

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Karınca Koloni Optimizasyonu Kullanılarak Yapılan Optimum Yönlendirme İşlemi

Derviş Karaboğa¹

Selçuk Ökdem²

^{1,2}Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi,
Erciyes Üniversitesi, Kayseri

¹e-posta: karaboga@erciyes.edu.tr

²e-posta: okdem@erciyes.edu.tr

Özetçe

Kablosuz haberleşme ve sayısal elektronik teknolojilerindeki yeniliklerle birlikte çok küçük boyutlarda, düşük güç tüketimli, ekonomik yapılarda algılayıcı elemanların üretimi mümkün hale gelmiştir. Bu tür algılayıcı elemanların meydana getirdiği ağ yapılarının endüstride çok çeşitli alanlarda uygulama imkanı bulunmaktadır. Diğer bilişim ağ yapılarından farklılık arz eden kablosuz algılayıcı ağlar üzerinde etkin ve verimli haberleşmenin gerçekleştirilebilmesi için algılayıcı ağ yapılarına özgü yönlendirme protokollerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bildiride, kablosuz ağ algılayıcı yapıları için geliştirilen EEABR ve EARACO algoritmalarının farklı senaryolarda simülasyon sonuçları alınmış ve performans analizleri yapılmıştır.

1. Giriş

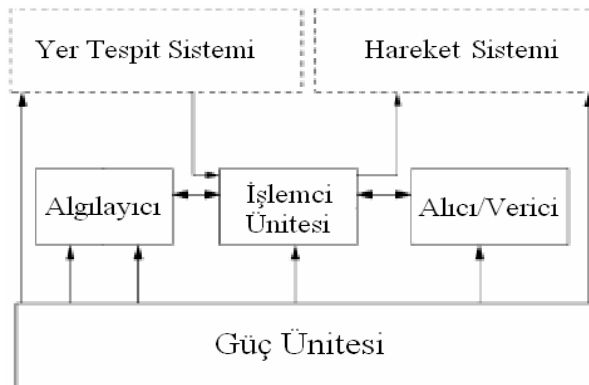
Kablosuz algılayıcı ağlar (KAA) çok sayıda küçük boyutlarda algılayıcı elemanın oluşturduğu ağ yapılarıdır. Kablosuz haberleşme ve sayısal elektronik teknolojilerindeki güncel gelişmelerle birlikte, düşük güç tüketimli, oldukça küçük boyutlarda ve kısa mesafeli iletişim becerilerine sahip algılayıcı ünitelerin tasarımı mümkün hale gelmiştir. Algılama, veri işleme ve haberleşme işlemleri gerçekleştirebilen bu türde, çok sayıda algılayıcı elemanların bir araya gelmesiyle oluşturulan KAA yapıları klasik algılayıcı sistemlerine önemli üstünlükler sağlamaktadır.

Çok sayıda algılayıcı ünitenin oluşturduğu bu ağlar, ölçüm yapılacak bölgenin yakınına veya içine yerleştirilebilmektedir. Her bir ünitenin yeri daha önceden belirlenebilmekte ve birçok uygulamada yerleştirme rastgele bir şekilde yapılmaktadır. Rastgele yerleştirme yöntemi ile oluşturulan ağ yapısında, kendi kendine organize olma ve adaptif yapıda bir işbirliği içine girme önem kazanmaktadır[1].

KAA' lar birçok askeri ve sivil uygulama alanlarında kullanılabilir. Bunlar arasında hedef bölge gözetleme, izinsiz giriş saptama, meteorolojik gözleme, sismik hareket ölçüm sistemi, orman yangın gözlemi, habitat gözlemi vb. gibi çeşitli uygulamalar yer almaktadır. Örneğin askeri amaçlı bir hedef gözetleme uygulaması için hedeflenen alana uçaktan binlerce sayıda küçük algılayıcı elemanlar atılır. Bu elemanlar kablosuz haberleşme üniteleri aracılığıyla birbirleriyle organize olarak saptadıkları verileri birbirleri üzerinden merkezlere iletebilmektedir[2].

Tipik olarak bir KAA yüzlerce veya binlerce algılayıcı eleman içermektedir. Her bir eleman birbirleri aracılığıyla merkeze(baz istasyonuna) veri iletmeye yeteneğine sahiptir. Bu elemanlarının her birinin kablosuz iletim mesafesi düşüktür. Ancak çok sayıda elemanın oluşturduğu bir yapıyla çok geniş coğrafik bir alan ölçüm yapılabilecek bir duruma gelmektedir.

