

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Bağlantı Sayısının Sınırlandırılmasının Ağ Ömrü Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Number of Connection Restriction in Wireless Sensor Networks and Its Influence on Network Lifetime

M. Burak Akgün¹, Bülent Tavlı¹, Kemal Bıçakcı²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
mbakgun@etu.edu.tr, btavli@etu.edu.tr

²Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
bicakci@etu.edu.tr

Özet

Kablosuz algılayıcı ağlar, en az bir baz istasyonundan ve çok sayıda algılayıcı düğümden oluşan ağlardır. Enerji gereksinimlerini bataryalarından karşılayan bu düğümlerin uzun süre hizmet vermesi beklenmektedir. Dolayısıyla enerji verimliliği, uzun ağ ömrü sağladığı için büyük önem arz etmektedir. Kablosuz algılayıcı ağlarda ağ ömrünün eniyilenmesi, düğümlerin enerjilerini dengeli tarzda tüketmesi ile mümkün olmaktadır. Dengeli enerji tüketimi de düğümlerin verilerini başka düğümler üzerinden, onları röle olarak kullanarak, baz istasyonuna ulaştırmalarını gerektirmektedir. Bunun sonucu olarak bazı düğümler çok fazla sayıda düğümden veri almakta ve bazıları da çok fazla sayıda düğüme veri göndermektedirler. Bu durum, pratik uygulamalarda ağ karmaşıklığına sebep olması ve büyük rotalama tabloları gerektirmesi nedeniyle istenilmemektedir. Bu çalışmada, öncelikle bir doğrusal programlama altyapısı kullanılarak düğümlerin verilerini dağıtma karakteristiği incelenmiştir. Daha sonra ise bir tamsayı-doğrusal programlama modeli kullanılarak, ulaşılabilir en uzun ağ ömrünün, düğümlerin oluşturdıkları giriş ve çıkış bağlantı sayısının sınırlandırılmasıyla nasıl etkilendiği irdelenmiştir.

Abstract

A wireless sensor network consists of at least one base station and multiple sensor nodes. These nodes are battery powered and are expected to operate for a long time therefore energy efficiency becomes a crucial design objective. Optimization of network lifetime can be achieved by balancing the energy consumption within the network. This requires nodes to split their flows to many other nodes to use them as relays towards the base station. Thus, some nodes have many inward connections and some have many outward connections. This situation is not desirable since it increases network complexity and requires huge routing tables. In this study, data splitting characteristics of sensor nodes have been examined through a linear programming framework. In the second stage, using a mixed integer programming framework, the influence of restricting inward and outward connection count on the network lifetime has been analyzed.

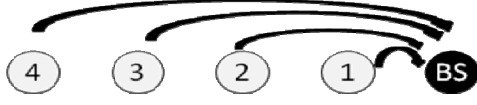
1. Giriş

Kablosuz algılayıcı ağların kullanım amacı, ortamdaki sıcaklık, nem gibi çevresel faktörlerin düğümlerde bulunan algılayıcılar vasıtasıyla ölçülmesi, elde edilen verinin işlenmesi ve verinin baz istasyonuna ulaştırılması olarak tanımlanmaktadır. Kablosuz algılayıcı ağı oluşturan düğümlerin depolayabildikleri enerji miktarı, hesaplama ve iletişim kabiliyetleri ekonomik ve teknolojik sebeplerle kısıtlı olmaktadır [1]. Kablosuz algılayıcı ağlar hakkında yapılan çalışmaların enerji ve hesaplamsal olarak verimli algoritmalar, protokoller ve rotalar üzerine yoğunlaşması bu sebeptir.

Kablosuz algılayıcı ağlar enerji ihtiyaçlarını bataryalarından karşıladıkları için yüksek enerji verimliliği en önemli tasarım hedeflerinden biridir. Buna ilave olarak algılayıcı ağların, genellikle gözetleme amaçlı olarak kullanılması dolayısıyla insanlardan uzak konumlarda kullanımı, batarya değişimi ve tekrar şarj edileme gibi işlemleri çok zor kılmaktadır. Algılayıcı düğümlerin, ortama bırakıldıktan sonra olabildiğince uzun süre hizmet vermesi düğüm üzerindeki elemanların enerji tüketim değerlerine bağlı olduğu kadar, düğümler arasındaki yardımlaşmaya da bağlıdır. Düğümler toplam enerjilerinin çok büyük kısmını veri iletimi için harcamaktadırlar [2]. Ağ içerisindeki enerji tüketiminin dengelenmesinin önemi örnek bir model üzerinde anlatılacaktır. Şekil-1’de 4 düğüm ve bir baz istasyonundan oluşan doğrusal ve eşit aralıklı yerleştirilmiş bir algılayıcı ağı verilmiştir. Düğümlerin ürettikleri veriyi gönderirken harcadıkları enerji alıcı düğüme olan uzaklıkla üssel olarak arttığı varsayılmaktadır. Eğer Şekil-1’de görüldüğü gibi düğümler arasında hiç yardımlaşma olmaz ve bütün düğümler verilerini direk olarak baz istasyonuna gönderirlerse 4 numaralı düğüm enerjisini diğer düğümlerden çok daha kısa sürede tüketecek ve ağın kapsama alanı düşecektir.

