

## TDMA TABANLI KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLLERİ İÇİN GENEL ANALİTİK VE BENZETİM MODELLERİ

Alper KARAHAN\*, İsmail ERTÜRK, Sedat ATMACA, Süleyman ÇAKICI

### Özet

Kablosuz Algılayıcı Ağ (KAA) kullanım alanlarının çeşitlenmesi, başarımlarının kolayca test edilmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, KAA'ların başarımlarını değerlendirmesinde kullanılan temel ölçütlerin, analitik olarak elde edilmesi, benzetimlerinin gerçekleştirilmesi ve her iki yöntemle elde edilen sonuçların kıyaslanarak geçerliliklerinin doğrulanması hedeflenmektedir. Haberleşme ağlarını modelleme yöntemlerinin birbirlerine göre üstünlükleri ve zorlukları bulunmaktadır. Her yöntem tek başına kullanıldığında sistem başarımları hakkında sadece bazı kestirimler yapılabilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte tasarlanan bir sistemin farklı iki modelinden elde edilen sonuçların birbirleriyle örtüşmesi, sistemin doğruluğunu, kararlılığını ve gereksinimleri hangi ölçüde karşılayacağını gösterir ve sonuçların geçerliliğini teyit eder.

Çalışmada, temel bir KAA OEK (Ortam Erişim Kontrol) protokolü gerçekleştirilmekte, analitik ve benzetim modelleri merkezi yapı bir uygulama örneğinde kullanılmakta ve elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Analitik model esas alınarak düğüm enerji tüketimi ve ortalama uçtan-uca paket gecikmesi hesaplanmakta, bunlar benzetim modelinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak sistemin başarımlarını değerlendirilmesi yapılmaktadır. Çalışma sonuçları, TDMA (Time Division Multiple Access, Zaman Bölmeli Çoklu Erişim) tabanlı KAA OEK için geçerlilik değerlendirmesinde kolayca kullanılabilir olduğundan, araştırmacılar ve uygulama geliştiriciler için bu konuda referans olma niteliği taşımaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Kablosuz Algılayıcı Ağlar, OEK, Analitik Modelleme, Bilgisayar Modelleme ve Benzetimi

## GENERIC ANALYTICAL AND SIMULATION MODEL FOR TDMA-BASED WIRELESS SENSOR NETWORK MEDIUM ACCESS CONTROL PROTOCOLS

### Abstract

The vast variety of Wireless Sensor Network (WSN) applications makes it necessary that they should be easily tested and validated before deployment. In this work, it is aimed at obtaining the basic criteria that are used to evaluate the performance of the WSNs using both the analytical modeling and the computer modeling & simulation as well as validating the results. Computer network modeling techniques have some advantages and disadvantages over each other according to their usage in different type of applications. Each method provides only basic estimations related to the system performance when used alone, however the reliability of the results can only be guaranteed by using more than one of these methods together. The use of analytical modeling and simulation techniques together is the most effective way to evaluate the performance of computer networks. Matching up the results from two different models provides a remarkable validation way and points out whether the system runs stable or not in reality.

\* Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, 41380, KOCAELİ  
E-posta: [alper.karahan@kocaeli.edu.tr](mailto:alper.karahan@kocaeli.edu.tr)

In this paper, a generic analytical model and a computer model & simulation of a developed TDMA (Time Division Multiple Access) based WSN Medium Access Control (MAC) protocol with a centralized infrastructure are provided, and these models are used in an example networking application scenario. The results obtained from both models are presented and compared to each other. Node energy consumption, mean end-to-end packet delay and wireless channel utilization are selected as the network performance metrics since they can be enough for an essential system validation and evaluation. This work will be helpful as a reference for researchers and application developers studying on TDMA based WSN MACs.

**Key Words :** Wireless Sensor Networks, MAC, Analytical Modeling, Computer Modeling & Simulation

## 1. GİRİŞ

Kablosuz ağ teknolojileri, son yıllardaki gelişmelerle birlikte, sundukları hareket kabiliyeti ve farklı platformlara kolaylıkla uyarlanabilme üstünlükleri sayesinde, birçok alanda geleneksel kablolu eşleniklerinin yerini almıştır. Bunun yanında, ağ teknolojilerinin çeşitlenmesi ve maliyetlerin azalması özel amaçlı kablosuz ağların gelişimini hızlandırmaktadır.

Bu özel amaçlı ağlardan biri; mikrodenetleyici, algılayıcı, kablosuz haberleşme birimi ve güç ünitesinden oluşan düğümlerin bir araya gelerek oluşturduğu “Kablosuz Algılayıcı Ağ”dır. KAA düğümleri, istenen bir bölgeye rastgele veya sistematik olarak dağıtılarak farklı fiziksel büyüklükleri birbirlerinden bağımsız olarak algılayabilen ve elde edilen verileri istenilen bir noktaya ileten elemanlardır (Akyildiz ve diğ., 2002).

KAA’lar, çevre gözlemi, hasta takibi ve askeri uygulamalar gibi oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir (Akyildiz ve diğ., 2002; Verdone ve diğ., 2008; Alippi ve diğ., 2007). Geniş çaplı ve uzun süreli çalışması öngörülen ağ yapıları düşünüldüğünde (gözlem, izleme uygulamaları vb.) yaşam süresi, kendi kendine organize olabilme, dayanıklılık ve düşük hata oranı gibi gereksinimleri ön plana çıkmaktadır. KAA’ların hedeflenen görevleri yerine getirebilmesi ve bu görevleri devam ettirebilmesi, düğümlerin yaşam süreleri ile orantılıdır. Dolayısıyla, enerji kaynaklarının verimli kullanımı oldukça önem kazanmaktadır (Karahan, 2010).

