## II. MODEL

Bu çalışmada kullanılan ağ modelinde bir tane baz istasyonu disk şeklindeki ağın tam merkezinde bulunmakta olup  $N_S$  tane algılayıcı düğüm disk şeklindeki ağı düzgün dağılımla rastgele bırakılmıştır. Her  $i$  algılayıcı düğümü periyodik olarak  $s_i$  bayt veri üretmekte ve üretilen bu veri baz istasyonuna tek yollu (İng. single-path) veya çoklu yollu (İng. multi-path) olarak iletilmektedir. Tüm algılayıcı düğümler baz istasyonuna veri iletirken röle düğüm olarak görev alabilmektedir. KAA yönlü bir grafik olan  $G = (V, A)$  şeklinde tanımlanmış olup  $V$  kümesi tüm algılayıcı düğümleri temsil etmekte olup baz istasyonu düğüm-1 olarak tanımlanmıştır.  $W = V \setminus \{1\}$  kümesi baz istasyonu dışında kalan diğer düğümleri temsil etmektedir.  $A = \{(i, j) : i \in W, j \in V - i\}$  kümesi ise bağları (İng. link) gösteren kümedir. Bu tanımda hiçbir düğümün kendisine veri iletemediği açıkça görülmektedir. DP modelinin amaç fonksiyonu ağ yaşam süresinin ( $t$ ) maximize edilmesi şeklinde ifade edilmiştir. Ağ yaşam süresi, ilk algılayıcı düğümün tüm batarya enerjisini tükettiği an olarak tanımlanmıştır [4]. Bu tanıma göre ağ yaşam süresinin maximize edilmesi için tüm algılayıcı düğümler yaşam süresini iyileştirmek adına enerji dengelemesi yapmak için ortaklaşa çalışmaktadırlar. Böylece, ağdaki tüm düğümler aynı anda enerjilerini tüketmektedir. Düğüm- $i$ 'den düğüm- $j$ 'ye iletilen veri miktarı  $f_{ij}$  karar değişkeni ile gösterilmektedir. DP modeli Şekil 1'de detaylıca açıklanmıştır.

maximum  $t$   
Kısıtlar:

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (1)$$

$$\sum_{j \in V} f_{ij} - \sum_{j \in W} f_{ji} = \begin{cases} s_i t & \forall i \in W \\ - \sum_{j \in W} s_j t & i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} E_{tx,ij}^{opt} f_{ij} + E_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji} \leq \zeta \quad \forall i \in W \quad (3)$$

Şekil 1: Ağ yaşam süresini maximize eden DP modeli

Kısıt (1) ağdaki akışların negatif olamayacağını göstermektedir. Kısıt (2) akış dengeleme için kullanılmakta olup baz istasyonu dışında kalan tüm düğümlerde ( $i \in W$ )  $i$  düğümünden çıkan akımların bu düğüme gelen akımlar ile bu düğümün ürettiği akım miktarının toplamı kadar olduğunu söylemektedir. Bununla birlikte, algılayıcı düğümlerde üretilen tüm veri baz istasyonunda sonlandırılmaktadır. Kısıt (3) algılayıcı düğümler için enerji tüketim kısıtı olup iletim ve alma için harcanan enerji miktarının algılayıcı düğümlerdeki batarya enerjisinden ( $\zeta = 3$  J) daha az olması gerektiğini vurgulamaktadır.  $i$  düğümü ile  $j$  düğümü arasındaki fiziksel mesafe  $d_{ij}$  değişkeni ile gösterilmiş olup bir bit verinin bu mesafeye gönderilmesi için harcanan optimum enerji miktarı  $E_{tx,ij}^{opt}$  ile modellenmiştir. Bir bit verinin algılayıcı düğümlerde alınması için harcanan enerji miktarı sabit bir değişken olan  $E_{rx}$  ile temsil edilmiştir.

