



## 3D location optimization of multiple Unmanned Aerial Vehicle Base Stations in next-generation cellular networks and a new meta-heuristic approach

Recep Özdağ\*

Department of Computer Engineering, Van Yüzüncü Yıl University, Van, 65080, Turkey

### Highlights:

- Optimum altitude detection of aerial base stations using the ATG model
- Placement of aerial base stations in next-generation cellular networks
- EML and WOA-based new meta-heuristic approaches for 3D location optimization of aerial base stations

### Keywords:

- Cellular networks
- aerial base station
- multiple Drone-BS deployment
- electromagnetism-like algorithm
- whale optimization algorithm

### Article Info:

Research Article  
Received: 07.04.2020  
Accepted: 09.02.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.716111

### Correspondence:

Author: Recep Özdağ  
e-mail: rozdag@yyu.edu.tr  
phone: +90 432 225 1275

### Graphical/Tabular Abstract

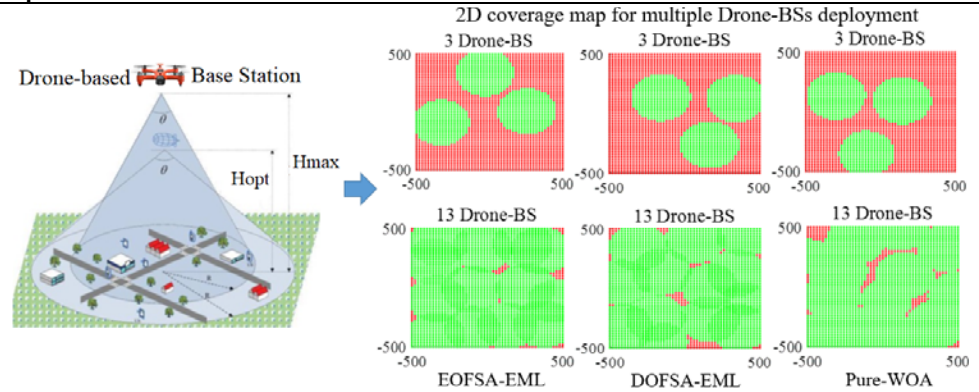


Figure A. Block diagram of dynamic deployment based on EML algorithm and WOA for 3D location optimizations of the Drone-BSs

**Purpose:** This study aims to make 3D dynamic deployment (location optimization) of multiple Drone-BSs in the area of interest for optimal coverage of the receivers (user equipment-UE), which are assumed to be located at certain distance intervals in the urban environment defined according to the Air-to-Ground (ATG) model.

### Theory and Methods:

In this study, meta-heuristic algorithms were used, which are the Whale Optimization Algorithm (WOA) with the Electromagnetism-Like (EML) algorithm commonly used in the literature. In addition, two new Drone-BS dynamic deployment approaches based on the EML algorithm were developed. These approaches were named EOFSA-EML (Extensive-interval Optimal Fitness Search Algorithm) and DOFSA-EML (Discrete-interval Optimal Fitness Search Algorithm), respectively. By defining two different scenarios, developed EML-based approaches were compared with Pure-WOA based on four metric evaluations. For simulation, the placement of UEs with regular intervals was made in the Grid-based 2D plane according to the scenarios defined in the area of interest.

### Results:

When the dynamic distribution of multiple Drone-BSs is made by EML and WOA based algorithms; (i) in terms of the cumulative average of the calculated fitness function, (ii) in terms of the average coverage rate calculated according to the average number of iterations in the area of interest, (iii) in terms of the average altitude value where the Drone-BSs are located, and (iv) in terms of the maximum coverage rate of the Drone-BSs in the 2D plane, optimum results have been achieved with developed EML-based algorithms.

### Conclusion:

According to Monte-Carlo simulation results, developed EML-based new approaches more optimum results in performance measurement with four metrics compared to Pure-WOA. It can be concluded that effective distribution of Drone-BSs can be made with EOFSA-EML and DOFSA-EML and thus should be recommended in the literature.



## Gelecek nesil hücresele ağlarda çoklu İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonlarının 3D konum optimizasyonu ve yeni bir meta-sezgisel yaklaşım

Recep Özdağ\*

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Gelecek nesil hücresele ağlarda çoklu havai baz istasyonlarının yerleşimi
- ATG modeli ile havai baz istasyonlarının optimum irtifa tespiti
- Havai baz istasyonlarının 3D konum optimizasyonu için EML ve WOA tabanlı yeni meta-sezgisel yaklaşımlar

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.04.2020

Kabul: 09.02.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.716111

#### Anahtar Kelimeler:

Hücresele ağlar,  
havai baz istasyonu,  
çoklu Drone-BS dağıtımı,  
elektromanyetizma-benzer  
algoritması,  
balina optimizasyon  
algoritması

#### ÖZ

Kablosuz iletişimde İnsansız Hava Araçları (UAVs)'nin mobil Baz İstasyonları (BSs) olarak kullanılması gelecek nesil hücresele ağlarda veya afet durumlarında planlanan hizmetler için kullanılması gereken etkin bir teknik olarak ortaya çıkmaktadır. Günümüzde Alçak-irtifa Hava Platform'ları olarak da isimlendirilen UAV'lere veya Drone'lara monte edilen BS (Drone-BS)'lerin tanımlanan alandaki 3D yerleşimlerinin etkin bir şekilde yapılması kablosuz iletişimin Servis Kalitesi (QoS)'ni önemli ölçüde artırmaktadır. Bu çalışmada, Air-to-Ground modeline göre kentsel ortamdaki alıcıların optimum şekilde kapsanması için 3D düzleminde rastgele dağılımı yapılan Drone-BS'lerin dinamik dağıtımları (konum optimizasyonu)'nın yapılması amaçlanmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan ve meta-sezgisel olan Elektromanyetizma-Benzer (EML) algoritması ve Balina Optimizasyon Algoritması (WOA)'ni esas alan yeni yaklaşımlar kullanılarak zemindeki alıcıların çoklu Drone-BS'ler tarafından maksimum sayıda kapsanması planlanmıştır. Ayrıca EML algoritması esas alınarak Geniş-aralıklı Optimum Uygunluk Arama Algoritması (EOFSA-EML) ve Ayrık-aralıklı Optimum Uygunluk Arama Algoritması (DOFSA-EML) yaklaşımları geliştirilmiştir. EOFSA-EML, DOFSA-EML ve Pure-WOA tarafından dağıtılan çoklu sayıdaki Drone-BS'ler için karşılaştırma metrikler esas alındığında, Pure-WOA'ya kıyasla EML tabanlı algoritmalar ile optimum sonuçlara ulaşıldığı tespit edilmiştir.

## 3D location optimization of multiple Unmanned Aerial Vehicle Base Stations in next-generation cellular networks and a new meta-heuristic approach

### H I G H L I G H T S

- Optimum altitude detection of aerial base stations using the ATG model
- Placement of aerial base stations in next-generation cellular networks
- EML and WOA-based new meta-heuristic approaches for 3D location optimization of aerial base stations

#### Article Info

Research Article

Received: 07.04.2020

Accepted: 09.02.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.716111

#### Keywords:

Cellular networks,  
aerial base station,  
multiple Drone-BS  
deployment,  
electromagnetism-like  
algorithm, whale  
optimization algorithm

#### ABSTRACT

The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) as mobile Base Stations (BSs) in wireless communication is emerging as an effective technique that should be used for the services planned in the next-generation cellular networks or in disaster situations. Currently, effective 3D placement of BS mounted on UAVs or Drones (Drone-BS), also called Low-altitude Air Platforms, in the defined area significantly increases the Quality of Service (QoS) of wireless communication. This study has been aimed to be performed dynamic deployments (location optimization) of Drone-BSs randomly distributed in the 3D plane in order to optimally cover the users in the urban environment according to the Air-to-Ground (ATG) model. Using new approaches based on the Electromagnetism-Like (EML) Algorithm and the Whale Optimization Algorithm (WOA), which are widely used in the literature and are meta-heuristic, it was planned to be covered the maximum number of users on the ground by multiple Drone-BSs. In addition, Extensive-interval Optimal Fitness Search Algorithm (EOFSA-EML) and Discrete-interval Optimal Fitness Search Algorithm (DOFSA-EML) approaches were developed based on the EML algorithm. Based on comparison metrics for multiple Drone-BSs distributed by EOFSA-EML, DOFSA-EML, and Pure-WOA, it has been found that EML-based algorithms achieve optimal results compared to Pure-WOA.

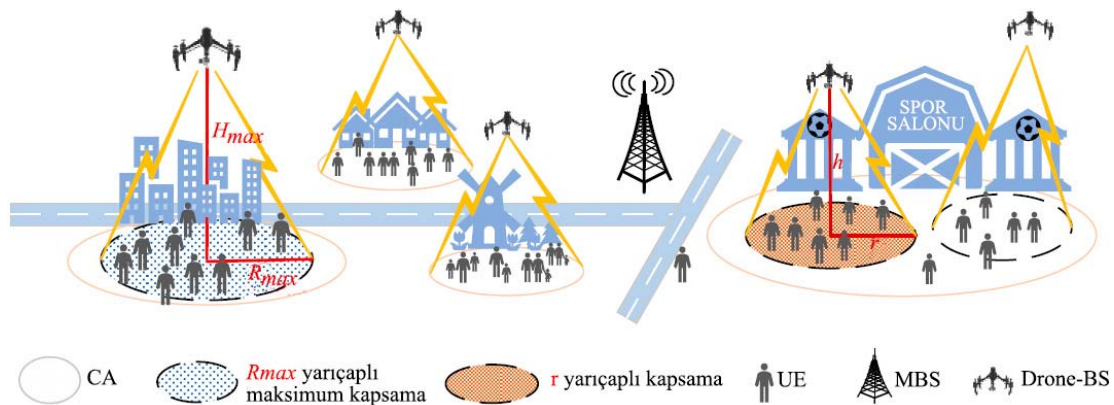
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hücresel ağın devre dışı olduğu durumlarda [1] kısa süreliğine altyapının yeniden inşa edilerek karasal Baz İstasyonları (BSs)'nin kurulması maliyet açısından makul bir yaklaşım değildir. Fakat geçişi internet erişiminin gerekli olduğu acil durumlarda İnsansız Hava Araçları (UAVs)'nin havai kablosuz BS olarak hizmet vermesi amacıyla Alçak-irtifa Hava Platformu (LAP) gibi hızlı mobilize olma özelliğine sahip olan Drone'ların kullanılması gelecek nesil hücresel ağların kapsanma oranını artırmada önemli ve makul bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca ortamdaki kablosuz iletişimin kapsanma oranının artırılması veya nüfusun yoğun olduğu alanlarda karasal BS'ye aşırı trafik yüklenmesi durumlarında zemindeki alıcılar (UEs)'a daha yüksek oranlarda veri trafiğinin sağlanması için BS'nin monte edildiği Drone (Drone-BS)'lar karasal BSs'ye takviye amacıyla kullanılabilir [2] (Şekil 1). Örneğin, karasal BS'nin devre dışı olması durumunda, Drone-BS'ler ilgili alanda dağıtılarak ortamdaki kablosuz iletişim talepleri hızlı bir şekilde karşılanabilir [3]. Drone-BS kullanımının ana avantajları; uzaktan kontrol edilebilmeleri ve bu sayede afet durumlarındaki tehlikeli ortamlarda otonom olarak hızlı dağılımlarının yapılabilmesidir [4]. Drone-BS'ler mobilize özellikleri dikkate alınarak karasal BSs'ler ile karşılaştırıldığında çevresel değişikliklere karşı daha sağlamdırlar. Örneğin, deprem, sel veya yangın gibi afet durumlarında bazı karasal BS'ler zarar görebilir. Bu gibi durumlarda BSs olarak mobilize olabilen Drone'ların dinamik dağılımlarının etkin bir şekilde yapılması UEs'ler için gelişmiş bir Servis Kalitesi (QoS) sağlar. Fakat Drone-BS'lerin dağıtımlarında güç tüketimi ve kapsanma oranları çözülmesi gereken önemli problemler olarak karşımıza çıkmaktadır.

UAV'in düşük maliyet ve yüksek mobilize özelliği dikkate alındığında askeri ve keşif dışındaki alanlara da uygulanabilmiştir. UAV genellikle uçuş irtifası 10 km'den

[6] daha yüksek veya daha düşük irtifada uçabilen uçaklar, balonlar ve Drone'lar için kullanılan bir terimdir. Drone'ların kullanımı gün geçtikçe artmakta ve kablosuz iletişimin mevcut olduğu uygulama alanlarında da kullanılmaktadır. Drone destekli kablosuz iletişim geleceksenil hücresel ağlar (5G+) için ortaya çıkan ve geliştirilen bir konudur. Ortamdaki hücresel ağların afet koşullarından dolayı zarar görmesi durumunda, Drone-BS'ler hızlı şekilde mobilize olarak hizmetin devamlılığında aktif rol alırlar. Ayrıca alandaki çok yoğun veri trafiği durumlarında ağ sıklığı rahatlatmak için Drone-BS'ler hücresel ağlara destek sağlayabilmektedir. Afet gibi beklenmedik durumlarda UE'lerin maksimum olarak kapsanmasını sağlamak Drone-BS'nin etkin ve hızlı bir şekilde dağıtımını zorunlu hale getirmektedir. Drone-BS'nin etkin dağıtımının yapılması haricinde önemli olan diğer bir problem ise, kanal modellemesidir. Yoğun kentsel ortamlarda binaların ortalama yüksekliği ve yükselti açısının fonksiyonu olarak Air-to-Ground (ATG) modeli için Line-of-Sight (LoS) olasılığı [7]'de tanımlanmıştır. ATG *PathLoss* (PL) modeli ise, [8, 9]'de çözülmüştür.