Şekil 1' de bir algılayıcı eleman içeriğinin şematik gösterimi yer almaktadır. Temel olarak algılayıcı, algılayıcı birim, işlemci birim, haberleşme ünitesi ve enerji kaynağı içermektedir. Baz istasyonu, bu algılayıcı elemanlardan biri olabileceği gibi internet ortamında bir PC de olabilmektedir. Algılayıcılar ve baz istasyonu sabit veya hareketli olabilmektedir.



Şekil 1: Algılayıcı Eleman İçeriği.

Klasik bilişim ağ yapılarından farklılık arz eden KAA yapıları için etkin haberleşmenin sağlanabilmesi amacıyla yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesi, uygulama alanlarının artmasıyla birlikte önem kazanmaktadır. Klasik ağ yapılarında yönlendirme algoritmalarına alternatif olarak güzel sonuçlar sunan karınca koloni optimizasyonu, KAA yapıları için de uyarlanabilmektedir. Ancak KAA yapılarının sahip olduğu bazı özellikler, diğer klasik bilişim ağlardan oldukça farklı yapıda yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesini gerektirmektedir.

Bildiride, 2. bölümde KAA' lar için geliştirilen temel yönlendirme algoritmaları, bunların getirdiği avantaj ve dezavantajlar ana hatlarıyla verilmiştir. 3. bölümde KAA' lara özgü nitelikleri dikkate alarak geliştirilen karınca koloni optimizasyonunu kullanan yeni bir yaklaşım olan "Energy Aware Routing using Ant Colony Algorithm for WSNs, EARACO" (Kablosuz algılayıcı Ağlar için Enerji Durumlarını Değerlendiren Yönlendirme Algoritması)[3] açıklanmıştır. 4. bölümde ise bu algoritmanın başarısı simülasyonlarla test edilmiş ve bilinen bir diğer karınca tabanlı algoritma olan "Energy Efficient Ant Based Routing Algorithm for WSNs, EEABR" (Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Karınca Tabanlı Yönlendirme Algoritması)[4] ile performans karşılaştırması yapılmıştır. Bu algoritmaların farklı yapılardaki KAA' lar üzerindeki simülasyon sonuçları tartışılmıştır. Son bölümde ise bildiri sonuçlanmıştır.

2. Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Yönlendirme Protokolleri

Birçok uygulamada, KAA' lar güzel çözümler sunabilmelerine rağmen bu yapılara özgü bazı sıkıntılar da söz konusudur. Bunlardan bazıları sınırlı enerji kaynağı, düşük işlemci güçleri ve oldukça kısıtlı haberleşme yeteneklerine sahip olmalarıdır. İletişim veri hızları ve veri gönderim/alım mesafeleri klasik ağ haberleşme sistemlerine nazaran oldukça düşük kalmaktadır. Bu sınırlamalardan dolayı literatürde mevcut birçok ağ haberleşme(MANET, adhoc[5] vb.) yapılarının kullandığı yönlendirme algoritmaları KAA'lar için uygun olamamaktadır.

Algılayıcı ağlarında enerji tüketimi ağ ömrünün süresini belirleyen en önemli performans kriteridir. Yönlendirme algoritmaları enerji tüketimini minimize ederken aynı zamanda hata toleransını da sağlamalıdır. Bununla birlikte algılayıcıların bant genişliğinin düşük olmasından dolayı, yönlendirme algoritmasının algılayıcılar üzerindeki işbirliği ve işlevi gerçekleşirken ihtiyaç duyulan bant genişliği düşük seviyelerde olmalıdır.

Bir algılayıcıdan baz istasyonuna veri gönderirken kullanılan en temel teknik "flooding" olarak adlandırılmaktadır. Bu metotta bilgi bütün algılayıcılar üzerinden baz istasyonuna ulaşmaya kadar yayılmaktadır. Bu şekilde bir yayımlama büyük ölçüde enerji ve bant genişliği tüketmektedir. Heinzelman ve arkadaşları veri yayımlamada SPIN ailesini önermişlerdir[6]. Ancak SPIN protokollerinin reklam (advertisement) operasyonları veri iletiminin hedefe ulaşmasını garanti etmemektedir. Bu konuda çoklu yollu yönlendirme protokolleri avantaj sağlamaktadır. Veri gönderiminde çoklu yol kullanılması KAA' ların güvenli bir şekilde veri iletimi için faydalı bir yöntem olmaktadır. Güdümlü yayım (directed diffusion)[7] çoklu-yollu yönlendirme algoritmalarına bir örnektir. Ancak, güdümlü yayım periyodik veri transferi gerektiren gözlem uygulamalarında uygun olamamaktadır.

