

# Telsiz Duyurga Ağlarında Topoloji Kontrolü için Enerji-Etkin Kapasite Kısıtlı En Küçük Ağaç Algoritması

## An Energy-Efficient Capacitated Minimum Spanning Tree Algorithm for Topology Control in Wireless Sensor Networks

Mustafa Aşçı, Can Umut İleri, Orhan Dağdeviren  
International Computer Institute  
Ege University, Izmir, Turkey

Email: {mustafa.asci, can.umut.ileri, orhan.dagdeviren}@ege.edu.tr

**Özetçe**—Telsiz duyurga ağları (TDA'lar) üzerinde çalışan cihazlar genellikle sınırlı enerji kaynaklarına sahiptir ve bu sebeple enerji-etkin algoritmaların tasarlanması önemlidir. Kapasite kısıtlı en küçük kapsayan ağaç (KEKA) algoritmaları, ağ üzerinde enerji etkin yönlendirme patikaları oluşturmak ve çıkış düğümüne bağlı alt ağaçlar arasında yük dengesi sağlamak için kullanılabilir. Bu problem ile ilgili birçok merkezi algoritma tasarlanmış olmasına karşın problemin TDA'ya uygun enerji-etkin çözümü bulunmamaktadır. Merkezi bir algoritmayı  $n$  düğümlü ağ üzerindeki çıkış düğümünde uygulamanın bit karmaşıklığı  $O(n^2 \log n)$  bit olmaktadır. Bu çalışmada, TDA'da KEKA problemini çözmeyi hedefleyen ve Esau-Williams (E-W) algoritmasını temel alan bir algoritmanın tasarımı verilmiştir. Önerilen algoritmanın bit karmaşıklığı  $O(n \log n)$  bit'tir. Algoritmanın performansı, E-W algoritmasının merkezi olarak çözülüp, sonucun tüm düğümlere bildirildiği senaryo ile karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarına göre önerilen algoritma enerji tüketimi açısından merkezi algoritmadan daha etkindir. Önerilen algoritmanın (MCO) tükettiği enerji miktarı merkezi algoritmaya göre 3 kata kadar daha az olduğu görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler**— Telsiz Duyurga Ağları, Enerji Etkin Ağlar, Kapasite Kısıtlı Kapsayan En Küçük Ağaç Problemi, Topoloji Kontrolü.

**Abstract**—Devices running on Wireless Sensor Networks (WSNs) generally have limited energy resources, which makes it important to design energy-aware algorithms. Capacitated Minimum Spanning Tree (CMST) algorithms can be designed for finding energy-aware routing paths and for load-balancing among sub-trees connected to the sink device. Despite being studied extensively in central settings, there has not been any energy-efficient algorithm for the WSNs. The bit complexity of applying a central approach in the sink node is  $O(n^2 \log n)$  bits on a network having  $n$  nodes. In this work, we present the design of an algorithm which aims to solve CMST problem in WSNs and is based on Esau-Williams (E-W) algorithm. The bit complexity of the proposed algorithm is  $O(n \log n)$  bits. We compare the performance of the algorithm with the straightforward implementation of E-W where the problem is

solved by the sink node and the result is sent to the other nodes. According to the computational results, our algorithm is more efficient than this version with respect to the energy consumption. Our algorithm (MCO) consumes up to 3 times less energy than central algorithm.

**Keywords**— Wireless Sensor Networks, Energy Efficient Networks, Capacitated Minimum Spanning Tree Problem, Topology Control.

### I. GİRİŞ

Telsiz Duyurga Ağları (TDA'lar) fiziksel ya da çevresel koşulları duyurgalar vasıtasıyla izleyebilen, bu bilgileri birbirleri ile paylaşabilen ve birbirlerinden bağımsız olarak çalışabilen düğümlerin oluşturduğu telsiz ağlardır. Genellikle bu ağlarda bilgi bir çıkış düğümünde (İng. sink node) toplanır. Bu ağlar askeri uygulamalarda, çevre gözlemlene uygulamalarında ve sağlık uygulamalarında kullanılmaktadır.