Mica2 düğüm platformu için deneysel olarak tespit edilen ve modellenen enerji tüketim karakteristikleri Tablo I'de sunulmuştur [8]. Bu tabloda  $l$  güç seviyesi için iletim enerji tüketimi  $E_{tx}(l)$  olarak ve bu güç seviyesi için ölçülen maximum menzil  $R_{max}(l)$  metre olarak ölçülmüştür. İletim güçleri  $S_L$  ile ifade

edilen 26 elemanlı bir kümeden seçilmektedir. Her ne kadar bir bitlik verinin iletimi kaynak ve hedef düğümler arası uzaklığa bağlı olsa da alım işlemi için gereken enerji miktarı uzaklıktan bağımsız olup sabittir ( $E_{rx} = 0.922 \mu\text{J/bit}$ ). Eğer  $d_{ij}$  uzaklığı maximum menzil değerinden ( $R_{max}(26) = 82.92$  m) daha yüksek olursa,  $i$  düğümünden  $j$  düğüme veri iletilememektedir. Her algılayıcı düğüm optimal iletim enerjisini ( $E_{tx,ij}^{opt}$ ) Denklem (4)'e göre seçmektedir.

TABLO I: Mica2 düğüm platformunda 26 farklı güç seviyesi için iletim enerji tüketimi ( $E_{tx}(l) - \text{nJ/bit}$ ) ve iletim menzili ( $R_{max}(l) - \text{m}$ ) [8].

$l$	$E_{tx}(l)$	$R_{max}(l)$	$l$	$E_{tx}(l)$	$R_{max}(l)$
1 ( $l_{min}$ )	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 ( $l_{max}$ )	1984.38	82.92

$$E_{tx,ij}^{opt} = \begin{cases} E_{tx}(1) & \text{eğer } d_{ij} \leq R_{max}(1) \\ E_{tx}(l+1) & \text{eğer } R_{max}(l) < d_{ij} \leq R_{max}(l+1) \\ \infty & \text{eğer } d_{ij} > R_{max}(26) \end{cases} \quad (4)$$

Yukarıda açıklanan ve ağ yaşam süresini maximize eden DP modeli, KAA'daki kritik düğümleri belirleyen algoritmaların temeli olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada tasarlanan algoritmalar ağ yaşam süresini en fazla etkileyen (düşüren veya yükselten) kritik düğüm kümesini tespit etmektedir. Eğer ağ yaşam süresini en fazla etkileyen tek bir kritik düğümün bulunması istenirse, Şekil 1'de sunulan DP modeli  $N_S$  kez çalıştırılmalıdır. Yani öncelikle bir tane düğüm ağdan silinerek (ele geçirilerek) yaşam süresi bulunmakta, bu işlem kalan diğer düğümler için tekrarlanarak ağ yaşam süresini en çok etkileyen en kritik düğüm tespit edilmektedir.

Bazı düğümlerin işlevsiz hale getirilmesi ile ağ yaşam süresi her zaman düşmeyebilir. Kimi durumda ağdaki düğümlerin bazılarının ele geçirilmesi ile ağ yaşam süresinde bir miktar artış gözlemlenebilir. Her ne kadar en kritik düğümün tespit edilmesi DP modelinin  $N_S$  kere çalıştırılması ile elde edilse de ağ yaşam süresini en çok etkileyen kritik algılayıcı düğüm grubunun tespit edilmesi bir önceki duruma göre kolay olmayabilir. "Ardışık Kritik Düğüm Seçim Algoritması"nı (Algoritma (1)) kullanarak  $N_C$  tane kritik düğüm ardışık biçimde tespit edilebilir. Bunun için öncelikle ağ yaşam süresini en fazla etkileyen düğüm  $N_S$  iterasyonda bulunur. Daha sonra bulunan kritik düğüm ağdan çıkarılarak  $N_S - 1$  iterasyonda ağ yaşam süresini en fazla etkileyen ikinci kritik düğüm tespit edilir. Bu süreç toplamda  $N_C$  tane kritik düğümün bulunmasına kadar devam eder. Alternatif olarak "Yığın Kritik Düğüm Seçim Algoritması" (Algoritma (2)) ile  $N_S$  tane düğümün  $N_C$  kombinasyonu ile kritik düğümler belirlenerek ağdan atılır ve ağ yaşam süresinde meydana gelen değişim de incelenebilir. Bu durumda ağ yaşam süresinin en fazla etkilendiği durumu