İkinci olarak, düğümlerin sadece kendi enerji kısıtlarını düşünerek veri iletimi yaptığı durum Şekil-2’de verilmiştir. Buna göre her düğüm kendisine en yakın olan düğüme verisini göndermekte ve bu veriyi onlar üzerinden atlatmaktadır. Bu durumda 1 numaralı düğüm diğer düğümlerden gelen verilerin de baz istasyonuna iletiminde

enerji harcayacağı için enerjisini ilk önce tüketecek ve ağına kapsama alanı yine düşecektir.

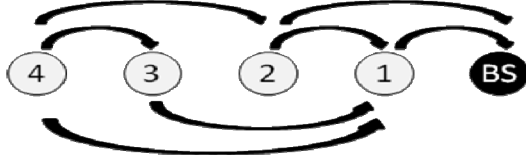


Şekil-1: Çok atlamasız veri akışı



Şekil-2: Bencil davranış durumunda veri akışı

Şekil-1 ve Şekil-2'de enerji tüketiminin verimsiz kullanıldığı iki uç durum örneklenmiştir. Ağdaki düğümlerin enerjilerini en verimli şekilde kullanması düğümlerin enerjilerini dengeli harcaması ile mümkün olmaktadır. Bu da Şekil-3'de görüldüğü üzere düğümlerin çok atlama tekniğini akıllıca kullanmalarını ve gerektiğinde verilerini bölerek çok sayıda düğüme göndermelerini gerektirir. En uzun ağ ömrünü veren bu iletim şemasının ne olduğunun bulunması ise doğrusal programlama ile mümkündür [7][8].



Şekil-3: Optimal iletim şeması

2. HAZIRLAYICI BİLGİLER

2.1. Doğrusal Programlama

Doğrusal programlama, verilen doğrusal kısıtlar çerçevesinde doğrusal bir amaç fonksiyonuna eniyi değeri veren çözümü bulmak için kullanılan yöntemdir. Eniyi değerin bulunabilmesi için hangi yönde (pozitif, negatif) eniyileme yapılacağı problem tanımlanırken belirtilmelidir. Değişkenler reel sayıdır ve süreklidirler.

Doğrusal programlama problemlerinin genel modeli Tablo 1'de görülmektedir. Bu ifadelerde X değişkenler vektörü, C ve B katsayı vektörü ve A ise katsayı matrisidir.

Tablo 1: Genel Doğrusal Programlama Modeli

Amaç Fonksiyon	$C^T X$
Kısıtlar	$AX \leq B$



Şekil-4: Optimal iletim örneği

Doğrusal programlamanın kablosuz algılayıcı ağlar üzerinde uygulanması 2 düğüm ve 1 baz istasyonundan oluşan Şekil-4'teki basit model üzerinde örneklendirilecektir [3]. Bu modele göre i düğümünden j düğüme ağ ömrü boyunca iletilen veri miktarı f_{ij} değişkeni ile belirtilmiştir. Düğümler

birim zamanda $s=1$ bit veri üretmektedirler. Düğümlerin ilk batarya enerjileri e sabitidir. i düğümünden j düğüme 1-bit veri gönderilirken harcanan enerji $P_{tx,ij}$ ve alırken harcanan enerji P_{rx} ile belirtilmiştir. İletimde mesafenin karesi kadar birim enerji harcanmakla birlikte verinin alınmasında harcanan enerji 1 birimdir. Ardışık düğümler arası mesafe 1 birimdir. Amaç değişkeni ağ ömrü t 'dir ve pozitif yönde eniyilenecektir. Bu modele göre (1.1) ve (1.2)'deki kısıtlar çıkarılabilir. (1.1.a) ve (1.1.b) denklemleri düğümlerin enerji kısıtlarını temsil etmektedirler. Herbir düğümün veri alırken ve gönderirken harcadığı toplam enerji, ilk andaki batarya enerjisinden büyük olamaz. (1.2.a) ve (1.2.b) ifadeleri ise algılayıcı düğümlerin ilettikleri veri miktarını, algıladıkları ve ürettikleri verilerin toplamına eşitlemiştir.

