

Telsiz Duyurga Ağları

1. Giriş

Mikro elektro-mekanik sistem (MEMS), telsiz iletişim ve sayısal elektronik teknolojilerinde son yıllarda gerçekleşen gelişmeler düşük maliyetli, güç ihtiyacı az olan, çok fonksiyonlu duyurgaların üretilmesine olanak sağlamıştır. Genellikle bir kibrit kutusu büyüklüğünde, bazı uygulamalarda bir cm^3 ve daha küçük olabilen bu duyurgalar kısa mesafelerde telsiz ortam üzerinden birbirleri ile haberleşebilmektedirler. Algılama, haberleşme ve işlem güçlerine sahip küçük duyurgalar binlerce duyurganın birbiri ile işbirliği yaparak bir nesne veya olayı algılanmalarına dayanan telsiz duyurga ağları fikrinin oluşturulmasını sağlamıştır. Telsiz duyurga ağları aşağıdaki iki yaklaşımdan birisine göre kullanılan geleneksel duyurgalar ile karşılaştırıldığında bir çok ilave yetenek kazandırmaktadırlar [15]:

- Geleneksel duyurgalar algılanacak nesne veya olaydan uzakta konuşlandırılabilirler. Bu yaklaşım, hedeflerden gelen işaretlerin diğer nesne, olay ve her türlü elektronik gürültü kaynağından ayırt edilebilmesini sağlayacak karmaşık yöntem ve teknolojilere ihtiyaç duyan büyük hacimli duyurgaları gerektirmektedir. Sahil gözetleme radarları ve hava radarları bu sınıfa girmektedir.
- Sadece algılama yapan ve algılama sonuçlarını işlem merkezlerine gönderen kısıtlı sayıdaki geleneksel duyurgalar hedef nesne veya bölgenin yakınına veya içine yerleştirilirler. Bu durumda duyurgaların yerlerinin ve duyurgalardan gelen bilgileri merkezi sisteme taşıyacak iletişim ağının önceden dikkatlice planlanması gerekmektedir. Sismik duyurga ağları bu sınıfa giren bir duyurga uygulamasıdır.

Telsiz duyurga ağları konsepti ise çok sayıda duyurganın hedef bölgenin içine veya yakınına bırakılmasına dayanmaktadır. Duyurga sayıları bazı uygulamalarda milyonlar ile ifade edilmektedir. Duyurga yoğunlukları ise bazen bir metre küpde 20 duyurga gibi rakamlara ulaşabilmektedir. Duyurga ağları, her bir duyurganın yeri planlanmadan ve süratle hedef bölgeye konuşlandırılabilir. Bu, duyurga ağlarının askeri hareketlerde, doğal felaketler sonrasında ve erişilmez arazide saçılarak konuşlandırılmalarına olanak sağlamaktadır. Böyle bir yetenek, duyurga ağlarının kendi kendilerini organize edecek teknolojilere sahip olmasına dayanmaktadır. Duyurga ağlarının diğer önemli bir özelliği birbirleri ile yardımlaşarak çalışmalarıdır.

Duyurga ağlarındaki duyurgalar bir işlemciye sahiptirler. Bunun sayesinde ham veriyi merkezi sistemlere göndermek yerine çevrelerindeki diğer duyurgalar ile haberleşerek işler ve kısmen işlenmiş bilgiyi geriye iletirler. Böylece birleştirme (algılama verilerinin diğer kaynaklardan alınan verilerle de birleştirilerek anlamlı bilgilere dönüştürülmesi) işlemine daha veri kullanıcılar ile etkileşen sistemlere iletilirken başlanmaktadır. Bu yetenekler duyurga ağlarının askeri, sağlık, çevre ve ticari gibi birçok uygulama alanı bulmasını sağlamaktadır. Örneğin bir hastanın fizyolojik durumu doktoru tarafından uzaktan takip edilebilir. Bu uygulama hastanın rahat etmesine ve doktorun hastasının o anki durumunu etkinlikle kontrol etmesine imkan sağlar. Duyurga ağları havadaki ve sudaki yabancı kimyasal maddeleri tespit etmek için de kullanılabilir. Kirlenmeye sebep olan maddenin cinsini, yoğunluğunu ve yerini tespit edebilirler. Sonuç olarak, duyurga ağları kullanıcılarını çevrelerini daha iyi anlamalarını ve gözlemlerini sağlayacak bilgi ile donatırlar. Duyurga ağları konsepti sadece algılama amacıyla kullanılmayabilir. Çok sayıda küçük donanım ve yazılımın birbiri ile etkileşerek ve yardımlaşarak çalışmasını gerektirecek her türlü uygulamada telsiz duyurga ağları için geliştirilen teknolojilerin kullanılması mümkündür. Gelecekte duyurga ağları teknolojilerinin hayatımızın

bütünleşik bir parçası olacaklarına ve bir çok yerde farkına varmadan bu ağların parçası olan birimleri kullanacağımıza inanılmaktadır.

Duyurga ağlarının tam olarak kullanılmaya başlanılabilmesi için yeni, güç ihtiyacı düşük olan telsiz iletişim teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Mevcut altyapısız telsiz bilgisayar ağı teknolojileri [20] şu sebeplerden dolayı duyurga ağlarının ihtiyaçlarını karşılayamamaktadır:

- Duyurga ağlarındaki duyurga sayısı büyük bir telsiz bilgisayar ağındaki bilgisayarlardan yüzlerce misli daha fazla olabilmektedir.
- Duyurga ağları çok yoğun olarak konuşlandırılmaktadır. Normal koşullarda duyurgalar arasındaki mesafe birkaç metre ile sınırlıdır.
- Duyurga ağlarındaki duyurgalar bilgisayarlar veya diğer telsiz haberleşme donanımı ile karşılaştırıldığında çalıştıkları ortamlar ve güç tüketimi sebebi ile çok daha yüksek oranda arıza yapabilmektedir.
- Duyurga ağlarındaki haberleşme hatları çok daha sık değişebilmektedir.
- Duyurga ağlarındaki duyurgalar daha kısıtlı işlemci gücü, enerji ve belleğe sahiptir.
- Duyurga ağlarındaki duyurgaların ayrı kimlikleri (adresleri) yoktur.

Telsiz duyurga ağlarındaki en önemli tasarım kısıtlarının başında güç tüketiminin düşük olması zorunluluğu gelir. Duyurgalar genellikle değiştirilemeyen ve sınırlı kapasiteleri olan pillerde depolanan enerjiden yararlanarak çalışırlar. Bu nedenle sıradan bilgisayar ağlarında hizmet kalitesi parametreleri daha önemli iken, duyurga ağlarında öncelikle duyurga ağının ömrünü uzatacak düşük güç tüketimi olan tekniklerin geliştirilmesi üzerinde durulur.

