Erzincan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
2019, 12(2), 1028-1035
ISSN: 1307-9085, e-ISSN: 2149-4584
Araştırma Makalesi

Erzincan University
Journal of Science and Technology
2019, 12(2), 1028-1035
DOI: 10.18185/erzifbed.545497
Research Article

Yeraltı Algılayıcı Ağlarda Kayıpsız Veri İletimi için Sezme Tabanlı Ortam Erişim Tekniğinin Başarım Analizi

Muhammed Enes BAYRAKDAR*

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Merkez, Düzce, Türkiye

Geliş / Received: 27/03/2019, Kabul / Accepted: 11/07/2019

Öz

Kablosuz yeraltı algılayıcı ağlarda temel olarak iki farklı haberleşme ortamı vardır. Bunlardan birincisi; algılayıcı düğümlerin toprak altında gömülü olduğu katı ortamdır ve toprak altından yerüstüne kablosuz olarak veri iletimi yapılmaktadır. İkincisi ise; tünel, mağara vb. yeraltında bulunan boşluklu ortamdır ve yeraltından yerüstüne kısmen katı ortamdan etkilenerek kablosuz veri iletimi yapılmaktadır. İletişim kalitesi, iki ortamda da toprağın nemli olmasından büyük oranda etkilenmektedir. Kablosuz yeraltı algılayıcı düğümlerin, erişilmesi zor noktalara yerleştirilmesi enerji verimli çalışmalarını zorunlu hale getirmektedir. Bu makale çalışmasında, enerji kısıtlı yeraltı algılayıcı ağlarda kayıpsız veri iletimi için sezme tabanlı CSMA (Carrier Sense Multiple Access – Taşıyıcı Sezmeli Çoklu Erişim) ortam erişim tekniğinin başarım analizi gerçekleştirilmiştir. Düğümlerin enerji verimli olarak kayıpsız veri iletimi yapabilmeleri için, CSMA tekniğinin çarpışmadan kaçınma özelliği ön plana çıkarılmıştır. Matematiksel olarak analitik modeli elde edilen kablosuz yeraltı algılayıcı ağ yapısının benzetimi Riverbed yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Algılayıcı ağ yapısının performansını analiz etmek için, gecikme ve iş çıkarma oranı parametreleri ele alınmıştır. Başarım analizi sonuçları incelendiğinde; yeraltı algılayıcı ağlarda enerji tüketimi makul seviyede tutularak, ortalama gecikme ve maksimum iş çıkarma oranı elde edilebildiği gözler önüne serilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Algılayıcı ağ, Enerji, Csma, Yeraltı.

Performance Analysis of Sensing based Medium Access Technique for Lossless Data Transmission in Underground Sensor Networks

Abstract

There are basically two different communication environments in wireless underground sensor networks. The first of these; where the sensor nodes are buried under the ground and wirelessly transmit data from the underground to the aboveground that is a solid medium. The second is; underground environment such as tunnel, cave etc. and it is transmitted from underground to the aboveground through partially solid medium. The quality of communication is greatly influenced by the humidity of the soil in both environments. The placement of wireless underground sensor nodes at hard-to-reach points makes energy efficiency mandatory. In this paper, performance analysis of the detection-based CSMA medium access technique for lossless data transmission in energy-restricted underground sensor networks was performed. The CSMA technique's ability to avoid collision is highlighted in order for the nodes to transmit energy-efficient lossless data. After obtaining mathematical model analytically, the simulation of the wireless underground sensor network structure was performed using the Riverbed software. To analyze the performance of the sensor network, the delay and throughput parameters are investigated. When the performance analysis results are examined; keeping the energy consumption at a reasonable level, the average delay and maximum throughput can be achieved in the underground sensor networks.

Keywords: sensor network, energy, csma, underground.

Keywords: Sensor Network, Energy, Csma, Underground.