KAA’larda enerji tüketimine neden olan en büyük etmen kablosuz alıcı/verici biriminin kullanımınıdır. Kablosuz ağlarda paket çarpışmaları, tekrar iletimleri ve gereksiz ortam dinlemelerden dolayı oldukça fazla enerji israf edilmektedir. Bu nedenle gereksiz enerji tüketimlerini önleyecek, ortamın paylaşılmasından sorumlu OEK katmanının yapısı enerji tüketiminde kritik öneme sahiptir. Sınırlı kaynağa sahip düğümlerdeki enerjinin gereksiz yere kullanımının azaltılması ancak uygun bir OEK protokol tasarımı ile mümkün olabilmektedir. KAA uygulamalarının farklılaşmasıyla, ihtiyaca yönelik OEK tasarımının önemi de giderek artmaktadır.

OEK protokolünde yapılan iyileştirmeler enerji tüketimini doğrudan etkilemekte ve ağın ömrünün uzamasını sağlamaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde, bir OEK protokolü daha geliştirme aşamasındayken aksaklıklar irdelenmeli, çözümler üretilmeli ve başarımlı değerlendirilmesinden sonra fiziksel olarak gerçekleştirilmesi sağlanmalıdır.

Bu çalışmada KAA OEKlerinin tasarım aşamasındayken, iyileştirmelerinin yapılması, muhtemel aksaklıklarının giderilmesi ve geçerliliğinin test edilmesi amacı ile temel bir OEK benzetim modeli ve analitik modeli oluşturulmaktadır. Bu çerçevede, merkezi yapı, temel bir KAA OEK protokolü tasarlanmış ve benzetim modelinin OPNET Modeller yazılımıyla

geliştirilmesi aşamaları sırasıyla anlatılarak, modelden elde edilen benzetim sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Ayrıca aynı OEK protokolünün analitik modeli de çıkartılarak benzetim modellerinden elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. Çalışma sonuçları, TDMA tabanlı KAA OEK için geçerlilik değerlendirmesinde kolayca kullanılabilir olduğundan, araştırmacılar ve uygulama geliştiriciler için bu konuda referans olma niteliği taşımaktadır.

## **2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLLERİ**

KAA'ların uygulama alanlarının günden güne artması, ihtiyaca yönelik OEK geliştirmeyi de zorunlu kılmaktadır. Bu zorunluluk uygulama alanlarının birbirine benzememesinden kaynaklanabildiği gibi kurulacak sistem gereksinimlerinden de kaynaklanabilmektedir.

Günümüzde, farklı ortam erişim teknikleri kullanılarak KAA OEK protokolleri geliştirilmiştir. Bunlar sık kullanıma durumlarına göre çekişme tabanlı, zamanlama tabanlı ve melez yapılı olmak üzere üç kısımda incelenebilir.

### **2.1. Çekişme tabanlı OEK protokolleri**

Çekişme tabanlı OEK protokollerinin çalışma esasları ortamı kontrol et ve ortam boş ise veriyi gönder şeklinde açıklanabilir. Kurulumlarının basit olması ve ağ yapısındaki değişimlere çok hızlı tepki vermelerinden olay güdümlü uygulamalarda yaygın olarak tercih edilirler (Ye ve diğ., 2002; Van Dam ve Langendoen, 2003). Boşta dinleme, kendisine lazım olmayan bilgileri dinleme ve iletişim sırasında sıkça çarpışmaların meydana gelmesi çekişme tabanlı protokollerin en büyük olumsuzluklarıdır. Bilginin ne zaman geleceği belli olmadığından sürekli olarak ortamı dinleme zorunlulukları vardır. Bu durum çekişme tabanlı OEK protokollerini enerji verimli olmaktan çıkarmaktadır. Çekişme tabanlı OEK algoritmalarına uyku modu eklenerek, boşta dinlemeler azaltılmış ve enerji verimliliği artırılmaya çalışılmıştır (Ye ve diğ., 2002; Park ve diğ., 2005; Anastasi ve diğ., 2009).

### **2.2. Zamanlama tabanlı OEK protokolleri**

Zamanlama tabanlı OEK protokolleri zamanın belirli parçalara ayrılması esasına göre tasarlanır. Bu tür protokollerde her bir düğüm kendine ayrılmış zaman aralıklarında veri iletimini gerçekleştirir. Düğüme ait zaman diliminde gönderecek verisinin bulunmaması durumunda ayrılan zaman boş olarak geçirilir. Böylece oluşabilecek muhtemel bir çarpışma ve dolayısıyla tekrar göndermenin önüne geçilmiş olur. Uyku modunun kullanılmasıyla enerji tüketiminde büyük kazançlar elde edilebilir. Merkezi topolojilerin kullanıldığı uygulamalarda sıklıkla zamanlama tabanlı OEKler, kullanılmaktadır (Çeken, 2008).

Bu ortam erişim yönteminde, zaman dilimlerinde bilgi gönderilmeyerek boş geçilmesi istenmeyen gecikme artışlarına sebep olması dolayısıyla önemli bir olumsuzluk olarak değerlendirilebilir.

### **2.3. Melez yapılı OEK protokolleri**

Farklı ortam erişim yaklaşımlarının bir arada kullanıldığı OEK protokolleridir (Srikanth, 2011). Her bir ortam erişim yönteminin olumlu yönlerinin değerlendirilmesi ve olumsuz yönlerinin en aza indirilerek her iki yöntemden daha da verimli ortam paylaşımı amacıyla geliştirilirler. Örneğin melez OEKler kullanılarak zamanlama tabanlı yöntem hızlı tepki isteyen uygulamalarda, çekişme tabanlı yöntem de yoğun trafiğin olduğu uygulamalarda tercih edilebilir.