$$\{E_{tx,32}f_{32} + E_{tx,31}f_{31}\} \leq e \quad (1.1.a)$$

$$\{E_{rx}f_{32} + E_{tx,21}f_{21}\} \leq e \quad (1.1.b)$$

$$f_{32} + f_{31} - s.t = 0 \quad (1.2.a)$$

$$f_{21} - f_{32} - s.t = 0 \quad (1.2.b)$$

İletim ve alım için harcanan enerji değerleri yerine konulduğunda (1.3) ve (1.4) denklemleri elde edilir.

$$f_{32} + 4f_{31} \leq e \quad (1.3.a)$$

$$f_{21} + f_{32} \leq e \quad (1.3.b)$$

$$f_{32} + f_{31} - t = 0 \quad (1.4.a)$$

$$f_{21} - f_{32} - t = 0 \quad (1.4.b)$$

t , (1.4.a). ifadesinden çekilip (1.4.b) ifadesinde yerine yazıldığında

$$f_{21} = 2f_{32} + f_{31} \quad (1.5)$$

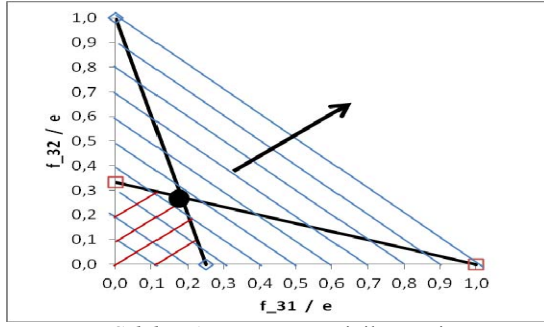
elde edilir. 1.4.a denkleminden görüldüğü üzere, amaç değişkeni olan t , f_{32} ve f_{31} toplamına eşittir. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında Tablo 2'deki sonuçlar elde edilir.

Tablo 2: Sadeleştirilmiş eniyileme denklemleri

Amaç fonksiyon	$f_{32} + f_{31}$
Kısıtlar	$f_{32} + 4f_{31} \leq e$

Bu kısıtların belirttiği alan Şekil-5'de gösterilmiştir. Taralı dört kenarlı alan kısıtları sağlayan çözüm uzayıdır. Amaç fonksiyonu eksenlere 45° açıyla çizilen doğrular üzerinde değerler almaktadır ve ok yönünde ilerledikçe artmaktadır. Dolayısıyla çözüm noktası kısıtları sağlayan alanın köşesinde olup siyah nokta ile işaretlenmiştir.

Çözümleme yapıldığında ağ ömrü $(5/11)e$ olarak bulunur. Modelleme sonucu oluşacak denklem ve bilinmeyen sayısı düğüm sayısının karesiyle artmaktadır. Ancak örnekte görüldüğü gibi doğrusal programlama problemlerinde çözüm genellikle kısıtların oluşturduğu uzayın sınırları üzerindedir. Bu sebeple doğrusal programlama problemlerinde, tamsayı programlama problemlerine kıyasla çok daha yüksek düğüm sayıları ile çözüm mümkündür.



Şekil-5: Ağ ömrünün Eniyilenmesi

2.2. Tamsayı Programlama

Bazı problemlerde, problemin yapısından dolayı bütün değişkenler reel olarak tanımlanamamaktadır. Bir kablosuz algılayıcı ağda bulunan düğümlerin kurdukları bağlantı sayılarının kısıtlanmasıyla ağ ömründeki düşüş gözlenmek istenildiğinde düğümlerin kurdukları bağlantı sayıları tamsayı değişkeni olarak tanımlanmak zorundadır [7]. Genel olarak problemlerde doğrusal olarak tanımlanamayan değişkenler tamsayı ya da ikili olarak tanımlanmış olabilir. Hem doğrusal hem de tamsayı değişkenlerinin bulunduğu problemlere karışık tamsayı problemleri denilmektedir. Tamsayı problemlerinin çözümleri doğrusal problemlere göre çok daha fazla zaman almaktadır. Sistemde reel olmayan değişkenler bulunduğu için kısıtların çevrelediği uzay sürekli değildir ve optimal nokta uzayın sınırlarında olmayabilir.