*Sorumlu Yazar: muhammedbayrakdar@duzce.edu.tr

1. Giriş

İletişim tekniklerindeki son gelişmelerle birlikte, yeraltı ortamındaki algılayıcı ağ uygulamaları önemli ölçüde artmıştır (Ling-Ling vd., 2017). Kablosuz yeraltı algılayıcı ağları; yeraltına gömülü kablosuz algılayıcılardan oluşan ve kablolu yeraltı izleme teknikleriyle mümkün olmayan birçok uygulamanın yapılmasını sağlayan umut verici bir çalışma alanıdır (Ünsal vd., 2016). Kablosuz yeraltı algılayıcı ağ kapsamında; heyelan tahmini, sınır devriyesi, güvenlik, yeraltı altyapısı izleme, toprak durumu izleme, deprem tahmini gibi çeşitli uygulamalar bulunmaktadır (Afonso vd., 2018). Ancak, yeraltı iletişiminin en zorlu kısmı kanal ortamıdır (Conceição vd., 2016). Bunun temel nedeni; kanal ortamının hava olduğu karasal kablosuz algılayıcı ağların aksine, kanal ortamının katı ortam, diğer bir ifadeyle toprak, olmasıdır (Zhu vd., 2017). Karasal kablosuz algılayıcı ağın geleneksel teknikleri toprak ortamında iyi çalışmadığından yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır (Elleithy ve Liu, 2013).

Algılayıcı düğümleri çok sınırlı radyo gücüne sahip olduklarından, herhangi bir kablosuz algılayıcı ağ türünde enerji tüketimini azaltmak çok önemlidir (Dohare vd., 2016). Literatürde, bu konu ile ilgili olarak birçok araştırma yapılmıştır (Zungeru vd., 2016). Ancak, bu araştırmaların çoğu esas olarak kanal ortamının hava olduğu karasal kablosuz algılayıcı ağlarda için gerçekleştirilmiştir (Ranjan vd., 2017). Bununla birlikte, yeraltı ortamı karasal ortamdan tamamen farklıdır çünkü kanal ortamı hava değil, katı bir ortam olan topraktır (Dung vd., 2016). Yol kaybı; yerüstü ortam ile karşılaştırıldığında, yeraltı ortamda daha fazladır (Chowdhury ve Hossain, 2018). Bu nedenle, yeraltı iletişiminde enerji tüketimini azaltmanın yollarını araştırmak ve bulmak büyük önem arz etmektedir (Dong ve Vuran 2013). Bu şekilde, kablosuz yeraltı algılayıcı ağların ömrünü artırmak mümkün hale gelecektir (Zemmour vd., 2017). Ayrıca, verilerin güvenilirliği, yeraltı iletişiminde dikkat gerektiren başka bir önemli özelliktir, çünkü bit hata oranı yer üstü iletişiminden farklıdır (Olasupo vd., 2017). Günümüzde, kablosuz algılayıcı ağların güvenilirliği artırma için yeraltındaki hata kontrol kodunun kullanımını araştıran çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Jaya Lakshmi ve Gomathi, 2015). Bununla birlikte, kablosuz yeraltı algılayıcı ağların enerji tüketimini azaltmaya yönelik kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Dong ve Vuran, 2013).

Bu makale çalışmasında, enerji kısıtlı yeraltı algılayıcı ağlarda kayıpsız veri iletimi için sezme tabanlı CSMA ortam erişim tekniğinin başarım analizi gerçekleştirilmiştir. Düğümlerin enerji verimli olarak kayıpsız veri iletimi yapabilmeleri için, CSMA tekniğinin çarpışmadan kaçınma özelliği ön plana çıkarılmıştır. Matematiksel olarak analitik modeli elde edilen kablosuz yeraltı algılayıcı ağ yapısının benzetimi Riverbed yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Algılayıcı ağ yapısının performansını analiz etmek için, gecikme ve iş çıkarma oranı parametreleri ele alınmıştır. Başarım analizi sonuçları incelendiğinde; yeraltı algılayıcı ağlarda enerji tüketimi makul seviyede tutularak, ortalama gecikme ve maksimum iş çıkarma oranı elde edilebildiği gözler önüne serilmiştir.