Çok sayıda bilim adamı bu koşullara uygun iletişim teknolojilerinin geliştirilmesi için çalışmaktadır. Bu bölümde duyurga ağları için geliştirilmiş olan protokoller ve algoritmalar üzerinde duracağız. Duyurga ağları uygulamalarını, duyurga ağı ile ilgili teknolojilerin geliştirilmesine etki eden faktörleri ve şimdiye kadar değişik katmanlar için yapılmış önerileri inceleyeceğiz.

2. Duyurga Ağlarının Uygulama Alanları

Duyurga ağları, sismik, düşük örnekleme hızlı manyetik, termal, görsel, infrared, akustik ve radar gibi çok değişik tipte duyurgalardan oluşabilmektedir. Bu duyurgalar, gözlenen nesne ve olayla ilgili, aşağıdakilere benzer özelliklere yönelik algılamalar yapabilecektir [11]:

- Isı,
- Nem,
- Araç hareketi,
- Işık durumu,
- Basınç,
- Ses seviyesi,
- Toprak ve sıvı özellikleri,
- Nesnelerin mevcudiyetleri,
- Nesnelere üzerindeki gerilimler,
- Nesnelerin hız, istikamet ve hacim gibi özellikleri.

Duyurgalar sürekli algılama, olay tespiti, olay teşhisi, yer algılaması ve tetikleyicilerin (bir donanımı çalıştıran araç) kontrolü gibi maksatlarla kullanılabilirler. Mikro algılama ve duyurgaların telsiz ortamlar üzerinden haberleşmesi konsepti bir çok yeni uygulama alanı doğurmaktadır. Bunlara örnek olarak askeri, çevre, ev, ticari, uzay, kimyasal işlem ve doğal felaket gibi uygulama alanları verilebilir. Bu uygulama alanları ile ilgili detaylı bilgiler ve örnekler [1]'de bulunabilir.

3. Duyurga Ağı Teknolojilerinin Tasarımına Etki Eden Faktörler

Duyurga ağı teknolojilerinin tasarımları hatalara duyarlılığın az olması, ölçeklenebilirlik, üretim maliyeti, çalışma ortamı, duyurga ağı topolojileri, donanım kısıtları, aktarım ortamı, güç tüketimi gibi çok sayıda faktörden etkilenmektedir. Bu faktörler iletişim kuralları ve algoritmalar geliştirilirken dikkate alınmaları gerektiği için önemlidir.

3.1. Hatalara Duyarlılık

Duyurgalar çalıştıkları ortamın sertliği sebebiyle alabilecekleri fiziksel hasarlar ve güç kaynaklarının tükenmesi gibi nedenler ile çok sık kullanım dışı kalabilirler. Duyurgaların kullanım dışı kalması duyurga ağının görevini sürdürmesine engel olmamalıdır. Hatalara duyarlılığı az olan duyurga ağları çok sayıda duyurganın çeşitli sebepler ile arıza yapmasına rağmen kalan duyurgalarının yeteneklerinden kesintisiz olarak yararlanılabilmesine olanak sağlar [30], [19], [14]. Duyurga ağlarındaki duyurgaların güvenilirliği genellikle Poisson dağılıma dayanan aşağıdaki denklem ile modellenmektedir [14]:

$$R_k(t) = e^{-\lambda_k t} \quad (1)$$

Bu denklemde λ_k , k numaralı duyurganın hata yapma oranını, t ise duyurganın hata yapma olasılığının test edildiği zaman aralığını göstermektedir.

İletişim kuralları ve algoritmalar çeşitli hataya duyarlılık seviyelerine göre tasarlanabilirler. Eğer tasarlanan duyurga ağının çalışacağı ortam daha az sert ise ve bundan dolayı duyurgaların kullanım dışına çıkma süreleri daha uzunsa, hataya duyarlılığı daha fazla olan teknikler kullanılabilir. Örneğin ev ortamında sıcaklık ve nem ölçme gibi maksatlar ile kullanılacak bir duyurga ağı, savaş alanında kullanılacak bir duyurga ağından daha fazla hataya duyarlı olabilir. Bu nedenle ihtiyaç duyulan yazılım ve donanımların karmaşıklığı kullanım alanına göre değişebilir.

3.2. Ölçeklenebilirlik

Bir duyurga ağında kullanılan duyurga sayısı yüzler ve binler ile ifade edilebilir. Bazı uç örneklerde duyurga sayıları milyonlara ulaşabilir. Geliştirilen duyurga ağı algoritmaları yüksek sayıda duyurganın kullanılmasına uygun olmalıdır. Diğer önemli bir konu da bir duyurga alanındaki duyurgaların yoğunluğudur. Duyurga yoğunlukları 20 duyurga/m³ 'e kadar ulaşabilir. Duyurgalar genellikle aynı bölgede algılama yapan birden fazla duyurga bulunacak şekilde dağıtılırlar. Bu nedenle duyurga yoğunluğunun aşağıdaki gibi bir duyurganın iletişim mesafesinde olan ortalama duyurga sayısı ile verilmesi uygun olmaktadır [3]:

$$\mu(r) = \frac{n\pi r^2}{A} \quad (2)$$

Bu denklemde n , A büyüklüğündeki bir alanda bulunan ortalama duyurga sayısını, r ise duyurgaların iletişim mesafesini göstermektedir.

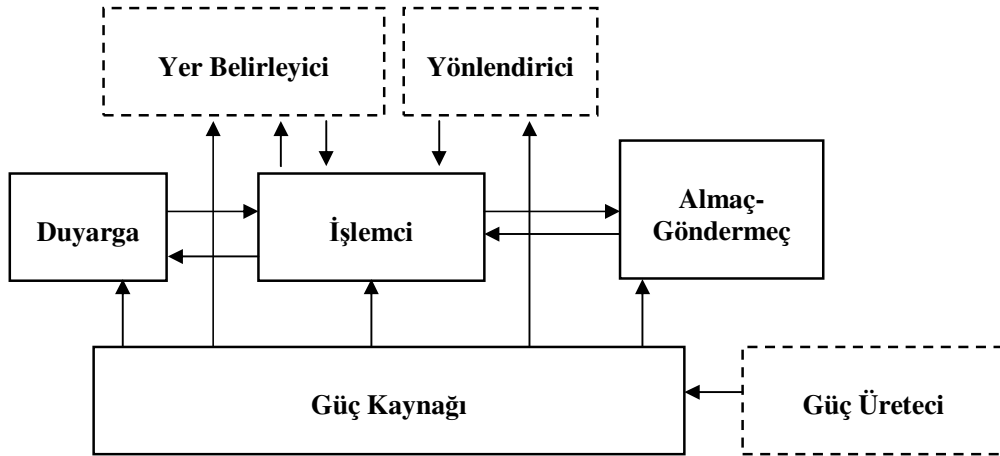
Duyurga yoğunlukları uygulamaya göre değişiklik göstermektedir. Bir evde bir iki düzine duyurga bulunabileceği gibi [22], mobilyanın ve diğer ev eşyalarının içerisine de duyurgaların yerleştirilmesi halinde bu rakamın yüzlerle ifade edilmesi mümkündür. Bir bölgede yaşayan canlıların doğal