Drone-BS'lerin üç boyutlu (3D) alanlarda yerleşimleri son zamanlarda literatürde sıklıkla araştırılan ve çözüm bulunması gereken problemler arasındadır. 3D yerleşim ile ilgili araştırmalar; radyo kanal özellikleri [10], ağ kapasitesi [11], iletim gücü [12] vb. yönleriyle ele alınmıştır. Radyo kanal özellikleri açısından incelendiğinde, Drone-BS irtifası ve onun bu irtifaya göre optimum kapsamı arasındaki ilişki [10]'da önerilen ATG kanal modeline göre kurulmuştur. Ağ kapasitesi açısından incelendiğinde, 5G+'da kapasiteyi artırmak için Drone-BS'nin 3D yerleşimi [11] geliştirilmiştir. Ayrıca [13]'de, UE yoğunluğunda Drone-BS'nin sayısını minimize etmek için polinom zamanlı Drone-BS dağıtım yaklaşımı önerilmiştir. Güç açısından incelendiğinde [12]'de, minimum iletim gücü kullanılarak enerji verimli olarak Drone-BS'nin yerleşimi üzerine çalışılmıştır. UEs'ler için Drone destekli iletişimde ana



**Şekil 1.** Çoklu Drone-BS'lerin 3D yerleşimi ve farklı irtifalardaki kapsama alanları. CA: Kapsama Alanı, UE: Kullanıcı Ekipmanı, MBS: Makro Baz İstasyonu,  $R_{max}$ : Maksimum Kapsama Yarıçapı,  $r$ : Drone-BS Kapsama Yarıçapı,  $H_{max}$ : Maksimum İrtifa,  $h$ : Drone-BS İrtifası [5]

(3D placement of multiple Drone BSs and coverage areas at different altitudes. CA: Coverage Area, UE: User Equipment, MBS: Macro Base Station,  $R_{max}$ : Maximum Coverage Radius,  $r$ : Coverage Radius of Drone-BS,  $H_{max}$ : Maximum Altitude,  $h$ : Altitude of Drone-BS)

problemlerden biriside Drone-BS'nin dağıtımının nereye yapılacağıdır. Ayrıca Drone-BS yerleşimi karasal BSs'lerdeki gibi iki boyutlu (2D) bir yerleştirme problemi değildir. Sezgisel yaklaşımlar ile çözülebilen ve NP-hard [14] olarak kabul edilen bir 3D yerleştirme problemidir. Drone'ları kablosuz ağlara dâhil etmek zor olmasa da karşılaşılan önemli problemlerden biride Drone'ların batarya kapasitelerinin sınırlı olmasıdır. Bu problem araştırmacıları ilgili alanda gerekli kapsamı sağlamak için sadece sınırlı sayıda Drone-BS'lerin kullanılmasına yönlendirmiştir. Drone'lara monte edilen ve elektronik modül olan BS'de tüketilen gücün Drone-BS'lerin uçuş süresini %16'ya kadar sınırlayabildiği hesaplanmıştır [15]. Aslında Drone-BS'nin batarya yaşam süresinin uzatılması ve böylece görev süresinin daha uzun olması Drone-BS'nin iletim gücünü azaltarak gerçekleştirilebilir. Fakat bu durum Drone-BS'nin kapsama oranı azaltarak UEs'lerin daha az oranda kapsanmasına sebep olacaktır. Dolayısıyla Drone-BS'nin iletim gücü, kapsama alanı ve batarya yaşam süresi arasında doğrudan bir ilişki mevcuttur. Drone-BS'lerin gözetleme ve keşif ağlarında kullanımı ile ilgili araştırma [16]'da yapılmasına rağmen, 5G+ a yönelik olarak hücresel ağlarda Drone-BS'lerin kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar hala başlangıç aşamasındadır. [17, 18]'de, varsayım olarak Drone-BS için sabit bir irtifa tanımlanmıştır ve Drone-BS'nin irtifası ve kapsama alanı arasındaki ilişki ile dağılımın yapıldığı kentsel ortam dikkate alınmaksızın Drone-BS yerleşimleri yapılmıştır. Fakat [10]'da, Drone-BS'nin dağıtım yapıldığı küçük kentsel, kentsel, yoğun kentsel ve çok yoğun kentsel ortamlar dikkate alınarak Drone-BS'lerin ulaşabileceği Optimum İrtifa değerleri ve kentsel ortamda kullanılacak kanal modeli ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca farklı senaryolarda ATG modelinin LoS ve Non-LoS (NLoS) olasılıkları dikkate alınarak LAP'lar için ATG PL modeli önerilmiştir. Bazı araştırmacılar [11, 19, 20]'deki modeli temel alarak ağdan maksimum oranda faydalanmak için Drone-BS'lerin optimum dağılımlarını yapmaya çalışmışlardır.

Literatürde, 3D Drone-BS yerleşimlerinin etkin olarak yapılması amacıyla yürütülen çalışmalarda ayrıca meta-sezgisel algoritmalarından faydalanılmıştır. Örneğin, tanımlanan belirli bir bölgedeki rastgele şekilde konumlanan UEs'lere hizmet etmesi amacıyla Drone-BS'lerin 3D konumlarının ve minimum sayılarının bulunması için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) [20] kullanılmıştır. [21]'de, farklı QoS gereksinimine sahip kapsanan UEs'lerin sayısını maksimum yapan Drone-BS'lerin 3D dağıtımları çoklu daire yerleşim problemi olarak modellenmiştir. Drone-BS'lerin 2D konumunu ve Optimum İrtifasını belirlemek için tanımlanan bölgede tek boyutlu parametre üzerinde Kapsamlı Arama (ES) kullanan bir algoritma önerilmiştir. [22]'de, Radyo Erişim Ağı (RAN)'nda çoklu sayıda Drone-BS'lerin dağıtımını için PSO algoritması temel alınarak Drone Destekli RAN (DA-RAN) önerilmiştir. [23]'de, engebeli arazide konumlanan UEs'ler için ağ kapsamını sağlayabilen ve Drone-BS'lerin 3D dağıtımlarını sağlayan yeni bir algoritma önerilerek optimum kapsama ve bağlanabilirlik modelleri formüller ile tanımlanmıştır.

Öncelikle hem Drone'ların kapasitesi hem de UEs'lerin QoS gereksinimleri dikkate alınarak Drone-BS'lerin 3D dağıtım problemi tanımlanmış ve gerekli olan Drone-BS'lerin sayılarını minimize etmek için PSO temelli olarak etkin maliyet sağlayan sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir.

Bu makalenin taslak hali [24]'de çalışılmış ve MDDA-EML, Pure-EML isimleri ile adlandırılan algoritma yaklaşımları kullanılarak ilgili alanda ulaşılan ortalama kapsanma oranları karşılaştırılmıştır. Bu makalede ise, EML algoritması esas alınarak Drone-BS'ler için yeni meta-sezgisel dinamik dağıtım yaklaşımları geliştirilmiş ve Pure-WOA ile karşılaştırılmıştır. Monte-Carlo benzetimlerinde, ilgili alandaki zeminde UEs'lerin düzenli olarak yerleştirildiği ve farklı sayıda UEs'lerden oluşan iki senaryo tanımlanmıştır. Makalenin amacı; dağıtım yeri kentsel ortam olarak tanımlanan alanda başlangıçta rastgele dağılımı yapılan çoklu sayıdaki Drone-BS'lerin etkin bir şekilde 3D yerleşimlerinin yapılabilmesidir. Bu amaç için UEs'lerin gereğinden fazla Drone-BS'ler tarafından kapsanması engellenerek ilgili alanda dağıtılan çoklu Drone-BS sayısının minimize edilmesi planlanmıştır. Bu planlamada, geliştirilen EOFSA-EML ve DOFSA-EML yaklaşımları ile Pure-WOA kıyaslaması MATLAB® R2015a benzetim programı kullanılarak yapılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre çoklu sayıdaki Drone-BS'lerin dinamik dağıtımları EML tabanlı geliştirilen algoritmalar tarafından yapıldığında; (i) hesaplanan uygunluk (fitness) fonksiyonunun varyasyonu açısından, (ii) Drone-BS'ler tarafından ilgili alanın ortalama kapsanma oranları ve Drone-BS'lerin optimum konuma yerleşmek için çalıştırılan ortalama iterasyon sayılarının varyasyonu açısından, (iii) Drone-BS'lerin dağıtıldığı ortalama irtifa varyasyonları açısından ve (iv) çoklu Drone-BS'lerin dağıtıldığı alandaki 2D düzleminin maksimum kapsanma oranları açısından daha optimum olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın literatüre katkısı aşağıda verildiği üzere özetlenebilir:

- Meta-sezgisel algoritma olan EML esas alınarak EOFSA-EML ve DOFSA-EML yaklaşımları geliştirilmiştir.
- Kentsel ortamda tanımlanan senaryolara göre dağıtılan Drone-BS'lerin alandaki UEs'leri maksimum sayıda kapsaması için minimum sayıda Drone-BS kullanılmıştır. Drone-BS sayısının artırılması kısmen de olsa ilgili alanın kapsanma oranında artırıcı bir etki oluşturacak, fakat bu durum Drone-BS'lerin çakışmasına (overlap) neden olacağı için gereğinden fazla Drone-BS dağıtılması maliyet açısından olumsuz bir etki oluşturacaktır. Dolayısıyla bu çalışmada, minimum sayıda Drone-BS'ler ile etkin bir maliyete ulaşılması da hedeflenmiştir.
- Kentsel alanda bir Drone-BS'nin tanımlanan maksimum yarıçap mesafesi içinde maksimum sayıda UEs'leri kapsayabilmesi için alanda konumlanması gereken Optimum İrtifa değeri hesaplanmıştır. Çoklu Drone-BSs'lerin tüm UE'leri kapsayabilmesi için her bir Drone-BS'in alandaki 3D düzlemindeki yerleşimleri hesaplanan Optimum İrtifa değeri esas alınarak literatürde çalışılmayan EML ve WOA meta-sezgisel algoritmaları ile optimize edilmiştir.



- Benzetimlerde 2 senaryo tanımlaması yapılarak 2D düzleminde düzenli olarak yerleşimleri yapılan UEs'lerin benzetim sonuçları olan etkisi incelenmiştir.

Makalenin sonraki bölümleri takip edildiği gibi planlanmıştır. Bölüm 2'de, çalışmanın sistem modellemesi sunulmuştur. Bölüm 3'de, Drone-BS'lerin Optimum İrtifası formülleri ile modellenerek tespit edilmiştir. Bölüm 4'de, Drone-BS'lerin etkin dinamik dağıtımları için EML algoritması esas alınarak geliştirilen Optimum Uygunluk Arama Algoritmaları (OFSA) ile benzetim karşılaştırmasında kullanılan Pure-WOA'nın yapısı açıklanmıştır. Benzetim sonuçları ile yapılan analizler Bölüm 5'de sunulularak tartışılmış ve Bölüm 6'da nihai sonuçlar sunulmuştur.

## 2. SİSTEM MODELİ (SYSTEM MODEL)

LAPs, atmosferin yere temas eden en alt katmanı olan troposfer içinde yer alan bir irtifa yüksekliğinde karakterize edilebilen ve Quadcopter, helikopter ve balonlar gibi yarıstatik havai platformlardır. Bu çalışmada, iki model esas alınarak çoklu Drone-BS'lerin dağıtım problemlerine uygulanmıştır. İlki; LAPs olarak sınıflandırılan Drone-BS'lerin 3D alandaki sistem modellemesi ATG kanal modeli [2-4, 10] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İkincisi ise, Drone-BS'lerin ilgili alanda kapsadığı UEs'lerin tespiti için 2D Izgara ( $P$ ) modeli [25, 26] kullanılmıştır.

### 2.1. Air-to-Ground Yayılım Modeli (Air-to-Ground Propagation Model)

ATG iletişimi iki ana yayılım grubuna göre gerçekleşir. İlki, LoS koşuluna yakın veya LoS koşulunu sağlayan alıcılara karşılık gelirken, ikincisi ise LAP'ın NLoS koşulunu sağlayan alıcılara karşılık gelir. Şekil 2 [10]'de gösterildiği üzere LAP tarafından yayılan radyo sinyalleri binaların veya yapıların neden olduğu gölgelemeye maruz kaldıkları kentsel ortama ulaşıncaya kadar herhangi bir engelin olmadığı ortamda ATG'de oluşan *Free Space PathLoss*

(FSPL) ile yayılım gösterirler. Radyo sinyalleri kentsel ortama ulaştığında ise, binalardan dolayı Aşırı *PathLoss* (Excessive PL- $\eta$ )'a maruz kalırlar. ATG modelindeki her bir yayılım grubu için, LAP tarafından yayılan sinyalin maruz kaldığı ortalama PL değeri Eş. 1 [10]'e göre modellenir.

$$PL_{\delta} = FSPL + \eta_{\delta} \quad (1)$$

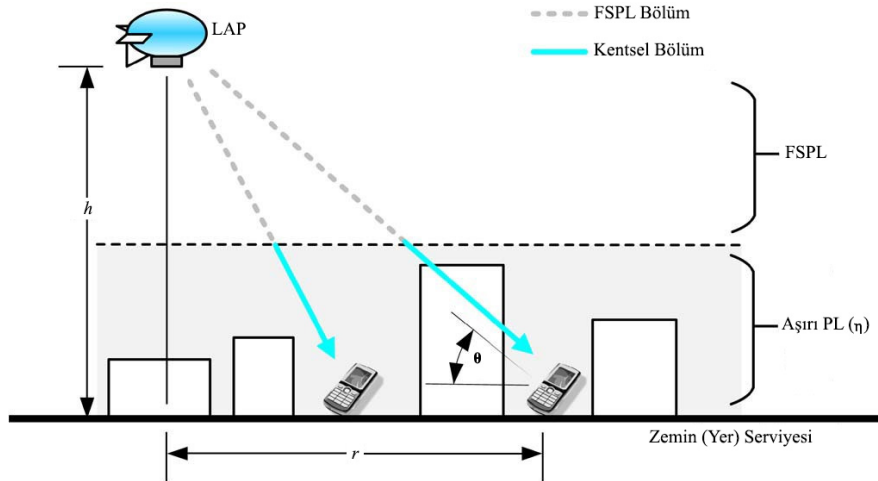
Verilen denklemde, FSPL boş alandaki PL değerini,  $\eta$  kentsel ortamdaki aşırı PL değerinin ortalamasını,  $\delta$  ise yayılım grubunu göstermektedir. Dolayısıyla Şekil 2'de gösterilen ve  $\delta$ 'ya göre  $\theta$  yükseklik açısına sahip olan  $i$ 'nci alıcı ile LAP arasında oluşan olasılıksal ortalama PL değeri Eş. 2 [19] ile modellenir.