TDA'yı oluşturan düğümler genellikle pille çalıştılarından dolayı ağın yaşam ömrünün uzatılması için enerji etkinliği çok önemli bir konudur. Haberleşme, düğümlerin enerjisini tüketen baskın etkindir [1]. Bu sebeple haberleşmenin dikkatli yapılması enerji etkinliği açısından çok önemlidir. Yoğun bağlı düğümlerin oluşturdukları bir TDA'da mesaj çakışmalarından dolayı büyük enerji kayıpları olabilmektedir. Bunu engellemek amacıyla yoğun bağlı bir TDA'nın daha seyrek bağlı bir TDA'ya dönüştürülmesi işlemi topoloji kontrolü olarak ifade edilir. Ayrıca, topoloji kontrolü sayesinde düğümlerin iletim güçleri (İng. transmission range) azaltılıp enerji etkinliği amaçlanır.

Topoloji kontrolü yapmak için en temel yöntemlerden biri kapsayan ağaç oluşturmaktır.  $V$  düğümlerin kümesi,  $E$  kenarların kümesi,  $w$  ise  $E \rightarrow R^+$  kenarlara ait ağırlık (maliyet) fonksiyonu olmak üzere verilen bir  $G(V, E, w)$  çizgesinde tüm düğümleri birbirine bağlayan ağaca *kapsayan ağaç* denir.  $r \in V$  olan bir kök  $r$  düğümü seçilmiş ve her bir alt ağaçtaki

düğüm sayısı  $C$  sabitini geçmeyecek şekilde oluşturulmuş kapsayan ağaçlar arasında maliyeti en düşük ağacı bulma problemine *kapasite kısıtlı en küçük kapsayan ağaç (KEKA) problemi* denir. KEKA problemi NP-ZOR karmaşıklık sınıfındadır [2], [3]. KEKA sayesinde TDA'da en küçük kapsayan ağaç yapısı oluşturulup düğümlerin iletim güçleri bu yapıya göre ayarlanır ve enerji-etkin haberleşme kanalları seçilmiş olur. Ayrıca kapasite kısıtı sayesinde alt ağaçlar arasında yük dengesinin sağlanması hedeflenir. Bilgilerimiz dahilinde problemin çözümü için çeşitli merkezi algoritmalar verilmiş olsa da KEKA problemini TDA üzerinde çözmeyi hedefleyen enerji-etkin bir algoritma literatürde bulunmamaktadır.

Bu çalışmada KEKA problemini TDA üzerinde enerji-etkin çözmeyi hedefleyen MCO algoritmasının tasarımı ve uygulanması verilmiştir. Bölüm II'de KEKA problemiyle ilgili yapılmış çalışmalar özetlenmektedir. Bölüm III'de MCO algoritmasının detaylı açıklaması yapılmakta, Bölüm IV'de ise simülasyon sonuçları verilmekte ve yorumları yapılmaktadır. Bölüm V'de sonuçlar verilmiştir.

## II. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

TDA'da topoloji kontrolü teknikleri homojen ve heterojen olarak ikiye ayrılabilir [4], [5]. Homojen tekniklerde düğümlerin iletim alanlarının eşit olduğu varsayılmıştır. Heterojen tekniklerde ise düğümlerin iletim alanları farklı olabilmektedir. Bu çalışmada verilen algoritma heterojen tekniklerden biridir ve bilgilerimiz dahilinde hem enerji-etkin patika oluşturmayı hem de yük dengesini hedefleyen enerji-etkin bir topoloji kontrolü algoritması literatürde bulunmamaktadır.

KEKA problemi, NP-ZOR olduğundan dolayı problemin çözümü üzerine birçok çalışma yapılmıştır. [6]'de, bu problemi çözmek için en küçük kapsayan ağaç problemini çözen çok bilinen Prim ve Kruskal algoritmalarında değişiklikler yapmışlardır. Değiştirilen Prim ve Kruskal algoritmalarına kapasite kontrolü eklenmiştir.

