Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 27(2), 173-186, 2021

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Enerji hasadı yapan düğümlerin bulunduğu telsiz duyarga ağlarının yaşam süresini arttıran yeniden oluşturulabilen bir dağıtık bağlı baskın küme algoritması

A new reconstructable distributed connected dominating set algorithm for extending the lifetime of wireless sensor networks including energy harvester nodes

Elif HAYTAOĞLU[1], Ömer GÜLEÇ[2], Mustafa TOSUN[3]*

[1]Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
eacar@pau.edu.tr
[2]Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
omer@pau.edu.tr
[3]Uluslarası Bilgisayar Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
mustafa.tosun@ege.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 31.10.2019 Düzeltme Tarihi/Revision: 10.02.2020 doi: 10.5505/pajes.2020.83030
Kabul Tarihi/Accepted: 04.03.2020 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Telsiz duyarga ağları sağlık, ziraat, güvenlik ve eğlence gibi çeşitli alanlarda fayda sağlamaktadır. Bu ağları oluşturan düğümlerin enerji kaynaklarının kısıtlı olmasından dolayı enerjilerini etkin bir şekilde kullanmaya yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda genel olarak, düğümlerin nöbetleşe sıra ile çalışması ya da sistemde enerji etkin bir iletişim omurgası kullanılması üzerinde durulmuştur. Telsiz duyarga ağlarında iletişim omurgası olarak genellikle bağlı baskın kümeler kullanılmaktadır. Ayrıca, kendi enerjisini üreten düğümlerin de telsiz duyarga ağı sistemlerinde kullanılarak bu sistemlerin yaşam süresinin arttırılması literatürdeki bazı çalışmalarda düşünülmüştür. Bu çalışmada telsiz duyarga sistemlerinin en büyük problemlerinden olan enerji sorunu incelenerek güneş panellerinden kendi enerjisini üretebilen ve üretemeyen düğümlerin olduğu telsiz duyarga ağlarının yaşam sürelerinin arttırılması için yeniden kullanılabilen yeni bir dağıtık bağlı baskın küme algoritması önerilmiştir. Bir düğümde veya düğümlerin bazılarında enerji tükenmesi gerçekleştiğinde belirli bir miktar beklenerek, çalışan düğümlerde bir kopma gerçekleşmemişse önerilen algoritma tekrar çalıştırılmaktadır. Önerilen algoritma, telsiz duyarga ağ alanında sıklıkla kullanılan Cooja tabanlı SensEH benzetim ortamında uygulanmıştır. Önerilen algoritma ve rakip algoritma oluşturulan bağlı baskın kümelerin kullanıldığı sistemlerdeki yaşam süreleri ile algoritmaların zaman ve enerji tüketim maliyeti kapsamlı benzetim analizleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre önerilen algoritmanın toplam yaşam süresini rakip algoritmaya göre yaklaşık olarak iki katına çıkartabildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Telsiz duyarga ağları, Bağlı baskın küme, Enerji hasadı.

Abstract

Wireless sensor networks are utilized in many different areas such as health, agriculture, security, and entertainment. Since the nodes that constitute wireless sensor networks have limited energy resources, many studies have been carried out on use of their resources in an energy efficient manner. These studies generally focused on duty cycle techniques or constructing energy efficient communication backbones. In wireless sensor systems, the connected dominating sets are generally considered to be used as a backbone. In addition, the deployment of the nodes that harvest their own energy in wireless sensor networks has also been considered in recent studies. In this study, a new distributed algorithm is proposed to construct reusable connected dominating set for wireless networks that possess energy harvester nodes and ordinary nodes which could not harvest its energy. Whenever an energy depletion problem in a node or in more than one node occurs, after a specific interval, the proposed algorithm is re-employed on the alive nodes unless wireless sensor network is disconnected. The proposed algorithm was implemented on SensEH simulation environment based on Cooja which is one of the most commonly used tools in the wireless sensor network area. The new algorithm and the rival algorithm in the area are analyzed with respect to the lifetime of the systems together with the time and the energy consumptions required by the algorithms. According to the results, it is observed that the proposed algorithm can double the total lifetime compared to the rival algorithm.

Keywords: Wireless sensor networks, Connected dominating set, Energy harvesting.

1 Giriş

Telsiz duyarga ağları (TDA) günümüzde çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle ziraat alanında, ürün yetiştirme sürecini kolaylaştırmak ve ürün verimini arttırmak için çeşitli TDA sistemleri oluşturulmuştur [1]-[3]. Bunun dışında doğal afet ya da insan hatalarından kaynaklanan felaketlerin önüne geçebilmek için çeşitli TDA sistemleri kullanılmaktadır. Bu tür sistemler bir felaket gerçekleşmeden önce çeşitli yollarla yetkilileri uyarmak amacıyla tasarlanmaktadır. Bu sistemlere, kömür madenlerinde telsiz duyarga ağı tabanlı yangın önleme sistemi [4] ve erken deprem uyarı sistemi [5] gibi çalışmalar örnek olarak verilebilir. Bunun dışında TDA sistemleri sağlık alanında da kullanılmaktadır [6],[7]. Sağlık alanındaki çalışmalarda, hastaların nabız, vücut sıcaklığı, terleme miktarları veya diğer biyofiziksel/biyokimyasal özellikleri

*Yazışılan yazar/Corresponding author

çeşitli duyargalarla ölçülerek ileride oluşabilecek rahatsızlıkların veri madenciliği yöntemlerinin de yardımıyla engellenmesi hedeflenmektedir.

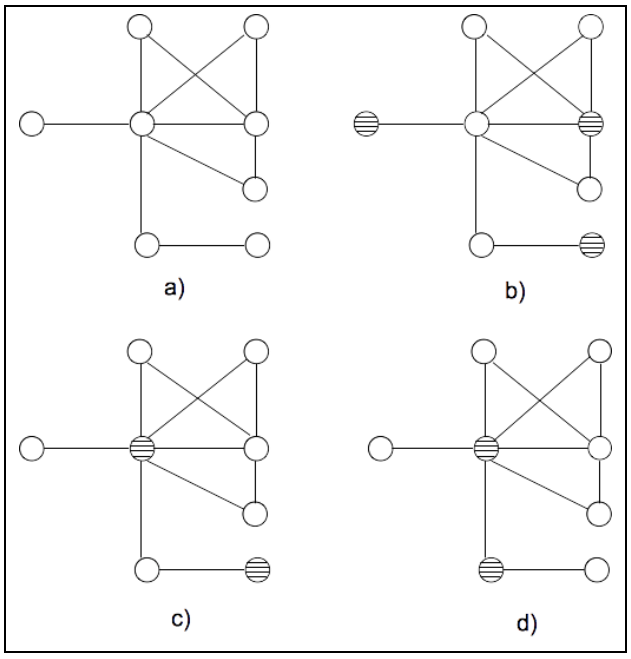
TDA'lar birbirleri ile iletişimde bulunabilen düğümlerden oluşmaktadır. Bu düğümler kullanım alanlarına göre çeşitli duyargalarla donatılmıştır. Bu duyargalarla genellikle çevredeki fiziksel ya da kimyasal değişkenler belirli süre aralıklarıyla ölçülerek bir ana bilgisayara iletilmektedir. Genel çerçevede incelenecek olursa, düğümler veri algılama ve ardından algılanan veriyi iletmekle yükümlüdür. Bu düğümler enerji kaynağı olarak içlerinde bulunan pilleri kullanmaktadır. Tipik bir düğüm iki adet kalem pil ile çalışmaktadır [8]. TDA'ların yaşam sürelerinin uzun olması için veri algılama ve iletme işlemlerinin mümkün olduğunca az enerji harcaması ile gerçekleştirmeleri büyük önem arz etmektedir.

TDA sistemleri çeşitli alanlarda büyük kolaylıklar sağlamasına rağmen bu sistemlerin kurulmasında ve işleyişinde bazı zorluklar bulunmaktadır. Örneğin, düğümlerin alana ne şekilde yerleştirileceği kararı, özellikle geniş alanlarda sistem performansını etkileyen bir durumdur. Bunun yanında, TDA'ları oluşturan düğümlerin enerji kaynakları pillerin kapasitesi ile kısıtlandığından, sistemde çalıştırılan dağıtık algoritmanın ve iletişim altyapısının enerji-etkin bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Sistemdeki düğümlerin enerjilerinin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için literatürde nöbetleşe çalışma (*duty-cycle)* olarak adlandırılan bir teknik uygulanmaktadır [9]. Bu uygulama ile düğümler sadece işleri olduğunda aktif olarak çalışmakta diğer durumlarda ise uyku modunda bulunarak düşük seviyede enerji harcaması gerçekleştirmektedir. Ancak bunun gibi önlemler, TDA üzerinde işletilecek uygulamanın büyük miktarda enerji kullanımı gerçekleştirmesi durumunda çok etkili olmamaktadır. Dolayısıyla, TDA üzerinde kullanılacak dağıtık uygulamanın iletişiminden kaynaklanan enerji kullanımının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu kapsamda, düğümler tarafından kullanılacak iletişim omurgasının yapısı, düğümler üzerinde çalıştırılacak algoritmanın iletişim maliyetini büyük ölçüde etkileyeceğinden, bu yapının az enerji kaybı yaşatacak şekilde dağıtık olarak oluşturulabilmesi literatürdeki açık konulardan bir tanesidir. Bu iletişim altyapısı genellikle çizge teorisinde de bilinen **Bağlı Baskın Kümeler (BBK)** ile oluşturulmaktadır [10]-[13]. Bunun dışında, BBK iletişim yapılarının üzerine nöbetleşe çalışma uygulamalarının da kullanıldığı karma bir yaklaşım da çalışmalar arasında bulunmaktadır [14].

TDA'ların yaşam süresinin arttırılmasında yukarıda bahsedilen yöntemlerin dışında, kendi enerjilerini üretebilen düğümlerin kullanılması da düşünülmüştür [15],[16]. Bu sistemlerde TDA'yı oluşturan düğümlerden bazıları kendi enerjilerini üreten düğümler olabilmektedir. Bu düğümler güneş, rüzgâr ve radyo frekansı gibi çevresel kaynakları kullanarak kendi enerjilerini üretebilen araçlarla donatılmıştır. Bu tip sistemlerde ağın enerji etkinliğini arttıracak BBK'ların oluşturulması önceki problemlerden değişik bir şekilde ele alınması gereken bir problemdir. Bu tarz sistemlerde, kendi enerjisini üreten hasatçı düğümlerin BBK içerisine girip girmeyeceğine, kendi enerjisini üretmeyen düğümlerin BBK içerisine seçilme yönteminden daha farklı bir şekilde karar vermek gerekmektedir. Benzer şekilde, kendi enerjisini üreten düğümlere komşu olan sıradan düğümlerin de BBK içerisine seçilmesi iletişim altyapısının enerji etkinliğinin bir adım öteye götürülebilmesi için daha farklı bir şekilde ele alınmalıdır.

Bir TDA topolojisi, bir $G(V,E)$ çizgesi ile temsil edilebilmektedir. TDA'yı oluşturan düğüm kümesi V (köşe kümesi) ile aralarında doğrudan iletişim gerçekleştirebilen düğüm ikilileri ise E kümesi (kenar kümesi) ile temsil edilebilmektedir. Bir $G(V,E)$ çizgesindeki baskın küme (BK) problemi ise bir $V' \subseteq V$ düğüm altkümesini bulmayı gerektirmektedir, öyle ki bahsedilen V' kümesi içerisine dâhil olmayan düğümlerin, yani $V \backslash V'$ kümesindeki düğümlerin en az bir komşusunun V' içerisinde olması gerekmektedir. Bağlı baskın küme ise BK'dan farklı olarak V' içerisindeki düğümlerin kendi arasında bir ağaç oluşturmasını diğer bir deyişle V' düğümlerinden bir alt çizge oluşturulduğunda bu çizgenin bağlı olmasını ve döngü içermemesini gerektirmektedir. Her düğüme bir ağırlık atandığında, oluşturulabilecek minimum ağırlıklı BK'yı ya da BBK'yı bulmak ise NP-Zor bir problemdir [17].

Şekil 1(a)'da aralarında iletişim hatlarının kenarlar ile düğümlerin ise köşeler ile ifade edildiği bir örnek TDA gösterilmiştir. Şekil 1(b)'de ise çizgili düğümler olası bir BK'yı (baskın küme) oluşturabilirken, Şekil 1(c)'de minimum sayıda düğüm içeren bir BK gösterilmiştir. Görüldüğü gibi ağdaki tüm düğümler ya baskın kümeye dâhildir ya da baskın düğüm kümesinden en az bir düğüm ile komşuluğu bulunmaktadır. Şekil 1(d)'de ise baskın düğümlerin bağlı bir şekilde bulunduğu BBK örneği gösterilmektedir. Görüldüğü üzere bağlı kümeye seçilen çizgili düğümler kendi aralarında bir ağaç oluşturmaktadır.