Maksimum ağ ömrünü sağlamak üzere KAA parametrelerinin optimizasyonu bir kombinasyonel optimizasyon problemi olarak düşünülebilir. Kombinasyonel optimizasyon problemlerinin çözümü, karıncalar gibi işbirliği ile çalışan biyolojik canlı türlerinin davranışlarını referans alarak geliştirilen algoritmalar ile yapılabilmektedir[8]. Karınca koloni davranışlarını simüle eden Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO) algoritması asimetrik gezgin satıcı, araç yönlendirme ve KAA yönlendirme[9, 10, 11] gibi bir çok optimizasyon problemine başarılı bir şekilde uygulanmaktadır.

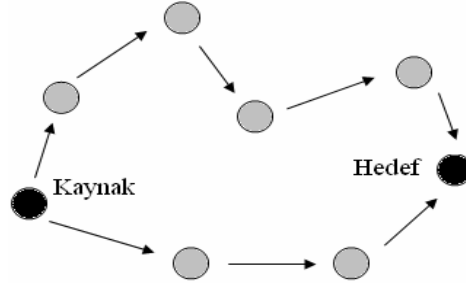
Singh ve arkadaşları[12] KAA yapıları için karınca algoritması tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Ancak, bu yaklaşımda enerji ile ilgili sınırlamalar dahil olmak üzere KAA' lara özgü temel özelliklere yönelik unsurlara dikkat edilmemiştir. Zhang ve arkadaşları[13] yine karınca algoritması tabanlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Çalışmaları SC, FF ve FP olmak üzere üç yönlendirme algoritmasını ihtiva etmektedir. Algoritmalar sistem çalışması başlangıcında karınca algoritmasına özgü bir parametre olan ilk feromon değerlerini güzel sonuçlar verecek şekilde üretmektedir. Ancak sistemin çalışmasının ileri aşamalarında SC ve FF algoritmaları için gecikmeler(latency) artmaktadır. Diğer iki algoritmaya nazaran FP algoritması hızlı veri iletimi yapabilmesine rağmen, SC ve FF algoritmalarından daha fazla enerji tüketiminde bulunmaktadır. Literatür' de yer alan bir diğer algoritma EEABR[4] karınca koloni optimizasyonu sezgiselliğini referans almaktadır. Algoritma, algılayıcıların enerji seviyelerini ve yönlendirilmiş yolların uzunluklarını dikkate alan etkili bir strateji kullanmaktadır. Enerji durumlarını ve yol uzunluklarını dikkate alarak karınca koloni optimizasyonunu kullanan ve EEABR' e kıyasla güzel performans sonuçları üreten bir diğer algoritma ise EARACO algoritmasıdır.

3. EARACO Yönlendirme Algoritması

KAA' lar çok sayıda sabit veya hareketli algılayıcılarla, bu algılayıcılardan gelen verileri değerlendirmek üzere toplayan bir baz istasyonundan meydana gelmektedir. Verilerin merkeze hangi yollardan ne şekilde gideceğini yönlendirme algoritmaları belirlemektedir. Etkin ve güvenli bir veri iletişimi sağlamak amacıyla KAA' lara özgü başlıca sınırlamalar bu yönlendirme algoritmaları tarafından dikkate alınmalıdır. KAA' lar üzerinde diğer ağlara göre daha fazla hatalarla karşılaşma olasılığı söz konusudur. Çünkü algılayıcılar bir daha bakım veya tamir yapılamayacak şartlarda genelde rastgele olarak coğrafik bölge üzerine yerleştirilmektedir. Enerji kaynakları sınırlı olduğu için ve çevresel şartlar(sıcaklık, nem manyetik alan girişimleri vb.) sağlıklı haberleşmeyi daha fazla zorladığı için klasik ağ haberleşme protokollerinin kullandığı stratejiden daha farklı bir yaklaşım geliştirilmelidir. Zamanla farklı algılayıcı elemanlar hatalarından ağ işlevinin etkilememesi ve sağlıklı yönlendirme işlevlerinin gerçekleştirilebilmesi için ağ adaptif yapıda olmalıdır.