$$L(h, r_i) = PL_{LoS} \times P_{LoS} + PL_{NLoS} \times P_{NLoS} \quad (2)$$

Verilen denklemde  $PL_{LoS}$  ve  $PL_{NLoS}$  yayılım gruplarının ortalama PL değerlerini,  $P_{LoS}$  ve  $P_{NLoS}$  ise LoS ve NLoS bağlantısına sahip olma olasılığını gösterir. Her bir  $i$ 'nci alıcının 2D düzlemindeki konumu ile yerden belirli bir  $h$  irtifasında konumlanan LAP'ın 2D düzlemindeki konumu sırasıyla  $(x_i, y_i)$  ve  $(x_{LAP}, y_{LAP})$  olarak temsil edilsin. Her bir  $i$ 'nci alıcı ile LAP arasındaki yatay mesafe  $r_i = \sqrt{(x_i - x_{LAP})^2 + (y_i - y_{LAP})^2}$  Öklid bağıntısı kullanılarak hesaplanır. Dolayısıyla  $i$ 'nci alıcı ile LAP arasındaki LoS bağlantısına sahip olma olasılığı Eş. 3[10]'e göre modellenir.

$$P_{LoS} = \frac{1}{1 + a \exp(-b(\theta_i - a))} \quad (3)$$

Verilen denklemde,  $a$  ve  $b$  [11] kentsel veya kırsal gibi farklı ortamlara göre tanımlanan sabitlerdir. LAP ve  $i$ 'nci alıcı arasındaki yükseklik açısı  $\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{h}{r_i}\right)$  tarafından hesaplanır. NLoS yayılım grubunun olasılığı ise,  $P_{NLoS} = 1 - P_{LoS}$  eşitliği ile hesaplanır. Eş. 2'deki LoS ve NLoS yayılım gruplarının PL değerleri Eş. 4'te sırasıyla hesaplanmıştır.



Şekil 2. Kentsel ortamda LAP'dan alıcıya olan radyo yayılımı ( $\theta$ : Yükseklik açısı,  $h$ : İrtifa,  $r$ : Yatay mesafe)  
(Radio propagation from LAP to receiver in urban environment  $\theta$ : Height angle,  $h$ : Altitude,  $r$ : Horizontal distance)

$$PL_{LOS} = 20 \log \left( \frac{4\pi f d_i}{c} \right) + \eta_{LOS} \quad (4)$$

$$PL_{NLOS} = 20 \log \left( \frac{4\pi f d_i}{c} \right) + \eta_{NLOS}$$

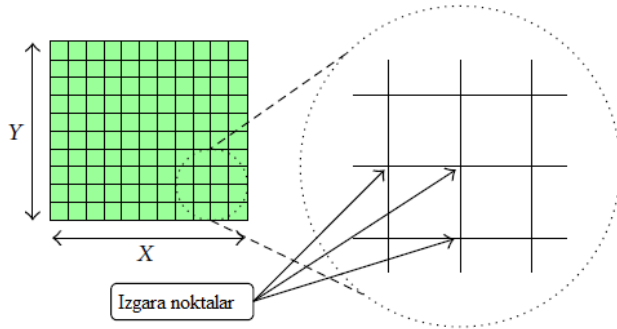
Verilen denklemde,  $f$  (Hz) taşıyıcı frekans değerini,  $d_i$  LAP ile  $i$ 'nci alıcı arasındaki  $\sqrt{h^2 + r_i^2}$  olan Öklid mesafesini,  $c$  (m/s) ışık hızını,  $\eta_{LOS}$  ve  $\eta_{NLOS}$  [11] ise yayılım grupları için ortama bağlı olarak tanımlanan ortalama ek kayıpları gösterir.

Eş 3 ve Eş. 4, Eş. 2'de verilen modele uygulandığında  $h$  irtifasındaki Drone-BS tarafından  $r_i$  mesafesindeki UE'ye ulaşan sinyalin ortalama PL değeri Eş. 5'e göre modellenir.

$$L(h, r_i) = \frac{\eta_{LOS} - \eta_{NLOS}}{1 + a \exp(-b(\theta_i - a))} + 20 \log \left( \frac{4\pi f d_i}{c} \right) + \eta_{NLOS} \quad (5)$$

### 2.2. Izgara Modeli (Grid Model)

Bu çalışmada, ilgili alandaki UE'slerin yerleşimleri 2D  $P$  düzleminde tanımlanan sabit bir aralık mesafesi ile düzgün bir şekilde dağıtılmıştır. Şekil 3 [25]'de gösterilen 2D düzlemindeki yatay ve dikey çizgilerin kesişim noktası olan  $P$  noktalar her bir UE'yi temsil etmektedir. UE'slerin 2D düzlemindeki yerleşim koordinatları  $(x,y)$ , Drone-BS'lerin 3D dağıtım koordinatları ise  $(x,y,h)$  olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla Drone-BS'lerin dinamik dağıtıldığı alan ve UE'slerin düzenli olarak yerleştirildiği Kapsama Haritası (CM) Şekil 3 ile temsil edilmiştir.



Şekil 3. 2D Izgara düzlemi şeması (2D Grid plane scheme)

### 3. PROBLEM FORMÜLASYONU VE OPTİMUM İRTİFA TESPİTİ (PROBLEM FORMULATION AND OPTIMUM ALTITUDE IDENTIFICATION)

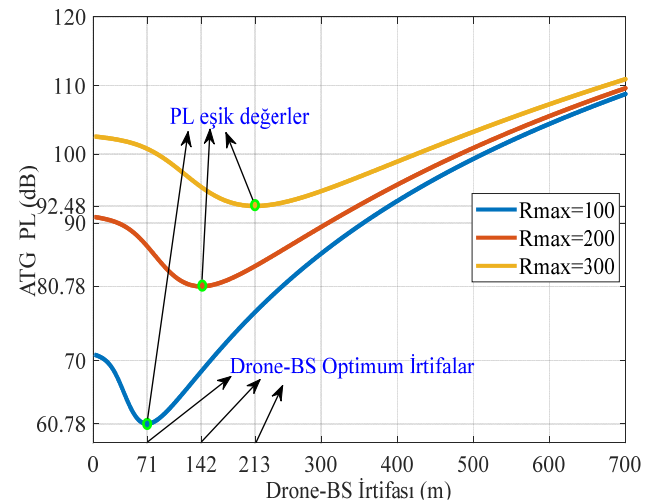
Bu bölümde, çoklu Drone-BS'lerin dağıtımları sonrasında yerleşmiş oldukları  $h$  irtifasına göre kapsanan UE sayısının tespiti amacıyla, öncelikle Drone-BS'ler için maksimum kapsama yarıçap mesafesi tanımlanarak Optimum İrtifa ( $h_{opt}$ )'nın tespiti yapılacaktır.

ATG yayılım modeline göre Drone-BS'ler  $h_{opt}$ 'ye ulaştığı anda zemindeki maksimum kapsama tarama yarıçap mesafesi  $R_{max}$  olarak tanımlansın. Şekil 4'de gösterildiği üzere; Drone-BS irtifasını artırarak yerden yükselmeye

başladığı andan itibaren UE'slere ulaşan sinyalin PL değeri gittikçe azalmaya başlar. Drone-BS  $h_{opt}$ 'ye ulaştığı zaman  $R_{max}$  mesafesindeki UE'ye ulaşan sinyalin PL değeri eşik değer ( $L_{th}$ )'e ulaşır. Eş. 6'da gösterildiği üzere, PL değerinin  $L_{th}$ 'a ulaştığı  $h_{opt}$ 'de Drone-BS'nin  $R_{max}$  değeri kapsanan  $i$ 'nci UE'nin Drone-BS ile arasındaki yatay mesafeye ( $r_i$ ) eşit olur ve bu mesafe kapsanacak UE'sler için Drone-BS'nin ulaşacağı maksimum tarama yarıçap mesafesi olarak belirlenir. Fakat  $r_i > R_{max}$  olduğu durumlardaki  $i$ 'nci UE'sler Drone-BS tarafından kapsanmayacaktır. Eğer Drone-BS ulaştığı optimum irtifada kararlı olmayarak irtifasını artırmaya devam eder ise (Şekil 4),  $R_{max}$  mesafesinde bulunan UE'ye ulaşan sinyalin PL değeri sürekli artış gösterecek ve artık  $PL > L_{th}$  olacağından dolayı UE kapsanmayacaktır. Ayrıca Drone-BS'nin  $h_{opt}$ 'nin üzerindeki irtifalara çıkması  $R_{max}$  değerinin düşmesine ve daha az sayıda UE'snin kapsanmasına sebep olacaktır.

$$\begin{cases} R_{max} = r_i, & \text{Eğer } L(h, r_i) = L_{th} \\ R_{max} \neq r_i, & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (6)$$

Şekil 4'de,  $R_{max}$  değeri sırasıyla 100, 200 ve 300 metre olarak tanımlandığında, ATG modeline göre Drone-BS'nin PL değişim grafiği gösterilmiştir.  $R_{max} = 100$  metre tanımlandığında bu mesafede bulunan UE'nin PL değeri 60,78 dB'de  $L_{th}$  değerine ulaşacak ve  $h_{opt} = 71$  metre olarak hesaplanacaktır.  $R_{max} = 200$  metre tanımlandığında bu mesafede bulunan UE'nin PL değeri 80,78 dB'de  $L_{th}$  değerine ulaşacak ve  $h_{opt} = 142$  metre olarak hesaplanacaktır.  $R_{max} = 300$  metre tanımlandığında ise, bu mesafede bulunan UE'nin PL değeri 92,48 dB'de  $L_{th}$  değerine ulaşacak ve  $h_{opt} = 213$  metre olarak hesaplanacaktır.



Şekil 4. Kentsel ortamda Drone-BS'nin  $R_{max}$  mesafelerine göre PL değişim grafiği (PL change graph according to  $R_{max}$  distances of Drone-BS in an urban environment)

Drone-BS'nin  $h_{opt}$  irtifasına ulaştığında  $R_{max}$  mesafesinde bulunan UE'ye ulaşan sinyalin PL değeri  $L_{th}$  olarak tanımlanır ve Eş. 7'ye göre modellenir.

$$L_{th}(h_{opt}, R_{max}) = \frac{\eta_{LOS} - \eta_{NLOS}}{1 + a \exp(-b (\tan^{-1}(\frac{h_{opt}}{R_{max}}) - a))} + 20 \log\left(\frac{4\pi f d_{max}}{c}\right) + \eta_{NLOS} \quad (7)$$

Verilen denklemde, Drone-BS ile  $R_{max}$  mesafesinde bulunan UE arasındaki mesafe  $d_{max}$  olarak tanımlanmıştır ve bu mesafe  $\sqrt{h_{opt}^2 + R_{max}^2}$  Öklid bağıntısı ile hesaplanır. Drone-BS  $h$  irtifasında konumlandığında  $i$ 'nci UEs'lere ulaşan sinyalin PL değeri  $L_{th}$  değerinden küçük olduğu sürece, UEs'lerin Drone-BS tarafından Kapsanma Durumu (CS) Eş. 8'e göre modellenir.

$$CS_i = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } L(h, r_i) \leq L_{th} \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (8)$$

Verilen eşitlikte,  $P$  noktalarında konumlandığı varsayılan UE'lerin Drone-BS'ler tarafından kapsanması durumunda "1", kapsanmaması durumunda ise "0" ikili değerler tanımlanarak ilgili UEs'lerin CS'si tespit edilir. Dolayısıyla  $\{0, 1\} \in \mathcal{M}$  ve  $j = 1, \dots, N_{BS}$ ,  $i = 1, \dots, N_{\phi}$  olmak üzere,  $\mathcal{M}(j, i)$ ; Şekil 3'te modellenen CM'deki her bir  $P$  noktasının CS'sinin tanımlandığı bir vektördür. Drone-BS'lerin dinamik dağılımlarının yapılması sonrasında,  $\forall j$  Drone-BS tarafından CM'deki  $\forall i$  UE'nin CS'si tespit edilerek Eş. 9'a göre maksimum kapsanan UE sayısı hesaplanır.

$$f(x)_j = \max \sum_j^{N_{BS}} \sum_i^{N_{\phi}} \mathcal{M}(j, i), \quad \forall ij \quad (9)$$

Verilen denklemde,  $N_{BS}$  ilgili alanda dağıtımı yapılan Drone-BS'lerin toplam sayısını,  $N_{\phi}$  ise 2D düzleminde dağılımı yapılan UEs'lerin toplam sayısını temsil eder. Ayrıca  $f(x)_j$ , dinamik olarak CM'de yerleştirilen  $\forall j$  Drone-BS tarafından kapsanan UEs'lerin toplam sayısını gösteren fitness değeridir ve bu çalışmadaki meta-sezgisel algoritmalar ile optimize edilecektir. Bu çalışmada,  $\forall j$  Drone-BS için  $f(x)_j$  değerinin optimize edilmesinin önemi; ilgili alanda kapsanacak UEs'lerin sayısını maksimize ederek  $\forall j$  Drone-BS'in 3D düzleminde dinamik dağıtımlarını optimum şekilde gerçekleştirmesidir.

