

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİ NESİL KABLOSUZ AĞLARDA KAPASİTE VE KAPSAMA ALANI  
ENİYİLEMESİ İÇİN DRON BAZ İSTASYONLARININ KULLANIMI**

**DOKTORA TEZİ**  
**Alper AKARSU**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tolga GİRİCİ**

**ARALIK 2019**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....  
**Doç. Dr. Tolga GİRİCİ**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **131217013** numaralı Doktora Öğrencisi **Alper AKARSU**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**YENİ NESİL KABLOSUZ AĞLARDA KAPASİTE VE KAPSAMA ALANI ENİYİLEMESİ İÇİN DRON BAZ İSTASYONLARININ KULLANIMI**" başlıklı tezi **20.12. 2019** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı:** **Doç. Dr. Tolga GİRİCİ** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri:** **Prof. Dr. Bülent TAVLI (Başkan)** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Doç. Dr. Cenk Toker** .....  
Hacettepe Üniversitesi

**Doç. Dr. Ayşe Melda YÜKSEL TURGUT** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Prof. Dr. Kemal LEBLEBİCİOĞLU** .....  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Alper Akarsu

İMZA



## ÖZET

Doktora Tezi

### YENİ NESİL KABLOSUZ AĞLARDA KAPASİTE VE KAPSAMA ALANI ENİYİLEMESİ İÇİN DRON BAZ İSTASYONLARININ KULLANIMI

Alper Akarsu

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tolga Girici

Tarih: Aralık 2019

Son yıllarda meydana gelen teknolojik gelişmeler, İnsansız Hava Araçlarının (İHA) ya da daha çok bilinen şekliyle dronların hem ticari hem de askeri alanda bir çok uygulamada kullanılabilmesine olanak sağlamıştır. Dronların kullanımı ile gözetleme, arama ve kurtarma, malzeme dağıtım, haberleşme gibi çeşitli uygulamalarda düşük maliyetli ve etkin çözümler sağlanmaktadır. 5G ve ötesi haberleşme sistemlerinin hedeflediği çok yüksek veri kapasitesinin ve servis kalitesinin sağlanması noktasında da dronların önemli rol oynayacağına görülmesi üzerine bu alanda araştırmalar hızlanmıştır. Ayrıca, askeri haberleşmede dronların kullanımı da bu alandaki araştırmaları motive etmektedir. Dronların haberleşmede kullanımında en önemli problemlerden bir tanesi dron baz istasyonlarının (DBİ) 3 Boyutlu (3B) uzayda nasıl konumlandırılacağıdır. Bu tez çalışmasında pratik varsayımlar altında DBİ'lerin konumlandırılması kullanıcı veri kapasitesine bağlı şekilde modellenmiş ve çeşitli senaryolar kurgulanarak özgün konumlandırma yöntemleri önerilmiştir. Bu kapsamda öncelikle ağın doğrusal ve logaritmik veri kapasitelerinin eniyilenmesi problemi incelenmiş ve kümeleme temelli hızlı çalışan gerekli DBİ sayısını ve pozisyonlarını belirleyen bir yöntem önerilmiştir. Kullanıcıların düzgün dağılmadığı belli bir bölgede yoğunluk barındıran ağlar için DBİ konumlarının DBİ kullanıcı eşleşmesi ile birlikte optimize edilmesi önerilmiştir. Askeri bir uygulama olarak taktik sahada DBİ'lerin kullanımı ele alınmış ve kullanıcı pozisyonlarını kestirip vurulma olasılığını azaltan özgün bir DBİ konumlandırma yöntemi önerilmiştir. Bir diğer senaryoda, DBİ'lerin güvenilirlik oranlarının haberleşme

sistemlerine göre düşük olması ve taktik sahalarda DBİ'lerin etkisiz hale getirilme olasılıkları göz önünde bulundurularak DBİ'lerin konumlandırılması incelenmiştir. Bu kapsamda bir DBİ devre dışında kaldıktan sonra ağın performansını iyileştiren özgün konumlandırma yöntemleri geliştirilmiştir. Tanımlanan problemlerin konveks olmaması sebebiyle meta sezgisel yöntemlerden yararlanılmış ve en yüksek çözüm doğruluğuna ulaşan yöntem belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dron baz istasyonlarının konumlandırılması, Konum tahmini, Meta sezgisel algoritmalar, Dirençli ağlar.