Algılayıcı elemanlarda meydana gelebilecek enerji tükenmesi hatalı işlem, arıza vb. sıkıntılarının elimine edilmesi için yönlendirme işleminde farklı alternatif yolların canlı tutulması çözüm olmaktadır. EARACO algoritması enerji durumlarına ve hatalara bakarak veriyi farklı yollardan iletme yeteneğine sahiptir. Algoritmada, veri parçalara bölünerek uygun yollardan gönderilme işlemi yapılmaktadır. Her bir parça baz istasyonuna ulaştığında veriyi gönderen kaynağa onay mesajı iletilmektedir. Bu sayede hatalı yollarda kaybolan veri tekrar gönderilebilmektedir ve garantili veri iletimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu şekilde yönlendirme işleminde farklı yolları canlı tutarak ve onay mesajlarını kullanarak veri iletimi daha güvenli hale gelmektedir. Şekil 2' de görüleceği üzere kaynak algılayıcı elemandan hedef baz istasyonuna giden bazı yollar diğer yollardan daha kısa olabilmektedir.

Bu yollardan kısa olanları, veri iletimde toplam harcanan enerjiyi azaltacağından tercih edilmelidir. Ancak bu yollar üzerinde bulunan algılayıcılarda enerji azaldığında veya hatalar olduğunda diğer yollardan veri gönderilmelidir. Başka bir ifadeyle enerjisi bol olan, kısa güzergahlı ve hatasız yollara gönderilen paket sayısı diğer yollara nazaran daha fazla olmalıdır. Önerilen EARACO algoritmasıyla bu yönde bir yol seçim yaklaşımı mümkün olmaktadır. Yaklaşımında enerji seviyeleri değerlendirilmekte ve fazla enerjiye sahip algılayıcılar üzerinden veri aktarımı ağırlıklı olarak tercih edilmektedir. Yaklaşımında, ayrıca yol uzunlukları da değerlendirilmekte ve kısa olan yollara veri gönderiminde öncelik verilmektedir.



Şekil 2. KAA' larda Çoklu Yollu Veri İletim Örneği.

KAA' larda haberleşme bant genişliği oldukça düşüktür. Dolayısıyla geliştirilen yönlendirme algoritmasının haberleşmede kullandığı kontrol parametre sayısı ve boyutu mümkün olduğunca az olmalıdır. Önerilen EARACO algoritmasıyla az sayıda kontrol parametresi kullanılmış ve ihtiyaç duyulan bant genişliği gereksinimi düşürülmüştür.

Çevresinde gerçekleşen bir olayla ilgili veri göndermek isteyen bir algılayıcı öncelikle bu veriyi parçalara böler (her bir parça boyutu daha önceden sisteme paket boyutu olarak belirtilmiştir). Şekil 3' de gönderilen veri paketinde bulunan algoritma tarafından kullanılan kontrol parametreleri yer almaktadır.

P_T	K_A	S_N	J_w^k	$Veri_Parçası^k$
--------	--------	--------	---------	-------------------

Şekil 3. Veri Paketi İçeriği.

Paket içeriğinde P_T , paket tanımlayıcı; K_A , kaynak algılayıcı eleman adresi; S_N , paket sıra numarası; J_w^k , k . yol uzunluğunu gösteren parametre ve son olarak, gönderilen k . veri parçası yer almaktadır.

EERACO algoritması karınca koloni optimizasyonunu[14] kullanmaktadır. Algoritma çalışırken her bir yapay karınca ajanı ağ üzerinde uygun bir yol bulmaya çalışmaktadır. Karınca ajanlar, kuyruk algılayıcı eleman s ' den hareket etmekte ve komşu r_i algılayıcılar üzerinden hedef eleman d ' ye ulaşmaktadırlar. Hareket edilen her bir komşu eleman r seçimi, Eşitlik 1'den elde edilen $P_k(r, s)$ değerine göre yapılmaktadır.

$$P_k(r, s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r, s)]^\alpha \cdot [\eta(r, s)]^\beta}{\sum_{r \in R_s} [\tau(r, s)]^\alpha \cdot [\eta(r, s)]^\beta}, & k \notin tabu^r \text{ durumunda} \\ 0 & \text{farklı durumlarda} \end{cases} \quad (1)$$