**Algoritma 1: Ardışık Kritik Düğüm Seçim Algoritması**

**Girdi:**  $G=(V, A)$ : ağ topoloji grafiği  
 $N_C$ : kritik düğüm sayısı  
 $mod$ : 'min' veya 'max' kritik düğümlerin ele geçirilmesi ile ağ yaşam süresinin minimize/maximize edilmesi

**Çıktı:**  $C=\{(v_j, lt_j)$ : sıralı kritik düğüm kümesi  $v_j$ ,  
 $v_j \in V$ ,  $1 \leq j \leq n$  ve  $v_1$ 'den  $v_j$ 'ye kadar olan düğümlerin  $G$ 'den silinmesi ile elde edilen ağ yaşam süresi  $lt_j\}$

```

1 for  $k=1$ 'den  $N_C$ 'ye do
2   if  $mod='max'$  then
3      $C_k.yasamSuresi = 0$ 
4   else
5      $C_k.yasamSuresi = \infty$ 
6   end
7   foreach  $v_i \in V$  için  $1 \leq i \leq |V|$  do
8      $lt_i \leftarrow yasamSuresi(G \setminus v_i)$ 
9     if ( $mod='max'$  ve  $lt_i > C_k.yasamSuresi$ ) veya ( $mod='min'$  ve  $lt_i < C_k.yasamSuresi$ ) then
10       $C_k.kritikDugumler = v_i$ 
11       $C_k.yasamSuresi = lt_i$ 
12    end
13  end
14  ▷ kritik düğümün  $G$ 'den silinerek ağ yaşam süresinin minimize/maximize edilmesi
15   $G \leftarrow G \setminus C_k.kritikDugumler$ 
16 end
17 return  $C$ 

```

tespit edebilmek adına DP modeli  $\binom{N_S}{N_C} = \frac{N_S!}{N_C!(N_S-N_C)!}$  kere çalıştırılmalıdır.

Algoritma (1) girdi olarak düğüm ve bağ bilgisini içeren ağ topolojisini ( $G = (V, A)$ ), bulunacak kritik düğüm sayısını ( $N_C$ ) ve ağ yaşam süresinin minimize mi yoksa maximize mi edileceği bilgisini gösteren çalıştırma modu ( $mod$ ) bilgilerini istemektedir. Algoritma (1),  $C$  kümesi ile gösterilen  $N_C$  sayıda kritik düğümü ardışık bir biçimde bulur. Eğer algoritma (1)'in çalıştırılma modu  $max$  ise ağ yaşam süresi maximize edilirken  $min$  için bu durum tam tersidir. Algoritma (1),  $N_C$  tane kritik düğüm tespit edilene kadar çalışır (sıra 1) ve her bir iterasyonda (yeni bir kritik düğümün tespit edilmesinde) ağ yaşam süresini maximize/minimize edecek (sıra 8-9) bir tane kritik düğüm bulur (sıra 10-11) bu düğümü ağdan siler (sıra 8). Algoritma ardışık biçimde çalışarak tüm düğümler üzerinden iterasyonlarını tamamlar (sıra 7). Diğer taraftan Algoritma (2),  $N_C$  sayıdaki kritik düğümleri tek seferde başlangıçta belirler ve bu düğümlerin ağdan çıkarılması ile ağ yaşam süresindeki değişim gözlenir. Ağ yaşam süresini en fazla etkileyen  $N_C$  düğüm kümesi en kritik düğüm kümesi olarak adlandırılır.