### 3. ÖNERİLEN GENELLEŞTİRİLMİŞ KAA OEK ANALİTİK VE BENZETİM MODELLERİ

Haberleşme ağların performans değerlendirmesinde genel olarak ilk örnek, benzetim ve analitik olmak üzere üç modelleme yönteminden faydalanılır. Her yöntemin birbirlerine göre üstünlükleri ve olumsuz yönleri bulunmaktadır (Stallings, 2005).

İlk örnek (prototip) yönteminde uygulanacak tasarımla ilgili, gerçek sistemi temsil eden ve bütün özelliklerini taşıyan fiziksel bir çözüm oluşturulur. Bu sistemden elde edilen sonuçlar gerçek veriler olduğundan kurulacak uygulamanın başarımı ile ilgili somut kestirimler yapılabilir. Ancak ilk örnek, kurulumunun zor olması ve zaman alması sebepleriyle çoğu zaman tercih edilmemektedir.

Benzetim yönteminde modeller, sistemde karşılaşılabilecek olaylar ve ortam koşulları taklit edilerek oluşturulur. Karmaşıklığı azaltmak için süre veya değerlendirilecek ölçütler sınırlandırılabilir. Benzetim modeli, haberleşme ağlarında özellikle karmaşık kuyruk davranışlarının kolaylıkla modellenemediği durumlarda tercih edilir. Bu çalışmada, haberleşme ağlarının modellenmesinde sıklıkla kullanılan OPNET Modeler benzetim yazılımı kullanılarak genel bir KAA OEK protokolünün benzetim modelinin oluşturulması ve incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Analitik modeller sistemin başarımını ifade eden denklem veya denklemler grubu olarak tanımlanabilir. Matematiksel ifadelerden oluşurlar ve hızlı sonuç verirler (Kobayashi ve Mark, 2009). Bununla birlikte sistem karmaşıklığının arttığı durumlarda modelin çıkarılması neredeyse imkânsız hale gelmektedir. Bu makalede, genel bir benzetim modeli geliştirilen KAA OEK yapısının analitik modeli elde edilmiştir.

Haberleşme ağlarını modellemede kullanılan üç temel yöntem, uygulamanın türüne göre tercih edilmelidir. Bununla birlikte tek yöntemin kullanılmasından elde edilecek sonuçlar bazen model geliştirilirken yapılabilecek muhtemel hatalar dolayısıyla doğru/güvenilir sonuçlar vermeyebilir. Herhangi iki modelleme yönteminin birlikte kullanılması ise, sonuçların karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesini, kurulacak sistemin doğrulanmasını ve kesin sonuçlar elde edilmesini sağlarlar (Karahana, 2010).

Bu çalışmada, alt bölümlerde detaylandırılan genelleştirilmiş benzetim ve analitik modelleme yöntemleri birlikte kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve her bir modelin tasarlanan örnek bir uygulama ortamı için kullanılabilirliği teyit edilmiştir.

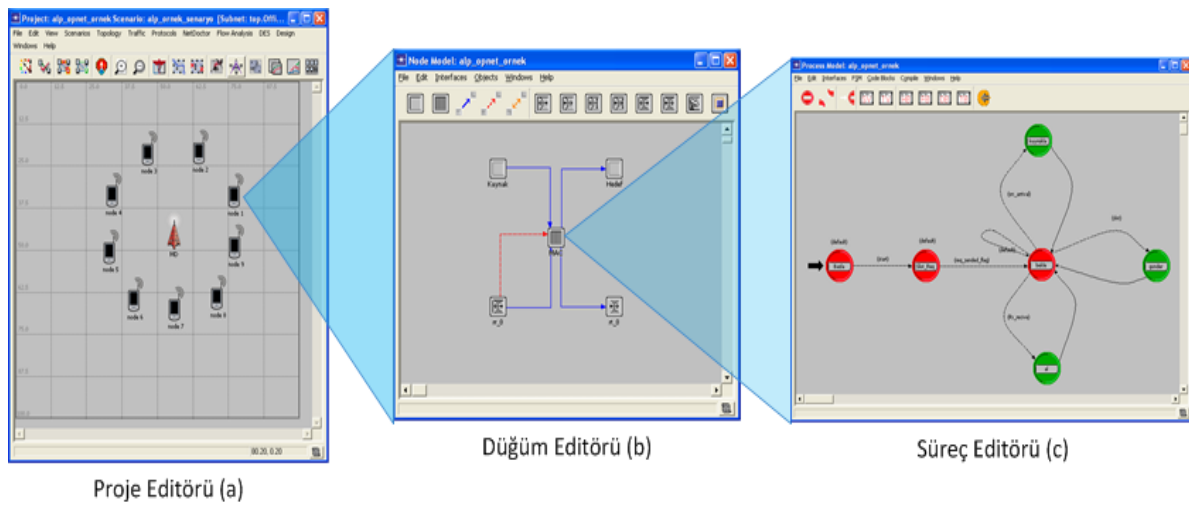
#### 3.1. KAA OEK Benzetim Modeli

Günümüzde kablosuz ağların ve KAA uygulamalarının tasarlanması, modellenmesi, başarımların değerlendirilmesi ve en iyilemelerinin yapılması amacıyla NS2, OMNET++, GLOMOSIM gibi birçok benzetim aracı kullanılmaktadır. Benzetim aracı, geliştirilecek sistemin ihtiyaçlarına uygun olarak seçilmelidir. Bu çalışmada, doğruluğu ve geçerliliği araştırmacılar tarafından kabul edilmiş, diğer benzetim araçlarından farklı olarak dokümantasyonu ve teknik desteği üst düzeyde sağlayabilen OPNET Modeler benzetim aracı kullanılmıştır.