#### 4. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Bu bölümde, çoklu Drone-BS'lerin dağıtımlarında kullanılan ve EML algoritması esas alınarak geliştirilen EOFSA-EML ve DOFSA-EML ile WOA tabanlı Pure-WOA'nın algoritma yapıları açıklanacaktır. EML algoritmasının kullanıldığı literatür çalışmaları [25-28] incelendiğinde, benzetim ortamında parçacıkların birbirine hızlı bir yakınsama sağlayarak daha kısa iterasyon sayılarında problemi optimize ettiğinden dolayı bu çalışmada kullanılmasının başlıca nedeni olmuştur. WOA [29-31], sürü tabanlı optimizasyon problemlerinin çözümünde tercih edilen yeni bir meta-sezgisel [32, 33] algoritma olduğundan dolayı bu çalışmadaki EOFSA-EML ve DOFSA-EML'nin performans karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

#### 4.1. Elektromanyetizma – Benzer Algoritması (Electromagnetism-Like Algorithm)

Birbil ve Fang [28] tarafından geliştirilen, fizikteki elektromanyetizma teorisine göre yüklü parçacıkların birbirini itme-çekme kuvvetini temel alan ve bunların çözüm uzayındaki hareketinden esinlenerek tasarlanan popülasyon tabanlı meta-sezgisel bir algoritmadır. Sınırlı değişkenler ile kısıtsız global problemlerin çözümü için geliştirilen EML algoritması doğrusal olmayan gerçek değerli problemlerin optimizasyonunu sağlar [25]. EML algoritmasına göre her parçacık bir çözümü temsil eder ve çözüm kalitesi ile orantılı olarak belirli miktarda yük taşır. Bu yük değerine göre parçacıklar çözüm uzayında birbirine itme veya çekme kuvveti uygulayarak mevcut konumlarının değiştirir [26]. Ayrıca bu çözümler çok boyutlu uzayda parçacıkların gerçek konumlarını veren konum vektörleri tarafından tanımlanır. Dolayısıyla parçacıkların  $f(x)$  değerleri konum vektörleri esas alınarak hesaplanır. EML algoritmasının temel çalışma prensibi; parçacıklara itme veya çekme kuvveti uygulanarak optimum çözüme doğru parçacıkların hareketinin sağlanmasıdır. Coulomb yasasına göre eğer bir parçacığın  $f(x)$  değeri diğerinden daha büyükse bu parçacık diğer parçacığı iter, aksi durumda ise kendisine doğru çekerek hareket eder. Her bir parçacığa uygulanan kuvvetin vektörel toplamı alınarak bileşke kuvvet hesaplanır ve bu parçacık bileşke kuvvet yönünde hareket ederek popülasyondaki konumu güncellenir.

#### 4.2. Balina Optimizasyon Algoritması (Whale Optimization Algorithm)

Mirjalili ve Lewis [29] tarafından geliştirilen ve kambur balinaların avlanırken kullandıkları kabarcık avlanma stratejisinden esinlenerek tasarlanan sürü tabanlı yeni bir meta-sezgisel algoritmadır. Küçük balık sürüleri ile beslenen kambur balinaların kendilerine özgü bir avlanma stratejisi vardır. Suyun altında soluk vererek kabarcık bulutları oluşturan balinalar bu sayede avlarını bir araya toplarlar. Kabarcık bulutunu su yüzeyine çıkana kadar devam ettirerek avlarının bu bulutun içerisinde kalmasını sağlarlar. Ayrıca bu sayede kendilerini gizlemiş olurlar. WOA'da av, ulaşılacak olan optimum çözüm olarak kabul edilir. Optimizasyon problemlerinde optimum çözüm bilinmediğinden, yerel veya global arama uzayları kullanılarak optimum çözüm elde edilmeye çalışılır. Belirli kıstaslar sağlanana kadar arama işlemi devam eder. Optimum çözüm ulaşılan en iyi çözüm ya da onun etrafında bir nokta olarak kabul edilir. En iyi çözüm belirlendikten sonra diğer çözümlerin konumları en iyi çözüm kullanılarak güncellenir. Avı bulan balinalar avına doğru hareket için avın etrafındaki çemberi daraltma ve spiral hareket gibi iki farklı şekilde avına yaklaşırlar. Balina avına ulaşmak için yapmış olduğu bu yaklaşımlar matematiksel olarak modellenir [29] ve avın etrafını sarma, avı doğru hareket etme ve av arama olmak üzere 3 adımda sunulmaktadır [30].

#### 4.3. EML Algoritmasını Esas Alan Optimum Uygunluk Arama Algoritmaları (Optimum Fitness Search Algorithms Based on EML Algorithm)

Bu çalışmada, EML algoritmasını temel alan EOFSA-EML ve DOFSA-EML olarak isimlendirilen yeni meta-sezgisel

yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu algoritmalar ilgili alanda minimum sayıdaki Drone-BS'lerin dinamik dağılımlarını etkin bir şekilde yaparak maksimum sayıda UEs'nin kapsanmasını amaçlar. Bu amaca ulaşmak için ilgili alandaki herhangi bir UE'nin minimum sayıda Drone-BS tarafından kapsanması planlanmıştır. Böylece dağıtılan Drone-BS'lerin çıkışması minimum oranda sağlanarak, hem daha az sayıda Drone-BS'in dağıtımı yapılacak, hem de ilgili alanın kapsanma oranında artış sağlanacaktır. Geliştirilen EOFSA-EML ve DOFSA-EML'de, NP-hard olan ve 3D düzleminde

Drone-BS yerleşim problemi dikkate alınarak 2D düzlemindeki UEs'leri maksimum sayıda kapsayan Drone-BS'lerin tespit edilmesinde  $f(x)$  fonksiyonu kullanılmıştır. EOFSA-EML ile DOFSA-EML'nin ortak taslak kodu olan ve Şekil 5'de gösterilen *Algoritma 1*'e göre Drone-BS'ler için  $f(x)$  hesaplama aşamaları 3 adımda sunulmuştur:

Adım 1: 2D düzlemindeki her bir  $P$  noktasının CS'leri öncelikle rastgele dağıtılan Drone-BSs'ler tarafından, sonrasında ise geliştirilen EML tabanlı algoritmalar

---

**ALGORİTMA 1.** EOFSA-EML(), DOFSA-EML(), Pure-WOA()
 

---

**Girdiler:**

$A$ : 3D ilgili alan boyutları ( $x$  koordinat,  $y$  koordinat,  $z$  koordinat)  
 $N_{DroneBS}$ : Dağıtılan Drone-BS'lerin sayısı  
 $\eta_{LoS}, \eta_{NLoS}$ : LoS and NLoS için ortalama ek PL değerleri  
 $a, b$ : Alan için ortam belirleyici parametreler  
 $f$ : Taşıyıcı sinyal frekans değeri  
 $c$ : Işık hızı değeri  
 $R_{max}$ : Drone-BS için maksimum tarama yarıçap değeri  
 $Update\_F_x\_ToI$ : tolerans güncelleme (EOFSA-EML) veya  $f(x)$  güncelleme (DOFSA-EML) sabiti  
 $N_{simulation}$ : Monte Carlo benzetim sayısı  
 $hopI$ : DroneBS için optimum irtifa değeri  
 $TPL$ : DroneBS için  $hopI$  irtifasındaki eşik PL değeri

**Değişkenler:**

$Pos_{DroneBS}$ =[] // DroneBS'lerin 3D konum vektörü  
 $Pop_{DroneBS}$ =[] // DroneBS'lerin popülasyon vektörü  
 $Pop_{Grid}$ =[] // 2D düzlemindeki  $P$  noktalarının popülasyon vektörü  
 $Opt_{DroneBS}$ =[] // Optimum konuma yerleşen DroneBS'lerin  $Pos_{DroneBS}$  vektöründeki sıra indeks değeri  
 $BestF_xOrder_{DroneBS}$ =[] // Maksimum  $f(x)$  değerine göre sıralanan DroneBS'lerin indeks ve  $f(x)$  vektörü  
 $CoveredGridCoordinate$ =[] // 2D düzleminde kapsanan  $P$  noktalarının koordinat vektörü  
 $N_{MaxGrid}$ =[] // 2D düzleminde Drone-BS'lerin kapsayabileceği maksimum  $P$  nokta sayısı  
 $LeaderPos_{Grid}$ =[] // Pure-WOA için 2D düzleminde seçilen optimum  $P$  noktasının koordinat vektörü  
 $CumulativeToI=0$  // EOFSA-EML için kümülatif tolerans değeri  
 $ALG$ : Benzetimi yapılacak algoritma için seçim değeri (1:EOFSA-EML, 2:DOFSA-EML, 3:Pure-WOA)  
 $iter=1$  // benzetimlerdeki tekrarlama (iterasyon) başlangıç değeri

**Basla:**

```

1 :  $TPL = PathLossCalculate(\eta_{LoS}, \eta_{NLoS}, a, b, f, c, hopI, R_{max})$  // Eşik PL değerini hesapla
2 : for  $ALG = 1$  to 3 do // Benzetim için algoritmayı tanımla
3 :   for  $i = 1$  to  $N_{simulation}$  do
4 :      $Positions = RandomPositionGenerate(N_{DroneBS})$  // DroneBS'ler için rastgele başlangıç konumları üret
5 :      $[Pop_{Grid}, Pop_{DroneBS}] = FitnessCalculate(A, Pop_{Grid}, Pos_{DroneBS}, Opt_{DroneBS})$  //  $f(x)$  hesapla
6 :      $BestF_xOrder_{DroneBS} = OptimalFitnessSort(Pop_{DroneBS}, N_{DroneBS})$  // Azalan sırada  $f(x)$  sırala
7 :     if  $ALG = 1$  then // EOFSA-EML'nin benzetimini çalıştır
8 :        $[Opt_{DroneBS}, CumulativeToI] = EOFSA\_EML.OptDroneBSDetermine(BestF_xOrder_{DroneBS}, Opt_{DroneBS},$ 
            $Update\_F_x\_ToI, N_{MaxGrid}, CumulativeToI)$  // Optimum Drone-BS'yi tespit et
9 :     elseif  $ALG = 2$  then // DOFSA-EML'nin benzetimini çalıştır
10 :       $[Opt_{DroneBS}, N_{MaxGrid}] = DOFSA\_EML.OptDroneBSDetermine(BestF_xOrder_{DroneBS}, Opt_{DroneBS},$ 
            $Update\_F_x\_ToI, N_{MaxGrid})$ 
11 :    elseif  $ALG = 3$  then // Pure-WOA'nın benzetimini çalıştır
12 :       $[Opt_{DroneBS}, N_{MaxGrid}] = Pure\_WOA.OptDroneBSDetermine(BestF_xOrder_{DroneBS}, Opt_{DroneBS}, N_{MaxGrid})$ 
13 :    end if
14 :    if  $length(Opt_{DroneBS}) = N_{DroneBS}$  then // Eğer dağıtılan tüm DroneBS'ler optimum konuma yerleşir ise
15 :       $CoveredGridCoordinate = CoverageRateCalculate(A, Pop_{Grid}, Opt_{DroneBS}, TPL)$  // Kapsanma oranını hesapla
16 :      break
17 :    elseif  $ALG = 1$  or  $ALG = 2$  then // EML algoritma tabanlı Drone-BS dağıtımını gerçekleştir
18 :       $Pop_{DroneBS} = ChargeCalculate(Pop_{DroneBS}, BestF_xOrder_{DroneBS}(1), N_{DroneBS})$  // Parçacık yükünü hesapla
19 :       $[Pop_{DroneBS}, Pos_{DroneBS}] = TotalForceCalculate(Pos_{DroneBS}, Pop_{DroneBS}, N_{DroneBS}, A)$  // Parçacıklara
           uygulanan toplam kuvveti hesapla
20 :       $Pos_{DroneBS} = NewPositionCalculate(Pos_{DroneBS}, A)$  // Toplam kuvvete göre parçacıkların yeni konumunu tespit et
21 :    elseif  $ALG = 3$  then // WOA tabanlı Drone-BS dağıtımını gerçekleştir
22 :       $Pos_{DroneBS} = WOADeployment(LeaderPos_{Grid}, Pos_{DroneBS}, Opt_{DroneBS}, N_{MaxGrid}, iter)$ 
23 :    end if
24 :     $iter = iter + 1$ 
25 :  end for
26 : end for

```

---

**Şekil 5.** EOFSA-EML, DOFSA-EML ve Pure-WOA'nın ortak taslak kodları  
 (The common draft codes of EOFSA-EML, DOFSA-EML, and Pure-WOA)



tarafından Drone-BSs'lerin dinamik olarak yerleştirildikleri konumlar esas alınarak hesaplanır.

Adım 2: Adım 1'deki hesaplama esas alınarak; eğer herhangi bir  $P$  noktası sadece bir adet Drone-BS tarafından kapsanır ise, sadece bu  $P$  noktasını kapsayan Drone-BS'nin  $f(x)$  değeri güncellenir. Eğer birden fazla Drone-BS tarafından kapsanır ise, bu Drone-BS'lerin optimum olma veya olmama (optimum konuma yerleşme) durumlarına göre bu  $P$  noktasını kapsayan Drone-BS sayısı hesaplanır.

Adım 3: Adım 2'deki hesaplama esas alınarak; bu  $P$  noktasını kapsayan Drone-BS'lerin tümü eğer optimum değil ise, bu  $P$  noktasını kapsayan tüm Drone-BS'lerin  $f(x)$  güncellemesi yapılır. Aksi durumda ise,  $f(x)$  güncellenmez.

#### 4.3.1. Geniş-aralıklı optimum uygunluk arama algoritması (Extensive-interval optimal fitness search algorithm-EOFSA)

Bu çalışmada, dağıtımı yapılan çoklu sayıda DroneBSs'lerin her birinin 3D düzleminde optimum konuma yerleşimlerini sağlamak için hesaplanan  $f(x)$  esas alınarak geniş tolerans aralığında sorgulama yöntemi ile EOFSA-EML geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, optimum  $f(x)$ 'e sahip Drone-BS'e ulaşmak için tasarlanan taslak kod Şekil 6 (Algoritma 2)'da gösterilmiştir. Algoritma 1'de tanımlanan tolerans güncelleme sabiti ( $Update\_Fx\_Tol$ )'nin değeri kadar Algoritma 2'de güncellenen  $CumulativeTol$  değişkeni kullanılarak geniş aralık sorgulaması (Algoritma 2, 3.satır) gerçekleştirilir. Bu sorgulamada, eğer optimum  $f(x)$  değerine

ulaşılır ise optimum Drone-BS tespit edilir, aksi durumda  $CumulativeTol$  değişkeni  $Update\_Fx\_Tol$  sabiti kadar kümülatif olarak güncellenerek (Algoritma 2, 10.satır) bu değişkenin geniş aralık sorgulamasındaki yeni değeri tanımlanır.