Esau-Williams (E-W) algoritması [7] en önemli sezgisel algoritmalarından biridir. Burada sunulan algoritma basit, hızlı ve KEKA için verdiği sonuçlar etkindir. E-W algoritması, verilen bir ağırlıklı yönsüz çizgede, başlangıçta her bir düğümün çıkış düğümüne doğrudan bağlı olduğu bir kapsayan ağaç varsayar. Bu ağaç, yıldız topolojisi olarak da düşünülebilir. Daha sonra her bir düğüm için ödünleşme (İng. tradeoff) değeri hesaplanır. Ödünleşme değeri, düğümün o anda bağlı bulunduğu alt ağacın başka bir alt ağaca eklenerek çıkış düğümüyle iletişim kurması halinde toplam maliyette meydana gelecek artışı ifade eder. Ödünleşme değerinin negatif olması, ilgili düğüm üzerinden iki alt ağacın eklenmesinin toplam maliyeti düşüreceği anlamına gelir. Algoritmada en küçük ödünleşme değerine sahip olan düğüm seçilir. Bu düğüm üzerinden birleşecek olan iki alt ağacın toplam düğüm sayıları kapasite kısıtını ( $c$ ) aşmıyorsa ağaçlar birbirine bağlanır. Bağlanan ağaçtaki düğümlerin yeni ödünleşme değerleri hesaplanır. Kapasite aşıyor ise bağlantı yapılmaz ve düğümün ödünleşme değeri yeniden hesaplanır. Bu adımlar, negatif ödünleşme değerine sahip bir düğüm kalmayana kadar devam eder. Sonuçta oluşan kapsayan ağaç, kapasite kısıtlı kapsayan

ağaç problemi için bir çözümdür. Birçok sezgisel algoritma E-W algoritmasının geliştirilmesini amaçlamıştır veya E-W algoritmasını kullanmaktadır. [8], [9] ve [10]'de KEKA için sunulan algoritmalarda E-W algoritması referans alınmıştır. [11] ve [12]'de komşuluk aramayla, [13]'de kenar değiştirme yöntemiyle, [14], [15] ve [16]'de sunulan genetik algoritmalarla, [17] ve [18]'de aç gözlü algoritmasıyla, [19] ve [20]'de karınca kolonisi algoritmalarıyla, [21]'de bulanık mantıkla KEKA problemine sezgisel algoritmalar sunulmaktadır. Bu çalışmada verilen algoritma da E-W algoritmasını temel almasına karşın, benzerlerinden farklı olarak  $n$  düğüm sayısı olmak üzere  $O(\log n)$  bit mesaj boyutu kullanarak problemi enerji-etkin olarak çözmeyi hedeflemektedir.

## III. ÖNERİLEN ALGORİTMA

Bu bildiriye ilk olarak merkezi algoritma daha sonra tasarlanan MCO algoritmasının ana fikri, mesaj tiplerinin açıklamaları ve örnek bir uygulama verilmiştir.

### A. Merkezi Algoritma

E-W algoritmasını TDA'da çalıştırmak için basit bir algoritma tasarlanabilir. Öncelikle, bir düğümün diğer düğümlerin her biri için ne kadar iletim gücü kullanarak haberleşeceğini bildiğini varsayalım. Tüm düğümler bu komşuluk bilgilerini çıkış düğümüne gönderir, çıkış düğümü E-W algoritmasını merkezi olarak çözer ve sonucu diğer düğümlerle paylaşır. Bu durumda bir mesajın büyüklüğü  $O(n \log n)$  bit olacağından dolayı bu algoritmanın toplam bit karmaşıklığı  $O(n^2 \log n)$  bit'tir. Başka bir ifadeyle, tüm düğümlerin komşuluk bilgilerinin merkez düğümle paylaşılmasını gerektirdiğinden, bu çözüm yolunun iletişim ve buna bağlı olarak enerji maliyetleri yüksektir. Maliyeti azaltmak amacıyla bu çalışmada geliştirilen MCO algoritmasının tasarımı bir sonraki bölümde verilmiştir.

### B. MCO Algoritması

MCO algoritmasında sıradan düğümler ilk adımda tüm komşuluk bilgisi yerine, yalnızca en düşük ağırlığa sahip komşusunun ağırlığını çıkış düğümüne gönderir. Çıkış düğümü algoritmayı çalıştırırken kapsayan ağacın mevcut durumunu, değişiklikleri kontrol eder ve kapasite kısıtının aşılmasını engeller. Bu amaçla KEKA tablosunu tutar. Diğer düğümlerden topladığı bilgilerle ödünleşme değerlerini hesaplar ve hangi alt ağaçların birleşeceğine karar verir. Kapasite kısıtı sebebiyle bağlanamayan alt ağaçların olması durumunda gerekli bilgileri edinmek amacıyla diğer düğümlerle  $O(\log n)$  bit uzunluklu mesajlarla haberleşir. Bu sebepten dolayı toplam bit karmaşıklığı  $O(n \log n)$  bit'tir. Çözümü bulduktan sonra her bir düğüme ebeveyninin düğüm numarasını GÜNCELLE mesajıyla gönderir. Kendisine doğrudan bağlı kalan düğümlere BİTTİ mesajı gönderir. Mesaj tiplerinin detaylı açıklamaları aşağıda yapılmıştır. Algoritmanın adımları Algoritma 1 ve Algoritma 2'de verilmiştir.