Eşitlikte $\tau(r, s)$ feromon değerini, $\eta(r, s)$ enerji durumunu dikkate alan sezgisel değeri, R_s muhtemel komşu alıcı elemanları ifade etmektedir. Gönderici eleman r için $tabu_r$, daha önce alınan paket numaralarını işaret etmektedir. $tabu_r$ listesinde olan bir paket daha önceden iletilmiş anlamına gelmekte ve tekrardan iletilmemektedir. İletilen her bir paket numarası bu listeye eklenmektedir. α ve β parametreleri ise feromon izi ve sezgisel değer formülde etkisini belirleyen bağıl ağırlıklandırma değerleridir. Feromon izleri, her bir eleman arası bağlantılara $arc(r, s)$ iliştilmiştir. EARACO algoritmasında baz istasyonu sabit olarak ele alındığı için her bir karınca ajanının son ulaşacağı hedef eleman her turda aynıdır. Enerji durumlarını dikkate alan sezgisel ifade Eşitlik 2' de verilmiştir.

$$\eta(r, s) = \frac{(I - e_r)^{-1}}{\sum_{n \in R_s} (I - e_n)^{-1}} \quad (2)$$

Eşitlikte I başlangıç enerjisini, e_r ise r elemanın kalan enerjisini ifade etmektedir. Bu eşitlik sayesinde verinin gidebileceği alternatif komşu elemanların enerjilerine göre bağlı bir değerlendirme yapılabilmektedir. Değerlendirmede yol uzunlukları da dikkate alınan bir kriterdir. Uzun yollarda daha az feromon maddesi bulunmaktadır. Çünkü karıncalar turlarını tamamladıktan sonra yollara Eşitlik 3 ve 4' deki ifadeye göre feromon bırakmaktadır.

$$\Delta \tau^k(t) = 1 / J_w^k(t) \quad (3)$$

$$\tau(r, s)(t) \leftarrow \tau(r, s)(t) + \Delta \tau(r, s)(t), \quad k = 1, \dots, m \quad (4)$$

Eşitlikte $\Delta \tau^k$, k . karınca için w . turda yola bırakılan feromon miktarı; J_w^k , ise turun tamamlanması süresince toplam ziyaret edilen algılayıcı eleman sayısıdır. Bu değer yolun toplam uzunluğunu eleman sayısı olarak vermektedir. Feromon değerleri algılayıcı elemanlar üzerindeki hafızada tutulmaktadır. Her bir algılayıcı eleman komşularına olan bağlantılarına ait feromon bilgilerini saklamaktadır. Her bir tur sonrasında k karıncası tarafından kullanılan bu bağlantılara Eşitlik 3' de hesaplanan $\Delta \tau^k$ kadar feromon ilave edilmektedir. Bu işlem baz istasyonundan kaynağa onay mesajı iletilirken gerçekleştirilmekte ve yol boyunca bütün bağlantılar için aynı olmaktadır. Bağlantılarda zamanla artan feromon miktarları sürekli bir pozitif geri beslemeye neden olmaktadır. Sisteme kontrollü bir negatif geri beslemenin ilave edilmesi amacıyla Eşitlik 5 kullanılarak yollardaki feromon maddesinin buharlaşması sağlanmaktadır. Eşitlikte buharlaşma miktarını kontrol etmek amacıyla $\rho \in (0, 1)$ parametresi kullanılmaktadır[14].

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ij}(t) \quad (5)$$

EARACO algoritmasının kullandığı parametrelerden, e_r (enerji durumları) ve τ (feromon iz değerleri) algılayıcı eleman hafızalarında tutulmakta, J_w^k (yol uzunluğu) ve karınca ajanını tanımlayan indis değeri S_N (sıra numarası) olarak iletim halinde olan veri paketi üzerinde bulunmaktadır. Performans sonuçlarının alınması için yapılan simülasyonlarda, α , β ve ρ parametreleri için Dorigo tarafından önerilen 1, 5 ve 0.5 değerleri kullanılmıştır[14].