#### 4.3.2. Ayrık-aralıklı optimum uygunluk arama algoritması (Discrete-interval optimal fitness search algorithm-DOFSA)

Bu çalışmada, dağıtımı yapılan çoklu sayıda DroneBSs'lerin her birinin optimum konuma yerleşimlerini sağlamak için hesaplanan  $f(x)$  değerleri esas alınarak ayrık tolerans aralığında sorgulama yöntemi ile DOFSA-EML geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, optimum  $f(x)$ 'e sahip Drone-BS'e ulaşmak için tasarlanan taslak kod Şekil 7 (Algoritma 3)'de gösterilmiştir. Algoritma 1'de tanımlanan tolerans güncelleme sabiti ( $Update\_Fx\_Tol$ )'nin değeri kadar Algoritma 3'de güncellenen  $NMaxGrid$  değişkeni kullanılarak ayrık aralık sorgulaması (Algoritma 3, 3.satır) gerçekleştirilir. Bu sorguda, eğer optimum  $f(x)$  değerine ulaşılır ise optimum Drone-BS tespit edilir, aksi durumda  $NMaxGrid$  değişkeni  $Update\_Fx\_Tol$  sabiti kadar kümülatif olarak güncellenerek (Algoritma 3, 10.satır) bu değişkenin kısmi aralık sorgulamasındaki yeni değeri tanımlanır.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu bölümde, EOFSA-EML ve DOFSA-EML algoritmaları ile Pure-WOA'nın benzetimleri geliştirilen Algoritma 1 ile

---

**ALGORİTMA 2.** [ $OptDroneBS, CumulativeTol$ ] = EOFSA\_EML.OptDroneBSDetermine( $BestFxOrderDroneBS, OptDroneBS, Update\_Fx\_Tol, NMaxGrid, CumulativeTol$ )

---

```

1 : for i = 1 to length(BestFxOrderDroneBS) do
2 :   if BestFxOrderDroneBS(i).fitness ≠ 0 then
3 :     if BestFxOrderDroneBS(i).fitness ≤ NMaxGrid AND BestFxOrderDroneBS(i).fitness ≥ (NMaxGrid - CumulativeTol) then
4 :       OptDroneBS = BestFxOrderDroneBS(i).index
5 :       break
6 :     end if
7 :   end if
8 : end for
9 : if i = length(BestFxOrderDroneBS) then
10 :  CumulativeTol = CumulativeTol + Update_Fx_Tol
11 : end if
12 : return (OptDroneBS, CumulativeTol)

```

---

**Şekil 6.** EOFSA-EML tarafından optimum Drone-BS tespitinin taslak kodu  
(The draft code of optimum Drone-BS detection by the EOFSA-EML)

---

**ALGORİTMA 3.** [ $OptDroneBS, NMaxGrid$ ] = DOFSA\_EML.OptDroneBSDetermine ( $BestFxOrderDroneBS, OptDroneBS, Update\_Fx\_Tol, NMaxGrid$ )

---

```

1 : for i = 1 to length(BestFxOrderDroneBS) do
2 :   if BestFxOrderDroneBS(i).fitness ≠ 0 then
3 :     if BestFxOrderDroneBS(i).fitness ≤ NMaxGrid AND BestFxOrderDroneBS(i).fitness ≥ (NMaxGrid - Update_Fx_Tol) then
4 :       OptDroneBS = BestFxOrderDroneBS(i).index
5 :       break
6 :     end if
7 :   end if
8 : end for
9 : if i = length(BestFxOrderDroneBS) then
10 :  NMaxGrid = NMaxGrid - Update_Fx_Tol
11 : end if
12 : return (OptDroneBS, NMaxGrid)

```

---

**Şekil 7.** DOFSA-EML tarafından optimum Drone-BS tespitinin taslak kodu  
(The draft code of optimum Drone-BS detection by the DOFSA-EML)

Algoritma 3 arasındaki taslak kodlar esas alınarak MATLAB® R2015a ortamında uygulanmış ve ulaşılan sonuçlar analiz edilmiştir.

5.1. Senaryoların Tanımı (Scenarios Definition)

Bu çalışmada, 2D düzlemindeki UEs’lerin düzenli dağılımları tanımlanan iki senaryo esas alınarak yapılmıştır. Tanımlanan kentsel ortamdaki alan 1 km<sup>2</sup> olmak üzere; Senaryo1 için 20 metre mesafe aralıklarında ve toplam 2601 adet UE’nin tüm alana dağılımı yapılırken, Senaryo2 için ise 25 metre mesafe aralıklarında ve toplam 1681 adet UE’nin tüm alana dağılımı yapılmıştır. Senaryolardaki her bir UE’nin zemin yüksekliği 1,5 metre olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan iki farklı senaryonun amacı; farklı mesafelere göre yerleştirilen UEs’lerin toplam sayılarının da farklı olması sayesinde benzetim sonuçlarının nasıl etkileneceğini göstermektir. Tablo 1’de tanımlanan parametreler esas alınarak bağımsız 10 Monte-Carlo benzetim çalışması yapılmıştır. Tanımlanan benzetimlerde; Senaryolara göre dağılımları yapılan tüm UEs’lerin optimum olarak kapsanması amacıyla dağıtımı yapılacak Drone-BS sayısı 13 adet olarak belirlenmiştir. Benzetimi yapılacak kentsel ortam için belirleyici olan *nLoS*, *nNLoS*, *a*, *b* katsayıları ile *c* (ışık hızı) ve *f* (sinyal frekansı) parametreleri [10, 21-22]’teki çalışmalara göre tanımlanmıştır. Drone-BS’lerin başlangıç

rastgele dağılımlarının ve dinamik dağıtımlarının yapıldığı kentsel ortamdaki ilgili alanın 3D düzleminin (*x*, *y*, *z*) koordinatları (1000, 1000, 300) olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla Drone-BS’lerin dağıtım alanındaki irtifa aralığı da zeminden maksimum 300 metre olarak sınırlandırılmıştır. Senaryolarda Drone-BS’ler için *R<sub>max</sub>*=200 metre olarak tanımlanmakta ve Şekil 4’te gösterildiği üzere; bu *R<sub>max</sub>* değerinde Drone-BS’lerin maksimum sayıda UE’yi kapsayabilmesi için *h<sub>opt</sub>*=142 metre olarak hesaplanmaktadır.

2D düzlemindeki *P* noktalarında düzgün dağılımı yapılan UEs’ler arası mesafelere göre alandaki toplam UE sayısı  $(x/R_{UE} + 1) \times (y/R_{UE} + 1)$  eşitliğine göre modellenebilir. Bu eşitlikte, +1 sabiti sadece 2D düzlemindeki (0,0) başlangıç noktasından geçen *x* ve *y* eksenlerindeki düzlem sayısını tanımlar.

5.2. Uygunluk Fonksiyonu Varyasyonu (Variation in Fitness Function)

Bu çalışmada, ilk karşılaştırma metriği olarak *f(x)* değerlerinin varyasyonu incelenmiştir. Dinamik dağıtımı yapılan her bir Drone-BS için karşılaştırılan algoritmalar tarafından benzetimlerdeki *f(x)* ortalamaların kümülatif toplamları hesaplanarak Tablo 2 ve Tablo 3’de sunulmuştur. Senaryo1 ve Senaryo2’ye göre dağıtılan her bir Drone-BS

**Tablo 1.** Senaryo parametreleri (Scenario Parameters)

Parametreler	Senaryo1	Senaryo2
<i>nLoS</i> ve <i>nNLoS</i>	1 ve 20	1 ve 20
<i>a</i> ve <i>b</i>	9,61 ve 0,16	9,61 ve 0,16
<i>c</i> (m/s)	3×10 <sup>8</sup>	3×10 <sup>8</sup>
<i>f</i> (GHz)	2	2
<i>R<sub>max</sub></i> (metre)	200	200
<i>h<sub>opt</sub></i> (metre)	142	142
<i>h<sub>UE</sub></i> (metre)	1,5	1,5
( <i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i> ) metre	(1000, 1000, 300)	(1000, 1000, 300)
<i>R<sub>UE</sub></i> (metre)	20	25
<i>N<sub>UE</sub></i> (adet)	2601	1681
<i>N<sub>DroneBS</sub></i> (adet)	13	13
<i>N<sub>simulation</sub></i>	10	10

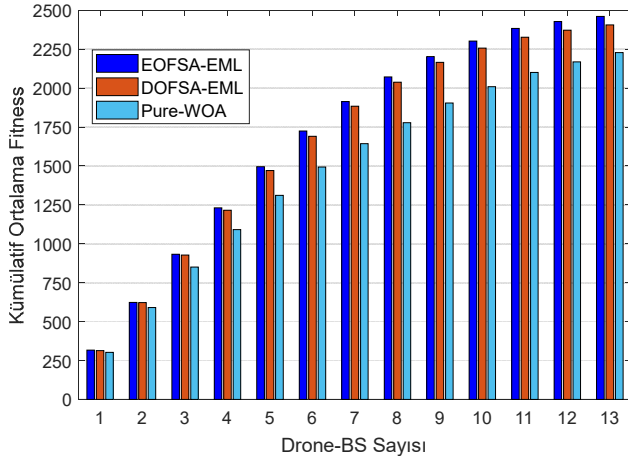
**Tablo 2.** Senaryo1’e göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde hesaplanan *f(x)* ortalamasının kümülatif toplamı (The cumulative sum of *f(x)* average calculated in simulations for each deployed Drone-BS according to Scenario1)

Karşılaştırılan Algoritmalar	Dağıtılan Drone-BS sayıları												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
EOFSA-EML	316	622	931	1231	1494	1723	1913	2072	2201	2302	2382	2428	2461
DOFSA-EML	312	622	927	1214	1469	1690	1883	2038	2165	2256	2326	2372	2405
Pure-WOA	302	589	850	1091	1311	1492	1643	1778	1904	2008	2100	2168	2227

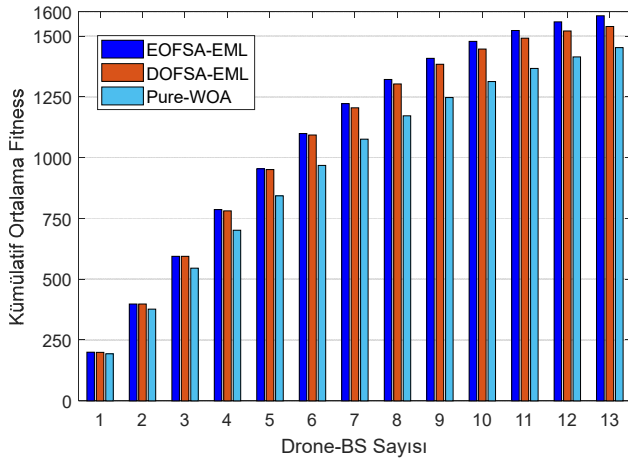
**Tablo 3.** Senaryo2’ye göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde hesaplanan *f(x)* ortalamasının kümülatif toplamı (The cumulative sum of *f(x)* average calculated in simulations for each deployed Drone-BS according to Scenario2)

Karşılaştırılan Algoritmalar	Dağıtılan Drone-BS sayıları												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
EOFSA-EML	200	398	594	786	954	1099	1222	1321	1408	1478	1523	1558	1583
DOFSA-EML	199	397	594	781	951	1093	1205	1303	1384	1446	1491	1520	1539
Pure-WOA	193	377	545	701	843	968	1076	1171	1247	1313	1367	1414	1452

için hesaplanan  $f(x)$  ortalamalarının kümülatif toplamı esas alınarak Şekil 8 ve Şekil 9'daki grafikler belirlenmiştir.



**Şekil 8.** Senaryo1'e göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde hesaplanan  $f(x)$  ortalamasının kümülatif toplam varyasyon grafiği (Cumulative total variation graph of  $f(x)$  average calculated in simulations for each deployed Drone-BS according to Scenario1)

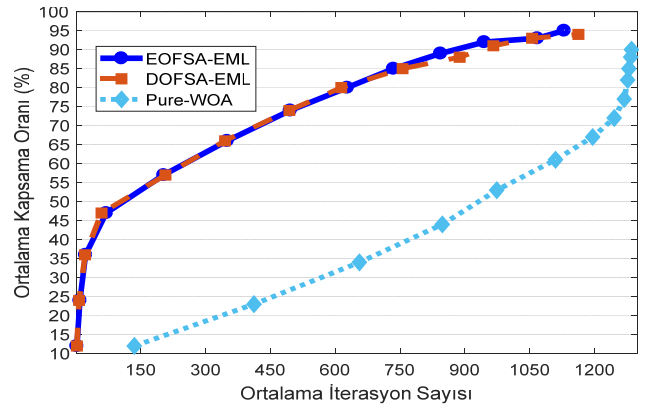


**Şekil 9.** Senaryo2'ye göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde hesaplanan  $f(x)$  ortalamasının kümülatif toplam varyasyon grafiği (Cumulative total variation graph of  $f(x)$  average calculated in simulations for each deployed Drone-BS according to Scenario2)

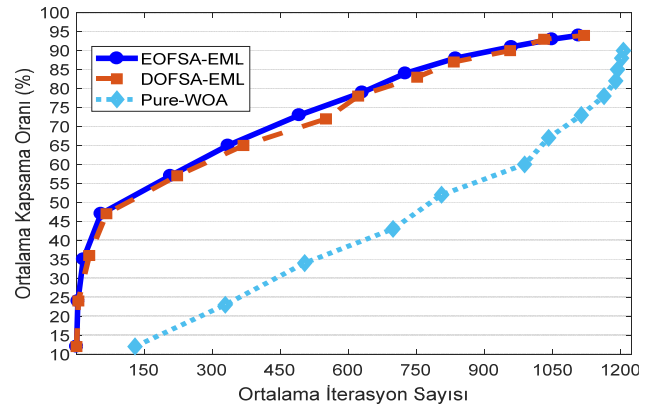
Senaryo1'de dağıtılan ilk (birinci) Drone-BS'in ulaşacağı optimum  $f(x)$  değeri (maksimum kapsanan UE sayısı) 318, Senaryo2'de ise 208'dir. Bu değerler esas alındığında, Tablo 2, Tablo 3'de EOFSA-EML tarafından birinci Drone-BS için hesaplanan ortalama  $f(x)$  değerlerinin optimum  $f(x)$  değerlerine daha çok yakınsadığı tespit edilmiştir. Dağıtılan Drone-BS'lerin çakışması durumunda, bu Drone-BS'lerin kapsadığı UEs'ler için  $f(x)$  güncellemesinin yapılmadığı dikkate alınarak algoritmalar tarafından 2-13 aralığında dağıtılan her Drone-BS için hesaplanan  $f(x)$ 'in optimum  $f(x)$  değerine eşit olmadığı görülür. Dolayısıyla bu metrik karşılaştırmasında, her iki senaryo için optimum  $f(x)$ 'e en çok yakınsayan EOFSA-EML'nin diğer algoritmalara göre Drone-BS'leri optimum olarak yerleştirdiği tespit edilmiştir.