Bu tip problemlerin çözümünde birçok yöntem kullanılmaktadır. Örneğin dal-sınır algoritması bütün değişkenleri reel kabul ederek problemi doğrusal programlama ile çözer ve çıkan sonuçta tamsayı olması gereken değerlerden bir tanesini seçer. Bu değişken için bulunan değer ardışık iki tamsayı arasında olduğu düşünülürse, problem iki dala ayrılır ve her bir dalda bu değişken bir ardışık tamsayıya eşitlenerek dallanmaya devam edilir. Reel sayı farz edilerek yapılan çözümlemelerde bütün istenilen değişkenler tamsayı çıkmış ise optimal çözüm bulunduğu anlamına gelir ancak bu durum çok zaman gerektirir. Optimal nokta bulunmasa dahi bulunan doğrusal çözüm ile eniyi tamsayı çözümü arasındaki fark hatayı verir. Dolayısıyla çözüm esnasında en fazla hatanın ne kadar olduğu bilinebilir. Bu çalışmada izin verilen hata sınırı % 1 olarak ayarlanmış ve çözücü programların (solver) standart bir PC ile 1 haftaya kadar sonuçlanması beklenilmiştir.

2.3. GAMS Genel Cebirsel Modelleme Sistemi

Bu çalışmada çözümleri elde etmek için kullandığımız GAMS sistemi Doğrusal(LP), tamsayı(MIP), doğrusal olmayan (NLP) gibi birçok problemin modellenmesini sağlayan yüksek seviyeli bir programlama dilidir. GAMS, kullanıcı tarafından kodlanan modeli çözücülere verilmek üzere genel bir forma getirir ve kullanıcının tercih edebileceği çözücüye çözdürür.

3. Sistem Modeli

Bu çalışmada kullanılan kablosuz algılayıcı ağ modeli bir baz istasyonu ve çok sayıda algılayıcı düğümden oluşmaktadır. Algılayıcı düğümler veri üretilmesinde ve ağda üretilen verinin baz istasyonuna iletilmesinde görevlidirler. Ağ topolojisi $G=(V,A)$ olan tam ve yönlü bir çizge olarak ifade edilmektedir. V , baz istasyonunu (düğümler-1) da içeren düğümler kümesidir. W ise baz istasyonu hariç bütün

düğümlerin kümesidir. $A = \{(i, j) : i \in V, j \in V - \{i\}\}$ çizgedeki bütün kenarların kümesidir. i düğümünden j düğüme ağ ömrü boyunca iletilecek toplam veri miktarı f_{ij} ile ifade edilmiştir. Ağ ömrü, ilk düğümün enerjisini tükettiği ana kadar geçen süre olarak tanımlanmıştır [4] [5]. Bu çalışma genelinde [6]'da önerilen enerji modeli kullanılmıştır.

$$P_{tx,ij} = \rho + \epsilon d_{ij}^{\alpha} \quad (3.1)$$

$$P_{rx,ij} = \rho \quad (3.2)$$

(3.1) İfadesinde i düğümünden j düğüme 1 bit verinin gönderilmesi için gereken enerji verilmiştir. Bu ifadede ρ

devrede harcanan enerjiyi ve ϵ antenin verimliliğini, d_{ij} i düğümü ve j düğümü arasındaki mesafeyi, α ise yol boyunca oluşacak kaybı temsil etmektedir. En ideal durum, yani ortamdan kaynaklanan bir sönümlenme olmadığı ve elektromanyetik enerjinin küresel yüzeye yayıldığı varsayılırsa, $\alpha = 2$ olmaktadır. Elektromanyetik sinyalin farklı yüzeylerden yansıması, dolayısıyla yansıyan sinyalin alıcıya kadar farklı mesafeler kat ederek, farklı zamanlarda ulaşmasından dolayı çok yollu iletim modeli önerilmiştir [6] ve bu modele göre $\alpha = 4$ olarak seçilmiştir. Genel olarak α , ortamdan kaynaklanan kayıplar da hesaba katıldığında 2-5 aralığında değerler alabilir. (3.2) ifadesinde ise 1 bit verinin algılanması için gereken enerji verilmiştir ve sadece devrede harcanan enerjiden oluşmaktadır.

3.1. Doğrusal Programlama Modeli

Bu modelde algılayıcı düğümlerin verilerini dağıtma karakteristiği incelenmektedir. Bunun için düğümlerin oluşturduğu bağlantı sayısı serbest bırakılmakta ve ağ ömrünün en uzun olmasını sağlayacak eniyileme problemi çözdürülmektedir. Optimal çözüm bulunduktan sonra düğümlerin ortalama ve en fazla kaç çıkışı ve giriş bağlantısı kurdukları incelenmektedir.