ortamlarında takip edilmesi için 25-100 duyurga yeterli olabilecektir [6]. Kişilerin üzerlerinde birkaç tane duyurga taşımaları durumunda ise bir futbol stadyumunda bulunan duyurga sayısı yüz bin gibi rakamlara ulaşabilecektir.

3.3. Üretim Maliyeti

Duyurga ağlarındaki duyurga sayıları çok yüksek olacağı için, duyurgaların maliyeti düşük olmalıdır. Bir çok uygulama için duyurga maliyetlerinin 1 Amerikan Dolarının altında tutulması gerekmektedir [24]. Çok ucuz olduğu kabul edilen ve algılama yapması da beklenmeyen Bluetooth birimlerinin maliyeti bile hedeflenen bu rakamın yaklaşık on katıdır [25]. Duyurga birimlerinin algılama yapmaları, diğer birimlerden alınan verilerden de yararlanarak kendi algılama sonuçlarını işlemeleri ve hatta bazı durumlarda küresel konumlandırma sistemlerine (GPS) sahip olmaları gerektiği düşünüldüğünde hedeflenen maliyetin oldukça iddialı bir rakam olduğu görülebilir.

3.4. Donanım Kısıtları



Şekil 1. Bir duyurga biriminin parçaları.

Bir duyurga birimi Şekil 1 de gösterildiği gibi dört temel parçadan oluşur: algılama birimi, işlemci, almaç-göndermeç ve pil. Bunun dışında uygulamaya bağlı olarak yer konumlandırma sistemi, güç üretici ve yönlendirici gibi bazı ilave parçalara da sahip olabilirler. Bir duyurga birimine birden fazla duyurga takılabilir. Örneğin aynı duyurga birimi hem ısı hem de nem ölçebilir. İşlemci aynı zamanda küçük bir hafızaya sahip olup, duyurga biriminin diğer duyurga birimleri ile işbirliği yapmasını sağlayacak algoritmaları çalıştırır. Almaç göndermeç duyurga birimini ağa bağlar. Güç üretici hareket, ısı ve güneş ışığı gibi çevre koşullarından faydalanarak enerji üretir. Yer belirleyici duyurga biriminin coğrafik konumunun bulunmasını sağlar. Yönlendirici ise duyurga biriminin ihtiyaç duyulması halinde kısa mesafelerde bir yerden bir yere taşınması veya bir istikamete yönlendirilmesi için kullanılır.

Bütün bu parçaların normal koşullarda bir kibrit kutusu büyüklüğündeki hacme sığdırılması gerekmektedir [15]. Bazı uygulamalarda duyurga birimlerinin 1 cm³ e sığacak kadar küçük ve havada uçacak kadar hafif olması bile gerekmektedir [23]. Bunun dışında duyurga birimi donanımlarına ait başka önemli kısıtlar da vardır [16]:

- Güç tüketimleri çok düşük olmalıdır.
- Çok yüksek yoğunlukta ve sert ortamlarda çalışmaları gerekmektedir.
- Çok düşük maliyetlerde üretilebilmeli ve kullanıldıktan sonra atılabilmelidirler.

- Kendi başlarına çalışabilmelidirler.
- Buldukları çevre koşullarına uyum sağlayabilmelidirler.

Duyurga birimleri genellikle ulaşılamayan yerlerde ve büyük sayılarda konuşlandırıldıkları için çalışırken pillerinin değiştirilmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle yaşam süreleri üzerlerinde bulunan pil ile sınırlı kalmaktadır. Pillerin boyutları da duyurga birimlerinin boyutları nedeni ile çok küçüktür. Örneğin bir Smart Dust duyurga biriminde [23] bulunabilecek toplam enerji 1 Joule ile sınırlıdır. WINS birimleri için [33] toplam ortalama anlık güç tüketimi 30 μ A den fazla olmamalıdır. WINS birimleri 2,5 cm çapında 1 cm kalınlığında piller ile beslenmektedir.

Almaç göndermeçler Smart Dust uygulamasındaki gibi pasif veya aktif optik almaç göndermeçler olabileceği gibi radyo frekansını da kullanabilirler. Radyo frekansı modülasyon, filtreleme, demodülasyon ve çoklama gibi işlemlerin gerçekleşmesini gerektirmektedir. Duyurga ağlarında antenlerin yere çok yakın olması nedeni ile güç kayıpları kısa mesafelerde bile yüksek olmaktadır. Buna rağmen bir çok uygulamada radyo frekansı tercih edilmektedir. Çünkü duyurga ağlarında genellikle çok düşük veri aktarım hızları yeterli olmaktadır ve kısa aktarım mesafeleri nedeni ile aynı frekans kısa mesafelerde tekrar kullanılabilir.

Her geçen gün daha küçük hacimlere sığdırılabilen işlem güçlerinin artmasına rağmen, duyurga birimlerinde işlem gücü ve bellek hala çok sınırlı bir kaynaklardır. Örneğin Smart Dust için kullanılan prototip duyurga birimlerinde 8 KB flash belleğe, 512 KB ana belleğe ve 512 byte EEPROM anabelleğe sahip 4 MHz ATMEL AVR 8535 işlemci [21] kullanılmaktadır. Bu işlemci üzerinde 3500 byte işletim sistemi, 4500 byte uygulama kodu alanına sahip TinyOS işletim sistemi kullanılmaktadır. Diğer bir prototip duyurga birimi olan μ AMPS 59-206 MHz SA-1110 mikroişlemciye sahiptir [31]. μ AMPS üzerinde μ OS işletim sistemi kullanılmaktadır.

Bir çok algılama görevi algılama yapılan yerin coğrafik konumunun da bilinmesini gerektirmektedir. Duyurga birimleri çoğu uygulamada saçılarak konuşlandırıldıkları için bir yer bulma sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla beraber bir çok yol atama algoritmasında da yer bilgisi kullanılmaktadır. Bu nedenle GPS tabanlı veya başka tekniklere [28] dayanan yer konumlandırma sistemleri duyurga birimlerinde bulunmaktadır.