### 5.3. Kapsanma Oranının Varyasyonu (Variation of Coverage Ratio)

Bu çalışmada, ikinci karşılaştırma metriği olarak dağıtılan çoklu Drone-BS'ler tarafından ilgili alanın kapsanma oranının varyasyonu incelenmiştir. Dağıtılan Drone-BS'lerin her birisinin optimum konuma yerleştiği ortalama iterasyon sayıları ve alanın ortalama kapsanma oranları hesaplanarak Tablo 4 ve Tablo 5'de sunulmuştur. Tablo 4 ve Tablo 5'deki sonuçlar esas alınarak Şekil 10 ve Şekil 11'deki grafikler belirlenmiştir. Senaryo1 ve Senaryo2'ye göre EOFSA-EML'nin benzetimlerdeki çoğu Drone-BS dağıtımında daha düşük iterasyonlar ile optimum konuma ulaştığı ve DOFSA-EML tarafından her bir Drone-BS optimum konuma yerleştirildiğinde, alandaki ortalama kapsanma oranının EOFSA-EML'ye çok yakınsadığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu metrik ölçümünde Pure-WOA'ya göre EML tabanlı geliştirilen algoritmalar tarafından daha optimum sonuçlara ulaşılmıştır.



**Şekil 10.** Senaryo1'e göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde hesaplanan ortalama iterasyon sayılarına karşın alanın ortalama kapsanma oranlarının varyasyon grafiği (Variation graph of the average coverage rates of the area versus the average number of iterations calculated in simulations for each deployed Drone-BS according to Scenario1)



**Şekil 11.** Senaryo2'ye göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde hesaplanan ortalama iterasyon sayılarına karşın alanın ortalama kapsanma oranlarının varyasyon grafiği (Variation graph of the average coverage rates of the area versus the average number of iterations calculated in simulations for each deployed Drone-BS according to Scenario2)

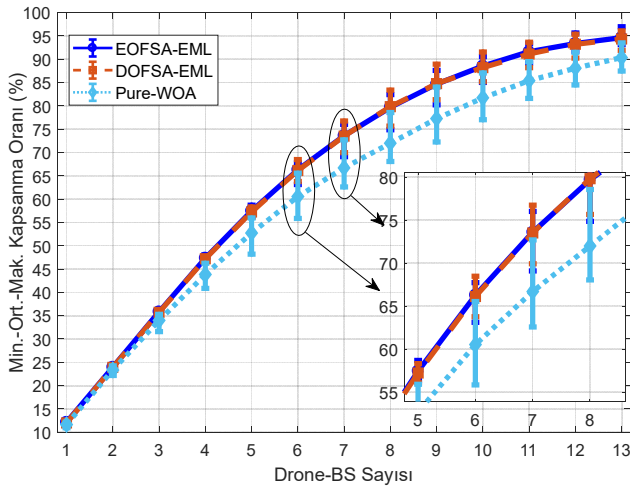
**Tablo 4.** Senaryo1'e göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde hesaplanan ortalama iterasyon sayısı<sup>(1)</sup> ve alanın ortalama kapsanma oranı<sup>(2)</sup> (The average number<sup>(1)</sup> of iterations calculated in simulations and average coverage rate<sup>(2)</sup> of the area for each deployed Drone-BS according to Scenario1)

Karşılaştırılan Algoritmalar	Dağıtılan Drone-BS sayıları												
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
EOFSA-EML	9 <sup>(1)</sup>	22 <sup>(1)</sup>	70 <sup>(1)</sup>	203 <sup>(1)</sup>	350 <sup>(1)</sup>	496 <sup>(1)</sup>	628 <sup>(1)</sup>	735 <sup>(1)</sup>	844 <sup>(1)</sup>	945 <sup>(1)</sup>	1068 <sup>(1)</sup>	1130 <sup>(1)</sup>	
	24 <sup>(2)</sup>	36 <sup>(2)</sup>	47 <sup>(2)</sup>	57 <sup>(2)</sup>	66 <sup>(2)</sup>	74 <sup>(2)</sup>	80 <sup>(2)</sup>	85 <sup>(2)</sup>	89 <sup>(2)</sup>	92 <sup>(2)</sup>	93 <sup>(2)</sup>	95 <sup>(2)</sup>	
DOFSA-EML	7 <sup>(1)</sup>	21 <sup>(1)</sup>	59 <sup>(1)</sup>	207 <sup>(1)</sup>	345 <sup>(1)</sup>	494 <sup>(1)</sup>	614 <sup>(1)</sup>	756 <sup>(1)</sup>	888 <sup>(1)</sup>	966 <sup>(1)</sup>	1056 <sup>(1)</sup>	1163 <sup>(1)</sup>	
	24 <sup>(2)</sup>	36 <sup>(2)</sup>	47 <sup>(2)</sup>	57 <sup>(2)</sup>	66 <sup>(2)</sup>	73 <sup>(2)</sup>	80 <sup>(2)</sup>	85 <sup>(2)</sup>	88 <sup>(2)</sup>	91 <sup>(2)</sup>	93 <sup>(2)</sup>	94 <sup>(2)</sup>	
Pure-WOA	412 <sup>(1)</sup>	656 <sup>(1)</sup>	848 <sup>(1)</sup>	974 <sup>(1)</sup>	1110 <sup>(1)</sup>	1196 <sup>(1)</sup>	1246 <sup>(1)</sup>	1269 <sup>(1)</sup>	1277 <sup>(1)</sup>	1280 <sup>(1)</sup>	1284 <sup>(1)</sup>	1286 <sup>(1)</sup>	
	23 <sup>(2)</sup>	33 <sup>(2)</sup>	44 <sup>(2)</sup>	53 <sup>(2)</sup>	61 <sup>(2)</sup>	67 <sup>(2)</sup>	72 <sup>(2)</sup>	77 <sup>(2)</sup>	82 <sup>(2)</sup>	85 <sup>(2)</sup>	88 <sup>(2)</sup>	90 <sup>(2)</sup>	

**Tablo 5.** Senaryo2'ye göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde hesaplanan ortalama iterasyon sayısı<sup>(1)</sup> ve alanın ortalama kapsanma oranı<sup>(2)</sup> (The average number<sup>(1)</sup> of iterations calculated in simulations and average coverage rate<sup>(2)</sup> of the area for each deployed Drone-BS according to Scenario2)

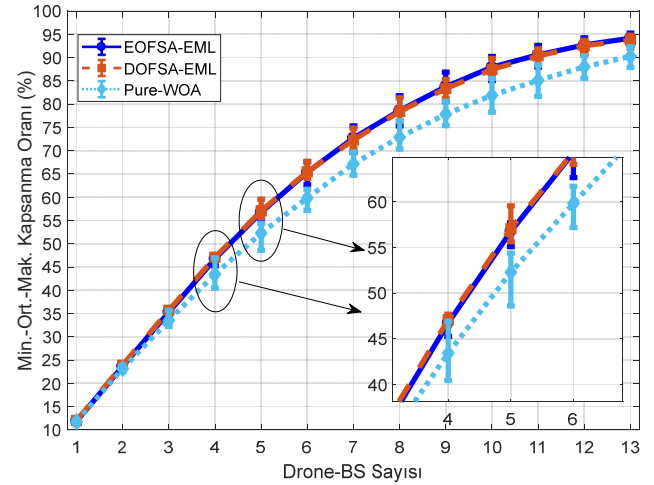
Karşılaştırılan Algoritmalar	Dağıtılan Drone-BS sayıları												
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
EOFSA-EML	4 <sup>(1)</sup>	16 <sup>(1)</sup>	55 <sup>(1)</sup>	208 <sup>(1)</sup>	335 <sup>(1)</sup>	492 <sup>(1)</sup>	631 <sup>(1)</sup>	726 <sup>(1)</sup>	837 <sup>(1)</sup>	960 <sup>(1)</sup>	1049 <sup>(1)</sup>	1108 <sup>(1)</sup>	
	24 <sup>(2)</sup>	35 <sup>(2)</sup>	47 <sup>(2)</sup>	57 <sup>(2)</sup>	65 <sup>(2)</sup>	73 <sup>(2)</sup>	79 <sup>(2)</sup>	84 <sup>(2)</sup>	88 <sup>(2)</sup>	91 <sup>(2)</sup>	93 <sup>(2)</sup>	94 <sup>(2)</sup>	
DOFSA-EML	5 <sup>(1)</sup>	29 <sup>(1)</sup>	67 <sup>(1)</sup>	223 <sup>(1)</sup>	369 <sup>(1)</sup>	551 <sup>(1)</sup>	622 <sup>(1)</sup>	752 <sup>(1)</sup>	833 <sup>(1)</sup>	957 <sup>(1)</sup>	1032 <sup>(1)</sup>	1120 <sup>(1)</sup>	
	24 <sup>(2)</sup>	36 <sup>(2)</sup>	47 <sup>(2)</sup>	57 <sup>(2)</sup>	65 <sup>(2)</sup>	72 <sup>(2)</sup>	78 <sup>(2)</sup>	83 <sup>(2)</sup>	87 <sup>(2)</sup>	90 <sup>(2)</sup>	93 <sup>(2)</sup>	94 <sup>(2)</sup>	
Pure-WOA	329 <sup>(1)</sup>	504 <sup>(1)</sup>	699 <sup>(1)</sup>	806 <sup>(1)</sup>	989 <sup>(1)</sup>	1042 <sup>(1)</sup>	1114 <sup>(1)</sup>	1164 <sup>(1)</sup>	1190 <sup>(1)</sup>	1194 <sup>(1)</sup>	1203 <sup>(1)</sup>	1207 <sup>(1)</sup>	
	23 <sup>(2)</sup>	34 <sup>(2)</sup>	43 <sup>(2)</sup>	52 <sup>(2)</sup>	60 <sup>(2)</sup>	67 <sup>(2)</sup>	73 <sup>(2)</sup>	78 <sup>(2)</sup>	82 <sup>(2)</sup>	85 <sup>(2)</sup>	88 <sup>(2)</sup>	90 <sup>(2)</sup>	

Senaryolara göre dağıtılan her bir Drone-BS sayısı için hesaplanan minimum, ortalama ve maksimum kapsama oranlarının varyasyon grafiği Şekil 12 ve Şekil 13'te gösterilmiştir. Bu grafiklerde minimum ve maksimum kapsanma oranı değişimleri dikkate alındığında, algoritmalar tarafından ulaşılan ortalama kapsanma oranlarının varyasyonu (standart sapması)'da gösterilmektedir.

**Şekil 12.** Senaryo1'e göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde alanın minimum, ortalama ve maksimum kapsanma oranlarının varyasyon grafiği (Variation graph of the minimum, average and maximum coverage rates of the area in simulations for each deployed Drone-BS according to Scenario1)

Her bir Drone-BS'in dağıtımında EML tabanlı algoritmalar tarafından alanın ortalama kapsanma oranlarının ve standart sapmasının Pure-WOA'ya göre daha optimum olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca EOFSA-EML tarafından hesaplanan standart sapmanın bazı Drone-BS dağıtımlarında

DOFSA-EML'ye göre daha minimum olduğu ve böylece EOFSA-EML'nin diğer algoritmalarla göre daha kararlı bir şekilde Drone-BS'lerin dağıtımlarını gerçekleştirdiği sonucuna da ulaşılmıştır.

**Şekil 13.** Senaryo2'ye göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde alanın minimum, ortalama ve maksimum kapsanma oranlarının varyasyon grafiği (Variation graph of the minimum, average and maximum coverage rates of the area in simulations for each deployed Drone-BS according to Scenario2)

#### 5.4. Drone-BS İrtifa Varyasyonu (Drone-BS Altitude Variation)

Bu çalışmada, üçüncü karşılaştırma metriği olarak dağıtılan çoklu Drone-BS'lerin ilgili 3D alanında yerleştirildikleri konumların irtifa varyasyonları incelenmiştir. Her bir Drone-BS'in dağıtımları sonrasında sırasıyla maksimum, minimum ve ortalama irtifalar hesaplanarak Tablo 6 ve Tablo 7'de sunulmuştur ve bu sonuçlara göre irtifaların varyasyon

grafikleri Şekil 14 ve Şekil 15’de gösterilmiştir. Bu metrikte, algoritmalar tarafından hesaplanan ortalama irtifa varyasyonları (standart sapması)’nın yüksek olması her bir benzetimde Drone-BS’lerin Optimum İrtifa’ya uzak olan irtifalarda konumlandığını gösterir. Senaryolara göre algoritmalar tarafından her bir Drone-BS için hesaplanan minimum ve maksimum irtifa değerleri ile ortalama irtifaların standart sapması dikkate alındığında, EML tabanlı geliştirilen algoritmaların çoklu Drone-BS’leri daha kararlı bir şekilde dağıttığı ve böylece ortalama irtifa eğrisinin Optimum İrtifa eğrisine daha çok yakınsadığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; EOFSA-EML ve DOFSA-EML tarafından yerleştirilen her bir Drone-BS’in irtifa varyasyonları Pure-WOA’ya göre daima daha minimumdur. Ayrıca Pure-

WOA’ya göre EML tabanlı algoritmalar tarafından ilgili 3D alanının ortalama kapsama oranının optimum olarak hesaplanması (Tablo 4 ve Tablo 5), bu metrikte hesaplanan ortalama irtifa standart sapmasının da daha minimum olduğunu teyit etmektedir.

