



EECHEP: Heterojen sensör ağların ömrünü uzatmak için enerji verimli küme başı seçim protokolü

EECHEP: Energy efficient cluster head election protocol for extending lifetime of heterogeneous sensor networks

Esma DİLEK^{1*} , Murat DENER¹

¹Bilgi Güvenliği Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
esma.dilek@gazi.edu.tr, muratdener@gazi.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 06.03.2022
Kabul Tarihi/Accepted: 04.10.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 21.09.2022

doi: 10.5505/pajes.2022.54789
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Kablosuz Sensör Ağlar, kısıtlı enerjiye sahip pillerle çalışan bir dizi düşük maliyetli, küçük sensör düğümlerinden oluşur. Sensör düğümlerinin sınırlı güç, bellek ve işlem kapasiteleri nedeniyle, düğümlerin enerji tüketimini iyileştiren ve ağın ömrünü uzatan yeni yöntemlerin bulunması önemlidir. Sensör düğümleri arasında küme başı seçimi, kablosuz sensör ağlarda ağın verimliliğini ve ömrünü artırmak için önemli bir role sahiptir. Bu çalışmada ağın ömrünü uzatan, heterojen kablosuz sensör ağlar için bir küme başı seçim yöntemi önerilmiş ve değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen küme başı seçim protokolünün, ağ ömrü açısından SEP ve LEACH protokollerinden daha iyi bir performans sunduğunu ve daha uzun süre verim sağlayabildiğini ortaya koymuştur. EECHEP'in, sensör enerjisinin verimli kullanımını sağladığı ve baz istasyonuna rapor sunan, hayatta kalan küme başı düğümlerinin sayısını artırmaya yardımcı olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Küme başı seçimi, Kablosuz sensör ağlar, Heterojen ağlar, Sensör ağı ömrü.

Abstract

Wireless Sensor Networks consist of a number of low cost, small sensor nodes powered by energy constrained batteries. Due to limited power, memory, and processing capacities of sensor nodes, it is essential to find new methods which improves energy consumption of the nodes and prolongs the lifetime of the network. Cluster head election among sensor nodes has an important role in wireless sensor networks to boost efficiency and lifetime of the network. In this study, a cluster head election method has been proposed and evaluated for heterogeneous wireless sensor networks, which extends the lifetime of the network. Simulation results reveal that the proposed cluster head election method offers a better performance than the SEP and LEACH protocols in terms of network lifetime and is able to provide throughput for a longer period of time. It is found that EECHEP provides efficient use of sensor energy and helps increase the number of surviving cluster head nodes that report to the base station.

Keywords: Cluster head election, Wireless sensor networks, Heterogeneous networks, Sensor network lifetime.

1 Giriş

Kablosuz sensör ağlar (KSA'lar), pillerle çalışan ve sınırlı yerleşik bellek, işleme, depolama ve radyo yeteneklerine sahip küçük sensör düğümlerinden oluşur [1]. Düğümler çevrelerini algılar ve algılanan verileri, araştırma ve depolama için baz istasyonu adı verilen ve aynı zamanda sunucuya veri göndermek için bir ağ geçidi görevi gören bir işlem merkezine iletir [2]. Sensör düğümlerinin konuşlandırılmasından sonra gömülü pillerin değiştirilmesi çok zor bir işlem olduğundan, ağın ömrünü uzatmak için KSA'lar için protokol tasarımı ve uygulamaların enerji açısından verimli olması gerekir [3].

Sensör düğümlerin sınırlı enerji kaynakları, ağın kararlılığını ve uzun ömürlülüğünü etkileyebilir. Bu nedenle ağın ömrünü uzatmak için literatürde birçok yöntem önerilmiştir. Literatürde enerji verimliliğini artırmak ve ağın ömrünü uzatmak için mevcut yöntemlerden biri, bir grup sensörün bir araya gelerek oluşturduğu kümelemedir. Kümeleme, KSA'larda performansın ölçeklenebilirliğini ve güvenilirliğini sağlamak için büyük önem taşımaktadır. Kümeler, üye düğümlerden ve küme başı olarak adlandırılan belirli bir düğümden oluşur. Küme başı, oluşturulan kümelerin her biri için seçilir ve enerjisi verimli kullanmak için baz istasyonu ile iletişim kurar. Küme başı, küme üyelerinden verileri toplar ve toplanan verileri baz istasyonuna iletir. Ağın dayanıklılığını artırmak için küme

başlarını seçerken verimli bir yöntem bulmaya ihtiyaç vardır [2].

Enerjinin verimli kullanımı ve küme başlarının optimal seçimi, KSA'ların ömrü üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada, hiyerarşik olarak kümelenecek heterojen KSA'lar için alternatif, enerji verimli bir küme başı seçim protokolü geliştirilmesi amaçlanmıştır. Hiyerarşik olarak kümelenecek heterojen KSA'lar için heterojen farkındalığı olan bir küme başı seçim protokolü olan "EECHEP (Energy Efficient Cluster Head Election Protocol)", sensör düğümlerinin ve ağın ömrünü uzatmak için önerilmiştir.

Önerilen EECHEP yöntemi, küme başı olarak seçilecek her bir düğümün, kalan enerjisine göre ağırlıklı seçim olasılıklarına bağlıdır [3]. EECHEP, ağ ömrünü ve ağın verimini artırmak için küme başlarının seçimi sırasında, düğümlerin kalan enerjisini de dikkate alır.

EECHEP'te, sensör düğümlerinin bir bölümü, ilave enerji kaynaklarına sahiptir. Enerji kaynaklarının bu heterojenliği, ağın ilk kurulumu sırasında veya ağ operasyonları ilerledikçe ortaya çıkabilir. Ayrıca, sensörlerin ağda rastgele (tekdüze) konuşlandırıldığı ve mobil olmadıkları, baz istasyonunun koordinatlarının ve sensör alanının boyutlarının sabit olduğu ve bilindiği varsayılmıştır.

Literatür çalışmaları gözden geçirildikten sonra, bu çalışmada heterojen KSA'lar için alternatif, enerji verimli küme başı seçim

*Yazışılan yazar/Corresponding author

protokolü geliştirilmiştir. EECHEP'in temel özellikleri ve önceki çalışmalardan farkları aşağıda özetlenmiştir:

- Hiyerarşik olarak kümelenmiş heterojen KSA'lar için enerji verimli, heterojen farkındalığı olan bir küme başı seçim protokolüdür,
- EECHEP, küme başlarının seçiminde sensör düğümlerinin kalan enerjisini dikkate almaktadır,
- Optimum oluşturulan küme sayısı (k_{opt}), küme başı olması gereken düğümlerin optimum yüzdesi (p_{opt}), normal düğümler için seçim olasılığı değeri (p_{nrm}), gelişmiş düğümler için seçim olasılığı değeri (p_{adv}), normal düğümler için (rnd_{pnr}) ve gelişmiş düğümler için (rnd_{padv}) tur sayıları, normal ve gelişmiş sensör düğümleri arasından seçilecek optimum küme başı sayısı; her turda, canlı normal ve gelişmiş sensör düğümlerinin toplam sayısına göre güncellenmektedir. Böylece normal ve gelişmiş düğümler arasından verimli bir küme başı seçimi gerçekleştirilebilmektedir,
- Küme başı seçim kriterlerinin sadeliği sayesinde, karşılaştırılan yöntemlerde tüm sensör düğümlerinin enerjileri tükendiği aşda, EECHEP çalıştırıldığında hâlâ canlı düğümler bulunmaktadır. EECHEP; SEP (Stable Election Protocol) [3] ve LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [4] protokollerine kıyasla, sensör düğümlerinin ve ağın ömrünü uzatmaktadır. Bu durum, sensör ağında heterojen sensör düğümler olduğunda, KSA'larda geri bildirim kalitesinin artmasına ve baz istasyonunun sensör ağı hakkında daha uzun süre bilgilendirilmesine olanak tanımaktadır,
- EECHEP hem normal hem de gelişmiş düğümler için daha uzun bir kullanım ömrü sağlamaktadır,
- EECHEP, KSA'larda daha uzun bir süre için ağ verimliliği sağlamakta ve KSA'larda canlı düğümler olduğu sürece küme başlarını seçmektedir,
- EECHEP'te, ağın işleyişi sırasında, canlı sensör düğüm sayısında, küme başlarına gönderilen paket sayısında, baz istasyonuna gönderilen paket sayısında ve ağ veriminde kademeli bir azalma görülmektedir. Eşik değeri ve rastgele sayı üretme işlemi olmadığı için küme başlarına gönderilen paket sayısında, baz istasyonuna gönderilen paket sayısında dalgalanma olmamaktadır.

Bu makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi organize edilmiştir. İlk olarak, 2. bölümde literatürde yer alan ilgili çalışmalar sunulmuştur. Ardından, 3. bölümde önerilen EECHEP yöntemi açıklanmış, 4. bölümde simülasyon sonuçları paylaşılmıştır. Son olarak 5. bölümde sonuçlar değerlendirilmiştir.

2 Literatür çalışmaları

Doğrudan İletim (DT) ve Minimum İletim Enerjisi (MTE) [5] gibi geleneksel yöntemler, enerji yükünün KSA düğümleri arasında dengeli bir şekilde yayılmasını sağlamada başarılı değildir. DT kullanıldığında, sensör düğüm verileri doğrudan baz istasyonuna iletiltiğinden, baz istasyonundan uzaktaki düğümlerin enerjisi daha önce tükenmektedir [6]. MTE kullanıldığında, veriler minimum maliyetli yollarla iletilmekte, burada tüketilen iletim gücü, maliyeti ortaya çıkarmaktadır. MTE kullanıldığında, baz istasyonuna yakın düğümler, baz istasyonundan uzaktaki düğümlerden daha yüksek olasılıkla mesaj gönderici olarak çalışmaktadır. Bu nedenle, baz

istasyonuna yakın olan düğümlerin enerjisi daha hızlı tükenme eğilimindedir. Hem DT hem de MTE kullanıldığında, ağın ömrünün önemli bir bölümünde sensör ağının bir kısmı izlenememektedir, bu durum algılama operasyonunun önyargılı olacağı anlamına gelmektedir [3].

[4]'te önerilen LEACH protokolü adı verilen yöntem, enerji yükünün dinamik olarak oluşturulmuş kümeler tarafından uygun şekilde tahsis edilmesini ve küme başlarının önceden hesaplanmış optimal olasılığa dayalı olarak dinamik olarak seçilmesini sağlar. Küme üyeleri tarafından algılanan veriler, küme başları tarafından toplanır ve ardından baz istasyonuna iletilir. Zaman içinde, her sensör düğümü, küme başı rolünü tüm sensör düğümleri arasında eşit olarak döndürerek aynı miktarda enerjiyi tüketme eğilimindedir. LEACH protokolünde kümeler her turda yeniden oluşturulur. Her turda, yeni küme başları seçilir ve sonuç olarak ağ yükü, KSA'nın düğümleri arasında düzgün ve dengeli bir şekilde dağıtılır. Ek olarak, her bir sensör düğümü, baz istasyonu ile iletişim maliyetini düşürmek için verileri en yakın küme başına iletir. Baz istasyonuna, yalnızca büyük miktarda enerji tüketme eğiliminde olan küme başları tarafından rapor edilir, ancak bu durum, her düğüm için düzenli aralıklarla gerçekleşir. LEACH protokolünün orijinal versiyonu, başlangıç enerjilerine göre düğümlerin heterojenliğini dikkate almaz. Sonuç olarak, sensör ağının enerji bakımından heterojen olması olduğunda, KSA'nın enerji kaynaklarının tüketimi optimize edilmez. LEACH protokolünde sensör ağının sadece uzaysal yoğunluğu dikkate alınmaktadır [3].

Kümelenmiş kablolu sensör ağlarda heterojenlik olması durumunda, kümeleme protokollerinin davranışını sorgulayan ilk çalışma Heinzelman [7] tarafından yapılmıştır. Heinzelman, her düğümün kalan enerjisine göre küme başlarını seçmek için bir yöntem araştırmıştır. Ağın toplam enerjisinin her düğüm tarafından bilindiğini ve her düğümün kendi küme başı seçim olasılığını, kalan enerjisine göre uyarladığını varsayan bir seçim yöntemi önermiştir. Bu yöntemin dezavantajı, bu kararın tur başına verilmiş olması ve ağın kalan toplam enerjisinin bilindiğinin varsayılmasıdır. Yöntem, tüm ağın kalan enerjisinin bilindiği varsayımına dayandığından uygulanması zordur.

Düğümlerin başlangıç enerjisine bağlı olan SEP [3]'te, düğüm enerjisine göre heterojenliğin etkisi araştırılmıştır. SEP, ilk düğümün enerjisinin tükenmesinden önceki süreyi (kararlılık periyodu) uzatmak için geliştirilmiştir. Bu durum, sensör ağından gelen yanıtın güvenilir olması gereken çoklu uygulamalar için büyük önem taşımaktadır. SEP, gelişmiş düğümlerin oranı (m) ve gelişmiş ve normal düğümler arasındaki ilave enerji faktörü (α) gibi tipik heterojenlik faktörlerini kullanarak kümeleme hiyerarşi sürecinin kararlı bölgesini geliştirmiştir [3].

Mary ve diğ. [8] tarafından önerilen olasılığa dayalı heterojen-farkında küme başı seçim yöntemi; kalan düğümün enerjisini, yoğunluğunu ve baz istasyonuna olan mesafesini dikkate alarak ağ ömrünü, küme başı seçimi için bulanık mantık tabanlı ZSEP-E (Zone-based Stable Election Protocol-Enhanced) protokolüne kıyasla iyileştirmiştir.

Barani ve diğ. [9], LEACH-FL (LEACH-Fuzzy Logic) protokolünde mevcut LEACH protokolünün düğüm yoğunluğunu, batarya seviyesini ve düğümün en yakın hop'a olan mesafesini göz önünde bulundurarak ortalama gecikme ve iletim oranını iyileştirmiştir.

Gupta ve diğ. [10] ağın kararlılığını ve ömrünü artıran bir sistem önermiştir. Yöntemleri, LEACH'ten daha iyi performans

göstermiştir ve hem homojen hem de heterojen KSA'larda etkilidir.