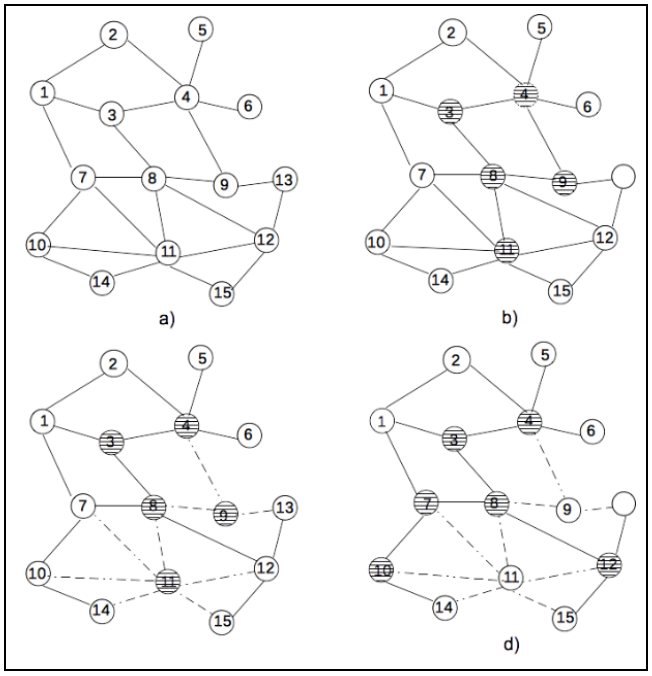


Şekil 1. Örnek bir çizge üzerinde BBK'nın gösterimi.

Figure 1. The connected dominating set illustration.

Bir TDA içerisinde BBK'lar oluşturulduktan sonra tüm düğümlerin mesajlarının iletilmesi işlemleri baskın kümeye dâhil olan düğümler tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, aralarında enerji hasadı yapan düğümlerin de bulunduğu TDA'lar için yeni bir tekrar edilebilir dağıtık bağlı baskın küme (TBBK) algoritması önerilmektedir. Şekil 2(a)'da örnek bir TDA topolojisi verilmiştir. Bu topolojide bir BBK, Şekil 2(b)'de çizgili düğümler ile kurulabilmektedir. Bu BBK'daki 9 ve 11 No.lu düğümlerin enerjisi biterek iletişim hatları koptuğunda geriye kalan iletişim ağı hala birbirine

bağlıdır, yani enerjisi olan tüm düğümler birbirleriyle iletişim kurabilmektedir. Bu şekildeki bir topolojide yeni bir BBK Şekil 2(d)'deki çizgi ile gösterilmiş düğümler ile oluşturulabilmektedir. Ancak, Şekil 2(b)'de 4 No.lu düğümün enerjisi bitmiş olması durumunda geriye kalan düğümlerin oluşturduğu topoloji bağlı olmayacaktır. Şekil 2(d)'de ise 4, 7, 8, 10 ya da 12 No.lu düğümlerin birinin enerjisinin bitmesi ağın bağlı olma özelliğini bozacaktır.



Şekil 2. Tekrar edilebilir BBK.

Figure 2. The reconstructable connected dominating set.

Shi ve diğ. ilk defa enerji hasadı gerçekleştiren düğümlerin de içinde bulunduğu TDA sistemlerinin yaşama süresini iyileştiren tekrar edilebilir dağıtık bir BBK algoritması önermişlerdir [18]. Bahsedilen çalışmada, enerji hasadı yapan düğümler sadece BK oluşturma fazındaki ağırlık hesaplamasında sıradan düğümlerden farklılık göstermektedir. Shi ve diğ.'nin çalışmalarında düğümlerin enerji üretiminin ve tüketiminin modellenmesi için basite indirgenmiş denklemler kullanılmış olup, ilgili çalışmada önerilen algoritma değerlendirilirken enerji hasadı ve harcama miktarının ölçülmesi için gerçeğe yakın benzetim araçları (*simulator tools*) kullanılmamıştır [18].

Burada gerçekleştirilen çalışmada, TDA'larda enerjisi biten düğümlerin BBK yapısını bozması durumunda oluşan yeni topoloji bağlı kaldığı müddetçe yeni BBK'lar oluşturacak (tekrar edilebilir) yeni bir dağıtık algoritma olan TBBK (tekrar edilebilir bağlı baskın küme) algoritması önerilmektedir. Bu yeni algoritmada baskın düğümler seçilirken enerji hasadı yapan düğümlerin komşularına göre enerji seviyesi ve sıradan düğümlerin enerji hasadı yapan düğümlere komşulukları gibi kriterler dikkate alınmıştır. Bu yönüyle literatürdeki diğer BBK algoritmalarından ayrılmaktadır. Önerilen algoritma SensEH benzetim aracında [19] gerçekleştirilerek oluşturulan TDA sistemlerinin yaşam süreleri ve BBK oluşturulması sırasında geçen süre ve bu süreçte düğümler tarafından harcanan enerjiler ölçülmüştür. Elde edilen bulgular, Shi ve diğ. tarafından önerilmiş LMW [18] algoritmasından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Önerilen çalışmanın literatüre getirdiği katkılar şu şekilde sıralanabilir:

1. Literatürde TDA'lar için çok sınırlı sayıda tekrar edilebilir bağlı baskın küme oluşturma algoritması tasarlanmıştır. Bunlar arasından hem TBBK tasarımı hem de hasatçı düğümün bulunduğu ise tek bir çalışma bulunmaktadır [18]. İlgili çalışmada sadece BK oluşturma fazında hasatçı düğüm ile sıradan düğüm arasındaki farklılığı göz önünde bulundurmaktadır. Bunun dışında hasatçı düğümlerin olduğu ağlar üzerine herhangi bir TBBK çalışması bulunmamaktadır. Bu çalışmada ise iki farklı tipteki düğüme dağıtık BBK algoritmasının her fazında farklı öncelikler verilerek enerji hasadı yapan düğümlerin varlığından mümkün olduğunca istifade edilmeye çalışılmıştır,
2. Bu çalışmada düğümlerin BBK'ya seçilmeleri için literatürde daha önce kullanılmayan yeni sezgisel ağırlık parametreleri önerilmiştir. Bu sezgisel parametrelerin hesaplanmasında düğümlerin kalan enerjilerinin yanı sıra hasatçı olup olmadıkları ve hasatçı komşularının birbirleriyle komşulukları göz önünde bulundurulmuştur,
3. Bu çalışmada düğümlerin gerçekleştirdiği işlerle (yerel işlemler ve haberleşme işlemleri gibi) uyumlu bir şekilde enerji tüketimini algılayan ve hasatçı düğümlerin enerji üretim miktarlarını üzerlerindeki güneş panelinin özeliklerine bağlı olarak ayrıntılı bir şekilde hesaplayan SensEH aracı [19] kullanılmıştır. Böylece, yeni BBK algoritmasının ve rakip algoritmanın (LMW algoritması [18]) gerçekçi bir şekilde karşılaştırılması SensEH benzetim aracı üzerinden gerçekleştirilmiştir,
4. Benzetimler sonucunda önerilen algoritmanın BBK oluşturmak için %37 oranında daha yüksek enerji harcadığı bununla beraber yaşam süresini ise yaklaşık iki katına çıkartabildiği görülmektedir.

Önerilen algoritma, hem TBBK'nın çalışıldığı hem de hasatçı düğümlerin bulunduğu tek çalışma olan Shi ve diğ.'nin çalışması ile karşılaştırılmıştır. Benzetim ortamında yeni TBBK algoritması ve rakip algoritma (LMW algoritması [18]) çalıştırılmış, BBK'nın içerisinde rol alan bir düğümün enerjisinin bitmesi durumunda bozulan iletişim yapısının yeniden kurulması için tüm ağ bu düğüm kaybından haberdar edilmiştir. Bu noktada, TDA'nın yaşam süresinin artırılması için ağın bağlı olup olmadığının kontrolü yapılmış olup hayatta kalan düğümler halen bağlı bir çizge oluşturuyorsa BBK algoritmaları yeni baştan çalıştırılmıştır. Her iki algoritma BBK'ları oluşturduktan sonra çevredeki ortamdan algıladıkları fiziksel özellikleri ana bilgisayara BBK üzerinden gönderen örnek bir TDA uygulaması çalıştırarak karşılaştırılmıştır.

2 İlgili çalışmalar

Literatürde telsiz duyarga ağlarına yönelik farklı alanlarda birçok uygulama geliştirilmiştir. Telsiz duyarga ağları; biyoloji, kimya ve askeriyede; canlı takibi, patlayıcı analizi, hedef takibi ve savaş alanlarının izlenmesi gibi görevlerin gerçekleştirilmesi için kullanılmaktadır [20],[21]. Bunun dışında TDA'lar sağlık alanında; EKG, vücut sıcaklığı, tansiyon gibi sağlık verilerinin, akıllı hastanelerde acil uyarı sistemleri üzerinden izlenebilmesi, toplanabilmesi ve paylaşılabilmesi için kullanılmaktadır [22],[23].

TDA'lar içerisindeki düğümlerin birbirleri ile haberleşme yöntemi, mesaj alan bir düğümün bu mesajı tüm komşularına ilettiği sel tipi model (*flooding*) ile ya da TDA'daki düğümlerin bazılarının bir iletişim yapısının içerisinde görev alması ile gerçekleştirilmektedir. Bahsedilen iletişim yapıları literatürde bağlı baskın kümeler (BBK'lar) ile sağlanmaktadır. İletişim omurgası olarak BBK'ların kullanılması ilk olarak [24]'te gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen çalışmanın ardından, telsiz duyarga ağlarında iletişim omurgasını oluşturan BBK'ların elde edilmesi amacıyla çeşitli başka yaklaşımlar da önerilmiştir. Bu yaklaşımlardan bir tanesi, TDA üzerinde önce dağıtık bir şekilde maksimal bağımsız küme (*maximal independent set*) bulup ardından seçilen düğümleri bağlı hale getirmek şeklindedir [25]. Literatürdeki temel yaklaşımlardan bir diğeri ise ilk aşamada ağda dağıtık bir şekilde baskın küme bulmak ve ardından tek bir ağaç oluşturana kadar bu baskın düğümleri diğer düğümleri de kullanarak bağlama işini gerçekleştirmektir.

Yukarıda bahsedilen maksimal bağımsız küme yaklaşımına örnek olarak [25] ve [26]'daki çalışmalar verilebilir. Bahsedilen çalışmalarda ilk olarak bağımsız küme oluşturulup ardından bağımsız kümede bulunmayan düğümlerden bazılarının da baskın olarak seçilmesiyle baskın kümeler oluşturulmaktadır. Bu yaklaşımlarda, ikinci fazda seçilmesi gereken düğüm miktarı diğer yaklaşımlara göre daha yüksek çıkmaktadır.

[10],[11],[13] ve [27]'de önerilen algoritmalarda ise öncelikle baskın küme oluşturulup ardından baskın kümede olmayan düğümlerden bazılarının da baskın hale getirilmesi ile bağlı baskın kümeler oluşturulmaktadır. Ancak bu çalışmalarda enerji hasadı yapan düğümlerin bulunduğu ağlar düşünülmemiş, oluşturulan BBK'lar sadece tek bir seferlik, bir düğümün enerjisi bitene kadar test edilmiştir.

Ayrıca, literatürde daha farklı yaklaşımlar kullanarak oluşturulan BBK'lar da mevcuttur [28]-[30]. [28]'de yapılan çalışmada, kök düğümün lider bir düğüm olduğu örten ağaçlar (*spanning tree*) kullanılarak BBK oluşturan iki-fazlı dağıtık bir algoritma geliştirilmiştir. Başka bir çalışmada ise, BBK oluşturulması için budama tabanlı sezgisel bir yaklaşım sunulmuştur [29]. [30]'da gerçekleştirilen çalışmada, α-en az yönlendirme maliyetli BBK (α-MOC-CDS) isimli özel amaçlı bir BBK algoritması tanımlanmıştır. Bu çalışmada, her bir düğüm çifti arasında, bahsedilen algoritma sonucunda oluşturulan BBK içerisinde bulunan ve maliyeti bu düğümler arasındaki en kısa yolun maliyetinin en fazla α katı kadar olan bir yol olduğu ortaya konulmaktadır. İlgili çalışmadaki en önemli amaç her düğüm çifti arasındaki iletişim maliyetini düşük tutabilmektir.