2. Literatür Araştırması

Literatürde, kablosuz yeraltı algılayıcı ağlar ile ilgili yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, enerji verimliliği ve hatasız veri iletimi üzerine yoğunlaşmaktadır.

Ling-Ling vd. (2017) kablosuz yeraltı algılayıcı ağlar için; radyo frekansı bilgi toplama modülü, kablosuz verici modülü, kablosuz alıcı modülü ve katılım bilgi işlem sisteminden oluşan bir sistem önermişlerdir. Ünsal vd. (2016), yer altı madenciliğinde kablosuz algılayıcı ağlarda kullanılan düğümlerin güç tüketimlerinin azaltılmasında uygulanabilecek yöntemleri incelemişlerdir. Alfonso vd. (2018), ağ kurulum maliyetini düşürmeyi ve kablosuz algılayıcı ağ ömrünü uzatmayı hedefleyen iki aşamalı yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Conceição vd. (2016), dört düğüm yeraltına gömülü ve bir düğüm yer üstünde olan kablosuz yeraltı ağ için ortam erişim konusunda bir benzetim çalışması sunmuşlardır. Zhu vd. (2017); geleneksel izleme sisteminin dezavantajlarını göz önünde bulundurarak, kablosuz algılayıcı ağına dayanan bir yeraltı boru hattı güvenliği erken uyarı sistemi tasarlamışlardır. Elleithy ve Liu (2013); iletişimde güç tüketimi için gelişmiş bir model sunmuşlardır ve kuru kumun yeraltı kablosuz algılayıcı ağ iletişiminin kullanım ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Dohare vd. (2016), ZigBee protokolü tabanlı kablosuz veri aktarım sistemi kullanılarak geliştirilen düşük maliyetli, düşük güçlü bir mobil kablosuz yeraltı maden ortamı izleme sistemi sunmuşlardır. Zungeru vd. (2016), yeraltı kablosuz iletişimdeki yüksek yol kaybı sorununu çözmek ve ortamdaki iletim aralığını artırmak için darbe gücü manyetik endüksiyon adı verilen yeni bir yöntem önermişlerdir. Ranjan vd. (2017); hem metal hem de kömür madenlerinde yapılan deneysel ölçümlerden elde edilen bulguları, kablosuz algılayıcı ağ iletişimi bağlantılarının özelliklerini karakterize etmek için kullanmışlardır. Dung vd. (2016); toprak ortam özelliklerinin ve ağ parametrelerinin, toprağın altındaki elektromanyetik dalga yoluyla birbirleriyle iletişim kuran kablosuz algılayıcı düğümlerin topolojik bağlantısı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Chowdhury ve Hossain (2018), hata kontrol kodunun kablosuz yeraltı algılayıcı ağlardaki karakteristik mesafe üzerindeki etkisini, hem elektromanyetik dalga hem de dağılım sinyali olarak manyetik indüksiyonu dikkate alarak tartışmışlardır.

Dong ve Vuran (2013), kablosuz yeraltı algılayıcı ağlar için ileri hata kontrolü ve iletim gücü kontrolü olmak üzere iki farklı hata kontrol mekanizması önermişlerdir. Zemmour vd. (2017), toprağın yeraltı ve yerüstü iletişim bağlantısı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Olasupo vd. (2017), sabit algılayıcı düğümlerin kritik görevlerde çalışmasını sağlayan bir iletişim modeli önermişlerdir. Jaya Lakshmi ve Gomathi (2015), kablosuz algılayıcı düğümler ile su sızıntısı tespiti yapmak için yeni bir sistem önermişlerdir. Dong ve Vuran (2013), kablosuz yeraltı algılayıcı ağlarda küme dağılımının modellenmesi için yeni bir model önermişlerdir. Liu vd. (2016), kablosuz güç tabanlı yeraltı algılayıcı ağlarda kapasite artırımı konusunu incelemişlerdir.