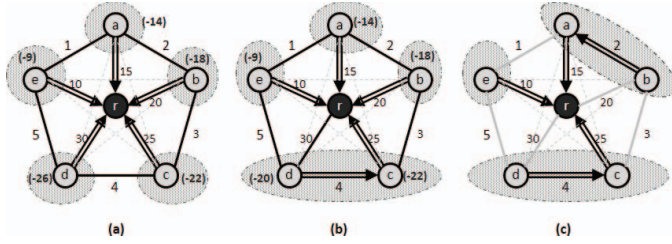
- **EK-AĞIRLIK:** Çıkış düğümü haricindeki düğümlerden (sıradan düğümler) çıkış düğümüne gönderilen mesaj tipidir. Mesajı gönderen düğümün en küçük ağırlığa sahip

### Algoritma 1 Çıkış düğümü için MCO algoritması.

- Adım 1:** EK-AĞIRLIK mesajlarını topla. Gelen bilgilere göre KEKA tablosundaki ödünleşme değerlerini güncelle.
- Adım 2:** Maksimum kapasiteye ulaşan alt ağaçlardaki düğümlerin KEKA tablosundaki ödünleşme değerlerini SONSUZ olarak belirle.
- Adım 3:** En küçük ödünleşme değerine sahip düğümü (SeçilenDüğüm) belirle. En küçük ödünleşme değeri negatif değil ise çocuklar listesinde olmayan düğümlere GÜNCELLE, diğer tüm düğümlere BİTTİ mesajı gönder ve algoritmayı sonlandır.
- Adım 4:** SeçilenDüğüm'ün bağlı olduğu alt ağaçtaki (SeçilenAltAğaç) düğümler ile bu düğümün EK-Komşusunun bağlı olduğu alt ağaçtaki (BağlananAltAğaç) düğümlerin toplamı kapasite kısıtını aşarsa veya döngü kısıtı sağlanmıyorsa 1. adıma geri dön.
- Adım 5:** SeçilenAltAğaç'taki tüm düğümleri çocuklar listesinden çıkar. SeçilenAltAğaç'taki düğümleri BağlananAltAğaç'a ekle ve KEKA tablosunu yeni duruma göre güncelle. SeçilenDüğüm'e DEVAM mesajı gönder. 1. adıma geri dön.

### Algoritma 2 Sıradan düğümler için MCO algoritması.

- Adım 1:** Komşuları ağırlıklarına göre artan şekilde sırala.
- Adım 2:** En küçük ağırlığa sahip komşuyu EK-AĞIRLIK mesajı ile çıkış düğümüne gönder.
- Adım 3:** Çıkış düğümünden gelen her mesaj için, mesaj tipi:  
**DEVAM ise:** Sıralı komşu listesinde sıradaki komşunun numarasını çıkış düğümüne EK-AĞIRLIK mesajı ile gönder.  
**GÜNCELLE ise:** Ebeveyn bilgisini güncelle. Algoritmayı sonlandır.  
**BİTTİ ise:** Çıkış düğümünü ebeveyn olarak belirle. Algoritmayı sonlandır.



Şekil 1.  $C = 2$  kapasiteli bir çizgede MCO Algoritmasının çalışması.  $r$ , çıkış düğümüdür. Çift çizgili yönlü kenarlar mevcut kapsayan ağacın ebeveyn-çocuk ilişkisini ifade eder. Gri aralıklı kenarların ağırlıklarının büyük bir değer olduğunu, diğer kenarların siyah düz çizgiyle gösterildiğini varsayalım. Kenarların üstündeki rakamlar kenarın ağırlığını ifade eder. (a)'da başlangıçta yıldız topolojiye sahip ağaç gösterilmiştir. Her bir alt ağaç gri arkaplanlı alanla gösterilmiştir. Düğümlerin üstünde ayrıca içindeki rakamlar düğümlerin başka bir ağaca bağlanma maliyetlerini (ödünleşme) gösterir. Ödünleşme değeri en küçük olan  $d$  düğümü  $c$ 'ye bağlanır (b). Sonraki adımda  $d$  ve  $c$  düğümleri en küçük ödünleşme değerlerine sahip olmalarına rağmen kapasite kısıtı sebebiyle başka bir ağaca bağlanamazlar. (c)'de algoritma sonunda çıkan çözüm gösterilir. MCO algoritmasında gri aralıklı kenarların çıkış düğümü tarafından bilinmesine gerek yoktur.