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in V} f_{ij} - \sum_{j \in W} f_{ji} - s_i t = 0 \quad \forall i \in W \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in V} P_{tx,ij} f_{ij} + P_{rx} \sum_{j \in W} f_{ji} \leq e_i \quad \forall i \in W \quad (3.5)$$

(3.3) ifadesi bağlantılarda oluşacak veri akışının negatif olmayan değerler almasını sağlamaktadır. (3.4) ifadesi verinin korunumunu sağlamaktadır. Buna göre ağ ömrü boyunca i düğümünden çıkan verinin tamamı, bu düğüme ağ ömrü boyunca giren veri ve ağ ömrü boyunca bu düğümden üretilen verinin toplamına eşittir. Burada s_i i düğümünde birim zamanda üretilen veri miktarını ve t ise ağ ömrünü ifade etmektedir. (3.4) ifadesi baz istasyonu için geçerli değildir ve bu sayede üretilen verinin tamamının sistemi baz istasyonu üzerinden terk etmesi sağlanmaktadır. (3.5) ifadesi düğümlerin enerji kısıtını tanımlamaktadır. Herhangi i düğümünün ağ ömrü boyunca veri iletirken ve alırken harcadığı enerjilerin toplamı o düğümün ilk enerjisinden fazla olamaz. Burada e_i düğümlerin ilk enerjisidir. (3.5) ifadesi baz istasyonu için geçerli değildir, dolayısıyla baz istasyonunun enerji kısıtı yoktur. Bu doğrusal programlama altyapısında amaç fonksiyonu olan t (ağ ömrü), pozitif yönde eniyilenmektedir.

Doğrusal program sonuç olarak ağ ömrünü ve bu ağ ömrü boyunca hangi bağlantıda ne kadar veri iletilmesi

gerektiğini hesaplamaktadır. Bulunan f_{ij} değerleri analiz edilmekte ve i düğümünün ilettiği toplam verinin $1/1000$ 'ini ya da daha fazlasını oluşturan bütün bağlantılar i düğümü için çıkış bağlantısı olarak kabul edilmektedir. Benzer şekilde i düğümünün ağ ömrü boyunca aldığı tüm verinin $1/1000$ ya da daha fazlasını oluşturan tüm giriş bağlantıları i düğümü için giriş bağlantısı olarak kabul edilmiştir.

3.2. Tamsayı Programlama Modeli

Bu kısımda bağlantı sayısı kısıtları eklenmiştir. Düğümlerin kurdukları bağlantıların sayısı tamsayı olması gerektiği için problem doğrusal programlama modeli olarak ifade edilememekte ve tamsayı programlama teknikleri uygulanmaktadır. Doğrusal programlama kısmında verilen (3.3), (3.4) ve (3.5) ifadelerine ilave olarak aşağıdaki kısıtlar eklenmektedir.

$$f_{ij} \leq M a_{ij} \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \in V} a_{ij} \leq L_{\text{çıkış}} \quad \forall i \in W \quad (3.7)$$

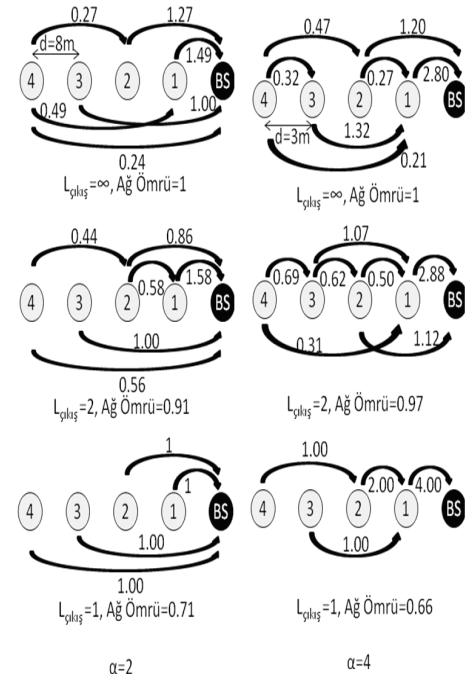
$$\sum_{j \in W} a_{ji} \leq L_{\text{giriş}} \quad \forall i \in W \quad (3.8)$$