TDA'larda enerji problemi, TDA tabanlı sistemlerin en önemli sorunlardan birisidir. Ağ üzerinde yer alan bir düğümün enerjisinin bitmesi, ağ topolojisinin değişmesine hatta ağın bağlantısız alt ağlara bölünerek yaşam süresinin sona ermesine neden olabilir. Bu da ağın yaşam süresine doğrudan etki etmektedir. Enerji sorununun çözümü için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan en etkin olanlardan bir tanesi çevresel kaynaklardan enerji hasadı yapmaktır. Bu sayede, düğümler şarj edilerek ağın yaşam süresi artırılacaktır. [18]'de gerçekleştirilmiş çalışmada, literatürde ilk defa enerji hasadı yapabilen düğümler için ağın yaşam süresini artırmayı hedefleyen tekrar edilebilir iki aşamalı bir BBK algoritması, LMW ismiyle önerilmiştir. Ayrıca, ilgili çalışmada düğümlerin ortak bir saate sahip olduğu bir algoritma da önerilmektedir. Ancak dağıtık sistemlerde düğümlerin ortak saate sahip olması ekstra mesaj ve zaman karmaşıklığı gerektirmektedir. Bahsedilen algoritmada ilk olarak maksimal bağımsız küme bulunmakta, baskın düğümleri bağlama aşamasında [25]'te önerilmiş olan derin öncelikli arama (*depth first search*) tabanlı algoritma kullanılmaktadır. Bunun dışında BBK oluşturulmasında enerji hasadı yapan düğümlerin bulunması [31]'de de düşünülmüştür. Ancak ilgili algoritma baskın kümeyi bir defaya mahsus oluşturmakta olup düğümlerin enerjisinin bitmesi sonucunda ağın parçalanma durumu oluşmasa bile BBK'nın yeniden oluşturularak yaşam süresinin artırılması hedeflenmemiştir. Ayrıca her hasatçı düğümün, kalan enerjisinin komşularının enerjisi ile kıyaslaması gerçekleştirilmeksizin baskın kümeye seçilmesi önerilmiştir.

Literatürde enerji hasadı yapan TDA'larla ilgili farklı alanlarda çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. TDA'lar için güneş enerjisinden enerji hasadı yapan düğümlerin kullanılması [32]'de önerilmektedir. TDA'ların yönlendirme problemi ile ilgili enerji hasadı yapan düğümlerin bulunduğu çalışmalar da yapılmıştır. Bu kapsamda, enerji hasadı yapabilen TDA'larda uyarlanabilir yönlendirme (*routing*) protokolü tasarımı [33] ve [34]'teki çalışmalarda gerçekleştirilmiştir. [35]'te ise enerji hasadı yapan düğümlerden oluşan TDA'lar için nöbetleşe çalışma yardımı ile enerji yönetimi gerçekleştirilmiştir. Ancak nöbetleşe çalışma yönteminde bazı düğümlerin uyku durumunda olmasından dolayı çalışır durumdaki düğüm mesajlarının ana bilgisayara ulaştırılmasında büyük gecikmeler oluşabilmektedir.

Güneş panellerine sahip TDA düğümleri kullanılarak tarımda su kullanımını optimize eden yeni bir sulama metodunun geliştirilmesi [36] ve tren tünellerinin yapısal durumlarının kontrol edilmesi [37] gibi uygulamaya yönelik çeşitli çalışmalar da mevcuttur.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda, genellikle sadece sıradan düğümlerin bulunduğu ağlarda BBK kurulmaya çalışılmış ya da sadece temel enerji hasat yöntemlerinin kullanıldığı TDA'lardaki özel uygulama alanları üzerinde durulmuştur. Bunun dışında birkaç çalışmada enerji kullanımının optimizasyonunu hedefleyen paket yönlendirme protokolleri önerilmiştir. Bilgilerimiz dâhilinde, enerji hasadı yapan düğümlerin de varlığı düşünülerek TDA'ların yaşam süresini uzatmaya yönelik tekrar edilebilir bir BBK algoritması sadece [18]'deki çalışmada gerçekleştirilmiştir. Ancak, ilgili çalışmada, sadece kalan enerji miktarı göz önünde bulundurulmuş olup enerji hasadı ile ilgili BBK'yı iyileştirebilecek ilave kıstaslar hesaba katılmamıştır. Bunun yanında, bahsedilen çalışmada önerilen LMW algoritması enerji hasadı miktarı ve alınan mesajlar doğrultusunda ilgili miktarda enerji harcaması gerçekleştiren bir benzetim ortamında gerçekleştirilerek incelenmemiştir.

3 Yeni TBBK algoritması

Önerilen dağıtık algoritmanın amacı duyarga düğümleri için bir iletişim omurgası oluşturmak, ayrıca oluşturulan omurga içerisinde bulunan herhangi bir düğümün enerjisinin bitmesi halinde hâlihazırda kullanılan omurganın iletişiminin aksaması durumunda, yani çalışır durumda olan düğümlerin bazılarının omurga üzerindeki iletişim hatlarının kopması hâlinde omurganın yeniden oluşturulmasını sağlamaktır.

TBBK algoritması iki fazdan oluşmaktadır. Algoritmanın ilk fazında düğümlerin her biri kapsayan ya da kapsanan olarak seçilmekte, ikinci fazda ise kapsayan düğümlerin bağlı hale getirilmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde ağda bir BBK yapısı kurulduğunda düğümler kendi uygulamaları süresince

(ziraatta nem ölçümü, jeolojide maden ocaklarındaki gaz miktarlarının ölçümü gibi alana özel uygulamalar) iletişimlerini artık bu BBK yapısının üzerinden gerçekleştirecektir. Düğümler üzerinde çalıştırılan uygulama içerisinde meydana gelen mesaj gönderme-alma ve yerel hesaplama işlemlerinden dolayı belirli bir süre sonra bazı düğümlerin enerji seviyeleri daha hızlı düşebilmektedir. Önerilen algoritmada, bir düğümün yeterli enerjisi kalmadığı için ağdan ayrılması sonucunda ağda bir parçalanma gerçekleşip gerçekleşmeyeceğine karar verilmekte, ağın ikiye ayrılmaması durumunda ise eğer ölen düğüm ya da düğümler bir kapsayan düğüm ise bozulmuş BBK yeniden oluşturulmaktadır. Burada, ağın ikiye ayrılması, hala çalışır durumda olan düğümlerin artık bağlı bir ağ oluşturamamasını ifade etmektedir.

Bu şekilde TBBK algoritması ile ağın ikiye ayrılması (düğümlerin bağlı olmaması) durumu gerçekleşinceye kadar farklı BBK'ların oluşturulması, bunun neticesinde üzerinde çalışan uygulamanın daha uzun bir yaşam süresine sahip olabilmesi amaçlanmaktadır.

Bir düğümün TBBK algoritması boyunca sahip olabileceği durumlar; HSTÇI-BSİZ, HSTÇI-KSNN, HSTÇI-KSYN, SRDN-BSİZ, SRDN-KSNN ve SRDN-KSYN'dır. Bu durumlar Tablo 1'de verilmiştir. Bir düğüm; hasatçı olup baskın kümede hangi rolde olduğu henüz belli değilse; bu durumlardan hasatçı ve belirsiz olduğunu ifade eden HSTÇI-BSİZ durumu ile hasatçı olup baskın küme tarafından kapsanan durumundaki bir düğüm ise hasatçı ve kapsanan olduğunu ifade eden HSTÇI-KSNN durumu ile hasatçı ve baskın küme içerisinde kapsayan durumunda ise hasatçı kapsayanı ifade eden HSTÇI-KSYN durumu ile temsil edilmektedir. Bir düğüm sıradan ise diğer bir deyişle enerji hasadı gerçekleştirmiyorsa ve baskın kümede kapsanan mı kapsayan mı olduğu belirsiz ise SRDN-BSİZ durumu ile düğüm sıradan ve kapsanan durumunda ise SRDN-KSNN durumu ile sıradan ve kapsayan durumunda ise sıradan kapsayanı ifade eden SRDN-KSYN durumu ile temsil edilmektedir.

Tablo 1. Düğümlerin durumları.

Table 1. The states of the nodes.

Durum	Anlamı
HSTÇI-BSİZ	Enerji hasadı yapabilen ve BK içerisindeki rolü henüz belli olmayan düğüm.
HSTÇI-KSNN	Enerji hasadı yapabilen ve BK içerisinde kapsayan bir düğüme komşu olan düğüm.
HSTÇI-KSYN	Enerji hasadı yapabilen BK içerisinde kapsayan olarak belirlenmiş düğüm.
SRDN-BSİZ	Enerji hasadı yapamayan ve BBK içerisindeki rolü henüz belli olmayan düğüm.
SRDN-KSNN	Enerji hasadı yapamayan ve BK içerisindeki kapsayan bir düğüme komşu olan düğüm.
SRDN-KSYN	Enerji hasadı yapıp BK içerisinde kapsayan olarak belirlenmiş düğüm.

Algoritma başladığında düğümler enerji hasadı yapabilme durumuna göre HSTÇI-BSİZ ya da SRDN-BSİZ olarak çalışmaya başlamaktadır. Algoritma sonlandığında, düğüm hasatçı ise HSTÇI-KSYN ya da HSTÇI-KSNN durumunda olmak zorundadır. Düğüm sıradan bir düğüm olduğu takdirde ise algoritma sonucunda SRDN-KSYN ya da SRDN-KSNN durumlarından birini almak zorundadır. Ancak sonraki diğer BBK oluşturma aşamalarında, yani TBBK algoritması düğüm kayıpları sonucunda yeniden çalıştırıldığında ise düğümler başka durumları alabilir. Düğümlerin TBKK algoritması boyunca alabildiği mesaj tipleri ise ENERJİ, HASATÇI, $DURUM_0$, KOMŞULAR, BSİZ, AĞIRLIK, İZİN, $DURUM_{i>0}$ ve FAZ olarak belirlenmiştir.

Önerilen algoritma boyunca düğümlerin kullandığı yerel değişkenler ise şu şekildedir: her m düğümü d_m, kendi komşu düğümlerini Γ_m listesinde, bu listedeki düğümler arasından algoritmada hâla aktif olarak çalışan düğümleri Γ_{akt} listesinde, komşu düğümler arasından enerji hasadı yapan düğümleri ise Γ_{hst} listelerinde tutmaktadır. Dolayısıyla, bu kümeler arasında $\Gamma_{akt} \subseteq \Gamma_m$ ve $\Gamma_{hst} \subseteq \Gamma_m$ ilişkileri mevcuttur. Bunun dışında bir düğümün KSNN durumundaki komşu kümesi Γ_{KSNN} ile HSTÇI-KSNN durumundaki komşu kümesi $\Gamma_{hstçıKSNN}$ ile ifade edilmektedir. Benzer şekilde diğer durumlardaki komşu listeleri de aynı notasyona uygun bir şekilde gösterilmektedir. d_m'nin pilinde kalan enerjisi e_m'de, diğer düğümlere yolladığı ağırlık parametresi ω_m'de, kendi durumunu ise $durum$ değişkeninde saklamaktadır, $hstçı$ değişkeni düğümün hasat yapabilen bir düğüm olup olmadığını tutmaktadır. $ilkFazBitti$ değişkeni ise ağda baskın kümenin oluşması işleminin bitip bitmediğini kontrol etmektedir. $d_m.id$, d_m düğümünün belirtecini tutmaktadır. $enerji_{msj}$, ilgili turda kaç farklı komşudan ENERJİ mesajı alındığını tutarken, $hasat_{msj}$ kaç tane HASATÇI mesajı alındığı bilgisini tutmaktadır, $durum_{msj}$ değişkeni toplamda alınan DURUM mesajının sayısını saklamak amacıyla kullanılmaktadır. $komşu_{msj}$ ise bir defaya mahsus gönderilen komşular ve komşuların durum bilgisini ihtiva eden KOMŞULAR mesajından kaç tane alındığı bilgisini tutmaktadır. Benzer şekilde ω_{msj}, $izin_{msj}$, faz_{msj} değişkenleri sırasıyla ilgili turda alınan AĞIRLIK, İZİN ve FAZ mesajlarından toplamda kaç adet alındığını tutmaktadırlar. Düğümler algoritmaya başladıklarında kendi komşu kümelerini Γ_m'de; komşularından enerji hasadı yapabilenlerin kümesini ise Γ_{hst}'da tuttuğu varsayılmıştır. Ayrıca, düğümlerin kendi kalan enerjilerini ölçebilen duyargalarının bulunduğu varsayılmaktadır. $izin_{ksyn}$ değişkeni ise kendisinin KSYN olabilmesi için kaç farklı düğümden izin alındığını tutan değişkendir.Önerilen algoritmanın iki temel fazı ilerleyen iki alt bölümde anlatılmaktadır. Bölüm 3.1'de TBBK algoritmasının ilk fazında gerçekleştirilen dağıtık baskın küme algoritması anlatılmaktadır. Bölüm 3.2'de ise TBBK algoritmasının ikinci fazında gerçekleştirecek olan baskın düğümlerin bağlı hale getirilmesi yani KSNN durumundaki bazı düğümlerin KSYN durumuna getirilmesi işlemleri anlatılacaktır. Ayrıca, algoritma Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'ten incelenebilmektedir.