3.5. Duyurga Ağı Topolojisi

Yüksek sayılardaki duyurga biriminin yoğun olarak konuşlandırılması nedeniyle duyurga ağlarında topoloji bakımı güç bir görevdir. Bu bölümde topoloji değişiklikleri ve bakımı konusunu üç ana başlık altında inceleyeceğiz:

3.5.1. Duyurga Ağının Konuşlandırılması ve Konuşlandırılmadan Önceki Dönem

Duyurga ağları toplu olarak bir bölgeye saçılabilirler gibi, tek tek elle de yerleştirilebilirler. Duyurga ağlarının konuşlandırılması için aşağıdaki tekniklerden birisi kullanılabilir:

- Hava araçlarından atılabilirler,
- Topçu mermileri, roketler ve füzeler ile hedef bölgeye gönderilebilirler,
- Bir katapult ile atılabilirler,
- Bir fabrikada tek tek yerleştirilebilirler,
- Bir robot veya insan tarafında hedef bölgede tek tek yerleştirilebilirler.

Çok yüksek sayılarda ve saçılarak konuşlandırılmaları nedeniyle duyurga birimlerinin yerlerinin dikkatlice planlanmaları mümkün olmamakla beraber, ilk konuşlandırma aşğıdaki koşulları sağlamalıdır:

- Düşük kurulum maliyetleri,
- Ön planlama veya organizasyon ihtiyacının olmaması,
- Esneklik,
- Kendi kendine organize olabilme ve düşük hata duyarlılığı.

3.5.2. Duyarga Ağının Konuşlandırılmasından Sonraki Dönem

Duyarga ağının konuşlandırılmasından sonra aşağıdaki nedenler ile duyarga ağının topoloji değişebilir:

- Duyarga birimlerinin yerlerinin değişmesi,
- Duyarga birimlerine karıştırma, gürültü ve duyarga alanında dolaşan nesnelere nedeniyle geçici sürelerle ulaşamaması,
- Duyarga birimlerinin arıza yapması,
- Duyarga görevleri ile ilgili detayların değişmesi.

Duyarga birimlerinin yerlerinin sabit olması durumunda bile duyarga ağının topolojisi duyarga birimlerinin enerji tükenmesi gibi nedenler ile ölmesinden dolayı değişebilir. Aynı zamanda gezgin birimlerden oluşan duyarga ağı uygulamaları da mevcuttur. Görev dinamikleri değişebildiği gibi, özellikle askeri uygulamalarda karıştırma gibi düşmanca saldırılardan da etkilenilebilir. Bütün bunlar duyarga ağı topolojilerinin çok sık değişmesine sebep olabilir.

3.5.3. İlave Duyarga Birimlerinin Konuşlandırılması Dönemi

Görev dinamiklerinin değişmesi ve arıza yapan birimlerin değiştirilmesi gibi sebepler ile sonradan yeni birimlerin duyarga ağına eklenmesi mümkündür. Binlerce birimden oluşan, çok yüksek güç kısıtları olan altyapısız bir telsiz ağda bu sıklıktaki topoloji değişikliklerine rağmen etkin yol atama yapılabilmesi dikkatlice tasarlanmış algoritmaları gerektirir.

3.6. Çevre Koşulları

Duyarga ağları gözlemlenecek olayın doğrudan içine ve yakınına atıldıkları için aşağıda örnekleri verilen ortamlarda dışarıdan müdahale edilmeden çalışmak zorunda kalabilirler:

- Yoğun yol kavşaklarında,
- Büyük bir makinanın içinde,
- Bir okyanusun dibinde,
- Bir fırtınanın içinde,
- Bir fırtına esnasında deniz yüzeyinde,
- Biyolojik veya kimyasal olarak kirletilmiş bölgelerde,
- Bir savaş alanında düşman hatlarının gerisinde,
- Bir binada,
- Bir depoda,
- Bir canlının üzerinde,
- Hızla hareket eden bir aracın üzerinde,
- Bir nehirde.

Bu liste duyarga ağlarının ne kadar sert ortamlarda çalışacağını göstermektedir.

3.7. Aktarım Ortamı

Telsiz duyurga ağlarında genellikle radyo frekansının kullanılması tercih edilmektedir. En fazla tercih edilen frekans bandlarının lisans gerektirmemesi sebebi ile Endüstriyel Bilimsel Tıbbi (ISM) bandlar olması beklenmektedir. ISM uygulamaları için ayrılmış olan bandlar aşağıdadır:

- 6765-6795 kHz,
- 13553-13567 kHz,
- 26957-27283 kHz,
- 40.66-40.70 MHz,
- 433.05-434.79 MHz,
- 902-928 MHz,
- 2400-2500 MHz,
- 5725-5875 MHz,
- 24-24.25 GHz,
- 61-61.5 GHz,
- 122-123 GHz,
- 244-246 GHz,

3.8. Güç Tüketimi

Duyurga birimlerinin küçük bir pil ile beslenmesi ve bir çok uygulamada bu pillerin değiştirilmesinin mümkün olmaması sebebi ile duyurga ağları için dikkatli bir güç yönetimi önemlidir. Bu nedenle her katmanda yapılan araştırmalarda gücün dikkatli kullanılması en önemli başarımların ölçütü olarak dikkate alınmaktadır. Bir duyurga biriminin görevleri algılama yapmak, algılanan veriyi işlemek ve diğer duyurga birimleri ile haberleşmektir. Bu nedenle güç tüketimini üç başlık altında inceleyebiliriz: algılama, işlem ve iletişim.

Algılama için harcanan güç kullanılan duyurgaya göre değişiklik göstermektedir. Algılamanın sürekli veya zaman aralıkları ile yapılması da güç tüketiminde önemli rol oynar. Son olarak ortamdaki gürültü algılama işlemini karmaşıklaştıracağı için güç tüketiminde artışa sebep olur. İletişim ve işlemci için ihtiyaç duyulan güç konusu aşağıda incelenmiştir:

3.8.1. İletişim Maksatlı Güç Tüketimi

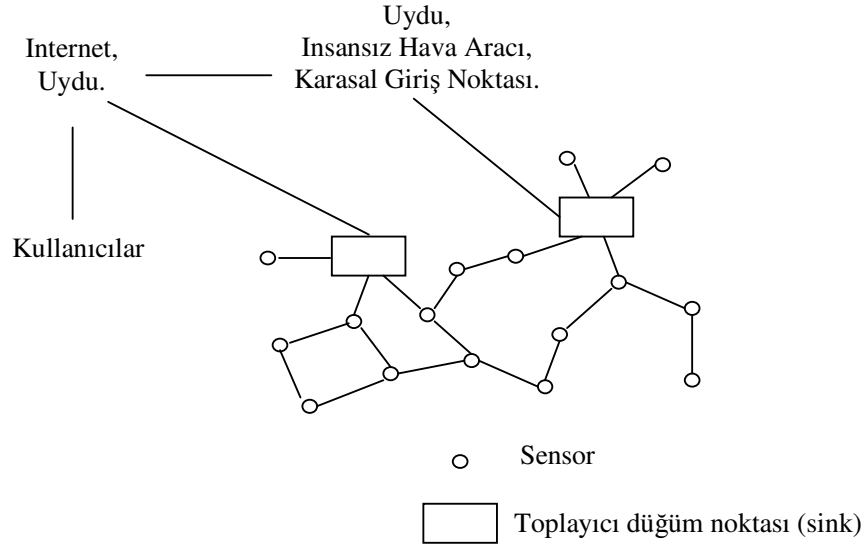
Duyurga ağlarında veri aktarımının kısa mesafelerde yapılması nedeniyle alma için harcanan güç ile gönderme için harcanan güç hemen hemen birbirine eşittir. Bu nedenle ortamı dinlemek için harcanan güç bile duyurga ağlarında önem kazanmaktadır. Diğer önemli bir faktör bir çok uygulamada duyurga birimlerinin yere yakın olması sebebi ile işaret gücünün kısa mesafelerde yüksek oranlarda kaybolması ve güç kaybı ile mesafe arasındaki ilişkinin mesafenin (m) dördüncü kuvveti ile (m^4) orantılı olmasıdır. Bu nedenle çok atlamalı fakat atlama mesafelerinin daha kısa olduğu yollarda güç tüketimi daha az olmaktadır. Örneğin 1 metrelik 10 atlama yapan bir yoldaki güç tüketimi 2 metrelik 5 atlama yapan bir yoldan çok daha düşük olabilir.

3.8.2. İşlem Maksatlı Güç Tüketimi

İşlem maksatlı güç tüketimi iletişim maksatlı güç tüketimi ile karşılaştırıldığında çok daha düşük olabilmektedir. Rayleigh bayılmasının geçerli olduğu ve güç kaybının m^4 ile orantılı olduğu bir ortamda 1 kilobit veriyi 100 m. mesafeye gönderme için ihtiyaç duyulan enerji ile 100 milyon işlem/saniye hızındaki bir işlemci kullanılarak yaklaşık 3 milyon işlemin yapılması mümkündür [23].

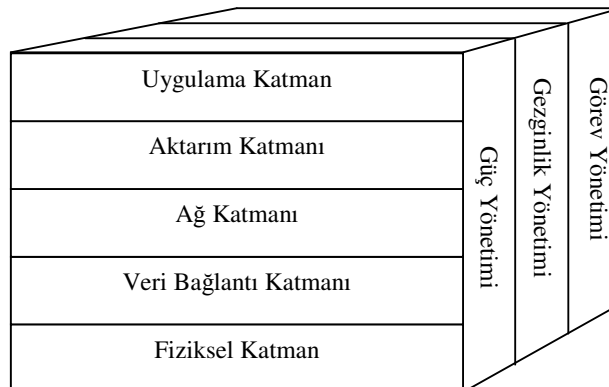
4. Telsiz Duyurga Ağı Protokolleri

Bir telsiz duyarga ağı Şekil 2’de gösterildiği gibi çok sayıda duyargadan ve bu duyargalardan gelen bilgilerin toplandığı bir düğüm noktasında oluşur. Duyurgalar topladıkları bilgileri diğer duyurgalardan de yararlanarak düğüm noktasına iletirler. Düğüm noktalarında toplanan bilgiler insansız hava araçları, uydular veya duyarga ağına yakın mesafede konumlandırılmış giriş noktaları kullanılarak geniş alan şebekelerine aktarılır. Ayrıca duyarga ağlarının birbirleri ile düğüm noktaları üzerinden etkileşmeleri mümkün olabilecektir. Gelecekte duyarga ağı kullanıcılarının Internet gibi geniş alan şebekeleri üzerinden duyarga ağlarını sorgulamaları ve yönetmeleri beklenmektedir.



Şekil 2. Duyarga ağı.

Böyle bir mimaride duyurgalar ve düğüm noktaları tarafından ihtiyaç duyulan iletişim kuralları (protokol) kümesi Şekil 3’de gösterilmiştir. Bu protokol kümesi güç ve yol atama kısıtlarına duyarlı, telsiz ortam üzerinden güç etkin olarak veri aktarımı yapabilen ve duyarga birimlerinin birbiri ile işbirliği yapmasını kolaylaştıran çeşitli katmanlardaki protokollerden oluşmaktadır. Küme uygulama, aktarım, ağ, veri bağlantısı ve fiziksel katmanlar ile güç, gezginlik ve görev yönetimi maksatları ile geliştirilmiş algoritmalar ve iletişim kurallarını içermektedir. Algılama görevlerine bağlı olarak farklı uygulama yazılımları geliştirilebilir ve uygulama katmanında kullanılabilir. Aktarım katmanı özellikle uçtan uca güvenli veri aktarımını sağlamaya çalışır. Ağ katmanı adresleme, veri kümeleme (aggregation) ve yol atama gibi konular ile görevlidir. Veri bağlantı ve fiziksel katmanlar ise duyarga ağlarına etki eden faktörleri dikkate alarak algılama verisini telsiz bir hat üzerinden bir sonraki düğüme iletecek donanım ve yazılımı sağlar.



Şekil 3. Duyarga ağları için iletişim kuralları kümesi.**4.1. Uygulama Katmanı**

Halen çok sayıda önerilmiş duyarga ağı uygulaması bulunmasına rağmen, duyarga ağı uygulama katmanı protokollerine yönelik öneri sayısı çok sınırlıdır. Biz bu bölümde geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğunu düşündüğümüz üç uygulama katmanı protokolünü anlatacağız:

4.1.1. Duyarga Yönetim Protokolü (SYP)

Sistem yöneticileri duyarga ağları ile Duyarga Yönetim Protokolünü (SYP) kullanarak etkileşecektir. Duyarga ağlarının ağ yönetimi görevlerinde yaratmış olduğu bir çok ilave problem vardır. Bunların başında duyarga düğümlerinin adreslenmesi gelir. Bölümün başında açıklandığı gibi bir çok sebeplerden dolayı duyarga ağlarında duyargalara atanmış küresel adresler yoktur. Adresleme maksadıyla genellikle aşağıdaki tekniklerden birisi kullanılır:

Özelliğe Dayalı İsimlendirme ve Veriye Yönelik Yol Atama ilk duyarga adresleme yöntemleridir. Bu teknikte istenen veri adreslenir ve veriye sahip duyargalar ilgili paketi alırlar. Örneğin “35⁰C dan daha yüksek ısı ölçen duyargalar” dendiğinde bu ölçümü yapan duyargalar ulaşmak istenenin kendileri olup olmadığını anlayabilirler.