(3.6) ifadesinde M yeterince büyük bir sayı alınarak programa çalışma öncesi girilmektedir. M , bağlantı sayısı kısıtı olmadığı durumdaki modelin çözülmesi sonucu (doğrusal program) hesaplanan bütün f_{ij} değerlerinden büyük olmalıdır. a_{ij} değeri, i düğümünden j düğüme doğru bir bağlantının olup olmadığını tutan ikili değerdir. Bu ifadeye göre f_{ij} sıfırdan büyük olduğu durumlarda yani i - j bağlantısı kurulduğu durumlarda a_{ij} mutlaka 1'dir. Ancak $a_{ij}=1$ olduğu durumlarda f_{ij} sıfırdan farklı olmak zorunda değildir. (3.7) ifadesinde $L_{\text{çıkış}}$ düğümler için izin verilen en fazla çıkış bağlantı sayısını belirtir. Bu değer çalışma öncesi atanmak zorundadır. Sonuç olarak i düğümünün veri gönderdiği düğümlerin toplam sayısının en fazla $L_{\text{çıkış}}$ kadar olması sağlanmaktadır. (3.8) ifadesinde $L_{\text{giriş}}$ düğümler için izin verilen en fazla giriş bağlantı sayısını belirtir. Benzer şekilde bu değer de çalışma öncesi atanmaktadır. (3.8) ifadesine göre i düğüme veri gönderen düğümlerin toplam sayısı en fazla $L_{\text{giriş}}$ kadar olabilmektedir. Bağlantı sayısı kısıtı baz istasyonu için geçerli olmadığı ve çok sayıda giriş bağlantısı kurabileceği için (3.6) ve (3.7) ifadelerinde baz istasyonu hariç tutulmuştur. Sonuç olarak (3.3-3.8) kısıtları çerçevesinde ağ ömrü (t) pozitif yönde eniyilenmektedir. Örneğin $L_{\text{giriş}}=2$ ve $L_{\text{çıkış}}=1$ seçilerek program çalıştırıldığında düğümlerin en fazla 2 giriş ve 1 çıkış bağlantısı oluşturmalarına izin verilmekte ve bu şartlarda ulaşılabilecek en uzun ağ ömrü hesaplanmaktadır.

4. Analiz Sonuçları

Bu kısımda sunulan analiz sonuçları GAMS [7] yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Enerji modeli parametreleri $\rho = 50\text{nJ}$ ve $\mathcal{E} = 100\text{pJ}$ olarak alınmıştır [6]. Düğümlerin bir saniyede ürettikleri veri miktarı 1 bit (1 bps) olarak seçilmiştir. Analizler farklı düğüm sayısı ve düğüm yoğunluklarında, farklı $L_{\text{giriş}}$ ve $L_{\text{çıkış}}$ değerleri için doğrusal, dairesel ve ızgara topolojilerinde, $\alpha = 2$ ve $\alpha = 4$ durumları için gerçekleştirilmiştir. Yer darlığı sebebiyle bu makalede sadece düğümlerin eşit aralıklarla doğrusal olarak sıralanmış olduğu ve baz istasyonunun en başta olduğu doğrusal topoloji

incelenecektir¹. Veri akış rotasının ve kurulan bağlantı sayısının kolayca takip edilebilmesi için ilk olarak az sayıda düğümden oluşan bir ağ üzerinde durum incelenmiştir. Baz istasyonu (BS) ve 4 adet düğümden oluşan bir algılayıcı ağındaki çıkış bağlantılarının sayısının sınırlandırılmasıyla, veri akışının ve ağ ömrünün değişimi şekil-6'da verilmiştir. Sol kolondaki değerler $\alpha = 2$ ve sağ kolondaki değerler ise $\alpha = 4$ enerji modeli ile elde edilmiştir. En üst satırda en fazla çıkış bağlantı sayısı sınırlandırılmamış ($L_{\text{çıkış}}=\infty$), ikinci satırda 2 ile sınırlandırılmış ($L_{\text{çıkış}}=2$) ve en alt satırda 1 ile sınırlandırılmış ($L_{\text{çıkış}}=1$). Veri akış değerleri bir düğümün ağ ömrü boyunca ürettiği toplam veri miktarıyla normalize edilmiştir. Benzer şekilde ağ ömrü de bağlantı sayısının sınırlandırılmadığı durumdaki ağ ömrü ile normalize edilmiştir. Buna göre $\alpha = 2$ durumunda çıkış bağlantı sayısı 2 ile sınırlandırıldığında ağ ömründe %9; 1 ile sınırlandırıldığında %29 ve $\alpha = 4$ durumunda 2 ile sınırlandırıldığında %3; 1 ile sınırlandırıldığında %34'lük kayıp söz konusudur. Veri akış rotasında da ciddi değişiklikler olduğu söylenebilir. Örneğin, $\alpha = 2$ durumunda $L_{\text{çıkış}}=1$ ise ulaşılabilecek en uzun ağ ömrü, bütün düğümlerin ürettikleri verileri direk olarak baz istasyonuna göndermeleri durumunda mümkündür. Bu durumda ise, 4 no'lu düğüm ilk olarak enerjisini tüketecek, dolayısıyla ağ ömrü bitecek ve diğer düğümlerin artan enerjilerinden sistem yararlanamamış olacaktır.