### 5.5. Drone-BS’lerin 2D Kapsaması (2D Coverage of Drone-BS)

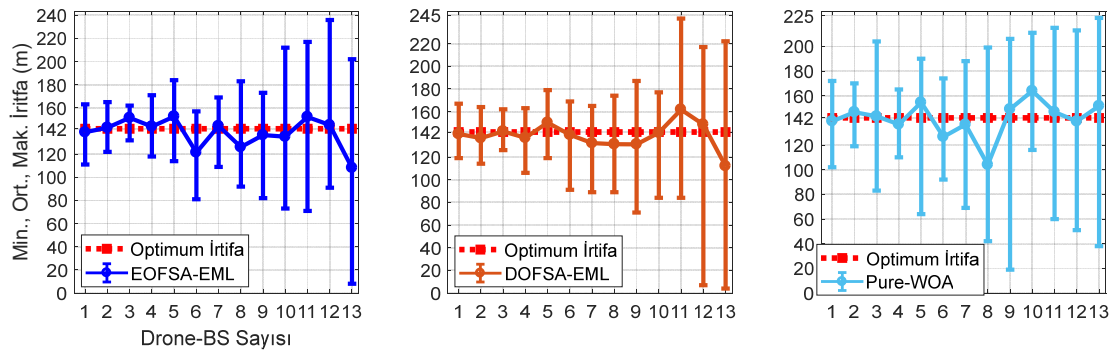
Bu çalışmada, son metrik olarak ilgili alanda optimum kapsama oranına ulaşılan benzetim için çoklu Drone-BS’lerin 2D kapsama alanları grafiksel olarak Şekil 16 ve Şekil 17’de gösterilmiştir. Senaryolara göre EOFSA-EML, DOFSA-EML ve Pure-WOA tarafından yapılan dağıtımlarda optimum benzetim için tanımlanan sayıda (3, 6, 10, 13) gösterilen Drone-BS’lerin yerleştikleri konumlar esas alınarak kapsanan ve kapsanmayan UE’ler 2D

**Tablo 6.** Senaryo1’e göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde hesaplanan maksimum<sup>(1)</sup>, minimum<sup>(2)</sup> ve ortalama<sup>(3)</sup> irtifalar (Maximum<sup>(1)</sup>, minimum<sup>(2)</sup>, and average<sup>(3)</sup> altitudes calculated in simulations for each deployed Drone-BS according to Scenario1)

Algoritmalar	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
EOFSA-EML	165 <sup>(1)</sup> 122 <sup>(2)</sup> 143 <sup>(3)</sup>	162 <sup>(1)</sup> 132 <sup>(2)</sup> 151 <sup>(3)</sup>	171 <sup>(1)</sup> 118 <sup>(2)</sup> 144 <sup>(3)</sup>	184 <sup>(1)</sup> 114 <sup>(2)</sup> 153 <sup>(3)</sup>	157 <sup>(1)</sup> 81 <sup>(2)</sup> 121 <sup>(3)</sup>	169 <sup>(1)</sup> 109 <sup>(2)</sup> 144 <sup>(3)</sup>	183 <sup>(1)</sup> 92 <sup>(2)</sup> 126 <sup>(3)</sup>	173 <sup>(1)</sup> 82 <sup>(2)</sup> 136 <sup>(3)</sup>	212 <sup>(1)</sup> 73 <sup>(2)</sup> 135 <sup>(3)</sup>	217 <sup>(1)</sup> 71 <sup>(2)</sup> 152 <sup>(3)</sup>	236 <sup>(1)</sup> 91 <sup>(2)</sup> 145 <sup>(3)</sup>	202 <sup>(1)</sup> 8 <sup>(2)</sup> 108 <sup>(3)</sup>
DOFSA-EML	164 <sup>(1)</sup> 114 <sup>(2)</sup> 137 <sup>(3)</sup>	162 <sup>(1)</sup> 126 <sup>(2)</sup> 143 <sup>(3)</sup>	163 <sup>(1)</sup> 106 <sup>(2)</sup> 137 <sup>(3)</sup>	179 <sup>(1)</sup> 119 <sup>(2)</sup> 150 <sup>(3)</sup>	169 <sup>(1)</sup> 91 <sup>(2)</sup> 140 <sup>(3)</sup>	165 <sup>(1)</sup> 89 <sup>(2)</sup> 132 <sup>(3)</sup>	174 <sup>(1)</sup> 89 <sup>(2)</sup> 131 <sup>(3)</sup>	187 <sup>(1)</sup> 71 <sup>(2)</sup> 131 <sup>(3)</sup>	177 <sup>(1)</sup> 84 <sup>(2)</sup> 141 <sup>(3)</sup>	242 <sup>(1)</sup> 84 <sup>(2)</sup> 162 <sup>(3)</sup>	217 <sup>(1)</sup> 7 <sup>(2)</sup> 149 <sup>(3)</sup>	222 <sup>(1)</sup> 4 <sup>(2)</sup> 112 <sup>(3)</sup>
Pure-WOA	170 <sup>(1)</sup> 119 <sup>(2)</sup> 147 <sup>(3)</sup>	204 <sup>(1)</sup> 83 <sup>(2)</sup> 143 <sup>(3)</sup>	165 <sup>(1)</sup> 110 <sup>(2)</sup> 137 <sup>(3)</sup>	190 <sup>(1)</sup> 64 <sup>(2)</sup> 154 <sup>(3)</sup>	174 <sup>(1)</sup> 92 <sup>(2)</sup> 126 <sup>(3)</sup>	188 <sup>(1)</sup> 69 <sup>(2)</sup> 137 <sup>(3)</sup>	199 <sup>(1)</sup> 42 <sup>(2)</sup> 104 <sup>(3)</sup>	206 <sup>(1)</sup> 19 <sup>(2)</sup> 149 <sup>(3)</sup>	211 <sup>(1)</sup> 116 <sup>(2)</sup> 164 <sup>(3)</sup>	215 <sup>(1)</sup> 60 <sup>(2)</sup> 147 <sup>(3)</sup>	213 <sup>(1)</sup> 51 <sup>(2)</sup> 139 <sup>(3)</sup>	223 <sup>(1)</sup> 38 <sup>(2)</sup> 152 <sup>(3)</sup>

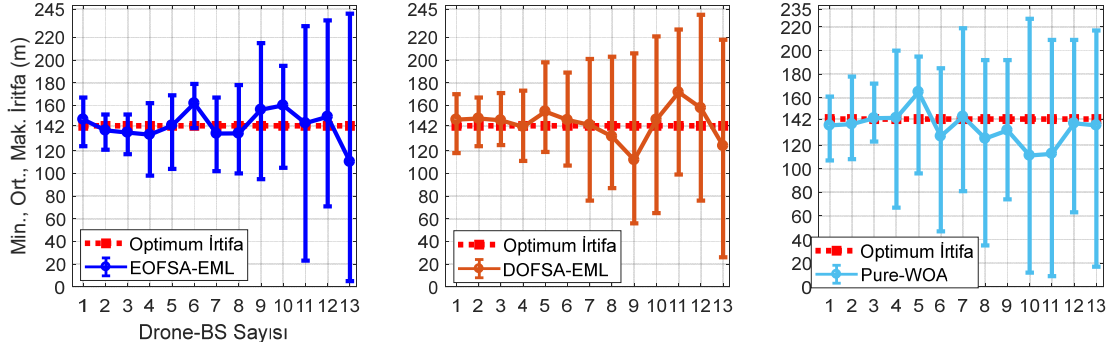
**Tablo 7.** Senaryo2’ye göre dağıtılan her bir Drone-BS için benzetimlerde hesaplanan maksimum<sup>(1)</sup>, minimum<sup>(2)</sup> ve ortalama<sup>(3)</sup> irtifalar (Maximum<sup>(1)</sup>, minimum<sup>(2)</sup>, and average<sup>(3)</sup> altitudes calculated in simulations for each deployed Drone-BS according to Scenario2)

Algoritmalar	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
EOFSA-EML	152 <sup>(1)</sup> 121 <sup>(2)</sup> 138 <sup>(3)</sup>	152 <sup>(1)</sup> 117 <sup>(2)</sup> 136 <sup>(3)</sup>	162 <sup>(1)</sup> 98 <sup>(2)</sup> 134 <sup>(3)</sup>	169 <sup>(1)</sup> 104 <sup>(2)</sup> 142 <sup>(3)</sup>	179 <sup>(1)</sup> 140 <sup>(2)</sup> 162 <sup>(3)</sup>	167 <sup>(1)</sup> 102 <sup>(2)</sup> 135 <sup>(3)</sup>	178 <sup>(1)</sup> 100 <sup>(2)</sup> 135 <sup>(3)</sup>	215 <sup>(1)</sup> 95 <sup>(2)</sup> 156 <sup>(3)</sup>	195 <sup>(1)</sup> 105 <sup>(2)</sup> 160 <sup>(3)</sup>	230 <sup>(1)</sup> 23 <sup>(2)</sup> 144 <sup>(3)</sup>	235 <sup>(1)</sup> 71 <sup>(2)</sup> 150 <sup>(3)</sup>	241 <sup>(1)</sup> 5 <sup>(2)</sup> 110 <sup>(3)</sup>
DOFSA-EML	167 <sup>(1)</sup> 124 <sup>(2)</sup> 148 <sup>(3)</sup>	171 <sup>(1)</sup> 125 <sup>(2)</sup> 147 <sup>(3)</sup>	173 <sup>(1)</sup> 111 <sup>(2)</sup> 141 <sup>(3)</sup>	198 <sup>(1)</sup> 119 <sup>(2)</sup> 155 <sup>(3)</sup>	189 <sup>(1)</sup> 107 <sup>(2)</sup> 147 <sup>(3)</sup>	201 <sup>(1)</sup> 76 <sup>(2)</sup> 143 <sup>(3)</sup>	203 <sup>(1)</sup> 87 <sup>(2)</sup> 133 <sup>(3)</sup>	206 <sup>(1)</sup> 56 <sup>(2)</sup> 112 <sup>(3)</sup>	221 <sup>(1)</sup> 65 <sup>(2)</sup> 147 <sup>(3)</sup>	227 <sup>(1)</sup> 99 <sup>(2)</sup> 172 <sup>(3)</sup>	240 <sup>(1)</sup> 76 <sup>(2)</sup> 158 <sup>(3)</sup>	218 <sup>(1)</sup> 26 <sup>(2)</sup> 124 <sup>(3)</sup>
Pure-WOA	178 <sup>(1)</sup> 108 <sup>(2)</sup> 138 <sup>(3)</sup>	172 <sup>(1)</sup> 123 <sup>(2)</sup> 143 <sup>(3)</sup>	200 <sup>(1)</sup> 67 <sup>(2)</sup> 143 <sup>(3)</sup>	195 <sup>(1)</sup> 96 <sup>(2)</sup> 165 <sup>(3)</sup>	185 <sup>(1)</sup> 47 <sup>(2)</sup> 127 <sup>(3)</sup>	219 <sup>(1)</sup> 81 <sup>(2)</sup> 144 <sup>(3)</sup>	192 <sup>(1)</sup> 35 <sup>(2)</sup> 125 <sup>(3)</sup>	192 <sup>(1)</sup> 74 <sup>(2)</sup> 132 <sup>(3)</sup>	227 <sup>(1)</sup> 12 <sup>(2)</sup> 111 <sup>(3)</sup>	209 <sup>(1)</sup> 9 <sup>(2)</sup> 113 <sup>(3)</sup>	209 <sup>(1)</sup> 63 <sup>(2)</sup> 138 <sup>(3)</sup>	217 <sup>(1)</sup> 17 <sup>(2)</sup> 137 <sup>(3)</sup>

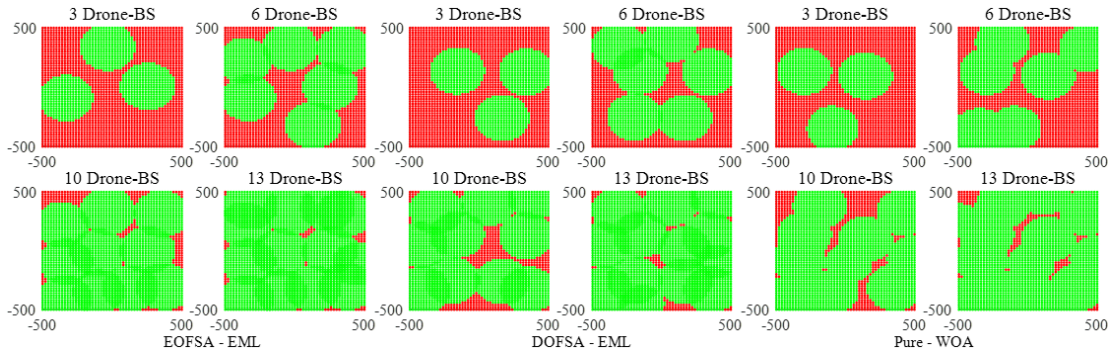


**Şekil 14.** Senaryo1’e göre dağıtılan her bir Drone-BS için 3D alanının minimum, ortalama ve maksimum irtifa varyasyon grafiği (Minimum, average, and maximum altitude variation graph of the 3D area for each deployed Drone-BS according to Scenario1)