## **ABSTRACT**

Doctor of Philosophy

### **USE OF DRONE BASE STATIONS FOR THE OPTIMIZATION OF CAPACITY AND COVERAGE IN NEW GENERATION WIRELESS NETWORKS**

Alper Akarsu

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Tolga Girici

Date: December 2019

Recent technological advances enable the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) or commonly known as drones in many civilian and military applications. Drones provide low-cost and efficient solutions to the problems arise in diverse applications such as surveillance, search and rescue, delivery of goods and communication. Research activities on the use of drones in wireless communication have substantially grown as it is understood that it could play an important role to satisfy the high data rate demand and service quality of users in beyond 5G networks. Drone based applications in military communication also motivates and triggers research activities. One of the most important research problems that needs to be addressed is how to deploy drone base stations (DBS) in 3 Dimensional (3D) space. In this thesis work, we model the DBSs deployment problem with respect to user capacities taking into account practical considerations for various scenarios and propose novel methods to determine the positions of DBSs. First, we investigate the problem of linear and logarithmic capacity maximization and propose a computationally low-cost method that determines the required number of DBSs and their positions. For a scenario, where users are not uniformly distributed and has a dense user region, the joint optimization of DBSs positions and DBS-user associations is proposed. We investigate the use of DBSs in a tactical network and design a method which estimates the positions of users and place DBSs considering the probability of DBSs being hit. In another case, taking into account the lower reliability of a drone compared to that of a radio system and the probability of

DBS shoot down we propose novel methods in order to increase network performance during repositioning of DBSs. As the defined problems are not convex, we utilize metaheuristics and identify the one with the highest solution accuracy.

**Keywords:** Deployment of drone base stations, Position estimation, Metaheuristics, Resilient networks.



## TEŞEKKÜR

Öncelikle bilimsel katkıları ile bana yardımcı olan, doktora eğitimim süresince yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, tez danışmanım ve akıl hocam Sayın Doç. Dr. Tolga Girici'ye en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım. Özellikle zorlandığım zamanlarda verdiği destekler için kendisine minnettarım. Ayrıca doktora eğitimimi araştırma bursu kapsamında yapmamı sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne ve araştırmalarımı destekleyen HAVELSAN A.Ş.'ye çok teşekkür ederim.

Tez sunumumda yorumları, kritikleri ve değerli görüşleri için tez komitesi üyeleri Sayın Doç. Dr. Ayşe Melda Yüksel Turgut'a, Sayın Prof. Dr. Bülent Tavlı'ya, "Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği" bölümünden Sayın Doç. Dr. Cenk Toker'e ve "Ortadoğu Teknik Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği" bölümünden Sayın Prof. Dr. Kemal Leblebicioğlu'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez bana maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan ailem Dr. Nevin Akarsu'ya, Dr. Fevzi Akarsu'ya, ablam Dr. Bengisu Akarsu Güven'e, eşim Dr. Ayşegül Akarsu'ya ve kızım Almıla Akarsu'ya adanmıştır. Verdiği görüşlerle çalışmalarına değerli katkılar sağlayan ve desteğini hiç esirgemeyen Dr. Tuna Güven'e teşekkürü bir borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> . . . . .	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> . . . . .	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> . . . . .	<b>xiii</b>
<b>KISALTMALAR</b> . . . . .	<b>xii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> . . . . .	<b>xv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı . . . . .	2
1.2 Problem Tanımı . . . . .	3
1.3 Katkılar . . . . .	4
1.4 Tezin Organizasyonu . . . . .	4
<b>2. TEMEL BİLGİLER</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 Dronlar . . . . .	5
2.1.1 Dronların tarihçesi . . . . .	5
2.1.2 Dron sistem bileşenleri . . . . .	6
2.1.3 Dronların sınıflandırılması . . . . .	9
2.2 Matematiksel Optimizasyon . . . . .	9
2.2.1 Matematiksel optimizasyonun temel özellikleri . . . . .	10
2.3 Meta sezgisel optimizasyon yöntemleri . . . . .	11
2.3.1 Meta sezgisel optimizasyonun tarihçesi . . . . .	12
2.3.2 Popülasyon Temelli Meta Sezgisel Yöntemler . . . . .	12
2.3.2.1 Parçacık sürü optimizasyonu . . . . .	14
2.3.2.2 Biyocoğrafya tabanlı optimizasyon . . . . .	15
2.3.3 Tek Çözüm Temelli Meta Sezgisel Yöntemler . . . . .	16
2.3.3.1 Benzetimli tavlama . . . . .	16
2.3.3.2 Tabu arama . . . . .	17
<b>3. SİSTEM MODELİ</b> . . . . .	<b>19</b>
3.1 Hava Yer Kanal Modeli . . . . .	19
3.2 Kullanıcı Veri Kapasitesi . . . . .	23
<b>4. DRON BAZ İSTASYONLARININ KONUMLANDIRILMASI</b> . . . . .	<b>25</b>
4.1 DBİ'lerin 3 Boyutlu Uzayda Konumlandırılması . . . . .	25
4.1.1 Literatür taraması . . . . .	25
4.1.2 Problemin tanımı ve çözümü . . . . .	26
4.1.2.1 Kapasite farkında DBİ konumlandırma . . . . .	27
4.1.2.2 K-ortalama kümeleme . . . . .	29
4.1.2.3 KC yöntemi ve PSO ile DBİ konumlandırma . . . . .	30