Uzaysal Adresleme özellikle hedef takip ve yetkisiz girişi tespit etme gibi duyarga ağı uygulamalarında kullanışlı olan bir adresleme tekniğidir. Duyarganın coğrafi konumuna dayalı olan bu adresleme tekniği ayrıca uzaysal veri gruplama ve coğrafik yol atama teknikleri için de gereklidir. Birden fazla uzaysal adresleme tekniği vardır. Poligonal adresleme de bir poligonun içindeki, dışındaki veya sınırındaki duyargalar çağrılabilir. Poligonların sınırları dağıtık kenar belirleme algoritmaları [7] kullanılarak veya coğrafi koordinat serileri verilerek bildirilebilir. Sektörel tarayıcılar da [10] diğer bir bölge adresleme yöntemidir. Bu teknikte yönlendirilmiş antenler ve alınan işaret güçleri kullanılarak bölge sınırları adreslenebilir. Quadtree ve octree tabanlı adresleme [9] teknikleri de duyarga ağlarında etkin olarak kullanılabilir. Son olarak hash fonksiyonlarının kullanıldığı modulus adresleme yöntemi ile [4] uzaysal adresleme yapmak mümkündür.

Üçüncü grup adresleme tekniği ise yerel duyarga kimliklerinin kullanılmasıdır. Bu durumda kullanıcıların yaptığı sorgulamalardaki adreslerin yerel duyarga kimliklerine dönüştürülmesi gerekecektir.

SYP aşağıdaki yönetim görevlerini yerine getirecektir:

- Veri gruplama, veriye dayalı adresleme ve gruplama ile ilgili kuralların duyargalara aktarılması,
- Yer belirleme algoritmaları için gerekli olan verilerin aktarılması,
- Zaman eş uyumlaması,
- Duyargaların yerlerinin değiştirilmesi,
- Duyargaların kapatılıp açılması,
- Duyarga ağının topolojisi ve duyargaların durumlarının sorgulanması ve gerekli ilave düzenlemelerin yapılması,
- Kimlik kanıtlama, anahtar dağıtımı ve veri güvenliği.

4.1.2. Görev Atama ve Veri Tanıtma Protokolü (GAVT)

Duyarga ağlarındaki diğer önemli bir işlem kullanıcıların duyargalara ilgi duydukları verileri iletmeleridir. İlgi duyulan bir veri alanı veya bir olay olabilir. Örneğin bir kullanıcı bir bölgedeki ısı ölçümlerinin sonuçlarını belli zaman aralıkları ile okumak isteyebilir. Bu ihtiyacın ilgili duyargalara bir görev olarak iletilmesi gerekir. Ayrıca duyargaların kendilerinde mevcut veriyi de duyurmaları gerekebilir. Örneğin bir duyurga kendisinde mevcut veriyle ilgili bilgiyi duyurga ağına duyurup, ilgilenen düğümlere bu veri ile ilgili detayları iletebilir.

4.1.3. Duyarga Sorgulama ve Veri Dağıtma Protokolü

Duyargaların sorgulanması ve sorgulama sonuçlarının alınması için de bir uygulama katmanı protokolüne ihtiyaç vardır.

4.2. Aktarım Katmanı

Duyarga ağlarında bazı uygulamalarda duyargaların algıladıkları olay hakkındaki bilginin toplayıcı düğüm noktasına ulaştıklarından emin olunması gerekir. Bu nedenle uçtan uca güvenilir olay bilgisi aktarımı duyurga ağlarındaki en önemli aktarım katmanı protokolü ihtiyacıdır [27]. Bu konudaki protokollere etki eden önemli faktörler, aynı olayın çoğu kez birden fazla duyurga tarafından algılanması ve duyurga ağlarında güç tasarrufu için alındı (acknowledgement) paketlerinin üretilmesinin pek fazla tercih edilmemesidir. Duyurga ağlarında önemli olan algılanan olayın toplayıcı düğüm noktasına iletilmesi olduğu için, olay bilgisinin kimin tarafından iletildiği ile ilgilenilmesi çok önemli değildir. Olay bilgisi iletildiği sürece bazı veri paketlerinin kaybolması önemsenmeyebilir. Örneğin bir deprem duyurga ağında göçük altındaki canlıyı üç duyurga tespit etti ise, bunlardan sadece birisinin dahi bu bilgiyi başarı ile aktarabilmesi yeterli olacaktır.

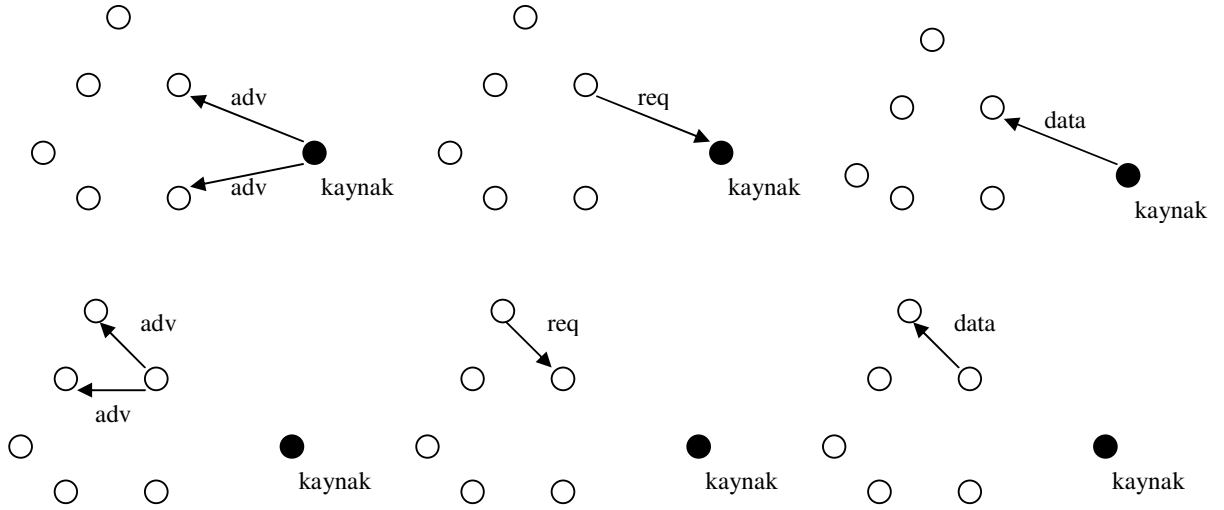
4.3. Ağ Katmanı

Duyurga ağlarında ağ katmanı için çok sayıda yeni yol atama protokol geliştirilmiştir. Bu protokolleri üç sınıfa ayırarak incelemek mümkündür: veriye yönelik (data centric) protokoller, sıra düzensel (hierarchical) protokoller ve yer bilgisine dayalı (location based) protokoller. Bunların dışında hizmet kalitesi (quality of service) ve akış (flow) tabanlı protokoller de bulunmaktadır.