**III. ANALİZ**

Bu bölümde, kritik düğümlerin ele geçirilmesinin KAA yaşam süresine olan etkileri bir önceki bölümde tasarlanan algoritmalar ile nümerik olarak incelenmiştir. Geliştirilen DP tabanlı algoritmalar GAMS ve XPRESS çözücülerini ile çözdürülmüştür. İstatistiksel tutarlılık için simülasyonlar 100 kere tekrarlanarak ortalamaları bu bölümde sunulmuştur. Her bir

**Algoritma 2: Yığın Kritik Düğüm Seçim Algoritması**

**Girdi:**  $G=(V, A)$ : ağ topoloji grafiği  
 $N_C$ : kritik düğüm sayısı  
 $mod$ : 'min' veya 'max' kritik düğümlerin ele geçirilmesi ile ağ yaşam süresinin minimize/maximize edilmesi

**Çıktı:**  $C=\{(v_j): v_j \in V, 1 \leq j \leq n\}$ : kritik düğümler kümesi  
 $lt$ : Kritik düğümlerin ( $C$ )  $G$ 'den atılması ile elde edilen minimum/maximum ağ yaşam süresi

```

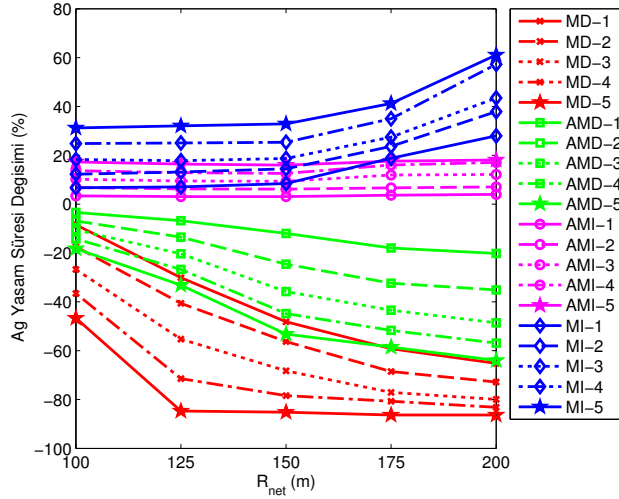
1  $C \leftarrow \emptyset$ 
2 while  $tempC = BirsonrakiNDugumuSec(G, N_C)$  do
3   if  $mod=max$  then
4      $lt = 0$ 
5   else
6      $lt = \infty$ 
7   end
8    $tempLT \leftarrow yasamSuresi(G \setminus tempC)$ 
9   if ( $mod=max$  ve  $tempLT > lt$ ) veya ( $mod=min$  ve  $tempLT < lt$ ) then
10     $C \leftarrow tempC$ 
11     $lt \leftarrow tempLT$ 
12  end
13 end
14 return  $C, lt$ 

```

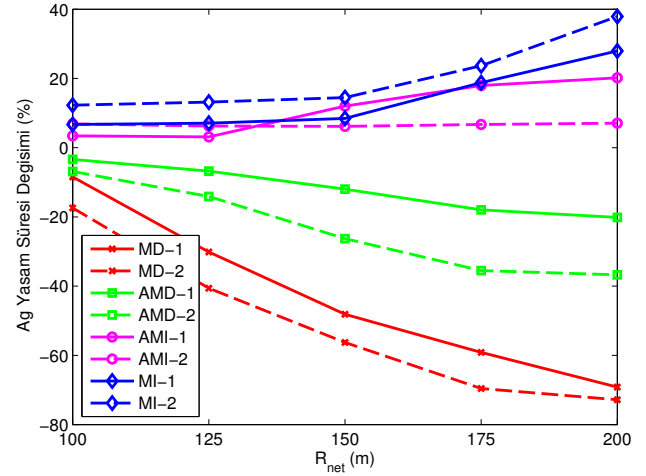
simülasyonda disk şeklindeki ağda yer alan düğümler düzgün dağılımla rastgele konumlandırılmıştır.