4.1.2.4 X-ortalama kümeleme . . . . .	30
4.1.2.5 Basit geometriksel yaklaşım . . . . .	31
4.1.3 Sonuçlar . . . . .	32
4.2 Yük Farkında DBİ Konumlandırma . . . . .	41
4.2.1 Literatür taraması . . . . .	41
4.2.2 Problemin tanımı ve çözümü . . . . .	41
4.2.3 Sonuçlar . . . . .	44
4.3 Şehir Çatışmalarında DBİ Konumlandırma . . . . .	49
4.3.1 Literatür taraması . . . . .	49
4.3.2 Problemin tanımı ve çözümü . . . . .	51
4.3.2.1 Kullanıcı konumlarının kestirilmesi . . . . .	52
4.3.2.2 Tehdit modeli ve DBİ'lerin vurulmama olasılığı . . . . .	53
4.3.2.3 Kullanıcı dağılım modeli . . . . .	55
4.3.2.4 Tehdit unsuru farkında DBİ kümeleme . . . . .	55
4.3.2.5 DBİ konumlandırma yöntemleri . . . . .	56
4.3.3 Sonuçlar . . . . .	58
4.4 Dayanıklı DBİ Konumlandırma . . . . .	62
4.4.1 Literatür taraması . . . . .	62
4.4.2 Problemin tanımı ve çözümü . . . . .	63
4.4.2.1 Riskli DBİ'nin bilindiği durumda DBİ konumlandırma . . . . .	65
4.4.2.2 Riskli DBİ'nin bilinmediği durumda DBİ konumlandırma . . . . .	66
4.4.3 Sonuçlar . . . . .	68
4.5 DBİ Konumlandırmada Meta Sezgisel Yöntemler . . . . .	74
4.5.1 Literatür taraması . . . . .	74
4.5.2 Problemin tanımı ve çözümü . . . . .	75
4.5.3 Sonuçlar . . . . .	76
<b>5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>KAYNAKLAR . . . . .</b>	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ . . . . .</b>	<b>99</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Geçmişten günümüze dronlar . . . . .	6
Şekil 2.2: Dron sistem bileşenleri . . . . .	7
Şekil 2.3: Dron bileşenleri . . . . .	7
Şekil 2.4: Yer kontrol istasyonları . . . . .	8
Şekil 2.5: Genel bir MO modeli . . . . .	10
Şekil 2.6: MO modelinde doğrusallık şartı . . . . .	10
Şekil 2.7: MO modelinde konveksite şartı . . . . .	11
Şekil 2.8: Popülasyon temelli meta sezgisel yöntemlerde temel yaklaşım . . . . .	13
Şekil 2.9: Parçacık hareket modeli . . . . .	14
Şekil 2.10: Bir adadaki türlerin göç modeli . . . . .	15
Şekil 2.11: Tek çözüm temelli meta sezgisel yöntemlerde temel yaklaşım . . . . .	16
Şekil 3.1: Radyo ışın yayılım tipleri . . . . .	20
Şekil 3.2: Sistem modeli . . . . .	21
Şekil 4.1: Toplam kapasiteyi maksimize eden DBİ konumlandırma modeli . . . . .	27
Şekil 4.2: Eşitlik farkında DBİ konumlandırma modeli . . . . .	27
Şekil 4.3: K-ortalama kümeleme ile DBİ konumlandırma . . . . .	29
Şekil 4.4: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI'de $C_{log}$ performansları . . . . .	37
Şekil 4.5: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI'de $C_{lin}$ performansları . . . . .	38
Şekil 4.6: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SII'de $C_{log}$ performansları . . . . .	38
Şekil 4.7: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SII'de $C_{lin}$ performansları . . . . .	39
Şekil 4.8: Örnek bir ağda $D = 10$ için DBİ konumlandırma . . . . .	40
Şekil 4.9: Kullanıcıların düzensiz dağıldığı örnek bir DBİ ağı . . . . .	42
Şekil 4.10: DBİ konumlarını ve eşleşmelerini eniyileyen problem modeli . . . . .	42
Şekil 4.11: DBİ kullanıcı eşleştirme problem modeli . . . . .	43
Şekil 4.12: DBİ kullanıcı eşleştirme probleminin eşdeğer modeli . . . . .	43
Şekil 4.13: DBİ kullanıcı eşleştirme probleminin ikincil problem modeli . . . . .	44
Şekil 4.14: DBİ kullanıcı eşleşmelerine göre farklı yüksekliklerde $C_{log}$ değerleri . . . . .	46
Şekil 4.15: DBİ kullanıcı eşleşmelerine göre farklı yüksekliklerde $C_{min}$ değerleri . . . . .	48
Şekil 4.16: DBİ kullanıcı eşleşmelerine göre farklı yüksekliklerde $J$ değerleri . . . . .	48
Şekil 4.17: Örnek bir ağda DBİ kullanıcı eşleştirme ( $D = 3$ ) . . . . .	49
Şekil 4.18: Şehir çatışması DBİ konumlandırma sistem modeli . . . . .	51
Şekil 4.19: DBİ tehdit unsuru . . . . .	52
Şekil 4.20: DBİ'nin mesafeye göre vurulma olasılığı modeli . . . . .	54
Şekil 4.21: SGMM modeli ile asker ve grup liderinin konumlandırılması . . . . .	55
Şekil 4.22: TACEP yönteminin genel modeli . . . . .	56
Şekil 4.23: Kapsanan kullanıcı sayısını eniyileyen DBİ konumlandırma modeli . . . . .	57