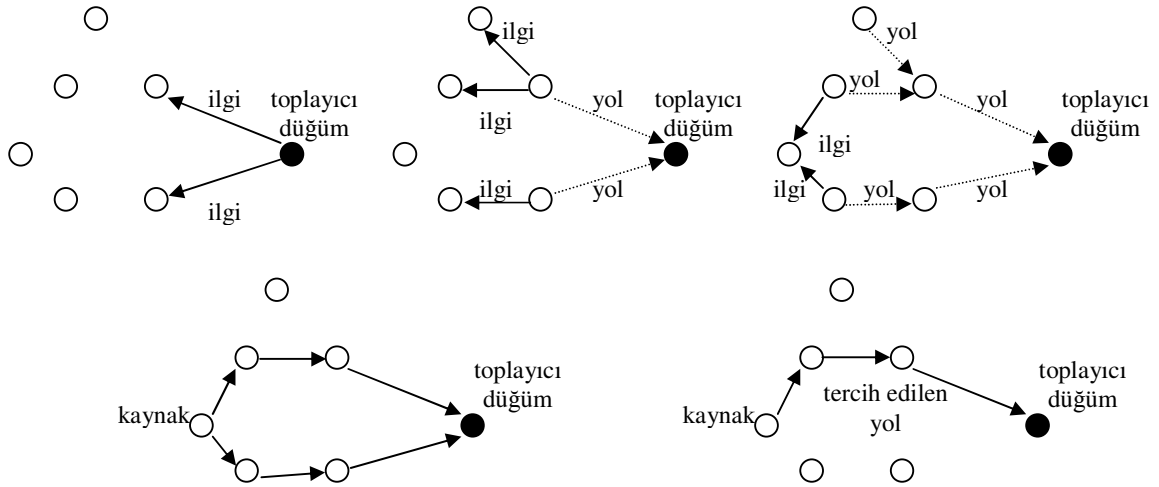
4.3.1. Veriye Yönelik Protokoller

Bu grup algoritmada toplayıcı düğüm noktası belli bölgelere sorgular gönderir ve daha sonra duyargaların bilgi göndermesini bekler. Alınan sorguya cevap olabilecek veriye sahip duyargalar sorguyu kendilerine ileten diğer duyargalardan yararlanarak ellerindeki bilgiyi toplayıcı düğüm noktasına iletirler. Bilinen ilk veriye yönelik yol atama algoritması SPIN'dir [12]. SPIN algoritmasında istenen veriye sahip olan duyargalar Şekil 4'de gösterildiği gibi bu veriyi çevrelerindeki diğer birimlere duyururlar. Bu veri ile ilgilenenler duyargadan veriyi kendilerine göndermelerini isterler ve daha sonra elde ettikleri veriyi çevrelerindeki diğer birimlere duyururlar. Böylelikle veri duyurga ağı içerisinde yayılmış olur. SPIN algoritmasının uygulanabilmesi için veri alanları konusunda duyurga ağında bir ortak yapı oluşturulmuş olması gerekir.

Directed Diffusion [15] duyurga ağları için önerilen diğer önemli bir yol atama algoritmasıdır. Bu algoritmada toplayıcı düğüm bir veri alanı hakkındaki ilgisini duyurga ağındaki bütün duyargalara yayarak (flood) duyurur. İlgi duyurga ağında yayılırken, bütün duyargalar kendilerine ilgi paketini ileten duyargaların adreslerini tutar. Bu adresler duyargalar için toplayıcı düğüm noktasına dönüş yolunu oluşturur. Gönderecek verisi olan duyargalar kendi listelerindeki adreslerden yararlanarak bu veriyi gönderirler. Toplayıcı düğüm noktasına başlangıçta veri birden fazla yol üzerinden gelebilir. Bu yollardan birisi toplayıcı düğüm noktası tarafından seçilir ve daha sonraki veri trafiği tercih edilen bu yol üzerinden aktarılmaya başlanılır. Directed Diffusion Şekil 5. de bir örnek üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4. SPIN yol atama algoritması.



Şekil 5. Directed Diffusion yol atama algoritması.

“Enerji aware” yol atama [29], “Rumor” yol atama [2], TEEN [18], APTEEN [18] ve CADR [8] diğer bilinen önemli veriye yönelik yol atama protokolleridir.

4.3.2. Sıradüzensel Protokoller

Duyurga ağlarında yüksek duyurga sayıları ve yoğunluğu nedeni ile ölçeklenebilirlik önemli bir problemdir. Hedeflenen duyurga yoğunluklarında ve sayılarında tek bir seviyede kalınarak yol ataması yapmak oldukça zor bir görevdir. Bunun alternatifi duyurgaları öbeklere ayırmak ve her öbek içinde seçilen bir veya daha fazla duyurgayı kullanarak öbekleri birbirine bağlamaktır. Bu şekilde problem, çok sayıda duyurga arasında yol atama yerine, daha kısıtlı sayıdaki öbekler arasında yol atama problemine indirgenir. Veri paketleri bir kere varış noktasının içinde bulunduğu öbeğe ulaştığında, öbek içerisinde duyurgalar arasında yol atama yaparak alıcıya teslim edilir. Böylece iki veya daha fazla seviyede yollar bulunarak yol atamaları yapılar ve daha ölçeklenebilir algoritmalar tasarlanabilir. Bu gruba giren algoritmalar öbekleme ve öbekler arası yol atama tekniklerine göre farklılıklar gösterebilir. Sıradüzensel duyurga ağı yol atama algoritmaları örnek olarak verilebilecek algoritmalar şunlardır: LEACH [13], PEGASIS [17], Self-organizing Protokol [32], TOSMOS [5].