bağlantıyla bağlı olduğu komşusunun düğüm numarası ve bağlantı ağırlığı bilgilerini içermektedir.

- **DEVAM:** Çıkış düğümünden diğer düğümlere, adaylarını değiştirmelerini istemek için gönderdiği mesajdır. Mesaj tipi dışında ek bir bilgi taşımaz.
- **GÜNCELLE:** Çıkış düğümünün diğer düğümlere algoritmanın bittiğini ve yeni ebeveynlerinin hangi düğüm olduğunu bildirmek için gönderdiği mesajdır. Düğümün

yeni ebeveyninin düğüm numarasını içerir.

- **BİTTİ:** Çıkış düğümünün diğer düğümlere algoritmanın bittiğini ve ebeveynlerinin değişmediğini (doğrudan çıkış düğümüne bağlı olduklarını) bildirdiği mesajdır. Mesaj tipi dışında ek bir bilgi taşımaz.

## IV. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu çalışmada önerilen MCO algoritması TinyOS işletim sisteminin benzetim ortamı olan TOSSIM [22] üzerinde gerçekleştirilmiştir. Fiziksel katmanda IEEE 802.15.4 standartları kullanılmış, ortam erişim katmanında ise kenar çizelgeleme tabanlı zaman bölümlü çoklu erişim (İng. edge scheduling based time division multiple access) protokolü kullanılmıştır. MCO algoritmasının performansının karşılaştırılması amacıyla merkezi olarak çalışan E-W algoritması (MERKEZİ) TOS-SIM benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. MCO ve MERKEZİ algoritmalarının ürettiği kapsayan ağaçlar aynı olduğu için algoritmaların enerji verimlilikleri karşılaştırılmıştır. 50, 100, 150, 200 ve 250 düğümlük ağlar için kapasite kısıtı 5, 10 ve 15 olarak verilmiştir.

Tablo I  
HARCANAN ENERJİ MİKTARININ DÜĞÜM SAYISINA BAĞLI DEĞİŞİMİ (KAPASİTE KISITI:5)

MERKEZİ			
Düğüm Sayısı	Toplam Gönderilen Mesaj (Byte)	Toplam Alınan Mesaj (Byte)	Harcanan Enerji (mJ)
50	5057	9590	252.8159
100	20109	38610	1013.3513
150	45156	87189	2283.7858
200	80229	155630	4069.7954
250	125293	243747	6367.6092
MCO			
Düğüm Sayısı	Toplam Gönderilen Mesaj (Byte)	Toplam Alınan Mesaj (Byte)	Harcanan Enerji (mJ)
50	1186	5719	117.9192
100	3466	21967	433.3760
150	4598	46622	870.2686
200	6444	81845	1498.5358
250	6499	124953	2227.8759

Tablo II  
HARCANAN ENERJİ MİKTARININ DÜĞÜM SAYISINA BAĞLI DEĞİŞİMİ (KAPASİTE KISITI:10)

MERKEZİ			
Düğüm Sayısı	Toplam Gönderilen Mesaj (Byte)	Toplam Alınan Mesaj (Byte)	Harcanan Enerji (mJ)
50	5077	9745	255.7938
100	20153	39347	1026.5935
150	45229	88805	2312.4002
200	80301	158024	4111.5370
250	125389	247515	6432.9967
MCO			
Düğüm Sayısı	Toplam Gönderilen Mesaj (Byte)	Toplam Alınan Mesaj (Byte)	Harcanan Enerji (mJ)
50	1276	5944	123.3365
100	2586	21780	414.4187
150	7042	50618	981.6597
200	5228	82950	1495.3762
250	9500	131626	2394.4968