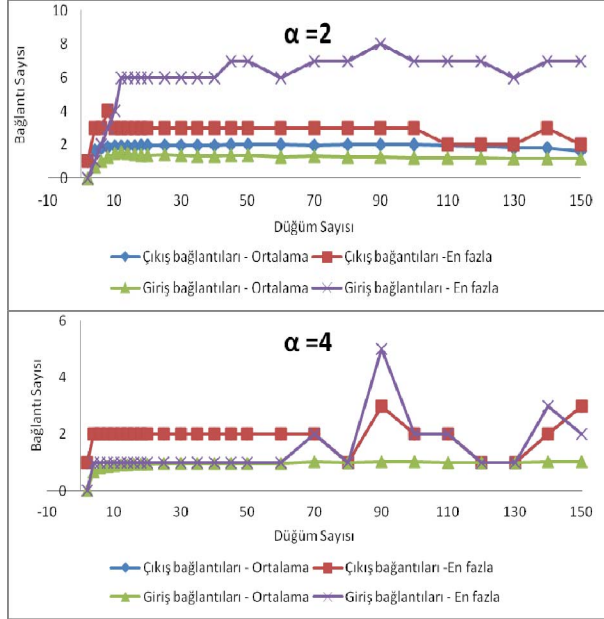
Şekil 6: Bağlantı Kısıtları Sonucunda Veri Akışı

4.1. Doğrusal Programlama Sonuçları

Doğrusal bir yerleşimde, düğümler arası mesafe 20m olmak üzere düğümlerin oluşturduğu bağlantı sayısının algılayıcı ağındaki düğüm sayısına bağlı grafiği şekil-7'de verilmiştir. Yeterli düğüm sayısına ulaşıldığında $\alpha = 2$ durumunda düğümlerin ortalama 1.90 ± 0.1 ve en fazla 3 çıkış bağlantısı ve ortalama 1.3 ± 0.1 ve en fazla 8 giriş bağlantısı kurdukları,

¹ İki boyutlu dairesel topoloji sonuçları da ayrıca incelenmiştir [8].

$\alpha = 4$ ve düğüm sayısı 30'dan fazla ise ortalama 1.0 ± 0.1 ve en fazla 3 çıkış bağlantısı; ortalama 0.95 ± 0.1 ile en fazla 3 giriş bağlantısı kurdukları gözlemlenmiştir.

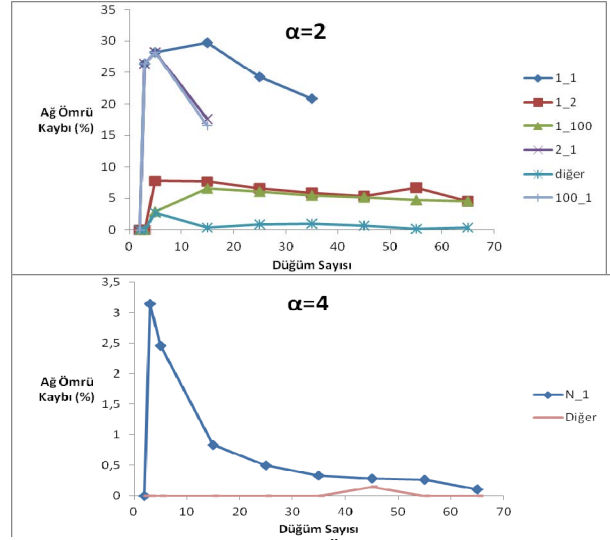


Şekil 7: Doğrusal Topoloji Bağlantı Sayısı-Düğüm Sayısı

4.2. Tamsayı Programlama Sonuçları

Bu kısımda doğrusal bir topolojide bağlantı sayısının kısıtlanması ile ağ ömründe meydana gelen düşüş incelenmiştir. Şekil-8'de dikey eksen bağlantı sayısı kısıtlandığında, kısıtlanmamış duruma göre ağ ömrünün kısalma oranını yüzde olarak göstermektedir. Eğriler ise ($L_{giriş}$, $L_{çıkış}$) ikilisine göre isimlendirilmiştir. Örneğin 2_1, giriş bağlantılarının 2 ve çıkış bağlantılarının 1 ile sınırlandırıldığı durumdaki azalmayı gösterir. Eğrilerde bağlantıların 100 ile sınırlandırılması ağda 100'den az düğüm olduğu için pratikte sınırsız olarak düşünülebilir. Örneğin 100_1 ile belirtilen eğri giriş bağlantılarında kısıt olmayan ve çıkış bağlantılarının sayısının 1 ile sınırlı olduğu bir ağ içindir. Grafikteki değerler, düğümler arası 20m olduğu topolojide elde edilmiştir.