4.3.3. Yer Bilgisine Dayalı Protokoller

Ölçeklenebilirlik problemini hafifletmek ve mevcut kısıtları en iyi karşılayan algoritmalar üretmek için kullanılacak bir diğer yaklaşım ise duyurgaların yer bilgilerinden yararlanılmasıdır. Bir çok duyurga ağı uygulamasında duyurgaların yer bilgisi zaten algılama görevi için gerektiğinden duyurgalarda mevcuttur. Bu gruba düşen algoritmalar bu bilgiden yararlanarak daha etkin yol ataması yapmaya çalışırlar. Diğer gruplar içinde tanıttığımız yer bilgisinden yararlanabilirler. Örneğin TOSMOS [5] yer bilgisine göre duyurgaları öbeklere ayırmaktadır. Bu sınıfa düşen algoritmalar en çok bilinenleri şu şekilde sıralayabiliriz: MECN ve SMECN [26], GAF [34].

4.4. Veri Bağlantı ve Fiziksel Katmanlar

Her iki katmanda duyurga ağları için henüz açık araştırma alanlarıdır. Gönderilen veri paketlerinin küçük boylarda olması, gönderme ve alma için harcanan güçlerin hemen hemen birbirine eşit olması, aktarım hızından çok düşük güç tüketiminin hedeflenmesi bu katmanlarda daha önce geliştirilenlerden farklı ve yeni protokollere ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.

Kaynakça

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey", Elsevier Computer Networks, Mart 2002.
- [2] D. Braginsky, D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks," Proceedings of the 1st Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, October 2002.
- [3] N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, and J. Heidemann, "Scalable Coordination for Wireless Sensor Networks: Self-Configuring Localization Systems," International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA 2001), Ambleside, UK, July 2001.
- [4] E. Cayirci, "Data Aggregation and Dilution by Modulus Addressing in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Letters*, August 2003.
- [5] E. Cayirci, "Power Aware Data Dissemination in Mobile Sensor Networks", *Journal of Naval Science and Engineering*, Vol.1., No.1, pp. 37-70, 2003.
- [6] A. Cerpa, J. Elson, M. Hamilton, and J. Zhao, "Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology," ACM SIGCOMM'2000, Costa Rica, April 2001.
- [7] K.K.Chintalapudi and R.Govindan, "Localized Edge Detection in Sensor Fields," SNPA2003.
- [8] M. Chu, H. Haussecker, F. Zhao, "Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for Ad Hoc Heterogeneous Sensor Networks," *The International Journal of High Performance Computing Applications*, Vol. 16, No.3, August 2002.

- [9] C. Cimen, E. Cayirci, V. Coskun, "Querying Sensor Fields By Using Quadtree Based Dynamic Clusters And Task Sets," *MILCOM 2003*.
- [10] A. Erdogan, E. Cayirci, V. Coskun, "Sectoral Sweepers for Sensor Node Management and Location Estimation in Ad Hoc Sensor Networks," *MILCOM 2003*.
- [11] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, "Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks," *ACM MobiCom'99*, pp.263-270, Washington, USA, 1999.
- [12] W. Heinzelman, J.Kulik, and H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks," *Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, Seattle, August 1999.
- [13] W. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks," *Proceedings of the Hawaii International Conference System Sciences*, Hawaii, January 2000.
- [14] G. Hoblos, M. Staroswiecki, and A. Aitouche, "Optimal Design of Fault Tolerant Sensor Networks," *IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 467-472, Anchorage, AK, September 2000.
- [15] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," *ACM MobiCom'00*, pp. 56-67, Boston, MA, 2000.
- [16] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister, "Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust," *Proc. of the ACM MobiCom'99*, pp.271-278, Washington, USA, 1999.
- [17] S. Lindsey and C.S. Raghavendra, "PEGASIS: Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems," *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, Montana, March 2002.
- [18] A. Manjeshwar, D.P.Agrawal, "TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, San Fransisco, April 2001.
- [19] D. Nadig, and S. S. Iyengar, "A New Architecture for Distributed Sensor Integration," *Proceedings of IEEE Southeastcon '93*, Charlotte, NC, April 1993.
- [20] C. Perkins, "Ad Hoc Networks," *Addison-Wesley*, 2000.
- [21] A. Perrig, R. Szewczyk, V. Wen, D. Culler, and J. D. Tygar, "SPINS: Security Protocols for Sensor Networks," *Proc. of ACM MobiCom'01*, pp. 189-199, Rome, Italy, 2001.
- [22] E. M. Petriu, N. D. Georganas, D. C. Petriu, D. Makrakis, and V. Z. Groza, "Sensor-Based Information Appliances," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, pp. 31-35, December 2000.
- [23] G.J. Pottie and W.J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors," *Communications of the ACM*, Vol. 43, No. 5, pp. 551-8, May 2000.
- [24] J. Rabaey, J. Ammer, J. L. da Silva Jr., and D. Patel, "PicoRadio: Ad-hoc Wireless Networking of Ubiquitous Low-Energy Sensor/Monitor Nodes," *Proceedings of the IEEE Computer Society Annual Workshop on VLSI (WVLSI'00)*, pp. 9-12, Orlanda, Florida, April 2000.
- [25] J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. da Silva Jr., D. Patel, and S. Roundy, "PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking," *IEEE Computer Magazine*, pp. 42-48, 2000.
- [26] V. Rodoplu, T.H. Ming, "Minimum Energy Mobile Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 17, No. 8, pp.1333-1344, 1999.
- [27] Y. Sankarasubramaniam and I. F. Akyildiz, "ESRT: Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks," *MobiHoc'2003*, 2003.
- [28] A. Savvides, C. Han, and M. Srivastava, "Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors," *Proc. of ACM MobiCom'01*, pp. 166-179, Rome, Italy, July 2001.
- [29] R.Shah, J.Rabaey, "Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks," *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Orlando, March 2002.
- [30] C. Shen, C. Srisathapornphat, and C. Jaikao, "Sensor Information Networking Architecture and Applications," *IEEE Personal Communications*, pp. 52-59, August, 2001.

- [31] E. Shih, S. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang, and A. Chandrakasan, "Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks," Proc. of ACM MobiCom'01, pp. 272-286, Rome, Italy, July 2001.
- [32] L. Subramanian, R.H. Katz, "An Architecture for Building Self-Configurable Systems," Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Boston, August 2000.
- [33] S. Vardhan, M. Wilczynski, G. Pottie, and W. J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors (WINS): Distributed in Situ Sensing for Mission and Flight Systems," IEEE Aerospace Conference, Vol. 7, pp. 459-463, March 2000.
- [34] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, "Geography Informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing," Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01), Rome, July 2001.

D Blok, Kat 5 34752 İerenky – İSTANBUL/TÜRKİYE
T +90 216 573 00 85 F +90 216 469 85 07
E info@genetlab.com www.genetlab.com