3. Kablosuz Yeraltı Algılayıcı Ağlar

Kablosuz yeraltı algılayıcı ağları, toprak izlemesi gibi işlemler için son zamanlarda araştırma konusu olmuştur (Zungeru vd., 2016). Bu ağlar, toprak koşullarını izleyen yeraltı algılayıcı düğümlerden ve elde edilen verileri son kullanıcılara iletmek için yeraltı düğümlerine kablosuz olarak bağlanan yerüstü erişim noktalarından oluşmaktadır (Zemmour vd., 2017). Kablosuz yeraltı

algılayıcı ağlar; uydu ve havadan uzaktan algılama ile karşılaştırıldığında, toprak nemi gibi bazı koşullar hakkında daha az maliyetiyle verimli ve kesin bilgiler sağlayabilmektedir (Conceição vd., 2016).

3.1. Kablosuz yeraltı algılayıcı ağların uygulama sahası

Tarım, kablosuz yeraltı algılayıcı ağlar için en umut verici alanlardan biridir (Alfonso vd., 2018). Tarım alanındaki algılayıcı düğümler; su içeriği, mineral içeriği, tuzluluk ve sıcaklık gibi toprak parametrelerini izlemek ve daha sonra bu değerleri gerçek zamanlı olarak bir kontrol istasyonuna iletmek için kullanılabilmektedir (Dong ve Vuran, 2013). Ek olarak, golf sahaları gibi spor alanlarının bakımına yardımcı olmak için sulama kontrol mekanizmaları da uygulanabilmektedir (Ranjan vd., 2017).

Güvenlik, düğümlerin gizlenmesi nedeniyle yeraltı ağlarının konuşlandırılması için faydalanabilecek bir alandır (Elleithy ve Liu, 2013). Algılayıcı düğümler, sığ bir derinliğe gömülerek yüzeydeki hareketi algılayabilmektedir (Ling-Ling vd., 2017). Bu senaryo, ev güvenliği için olduğu kadar sınır devriyesi gibi askeri uygulamalar için de faydalıdır (Liu vd., 2016).

Altyapı izleme, kablosuz yeraltı ağlar için olası bir başka uygulama senaryosudur (Dung vd., 2016). Örneğin, boru hatlarını izlemek ve kaçakları tespit etmek için kablosuz yeraltı algılayıcı ağlar kullanılabilmektedir (Dong ve Vuran, 2013). Bunu sağlamak için, boru hattının içindeki veya dışındaki algılayıcı düğümlerin kullanılması gibi farklı işlemler uygulanabilmektedir (Jaya Lakshmi ve Gomathi, 2015).

3.2. Kablosuz yeraltı algılayıcı ağlarda haberleşme yöntemleri

Yeraltı iletişim; hava ortamında yapılan iletişimin aksine, toprak nemindeki artma veya azalma gibi ortamdaki değişikliklere duyarlı olarak çalışmaktadır (Zungeru vd., 2016). Bu sebeple, ağ topolojisi ve bağlantı durumu toprağın nem seviyesine göre zamanla dinamik olarak değişebilmektedir (Ranjan vd., 2017). Bir yeraltı düğüm, herhangi bir zaman aralığında çok atlamalı şekilde sabit veya hareketli bir yeraltı düğüm ile bağlantı kurabiliyorsa ağa bağlı olarak kabul edilmektedir (Dung vd., 2016). Bu şekilde, yeraltı algılayıcı düğüm çevre düğümler üzerinden verisini erişim noktasına iletebilmektedir (Chowdhury ve Hossain, 2018).

Ağ topolojisi, bir kablosuz yeraltı algılayıcı için iki farklı tür düğümden oluşmaktadır; (i) toprak yüzeyi altında gömülü olan yeraltı algılayıcı düğümler, (ii) yeraltındaki algılayıcı düğümlerden gelen verileri toplamak için kullanılan yerüstü algılayıcı düğümler (Dong ve Vuran, 2013). Düğüm haberleşmeleri için alıcıların ve vericilerin konumlarını temel alan üç farklı iletişim kanalı mevcuttur; (i) yeraltı – yeraltı, (ii) yerüstü – yeraltı, (iii) yeraltı – yerüstü (Zemmour vd., 2017).