4. Simülasyon Sonuçları

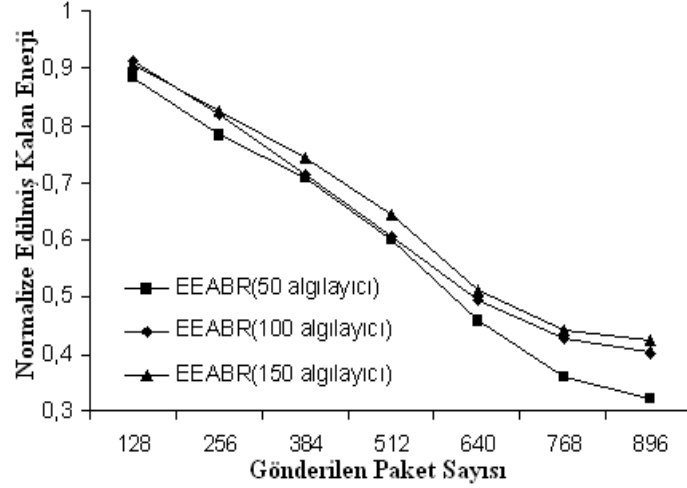
Bu bölümde EARACO algoritmasının performans sonuçları çeşitli KAA yapıları üzerinde test edilmiş ve EEABR algoritmasının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Performans sonuçlarının alınmasında MATLAB ortamında ayrık tabanlı ve paralel yapıda çalışan bir simülasyon programı geliştirilmiştir. OSI ağ katmanı protokolleri olan EARACO ve EEABR yönlendirme algoritmalarının performans analizinde aynı alt katman (fiziksel ve veri bağlantı) parametre değerleri kullanılmıştır. Parametre değerleri MICAz donanımına[15] aittir ve Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. MICAz Modül Parametre Değerleri

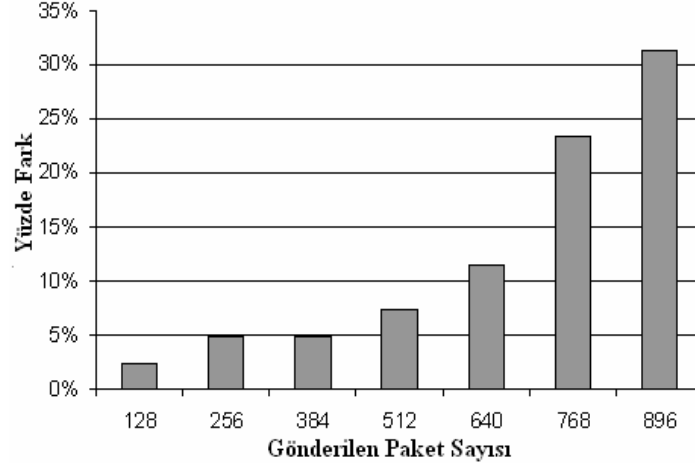
Parametre Adı	Değeri
Frekans	2.4GHz
Veri İletim	250 Kbps
RF Gücü	-10 dBm
Alıcı Hassasiyeti	-94 dBm
İletim Modunda Akım Çekimi	11mA
Alıcı Moda Akım Çekimi	19.7mA
Enerji Kaynağı	2 x (1250mAh, 1,5V)
Paket Büyüklüğü	1Mb

Geliştirilen simülasyon programında paket düzeyde veri transferi ve analizi yapılabilmektedir. Ayrıca ağ üzerindeki algılayıcıların enerji durumları ayrıntılı olarak alınabilmektedir. Sonuçlar farklı yoğunlukta rastgele yerleştirilmiş algılayıcılara sahip KAA' lar üzerinde alınmıştır. 200x200 m² lik alanda 50, 100 ve 150 adet algılayıcının oluşturduğu KAA yapılarında EARACO ve EEABR algoritmaları ayrı ayrı koşturulmuş ve sonuçlar