3.1 Baskın küme oluşturma fazı

Bu kısımda, Algoritma 1'de verilen TBKK algoritmasının ağda dağıtık bir şekilde baskın bir küme oluşturması sırasında gerçekleştirilen işlemlerin yer aldığı ilk fazı anlatılmaktadır. Bu faz kendi içerisinde iki ayrı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde düğümler başlangıçta kalan enerji seviyelerini birbirlerine göndermekte, ardından hasatçı düğümlere bir ayrıcalık tanınarak diğer sıradan düğümlerle yarışa girmeden bu düğümlerin BK'ye doğrudan seçilip seçilmeyeceği ile ilgili işlemler gerçekleştirilmektedir.

Bu fazın ikinci bölümünde ise hasatçı olsun olmasın tüm aktif düğümler BK'ye seçilmek için bir yarışa girmektedir. Bu bölüm bütün düğümlerin KSYN ya da KSNN olma durumlarının belli olup olmamasına göre bir veya birden fazla turdan oluşabilmektedir. Aşağıda, sırasıyla bu iki bölüm içerisinde gerçekleşecek işlemler detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

Algoritma 1 d_m düğümü için bağlı baskın küme algoritması

VERİ:
$\Gamma_m \leftarrow d_m$ düğümünün komşu listesi
$\Gamma_{akt} \leftarrow d_m$ düğümünün aktif komşu listesi
$\Gamma_{hst} \leftarrow d_m$ düğümünün hasatçı komşu düğüm listesi
$e_m \leftarrow d_m$ düğümünün kalan enerji seviyesi
$\omega_m \leftarrow d_m$ düğümünün ağırlığı
$durum \leftarrow d_m$ *düğümünün durumu* (HSTÇI-BSİZ, HSTÇI-KSNN, HSTÇI-KSYN, SRDN-BSİZ, SRDN-KSNN ya da SRDN-KSYN)
$ilkFazBitti \leftarrow false$, hstçı ← hasatçı olup olmadığı tutuluyor
$enerji_{msj}$, $hasat_{msj}$, $durum_{msj}$, $bsiz_{msj}$, ω_{msj}, $izin_{msj}$, faz_{msj}, $komşu_{msj}$, $izin_{ksyn}$ ilgili turda alınan mesaj sayısı (başlangıçta 0)
Düğümler algoritmaya başladığında:
$durum \leftarrow$ *SRDN-BSİZ* ya da *HSTÇI-BSİZ*
$e_m \leftarrow$ *pil seviyesi*
*hst*çı ← *true eğer hasatçı ise*
$\Gamma_{akt} \leftarrow \Gamma_m$
ENERJİ.enerji ← e_m,
Γ_m'e ENERJİ mesajını yayımla.
SRDN-KSYN ve HSTÇI-KSYN dışındaki tüm durumlar için:
d_u **düğümünden ENERJİ mesajı aldığında:**
$enerji_{msj} \leftarrow enerji_{msj} + 1$
$e_u \leftarrow ENERJİ.enerji$
if $enerji_{msj} = |\Gamma_m| \wedge hst$çı $= false \wedge |\Gamma_{hst}|=0$ **then**
DURUM$_0$ mesajını Γ_m'e yayımla.
end if
if $enerji_{msj} = |\Gamma_m| \wedge hst$çı $= true$ **then**
e_m değerini kıyasla, yeni durumunu belirle.
HASATÇI mesajını Γ_m'e yayımla.
end if
SRDN-KSYN dışındaki durumlar için:
d_u **düğümünden HASATÇI mesajı aldığında:**
$hasat_{msj} \leftarrow hasat_{msj} + 1$
$d_u.durum \leftarrow HASATÇI.durum$
if HASATÇI.durum=KSYN $\wedge$
$durum \neq KSYN$ **then**
$durum \leftarrow KSNN$
$\Gamma_{akt} \leftarrow \Gamma_{akt} \setminus d_u$
end if

Şekil 3. TBBK algoritması bölüm 1.

Figure 3. The first part of TBBK Algorithm.

if $hasat_{msj}=|\Gamma_{hst}| \wedge hst$çı $= true$ **then**
HASATÇI mesajını Γ_m'e yayımla.
end if
if $hasat_{msj}=2|\Gamma_{hst}| \wedge hst$çı $= false$ **then**
DURUM$_0$ mesajını Γ_m'e yayımla
end if
if $hasat_{msj}=2|\Gamma_{hst}| \wedge ((d_i.durum \neq$BSİZ, $\forall\, d_i \in \{\Gamma_m \cup d_m\}) \vee durum = KSYN)$ **then**
$ilkfazBitti \leftarrow true$
İkinci faza başla (Bölüm 3.2)
end if
d_u **düğümünden DURUM$_0$ mesajı aldığında:**
$durum_{msj} \leftarrow durum_{msj} + 1$
$d_u.durum \leftarrow DURUM_0.durum$
if $durum_{msj} = |\Gamma_m \setminus \Gamma_{hst}| \wedge hasat_{msj}=2|\Gamma_{hst}|$ **then**
$durum_{msj} \leftarrow 0$
if $(d_i.durum \neq$BSİZ, $\forall\, d_i \in \{\Gamma_m \cup d_m\}) \vee durum = KSYN$ **then**
$ilkfazBitti \leftarrow true$
İkinci faza başla (Bölüm 3.2)
else
Γ_m kümesini KOMŞULAR mesajı olarak Γ_{akt}'e yayımla.
end if
end if
Durumları HSTÇI-BSIZ, HSTÇI-KSNN, SRDN-BSIZ, SRDN-KSNN olan düğümler için:
d_u **düğümünden KOMŞULAR mesajı aldığında:**
$komşu_{msj} = komşu_{msj} + 1$
$d_u.\Gamma \leftarrow$ KOMŞULAR.Γ
if $komşu_{msj} = |\Gamma_{akt}|$ **then**
$\omega \leftarrow ağırlıkHesapla()$
ω'yı Γ_{akt}'e AĞIRLIK mesajı olarak yayımla.
end if
while $\neg ilkFazBitti$ **do**
d_u **düğümünden AĞIRLIK mesajı aldığında:**
$\omega_{msj} \leftarrow \omega_{msj} + 1$
$d_u.\omega \leftarrow AĞIRLIK.\omega$
if $\omega_{msj} = |\Gamma_{akt}|$ **then**
$\omega_{msj} \leftarrow 0$

Şekil 4. TBBK algoritması bölüm 2.

Figure 4. The second part of TBBK Algorithm

d_{izin}=max({d_z.id | d_z.ω = max({d_j.ω | $d_j \in \Gamma_{akt} \cup \omega_m$}})
d_{izin} düğümünü İZİN mesajı olarak yolla.
end if
d_u düğümünden İZİN mesajı aldığında:
$izin_{msj} \leftarrow izin_{msj} + 1$
if İZİN.d_{izin}=d_m **then**
$izin_{ksyn} \leftarrow izin_{ksyn} + 1$
end if
if $izin_{msj}$=$|\Gamma_{akt}| \wedge izin_{ksyn}$=$|\Gamma_{akt}|$ **then**
$durum \leftarrow$ KSYN, $izin_{msj} \leftarrow 0$
Γ_{akt}'e DURUM$_{i>0}$ mesajı gönder.
end if
if $izin_{msj}$=$|\Gamma_{akt}| \wedge d_{izin} = d_m \wedge izin_{ksyn} \neq |\Gamma_{akt}|$ **then**
Γ_{akt}'e DURUM$_{i>0}$ mesajı gönder.
end if
Tüm durumlardaki düğümler için:
d_u düğümünden DURUM$_{i>0}$ mesajı aldığında:
$durum_{msj} \leftarrow durum_{msj} + 1$
$d_u.durum = DURUM_{i>0}.durum$
if $durum$ =BSİZ
$\wedge\ d_u.durum = KSYN$ **then**
$durum \leftarrow KSNN$
end if
if $d_u = d_{izin}$ **then**
Γ'_{akt}e **DURUM$_{i>0}$** mesajı gönder.
end if
if $durum_{msj}$=$|\Gamma_{akt}|$ **then**
$izin_{ksyn} \leftarrow 0$
if $d_i.durum \neq$BSİZ $\forall\ d_i \in \{\Gamma_m \cup d_m\}$
$\vee\ d_m.durum = KSYN$ **then**
$ilkfazBitti \leftarrow true$
end if
$ilkfazBitti$ değerini **FAZ** mesajı olarak Γ_{akt}'e gönder
$durum_{msj} \leftarrow 0$
end if
d_u düğümünden FAZ mesajı aldığında:
$faz_{msj} \leftarrow faz_{msj} + 1$
if faz_{msj}=$|\Gamma_{akt}|$ **then**
Γ_{akt}'i güncelle
$faz_{msj} \leftarrow 0$
if ilkfazBitti **then**
İkinci faza başla (Bölüm 3.2)
else
$\omega \leftarrow ağırlıkHesapla()$
ω'yı Γ_{akt}'e AĞIRLIK msj. yayımla
end if
end if
end while

Şekil 5. TBBK algoritması bölüm 3.

Figure 5. The third part of TBBK Algorithm.

Ağ üzerinde BSİZ durumunda düğüm kalmayıncaya kadar AĞIRLIK mesajının gönderilmesi ile bu turlar devam etmektedir. Birinci fazın sonunda ise ağda BSİZ düğüm kalmamaktadır ve sonuç olarak BK belirlenmiş olmaktadır.

Düğümler algoritmaya başladığında komşularına kalan enerjileri olan e_m değerini, ENERJİ mesajı olarak göndermektedir. Bir d_u düğümünden ENERJİ mesajı alan bir düğüm komşusunun kalan enerjisini e_u değişkeninde saklamaktadır. Ayrıca toplamda alınan ENERJİ mesajlarının sayısını tutmak için kullandığı $enerji_{msj}$ değişkenini arttırmaktadır. Tüm komşularından enerji mesajlarını alan bir düğüm eğer SRDN-BSİZ ise ve hasatçı komşu sayısı $|\Gamma_{hst}|$=0 ise, kendi durumunu belirsiz olarak (BSİZ) $DURUM_0$ mesajı içerisinde göndermektedir. Tüm ENERJİ mesajlarını alan sıradan bir düğüm eğer herhangi bir hasatçı komşusu varsa, kendi $DURUM_0$ mesajını göndermeden önce hasatçı komşularının durumunu öğrenebilmek, dolayısıyla kendinde oluşabilecek bir durum değişikliğinden haberdar olmak ve gerektiğinde kendi durumunu güncellemek için tüm hasatçı komşularından ikişer defa HASATÇI mesajlarını almalıdır.

Bir HSTÇI-BSİZ düğüm tüm ENERJİ mesajlarını aldıktan sonra kendi komşularıyla beraber hesapladığı ortalama enerjiden daha yüksek bir enerji seviyesine sahip ise kendini KSYN ilan etmektedir. Hasatçı düğümün kalan enerji seviyesinin $e_m < \frac{\Sigma\, e_u, \forall\, d_u \in \Gamma_{akt}}{|\Gamma_{akt}|}$ ile gösterildiği gibi ortalamanın altında olması durumunda bu düğüm ilgili tura BSİZ olarak devam etmektedir. Hasatçı düğümün enerji seviyesi ortalamadan az ise, göndereceği ilk HASATÇI mesajında kendisini BSİZ olarak atayıp durumunu tüm komşularına aktarmaktadır. Bir hasatçı düğüm kendi Γ_{hst} listesindeki tüm komşularından HASATÇI mesajı aldığında bir defa daha HASATÇI mesajı göndermektedir. Burada, eğer hasat yapan bir düğüm ilk HASATÇI mesajında kendi durumunu BSİZ olarak yayınlamış ise ve ardından hasatçı bir komşusundan KSYN olduğunu belirten bir HASATÇI mesajı alırsa yeni durumunun güncellenmesi için ikinci HASATÇI mesajında kendi durumunu KSNN olarak göndermektedir. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, hasatçı düğümler enerji mesajlarını tüm komşularından aldıktan sonra durumları ne şekilde değişirse değişsin iki defa HASATÇI mesajı göndermektedir. Bir tanesi kendi enerjisi e_m'nin ortalamadan düşük olup olmadığına göre kendisini BSİZ ya da KSYN olarak ilan ettiği, diğeri ise başka bir hasatçı komşusu tarafından kapsanması ihtimaline karşı Γ_{hst}'daki tüm komşularından HASATÇI mesajlarını aldıktan sonra gönderdiği kendi durumunu içeren ikinci bir HASATÇI mesajıdır. Burada ilk HASATÇI mesajı aynı zamanda dağıtık algoritmanın bu aşamadaki senkronizasyonunu sağlamaktadır.