4. Matematiksel Model ve Benzetim Modeli

Bu çalışmada, bulundukları toprak altı konum sebebiyle tekrar enerji sağlanamayacak (enerji kısıtlı) yeraltı algılayıcı düğümlerin kendileri arasında yeraltı-yeraltı iletişim ve toplayıcı istasyonlar ile yeraltı-yerüstü iletişim yaptığı ağ tasarımı incelenmiştir. Yeraltı algılayıcı düğümler, ilk olarak kendilerine en yakın konumdaki toplayıcı istasyona verilerini iletmektedirler. Eğer direk iletişim ile verilerini toplayıcı istasyona aktarmaları mümkün değil ise, diğer yeraltı veya yerüstü algılayıcı düğümler yardımıyla Ad-Hoc haberleşme ağları üzerinden

verilerini toplayıcı istasyona iletmektedirler. Çalışmada kullanılan CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance – Taşıyıcı Sezmeli Çoklu Erişim / Çarpışmadan Kaçınma) ortam erişim tekniği sayesinde; ortamdaki devam eden veri iletimleri sezilmekte, paket çarpışmaları önlenmekte ve gereksiz enerji tüketiminin önüne geçilmektedir.

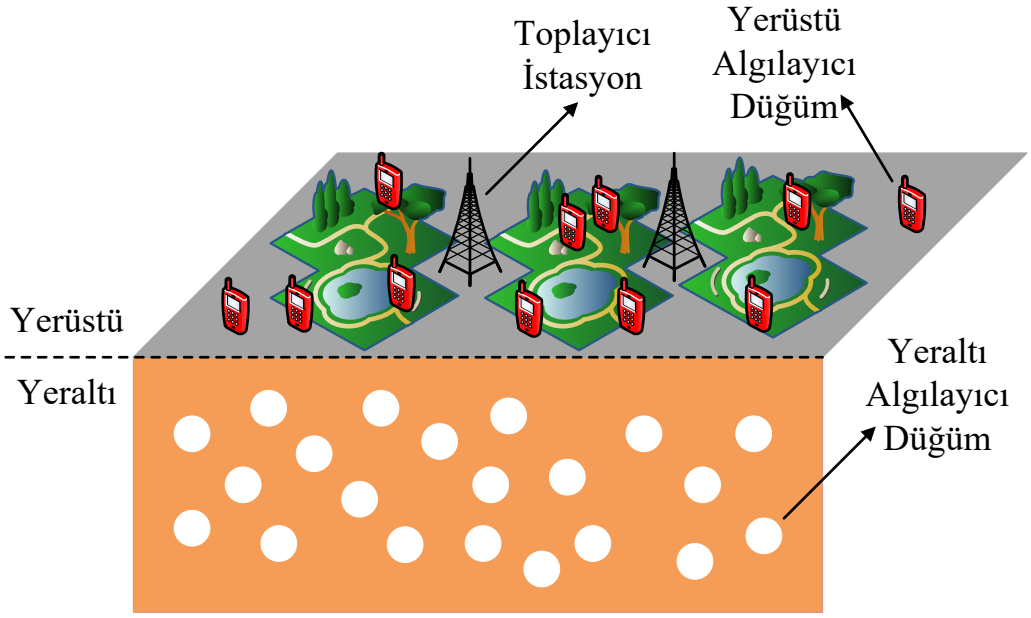
Kablosuz algılayıcı ağın iş çıkarma başarımı ve ortalama gecikme parametrelerini hesaplamak için iki farklı denklem türetilmiştir. İş çıkarma başarımı yüke bağlı bir fonksiyon şeklinde elde edilmiştir. Ortalama gecikme ise sezilen bir paketin toplayıcı istasyona ulaşana kadar maruz kaldığı bekleme sürelerinin toplamına eşit olmaktadır. Yeraltı algılayıcı ağın, iş çıkarma başarımı denklemi (1)'deki gibidir:

$$S = (G + G^2) / (1 + (G * e^G)) \qquad (1)$$

Denklem (1)'de (Conceição vd., 2016); S iş çıkarma başarımını ve G sunulan yükü belirtmektedir. İş çıkarma başarımı, belirli bir zamanda başarılı bir şekilde iletilen toplam paket sayısı olarak tanımlanmaktadır. Sunulan yük ise, belirli bir zamanda iletim işlemi başlatılan toplam paket sayısı olarak ifade edilmektedir. Ağ tasarımımızda enerji verimliliği önemli oluğu için 1-persistent CSMA/CA tekniğinden faydalanılmıştır. Yeraltı algılayıcı ağın, ortalama gecikme denklemi (2)'deki gibi elde edilmektedir.

$$og = cs (ogcs + cbs + cms) + (ogcs + bis) \qquad (2)$$

Denklem (2)'de (Conceição vd., 2016), og ortalama gecikmeyi, cs çarpışma sayısını, ogcs ortalama geri çekilme süresini, cbs çarpışma bekleme süresini, cms çarpışma meşgul süresini ve bis başarılı iletim süresini temsil etmektedir.



Şekil 1. Kablosuz yeraltı algılayıcı ağ yapısı.

Şekil 1'de, yeraltı algılayıcı ağ yapısındaki yeraltı düğümler, yerüstü düğümler ve toplayıcı istasyonlar görülmektedir. Yeraltı algılayıcı düğümlerin görevi veri toplamaktır. Yerüstü algılayıcı düğümler, veri toplamak yanında yeraltı algılayıcı düğümlerden gelen verileri toplayıcı istasyonlara aktarmaktadırlar. Toplayıcı istasyonlar ise, kendilerine gelen verileri toplayarak herhangi bir çevrimiçi noktadan izlenebilmesini sağlamaktadır. Algılayıcı düğümler, boşta oldukları sürelerde uyku halinde bekleyerek

mümkün olan en düşük enerji tüketimini sağlamaktadırlar.

Tablo 1'de, yeraltı algılayıcı ağ yapısının benzetim parametreleri ve değerleri görülmektedir.

Tablo 1. Benzetim parametreleri ve değerleri.

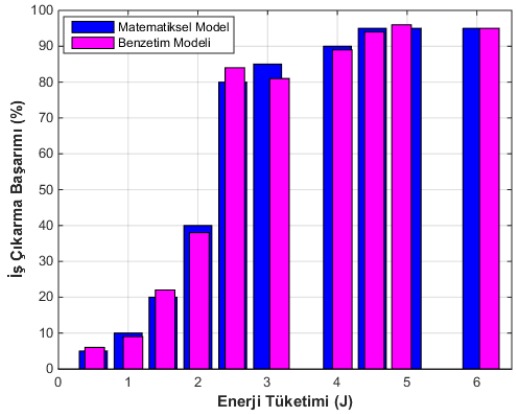
İlgili Parametreler ve Değerleri	
Parametre	*Değer*
Veri oranı	10 kbps
Modülasyon	Bpsk
Algılayıcı düğüm sayısı	32
Gönderici gücü	800 mw
Veri paketi boyutu	40 byte
Sezme süresi	100 µs
Frekans	350 MHz
Maksimum derinlik	4 m