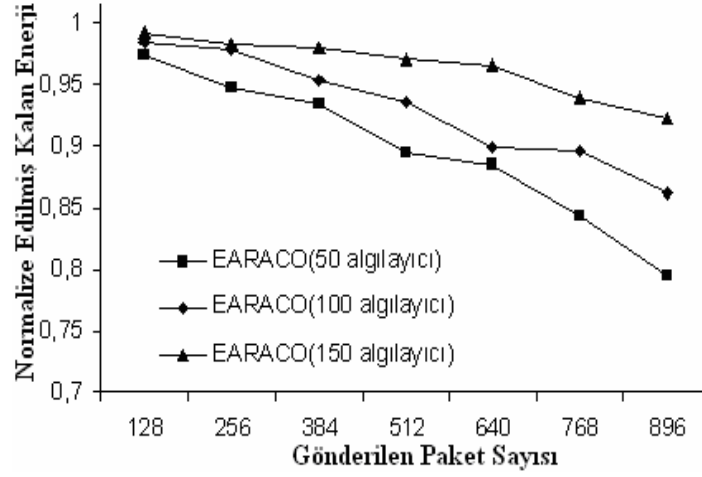
grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil 4, EEABR algoritmasının farklı sayılarda algılayıcılar içeren KAA yapıları için veri transferinden sonra ağıın sahip olduğu ortalama enerjiyi göstermektedir. Şekil üzerinde görüleceği üzere EEABR algoritması ile az yoğunluklu(birim sayıda az sayıda algılayıcı içeren) KAA' larda enerji tüketimi daha hızlı olmaktadır. Şekil 5' de az yoğunluklu (200x200 m²' de 50 algılayıcı) KAA ile daha fazla yoğun (200x200m²' de 150 algılayıcı) olan KAA arasında, kalan enerji durumlarının yüzde olarak farkları yer almaktadır. Şekilden, gönderilen paket sayısı arttıkça aradaki farkın üstel olarak arttığı görülmektedir. Şekil 4 ve 5' de EEABR için sonuçları verilen bu simülasyon koşullarının aynı şartlar dahilinde EARACO algoritması için alınan sonuçları Şekil 6 ve 7' de verilmiştir. Şekiller üzerinden görüleceği üzere EARACO algoritması EEABR algoritmasına göre daha fazla enerji tasarrufunda bulunmaktadır. Bu iki algoritmanın farklı ağlarda enerji kullanımını gösteren karşılaştırmalı grafik Şekil 8' de yer almaktadır.



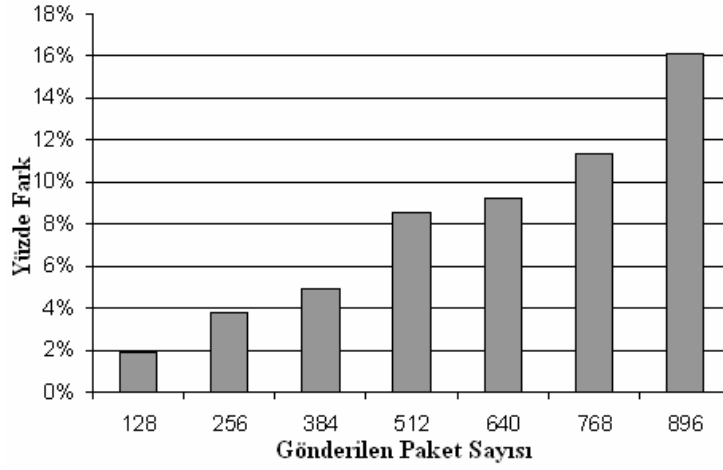
Şekil 4. Farklı Algılayıcı Ağlar için İletim Sonrası Ağda Kalan Ortalama Enerji Seviyeleri.



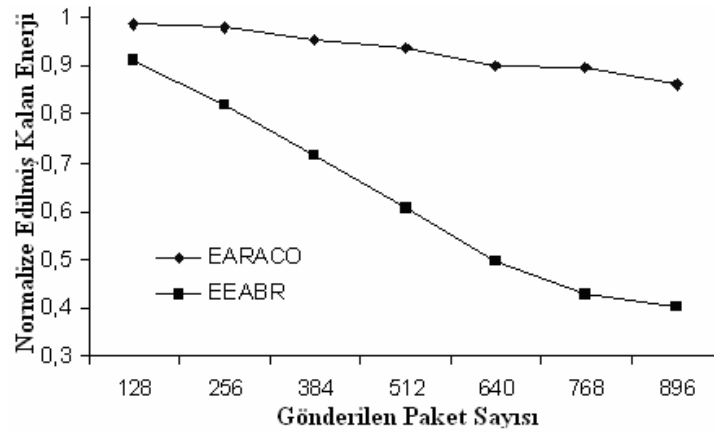
Şekil 5. EEABR Algoritması kullanan Farklı Yoğunluktaki KAA' ların İletim Sonrası Kalan Ortalama Enerji Seviyelerinin Farkları.



Şekil 6. Farklı Algılayıcı Ağlar için İletim Sonrası Ağda Kalan Ortalama Enerji Seviyeleri.