Heterojen KSA'larda küme başı seçimi için Ridge Yöntemi, Prasath ve diğ. [11] tarafından önerilmiş; ağ verimini ve kalan enerjisini arttırmıştır.

Homojen ve heterojen kümelenmiş KSA'lar için maliyete dayalı karşılaştırmalı bir çalışma, Mhatre ve Rosenberg tarafından ortaya konmuştur [12]. Farklı sensör türleri arasındaki optimal dağılımı tahmin etmek için bir yöntem önerilmiştir. Ancak, sensör ağının enerji bakımından heterojen olması durumu, KSA'nın çalışmasından kaynaklanıyorsa, bu sonucun kullanılması zordur. Her bir küme içindeki çok hop'lu yönlendirmeyi (M-LEACH olarak adlandırılan) de incelemişlerdir. Çözümün en büyük dezavantajı, yalnızca güçlü düğümlerin küme başı olarak seçilebilmesidir. Ayrıca, M-LEACH, çoklu varsayımlar altında ve yalnızca düğüm sayısı çok yüksek olduğunda doğrulanmıştır [3].

Önceki çalışmalar, simülasyon ortamlarında [4],[6] veya analitik yöntemlerle [13],[14] sensör ağında, düğümlerin düzgün bir şekilde dağıtıldığında, uzaysal yoğunluğun bir fonksiyonu olarak bir düğümün küme başı olarak seçilmesinin optimal olasılığını incelemiştir. Bu kümeleme yaklaşımı, enerji tüketiminin tüm sensörler üzerinde iyi bir şekilde dağıtılması ve toplam enerji tüketiminin en aza indirilmesiyle optimal olarak kabul edilir [3].

[15]'te Duarte-Melo ve Liu, iki tür sensörün bulunduğu bir alanda, KSA'ların performansını ve enerji tüketimini incelemiştir. Bir katmana ait olan sensör düğümlerin sayısı daha az; ancak daha güçlü olması dikkate alınmıştır. Diğer düğümler, algıladıkları verilerini bu katman düğümlerine iletmekte ve bu katman düğümleri verileri toplayarak baz istasyonuna iletmektedir. İki tip düğüm arasında küme başlarının dinamik bir seçimi olmadığından, bu yöntemde güçlü düğümlerden uzaktaki düğümlerin daha önce enerjileri tükenmektedir. Ağdaki güçlü düğümlerin optimal yüzdesi yazarlar tarafından tahmin edilmektedir; ancak heterojenlik sensör ağının çalışmasının bir sonucuysa ve optimal ayar seçeneği değilse bu sonucun kullanılması çok zordur [3].

Sensör ağlarda güvenilir veri iletimi ihtiyacı [16]'da tartışılmıştır. [17],[18] gibi diğer enerji duyarlı yönlendirme yöntemleri, her bir düğümün tam konumunun önceden bilindiğini (örneğin, her düğümün bir GPS'inin olması) ve başlangıçta düğümlerin enerjileri açısından homojen olduklarını varsaymıştır. [18]'de önerilen bu tür varsayımlar ve özel olarak merkezileştirilmiş çözümler, düşük maliyetli, büyük ölçekli ağlar için uygun görünmemektedir.

Kumar ve diğ. [19], heterojen sensör ağlar için literatürdeki mevcut yöntemlerden farklı bir ağırlıklı olasılığa dayanan, dağıtılmış küme başı seçim yöntemi önermiş ve değerlendirmiştir.

[20],[21]'deki ilgili çalışmalar, diğer sensör düğümlere kıyasla daha yüksek veri işleme kapasitesine ve gelişmiş donanım özelliklerine sahip olan yüksek enerjili sensör düğümlerle, iki farklı türde düğümün konuşlandırıldığını varsayan heterojen ağ modellerini ele almıştır. [22]'de, heterojen ağların enerji tüketimi ve ömrü, bir dizi önde gelen sensör arasından, herhangi bir zamanda, bunların yalnızca bir alt kümesinin aktif küme başları olarak seçileceği varsayılarak incelenmiştir. Ömür tahmini, diğer değişkenlerle birlikte, veri toplama turlarının sayısının bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir [19].

Sensör düğümlerinin yerel bilgisinden yararlanan, bunu küme başı seçimi ve küme oluşumu için kriter olarak kullanan, yeni bir dinamik, dağıtımçı ve kendi kendini organize eden, entropi tabanlı kümeleme şeması, Osamy ve diğ. [23] tarafından önerilmiştir. Önerilen yöntemin, enerji tüketimi, kararlılık periyodu ve ağ ömrü açısından mevcut temel algoritmalarından daha iyi performans gösterdiği ortaya koyulmuştur.

Preethiya ve diğ. [24], hibrit KSA'da ağ ömrünü ve yük dengelemeyi geliştirmek için ağ kullanım ömrünü iyileştirmede standart LEACH-C, LEACH-M algoritmasından daha iyi performans gösteren Mobil Çift Küme Başı-Parçacık Sürü Optimizasyonu (MDCH-PSO) algoritmasını önermiştir.

[25]'te Batra ve diğ. tarafından bulanık mantık tabanlı bir küme başı seçim yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen Bulanık Mantık tabanlı Küme Başı Seçimi (FLCHS) yöntemi, düğüm yükünün dengelenmesine yardımcı olmuş ve enerji tasarrufu sağlamıştır. FLCHS protokolü, ağ ömrü, enerji tüketimi ve verim açısından SEP [3] protokolünden daha iyi performans göstermiştir.

Dutt ve diğ. [26], iki seviyeli heterojen bir KSA'da küme başı seçim eşiklerini değiştirerek ağ ömrünü daha da iyileştirmek için Küme Başlı Kısıtlı Enerji Verimli Protokolü (CREEP) biçiminde bir yöntem önermiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen çözümün, sabit ve mobil KSA senaryolarında, ağ ömrü açısından iyileştirme sağladığını göstermiştir.

Dinamik olarak değişen küme başı seçim olasılığını temel alan, düğümlerin kalan enerji düzeyine ve tur başına minimum küme sayısına göre küme başlarını seçen, kararlılık ve ağ ömrü açısından SEP [3] ve Eşiğe Duyarlı Kararlı Seçim protokolünden (TSEP) daha iyi performans gösteren Gelişmiş Eşik Duyarlı Kararlı Seçim Protokolü (ETSSEP), Kumar ve diğ. [27] tarafından önerilmiştir.

Küme başlarının dağılımını dengeleyen, görece daha yüksek enerjiye sahip düğümleri küme başı olarak seçen ve ağ ömründe iyileşme sağladığı gösterilen Sanal Küme Başı Seçim Yöntemi, [28]'de önerilmiştir.

Wang ve diğ. [29] tarafından önerilen SEARCH (Election of Appropriate Range Cluster Heads)'te, her tur için düşük zaman maliyeti ve optimal sayıda küme başı sağlayan, ağ performansını iyileştiren yarı merkezi bir stokastik seçim yaklaşımı sunulmuştur.

Çok-seviyeli heterojen, kablosuz sensör ağlarda yönlendirme problemini çözmek için [30]'da belirleyen verimli ve dinamik bir kümeleme şeması (EDCS) önerilmiştir. Bu yöntemde, ideal durum ve geçmiş referans değer ortalama enerji tüketimi tahmini birlikte değerlendirilmekte ve bir sonraki turda, ağın ortalama kalan enerjisi tahmini yoluyla düğümün küme başı olma olasılığı belirlenmektedir. Bu yöntemin, çok seviyeli heterojen KSA'lar için LEACH, SEP, DEEC (Distributed Energy-Efficient Clustering) [31] ve EDFCM (Energy Dissipation Forecast and Clustering Management) [32]'den daha uygun olduğu gösterilmiştir.

[33]'te, sensörlerin ağ geçidi ve küme başı olma şansını değerlendirmek için iki bulanık seçim mantığı kullanan ve daha az enerji tüketerek ağın ömrünü uzatan GCHE-FL (Gateway and Cluster Head Election using Fuzzy Logic) yöntemi önerilmiştir.

Küme başı seçim olasılığının dinamik olarak ve daha verimli bir şekilde değiştirilmesine dayanan DDEEC (Developed Distributed Energy-Efficient Clustering) yöntemi [34]'te değerlendirilmiştir. Ağ ömrü ve ilk düğümün enerjisinin

tükenmesi açısından SEP [3]'ten ve DEEC'ten daha performanslı olduğu gösterilmiştir.

Küme tabanlı KSA mimarileri için dinamik olarak seçilen parametre katsayılarına dayanan, adaptif bir küme başı seçim metodolojisi [35]'te önerilmiştir.

Heterojen kablosuz sensör ağlarda, farklı kümeleme protokollerinin küme başı seçim kriterleri [36]'da gözden geçirilmiş ve bu protokollerin performansı; kümeleme tekniği, küme başı seçim kriterleri, düğüm ömrü, iki ve üç seviyeli heterojen ağlarda enerji verimliliği gibi çeşitli parametreler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, TDEEC (Threshold Distributed Energy Efficient Clustering)'in diğer iki ve üç seviyeli heterojen kablosuz sensör ağ protokollerine göre çok etkili sonuçlara sahip olduğunu ve kararsız bölgeyi önemli ölçüde genişlettiğini göstermiştir. Simülasyon sonuçları, düğüm heterojenliği eklemenin ağ ömrünü önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir.

Düğümün kalan enerjisinin ve ağ ortalama enerjisinin, küme başı seçimindeki eşik değerine eklenmiş olduğu heterojen bir kümeleme olan Uyku-Uyanık Enerji Verimli Dağıtılmış (Sleep-awake Energy Efficient Distributed, SEED) [37] kümeleme yönteminde, kablosuz sensör ağlarda heterojen kümeleme yöntemi olan SEED protokolü iyileştirilmiştir. [38]'de, yüksek enerji verimliliği, uzun kararlılık süresi ve ölçeklenebilirlik sunan, iki aşamalı küme başı seçim yöntemi olan EEMCE (Energy Efficient Multi-Hop Cluster-Head Election Strategy) stratejisi önerilmiştir. [39]'da önerilen DARE-SEP (Distance Aware Residual Energy-Efficient Stable Election Protocol); REE-SEP (Residual Energy Efficient Stable Election Protocol)'in özelliklerini Doğrudan İletim (DT) ve DP (Distance-Based) protokolü ile birleştiren hibrit bir yaklaşım olup enerji verimliliğinde %10 artış sağladığı görülmüştür.

[40]'ta, küme başlarının etkili seçimi için ağların farklı enerji türlerini ve algılama aralığındaki düğüm yoğunluğunu dikkate alan, ağırlıklı bir eşik tabanlı olasılıklar formülü önerilmiş ve ağ ömrü, SEP'e kıyasla %115.4 uzatılabilmektedir.

Çok seviyeli heterojenliğe dayanan [41], heterojen kablosuz sensör ağlarda ağ ömrünü uzatmak ve verimi artırmak için SEP'ten esinlenmiş olup NEECP (Novel Energy-Efficient clustering protocol), ICACO (Inter Cluster Ant Colony optimization) ve DCHSM (Dynamic Cluster Head Selection Method) yöntemlerinden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Güncel çalışmalarda genetik algoritma ve bulanık mantık tabanlı küme başı seçim yöntemleri kullanılarak da başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Genetik Algoritma tabanlı Optimize Edilmiş Kümeleme (GAOC-Genetic Algorithm-based Optimized Clustering) protokolü [42], kalan enerji, baz istasyonuna olan mesafe ve düğüm yoğunluğu parametrelerini formüle edilmiş uygunluk fonksiyonunda entegre ederek optimize edilmiş küme başı seçimi sunmaktadır.

Nandan ve diğ. [43], önerdikleri hareketli baz istasyonu stratejisi ile baz istasyonu ve küme başı arasındaki mesafeyi kısaltan ve hot-spot problemini azaltan optimize edilmiş genetik algoritması ile ağın kalan enerjisi, ağ ömrü, kararlılık süresi, verim ve tur başına küme sayısı performans ölçütlerini iyileştirmiştir.

Optimal küme başının, bulanık mantık kullanılarak kalan enerji, her kümedeki minimum ve maksimum enerji ve her kümedeki düğümler ile baz istasyonu arasındaki minimum ve maksimum mesafeler gibi çeşitli kriterlere göre seçildiği HQCA-WSN [44], yüksek güvenilirlik, kümeleme sırasında düşük hata oranı, daha

iyi ölçeklenebilirlik ve yüksek sayıda düğüm içeren ağlarda performans sağlamaktadır.

Bulanık Bağımsız Dairesel Bölgeler Protokolü (FICZP) [45]'te, küme başlarının seçimi, biri komşu düğüm sayısını ve ikincisi kalan enerjiyi düğümlerle temsil eden iki farklı ölçüte dayanmakta olup bu iki metrik, düğümlerin yaşam boyu maliyet değerlerini tanımlamak için bulanık mantık yaklaşımıyla birleştirilmiştir.

Önerilen EECHep, ağ ömrü ve enerji verimliliği bakımından SEP'in iyileştirilmiş bir versiyonu olup SEP'ten farklılıkları aşağıda sunulmuştur:

- Küme başı seçim kriterleri, literatürde mevcut olan SEP ve LEACH protokolünden farklıdır. Küme başı seçim süreci bir eşik değeri içermemekte ve rastgele bir sayı seçme süreci bulunmamaktadır,
- En uygun sayıda küme başları, normal ve gelişmiş sensör düğümleri arasında, enerjileri olduğu sürece ve bir önceki döngüde (epoch) veya alt döngüde (sub-epoch) küme başı olarak seçilmedikleri sürece seçilir. Algoritma, her turda güncel canlı normal düğüm sayısını ve p_{norm} değerini dikkate alarak normal düğümler arasında optimal sayıda küme başını; güncel canlı gelişmiş düğüm sayısını ve p_{adv} değerini göz önünde bulundurarak gelişmiş düğümler arasında optimum sayıda küme başını seçer. Algoritma bir turda normal ve gelişmiş düğümler arasında bir küme başı seçemezse, maksimum enerjiye sahip sensör düğümünü, enerjisi varsa mevcut tur için küme başı olarak seçer,
- EECHep'in her turunda aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmektedir:
 - Canlı normal ve gelişmiş sensör düğümleri arasında optimal küme başı sayısının bulunmasında kullanılan parametreler, toplam canlı sensör düğüm sayısına göre ayrı ayrı güncellenir,
 - Canlı normal ve gelişmiş sensör düğümlerinin sayısı, kalan enerjileri dikkate alınarak güncellenir,
 - Ağın ortalama kalan enerjisi ve verimi güncellenir.