Şekil (2a)'da Algoritma (1) için 50 düğümlük ( $N_S = 50$ ) bir topoloji göz önünde bulundurulduğunda ağ yaşam süresi değişimi ağ yarıçapının ( $R_{net}$ ) bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Bu grafikte sunulan negatif değerler orijinal duruma (ağdan herhangi bir düğümün atılmaması durumu) göre ağ yaşam süresinde azalma meydana geldiğini göstermektedir. Karşıt biçimde pozitif değerler ağ yaşam süresinde artış gözlemlendiğini söylemektedir. Tek bir düğümün ağdan atılması ile ağda meydana gelen ortalama yaşam süresi düşüşü AMD-1 olarak ifade edilirken, 2 düğümün atıldığı durum için AMD-2 ismi kullanılmıştır. Ağdan 3, 4 ve 5 düğüm atıldığı zaman kullanılan ifadeler sırasıyla; AMD-3, AMD-4 ve AMD-5'tir. Benzer biçimde, 1, 2, ..., 5 düğümün atılması ile ağ yaşam süresinde meydana gelen ortalama artışlar AMI-1, AMI-2, ..., AMI-5 olarak belirtilmiştir. Bununla birlikte, 100 deneme içinde ağ yaşam süresinde meydana gelen en yüksek düşüş MD-X olarak gösterilmiştir. Bu notasyonda X, ağdan atılan düğüm sayısını temsil etmektedir. Yine benzer şekilde, simülasyonlar boyunca gözlenen en yüksek ağ yaşam süresi artışı MI-X olarak gösterilmiştir.

Kritik düğümlerin ele geçirilmesinin ağ yaşam süresine olan etkilerinin seyrek ağlarda daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Örneğin, Algoritma (1) ele alındığında  $N_C = 2$  iken ağ yaşam süresindeki ortalama düşüş (AMD-2),  $R_{net} = 100$ , 150 ve 200 metre için sırasıyla %6.9, %24.6 ve %35.1'dir.  $R_{net} = 200$  m için ağ yaşam süresindeki ortalama düşüş %20.2 (AMD-1) ile %64.0 (AMD-5) arasında olduğu tespit edilmiştir. Beklenildiği üzere, ele geçirilen kritik düğüm sayısı arttığında ağ yaşam süresindeki değişim de artmaktadır. Örneğin, 200 metre yarıçaplı bir ağda  $N_C = 1, 3$  ve 5 için ağ yaşam süresinde meydana gelen ortalama düşüş sırasıyla %20.2, %48.6 ve %64.0'dır. Ağ yaşam süresinde meydana gelen maximum



(a) Algoritma (1)



(b) Algoritma (2)

Şekil 2: Orijinal ağ topolojisine göre (herhangi bir düğümün ağdan atılmamış hali) yaşam süresinde meydana gelen değişme (%).

düşüş beklenildiği üzere ortalama yaşam süresi düşüşünden daha fazladır. Yine 200 metre yarıçaplı bir ağ düşünüldüğünde  $N_C = 2$  için maximum düşüş (MD-2) %72.8 olarak tespit edilmiştir. Bu durumda ortalama yaşam süresi düşüşü ise %35.1'dir. maximum düşüş  $N_C$  arttığı zaman artmaktadır. Öyle ki bu düşüş en fazla %86.4'tür.

Ağdaki bazı düğümler ele geçirildiğinde ağ yaşam süresinde artış meydana gelebilir. Bunun sebebi, bazı röle düğümlerin orantısız biçimde diğer düğümlerin verisini ilettiği için harcadıkları ek enerjidendir. Bu durum bahsi geçen diğer düğümlerin ele geçirilmesi ile önlenilebileceği için röle düğümlerdeki orantısız enerji harcamasının önüne geçilerek ağ yaşam süresinde bir miktar artış gözlenebilir. Ağ yaşam süresindeki ortalama artış %3.1 (AMI-5 için  $R_{net} = 125$  m iken) ile %18.1 (AMI-5 için  $R_{net} = 200$  m iken) arasında gözlenmiştir. Öte yandan, ağ yaşam süresindeki maximum artış, düşüş kadar yüksek değildir. Ağ yaşam süresindeki maximum artışın en fazla %61.1 olduğu (MI-5 için  $R_{net} = 200$  m iken) sonuçlarda görülmüştür.