Sıradan bir düğüm HASATÇI mesajı aldığında, Γ_{hst}'daki komşularının herhangi birinin KSYN durumunda olması ile KSNN durumuna geçmekte aksi halde BSİZ durumunda kalmaktadır. Bu düğüm tüm hasatçı komşularından ikişer defa HASATÇI mesajını alıp $hasat_{msj} = 2|\Gamma_{hst}|$ olduğunda artık kendi durumunu $DURUM_0$ mesajı ile tüm komşularına yayınlamaktadır. ENERJİ, HASATÇI ve $DURUM_0$ mesajları BBK oluşturma işinin ilk bölümünde gönderilen mesajlardır. Bir düğüm tüm sıradan komşularından $DURUM_0$ ve hasatçı komşularından HASATÇI mesajını aldığında kendi Γ_m kümesini KOMŞULAR mesajı etiketiyle bir defaya mahsus olmak üzere komşularına göndermektedir. Bu küme içerisinde düğümlerin hasatçı olup olmadığı, kalan enerjileri ve bunun yanında, anlık durumları (HSTÇI-BSIZ, SRDN-KSNN vb.) da bulunmaktadır. Buradaki bilgiler algoritmanın ikinci fazında gerçekleşecek olan ağırlık hesaplaması işleminde kullanılacaktır. Düğümler tüm komşularından KOMŞULAR mesajlarını aldığında,

Algoritma 1'in ikinci bölümüne başlamaktadır. Burada düğümler ilk olarak ağırlıklarını Eşitlik (1)'e göre belirlemekte ve ağırlıklarını aktif komşularının yer aldığı Γ_{akt} listesindeki düğümlere AĞIRLIK mesajı ile göndermektedir. Bir d_m düğümünün ağırlığı ω_m'nin hesaplanmasında dört farklı faktör etkili olmaktadır:

1) d_m düğümünün komşularına göre normalize edilmiş kalan enerjisi, $\widehat{e_m}$ ile ifade edilmektedir,
2) KSYN durumundaki hasatçı komşu sayısı ($|\Gamma_{hstçıKSYN}|$). Burada KSYN durumundaki hasatçı komşu sayısının çok olması bu düğümün kümeye seçilmesini baskın kümenin daha erken bağlı hale getirilmesi açısından mantıklı hale getirmektedir,
3) Bir d_m düğümünün hasatçı komşularının d_m'nin başka bir baskın komşusu ile bağlı olması, d_m'nin baskın düğüm olarak seçilmesini negatif yönde etkilemektedir. Bir d_m düğümünün başka bir KSYN komşusu ile bağlı olan hasatçı komşu sayısı da $|\Gamma_{hstçıKSYNb}|$ ile ifade edilmektedir,
4) d_m'nin komşularının hiçbirinin komşusu olmayan BSİZ durumundaki komşu sayısı olan $|\Gamma_{BSİZf}|$ değeri de ω_m'yi etkileyen faktörler arasındadır. Bu sayının yüksek olmasının baskın kümedeki toplam düğüm sayısını azaltma ihtimali bulunmaktadır, dolayısıyla bu parametrenin yüksek çıkması d_m'nin baskın olarak seçilmesini olumlu yönde etkilemektedir.

Her turda düğümlerin durumları değişebileceğinden yukarıdaki faktörlerin son üç tanesi BK oluşuncaya kadar her turda yeniden hesaplanmaktadır. Bu parametreler, AĞIRLIK mesajı gönderilmeden önce Eşitlik (1)'deki gibi birleştirilip ω_m'nin içerisinde saklanmaktadır.

$$\omega_m = \frac{e_m}{\sum e_u}\left(|\Gamma_{hstçıKSYN}| - |\Gamma_{hstçıKSYNb}| + |\Gamma_{BSİZf}|\right), \quad \forall\, d_u \in \Gamma_{akt} \cup d_m \qquad (1)$$
$$= \widehat{e_m}\left(|\Gamma_{hstçıKSYN}| - |\Gamma_{hstçıKSYNb}| + |\Gamma_{BSİZf}|\right)$$

Bir d_m düğümü kendi ağırlığı ω_m'yi hesapladıktan sonra bunu AĞIRLIK mesajı olarak aktif komşularına yayınlamaktadır.

Γ_{akt} listesindeki düğümlerin hepsinden AĞIRLIK mesajını alan bir düğüm kendisinin ağırlığı ve komşularından aldığı tüm ağırlıkları kıyasladığında en yüksek ağırlık değerini alan komşusunu d_{izin} değişkeninde kaydederek tüm aktif komşularına İZİN mesajı göndermektedir. Γ_{akt} listesindeki tüm komşularından İZİN mesajı alan bir düğüm artık KSYN durumuna geçmektedir ve durumunu $\text{DURUM}_{i>0}$ mesajı olarak tüm aktif komşularına iletmektedir.

Bir d_m düğümü ilgili turda izin göndermiş olduğu d_{izin} düğümünden $\text{DURUM}_{i>0}$ mesajı aldığında; d_m düğümü BSİZ durumunda ise ve d_{izin} düğümünün durumu KSYN ise kendisi KSNN durumuna geçmektedir. Aksi halde kendi durumunda bir değişiklik olmamaktadır. Yeni durumunun ne olduğu farketmeksizin, d_{izin} düğümünden $\text{DURUM}_{i>0}$ mesajı alan bir düğüm durumunu yine $\text{DURUM}_{i>0}$ mesajı ile komşularına iletmektedir.

Tüm aktif komşularından $\text{DURUM}_{i>0}$ mesajlarını alan bir düğüm aktif komşularına kendilerinin de bir sonraki tura katılıp katılmayacağını saklayan mantıksal (*boolean*) bir değeri FAZ mesajı ile göndermektedir, bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\neg((|\{d_u | d_u.durum = BSİZ\ ,\ \forall\ d_u \in\ \Gamma_m\}| = 0) \wedge\ (\ d_m.durum \neq\ BSİZ)). \qquad (2)$$

Bir düğüm baskın küme oluşturma algoritmasının bir sonraki turuna katılmayacağını BSİZ durumda hiçbir komşusu yoksa ve kendisi de BSİZ durumda değilse Eşitlik (2)'den *false* değeri alarak anlamaktadır. Eşitlik (2), *true* değeri veriyorsa, d_m düğümü Algoritma 1'in diğer turuna da katılacak demektir. d_m düğümü hesapladığı değeri FAZ mesajı içerisinde aktif komşularına iletmektedir. Γ_{akt} listesindeki tüm komşulardan FAZ mesaj alındığında FAZ mesajındaki mantıksal değeri *false* gönderenler bir sonraki tura girmeyeceğinden aktif komşu listesinden çıkarılarak güncellenmektedir.

3.2 Baskın düğümleri bağlama fazı

Algoritmanın ilk aşaması bittiğinde baskın küme oluşturulmuştur. Bu noktada artık baskın düğümlerin bağlı bir hale getirilmesi için kapsanan durumundaki düğümlerin bazılarının da baskın bir düğüm haline getirilmesi gerekmektedir. İlk fazın sonunda oluşan baskın düğümler kendi aralarında kısmi bağlı kümeler oluşturabilmektedir. Bu kısmi bağlı kümelerin bulunması için baskın düğümlerin oluşturduğu çoklu ağaçların tespiti gerekmektedir. Benzer şekilde, literatürdeki bazı baskın küme oluşturma algoritmalarında da ilk önce bu kısmi ağaçların tespiti gerçekleştirilmiştir [10],[13].

Algoritmanın ikinci fazında bu baskın ağaçlar GHS algoritması [38] kullanılarak dağıtık bir şekilde oluşturulmaktadır. Ardından, elde edilen ağaçların, bu ağaçlara komşu KSNN durumundaki bazı düğümlerin baskın hale getirilerek birleştirilmesi işlemleri gerçekleştirilmektedir. Kısmi ağaçların birleştirilmesi için de hangi KSNN düğümlerin baskın hale getirileceği ile ilgili yeni sezgisel ağırlık parametreleri önerilmektedir.

Kısmi ağaçlar tek bir düğümün baskın hale geçirilmesi ile bağlı hale gelebileceği gibi, komşu iki kısmi ağacın bağlanabilmesi için iki farklı KSNN durumundaki düğümün de durumlarının KSYN haline getirilmesi gerekebilmektedir. Önerilen algoritmada KSNN düğümler, komşusu oldukları ağaçları bağlı hale getirmek için birden fazla ağırlık parametresi hesaplamakta, bu parametrelerden en uygun ağırlığa sahip senaryodaki durumu seçerek KSYN komşularına ağırlıklarını göndermektedir. GHS algoritması [38] baskın düğümlerin bulunduğu topolojide uygulanarak tüm kısmi ağaçlar belirlendikten sonra, her baskın düğüm kendi ait olduğu kısmi ağacın belirtecini (ID) bilmekte ve KSNN durumundaki komşularına kendi kısmi ağaç belirteçlerini göndermektedir. Tüm baskın komşularından ağaç belirteçlerini alan kapsanan düğümler, komşu olduğu ağaçlar kümesini kendi KSNN durumundaki komşularına göndermektedir.

SRDN-KSNN durumundaki bir d_m düğümü tüm KSNN komşularından ilgili komşu ağaç kümelerini aldıktan sonra aşağıdaki ağırlık parametrelerini hesaplamaktadır. Bu ağırlık parametrelerinden, kapsanan (KSNN) durumundaki hasatçı bir komşusu ile ağaçları bağladığında oluşan ağırlık değeri Eşitlik (3)'te, sıradan kapsanan (SRDN-KSNN) bir komşusu ile birlikte ağaçları bağladığı durum için hesapladığı ağırlık değeri Eşitlik (4)'te ve son olarak d_m düğümünün sadece kendisinin KSYN durumuna geçerek birden fazla ağacı bağlayabildiği durum için hesapladığı ağırlık değeri ise Eşitlik (5)'te verilmiştir.

$$\omega_1 = \max\left((\widehat{e_{mA\breve{g}a\varsigma}} + \widehat{e_{uA\breve{g}a\varsigma}})|\gamma_m \cup \gamma_{hst\varsigma_u}|\right), \forall d_u \mid e_u > \mu \wedge d_u \in \Gamma_{mhst\varsigma ıKSNN} \quad (3)$$

$$\omega_2 = \max\left((\widehat{e_{mA\breve{g}a\varsigma}} + \widehat{e_{uA\breve{g}a\varsigma}})\left|\gamma_m \cup \gamma_u\right|\right), e_z < \mu, \forall d_z \mid d_z \in \Gamma_{mhst\varsigma ıKSNN}, \left|\gamma_m \cup \gamma_u\right| > |\gamma_m| \wedge d_u \in \Gamma_{msrdnKSNN} \quad (4)$$

$$\omega_3 = \widehat{e_{mA\breve{g}a\varsigma}}|\gamma_m|, |\gamma_m| > 1 \wedge e_z < \mu \wedge \forall d_z, d_z \in \Gamma_{mhst\varsigma ıKSNN} \quad (5)$$

Eşitlik (3)'te γ_m kümesi, SRDN-KSNN durumundaki d_m düğümünün komşusu olan farklı ağaç belirteçlerini içermektedir. $\gamma_{hst\varsigma_u}$ ise kapsanan durumundaki d_u hasatçı düğümünün komşusu olduğu ağaçların belirteç kümesini oluşturmaktadır. $\widehat{e_{mA\breve{g}a\varsigma}}$ değeri ise d_m düğümünün kalan enerji değerinin kendisi gibi KSNN durumundaki komşularının kalan enerjileri kullanılarak normalize edilmiş halidir. μ ise hasatçı düğümlerin BBK oluşturma işlemine devam edip edemeyeceğini belirlemek için oluşturulan bir enerji eşik değeridir. Eşitlik (3)'e göre eğer sıradan bir düğümün, durumu KSNN ve kalan enerji seviyesi eşik değeri μ'den yüksek bir hasatçı komşusu varsa ağaçları kendi başına bağlı hale getirebilse bile en yüksek ağırlık değerine sahip hasatçı komşusunu eş olarak seçerek komşu olduğu ağaçları bağlamayı tercih etmekte, ω_1 değerini hesaplamaktadır.