Şekil 4.24: Gerçek kullanıcı pozisyonları ile farklı yüksekliklerde $N_{kd}$ değerleri	59
Şekil 4.25: Kestirilmiş kullanıcı pozisyonları ile farklı yüksekliklerde $N_{kd}$ değerleri	60
Şekil 4.26: DBİ'lerin farklı yüksekliklerde $p_{vur}^0$ değerleri	61
Şekil 4.27: 700m'de farklı tehdit sayılarına göre $p_{vur}^0$ değerleri	62
Şekil 4.28: Riskli DBİ'nin bulunduğu ağın olası durumları	63
Şekil 4.29: DBİ'nin devre dışı kaldığı örnek bir senaryo	64
Şekil 4.30: Geçiş durumu DBİ atama problemi	65
Şekil 4.31: Dayanıklı DBİ konumlandırma modeli	66
Şekil 4.32: Devre dışı kalma farkında DBİ kümeleme modeli	67
Şekil 4.33: Normal durumda farklı $r_S$ değerlerine göre $C_{min}^N$ değerleri	70
Şekil 4.34: Geçiş durumunda farklı $r_S$ değerlerine göre $C_{min}^G$ değerleri	70
Şekil 4.35: Geçiş durumunda farklı $r_S$ 'ler için $N_{kd}^G$ değerleri	71
Şekil 4.36: Farklı $g$ 'ler için $C_{min}^N$ ve $C_{min}^G$ değerleri	72
Şekil 4.37: Farklı $g$ değerlerine göre $N_{kd}^N$ ve $N_{kd}^G$ değerleri ( $D = 4, h=450m$ )	73
Şekil 4.38: Farklı DBİ yüksekliklerinde $N_{kd}^N$ ve $N_{kd}^G$ değerleri ( $D = 4, g = 5.5$ )	73
Şekil 4.39: Farklı DBİ sayılarına göre $N_{kd}^G$ değerleri	74
Şekil 4.40: Meta sezgisel yöntemlerin SI'de DBİ sayılarına göre $C_{log}$ değerleri	77
Şekil 4.41: Meta sezgisel yöntemlerin SII'de DBİ sayılarına göre $C_{log}$ değerleri	77
Şekil 4.42: Meta sezgisel yöntemlerin SI'de $N_{tk}$ 'ya göre $C_{log}$ değerleri	78
Şekil 4.43: Meta sezgisel yöntemlerin SII'de $N_{tk}$ 'ya göre $C_{log}$ değerleri	78