3 Önerilen yöntem

Bu bölümde, başlangıç enerjilerinde heterojen sensör düğümlerinden oluşan bir KSA için önerilen küme başı seçim yöntemi açıklanmıştır.

3.1 Önerilen yöntemin seçim nedeni

Sensör düğümleri arasında küme başı seçim süreci, ağın verimliliğini, ölçeklenebilirliğini ve ömrünü artırmak için KSA'larda etkili bir süreç ve KSA'a birkaç heterojen sensör düğümü eklemek, ağ ömrünü ve kararlılığını iyileştirmek için etkili bir yöntemdir [19]. Bu çalışmada, literatürde yer alan yöntemlerden farklı seçim kriterlerine dayalı alternatif, enerji verimli bir küme başı seçim protokolü önerilmiştir.

3.2 Terimler, tanımlar ve formüller

[3]'te açıklanan ve bu çalışmada kullanılan terimler, tanımlar ve formüller aşağıda yer almaktadır:

- **Homojen:** Tüm sensör düğümlerinin aynı miktarda başlangıç enerjisine sahip olması,
- **Heterojen:** Bazı sensör düğümlerinin başlangıç enerjisinin diğerlerinden daha fazla olması,
- **Kararlılık periyodu:** İlk düğümün enerjisinin tükenmeden önceki zaman periyodu,
- **Normal düğüm:** Varsayılan başlangıç enerjisine sahip düğüm,

- **Gelişmiş düğüm:** Normal düğümlerden daha yüksek başlangıç enerjisine sahip düğüm,
- **Canlı düğüm:** Enerjisi tükenmemiş olan düğüm.
- **n :** Ağdaki toplam düğüm sayısı,
- **m :** Gelişmiş düğüm sayısının ağdaki toplam düğüm sayısına oranı,
- **α :** Gelişmiş ve normal düğümler arasındaki ilave enerji çarpanı,
- **k_{opt} :** Sensör ağında oluşturulan optimum küme sayısı olup Formül (1) ile hesaplanmaktadır.

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{n}{2\pi}} \cdot \frac{2}{0.765} \quad (1)$$

- **p_{opt} :** Bir düğümün küme başı olma optimal olasılığı olup Formül (2) ile hesaplanmaktadır.

$$p_{opt} = \frac{k_{opt}}{n} \quad (2)$$

- **p_{nrm} :** Normal düğümler için her turda küme başı seçilme ağırlıklı olasılığı olup Formül (3) ile hesaplanmaktadır.

$$p_{nrm} = \frac{p_{opt}}{1 + \alpha \cdot m} \quad (3)$$

- **p_{adv} :** Gelişmiş düğümler için her turda küme başı seçilme ağırlıklı olasılığı olup Formül (4) ile hesaplanmaktadır.

$$p_{adv} = \frac{p_{opt}}{1 + \alpha \cdot m} \times (1 + \alpha) \quad (4)$$

- **Döngü (epoch):** Heterojen ağda, normal bir düğümün kaç turda bir tekrar küme başı seçilebileceğini belirleyen periyot olup Formül (5) ile hesaplanmaktadır.

$$epoch = \frac{1}{p_{nrm}} = \frac{1}{p_{opt}} \times (1 + \alpha \cdot m) \quad (5)$$

- **Alt-Döngü (sub-epoch):** Heterojen ağda, gelişmiş bir düğümün kaç turda bir tekrar küme başı seçilebileceğini belirleyen periyot olup Formül (6) ile hesaplanmaktadır.

$$sub_epoch = \frac{1}{p_{adv}} = \frac{1}{p_{opt}} \times \frac{1 + \alpha \cdot m}{1 + \alpha} \quad (6)$$

- **d :** Gönderici ile alıcı arasındaki mesafe,

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (7)$$

- **ϵ_{fs} ve ϵ_{mp} :** Sensör düğümü radyosunda kullanılan, verici amplifikatör modeline bağlı sabit radyo değerleri olup tüketilen enerji, baz istasyonuna olan mesafe $\leq d_0$ ise $\epsilon_{fs} = 10\text{pJ/bit/m}^2$; baz istasyonuna olan mesafe $\geq d_0$ ise $\epsilon_{mp} = 0.0013\text{pJ/bit/m}^4$ olarak kabul edilmiştir.
- **E_{elec} :** Sensör düğümünün verici veya alıcı birimini çalıştırmak için bit başına tüketilen enerji olup $E_{elec} = 50\text{nJ/bit}$ olarak kabul edilmiştir.
- **E_{RX} :** Bir mesajı almak için radyo tarafından tüketilen enerji,
- **E_{TX} :** Bir mesajı iletmek için radyo tarafından tüketilen enerji,
- **E_{DA} :** Sensör düğümünün veri kümeleme sırasında tükettiği enerji olup $E_{DA} = 5\text{nJ/bit/iletim}$ olarak kabul edilmiştir.
- **E_0 :** Normal bir sensör düğümünün başlangıç enerjisi olup $E_0 = 0.5$ Joule olarak kabul edilmiştir (Gelişmiş bir sensör düğümünün başlangıç enerjisi $E_0 \times (1 + \alpha)$ 'dır).

- **$rmax$:** Algoritmanın çalıştırıldığı maksimum tur sayısı.

3.3 EECHep (Enerji Verimli Küme Başı Seçim Protokolü)

EECHep, iki seviyeli hiyerarşik KSA'larda dağıtılmış bir tarzda küme başlarının seçilmesi için önerilmiştir. EECHep, küme başı seçim olasılıklarının ağdaki diğer düğümlerinkine göre bir düğümün başlangıç enerjisi tarafından ağırlıklandırıldığı anlamına gelen, heterojen-farkında bir küme başı seçim protokolüdür.

EECHep'te, canlı sensör düğümleri (normal veya gelişmiş düğümler) olduğu sürece, heterojen bir KSA'da farklı seçim kriterleri kullanılarak tur başına ortalama küme başı sayısının seçilmesinin sağlanması amaçlanmaktadır. Ağda canlı sensör düğümleri olduğu sürece, baz istasyonunun KSA hakkında geri bildirim alabilmesi için EECHep'te her turda en az bir küme başı seçilmektedir. Sonuç olarak, en kötü durumda, herhangi bir sensör düğümünün enerjisi olduğu sürece, her turda sensör ağı hakkında baz istasyonuna rapor sunan bir küme başı seçilmektedir.

Ağın homojen olması durumunda, tur başına ortalama küme başı sayısı $n \times p_{opt}$ iken; ağın heterojen olması durumunda, tur başına ortalama küme başı sayısı $n \cdot (1 - m) \times p_{nrm} + n \cdot m \times p_{adv} = n \times p_{opt}$ 'ye; yani tur başına istenen küme başı sayısına eşittir [3].

Normal ve gelişmiş sensör düğümleri için küme başı seçilme ağırlıklı olasılıkları, sırasıyla aşağıdaki Formül (3) ve Formül (4) ile hesaplanmaktadır [3]:

$p_{nrm} = \frac{p_{opt}}{1 + \alpha \cdot m}$ (3) Normal düğümler için her turda küme başı seçilme ağırlıklı olasılığı.

$p_{adv} = \frac{p_{opt}}{1 + \alpha \cdot m} \times (1 + \alpha)$ (4) Gelişmiş düğümler için her turda küme başı seçilme ağırlıklı olasılığı.

Gelişmiş düğümler, normal düğümlerden daha yüksek enerjiye sahip olduklarından, EECHep'te gelişmiş düğümlerin normal düğümlerden daha sık küme başı olmaları sağlanmakta ve enerji tüketiminde adaletli davranılmaktadır. EECHep'te, [3]'te önerildiği gibi normal düğümlerin her biri, her $\frac{1}{p_{opt}} \times (1 + \alpha \cdot m)$ turda (döngüde) bir kez küme başı olmakta ve gelişmiş düğümlerin her biri, her $\frac{1}{p_{opt}} \times (1 + \alpha \cdot m)$ turda (alt-döngüde) $1 + \alpha$ kez küme başı olmaktadır. SEP'ten farklı olarak, p_{opt} değeri, canlı sensör düğümü sayısına göre her turda güncellenmektedir. Böylece p_{opt} değeri, canlı sensör düğüm sayılarına göre ayarlanabilmektedir. p_{opt} değerinin güncellenmesinden sonra p_{nrm} ve p_{adv} değerleri de her turda güncellenmektedir.

EECHep algoritmasının başlangıç adımları aşağıda özetlenmiştir:

- $n, m, \alpha, \epsilon_{fs}, \epsilon_{mp}, E_{elec}, E_{RX}, E_{TX}, E_{DA}, E_0, rmax$ parametreleri giriş parametreleri olarak okunur,
- $100m \times 100m$ boyutunda bir alanda n adet sensör düğümünden oluşan bir sensör ağı rastgele oluşturulur ve baz istasyonu sensör ağının merkezine yerleştirilir,
- Normal düğüm sayısı $normal_node_cnt = n \times (1 - m)$ olarak hesaplanır,
- Gelişmiş düğüm sayısı, $advanced_node_cnt = n \times m$ olarak hesaplanır,
- Tüm normal sensör düğümlerine başlangıç enerjisi E_0 olarak atanır,

- f. Tüm gelişmiş sensör düğümlerine başlangıç enerjisi $E_0 \times (1 + \alpha)$ olarak atanır,
- g. Normal/gelişmiş/canlı/enerjisi tükenmiş düğüm sayıları ile verim ve ortalama kalan enerji sayaçlarına ilk değerleri atanır,
- h. $k_{opt}, p_{opt}, p_{nrm}, p_{adv}$ değerleri hesaplanır,
- i. Normal ve gelişmiş düğümler için döngü (epoch- rnd_pnrn) ve alt döngü (sub-epoch- rnd_padv) sayaçları, Formül (5) ve Formül (6) ile hesaplanır ve elde edilen ondalık sayılar yuvarlanır ($rnd_pnrn = \text{round}(\frac{1}{p_{nrm}})$ ve $rnd_padv = \text{round}(\frac{1}{p_{adv}})$ olarak hesaplanır),
- j. Her turda küme başı olarak seçilecek optimal sayıda normal ($normal_n_cnt$) ve gelişmiş ($advanced_n_cnt$) düğüm sayıları, Formül (7) ve Formül (8) ile hesaplanır.

$$normal_n_cnt = \text{round}(n \cdot (1 - m) \times p_{nrm}) \quad (7)$$

$$advanced_n_cnt = \text{round}(n \cdot m \times p_{adv}) \quad (8)$$

EECHEP algoritmasının uygulama adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- a. $k_{opt}, p_{opt}, p_{nrm}, p_{adv}, rnd_pnrn, rnd_padv$ değerleri, toplam canlı sensör düğümü sayısına göre güncellenir,
- b. Küme başı olarak seçilecek normal sensör düğüm sayısı ve küme başı olarak seçilecek gelişmiş sensör düğüm sayısı, toplam canlı sensör düğüm sayısına göre güncellenir,
- c. Her bir turun kalan enerjisi, her sensör düğümünün kalan enerjisinin toplamı alınarak hesaplanır,
- d. $\text{mod}(r, rnd_pnrn) = 0$ ise (r mevcut tur sayısıdır), bu durumda tüm sensör düğümlerinin grup numaraları 0 olarak ayarlanır (heterojen döngü için işlem),
- e. $\text{mod}(r, rnd_padv) = 0$ ise, gelişmiş sensör düğümlerinin grup numaraları 0 olarak ayarlanır (Alt döngüdeki işlemler için),
- f. Enerjisi tükenmiş/canlı/normal/gelişmiş sensör düğümleri, Küme Başları, $packages_to_BS$ (baz istasyonuna gönderilen paket sayıları), $packages_to_CH$ (küme başlarına gönderilen paket sayıları) sayılarını tutmak için sayaçlar 0 olarak ayarlanır (sayaçlar r . tur için sıfırlanır),
- g. Tüm sensör düğümlerinin kalan enerjileri kontrol edilir ve enerjisi tükenmiş/canlı/normal/gelişmiş düğüm sayılarını tutmak için kullanılan ilgili sayaçlar güncellenir,
- h. Sensör ağındaki sensör düğümlerinin her biri için, $Energy_Node(i) > 0$ & $Node(i) \neq$ önceki döngüdeki/alt döngüdeki küme başı olup olmadığı & seçilen normal düğümlerin toplam sayısı $< normal_n_cnt$ & seçilen gelişmiş düğümlerin toplam sayısı $< advanced_n_cnt$ olup olmadığı kontrol edilir. Koşullar sağlanırsa, $Node(i)$ küme başı olarak atanır, kalan enerjisi veri toplama ve baz istasyonuna mesaj iletme sırasında harcadığı enerjiler dikkate alınarak güncellenir. Baz istasyonuna iletilen paket sayısı ve küme başı sayısı artırılır. Seçilen gelişmiş düğüm sayacı veya seçilen normal düğüm sayacı, seçilen (küme başı) düğümün türüne göre artırılır,

- i. Mevcut tur için küme başlarının sayısı güncellenir,
- j. Mevcut tur için seçilen küme başlarının sayısı = 0 ve canlı düğüm sayısı > 0 ise, maksimum enerjiye sahip canlı sensör düğümü, mevcut turun küme başı olarak seçilir. Seçilen küme başının enerjisi, veri toplama ve baz istasyonuna mesaj iletme sırasında harcadığı enerjiler dikkate alınarak güncellenir. Baz istasyonuna iletilen paket sayısı ve küme başı sayısı artırılır,
- k. Her sensör düğümünün enerjisi kontrol edilir ve bir sensör düğümünün enerjisi > 0 ise ve ağıda en az bir küme başı varsa, sensör düğümü en yakın küme başının üyesi olarak atanır. Sensör düğümü ile küme başı arasındaki mesafe Öklid mesafesine göre ölçülür ve sensör, kendisi ile en az uzaklığa sahip olan kümeye atanır. Sensör düğümünün enerjisi, küme başına bir mesaj iletilmesi sırasında harcadığı enerji dikkate alınarak güncellenir. Küme başına iletilen paket sayısı da artırılır,
- l. Tüm sensör düğümleri için k . adımdaki işlemler tekrarlandıktan sonra, mevcut tur için verim değeri, küme başlarına iletilen toplam paket sayısı ve mevcut turda baz istasyonuna iletilen toplam paket sayısı eklenerek güncellenir.