Ancak hiçbir hasatçı komşusu yoksa ya da hasatçı komşularının hepsinin kalan enerji seviyeleri μ'den düşük ise, bir d_m düğümü eş olarak SRDN-KSNN komşuları ile ağaçları bağlamaya çalışmaktadır. Bu durumda sıradan kapsanan durumundaki düğümü seçmek için Eşitlik (4)'ü kullanarak ω_2'yi hesaplamaktadır. Bu d_m düğümünün herhangi bir SRDN-KSNN komşusu ile bağladığı ağaç sayısı kendisinin tek başına bağladığı ağaç sayısından çok değilse ve ayrıca kendisi de birden fazla ağaca komşu ise Eşitlik (5)'te verilen ağırlık değerini hesaplamaktadır.

Sonuç olarak sıradan bir d_m düğümünün kalan enerjisi eşik değerinden yüksek olan hasatçı bir komşusu var ise sadece Eşitlik (3)'deki eşitsizliği hesaplayıp göndermekte, bir komşu ile beraber bağlayabildiği ağaç sayısı sadece kendisinin komşusu olduğu ağaç sayısından fazla ise Eşitlik (4)'teki ağırlık değerini kullanmaktadır. Başka bir sıradan komşusu ile birlikte bağlayabildiği ağaçların sayısı sadece kendi bağladığı ağaç sayısından yüksek değilse ve kendi komşusu olduğu ağaç sayısı iki veya ikiden fazla ise de Eşitlik (5)'teki ω_3 ağırlık değerini hesaplayıp komşu KSYN düğümlere göndermektedir.

Benzer şekilde, KSNN durumundaki hasatçı bir düğüm ise tüm KSNN komşularından komşu ağaç kümelerini aldıktan sonra kalan enerji seviyesinin durumuna göre iki ağırlık fonksiyonundan birini hesaplamaktadır. Buna göre bu hasatçı düğümün komşu olduğu ağaç sayısı birden yüksek olup kalan enerjisi e_m eşik değeri de μ'den yüksek ise veya hiçbir KSNN komşusu olmayıp birden fazla ağacı bağlayabilecek durumda ise Eşitlik (6)'nın ilk değerini hesaplayarak, eşsiz (partnersiz) bir şekilde ağaçları bağlayabilmektedir. Bunun dışındaki durumlarda Eşitlik (6)'nın ikinci değerini hesaplanmaktadır.

$$\overset{\omega_4}{=} \begin{cases} \widehat{e_{mA\breve{g}a\varsigma}}|\gamma_u|, (e_m > \mu \vee |\Gamma_{ksnn}| = 0) \wedge |\gamma_m| > 1 \\ \max\left((\widehat{e_{mA\breve{g}a\varsigma}} + \widehat{e_{uA\breve{g}a\varsigma}})|\gamma_m U\ \gamma_u|\right), |\gamma_m U\ \gamma_u| > 1,\ d_u \in \Gamma_{KSNN} \end{cases} \quad (6)$$

Yukarıda belirlenen koşullara göre ağırlıklarını hesaplayan düğümler kapsanan durumundaki tüm komşularına varsa seçtikleri eş belirteçlerini yoksa sadece kendi belirteçlerini ihtiva eden bir mesaj göndermektedir. Bir düğüm başkası tarafından eş olarak seçildiyse ve kendisi de ilgili düğümü eş olarak seçtiyse onay, seçmediyse ise ilgili düğüme ret mesajı göndermektedir. Ağırlık hesaplamasında eş seçmeyen ya da seçtiği eşinden onay alan düğüm, ilgili eşitlikle hesapladığı ağırlık parametresini göndermekte, eş seçen düğüm eğer eşinden onay almadıysa tüm ağaçlar tarafından seçilmeyeceği için bu turda KSNN olmaya aday olmayacağını belirten mesajı KSYN durumundaki komşularına göndermektedir. Buna göre KSNN tüm komşularından ağırlık değerini alan KSYN konumundaki düğümler kendi aldıkları arasından en büyük değeri seçerek kendi bağlı oldukları ağaca iletmektedir. Ağacın kök düğümü de tüm ağırlık parametrelerini aldığında yine önceliği hasatçı düğümlere verip ikincil olarak (birden fazla hasatçı düğümden ağırlık mesajı alındıysa ya da hiçbir hasatçı düğümden ağırlık mesajı alınmadıysa) ağırlıkların en yükseğini seçerek, bağlanacak kapsanan düğümün belirtecini tüm ağaca iletmektedir. Bulunduğu ağaçtan düğüm belirtecini alan KSYN durumundaki düğümler ise ağaç tarafından seçilen düğümü KSNN komşularına iletmektedir. Tüm KSYN komşularından kimin seçildiği bilgisini alan bir düğüm, tüm komşu ağaçlarından kendisinin seçildiği bilgisini aldığında kendi durumunu KSYN olarak değiştirmekte ve ağaçlara ve komşularına KSYN olduğu bilgisini göndermekte ve bağladığı ağaçlar tek bir ağaç haline gelerek yeni ağaç belirtecini KSYN durumundaki düğümlere iletmektedir. Bağlı olduğu ağaçların en az bir tanesi tarafından seçilirken diğeri tarafından seçilmediyse kendisi KSNN olarak kalmakta ve yine komşularına ve dolayısıyla komşu olduğu ağaçlara kendi durumlarını iletmektedir. Tüm KSNN durumundaki komşularından mesaj alan ağaçlar kendi belirteçlerini bir kere daha KSNN durumundaki komşularına göndermekte ve KSNN durumundaki düğümler yeniden ağırlık parametrelerini hesaplayarak aynı işlemleri KSYN düğümler tek bir ağaç oluşturana kadar devam etmektedir.

TBBK algoritması her koşulda sonlanmaktadır. Algoritmanın ilk fazında ağırlığı en büyük en az bir düğüm kapsayan düğüm olarak seçilmektedir. Eğer birden fazla aynı en büyük değere sahip düğüm varsa her düğümün belirteci farklı olduğundan en yüksek belirtece sahip düğüm kapsayan olarak seçilmekte ilk faz BSİZ düğüm kalmayıncaya kadar devam ettiğinden ilk faz sonunda BK oluşturulması garanti edilmektedir.

TBBK algoritmasının ikinci fazı GHS algoritması [38] ile başlamaktadır. GHS algoritmasının da çoklu ağaçları tespit ettikten sonra her durumda sonlandığı ilgili çalışmada ispat edilmiştir. TBBK algoritması, çoklu ağaçların tespit edilmesinin ardındaki her fazda en az iki ağacı birleştirmektedir. Tüm ağaçların seçtiği bir maksimum ağırlıklı KSNN düğüm vardır ve sistemde tek kendisinin ya da eşi ile birlikte tüm komşu ağaçlarından maksimum olarak seçilen en az bir düğüm ya da düğüm ve eşi bulunmaktadır. Diğer bir deyişle, bir düğüm eğer eşi tarafından onay almadıysa ağırlığını komşu ağaçlara göndermemekte, bu durumda ağda tek başına ya da eşli bir şekilde ağaçlara ağırlık gönderen en az bir düğüm bulunmaktadır. Algoritma sistemde tek bir ağaç oluşana kadar devam ettiği için de ilk fazda oluşan BK bağlı olana kadar devam etmektedir.

4 Benzetim sonuçları

Bu çalışmada önerilen TBBK algoritması ve [18]'de yer alan LMW algoritması, Cooja benzetim ortamına [39] dayalı SensEH benzetim aracında [19] gerçekleştirilmiştir. BBK'lar

benzetimlerde dağıtık bir şekilde oluşturulduktan sonra, bu BBK'ları bir iletişim çatısı olarak kullanan örnek bir telsiz duyarga uygulaması düğümler üzerinde çalıştırılmaya başlamıştır. Bu örnek duyarga uygulamasında düğümler aynı periyotlarla çevredeki bir veriyi algılayıp oluşturulan BBK üzerinden bir hedef düğüme göndermektedir. Benzetimler, düğüm derecesi ortalama 4 olma kısıtlamasıyla, rastgele bir şekilde 30 düğüm ve 50 düğümden oluşan topolojiler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu topolojilerde hasatçı düğümler, toplam düğüm sayısının sırasıyla %30'unu, %60'ını ve %90'ını oluşturacak şekilde rasgele bir şekilde seçilmiştir. Benzetimlerde, algoritmalar uygulanıp BBK'lar oluşturulduktan sonra, oluşturulan BBK'lar üzerinde çalıştırılan örnek uygulamanın yaşam süresi elde edilmiştir. Ayrıca, düğümlerin ilk BBK oluşması sırasında harcadıkları enerji, kullandıkları süre ve yaşamları boyunca oluşturdukları tüm BBK'lar için harcanan ortalama enerji ve ortalamada kullanılan süreler de elde edilmiştir.

Her bir topoloji düzeni için 40 adet farklı topoloji üretilerek önerilen TBBK algoritması ve rakip LMW algoritması [18] bu topolojiler üzerinde çalıştırılmış ve yukarıda bahsedilen performans parametrelerinin ortalama sonuçları elde edilmiştir. Benzetimlere başlamadan önce TDA'yı oluşturan her düğümün iki adet dolu AA pile sahip olduğu varsayılmıştır. Bir Zn-MnO_2 alkalin pilin başlangıç enerjisi Eşitlik (7)'de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$E = P \times t = V \times I \times t = (1.5V) \times (2.85Ah) \times (3600s) = 15390\,J. \quad (7)$$

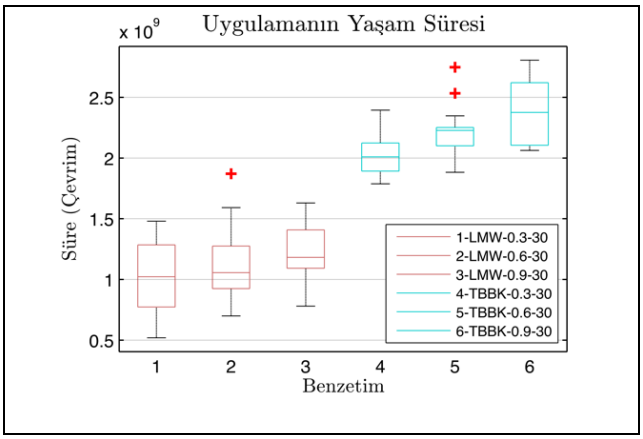
Bu denkleme göre iki adet AA tipi pile sahip düğümlerin her birinin başlangıç enerjisi 30780 J'dür.

Örnek uygulama çalıştırılırken düğümlerden bir ya da birkaç tanesinin enerjisinin tükenmesi sonucunda oluşturulan BBK omurgasının bozulması durumunda, hayatta kalan düğümlerin oluşturduğu ağın bağlı olup olmadığı kontrol edilmekte, hala bağlı ise yeni bir BBK oluşturularak bahsedilen performans parametreleri yeniden elde edilmektedir.

Şekil 6 ve Şekil 7'de, sırasıyla 30 ve 50 düğümlü topolojiler için LMW ve TBBK algoritmaları tarafından oluşturulan BBK'lar üzerinde çalıştırılan örnek uygulamanın yaşam süreleri saat çevrimi cinsinden görülmektedir. Tek bir algoritmanın kendi içerisinde hasatçı düğüm sayısının artması ile yaşam süresi arasındaki ilişki incelenmiştir. Buna göre 30 düğümlü topolojiler için LMW kullanılan benzetimlerde hasatçı düğüm oranının %30'dan %60'a çıkması yaşam süresini %8.4, %30'dan %90'a çıkması ise yaşam süresini %16 oranında artırmıştır. TBBK algoritmasında ise hasatçı düğüm oranının %30'dan %60'a çıkması yaşam süresini %6.7, %30'dan %90'a çıkması ise yaşam süresini %17 oranında artırmıştır. Yöntemler karşılaştırıldığında ise, 30 düğümün bulunduğu ve hasatçı düğüm oranının %30, %60 ve %90 olduğu topolojilerde TBBK algoritmasının kullanıldığı benzetimlerde elde edilen yaşam süresinin, bu topolojilerde LMW algoritmasının kullanıldığı benzetimlerde elde edilen yaşam süresinin sırasıyla 1.96, 1.94 ve 1.98 katı olduğu görülmektedir.