### 3.1.1. OPNET Modeller ile TDMA tabanlı OEK modeli oluşturulması

OPNET Modeller, kablolu ve kablosuz tüm haberleşme sistemlerinin benzetiminin yapılabildiği görselliğe sahip, ticari bir yazılımdır (OPNET, 2006). OPNET’te modellenen sistemlerin davranış ve başarımları analizleri ayrık olay (discrete–event) benzetim yöntemi ile gerçekleştirilir. Bu yetenekleri sayesinde OPNET, standart ağ modellemesinde, ağlar arası iletişimin modellenmesinde, kablolu–kablosuz ve hareketli–hareketsiz haberleşme protokollerinin geliştirilmesinde sıklıkla tercih edilmektedir (Karahan, 2010).

OPNET Modeller benzetim programında geliştirilen genelleştirilmiş KAA OEK modeli oluşturulurken aşağıda belirtilen işlem basamakları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 OPNET Modeller yazılımı temel editörleri

- OEK protokolünün proje editöründe oluşturulması:

OPNET ile KAA’lar için bir OEK geliştirilmeye başlarken öncelikle proje editöründe yeni bir proje oluşturulmalı, çalışılacak alan ve elemanlar seçilmelidir (Şekil 3.1-a). Topolojinin belirlenmesinin ardından her bir düğümün çalışmasını tanımlamak üzere iç yapılar oluşturulmalı; diğer bir ifade ile düğüm modelleri belirlenmelidir.

- OEK protokolü düğüm modelinin oluşturulması:

Topolojinin belirlenmesinin ardından her bir elemanın iç yapısı oluşturulmak üzere düğüm modelinde kullanılacak kaynaklar–hedefler, işlemciler, kuyruk yapıları, iletişim kanalları belirlenmeli ve modüller arasındaki bağlantılar amaca uygun olarak gerçekleştirilmelidir (Şekil 3.1-b).

- OEK protokolü süreç modelinin oluşturulması:

Düğüm modeliyle şekillenen iletişim aygıtlarının davranışları durum şemaları aracılığıyla belirlenir. Tüm olasılıklar göz önünde bulundurularak durumlar arasında geçişler oluşturulur (Şekil 3.1-c). Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus tıkanıklıkların önüne geçilmesi için durumların birbirleri arasındaki bağlantıların ve zorlanmış (forced) / zorlanmamış (unforced) durumların seçilmesidir. Durumlar kesinlikle boşta kalmamalıdır. Süreç modelindeki her bir durum makinesi proto–C kodları kullanarak programlanmalı ve gerçekleştirecekleri işlemler belirlenmelidir.

### 3.2. KAA OEK Analitik Modeli

Bir OEK protokolünün ve içerdiği algoritmaların analitik modelinde ortama erişim için kullanılan iletişim kuralları, haberleşme kanalının kullanımı ve varsa özel durumlar modellenir. Analitik modelde boşa kalma, veri gönderme, kanal kullanılabilirliği ile ilgili olasılıklar bulunur. Bu olasılık ifadeleri kullanılarak birim zamanda aktarılan veri miktarı, haberleşme kanalının kullanım oranı ve başarılı bir iletim için gereksinimler hesaplanabilmektedir (Çakıcı, 2009; Carvalho, 2006).

KAA'nın temel bileşenlerinden olan ve fiziksel katman ile diğer katmanlar arasında köprü işlevi gören en önemli birim OEK'dir. Bu nedenle, genel bir analitik model oluştururken de OEK protokolünün modeli üzerine tüm katmanların analitik modeli bina edilebilmektedir.

Modellenecek bir ağda öncelikle değerlendirmede kullanılacak parametrelerin belirlenmesi gereklidir. Model çalışmasının amacı da böylelikle ortaya çıkmış olacaktır. Ardından iş yükleri, kurallar ve tanımlamalara göre karakterize edilmelidir. Üçüncü olarak uygulanacak yüklerin zaman aralıkları belirlenmeli ve girişler tanımlanmalıdır (Karahana, 2010).

KAA OEK protokollerinin analitik modellenmesinde, genellikle kuyruk modelleri kullanılır. Ortam erişiminde kullanılan tekniğin türüne göre farklı kuyruk modelleri oluşturularak başarımlar ölçümleri elde edilir. Alt bölümlerde uçtan uca gecikme ve düğüm enerji tüketimi analizini gerçekleştirmek üzere bir KAA OEK sisteminin analitik modelinin elde edilebilmesi için gerekli işlem basamakları açıklanarak, zamanlama tabanlı genel bir model sunulmaktadır.

#### 3.2.1. TDMA tabanlı OEK protokolü için gecikme analizi

Haberleşme sistemleri analitik modellerinin çıkarılmasında kuyruk sistemlerinin kullanılmasının nedeni, aynı anda sadece bir işlemin yapılabilmesi ve diğerler işlemlerin sırada bekletilmesidir. Kuyruk teorisi, bilgisayar sistemlerindeki kuyruklarda geçen bekleme sürelerinin hesaplanması ve böylece herhangi bir iş/süreç için sistem içerisinde harcanacak toplam bekleme süresinin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır (Jain, 1991; Baldwin ve diğ., 2003).