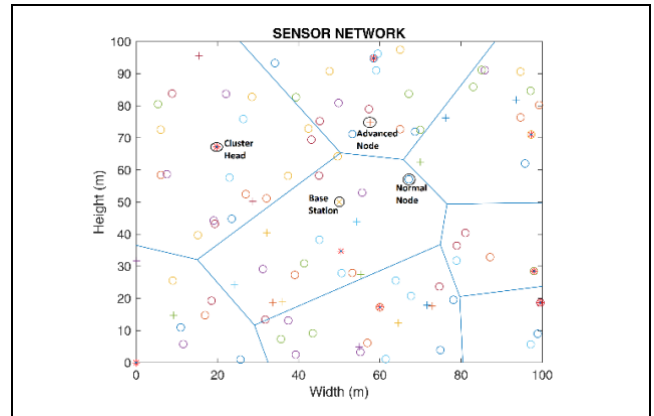
4 Simülasyon sonuçları

4.1 Simülasyon parametreleri

MATLAB R2021(b)'de $100m \times 100m$ ve $50m \times 50m$ boyutlarında bir alanda kümelenmiş bir KSA simüle edilmiştir. EECHep'in performansı, MATLAB kullanılarak simülasyonlar yoluyla değerlendirilmiştir.

Simülasyonlarda, $100m \times 100m$ 'lik boyutlarındaki bir alanda kullanılan toplam sensör sayısı 100, $50m \times 50m$ 'lik boyutlarındaki bir alanda kullanılan toplam sensör sayısı 50'dir ($n = 100$ ve $n = 50$). Hem normal hem de gelişmiş sensör düğümleri, alan üzerinde rastgele (tekdüze) olarak dağıtılmıştır. Her sensör düğümünün yatay ve dikey koordinatları 0 ile alanın boyutunun maksimum değeri (yani 100 ve 50) arasında rastgele atanmıştır.

Baz istasyonu, alanın merkezine yerleştirilmiştir; yani $100m \times 100m$ 'lik boyutlarındaki bir alanda, herhangi bir düğümün baz istasyonundan maksimum mesafesi yaklaşık 70m'dir. Şekil 1, simülasyonlar sırasında oluşturulan örnek kümelenmiş kablosuz sensör ağını göstermektedir. Simülasyon parametreleri Tablo 1'de listelenmiştir.



Şekil 1. Örnek kablosuz sensör ağı.

Figure 1. Sample wireless sensor network.

Tablo 1. Simülasyon parametreleri.

Table 1. Simulation parameters.

Parametre	Sembol	Değeri
Sensör ağı boyutları	$M \times M$	$100m \times 100m$, $50m \times 50m$
Sensör sayısı	n	100, 50
Normal bir düğümün başlangıç enerjisi	E_0	0,5 Joule
Gelişmiş bir düğümün başlangıç enerjisi		$E_0 \times (1 + \alpha)$ Joule
Mesaj büyüklüğü	D_{pkt}	4,000 bit
Toplam gelişmiş düğüm sayısının ağdaki toplam sensör düğümü sayısına oranı	m	0.2, 0
Gelişmiş ve normal düğümler arasındaki ilave enerji çarpanı	α	1, 3, 5, 0
Tur sayısı	r	3000, 6000, 10,000, 2000
Simülasyon tekrarlama sayısı		5

Normal bir sensör düğümünün başlangıç enerjisi $E_0 = 0,5$ Joule; sensör düğümünün ilgili küme başına ilettiği bir mesajın boyutu ve bir küme başının baz istasyonuna ilettiği toplu mesajın boyutu 4000 bit olarak ayarlanmıştır.

Ağın ömrünün sona ermesinin kolayca gözlemlenebilmesi için tur sayıları, heterojen sensör ağda $m = 0.2$ ve $\alpha = 1$ değerleri için 3000, $m = 0.2$ ve $\alpha = 3$ değerleri için 6000, $m = 0.2$ ve $\alpha = 5$ değerleri için 10.000 ve $m = 0$ ve $\alpha = 0$ değerleri için 2000 olarak set edilerek simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlar 5 kez tekrarlanarak çıkan sonuçların ortalamaları hesaplanmıştır. Simülasyon sonuçları önce $m = 0.2, \alpha = 1, r = 3000$ için elde edilmiş; ardından $m = 0.2, \alpha = 3, r = 6000, m = 0.2, \alpha = 5, r = 10.000$ için ve $m = 0, \alpha = 0, r = 2000$ değerleri için EECHep'in farklı parametrelerle nasıl davrandığını görmek için simülasyonlar tekrarlanmıştır. Örneğin, $n = 100$ düğüm için $m = 0.2$ ve $\alpha = 3$ ise $n \times m (100 \times 0.2 = 20)$ adet gelişmiş düğüm, normal düğümlerden $\alpha = 3$ kat ilave başlangıç enerjisine sahiptir, yani normal bir düğümün başlangıç enerjisi $E_0 = 0.5$ Joule iken gelişmiş düğümlerin başlangıç enerjisi $E_0 = 2$ Joule'dür.

4.2 Enerji tüketimi hesaplaması

[4]'te önerilen benzer enerji modeli ve analizi EECHep'te kullanılmıştır. L-bit mesajın, d mesafesine iletilmesi için radyo tarafından harcanan enerji, [3]'te belirtilen Formül (9) ile hesaplanmıştır:

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} L \cdot E_{elec} + L \cdot \epsilon_{fs} \cdot d^2 & \text{if } d \leq d_0 \\ L \cdot E_{elec} + L \cdot \epsilon_{mp} \cdot d^4 & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (9)$$

Burada E_{elec} , verici veya alıcı devresini çalıştırmak için bit başına harcanan enerjidir, ϵ_{fs} ve ϵ_{mp} kullanılan verici yükseltici modeline bağlıdır ve d , gönderici ile alıcı arasındaki mesafedir.

Bir L-bit mesajı almak için sensör düğümü radyosu, Formül (10) ile hesaplanan miktarda (Joule) enerji harcar.

$$E_{RX} = L \cdot E_{elec} \quad (10)$$

E_0 'ın normal sensör düğümünün başlangıç enerjisi olduğu varsayıldığında, gelişmiş sensör düğümünün başlangıç enerjisi $E_0 \times (1 + \alpha)$ 'ya eşittir ve heterojen KSA'nın başlangıç toplam enerjisi Formül (11) ile hesaplanmaktadır. KSA'nın Toplam Başlangıç Enerjisi (TBE) = Normal Sensörlerin Başlangıç Enerjisi + Gelişmiş Sensörlerin Başlangıç Enerjisi olup;

$$TBE = n \cdot (1 - m) \cdot E_0 + n \cdot m \cdot E_0 \cdot (1 + \alpha) = E_0 \cdot (1 + \alpha \cdot m) \quad (11)$$

4.3 Performans ölçütleri

Kararlılık süresi, ağ ömrü, tur başına küme başı sayısı, tur başına canlı (gelişmiş ve normal) düğüm sayısı, verim performans ölçütleri, seçilen kümeleme protokollerinin performansını değerlendirmek için bu çalışmada dikkate alınmıştır. Ayrıca, ağdaki tüm sensör düğümlerinin toplam kalan enerjisi olarak ölçülen ortalama kalan enerji miktarları değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

4.4 Simülasyon sonuçları

Heterojen-habersiz LEACH protokolü ve heterojen-farkında SEP ve EECHep protokolleri, sensör düğümlerinin başlangıç enerjilerinde heterojenlik durumu göz önünde bulundurularak MATLAB R2021b'de simüle edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmada, Boston Üniversitesi Bilgisayar Bilimleri Bölümü araştırma alanında [46] yer alan, MATLAB ortamında geliştirilmiş SEP ve LEACH protokolü kaynak kodlarından yararlanılarak EECHep protokolü performans kıyaslaması yapılmıştır.

Simülasyonlar M, n, m, α ve r değerleri değiştirilerek 5 kez tekrarlanmış ve karşılaştırılan her protokol (yani LEACH protokolü, SEP ve EECHep) için sonuçların ortalamaları hesaplanmıştır. Bu üç protokolün davranışı, bölüm 4.3'te tanımlanan performans ölçütleri açısından değerlendirilmiştir. Genel gözlemler ve simülasyon sonuçları aşağıdaki bölümlerde özetlenmiştir.

4.4.1 $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 1$ ve $r = 3000$ parametreleri için simülasyon sonuçları

$M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 1$ ve $r = 3000$ parametreleri için simülasyon sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir.

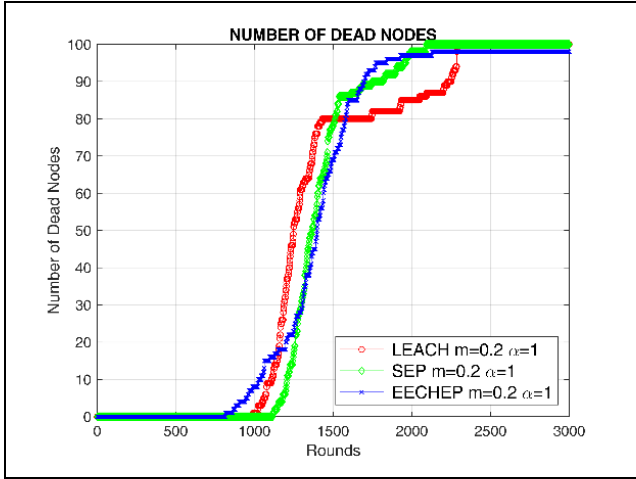
Tablo 2. $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 1$ ve $r = 3000$ parametreleri için simülasyon sonuçları.

Table 2. Simulation results for parameters $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 1$ and $r = 3000$.

$M = 100$, $n = 100, m = 0.2$, $\alpha = 1$ ve $r = 3,000$ parametreleri için simülasyon sonuçları	LEACH	SEP	EECHep
Verim	188.19	189.31	188.96
Kalan enerji	15.25	14.55	15.37
Enerjisi tükenen ilk düğüm tur sayısı	1,013	1,129	772
Son canlı düğüm tur sayısı	2,261	2,056	>3,000
Küme başlarına gönderilen toplam paket sayısı	126,999	127,318	125,780
Baz İstasyonuna gönderilen toplam paket sayısı toplam küme başı sayısı	14,246	14,768	16,044

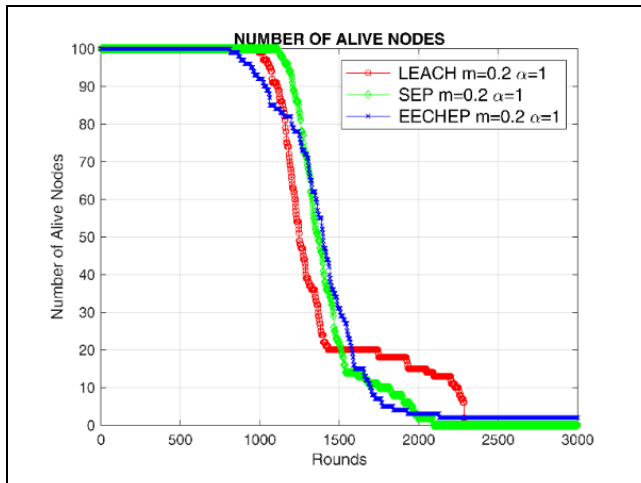
Tablo 2'de gösterildiği gibi, EECHep'in ortalama verimi, LEACH protokolü ve SEP ile hemen hemen aynıdır. EECHep'in ortalama kalan enerjisi, SEP'ten %6 ve LEACH protokolünden biraz daha (%1) yüksektir. EECHep'in kararlılık süresi hem LEACH protokolünden hem de SEP'den daha kısa iken, sensör düğümlerinin ömrü EECHep'te her iki protokole göre daha uzundur. EECHep'te küme başlarına iletilen toplam paket sayısı, LEACH protokolünden ve SEP'ten biraz daha azdır (%1). EECHep'te baz istasyonuna iletilen toplam paket sayısı, SEP'ten %9 ve LEACH protokolünden %13 daha fazladır. Bu durum, baz istasyonunun KSA'nın ömrü boyunca daha uzun bir süre için alandan geri bildirim alabileceği anlamına gelmektedir.

Tur başına enerji tükenen düğüm sayısı Şekil 2'de gösterilmiştir. Heterojen düğümlerden oluşan bir KSA'da, ilk düğüm, LEACH protokolü ve SEP'e kıyasla EECHep'te daha erken ölmektedir. Diğer bir deyişle, EECHep, karşılaştırılan protokollere göre daha kısa bir kararlılık süresine sahiptir; ancak Şekil 2'den görülebileceği gibi sensör düğümleri EECHep'te daha uzun ömürlüdür. Tur başına canlı düğüm sayısı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Tur başına enerjisi tükenen düğüm sayısı.

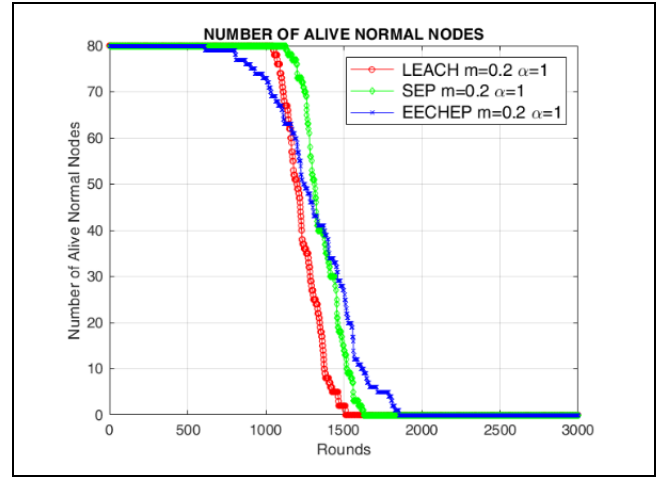
Figure 2. Number of dead nodes per round.