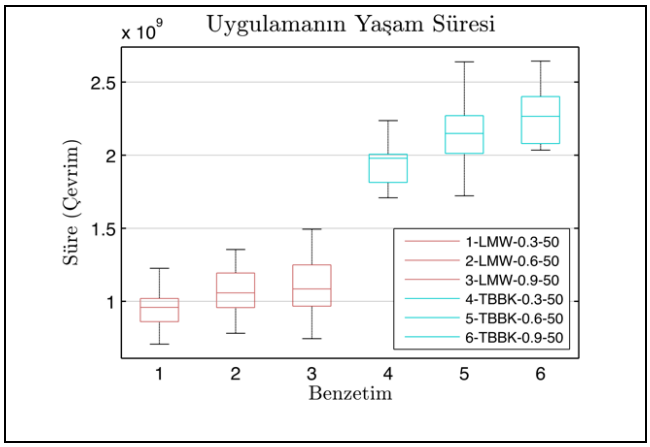
50 düğümlü topolojiler için LMW kullanılan topolojilerde hasatçı düğüm oranının %30'dan %60'a çıkması yaşam süresini %7, %30'dan %90'a çıkması ise yaşam süresini %17 oranında artırmıştır. TBBK algoritmasında ise hasatçı düğüm oranının %30'dan %60'a çıkması yaşam süresini %10, %30'dan %90'a çıkması ise yaşam süresini %18 oranında artırmıştır. Benzetimlerin makul sürelerde gerçekleştirilmesi için yaşam süreleri ölçülürken mesaj iletimlerinde gerçekleştirilen enerji harcamaları aynı oranda 1000 kat yükseltilerek ölçeklendirilmiştir. Bu nedenle, süre; saniye gibi herhangi bir zaman birimi cinsinden değil çevrim cinsinden verilmiştir. Yöntemler karşılaştırıldığında ise, 50 düğümün bulunduğu ve hasatçı düğüm oranının %30, %60 ve %90 olduğu topolojilerde TBBK algoritmasının kullanıldığı benzetimlerde elde edilen yaşam süresinin, bu topolojilerde LMW algoritmasının kullanıldığı benzetimlerde elde edilen yaşam süresinin sırasıyla 2, 2.08 ve 2.07 katı olduğu görülmektedir.

TBBK algoritmasının toplam yaşam süresini iyileştirdiği görülmüş, ancak diğer yandan BBK'ların oluşturulması için LMW algoritmasından daha yüksek miktarda enerji kullandığı gözlemlenmiştir. Şekil 8'de LMW ve TBBK algoritmalarının ilk BBK'yı oluşturmak için 30 ve 50 düğümden oluşan topolojilerde kullandığı enerjiler görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, %30, %60 ve %90 oranlarında hasatçı düğüme sahip 30 düğümden oluşan ağlarda LMW algoritmasının BBK'nın oluşturulması için TBBK algoritmasına kıyasla sırasıyla %28, %28 ve %26 daha az miktarda enerji harcaması gerektirdiği görülmüştür. %30'u, %60'ı ve %90'ı hasatçı düğümlerden oluşan 50 düğümlü ağlarda ise LMW algoritması BBK'nın oluşturulması için, TBBK'ya göre sırasıyla %30, %32 ve %33 daha az enerji harcaması gerçekleştirmiştir.



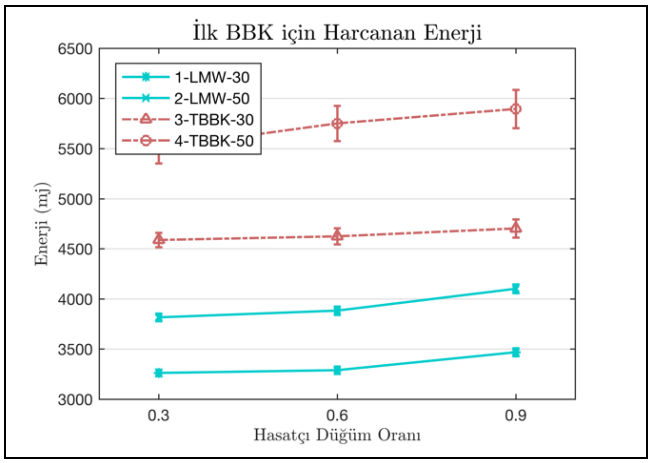
Şekil 6. 30 düğümlü ağlarda yaşam süreleri.

Figure 6. The lifetime of networks having 30 nodes.



Şekil 7. 50 düğümlü ağlarda yaşam süreleri.

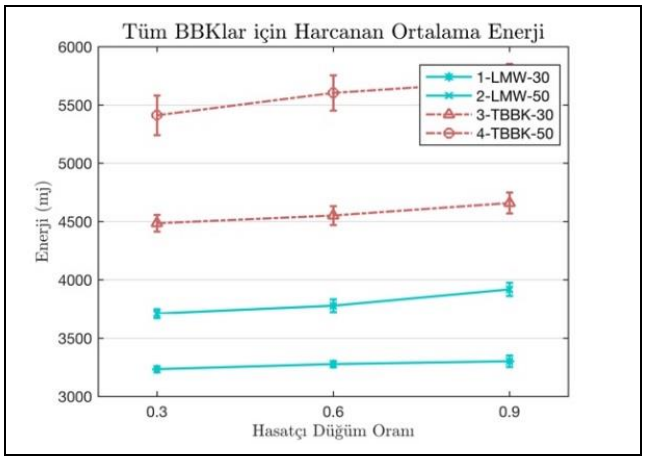
Figure 7. The lifetime of networks having 50 nodes



Şekil 8. İlk BBK için harcanan enerji.

Fgure 8. The consumed energy for the construction of the first conected dominating set.

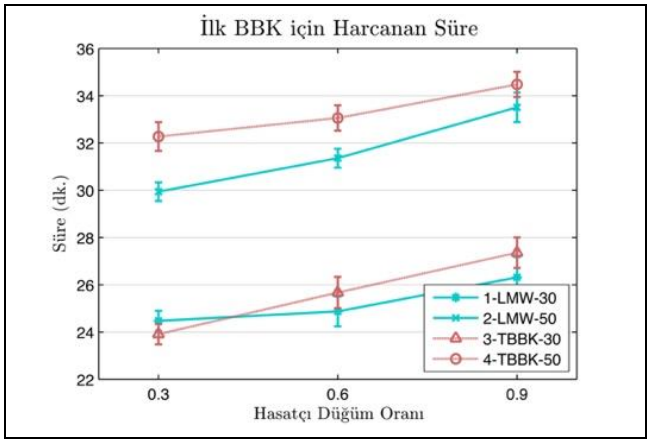
Algoritmalar tarafından oluşturulan BBK'larda bulunan düğüm veya düğümlerin enerjilerinin bitmesi ve geride hayatta kalan düğümlerin bağlı olması durumunda yeni baştan BBK oluşturulması işlemi gerçekleştirilmektedir. BBK oluşturulması işlemleri, oluşan düğüm kayıplarının hayatta kalan düğümlerin bağlı olmaması durumuna yol açana kadar tekrar edilmektedir. Dolayısıyla TDA'nın yaşam süresi boyunca birden fazla BBK oluşturulması gerçekleştirilebilir. Benzetimlerde TDA'ların yaşam süresi boyunca oluşturulan BBK'lar için harcanan ortalama enerji miktarları Şekil 9'da verilmiştir. TDA'daki düğümlerin yaşamları boyunca oluşturdukları tüm BBK'lar için ortalamada harcadıkları enerji miktarları incelendiğinde, %30, %60 ve %90 oranlarında hasatçı düğüme sahip olan 30 düğümlü ağlarda, LMW algoritmasının TBBK algoritmasına göre %27, %27 ve %29 daha az miktarda enerji harcadığı gözlemlenmiştir. %30, %60 ve %90 oranlarında hasatçı düğüme sahip olan 50 düğümlü ağlarda ise, LMW algoritmasının tüm BBK'lar için ortalama enerji harcamasının TBBK algoritmasına göre %45, %48 ve %45 daha az miktarda gerçekleştirildiği görülmüştür.



Şekil 9. Tüm BBK'lar için harcanan ortalama enerji miktarı(mj).

Figure 9. The average consumed energy for all of the constructed connected dominating sets.

Şekil 10'da ilgili algoritmaların ilk BBK'nın oluşturulması için kullandığı süreler gösterilmiştir. Buna göre hasatçı düğüm oranının %30 olduğu 30 düğümlü ağlarda TBBK algoritması LMW'ye göre %2.3 oranında daha az süre kullanmakta, %60 ve %90 hasatçı oranına sahip 30 düğümlü ağlarda ise LMW algoritması TBBK'ya göre sırasıyla % 3.2 ve %3.9 daha az süre kullanmaktadır. %30, %60 ve %90 hasatçı oranına sahip 50 düğümlü topolojiler incelendiğinde ise LMW algoritması TBBK algoritmasına göre sırasıyla %7.7, %5.5 ve %2.8 daha az süre kullanmıştır.

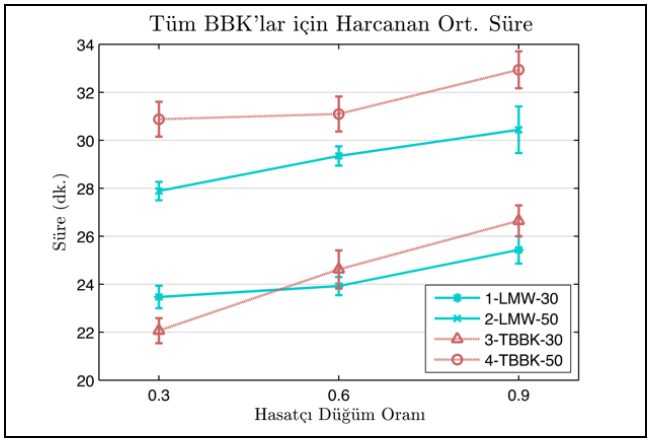


Şekil 10. İlk BBK oluşumu için geçen süre.

Figure 10. The elapsed time for constructing the first connected dominating set.

Şekil 11'de ilgili algoritmaların TDA yaşam süresi boyunca oluşturduğu tüm BBK'lar için ortalamada kullandığı süreler görülmektedir. Buna göre hasatçı düğüm oranının %30 olduğu 30 düğümlü ağlarda TBBK %5.9 oranında daha az süre kullanmakta, %60 ve %90 hasatçı oranına sahip 30 düğümlü ağlarda ise LMW algoritması sırasıyla %2.8 ve %4.5 oranında daha az süre kullanmaktadır. Ayrıca, elde edilen sonuçlara göre hasatçı düğüm oranının %30, %60 ve %90 hasatçı oranına sahip 50 düğümlü ağlarda LMW algoritması sırasıyla %9.6, %5.6 ve %7.5 oranında daha az süre kullanmaktadır.

Önerilen TBBK algoritmasının, BBK oluşturmak için harcadığı enerji miktarı ve kullandığı sürenin rakip algoritmaya göre daha yüksek olmasına rağmen, BBK'ya düğüm seçiminin sadece kalan enerji miktarına göre değil de komşuluk ilişkilerinin de göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmesi, kullanıldığı sistemlerde yaşam süresini artırmıştır.



Şekil 11. Tüm BBK'lar için harcanan ortalama süre.

Figure 11. The average elapsed time for constructing all connected dominating sets.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, enerji hasadı yapan düğümlerin bulunduğu ağlarda iletişim omurgaları oluşturmak için dağıtık olarak çalışan tekrar edilebilir bir bağlı baskın küme algoritması önerilmiştir. Düğümlerin oluşturduğu TDA'nın yaşam süresi, düğümlerin çalışmaya başladıkları andan hayatta kalan düğümlerin ağı parçalanmış hale getirdiği ana kadar geçen süre olarak belirlenmiştir. Önerilen TBBK algoritması ile bağlı baskın küme oluşturulduktan sonra düğümler üzerinde örnek bir TDA uygulaması çalıştırılmıştır. Uygulamayı çalıştıran düğümlerin zaman içerisinde enerji miktarları azalmış, özellikle BBK içerisinde görev alanların enerjilerinin daha çok azalarak, çalışan düğümlerin bağlı olması kaydıyla yeni bağlı baskın kümeler oluşturularak düğümler üzerinde çalıştırılan TDA uygulamasının yaşam süresinin yüksek boyutta olması hedeflenmiştir. TBBK algoritması ve rakip algoritma benzetim ortamında gerçekleştirilmiş olup bu algoritmaların BBK oluşturma ek yükleri ve yaşam süreleri karşılaştırılmıştır. Yaşam süresi boyunca BBK oluşturulması için kullanılan ortalama enerji incelendiğinde TBBK algoritması rakip algoritmaya göre 30 ve 50 düğümden oluşan ağlarda %27.66 ve %46.59 daha yüksek enerji harcaması gerektirmiştir. Önerilen algoritmada, yaşam süresi boyunca BBK oluşturma için harcanan süre ise tüm benzetimlerde rakip algoritma ile yakın çıkmıştır.