Paketlerin kaynak tarafında ilk bitinin üretildiği andan, hedef tarafında son bitinin elde edildiği ana kadar geçen süreye uçtan-ucaya gecikme denir (Stallings, 2005). Kablosuz tüm sistemlerin tasarlanması aşamasında en önemli başarımlar değerlendirme parametreleri arasında yer aldığından, KAA'lar için de göz önünde bulundurulması gereken bir ölçüttür. Bu çerçevede denklemlerde kullanılan değişkenler;

- $\lambda$ : Ortalama paket geliş oranı (paket/sn)
- $\mu$ : Servis sunucu için ortalama servis oranı (paket/sn)
- $X$ : Rastgele değişken
- $\rho$ : Trafik yoğunluğu
- $E[x]$ : Ortalama servis süresi (sn)
- $E[W]$ : Ortalama bekleme süresi (sn)
- $E[N]$ : Ortalama paket sayısı

olmak üzere, sistemdeki ortalama paket sayısı;

$$E[N] = \rho + \frac{\lambda^2 E[X^2]}{2(1-\rho)} \quad (3.1)$$

esas alınarak ve “Little kuralı” kullanılarak sistemde harcanan ortalama bekleme süresi aşağıdaki gibi bulunabilir (Karahana, 2010).

$$E[N] = \lambda x E[W] \quad (3.2)$$

$$\rho + \frac{\lambda^2 E[X^2]}{2(1-\rho)} = \lambda x E[W] \quad (3.3)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (3.4)$$

$$\mu = \frac{1}{E[x]} = \frac{\lambda}{\rho} \quad (3.5)$$

$$E[W] = \frac{\rho}{\lambda} + \frac{\lambda^2 E[X^2]}{2(1-\rho)} \quad (3.6)$$

$$E[W] = E[X] + \frac{\lambda E[X^2]}{2(1-\rho)} \quad (3.7)$$

$$E[W] = E[X] + \frac{\rho E[X]}{2(1-\rho)} \quad (3.8)$$

### 3.2.2. TDMA tabanlı OEK protokolü için enerji tüketimi analizi

Bir KAA düğümü verilerin alınması, gönderilmesi ve boşta bekleme durumlarında farklı büyüklüklerde güç tükettiğinden, analitik modelin elde edilmesinde bu durumlar göz önünde bulundurulurken işlemler gerçekleştirilir. KAA düğümleri incelendiğinde, en fazla enerji tüketiminin kablosuz haberleşme biriminde gerçekleştiği, düğümlerdeki diğer enerji tüketimlerinin ise ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla elde edilecek enerji tüketimi analitik modellerinde, kablosuz haberleşme birimi aktivitelerinin göz önünde bulundurulması yeterli olacaktır. Tüm bunlar değerlendirilerek aşağıda belirtilen değişkenlere göre denklemler çıkarılabilir (Karahana, 2010);

- $R_{Tx}$  : Veri hızı (bit/sn)
- $F_s$  : Çerçeve dilim (slot) sayısı
- $S_L$  : Zaman dilimi uzunluğu (sn)
- $P_L$  : Paket büyüklüğü (bit)
- $C_s$  : Zaman dilimi kapasitesi (bit)
- $F_L$  : Çerçeve uzunluğu (sn)
- $IAT$  : Paket geliş zamanı (sn)
- $T_F$  : Toplam çerçeve sayısı
- $ST$  : Benzetim zamanı (sn)
- $S_t$  : Paket gönderme/alma süresi (sn)
- $T_{CE}$  : Gönderme için harcanan enerji (joule)
- $R_{CE}$  : Alma işlemi için harcanan enerji (joule)
- $\dot{I}_{CE}$  : Boşta beklerken harcanan enerji (joule)
- $P_{Tx}$  : Veri gönderme işleminde harcanan güç (W)
- $P_{Rx}$  : Veri alma işleminde harcanan güç (W)
- $P_{idle}$  : Veri bekleme sırasında harcanan güç (W)

Harcanacak enerji zamanla değişeceğinden oluşturulacak modelde de zamana bağlı fonksiyonlar kullanılmalıdır. TDMA yapılarında zamanlamalar dilimlere ve çerçevelere göre değişmektedir. Bu iki değişken belirlendiğinde teorik olarak sonsuza kadar aynı zamanlar birbirlerini takip edecektir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus bir zaman dilimi için en fazla bit kapasitesinin dikkate alınması ve buna uygun paket boyutunun seçilmesidir;

$$C_s = R_{Tx} S_L \quad (3.9)$$

Paket boyutu bu sınırlar içinde ise, paketlere göre zaman dilimi enerji tüketimleri hesaplanarak bir çerçevede harcanan enerjinin bulunması ve istenilen herhangi bir süre için toplam enerji tüketiminin belirlenebilmesi mümkün olur.

İstenen süre içerisinde düğümlerde harcanan enerji miktarının belirlenebilmesi için geçen çerçeve sayısının bulunması gereklidir. Varışlar arası sürenin çerçeve boyutundan küçük olduğu durumlarda çerçeve sayısı;

$$F_L = F_S S_L \quad (3.10)$$

kullanılarak;

$$T_F = \frac{ST}{F_L} \quad (3.11)$$

şeklinde hesaplanır. Ancak yüke göre yapılan enerji tüketim hesaplarında her bir çerçevede gönderilecek paketin bulunmaması durumlarının göz önüne alınması gereklidir. Bu da ancak varışlar arası sürede geçen çerçeve sayısı belirlenerek yapılabilir. Denklem (3.11)'deki toplam çerçeve sayısı varışlar arası süre ve çerçeve yapısı oranına göre düzenlenirse;

$$T_F = \frac{ST}{IAT} \quad (3.12)$$

formülüyle hesaplanabilir. Varışlar arası süreye göre Denklem (3.11) ve (3.12) birlikte ifade edilirse;

$$T_F = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{ST}{F_L} & IAT \leq F_L \\ \frac{ST}{IAT} & IAT > F_L \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

denklem kümesi elde edilebilir.

Çerçevede harcanan enerjiler, bir zaman dilimi içinde paketin ne kadar sürede gönderilebileceği ve alma, gönderme, boшта kalma durumlarındaki güç tüketimlerine göre belirlenir. Paketin ne kadar sürede gönderilebileceği;

$$St = \frac{P_L}{R_{Tx}} \quad (3.14)$$

gönderme işleminde harcanan enerji;

$$T_{CE} = S_t P_{Tx} \quad (3.15)$$

alma işleminde harcanan enerji;

$$R_{CE} = S_t P_{Rx} \quad (3.16)$$



boşta beklenirken harcanan enerji;

$$\dot{I}_{CE} = (F_L - S_t)P_{idle} \quad (3.17)$$

denklemleriyle hesaplanır.