Şekil 3. Tur başına canlı düğüm sayısı.

Figure 3. Number of alive nodes per round.

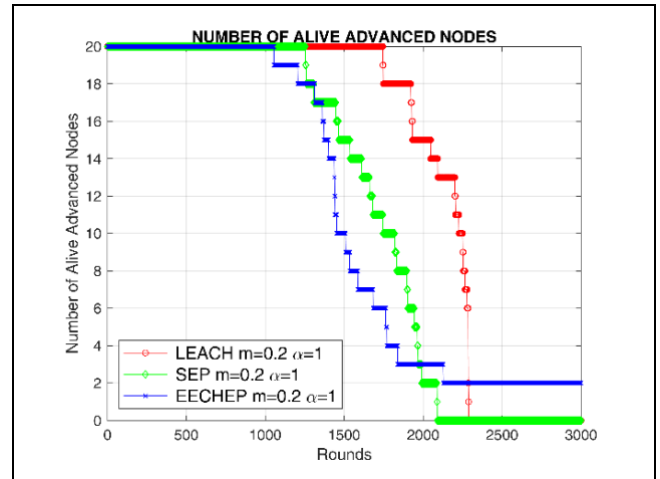
EECHep'te, son canlı düğümler hem LEACH protokolünden hem de SEP'ten daha geç ölmektedir, bu da düğümlerin kademeli olarak ölmesi anlamına gelmektedir ve EECHep ağın ömrünü uzatmaktadır. Böylece, bir KSA'da EECHep uygulandığında, sensör düğümlerinden daha uzun bir süre için geri bildirim alınabilmektedir. Ayrıca EECHep'te, LEACH protokolü ve SEP'ten farklı olarak, canlı düğüm sayısında keskin bir düşüş görülmemiştir. Bu gözlemler, Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Tur başına canlı normal düğüm sayısı Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4'ten de görülebileceği gibi, normal düğümler, EECHep'te, LEACH protokolü ve SEP'e kıyasla daha uzun yaşamaktadır. Karşılaştırılan protokollerin aksine, normal düğümler yavaş yavaş ölmekte ve EECHep uygulandığında, canlı normal düğüm sayısında keskin bir düşüş görülmemektedir.



Şekil 4. Tur başına canlı normal düğüm sayısı.

Figure 4. Number of alive normal nodes per round.

Tur başına canlı gelişmiş düğüm sayısı Şekil 5'te gösterilmiştir. Gelişmiş düğümlerin de EECHep'te, LEACH protokolü ve SEP'e kıyasla daha uzun yaşadığı Şekil 5'ten görülebilir.

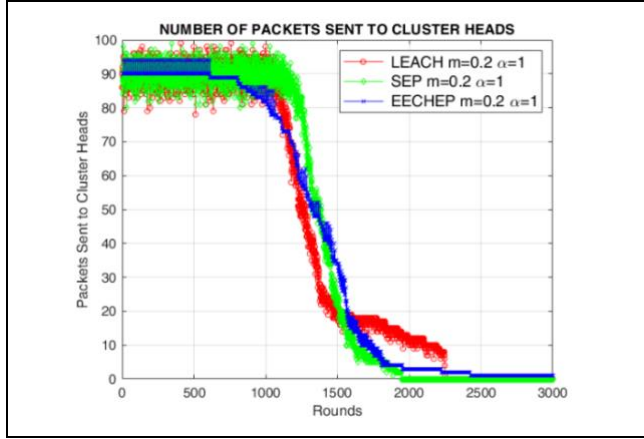


Şekil 5. Tur başına canlı gelişmiş düğüm sayısı.

Figure 5. Number of alive advanced nodes per round.

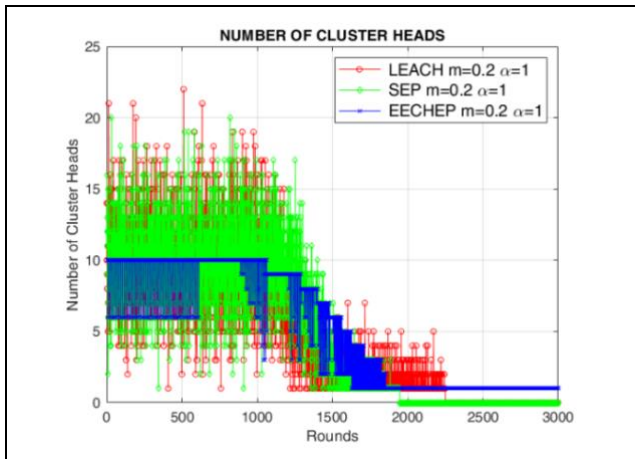
Karşılaştırılan protokollerin aksine, EECHep'te, normal düğümler yavaş yavaş ölmekte ve EECHep uygulandığında canlı normal düğüm sayısında keskin bir azalma olmamaktadır.

Beklendiği gibi, normal düğümler gelişmiş düğümlerden daha az enerjiye sahip olduğundan, karşılaştırılan tüm protokollerde, normal düğümler gelişmiş düğümlerden daha erken ölmekte, yani gelişmiş düğümler her zaman normal düğümlerden daha uzun ömürlü olmaktadır. EECHEP uygulandığında hem normal hem de gelişmiş düğümler, karşılaştırılan protokollerden daha uzun yaşamaktadır. Bu durum, daha uzun bir kullanım ömrü sağlamak için sensör düğümlerinin enerjisinin EECHEP'te daha verimli kullanıldığı anlamına gelmektedir (EECHEP'te, hem normal hem de gelişmiş düğümlerin ömrü, LEACH protokolüne ve SEP'e kıyasla daha uzundur). LEACH protokolünde ve SEP'te tüm sensör düğümlerinin enerjileri tükense bile, EECHEP'te sensör ağına hâlâ canlı sensör düğümleri bulunmaktadır. Bu gözlemler, Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir. Tur başına küme başlarına iletilen toplam paket sayısındaki değişim Şekil 6'da gösterilmiştir. EECHEP'te küme başlarına iletilen toplam paket sayısı hem LEACH protokolünden hem de SEP'ten biraz daha azdır (%1). Küme başlarına iletilen toplam paket sayısındaki değişiklik, alandaki toplam canlı düğüm sayısına benzer şekilde değişiklik göstermiştir. Tur başına seçilen küme başı sayısı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Tur başına küme başlarına gönderilen paket sayısı.

Figure 6. Number of packets sent to cluster heads per round.



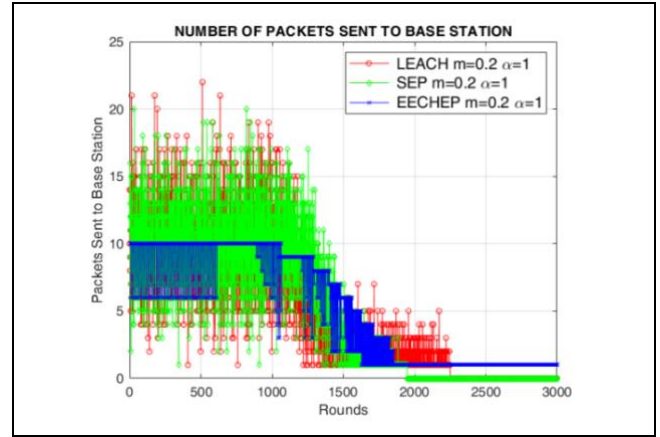
Şekil 7. Tur başına küme başı sayısı.

Figure 7. Number of cluster heads per round.

EECHEP'te, LEACH protokolü ve SEP'den farklı olarak küme başı seçiminde kullanılan bir eşik değeri olmadığı için seçilen küme başı sayısında dalgalanma görülmemektedir. LEACH

protokolünde ve SEP'te tüm sensör düğümlerinin enerjileri tükendiğinde, EECHEP'te, sensör ağına küme başları olarak seçilen ve hâlâ sensör gözlemleriyle ilgili verileri raporlayan canlı sensör düğümleri bulunmaktadır. Bu gözlemler, Şekil 7'de görülmektedir.

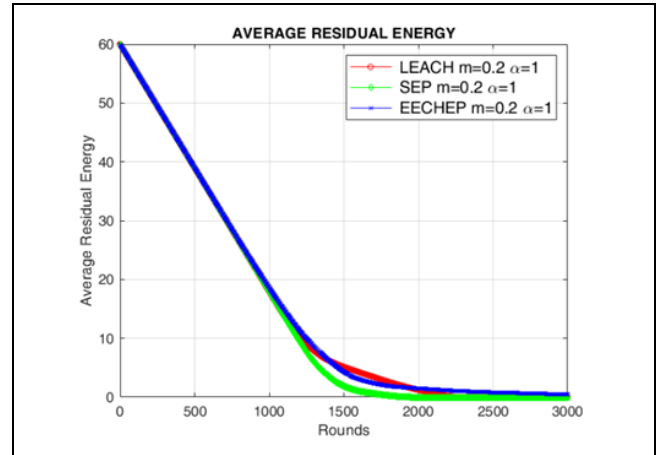
Her turda baz istasyonuna iletilen paket sayısındaki değişim Şekil 8'de gösterilmiştir. EECHEP'te baz istasyonuna iletilen toplam paket sayısı hem SEP hem de LEACH protokollerinden daha fazladır. Bu durum, EECHEP'te, baz istasyonunun sensör ağı hakkında daha fazla küme başı tarafından bilgilendirildiği anlamına gelmektedir. EECHEP, baz istasyonuna SEP'ten %9; LEACH protokolünden %13 daha fazla veri paketi iletebilmektedir. Her turda küme başlarından baz istasyonuna bir mesaj paketinin iletildiği varsayıldığı için baz istasyonuna gönderilen toplam paket sayısı, seçilen küme başlarının toplam sayısına eşittir. EECHEP'in ağın ömrünün sonuna kadar küme başlarını seçebildiği simülasyonla gösterilmiştir. Bu özellikler, Şekil 7 ve 8'den gözlemlenebilmektedir.



Şekil 8. Tur başına baz istasyonuna gönderilen paket sayısı.

Figure 8. Number of packets sent to base station per round.

Ağın tur başına ortalama kalan enerjisi Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 9'dan görüldüğü üzere, EECHEP uygulandıktan sonra Ağın Ortalama Kalan Enerjisi, SEP'ten %6 ve LEACH protokolünden biraz daha yüksektir (%1).

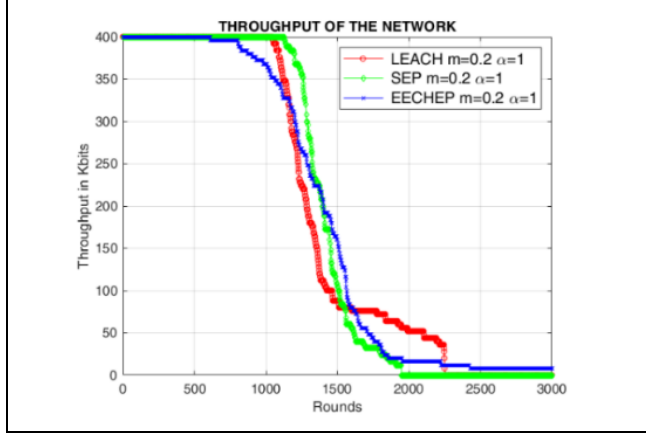


Şekil 9. Tur başına ağın ortalama kalan enerjisi.

Figure 9. Average residual energy of the network per round.

Her turda ağın verimi Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 10'dan görüleceği üzere, EECHEP uygulandıktan sonra Ağın Verimi, SEP ve LEACH protokolleriyle hemen hemen aynıdır. Ayrıca,

EECHEP uygulandığında ağın verimi kademeli olarak azalmaktadır (verimde keskin bir düşüş görülmemektedir). EECHep'teki sensör düğümlerinin ömrü daha uzun olduğundan, diğer protokollere kıyasla daha uzun bir süre boyunca ağ verimi elde edilebilmektedir.



Şekil 10. Tur başına ağın verimi.

Figure 10. Throughput of the network per round.

$M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 1$ ve $r = 3000$ parametreleri için simülasyon sonuçlarının özeti Şekil 11'de sunulmuştur.

4.4.2 $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 3$ ve $r = 6000$ parametreleri için simülasyon sonuçları

$M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 3$ ve $r = 6000$ parametreleri için simülasyon sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir. Tablo 3'teki simülasyon sonuçlarına göre, EECHep'in ortalama ağ verimi, SEP'ten biraz daha az (%2); ancak LEACH protokolünden biraz daha fazladır (%2). EECHep'in ortalama kalan enerjisi SEP'ten

%7 daha yüksek; ancak LEACH protokolünden %11 daha azdır. EECHep'in kararlılık periyodu, LEACH protokolünden biraz daha uzun iken, SEP'ten daha kısadır. Simülasyon sonuçları, ağda EECHep uygulandığında hem normal hem de gelişmiş canlı düğümlerin daha uzun yaşadığını ortaya koymuştur. Küme başlarına iletilen toplam paket sayısı, SEP'ten biraz daha fazladır (%1) ve LEACH protokolüyle hemen hemen aynıdır. EECHep'te baz istasyonuna iletilen toplam paket sayısı SEP'ten %17 daha az iken, LEACH protokolünden %19 fazladır.

$M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 3$ ve $r = 6000$ parametreleri için simülasyon sonuçlarının özeti Şekil 12'de sunulmuştur.