BBK oluşturma ek yükleri açısından TBBK algoritmasının rakip algoritmadan genelde daha düşük performans göstermesine rağmen, asıl hedeflenen nokta olan yaşam süresinde, 30 ve 50 düğümlü ağlarda rakip algoritmanın sağladığı yaşam süresinin 1.96 ve 2.05 katına ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre oluşturulan BBK yapılarının TDA yaşam süresi üzerinde büyük etkisi olduğu görülmüştür. Bu nedenle BBK oluşturma aşamasında, uygun BBK'ların tespit edilmesinin yaşam süresini artırmada, algoritmalar tarafından gerçekleştirilen enerji harcamasının kısıtlanmasından daha büyük önem taşıdığı görülmüştür. Oluşturulan BBK'lar uygulama süresince düğümler tarafından harcanan ortalama enerjiyi çok düşük seviyeye indirememekte ancak enerjisi erken bitecek ve ağı parçalı hale getirebilecek düğümlerin tespiti ile uygulamanın ve oluşturulan BBK'nın yaşam süresi artırılabilmektedir.

Gelecek çalışmalar arasında, daha yoğun ağ topolojisine sahip TDA'larda daha farklı ek kurallarla, ağı parçalı hale getirecek düğümlerin tespitini daha yüksek doğruluk ile gerçekleştirebilecek tekrar edilebilir BBK algoritmalarının geliştirilmesi planlanmaktadır.

6 Conclusions

In this study, a reconstructable connected dominating set algorithm is proposed that works in a distributed manner to create communication backbones in networks with energy harvesting nodes. The lifetime of the wireless sensor networks is determined as the time elapsed from the moment the nodes start to work until the network containing the alive nodes is divided into multiple parts. After creating the connected dominating set with the proposed TBBK algorithm, a sample wireless sensor network application was employed on the nodes. The energy amount of the nodes running the application has decreased over time, especially the energy of those who work in the dominating set has decreased more rapidly, and it is aimed to increase the lifetime of the wireless sensor network application employed on the nodes by creating new connected dominating sets provided that the alive nodes are connected. The TBBK algorithm and the rival algorithm were implemented in the simulation environment and the overheads of the connected dominating set generation and lifetimes' of the applications were compared. When the average energy used for the generation of the all connected dominating sets is examined, the TBBK algorithm required 27.66% and 46.59% higher energy consumption in networks consisting of 30 and 50 nodes compared to the rival algorithm. In the proposed algorithm, the time spent for generating connected dominating sets is very close to the rival algorithm in all simulations.

Although the TBBK algorithm generally involves more communication overhead than the rival algorithm in terms of connected dominating set construction, the main aim is increasing lifetime. Moreover, on average, TBBK algorithm achieves lifetimes which are 1.96 and 2.05 times of the lifetimes provided by the rival algorithm for 30 and 50 node networks, respectively. According to the results, it was seen that the structure of connected dominating set had a major effect on the wireless sensor application's lifetime. Hence, it has been observed that the determination of the appropriate connected dominating sets is more important in increasing the lifetime than the restriction of the energy consumption overhead realized by the algorithms in the construction phase. The created connected dominating sets cannot reduce the average energy consumed by the nodes during the application to a very low level, however, the lifetime of the application and the created BBK can be increased by detecting the nodes whose energy will deplete prematurely and can divide the network.

Among future studies, it is planned to develop reconstructable connected dominating set algorithms that can detect nodes, with higher accuracy, that will divide the network into multiple parts with different additional rules in wireless sensor networks with more dense network topologies.

7 Teşekkür

Bu çalışma 2018FEBE013 numaralı proje ile Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiştir. Dr. Sezai TOKAT'a değerli önerilerinden dolayı teşekkür ederiz.

8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştililen çalışmada Elif Haytaoğlu problemin ortaya konması, çözüm fikrinin oluşması, algoritma tasarımının yapılması, literatür taraması, simülasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi, sonuçların alınması ve yorumlanması başlıklarında; Ömer Güleç makalenin "İlgili çalışmalar, Yeni TBBK Algoritması, Sonuçlar" başlıklarında; fikrin iyileştirilmesi ve olgunlaştırılması, tüm makalenin yazım denetimi, literatür taraması, sonuçların değerlendirilmesi gibi kriterler ışığında katkı sunmuştur; Mustafa Tosun; Yeni TBBK Algoritmasının doğruluğu ve geliştirilmesi, sonuçların kontrolü ile tüm makalenin yazım denetimi başlıklarında katkı sunmuştur.

9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

10 Kaynaklar

[1] Diaz SE, Perez JC , Mateos AC, Marinescu MC, Guerra BB. "A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks". *Computers and Electronics in Agriculture,* 76(2), 252-265, 2011.

[2] Meda NS, Sadashiva TG, Ramani SK, Iyengar S. "Mobile WSN testbed for agriculture: Plant monitoring system". *The Second International Conference on Emerging Computation and Information Technologies*, Tumakuru, India, 15-16 December 2017.

[3] Caicedo-Ortiz JG, De-La-Hoz-Franco E, Ortega RM, Pineres-Espitia G, Combita-Nino H, Estevez F, Cama-Pinto A. "Monitoring system for agronomic variables based in wsn technology on cassava crops". *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 275-281, 2018.

[4] Bhattacharjee S, Roy P, Ghosh S, Misra S, Obaidat MS. "Wireless sensor network-based fire detection, alarming, monitoring and prevention system for Bord-and-Pillar coal mines". *Journal of Systems and Software*, 85(3), 571-581, 2012.

[5] Alphonsa A, Ravi G. "Earthquake early warning system by IOT using Wireless sensor networks". *International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking*, Chennai, India, 23-25 March 2016.

[6] Zhou G, Yi T, Zhang H, Li H. "Energy-aware wireless sensor placement in structural health monitoring using hybrid discrete firefly algorithm". *Structural Control And Health Monitoring*, 22(4), 648-666, 2014.

[7] Kalamani N, Aravind PD, Bala SM, Deepika. A, Gopala KK. "Health monitoring and control system using wireless sensor networks". *International Journal of Recent Trends In Engineering and Research*, 2018. doi: http://10.23883/IJRTER.CONF.02180328.022.Y0DIX.

[8] MEMSIC Company. "TelosB Datasheet". http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/telosb_datasheet.pdf, (01.10.2019).

[9] Chen Q, Cheng S, Gao H, Li J, Cai Z. "Energy-Efficient algorithm for multicasting in duty-cycled sensor networks". *Sensors,* 15(12), 31224-31243, 2015.

[10] Tosun M, Haytaoglu E. "A new distributed weighted connected dominating set algorithm for WSN". *IEEE 8th International Conference on Consumer Electronics*, Berlin, Germany, 2-5 September 2018.

[11] Tosun M, Haytaoglu E, Gulec O. "A minimal weight and routing cost connected dominating set algorithm for wireless sensor networks". *IEEE 26th Signal Processing and Communications Applications Conference*, İzmir, Turkey, 2-5 May 2018.

[12] Mohanty JP, Mandal C, Reade C. "Distributed construction of minimum connected dominating set in wireless sensor network using two-hop information". *Computer Networks*, 123, 137-152, 2017

[13] Dagdeviren O, Erciyes K, Tse S."Semi-asynchronous and distributed weighted connected dominating set algorithms for wireless sensor networks". *Computer Standards Interfaces*, 42, 143-156, 2015.

[14] Shi W, Liu W, Wang T, Zeng Z, Zhi G. "Adding duty cycle only in connected dominating sets for energy efficient and fast data collection". *IEEE Access*, 7(2019), 120475-120499, 2019.

[15] Kansal A, Srivastava MB. "An Environmental energy harvesting framework for sensor networks". *ACM International Symposium, Low Power Electronics and Design*, Seoul, Korea, 27-27 August 2003.

[16] Alippi C, Galperti C. "An adaptive system for optimal solar energy harvesting in wireless sensor network nodes". *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 55(6), 1742-1750, 2008.

[17] Clark BN, Colbourn CJ, Johnson D. "Unit disk graphs". *Discrete Math*, 86(1), 165-177, 1990.

[18] Shi T, Cheng S, Cai Z, Li Y, Li J. "Exploring connected dominating sets in energy harvest networks". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 25(3), 1803-1817, 2017.

[19] Dall'Ora R, Raza U, Brunelli D, Picco GP. "SensEH: From simulation to deployment of energy harvesting wireless sensor networks". *The Thirty Ninth Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops, Edmonton*, Canada, 8-11 September 2014.

[20] Winkler M, Tuchs K, Hughes K, Barclay G. "Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks". *Journal of Telecommunication Information Technology*, 2008(2), 37-45, 2008.

[21] Durisic MP, Tafa Z, Dimic G, Milutinovic V. "A survey of military applications of wireless sensor networks". *Mediterranean Conference on Embedded Computing*, Bar, Montenegro, 19-21 June 2012.

[22] Corchado JM, Bajo J, Tapia DI, Abraham, A. "Using heterogeneous wireless sensor networks in a telemonitoring system for healthcare". *IEEE Transactions Information Technology in Biomedicine*, 14(2), 234-240, 2009.

[23] Lee GX, Low KS, Taher, T. "Unrestrained measurement of arm motion based on a wearable wireless sensor network". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(5), 1309-1317, 2010.

[24] Ephremides A, Wieselthier JE, Baker DJ. "A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling". *Proceedings of IEEE*, 75(1), 56-73, 1987.

[25] Cardei M, Cheng MX, Cheng X, Du DZ. "Connected domination in multihop ad hoc wireless networks". *Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Science and Informatics*, North Carolina, United States of America, 8-14 March 2002.

[26] Alzoubi KM, Wan PJ, Frieder O. "New distributed algorithm for connected dominating set in wireless ad hoc networks". *Thirty Fifth Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Big Island, United States of America, 10 January 2002.

[27] Luo C, Yu J, Li D, Chen H, Hong Y, Ni L. "Novel Distributed algorithm for constructing virtual backbones in wireless sensor networks". *Computer Networks*, 146, 104-114, 2018.

[28] Wu J, Li H. "A dominating-set-based routing scheme in ad hoc wireless networks". *Telecommunication Systems*, 3(1999), 63-84, 1999.

[29] Dai, F, Wu, J. "An extended localized algorithm for connected dominating set formation in ad hoc wireless networks". *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 15(10), 908-920, 2004.

[30] Ding L, Wu W, Willson J, Du H, Lee W, Du DZ. "Efficient algorithms for topology control problem with routing cost constraints in wireless networks". *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Syste*ms, 22(10), 1601-1609, 2011.

[31] Gulec O, Haytaoglu E, Tokat S. "A novel distributed CDS algorithm for extending lifetime of wsns with solar energy harvester nodes for smart agriculture applications". *IEEE Access,* 8(2020), 58859-58873, 2020.

[32] Bhuvaneswari PTV, Balakumar R, Vaidehi V, Balamuralidhar P. "Solar energy harvesting for wireless sensor networks". *The Firsth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, Indora, India, 23-25 July 2009.

[33] Beheshtiha SS, Tan HP, Sabaei M. "Opportunistic routing with adaptive harvesting-aware duty cycling in energy harvesting WSN". *The Fifteenth International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications IEEE*, Taipei, Taiwan, 24-27 September 2012.

[34] Gong P, Xu Q, Chen, TM. "Energy-harvesting aware routing protocol for wireless sensor networks". *The nineth International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal IEEE*, Manchester, United Kingdom, 23-25 July 2014.

[35] Castagnetti A, Pegatoquet A, Le TN, Auguin M. "A joint duty-cycle and transmission power management for energy-harvesting WSN". *IEEE Transactions on Industrial Informatic*s, 10(2), 928-936, 2014.

[36] Gutiérrez J, Villa-Medina JF, Nieto-Garibay A, Porta-Gándara MÁ. "Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measuremen*t, 63(2014), 166-176, 2014.

[37] Cammarano A, Spenza D, Petrioli C. "Energy-Harvesting WSNs for structural health monitoring of undergroundtrain tunnels". *IEEE Conference on Computer Communications Workshops*, Turin, Italy, 14-19 April 2013.

[38] Gallager RG, Humblet PA, Spira PM. "A distributed algorithm for minimum-weight spanning trees". *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 5(1), 66-77, 1983.

[39] Osterlind F, Dunkels, A, Eriksson J, Finne N, Voigt T. "Cross-Level sensor network simulation with cooja". *The Thirty Firsth IEEE Conference on Local Computer Networks*, Florida, United States of America, 14-16 November 2006.