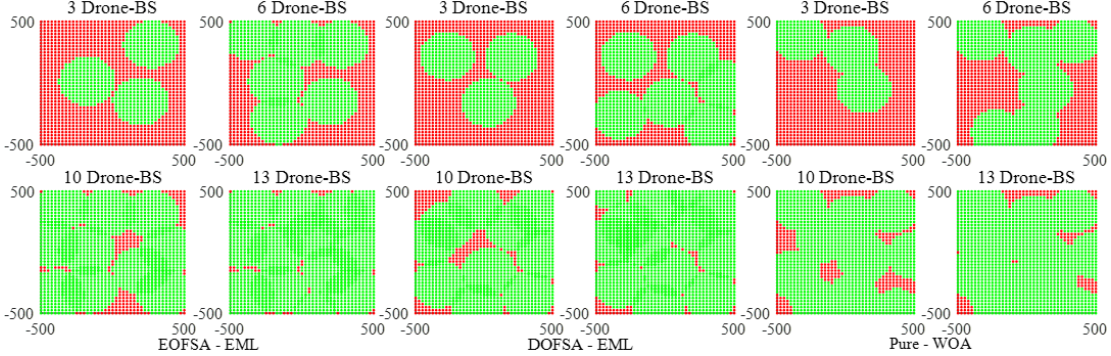




Şekil 15. Senaryo2'ye göre dağıtılan her bir Drone-BS için 3D alanının minimum, ortalama ve maksimum irtifa varyasyon grafiği (Minimum, average, and maximum altitude variation graph of the 3D area for each deployed Drone-BS according to Scenario2)



Şekil 16. Senaryo1'e göre dağıtılan 3, 6, 10 ve 13 Drone-BS'lerin 2D düzlemindeki kapsama alanı grafikleri (Coverage area graphics in the 2D plane of 3, 6, 10, and 13 Drone-BSs deployed according to Scenario1)



Şekil 17. Senaryo2'ye göre dağıtılan 3, 6, 10 ve 13 Drone-BS'lerin 2D düzlemindeki kapsama alanı grafikleri (Coverage area graphics in the 2D plane of 3, 6, 10, and 13 Drone-BSs deployed according to Scenario2)

düzleminde grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 17'de zemindeki UE'ler arası mesafe 25 metre olduğu dikkate alındığında, 2D düzlemindeki  $P$  noktalarının görünümünün Şekil 16'dakine göre daha seyrek olduğu görülmektedir. Grafiklerde Drone-BS'lerin kapsadığı ve kapsamadığı UE'ler sırasıyla, yeşil ve kırmızı renkli noktalar ile temsil edilmiştir. Drone-BS'lerin 2D düzleminde yerleştikleri koordinatlar dikkate alındığında, zemindeki UE'ler için oluşturulan kapsama izdüşümlerinin dairesel oldukları görülmektedir. Ayrıca dağıtılan Drone-BS sayısı arttıkça EML tabanlı geliştirilen algoritmalar tarafından yerleştirilen Drone-BS'lerin çakışması (kapsanan dairesel alanlar) minimize edilerek daha fazla sayıda UE'lerin kapsanması sağlanmıştır. Her iki senaryoya göre toplam 13 Drone-

BS'nin yerleştirdiği grafikler dikkate alındığında, EOLFSA-EML ve DOFSA-EML'ye karşı Pure-WOA tarafından kapsanmayan UE'lerin sayısının daha fazla olduğu görülmektedir. Dolayısıyla EML tabanlı algoritmalar tarafından daha fazla sayıda UE'lerin kapsandığı grafikler ile teyit edilmiştir.

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede, çoklu Drone-BS'lerin 3D düzlemindeki yerleşimleri NP-hard problemi olarak çalışılmıştır. Tanımlanan iki senaryoya göre kentsel ortamdaki ilgili alanda minimum sayıda Drone-BS ile tüm UE'lerin maksimum sayıda kapsanması amacıyla geliştirilen EOLFSA-

EML ve DOFSA-EML algoritmaları ile Pure-WOA kullanılarak dağıtılan Drone-BS'lerin konum optimizasyonu yapılmıştır. Algoritmaların performans karşılaştırmaları için Monte-Carlo benzetimlerinde ölçüt olarak; (i) hesaplanan  $f(x)$  varyasyonları, (ii) kapsama oranı varyasyonları, (iii) irtifa varyasyonları ve (iv) 2D düzleminde Drone-BSs'lerin yerleşimleri incelenmiştir. Benzetimlere göre, (i) dağıtılan her bir Drone-BS optimum konuma yerleşirken EOFSA-EML tarafından hesaplanan ortalama  $f(x)$ 'lerin kümülatif toplamları diğer algoritmalara kıyasla daha optimumdur ve böylece EOFSA-EML tarafından her bir Drone-BS'in dağıtımında daha fazla sayıda UEs'lerin kapsanması sağlanır. (ii) Dağıtılan her bir Drone-BS'lerin benzetimlerde optimum konuma yerleştiği ortalama iterasyon sayısına göre hesaplanan ortalama kapsama oranları esas alındığında, EML tabanlı geliştirilen algoritmalar tarafından daha düşük ortalama iterasyon sayılarında daha optimum ortalama kapsama oranlarına ulaşıldığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla EML tabanlı algoritmalar tarafından benzetimlerde her bir Drone-BS'in yerleşimi daha düşük iterasyon sayılarında gerçekleştirilerek daha optimum kapsama oranlarına ulaşılır. Ayrıca benzetimlerde her bir Drone-BS'in dağıtımında ulaşılan minimum – maksimum aralığındaki kapsama oranları dikkate alındığında, EOFSA-EML tarafından çoğu Drone-BS'in dağıtımında hesaplanan kapsama oranı standart sapmasının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Böylece EOFSA-EML ile kapsama oranlarının daha kararlı bir şekilde değiştiği ve Drone-BS'lerin de daha kararlı olarak dağıtıldığı sonucuna ulaşılır. (iii) Dağıtılan her bir Drone-BS için irtifa varyasyonları incelendiğinde, EML tabanlı geliştirilen algoritmalar tarafından Drone-BS'lerin irtifa standart sapmalarının daima daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla EML tabanlı algoritmalar ile Drone-BS'lerin dağıtımında daha kararlı irtifalarda yerleşimler yapılarak her bir Drone-BS'in irtifasının Optimum İrtifa'ya yakınsaması sağlanır. (iv) 2D düzlemindeki alanın kapsama grafikleri incelendiğinde, EML tabanlı algoritmalar tarafından dağıtılan Drone-BS'lerin çıkışması minimize edilerek birden fazla Drone-BS'in aynı UE'yi kapsaması engellenmiştir. Dolayısıyla minimum sayıda Drone-BS'in dağıtımı ile daha fazla sayıda UE'lerin kapsanması sağlanır.

Karşılaştırma ölçütlerinden ulaşılan bu sonuçlar esas alındığında, Pure-WOA'ya kıyasla geliştirilen EML tabanlı algoritmalar tarafından yapılan dinamik dağıtımlarda çoklu Drone-BS'lerin optimum yerleşimlerinin yapıldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak; geliştirilen EOFSA-EML ile DOFSA-EML yaklaşımları ile çoklu Drone-BS'lerin etkin bir şekilde konum optimizasyonlarının yapılabileceği ve literatüre katkı sağlayacağı aşikârdır. Önerilen algoritmanın kentsel ortam haricindeki farklı ortamlarda ve farklı maksimum tarama yarıçap değerleri ile Drone-BS'lerin konum optimizasyonlarının yapılması, planlanan çalışmalar arasındadır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bupe P., Haddad R., Rios-Gutierrez F., Relief and emergency communication network based on an autonomous decentralized UAV clustering network, Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2015, Florida-USA, 1-8, 9-12 April, 2015.
2. Bor-Yaliniz R.I., El-Keyi A., Yanikomeroglu H., Efficient 3-D Placement of an Aerial Base Station in Next Generation Cellular Networks, 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur-Malaysia, 1-5, 23-27 May, 2016.
3. Bor-Yaliniz R.I., Yanikomeroglu H., The New Frontier in RAN Heterogeneity: Multi-Tier Drone-cells, IEEE Commun. Mag., 54 (11), 48–55, 2016.
4. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M., Drone Small Cells in the Clouds: Design, Deployment and Performance Analysis, 2019 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), San Diego-USA, 1-6, 6-10 December, 2015.
5. Hu B., Wang C., Chen S., Wang L., Yang H., Proactive Coverage Area Decisions Based on Data Field for Drone Base Station Deployment, Sensors, 18 (11), 1-14, 2018.
6. Al-Hourani A., Kandeepan S., Jamalipour A., Modeling Air-to-Ground Path Loss for Low Altitude Platforms in Urban Environments, 2014 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Austin-USA, 2898-2904, 8-12 December, 2014.
7. Feng Q., Tameh E.K., Nix A.R., McGeehan J., Modelling the Likelihood of Line-of-Sight for Air-to-Ground Radio Propagation in Urban Environments, 2006 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), San Francisco-USA, 1-5, 27 November-1 December, 2006.
8. Feng Q., McGeehan J., Tameh E.K., Nix A.R., Path Loss Models for Air-to-Ground Radio Channels in Urban Environments, 2006 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Melbourne-Australia, 2901-2905, 7-10 May, 2006.
9. Holis J., Pechac P., Elevation Dependent Shadowing Model for Mobile Communications via High Altitude Platforms in Built-Up Areas, IEEE Trans. Antennas Propag., 56 (4), 1078-1084, 2008.
10. Al-Hourani A., Kandeepan S., Lardner S., Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage, IEEE Wireless Commun. Lett., 3 (6), 569-572, 2014.
11. Kalantari E., Shakir M.Z., Yanikomeroglu H., Yongacoglu A., Backhaul-aware Robust 3D Drone Placement in 5G+ Wireless Networks, 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Paris-France, 109-114, 21-25 May, 2017.
12. Wang L., Hu B., Chen S., Energy Efficient Placement of a Drone Base Station for Minimum Required Transmit Power, IEEE Wireless Commun. Lett., to be published (accepted), 2018.
13. Lyu J., Zeng Y., Zhang R., Lim T.J., Placement Optimization of UAV-Mounted Mobile Base Stations, IEEE Commun. Lett., 21 (3), 604-607, 2017.
14. Dyer M.E., Frieze A.M., The solution of some random NP-hard problems in polynomial expected time, Journal of Algorithms, 10 (4), 451-489, 1989.
15. Gupta L., Jain R., Vaszkun G., Survey of Important Issues in UAV Communication Networks, IEEE Commun. Surv. Tutorials, 18 (2), 1123-1152, 2016.

16. Kandeepan S., Gomez K., Reynaud L., Rasheed T., Aerial-Terrestrial Communications: Terrestrial Cooperation and Energy-Efficient Transmissions to Aerial Base Stations, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 50 (4), 2715-2735, 2014.
17. Rohde S., Putzke M., Wietfeld C., Ad hoc self-healing of OFDMA networks using UAV-based relays, *Ad Hoc Networks*, 11 (7), 1893-1906, 2013.
18. Li X., Guo D., Yin H., Wei G., Drone-Assisted Public Safety Wireless Broadband Network, 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), New Orleans-USA, 323-328, 9-12 March, 2015.
19. Alzenad M., El-Keyi A., Lagum F., Yanikomeroglu H., 3-D Placement of an Unmanned Aerial Vehicle Base Station (UAV-BS) for Energy-Efficient Maximal Coverage, *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 6 (4), 434-437, 2017.
20. Kalantari E., Yanikomeroglu H., Yongacoglu A., On the Number and 3D Placement of Drone Base Stations in Wireless Cellular Networks, 2016 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Montreal-Canada, 1-6, 18-21 September, 2016.
21. Alzenad M., El-Keyi A., Yanikomeroglu H., 3-D Placement of an Unmanned Aerial Vehicle Base Station for Maximum Coverage of Users with Different QoS Requirements, *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 7 (1), 38-41, 2018.
22. Shi W., Li J., Xu W., Zhou H., Zhang N., Shen X., 3D Drone-Cell Deployment Optimization for Drone Assisted Radio Access Networks, 2017 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Qingdao-China, 1-6, 22-24 October, 2017.
23. He X., Yu W., Xu H., Lin J., Yang X., Lu C., Fu X., Towards 3D Deployment of UAV Base Stations in Uneven Terrain, 2018 27th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), Hangzhou-China, 1-9, 30 July-2 August, 2018.
24. Özdağ R., Yanikomeroglu H., A New Meta-heuristic Approach for 3D Placement of Multiple Unmanned Aerial Vehicle Base Stations in Wireless Networks, *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics – 2019*, Van-Turkey, 64-66, 26-29 June, 2019.
25. Özdağ R., Karcı A., Sensor Node Deployment Based on Electromagnetism-Like Algorithm in Mobile Wireless Sensor Networks, *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, 11 (2), 1-15, 2015.
26. Özdağ R., Karcı A., Probabilistic dynamic distribution of wireless sensor networks with improved distribution method based on electromagnetism-like algorithm, *Measurement*, 79, 66-76, 2016.
27. Özdağ R., The optimization of network lifetime with sensor deployment for target coverage problem in wireless sensor networks, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1155-1167, 2017.
28. Birbil S.I., Fang S.C., An Electromagnetism-like Mechanism for Global Optimization, *J. Global Optim.*, 25 (3), 263-282, 2003.
29. Mirjalili, S., Lewis, A., The Whale Optimization Algorithm, *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67, 2016.
30. Özdağ R., Canayaz M., A new metaheuristic approach based on orbit in the multi-objective optimization of wireless sensor networks, *Wireless Networks*, 27, 285-305, 2021.
31. Özdağ R., Canayaz M., Optimization of sensor deployment for  $k$ -coverage in wireless sensor networks, *International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science (ICATCES)*, Safranbolu-Turkey, 755-760, 11-13 May, 2018.
32. Ekinci S., Demirören A., Zeynelgil H.L., Hekimoğlu B., An opposition-based atom search optimization algorithm for automatic voltage regulator system, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1141-1157, 2020.
33. Uçar U.U., İşleyen S.K., Gökçen H., Experimental analysis of Meta-Heuristic algorithms for moving customer vehicle routing problem, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 459-475, 2021.