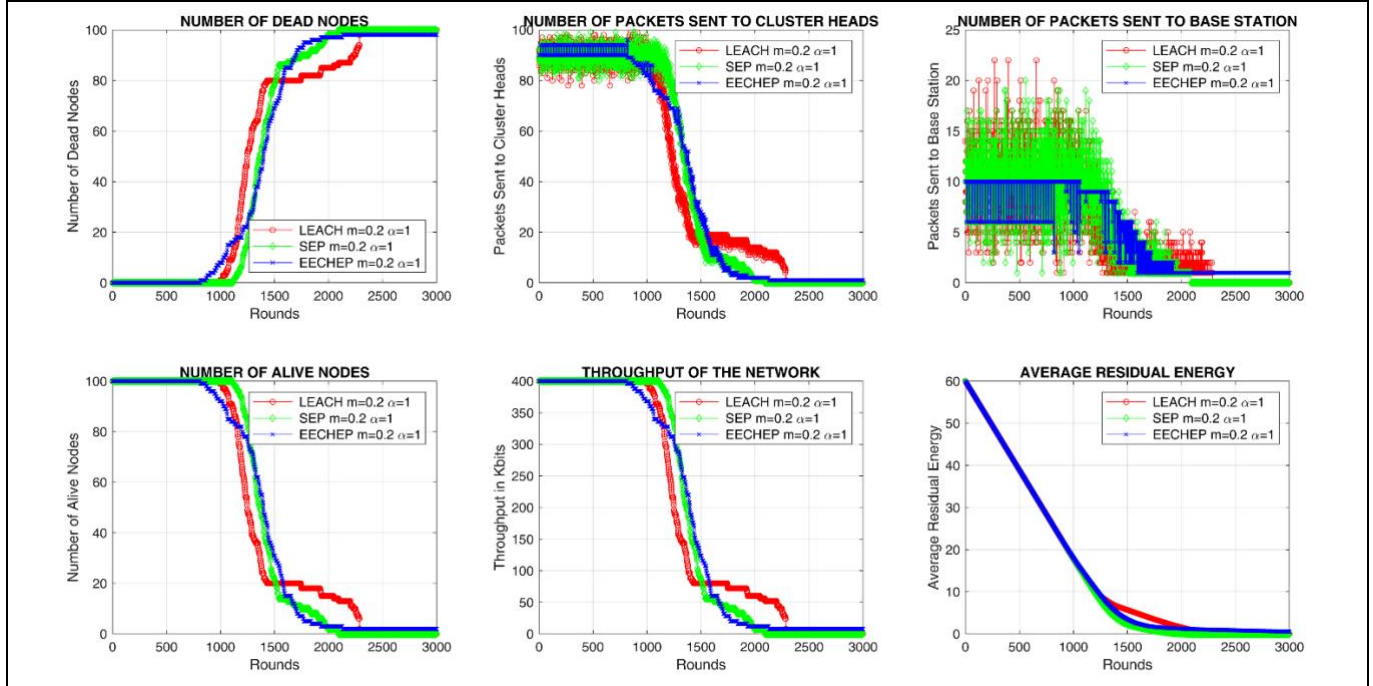
Tablo 3. $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 3$ ve $r = 6000$ parametreleri için simülasyon sonuçları.

Table 3. Simulation results for parameters $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 3$ and $r = 6000$.

$M=100, n=100, m=0.2, \alpha=3$ ve $r=6,000$ Parametreleri için Simülasyon Sonuçları	LEACH	SEP	EECHep
Verim	123.34	127.27	125.27
Kalan Enerji	18.28	15.17	16.31
Enerjisi Tüklenen İlk Düğüm Tur Sayısı	1,007	1,252	1,040
Son Canlı Düğüm Tur Sayısı	4,490	4,362	>6,000
Küme Başlarına Gönderilen Toplam Paket Sayısı	166,331	164,009	165,606
Baz İstasyonuna Gönderilen Toplam Paket Sayısı	18,777	26,989	22,393
Toplam Küme Baş Sayısı			

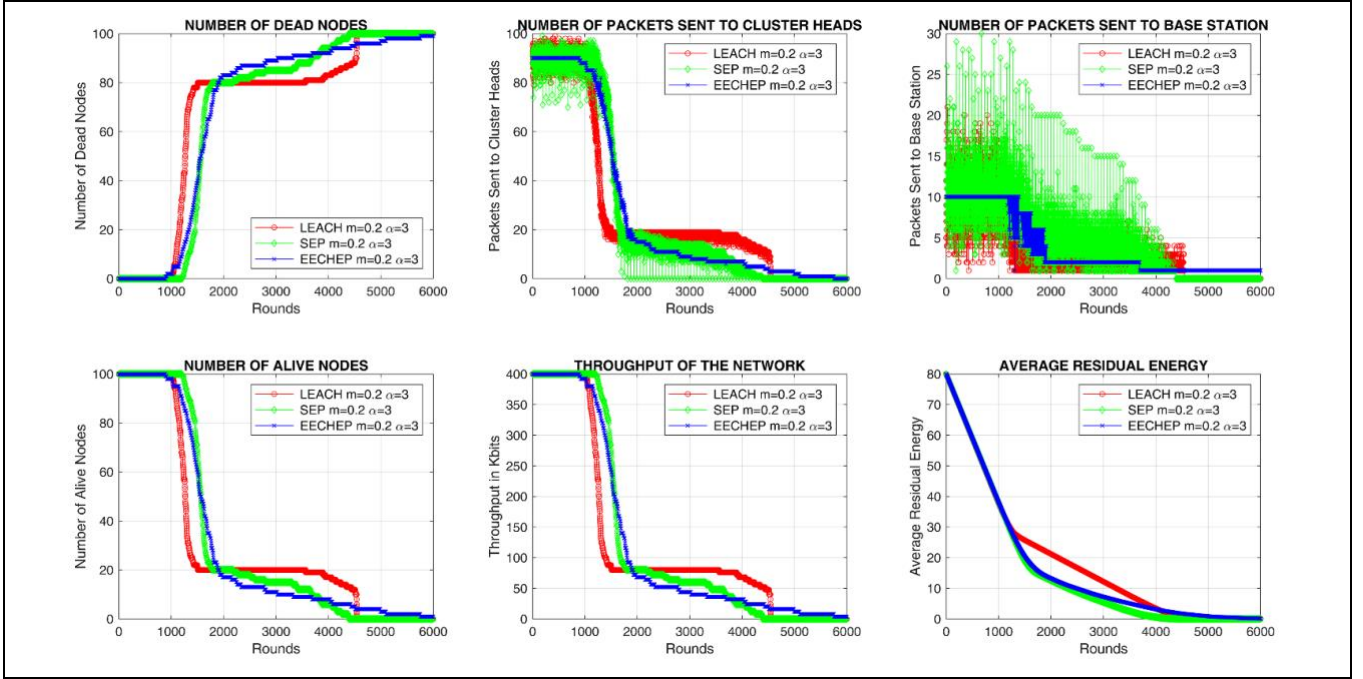
4.4.3 $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 5$ ve $r = 10,000$ parametreleri için simülasyon sonuçları

$M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 5$ ve $r = 10,000$ parametreleri için simülasyon sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir.



Şekil 11. $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 1$ ve $r = 3,000$ parametreleri için simülasyon sonuçlarının özeti.

Figure 11. Summary of simulation results for parameters $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 1$ and $r = 3,000$.



Şekil 12. $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 3$ ve $r = 6,000$ parametreleri için simülasyon sonuçlarının özeti.

Figure 12. Summary of simulation results for parameters $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 3$ and $r = 6,000$.

Tablo 4. $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 5$ ve $r = 10,000$ parametreleri için simülasyon sonuçları.

Table 4. Simulation results for parameters $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 5$ and $r = 10,000$.

$M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 5$ ve $r = 10,000$ Parametreleri için Simülasyon Sonuçları	LEACH	SEP	EECHEP
Verim	91.52	96.47	94.07
Kalan Enerji	21.66	16.82	18.59
Enerjisi Tükenen İlk Düğüm Tur Sayısı	1,037	1,452	1,236
Son Canlı Düğüm Tur Sayısı	6,700	6,681	>10,000
Küme Başlarına Gönderilen Toplam Paket Sayısı	205,555	199,083	203,494
Baz istasyonuna gönderilen toplam paket sayısı toplam küme başı sayısı	23,339	42,197	31,773

Tablo 4'ten görülebileceği gibi EECHEP'in ortalama ağ verimi, SEP'ten biraz daha az (%2); Ancak; LEACH protokolünden biraz daha yüksektir (%3). EECHEP'in ortalama kalan enerjisi, SEP'ten %11 daha yüksek; ancak LEACH protokolünden %14 daha azdır. EECHEP'in kararlılık periyodu LEACH protokolünden daha uzun iken SEP'den daha kısadır. Simülasyon sonuçları, ağda EECHEP uygulandığında hem normal hem de gelişmiş canlı düğümlerin daha uzun yaşadığını göstermiştir. EECHEP'te küme başlarına iletilen toplam paket sayısı, SEP'ten biraz daha yüksektir (%2); ancak LEACH protokolünden biraz daha azdır (%1). EECHEP'te baz istasyonuna iletilen toplam paket sayısı SEP'ten %25 daha azdır; ancak LEACH protokolünden önemli ölçüde yüksektir (%36). Bu durum, baz istasyonunun KSA'nın ömrü boyunca daha uzun bir süre boyunca alandan geri bildirim alabileceği anlamına gelmektedir. $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 5$ ve $r = 10,000$ parametreleri için simülasyon sonuçlarının özeti Şekil 13'te sunulmuştur.

4.4.4 $M = 100, n = 100, m = 0, \alpha = 0$ ve $r = 2000$ parametreleri için simülasyon sonuçları

$M = 100, n = 100, m = 0, \alpha = 0$ ve $r = 2000$ parametreleri için simülasyon sonuçları Tablo 5'te gösterilmiştir. Tablo 5'te, homojen sensör ağında ($m = 0, \alpha = 0$) EECHEP uygulandığında, ortalama ağ veriminin SEP ve LEACH

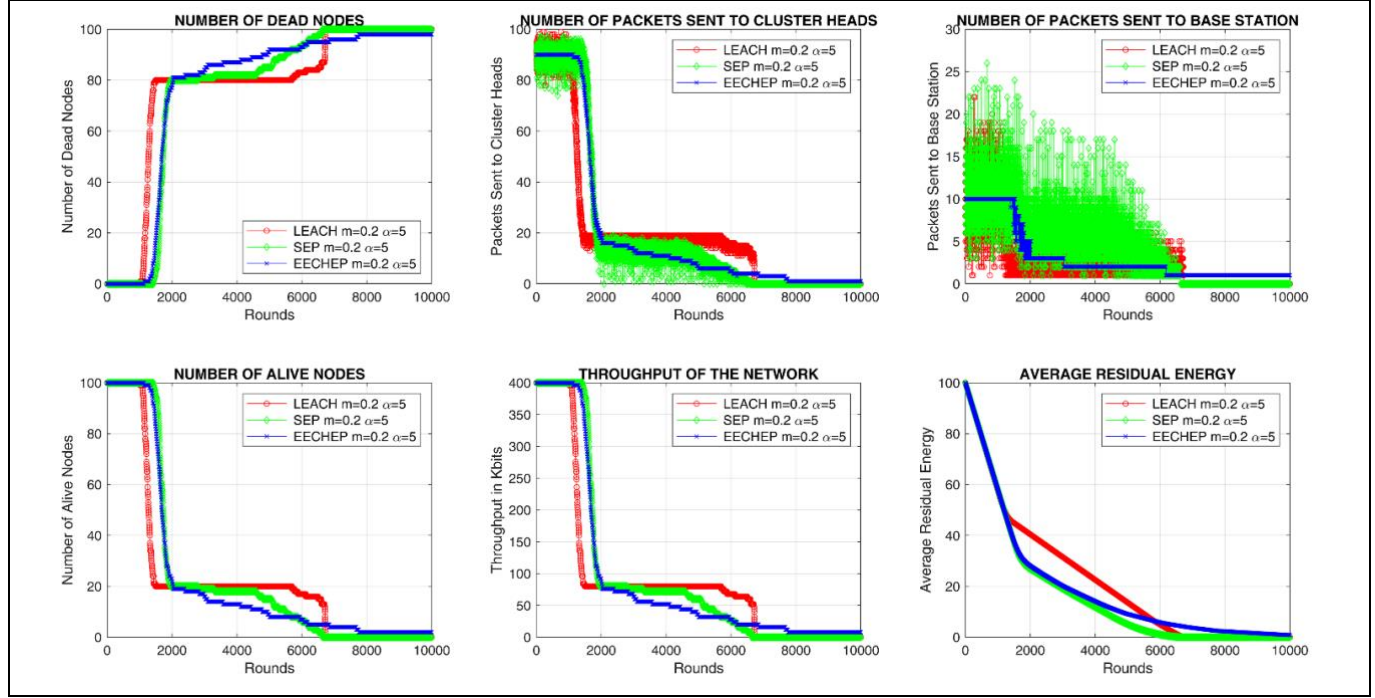
protokolleriyle hemen hemen aynı olduğu ortaya koyulmuştur. EECHEP'in ortalama kalan enerjisi hem SEP hem de LEACH protokollerinden yine biraz daha yüksektir (%3). EECHEP'in kararlılık periyodu hem LEACH protokolünden hem de SEP'den daha kısa iken, sensör düğümlerinin ömrü EECHEP'te her iki protokole göre daha uzundur. EECHEP'te küme başlarına iletilen toplam paket sayısı hem LEACH protokolünden hem de SEP'ten biraz daha azdır (%1). EECHEP'te baz istasyonuna iletilen toplam paket sayısı hem LEACH protokolünden hem de SEP'den daha yüksektir (%14). Bu durum, baz istasyonunun KSA'nın ömrü boyunca daha fazla küme başından geri bildirim alabileceği anlamına gelmektedir. Simülasyon sonuçlarından da görülebileceği gibi EECHEP, homojen sensör ağlarında da ağın ömrünü uzatmak için kullanılabilecek alternatif bir küme başı seçim yöntemi olarak değerlendirilebilir. $M = 100, n = 100, m = 0, \alpha = 0$ ve $r = 2000$ parametreleri için simülasyon sonuçlarının özeti Şekil 14'te sunulmuştur.