5. Başarım Analizi

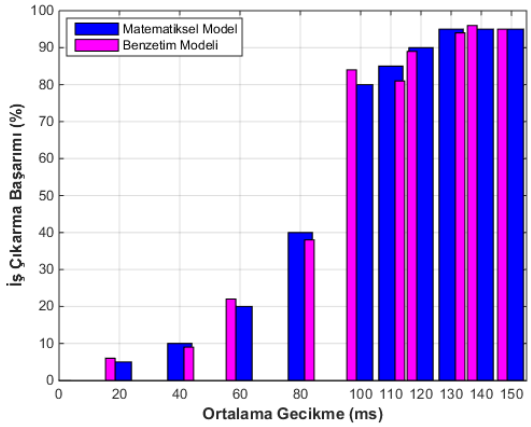
Yeraltı kablosuz algılayıcı ağ yapısının başarımını değerlendirmek için; iş çıkarma başarımı, ortalama gecikme ve enerji tüketimi parametreleri incelenmiştir. İş çıkarma başarımı, kablosuz algılayıcı düğümler tarafından sezilen verilerin toplayıcı istasyon tarafından başarılı bir şekilde alınması olarak ifade edilmektedir. Diğer bir ifadeyle, toplayıcı istasyon tarafından başarılı bir şekilde alınan verilerin toplam sezilen veri miktarına oranı olarak tanımlanmaktadır. Maksimum iş çıkarma oranı ise, belirli bir anda ağ üzerindeki mümkün olan en fazla miktarda verinin kayıpsız olarak toplayıcı istasyona ulaşması olarak tanımlanmaktadır. Ortalama gecikme, bir verinin sezildiği andan toplayıcı istasyona ulaşıncaya kadar geçen süre olarak ifade edilmektedir. Sınırlı kaynaklara sahip olan kablosuz algılayıcı düğümler, veri sezerken ve bekleme durumundayken enerji tüketmektedirler.

Şekil 2'de, farklı enerji tüketimi değerlerine göre iş çıkarma başarımı parametresinin sonuçları verilmektedir. İş çıkarma başarımı % olarak ele alınırken, enerji tüketimi 0 ile 6 J arasında değişiklik göstermektedir. Enerji tüketimi 2 J seviyesine gelene kadar, iş çıkarma başarımı ve enerji tüketimi doğru orantılı bir şekilde artış göstermektedir. Enerji tüketimi 3 J veya daha fazla olduğunda ise iş çıkarma başarımı yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu durum, enerji tüketimi düşük olduğunda daha az veri sezildiğini göstermektedir. Enerji tüketiminin artması ise, yüksek miktarda veri sezildiği ve verilerin başarılı bir şekilde toplayıcı istasyon tarafından alınması anlamına gelmektedir.

Şekil 3'te, farklı ortalama gecikme değerlerine göre iş çıkarma başarımı parametresinin sonuçları verilmektedir. İş çıkarma başarımı % olarak gösterilmekte ve ortalama gecikme 0 ile 150 ms arasında değişmektedir. Ortalama gecikme 80 ms olana kadar, iş çıkarma başarımı ve ortalama gecikme doğru orantılı olarak artmaktadır. Ortalama gecikme 100 ms veya daha fazla olduğunda ise, iş çıkarma başarımı %80 - %90 olmaktadır. Ortalama gecikmenin artması, çok miktarda sezilen verinin kablosuz algılayıcı düğümlerden toplayıcı istasyonlara gönderildiğini göstermektedir. Çok miktarda veri iletiminin yapılması, iş çıkarma başarımını artırmasının yanında yoğun veri trafiğinden dolayı ortalama gecikmeyi de artırmaktadır.



Şekil 2. Enerji tüketimine göre iş çıkarma başarımı.



Şekil 3. Ortalama gecikmeye göre iş çıkarma başarımı.

6. Sonuç ve Tartışma

Bu makale çalışması kapsamında, enerji kısıtlı yeraltı algılayıcı ağlarda kayıpsız veri iletimi için sezme tabanlı CSMA ortam erişim tekniğinin başarım analizi gerçekleştirilmiştir. Düğümlerin enerji verimli olarak kayıpsız veri iletimi yapabilmeleri için, CSMA tekniğinin çarpışmadan kaçınma özelliği ön plana çıkarılmıştır. Matematiksel olarak analitik modeli elde edilen kablosuz yeraltı algılayıcı ağ yapısının benzetimi Riverbed yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Algılayıcı ağ yapısının performansını analiz etmek için, gecikme ve iş çıkarma oranı parametreleri ele alınmıştır. Başarım analizi sonuçları incelendiğinde; yeraltı algılayıcı ağlarda enerji tüketimi makul seviyede tutularak, ortalama gecikme ve maksimum iş çıkarma oranı elde edilebildiği gözler önüne serilmiştir.Gelecek çalışmalarda, mevcut uygulamada olan sistemlere katkı sağlamak amacıyla yeraltı algılayıcı ağlarda yaşanan veri kayıpları sorununa yönelik çalışmaların yapılması faydalı olacaktır.