Şekil 2(b)'de Algoritma (2) için  $N_C = 1$  ve 2 iken sonuçlar sunulmuştur. Algoritma (2)'nin hesaplama zorluğundan ötürü  $N_C > 2$  için sonuçlar bu grafikte verilmemiştir.  $N_C = 2$  ve  $R_{net} = 200$  m iken AMI-2 değeri Algoritma (1) ile yaklaşık olarak 40 saniye içinde elde edilirken, bu değere oldukça yakın bir değer Algoritma (2) ile yaklaşık olarak 20 dakikada bulunmuştur. Yapılan deneyler neticesinde Algoritma (1) ile Algoritma (2) oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Bu iki algoritma ile elde edilen sonuçlar arasındaki farkın en fazla %0.1 olduğu görülmüştür (AMD-2 için  $R_{net} = 175$  m iken). Algoritma (1)'in hesaplama zorluğu Algoritma (2)'ninkinden daha düşük olduğu için Algoritma (1)'in daha verimli olduğu sonucuna varılabilir.

#### IV. SONUÇ

KAA'larda kullanılan algılayıcı düğümler güvenlik tehditleri, doğal felaketler, donanım/yazılım kaynaklı sorunlara

maruz kalabilmektedir. Bir grup algılayıcı düğümün etkisi hale gelmesi (veya bozulması) ağ yaşam süresini maximize edecek ideal yönlendirme mekanizmaları kullanan KAA'lar da dahil olmak üzere ağ yaşam süresini ciddi boyutta etkilemektedir. Literatürde daha önce incelenmeyen bir konu olan kritik düğümlerin işlevsiz hale getirilmesinin ağ yaşam süresine olan etkileri bu çalışma kapsamında etraflıca ele alınmıştır. Bu durumu analiz etmek için DP modeli kullanan iki farklı algoritma tasarlanmıştır. Kritik düğümlerin ele geçirilmesi ile ağ yaşam süresinde meydana gelebilecek ortalama düşüşün en fazla %64.0 olduğu 5 kritik düğümün ( $N_C = 5$ ) etkisiz hale getirilmesi ile gözlenmiştir. Bununla birlikte, yaşam süresinde gözlenen en fazla düşüşün ise %86.4 olduğu ( $N_C = 5$ ) sonuçlardan elde edilmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 325–349, 2005.
- [2] S. Uludag, M. Karakus, and E. Guler, "Low-complexity 3D target tracking in wireless aerial sensor networks," in *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2014, pp. 373–378.
- [3] J. Barcelo-Ordinas, J. Chanet, K.-M. Hou, and J. García-Vidal, "A survey of wireless sensor technologies applied to precision agriculture," in *Precision Agriculture*, J. V. Stafford, Ed. Wageningen Academic Publishers, 2013, pp. 801–808.
- [4] Z. Cheng, M. Perillo, and W. Heinzelman, "General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, no. 4, pp. 484–497, 2008.
- [5] R. Dubey, V. Jain, R. Thakur, and S. Choubey, "Attacks in wireless sensor networks," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 3, no. 3, 2012.
- [6] A. Yuksel, E. Uzun, and B. Tavli, "The impact of elimination of the most critical node on wireless sensor network lifetime," in *Proc. IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2015, pp. 1–5.
- [7] O. Dagdeviren, K. Erciyes, and S. Tse, "Semi-asynchronous and distributed weighted connected dominating set algorithms for wireless sensor networks," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 42, pp. 143–156, 2015.
- [8] 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.