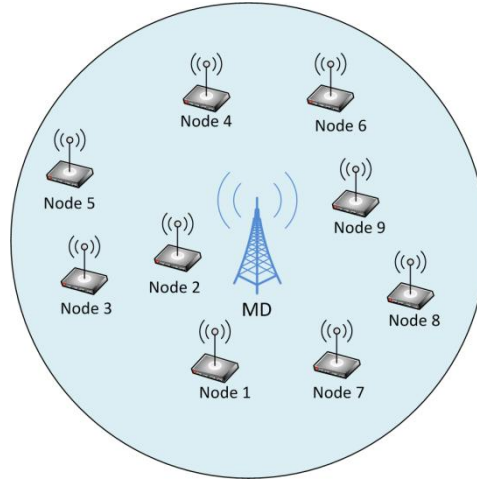
Alma, gönderme ve boşta kalma durumları tanımlanıp harcanan enerjilerin belirlenmesiyle toplam tüketilen enerjiler Denklem (3.18) yardımıyla hesaplanabilecektir.

$$T_E = (T_{CE} + R_{CE} + \dot{I}_{CE})T_F \quad (3.18)$$

#### 4. ÖNERİLEN GENELLEŞTİRİLMİŞ ANALİTİK VE BENZETİM MODELLERİNİN ÖRNEK BİR KAA OEK DOĞRULAMASI VE BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİNDE KULLANIMI

Şekil 4.1’de topolojisi sunulan KAA OEK örnek uygulamasının önerilen genelleştirilmiş analitik ve benzetim modelleri kullanılarak doğrulaması ve değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Örnek uygulamada, KAALAR için temel başarımlar değerlendirme ölçütleri olan düğüm enerji tüketimi ve uçtan uca paket gecikmesi sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen analitik ve benzetim modeli sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Merkezi düğümlü olarak tasarlanan uygulama senaryosunda düğümler kendi zaman dilimlerini bilmemekte ve uyandıklarında merkezi düğümden zaman dilimi isteğinde bulunmaktadır. Merkezi düğümden gelen cevap doğrultusunda her düğüm kendi zaman dilimi geldiğinde kuyrukta verisi varsa göndermektedir.



Şekil 4.1: Temel TDMA OEK’in kullanılacağı örnek topoloji

Benzetim ve analitik modellerinde Crossbow firmasının MICAz algılayıcı düğümünde kullanılan değişkenler referans alınmıştır (Crossbow, 2013). Bu değişkenler Tablo 4.1’de görülmektedir.

Tablo 4.1: Benzetim değişkenleri

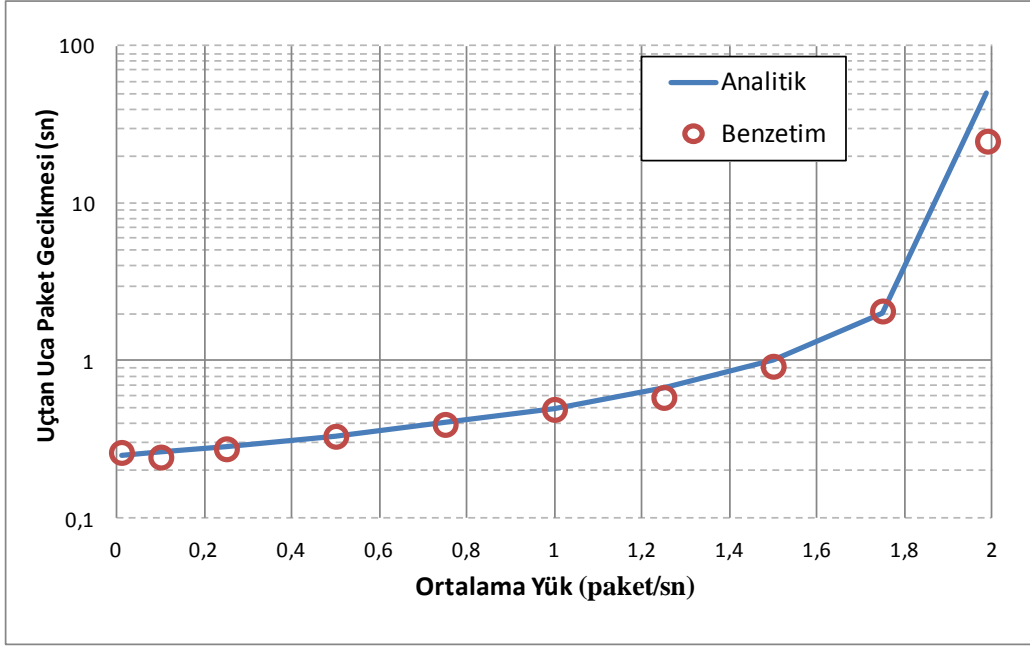
Değişken	Değeri
Alan	100 x 100 m <sup>2</sup>
Düğüm Sayısı	9
Benzetim Süresi	3600 sn
Paket Boyutu	52 Bayt
Yük	0,01–4 (Paket/sn)
Zaman Dilimi Genişliği	50 ms
Veri İletim Hızı (Data rate)	250 Kbps
Frekans	2400 MHz (ISM)
Çerçeve Zaman Dilimi Sayısı	10
Kanal Modeli	Engelsiz (Free Space) Yayılım Modeli
R <sub>x</sub> Power	59,1 mW
T <sub>x</sub> Power	52,2 mW
Idle Power	60 µW
Sleep Power	3 µW

Temel alınan ve bölüm 3’te model oluşturma aşamaları anlatılan performans değerlendirme ölçütlerinin analitik ve benzetim modellerinden elde edilen sonuçlar alt bölümlerde sunulmaktadır.