Her iki α değeri için de çıkış bağlantılarının kısıtlanmasından girişlerin kısıtlanmasından ağ ömründe daha fazla kısalma sebeptir olduğu görülmektedir. Tamsayı programlama problemleri genellikle karmaşıklığı yüksek ve çözüm süreleri uzun problemlerdir. Şekil-8'de verilen grafiklerde bazı eğrilerin yüksek düğüm sayılarında değerlerinin görülmemesi problemin standart bir PC tarafından 1 hafta süresinde çözülmemesinden kaynaklanmaktadır. $\alpha = 2$ durumunda çıkış bağlantısı 1 ile sınırlandırıldığında ağ ömründe % 32'ye varan kayıp görülebilir. $\alpha = 4$ 'te ise 1_1, 2_1 ve 100_1 eğrilerinin çakışık olması ağ ömrünün giriş bağlantılarının kısıtlanmasından etkilenmediği anlamına gelir. Bu sonuçlar Şekil-7'deki grafiklerle de tutarlıdır. Örneğin $\alpha = 2$ için Şekil-7'de düğümlerin ortalama 2'şer çıkış ve 1'er giriş bağlantısı oluşturduğu görülmektedir. Şekil-8'de de giriş bağlantılarının 1 ile sınırlandırılması ağ ömrünü çok az etkilemekle birlikte çıkış bağlantılarının 1 ile sınırlandırılması ağ ömründe % 32 oranında kısalma sebeptir olabilir.



Şekil-8: Doğrusal Topoloji Ağ Ömrü Kaybı- Düğüm Sayısı

5. Sonuç

Bu çalışmada bir kablosuz algılayıcı ağında doğrusal programlama sistemi kullanılarak ağ ömrünün eniyilenmesi sağlanmış ve bu durumda düğümlerin verilerini dağıtma karakteristiği incelenmiştir. Doğrusal topolojide, farklı enerji modeli parametreleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda düğümlerin kurdukları ortalama çıkış ve giriş bağlantı sayıları elde edilmiştir. Baz istasyonu dışındaki düğümlerin girişlerden daha fazla çıkış bağlantısı kurdukları gözlemlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında bir tamsayı programlama sistemi ile düğümlerin kurdukları bağlantı sayılarına kısıtlar kurulmuş ve bu şartlarda ağ ömrü eniyilenmiştir. Yapılan analizler sonucu ağ ömrünün giriş bağlantılarına kıyasla çıkış bağlantılarının sınırlandırılmasından daha çok etkilendiği görülmüştür. Çıkış bağlantı sayılarının sınırlandırılmasıyla ağ ömründe %30'lar mertebesinde düşüşler görülmüştür. Giriş ve çıkış bağlantı sayılarının en az 2 olması sağlandığında ise ağ ömründeki kaybın düşük seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] Labrador, M.A., Wightman, P.W., Topology Control in Wireless Sensor Networks, Springer Science, 2009.
- [2] Rahimi, M., Baer, R., Iroez, O.I., Garcia, J.C., Warrior, J., Estrin, Srivastava, M., Cyclops: in situ image sensing and interpretation in wireless sensor networks, Proc. ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2005.
- [3] Bicakci, K., Tavli, B., Prolonging Network Lifetime with Multi-domain Cooperation Strategies in Wireless Sensor Networks, *AdHoc Networks*, 2010.
- [4] Ergen, S.C., Varaiya P., On Multihop Routing for Energy Efficiency, *IEEE Communication Letters* vol:9 No:10, 2005.
- [5] Cheng, Z., Perillo, M., Heinzelman, W., General Network Lifetime and Cost Models for Evaluating Sensor Network Deployment Strategies, *IEEE Trans. Mobile Computing*, 2008.
- [6] Heinzelman, W., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H., An Application Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, *IEEE Trans. Wireless Comm.*, 2002.
- [7] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, R. Raman, GAMS: A User's Guide, The Scientific Press, 1998.
- [8] Bulent Tavli, M. Burak Akgun, and Kemal Bicakci, "The Impact of Limiting the Number of Links on the Lifetime of Wireless Sensor Networks", *IEEE Communication Letters* (kabul edildi), 2010.