Şekil 7. EARACO Algoritması kullanan Farklı Yoğunluktaki KAA' ların İletim Sonrası Kalan Ortalama Enerji Seviyelerinin Farkları.



Şekil 8. EEABR ve EARACO Yönlendirme Algoritmaları İçin İletim Sonrası Kalan Ortalama Enerji Seviyeleri.

5. Sonuç

Birçok alanda uygulama imkanına sahip olan kablosuz algılayıcı ağlar üzerinde enerji tasarruflu etkin yönlendirme algoritmalarının çözümü, bu türdeki ağ yapılarının daha uzun ömürlü olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır. Klasik bilişim ağ haberleşmesinde güzel alternatif çözümler sunan karınca optimizasyonunu baz alan yönlendirme tekniklerinin, KAA' lar üzerinde uygulanması etkili sonuçlar vermektedir. Bildiride, KAA' lara özgü nitelikleri (sınırlı enerji kaynağı, düşük haberleşme bandı) dikkate alan karınca koloni optimizasyonu kullanan yeni bir strateji olan EARACO algoritmasının yapısı açıklanmış, performans sonuçları alınmış ve bilinen bir başka karınca koloni optimizasyonu tabanlı algoritma olan EEABR ile karşılaştırılmaları yapılmıştır. Farklı türlerde KAA' lar için yapılan simülasyonlardan, EARACO' nun, ağ ömrünü artıracak şekilde performanslı sonuçlar ürettiği görülmektedir.

6. Kaynakça

- [1] Al-Karaki, J.N.; Kamal, "A.E. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey". *Wireless Communications, IEEE*, 2004; Volume 11, pp. 6-28
- [2] Mohammad, I.; Imad, M. "Handbook of Sensor Networks"; CRC Press: London, 2005; pp.117-140.
- [3] Okdem, S.; Karaboga, D. "Routing in Wireless Sensor Networks Using an Ant Colony Optimization (ACO) Router Chip", *Sensors* 2009, 9, 909-921.
- [4] Camilo, T.; Carreto, C.; Silva, J.; Boavida, F.; "An Energy-Efficient Ant Base Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks". *ANTS 2006 - Fifth International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Springer – LCNS series*, 2006; Volume 4150, pp. 49 – 59.
- [5] Sun, J.-Z. "Mobile Ad Hoc Networking: An Essential Technology for Pervasive Computing". In *International Conference on Info-Tech and Info-Net*, 2001; pp. 316–321.
- [6] Al-Karaki, J.N.; Kamal, A.E. "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey". *Wireless Communications, IEEE*, 2004; Volume 11, pp. 6-28.
- [7] Intanagonwiwat, C.; Govindan R.; Estrin, D. "Directed Diffusion: a Salable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks". *Mobile Computing and Networking*, 2000; pp. 56-67.
- [8] White, T.; Pagurek, B. "Toward Multi-Swarm Problem Solving in Networks". *3rd Int. Conf. Multi-Agent Syst.*, 1998; pp. 333– 340.
- [9] Liu, Z.; Kwiatkowska, M.Z; Constantinou, C. "A Biologically Inspired QOS Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks". *Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl.*, 2005; pp. 426–431.
- [10] Schoonderwoerd, R.; Holland, O.; Bruten, J.; Rothkrantz, L. "Ant-based Load Balancing in Telecommunications Networks". *Adapt. Behavior*, 1996; Volume 5(2), pp. 169–207.
- [11] Niannian D.; Liu, P.X.; Chao H. "Data Gathering Communication in Wireless Sensor Networks Using Ant Colony Optimization". *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2005; pp. 697–702.
- [12] Singh, G., Das, S. Gosavi, S., Pujar, S.; "Ant Colony Algorithms for Steiner Trees: An Application to Routing in Sensor Networks". *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, Eds., Idea Group Publishing, 2004; pp. 181-206.
- [13] Zhang, Y.; Kuhn, L.; Fromherz, M.; "Improvements on Ant Routing for Sensor Networks". In: *Ants 2004, Int. Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*, 2004; pp. 154-165.
- [14] Dorigo, M.; "Optimization, Learning and Natural Algorithms". Ph.D. thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- [15] Crossbow Technology, Inc. "MICAz module datasheet", http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAz_Datasheet.pdf, 2009.