#### 4.1. Uçtan Uca Paket Gecikmesi

Örnek uygulamada, uçtan uca paket gecikmesini incelemek üzere, algılayıcı düğümlere uygulanan yük değerleri değiştirilerek, kuyrukta bekleyen paket sayıları farklılaştırılmaktadır. Paketler düğümlere üstel dağılıma göre gelmekte ve boyutları sabit tutulmaktadır.

Şekil 4.2’de, bu doğrultuda benzetim ve analitik modelden elde edilen ortalama uçtan uca paket gecikme sonuçları sunulmaktadır. Grafiklerde ortalama yük 0,01 ile 2 paket/sn değerleri arasında artırılırken, uçtan-uca gecikme değerleri de artmıştır. Yükün 1,7 paket/sn değerine kadar hem analitik model hem de benzetim modeli sonuçları aynı değerlerde, giderek artmıştır. Yükün 2 paket/sn değerinde kuyruk gecikmesi sonsuza gittiğinden benzetimden elde edilen sonuçta bir miktar sapma görülmektedir. Sonuçlardaki ciddi farklılaşma durumu, kuyruğun kararsız noktaya ulaşmakta olduğunu göstermektedir. Ortalama yükün 2 paket/sn ve üzeri değerinde paket uçtan uca gecikmesi sonsuza gittiğinden analitik sonuçlar yükün 1,99 paket/sn değerine kadar elde edilmiştir.



Şekil 4.2: Benzetim ve analitik model uçtan uca gecikme sonuçları

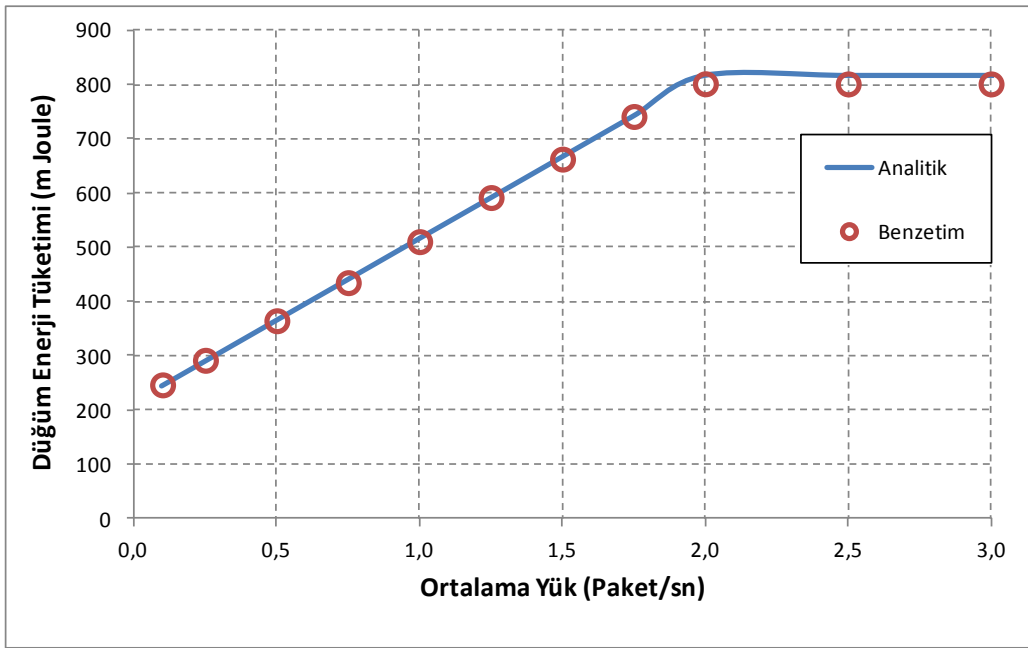
Böyle bir TDMA tabanlı KAA için, uçtan uca paket gecikmelerinin yaklaşık 1sn'den küçük olduğu ve saniyede 1 paketin gönderilmesi gerektiği uygulamalarda kullanımının uygun olacağı değerlendirilebilir.

#### 4.2. Düğüm Enerji Tüketimi

Bir KAA'da, algılayıcı düğümler harici bir pil veya batarya kullandıklarından, düğümlerin tükettikleri enerji miktarı başarımlı değerlendirme ölçütü olarak alınmıştır. Merkezi düğüm genellikle enerjisini şebekeden aldığından, bu düğümde tüketilen enerji miktarı, algılayıcı düğümlerde tüketilen enerji kadar kritik değildir.

Çalışmada TDMA tabanlı bir OEK sistemi kullanıldığı ve her bir düğüme sabit bantgenişliği tahsis edildiğinden, algılayıcı düğümlerin tükettiği enerji miktarı bir çerçeve boyunca sabittir. Paket boyutlarının sabit tutulduğu durumlarda benzetim süresi arttıkça tüketilen enerji miktarının da artması ve artışın doğrusal olması beklenir. OPNET benzetim ortamındaki bir KAA düğümü için enerji tüketimi benzetim sonuçları ve analitik modelden elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'te görülmektedir. Enerji tüketimi bir saatlik benzetim süresi boyunca her iki model için de yük 2 paket/sn oluncaya kadar doğrusal olarak artmaktadır.

Gerçekleştirilen TDMA sisteminde çerçeve uzunluğu 0,5 saniyedir. Bu nedenle sistem tam kapasite çalıştığında, her bir düğüm bir saniyede 2 paket gönderilebilir. Saniyede ortalama 2 paketten sonra yük ne kadar arttırılırsa arttırılsın, kuyruk sistemi doyuma gideceğinden enerji değişimi gözlenmemektedir.