4.4.5 $M = 50, n = 50$ ve değişken m, α, r parametreleri için simülasyon sonuçları

Önerilen yöntemin farklı kablosuz sensör ağ topolojisi ve ağda farklı sayıda düğüm olması durumunda da performansını ölçmek için tüm simülasyonlar $M = 50, n = 50$ ve değişken m, α, r parametreleri için tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

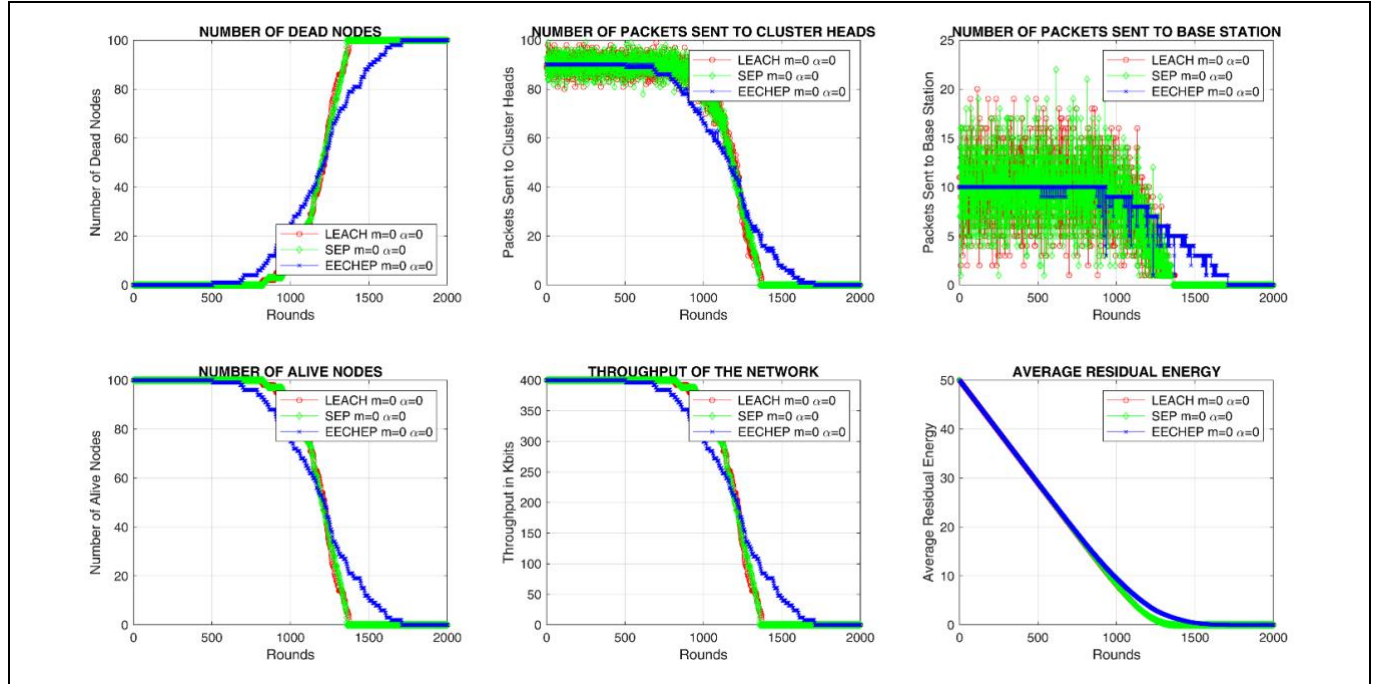
Ağın topolojisinin $M \times M = 50m \times 50m$ ve ağdaki düğüm sayısının $n = 50$ olarak değiştirilmesi durumunda da performans ölçüm parametrelerinin; $M \times M = 100m \times 100m$ ve ağdaki düğüm sayısının $n=100$ olduğu durumdaki m , α ve r parametrelerinin değişimi ile benzer karakteristikte değişim gösterdiği gözlenmiştir. Diğer bir ifade ile ağın topolojisinin ve ağdaki düğüm sayısının değişmesi, önerilen yöntemin

performansını etkilememiş; performans ölçütleri olan ağın verimi, kalan enerjisi, son canlı düğüm tur sayısı, küme başlarına gönderilen toplam paket sayısı, baz istasyonuna gönderilen toplam paket sayısının (toplam küme başı sayısı), ağın topolojisine ve düğüm sayısına bağlı olmadığı görülmüştür. Yapılan tüm simülasyonlarda, önerilen yöntemin kablosuz sensör ağının ömrünü uzattığı gözlenmiştir.



Şekil 13. $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 5$ ve $r = 10,000$ parametreleri için simülasyon sonuçlarının özeti.

Figure 13. Summary of simulation results for parameters $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 5$ and $r = 10,000$.



Şekil 14. $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 0$ ve $r = 2,000$ parametreleri için simülasyon sonuçlarının özeti.

Figure 14. Summary of simulation results for parameters $M = 100, n = 100, m = 0.2, \alpha = 0$ and $r = 2,000$.

Tablo 5. $M = 100, n = 100, m = 0, \alpha = 0$ ve $r = 2000$ parametreleri için simülasyon sonuçları.

Table 5. Simulation results for parameters $M = 100, n = 100, m = 0, \alpha = 0$ and $r = 2000$.

$M = 100, n = 100, m = 0, \alpha = 0$ ve $r = 2000$ Parametreleri için Simülasyon Sonuçları	LEACH	SEP	EECHEP
Verim	235.93	235.95	236.97
Kalan Enerji	14.97	14.97	15.43
Enerjisi Tükenen İlk Düğüm Tur Sayısı	831	808	597
Son Canlı Düğüm Tur Sayısı	1,386	1,386	1,753
Küme Başlarına Gönderilen Toplam Paket Sayısı	106,207	106,211	105,113
Baz İstasyonuna Gönderilen Toplam Paket Sayısı. Toplam Küme Başı Sayısı	11,860	11,862	13,470

Tablo 6. $M = 50, n = 50$ ve değişken m, α ve r parametreleri için simülasyon sonuçları.

Table 6. Simulation results for $M = 50, n = 50$, and variable m, α, r parameters.

$M = 50, n = 50$ ve değişken m, α, r parametreleri için simülasyon sonuçları	$m = 0.2, \alpha = 1, r = 3000$			$m = 0.2, \alpha = 3, r = 6000$			$m = 0.2, \alpha = 5, r = 10,000$			$m = 0, \alpha = 0, r = 2000$		
	LEACH	SEP	EECHEP	LEACH	SEP	EECHEP	LEACH	SEP	EECHEP	LEACH	SEP	EECHEP
Verim	100.13	100.62	100.58	66.68	68.30	67.24	49.92	52.55	49.90	125.30	125.31	126.14
Kalan Enerji	7.95	7.67	8.09	9.65	7.93	8.26	11.74	9.26	10.68	7.98	7.98	8.23
Enerjisi Tükenen İlk Düğüm Tur Sayısı	1,077	1,214	860	1,118	1,442	1,239	1,067	1,504	1,122	828	866	608
Son Canlı Düğüm Tur Sayısı	2,273	2,163	>3.000	4,757	4,868	>6,000	7,249	8,069	>10,000	1,518	1,518	1,818
Küme Başlarına Gönderilen Toplam Paket Sayısı	64,259	63,973	63,029	85,349	82,991	83,945	106,302	99,312	101,267	53,676	53,678	53,017
Baz İstasyonuna Gönderilen Toplam Paket Sayısı	10,892	11,540	12,454	14,722	19,505	16,972	18,537	32,115	23,545	9,024	9,026	10,102
Toplam Küme Başı Sayısı												

4.4.6 Sensör düğümlerinin ömürlerinin karşılaştırılması

$M = 100, n = 100$ ve değişken m, α, r parametreleri için enerjisi tükenen ilk düğüm ortalama tur sayılarının karşılaştırılması Şekil 15'te gösterilmiştir. Şekil 15'ten görülebileceği gibi EECHEP için kararlılık periyodu her zaman SEP'ten daha kısadır; ancak sensör ağının heterojenliği arttığında, LEACH protokolünden daha uzun olma eğilimindedir. $M = 100, n = 100$ ve değişken m, α, r parametreleri için son canlı düğüm ortalama tur sayılarının karşılaştırması, Şekil 16'da gösterilmiştir.

Şekil 16'dan da görülebileceği gibi EECHEP'te sensör düğümlerinin ömrü, her zaman hem LEACH protokolünden hem de SEP'ten daha uzundur. LEACH protokolü ve SEP'ten farklı olarak $\alpha = 1, \alpha = 3$ ve $\alpha = 5$ parametreleri için simülasyonlar gerçekleştirildiğinde, EECHEP'te turların sonunda ağda hâlâ canlı sensör düğümleri bulunmaktadır. Diğer bir ifadeyle, EECHEP'te son canlı sensör düğümü tur sayıları, $\alpha = 1, \alpha = 3$ ve $\alpha = 5$ parametreleri için sırasıyla 3,000, 6,000 ve 10,000'den daha büyüktür.

4.4.7 Turların tamamlanması sonrasında ağ durumu

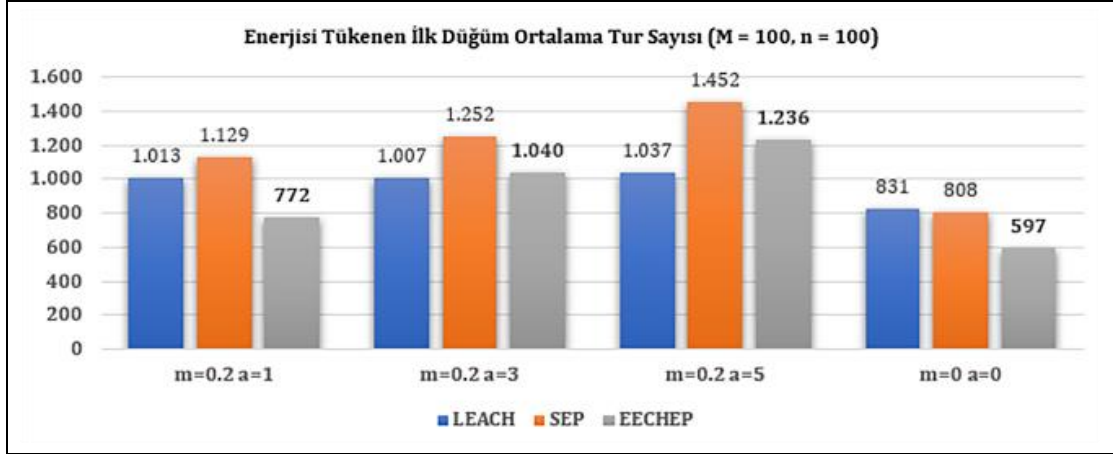
Turların bitiminden sonra örnek bir ağ ortamı Şekil 17'de gösterilmiştir. Şekil 17'den de görülebileceği gibi turların bitiminden sonra, tüm sensör düğümleri hem LEACH

protokolünde hem de SEP'te, kırmızı noktalarla gösterilen enerjisi tükenmiş düğümler haline gelmektedir.

5 Sonuçlar

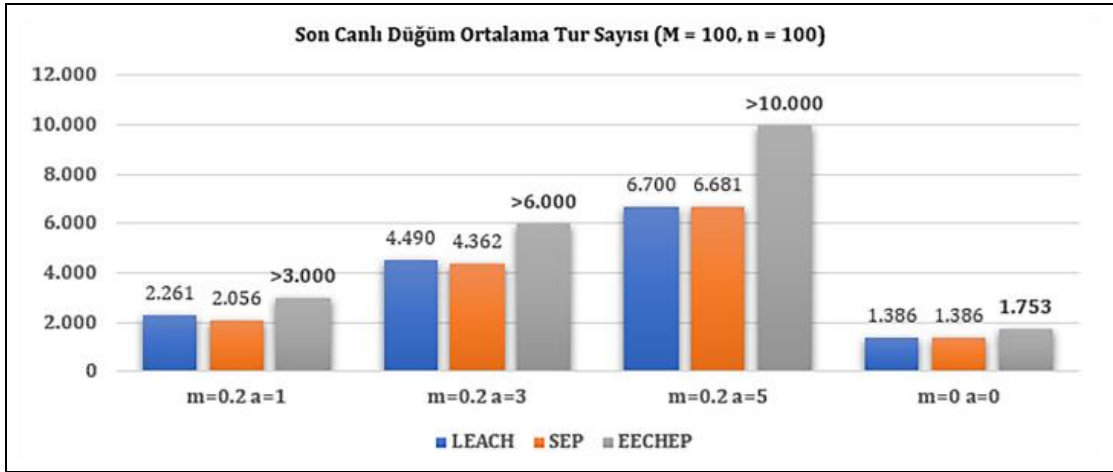
Geleneksel kümeleme protokolleri, ağdaki tüm sensör düğümlerinin aynı miktarda enerjiye sahip olduğunu varsayar ve düğüm heterojenliğinden tam olarak yararlanamazlar. LEACH protokolü gibi heterojen-habersiz kümeleme protokolleri, özellikle ağda heterojen düğümler olduğunda sistemin kararlılığını sürdürmekte başarısızdır. Bu çalışmada, heterojen kablosuz sensör ağlarda enerji verimli bir küme başı seçim yöntemi olan EECHEP önerilmiştir.

EECHEP'te, her bir sensör düğümü, heterojen iki seviyeli hiyerarşik bir ağdaki diğer sensör düğümlerinin enerjilerine göre, başlangıç enerjisine bağlı olarak kendisini küme başı olarak atamaktadır. [7]'den farklı olarak önerilen protokol, her turda küresel enerji seviyesi bilgisine ihtiyaç duymamaktadır. EECHEP, sensör ağındaki her bir düğümün kesin konumu hakkında herhangi bir bilgi gerektirmediğinden SEP gibi ölçeklenebilirdir. EECHEP'in performansı bu çalışmada değerlendirilmiş ve simülasyon ortamında LEACH protokolü ve SEP ile karşılaştırılmıştır.