Bir düğümün harcadığı toplam enerji aldığı ve gönderdiği mesaj boyutu ile orantılıdır. Harcanan enerji  $((0.17) * \text{toplam gönderdiği mesaj boyutu} + (0.16) * \text{toplam aldığı mesaj boyutu})$

toplam aldığı mesaj boyutu)/31.25) \* 3.3 formülü ile hesaplanabilmektedir. Düğüm sayısının veya kapasite kısıtının artması ile MERKEZİ algoritmasının harcadığı ortalama enerji miktarı MCO algoritmasından daha fazla olduğu öngörülmektedir. Tablo I, II ve III incelendiğinde bu öngörünün doğruluğu görülmektedir. Tablo I’de MCO ve MERKEZİ algoritmanın 5 kapasite kısıtlı çizgelerde, Tablo II’de 10 kapasite kısıtlı çizgelerde, Tablo III’de 15 kapasite kısıtlı çizgelerde bulunan düğümlerin harcamış oldukları toplam enerji miktarının düğüm sayısına bağlı değişimi gösterilmiştir. Düğüm sayısının artmasıyla her iki algoritmanın çalışması esnasında düğümlerin harcadıkları enerji miktarı artmaktadır. Tablo I incelendiğinde MCO algoritmasının 5 kapasite kısıtlı çizgelerde harcadığı enerji miktarı MERKEZİ algoritmanın harcadığı enerji miktarına göre yaklaşık 3 kat daha az olduğu görülmektedir. MCO algoritmasının 10 ve 15 kapasite kısıtlı çizgelerde harcadığı enerji miktarı MERKEZİ algoritmanın harcadığı enerji miktarına göre yaklaşık 2.7 kat daha az olduğu görülmektedir. Bu şekillerde görüldüğü üzere MCO algoritmasının enerji etkinliği MERKEZİ’ye göre oldukça iyidir.

Tablo III  
HARCANAN ENERJİ MİKTARININ DÜĞÜM SAYISINA BAĞLI DEĞİŞİMİ (KAPASİTE KISITI:15)

MERKEZİ			
Düğüm Sayısı	Toplam Gönderilen Mesaj (Byte)	Toplam Alınan Mesaj (Byte)	Harcanan Enerji (mJ)
50	5081	9764	256.1866
100	20169	39495	1029.3814
150	45249	89100	2317.7436
200	80337	158735	4124.1963
250	125425	248334	6447.4808
MCO			
Düğüm Sayısı	Toplam Gönderilen Mesaj (Byte)	Toplam Alınan Mesaj (Byte)	Harcanan Enerji (mJ)
50	1889	6571	144.9349
100	3652	22978	453.7969
150	5046	48897	916.7495
200	8988	87386	1637.8264
250	9018	131927	2390.9297

## V. SONUÇ

Kapasite kısıtlı en küçük kapsayan ağaç problemi için literatürde birçok merkezi algoritma sunulmasına rağmen bilgelerimiz dahilinde TDA ortamına uygun enerji-etkin bir algoritma bulunmamaktadır. Buna ek olarak bilgilerimiz dahilinde TDA için hem yük dengesini sağlayan hem de enerji etkin patikalar oluşturan topoloji kontrol tekniği bulunmamaktadır. Bu çalışmamızda sezgisel kapasite kısıtlı en küçük kapsayan ağaç algoritmalarından Esau-Williams algoritmasıyla aynı karar verme yöntemine sahip ve TDA ortamı için tasarlanmış enerji-etkin MCO algoritmasının anlatımı verilmiş ve benzetim ortamındaki sonuçları değerlendirilmiştir. Algoritmanın çalıştırılıp MERKEZİ algoritmayla karşılaştırılmasıyla elde edilen sonuçların değerlendirilmesiyle, düğümlerin harcadıkları enerji miktarı açısından tasarlanan MCO algoritmasının TDA’da yük dengesini gözetken ve enerji-etkin patikaları seçen bir topoloji kontrol algoritması olduğu sonucuna varılmıştır.

## VI. BİLGİLENDİRME

Yazarlar, 215E115 nolu proje ve 2211-BİDEB bursu kapsamındaki desteklerinden ötürü TÜBİTAK’a teşekkür eder.