Şekil 4.3: Benzetim ve analitik model enerji tüketimi

Temel TDMA OEK yapısı için gerçekleştirilen benzetim ve analitik modellerinden elde edilen enerji tüketimi sonuçları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde aynı doğrultuda değiştikleri ve örtüştükleri görülmektedir (Şekil 4.3). Benzetim modeli ve analitik modeli sonuçlarının örtüşmesi, OEK modellerinin doğruluğunu göstermektedir. Bunun anlamı, modelde yapılacak iyileştirmelerin gerçek sistemde karşılık bulmasıdır. Sonuçlar, geliştirilmesi hedeflenen KAA'nın istenilen niteliklerini sağladığında OEK'in kullanılabilirliğini de kanıtlar niteliktedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, KAA OEK protokolleri için önerilen geliştirilmiş benzetim ve analitik modelleme yöntemleri ve kullanıldıkları örnek bir uygulamada elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak kullanılabilirlikleri teyit edilmektedir. Haberleşme ağlarının başarımlarını değerlendirmek üzere modellenmesinde genel olarak ilk örnek, benzetim ve analitik olmak üzere üç yöntemden faydalanılır. Her yöntemin birbirlerine göre değişik üstünlükleri ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Tek yöntemin kullanılmasından elde edilecek sonuçlar bazen model geliştirilirken yapılan muhtemel hatalar dolayısıyla doğru sonuçlar vermeyebilir. Bunun yanında herhangi iki modelleme yöntemini birlikte kullanarak sonuçların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, kurulacak sistemin doğrulanmasını ve kesin sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Bu çalışmada örnek kullanımı da sunulan geliştirilmiş KAA OEK protokolü analitik ve benzetim modellerinin ileride farklı uygulamalar için geliştirilecek TDMA tabanlı OEK sistemlerine temel teşkil etmesi hedeflenmektedir. Geliştirilen modeller sayesinde, tasarım aşamasında KAA'larda muhtemel sorunlar ve çözümleri öngörülebilecek, değişik uygulamalara göre analitik model ve benzetim model sonuçları doğrulanabilecektir. Ayrıca önerilen mevcut standartlaştırılmış modelleme formlarına eklemeler ve basit düzenlemeler ile

daha kapsamlı KAA OEK modelleri oluşturulması araştırmacılara önemli bir kolaylık sunmaktadır.

## 6. REFERANSLAR

Akyildiz, F., Su, W., Sankasubramaniam Y. and Cayirci E. (2002), “Wireless sensor networks: a survey”, *Computer Networks*, 393–422.

Alippi, C., Anastasi, G., Galperti, C., Mancini, F., Roveri, M. (2007), “Adaptive Sampling for Energy Conservation in Wireless Sensor Networks for Snow Monitoring Applications”, *IEEE International Workshop on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems for Global and Homeland Security*, Pisa, Italy.

Anastasi, G., Conti, M., Francesco, M. D., Passarella, A. (2009), “Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A survey”, *Ad Hoc Networks*, Elsevier, Vol. 7, Issue 3, 537–568, Amsterdam, Netherlands.

Baldwin, R. O., Davis, N. J., Midkiff, S. F., Kobza, J. E. (2003), “Queueing Network Analysis Concepts Terminology And Methods”, *The Journal of Systems and Software*, Vol. 66.

Carvalho, M. M. (2006), “Analytical Modeling Of Medium Access Control Protocols In Wireless Networks”, *Doctor Of Philosophy in Computer Engineering*, University Of California Santa Cruz, California.

Crossbow, (2013), “MICAz Datasheet” [Online], [http://www.openautomation.net/uploads/productos/micaz\\_datasheet.pdf](http://www.openautomation.net/uploads/productos/micaz_datasheet.pdf), (Ziyaret Tarihi: 16 Ocak 2013).

Çakıcı, S. (2009), “An integrated approach for analytical modeling of WSNs”, *International Conference on Application of Information and Communication Technologies*, Bakü.

Çeken, C. (2008), “An Energy Efficient and Delay Sensitive Centralized MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, *Computer Standards and Interfaces*, 30 (1–2), 20–31.

Jain, R. (1991), “The Art of Computer Systems Performance Analysis, Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling”, John Wiley & Sons, New York.

Karahan, A. (2010), “TDMA Tabanlı Kablosuz Algılayıcı Ağ Ortam Erişim Kontrol Protokolleri İçin Genel Bir Analitik Ve Benzetim Modeli”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,

Kobayashi, H., Mark, B. L. (2009), “System Modeling and Analysis: Foundations of System Performance Evaluation”, Prentice Hall.

OPNET, (2006), “OPNET Modeler 11.5 Documentation”, OPNET Technologies, Release11.5.

Park, T.R., Kim, T.H., Choi, S., Kwon, W.H. (2005), “Throughput and Energy Consumption Analysis of IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA”, *Electronics Letters*, Vol. 41, Issue : 18, 1017 – 1019.

Srikanth, B., Harish, M., Bhattacharjee, R. (2011), “An energy efficient hybrid MAC protocol for WSN containing mobile nodes”, *8th International Conference on Information, Communications and Signal Processing*.

Stallings, W. (2005), “Wireless Communications & Networks”, Pearson Prentice Hall.

Verdone, R., Dardari, D., Mazzini, G., Conti, A. (2008), “Wireless Sensor And Actuator Networks; Technologies Analysis And Design”, Elsevier, London.

Van Dam, T., Langendoen, K. (2003), “An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, In The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, CA, USA, 171–180, November.

Ye, W., Heidemann, J., Estrin, D. (2002), “An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, 21<sup>th</sup> Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Vol. 3, 1567–1576.