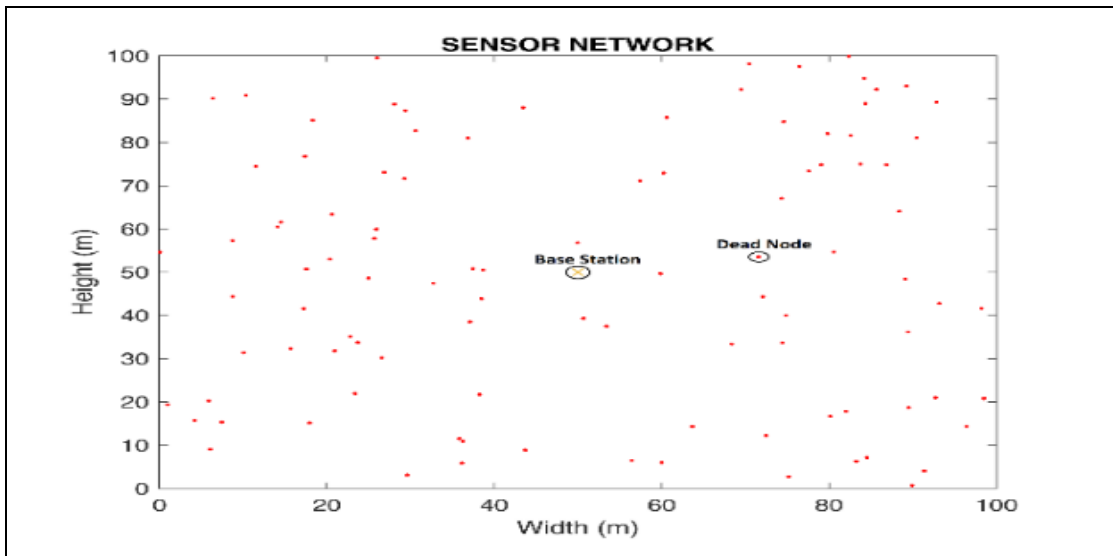
Şekil 15. Enerjisi tükenen ilk düğüm ortalama tur sayılarının karşılaştırılması.

Figure 15. Comparison of first dead node average round numbers.



Şekil 16. Son canlı düğüm ortalama tur sayılarının karşılaştırılması.

Figure 16. Comparison of last alive node average round numbers.



Şekil 17. Turların tamamlanması sonrasında ağ ortamı (Enerjisi tükenmiş düğümler).

Figure 17. Network environment after the end of rounds
(All dead nodes).

Simülasyon sonuçları, ağın ömrünü uzatmayı amaçlayan heterojen-farkında EECHep protokolünün, ağda heterojen sensör düğümleri olduğunda, tur başına optimal sayıda küme başı seçebileceğini ve KSA'ların geri bildirim kalitesini artırabileceğini ortaya koymuştur. Enerjinin verimli kullanılması sayesinde hem SEP hem de LEACH protokollerinde tüm düğümlerin enerjilerinin tükendiği ağda, EECHep'te hâlâ canlı düğümlerin olduğu simülasyon ile gösterilmiştir.

Simülasyon sonuçları, EECHep'in, LEACH protokolü ve SEP gibi mevcut kümeleme protokollerine kıyasla ağın ömrünü uzattığını göstermiştir. EECHep'in hem normal hem de gelişmiş sensör düğümleri için daha uzun ömür sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca hem heterojen hem de homojen sensör ağında EECHep uygulandığında, baz istasyonunun ağdan daha uzun süre geri bildirim alabildiği gösterilmiştir. EECHep, heterojen KSA'ların genel ömrünü uzatmak, KSA'lardan daha uzun bir süre için verim almak ve KSA'larda canlı düğümleri olduğu sürece küme başlarını seçmek için kullanılabilir. EECHep, hiyerarşik olarak kümelenmiş KSA'lar için alternatif, enerji verimli bir küme başı seçim yöntemi olarak tasarlanmasına rağmen, simülasyon sonuçlarına göre homojen sensör ağlarda da kullanılabilir bir küme başı seçim yöntemi olarak da değerlendirilebilir.

6 Conclusions

Traditional clustering protocols assume that all the sensor nodes in the network have the same amount of energy and as a consequence, they cannot fully benefit from the existence of node heterogeneity. Heterogeneous-unaware clustering protocols such as LEACH protocol is unsuccessful to sustain the stability of the system, especially when there are heterogeneous nodes in the network. In this study, EECHep, which is an energy efficient cluster head election method in heterogeneous wireless sensor networks, is proposed.

In EECHep, each sensor node separately assigns itself as a cluster head according to its initial energy relative to that of other sensor nodes in a heterogeneous two-level hierarchical network. Unlike [7], the protocol does not need global knowledge of energy level in each round. EECHep is also scalable as SEP since it does not necessitate any knowledge of the precise location of each node in the field. The performance of EECHep is evaluated and compared with LEACH protocol and SEP under simulation. Simulation results reveal that heterogeneous-aware EECHep protocol which aims to prolong the lifetime of the network can elect optimal number of cluster heads per round per epoch and advance the feedback quality of wireless sensor networks (WSNs) when there are heterogeneous sensor nodes in the network.

It is shown by simulation that thanks to the efficient use of energy, there exists alive nodes in the network where all the nodes become dead in both SEP and LEACH protocols. Simulation results show that EECHep prolongs the lifetime of the network compared to existing clustering protocols such as LEACH protocol and SEP. It is demonstrated that EECHep yields longer lifetime of the sensor nodes for both normal and advanced nodes. Moreover, it is shown that the base station can get feedback from the sensor network for a longer period of time when EECHep is applied in both heterogeneous and homogeneous sensor networks. EECHep can be employed to extend the overall lifetime of the heterogeneous WSNs, to get throughput for a longer period of time from the WSNs and elect cluster heads as long as there exists alive nodes in the WSN.

Although EECHep is designed as an alternative, energy efficient cluster head election method for hierarchically clustered WSNs, based on the simulation results, it can also be considered as a cluster head election method that can be used in homogeneous sensor networks.

7 Etik standartların beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

8 Yazar katkılarının beyanı

Çalışmada Esmâ DİLEK, fikir oluşması, literatür taraması, simülasyonların yapılması ve yazım aşamalarında; Murat DENER, yazım denetimi, makalenin gözden geçirilmesi ve kontrol edilmesi aşamalarında katkı sunmuşlardır.

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] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. "A survey on sensor networks". *IEEE Communications Magazine*, 40(8), 102-114, 2002.
- [2] Rekha D, Rajeev G. "cluster head election in wireless sensor network: a comprehensive study and future directions". *International Journal of Computer Networks and Applications*, 7(6), 178-192, 2020.
- [3] Smaragdakis G, Matta I, Bestavros A. "SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks". *Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA 2004)*, Massachusetts, USA, 22-26 August 2004.
- [4] Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4), 660-670, 2002.
- [5] Shepard TJ. "A channel access scheme for large dense packet radio networks". *ACM SIGCOMM*, 26(4), 219-230, 1996.
- [6] Heinzelman WR, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. "Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks". *33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-33)*, Hawaii, USA, 4-7 January 2000.
- [7] Heinzelman WR. *Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks*. PhD Thesis/Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 2000.
- [8] Mary SA, Gnanadurai JB. "Enhanced zone stable election protocol based on fuzzy logic for cluster head election in wireless sensor networks". *International Journal of Fuzzy Systems*, 19(3), 799-812, 2017.
- [9] Barani S, Visalakshi U. "Super cluster head selection and energy efficient round robin load balancing technique in wireless sensor networks". *International Journal of Engineering Science and Computing*, 7(4), 10065-10072, 2017.

- [10] Gupta I, Riordan D, Sampalli S. "Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks". *Communication Networks and Services Research Conference*, Halifax, NS, Canada, 16-18 May 2005.
- [11] Prasath KA, Shankar T. "RMCHS: Ridge method based cluster head selection for energy efficient clustering hierarchy protocol in WSN". *2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM)*, Vellore, India, 6-8 May 2015.
- [12] Mhatre V, Rosenberg C. "Homogeneous vs. heterogeneous clustered sensor networks: A comparative study". *2004 IEEE International Conference on Communications (ICC 2004)*, Paris, France, 20-24 June 2004.
- [13] Bandyopadhyay S, Coyle EJ. "An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks". *INFOCOM 2003*, San Francisco, California, USA, 30 March-3 April 2003.
- [14] Bandyopadhyay S, Coyle EJ. "Minimizing communication costs in hierarchically-clustered networks of wireless sensors". *Computer Networks*, 44(1), 1-16, 2004.
- [15] Duarte-Melo EJ, Liu M. "Analysis of energy consumption and lifetime of heterogeneous wireless sensor networks". *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2002)*. IEEE, Taipei, Taiwan, 17-21 November 2002.
- [16] Wan CY, Campbell AT, Krishnamurthy L. "PSFQ: a reliable transport protocol for wireless sensor networks". *1st ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02)*, Atlanta, Georgia, USA, 28 September 2002.
- [17] Kalpakis K, Dasgupta K, Namjoshi P. "Efficient algorithms for maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks". *Computer Networks*, 42(6), 697-716, 2003.
- [18] Tan HO, Korpeoglu I. "Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks". *ACM SIGMOD Record*, 32(4), 66-71, 2003.
- [19] Kumar D, Aseri TC, Patel RB. "Distributed cluster head election (dche) scheme for improving lifetime of heterogeneous sensor networks". *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 13(3), 337-348, 2010.
- [20] Soro S, Henizelman W. "Prolonging the lifetime of Wireless sensor networks via unequal clustering". *19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, Denver, CO, USA, 4-8 April 2005.
- [21] Yuan L, Gui C. "Applications and design of heterogeneous and broadband advanced sensor networks". *1st Annual International Conference on Broadband Networks*, San Jose, California/USA, 25-29 October 2004.
- [22] Mhatre V, Rosenberg C, Kofmanand SN. "A Minimum cost heterogeneous sensor networks with a lifetime constraint". *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 4, 4-15, 2005.
- [23] Osamy W, Salim A, Khedr AM. "An information entropy based-clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks". *Wireless Network*, 26, 1869-1886, 2020.
- [24] Preethiya T, Muthukumar A, Durairaj S. "Double cluster head heterogeneous clustering for optimization in hybrid wireless sensor network". *Wireless Personal Communications*, 110, 1751-1768, 2020.
- [25] Batra PK, Kushwah R. "Fuzzy logic based cluster head selection method for heterogeneous wireless sensor networks". *2019 5th International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, Solan, India, 15-17 November 2019.
- [26] Dutt S, Agrawal S, Vig R. "Cluster-Head restricted energy efficient protocol (creep) for routing in heterogeneous wireless sensor networks". *Wireless Personal Communications*, 100, 1477-1497, 2018.
- [27] Kumar S, Verma SK, Kumar A. "Enhanced threshold sensitive stable election protocol for heterogeneous wireless sensor network". *Wireless Personal Communications*, 85(4), 2643-2656, 2015.
- [28] Tsai M, Chen Y. "A virtual cluster head election scheme for energy-efficient routing in wireless sensor networks". *2015 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud*, Washington, DC, USA, 24-26 August 2015.
- [29] Wang MY, Ding J, Chen WP, Guan WQ. "SEARCH: A stochastic election approach for heterogeneous wireless sensor networks". *IEEE Communications Letters*, 19(3), 443-446, 2015.
- [30] Hong Z, Yu L, Zhang GJ. "Efficient and dynamic clustering scheme for heterogeneous multi-level wireless sensor networks". *Acta Automatica Sinica*, 39(4), 454-460, 2013.
- [31] Qing L, Zhu Q, Wang M. "Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks". *Computer Communications*, 29(12), 2230-2237, 2006.
- [32] Zhou H, Wu Y, Hu Y, Xie G. "A novel stable selection and reliable transmission protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks". *Computer Communications*, 33(15), 1843-1849, 2010.
- [33] Alla SB, Ezzati A, Mohsen A. "Gateway and Cluster Head Election using Fuzzy Logic in heterogeneous wireless sensor networks". *2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems*, Tangiers, Morocco, 10-12 May 2012.
- [34] Elbhiri B, Saadane R, Fkihi SE, Aboutajdine D. "Developed Distributed Energy-Efficient Clustering (DDEEC) for heterogeneous wireless sensor networks". *5th International Symposium On I/V Communications and Mobile Network*, Rabat, Morocco, 30 September-2 October 2010.
- [35] Turgut İA. "Dynamic coefficient-based cluster head election in wireless sensor networks". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(5), 944-952, 2020.
- [36] Hassan S, Ahmad M. "Energy heterogeneity analysis of heterogeneous clustering protocols". *The International Arab Journal of Information Technology*, 19(1), 45-54, 2022.
- [37] Yalçın S, Erdem E. "An improved SEED clustering model for wireless sensor networks". *Politeknik Dergisi*, 24, 521-528, 2021.
- [38] Zhao L, Guo S. "An energy efficient multi-hop cluster-head election strategy for wireless sensor networks". *Journal of Information Processing Systems*, 17(1), 63-74, 2021.
- [39] Naeem A, Javed AR, Rizwan M, Abbas S, Lin JCW, Gadekallu TR. "DARE-SEP: A Hybrid approach of distance aware residual energy-efficient SEP for WSN". *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 5(2), 611-621, 2021.

- [40] Singh S, Manju, Malik A, Singh PK. "A threshold-based energy efficient military surveillance system using heterogeneous wireless sensor networks". *Soft Computing*, 27, 1163-1176, 2021.
- [41] Kumar H, Singh PK. "Enhancing network lifetime and throughput in heterogeneous wireless sensor networks". *Wireless Personal Communications*, 120, 2971-2989, 2021.
- [42] Verma S, Sood N, Sharma A. K. "Genetic algorithm-based optimized cluster head selection for single and multiple data sinks in heterogeneous wireless sensor network". *Applied Soft Computing Journal*, 85, 105788, 2019.
- [43] Nandan AS, Singh S, Kumar R, Kumar N. "An optimized genetic algorithm for cluster head election based on movable sinks and adjustable sensing ranges in IoT-Based HWSNs". *IEEE Internet of Things Journal*, 9(7), 5027-5039, 2022.
- [44] Baradaran AA, K. Navi. "HQCA-WSN: High-quality clustering algorithm and optimal cluster head selection using fuzzy logic in wireless sensor networks". *Fuzzy Sets and Systems*, 389, 114-144, 2020.
- [45] Djabour D, Abidi W, Ezzedine T. "Fuzzy independent circular zones protocol for heterogeneous wireless sensor networks". *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 39(3), 157-169, 2022.
- [46] Boston University Department of Computer Science Research Area. "SEP: A Stable Election Protocol for Clustered Heterogeneous Wireless Sensor Networks". <http://csr.bu.edu/sep> (19.09.2022).