### KAYNAKLAR

- [1] H. Karl and A. Willig, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, 2005.
- [2] C. H. Papadimitriou, “The complexity of the capacitated tree problem,” *Networks*, vol. 8, no. 3, pp. 217–230, 1978.
- [3] H. E. Ruiz y Ruiz, “The capacitated minimum spanning tree problem,” PhD Thesis, 2013.
- [4] P. Santi, “Topology control in wireless ad hoc and sensor networks,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 37, no. 2, pp. 164–194, 2005.
- [5] M. Li, Z. Li, and A. V. Vasilakos, “A survey on topology control in wireless sensor networks: Taxonomy, comparative study, and open issues,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 12, pp. 2538–2557, 2013.
- [6] K. M. Chandy and T. Lo, “The capacitated minimum spanning tree,” *Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 173–181, 1973.
- [7] L. R. Esau and K. C. Williams, “On teleprocessing system design, part ii: A method for approximating the optimal network,” *IBM Systems Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 142–147, 1966.
- [8] Y.-J. Lee and M. Atiquzzaman, “Least cost heuristic for the delay-constrained capacitated minimum spanning tree problem,” *Computer Communications*, vol. 28, no. 11, pp. 1371–1379, 2005.
- [9] T. Öncan and İ. K. Altinel, “Parametric enhancements of the esau-williams heuristic for the capacitated minimum spanning tree problem,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 60, no. 2, pp. 259–267, 2009.
- [10] M. Battarra, T. Öncan, İ. Altinel, B. Golden, D. Vigo, and E. Phillips, “An evolutionary approach for tuning parametric esau and williams heuristics,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 63, no. 3, pp. 368–378, 2012.
- [11] R. K. Ahuja, J. B. Orlin, D. Sharma *et al.*, *New neighborhood search structures for the capacitated minimum spanning tree problem*. Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [12] R. K. Ahuja, J. B. Orlin, and D. Sharma, “Multi-exchange neighborhood structures for the capacitated minimum spanning tree problem,” *Mathematical Programming*, vol. 91, no. 1, pp. 71–97, 2001.
- [13] R. Kawatra and D. Bricker, “A multiperiod planning model for the capacitated minimal spanning tree problem,” *European Journal of Operational Research*, vol. 121, no. 2, pp. 412–419, 2000.
- [14] G. Zhou, Z. Cao, J. Cao, and Z. Meng, “A genetic algorithm approach on capacitated minimum spanning tree problem,” in *Computational Intelligence and Security, 2006 International Conference on*, vol. 1. IEEE, 2006, pp. 215–218.
- [15] I. Gamvros, S. Raghavan, and B. Golden, “An evolutionary approach to the multi-level capacitated minimum spanning tree problem,” in *Telecommunications Network Design and Management*. Springer, 2003, pp. 99–124.
- [16] E. Ruiz, M. Albareda-Sambola, E. Fernández, and M. G. Resende, “A biased random-key genetic algorithm for the capacitated minimum spanning tree problem,” *Computers & Operations Research*, vol. 57, pp. 95–108, 2015.
- [17] M. C. de Souza, C. Duhamel, and C. C. Ribeiro, “A grasp heuristic for the capacitated minimum spanning tree problem using a memory-based local search strategy,” in *Metaheuristics: Computer decision-making*. Springer, 2003, pp. 627–657.
- [18] P. Martins, “Enhanced second order algorithm applied to the capacitated minimum spanning tree problem,” *Computers & operations research*, vol. 34, no. 8, pp. 2495–2519, 2007.
- [19] T. N. Bui and C. M. Zrnica, “An ant-based algorithm for finding degree-constrained minimum spanning tree,” in *Proc. of the 8th annual conf. on Genetic and evolutionary computation*. ACM, 2006, pp. 11–18.
- [20] M. Reimann and M. Laumanns, “A hybrid aco algorithm for the capacitated minimum spanning tree problem,” in *Hybrid Metaheuristics*, 2004, pp. 1–10.
- [21] T. Öncan, “Design of capacitated minimum spanning tree with uncertain cost and demand parameters,” *Information Sciences*, vol. 177, no. 20, pp. 4354–4367, 2007.
- [22] P. Levis, N. Lee, M. Welsh, and D. Culler, “Tossim: Accurate and scalable simulation of entire tinyos applications,” in *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, ser. SenSys ’03. New York, NY, USA: ACM, 2003, pp. 126–137.