7. Kaynaklar

Alfonso, I., Goméz, C., Garcés, K. and Chavarriaga, J. 2018. "Lifetime optimization of Wireless Sensor Networks for gas monitoring in underground coal mining", *7th International Conference on Computers Communications and Control (ICCCC)*, Oradea, 224-230.

Chowdhury, S. M. and Hossain, A. 2018. "Impact of error control code on characteristic distance in wireless underground sensor networks", *IET Communications*, 12(13), 1540-1549.

Conceição, S., Pendão, C., Moreira, A. and Ricardo, M. 2016. "Evaluation of medium access and a positioning system in wireless underground sensor networks", *Wireless Days (WD)*, Toulouse, 1-6.

Dohare, Y. S., Maity, T., Paul, P. S. and Prasad, H. 2016. "Smart low power wireless sensor network for underground mine environment monitoring", *3rd International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*, Dhanbad, 112-116.

Dong, X. and Vuran, M. C. 2013. "Environment aware connectivity for wireless underground sensor networks," *Proceedings IEEE INFOCOM*, Turin, 674-682.

Dong, X. and Vuran, M. C. 2013. "Exploiting soil moisture information for

adaptive error control in wireless underground sensor networks", *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Atlanta, GA, 97-102.

Dung, L. T., Trang, H. T. H., Choi, S. and Hwang, S. O. 2016. "Impact of soil medium on the path connectivity of sensors in wireless underground sensor networks", *International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Hanoi, 60-64.

Elleithy, A. and Liu, G. 2013. "Analysis of the lifetime of wireless sensor networks for underground communications in dry sand", *WAMICON*, Orlando, FL, 1-6.

Jaya Lakshmi, M. and Gomathi, V. 2015. "An enhanced underground pipeline water leakage monitoring and detection system using Wireless sensor network", *International Conference on Soft-Computing and Networks Security (ICSNS)*, Coimbatore, 1-6.

Ling-Ling, Z., Liang, L., Meng, L., Yu-Xin, D. and Min-Ming, T. 2017. "Underground wireless attendance realized by wireless sensor network and radio frequency identification", *7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, Macau, 599-602.

Liu, G., Wang, Z. and Jiang, T. 2016. "QoS-Aware Throughput Maximization in Wireless Powered Underground Sensor Networks", *IEEE Transactions on Communications*, 64(11), 4776-4789.

Olasupo, K. O., Kostanic, I., Otero, C. E. and Olasupo, T. O. 2017. "Link performance modeling of wireless sensor network deployment for mission-critical applications (underground deployment)", *16th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, Budva, 1-7.

Ranjan, A., Misra, P. and Sahu, H. B. 2017. "On the importance of link characterization for wireless sensor networks in underground mines", *9th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, Bangalore, 576-577.

Ünsal, E., Akkan, T., Akkan, L. Ö. and Çebi, Y. 2016. "Power management for Wireless Sensor Networks in underground mining", *24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*, Zonguldak, 1053-1056.

Zemmour, H., Baudoin, G. and Diet, A. 2017. "Soil Effects on the Underground-to-Aboveground Communication Link in Ultrawideband Wireless Underground Sensor Networks", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 218-221.

Zhu, J., Li, X. and Zheng, W. 2017. "Design of early warning system for underground pipeline safety based on wireless sensor network", *Chinese Automation Congress (CAC)*, Jinan, 95-98.

Zungeru, A. M., Ezea, H. and Katende, J. 2016. "Pulsed power system for wireless underground sensor networks", *Third International Conference on Electrical, Electronics, Computer Engineering and their Applications (EECEA)*, Beirut, 126-132.

.