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: NATO dron sınıflandırması. . . . .	9
Çizelge 2.2: Meta sezgisel yöntemler. . . . .	12
Çizelge 2.3: Popülasyon temelli yöntemlerde arama hafızaları. . . . .	14
Çizelge 4.1: 3B DBİ konumlandırma simülasyon parametreleri. . . . .	32
Çizelge 4.2: DBİ konumlandırma yöntemlerinin eşitlik performansları ( $D = 7$ ). . . . .	33
Çizelge 4.3: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI ve SII'de J performansları . . . . .	35
Çizelge 4.4: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI ve SII'de $\gamma_C$ performansları . . . . .	36
Çizelge 4.5: DBİ konumlandırma yöntemlerinin yürütme zamanları (SI, $D = 7$ ). . . . .	37
Çizelge 4.6: SII'de DBİ konumlandırma yöntemlerine göre aktif DBİ sayıları. . . . .	39
Çizelge 4.7: Sinyal gücüne ve yük durumuna göre DBİ konumlandırma yöntemleri. . . . .	45
Çizelge 4.8: 7.62mm SVD Dragunov tüfeğinin hedef vurma olasılıkları. . . . .	54
Çizelge 4.9: DBİ konumlandırma yöntemlerinin özellikleri. . . . .	57
Çizelge 4.10: Şehir çatışmaları simülasyon parametreleri. . . . .	59
Çizelge 4.11: DBİ yüksekliğine ve sayısına göre $\sigma_e$ değerleri. . . . .	61
Çizelge 4.12: Farklı DBİ yüksekliklerinde $N_{kd}$ ve $p_{vur}^0$ değerleri. . . . .	61
Çizelge 4.13: RAD ve FAD yöntemlerinde kullanılan modeller. . . . .	67
Çizelge 4.14: FAC ve KC yöntemlerinde kullanılan modeller. . . . .	67
Çizelge 4.15: Dayanıklı konumlandırma simülasyon parametreleri. . . . .	68
Çizelge 4.16: Farklı $r_S$ 'ler için FAD'ın RAD'a göre sağladığı $C_{min}^N$ kazançları. . . . .	69
Çizelge 4.17: Farklı $r_S$ 'ler için RAD'ın FAD'a göre sağladığı $C_{min}^G$ kazançları. . . . .	70
Çizelge 4.18: Farklı $g$ 'ler için $C_{min}^N$ ve $C_{min}^G$ kazançları ( $D = 4$ , $h=450m$ ). . . . .	72
Çizelge 4.19: Meta sezgisel yöntemlerin $N_{tk}$ 'ya göre $C_{log}$ değerleri . . . . .	79



## KISALTMALAR

<b>3B</b>	: 3 Boyutlu
<b>Bİ</b>	: Baz İstasyonu
<b>BBO</b>	: Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (İng. Biogeography Based Optimization)
<b>BG</b>	: Basit Geometrik Yaklaşımla DBİ Konumlandırma (İng. Basic Geometric Approach)
<b>CLogKP</b>	: Bilinen Kullanıcı Pozisyonları ile Kapsama ve Logaritmik Kapasite Temelli DBİ Konumlandırma (İng. Coverage and Log Capacity Based Drone Base Station Positioning with Known User Positions)
<b>CLogEP</b>	: Kestirimsel Kullanıcı Pozisyonları ile Kapsama ve Logaritmik Kapasite Temelli DBİ Konumlandırma (İng. Coverage and Log Capacity Based Drone Base Station Positioning with Estimated User Positions)
<b>CovKP</b>	: Bilinen Kullanıcı Pozisyonları ile Kapsama Temelli DBİ Konumlandırma (İng. Coverage Based Drone Base Station Positioning with Known User Positions)
<b>DBİ</b>	: Dron Baz İstasyonu
<b>EQT</b>	: Eşkenar Üçgen Temelli DBİ Konumlandırma (İng. Equilateral Triangle Based Drone Base Station Positioning)
<b>FAD</b>	: Bozulma Farkında DBİ Konumlandırma (İng. Failure Aware Drone Base Station Deployment)
<b>FAC</b>	: Bozulma Farkında DBİ Kümeleme (İng. Failure Aware Drone Base Station Clustering)
<b>GPS</b>	: Küresel Konumlandırma Sistemi (İng. Global Positioning System)
<b>GKB</b>	: Görev Kontrol Bilgisayarı (İng. Mission Control Computer)
<b>HMI</b>	: İnsan Makine Arayüzü (İng. Human Machine Interface)
<b>HSI</b>	: Habitat Uygunluk İndeksi (İng. Habitat Suitability Index)
<b>ISR</b>	: İstihbarat, Gözetleme ve Keşif (İng. Intelligence, Surveillance and Reconnaissance)
<b>İHA</b>	: İnsansız Hava Aracı
<b>KBİ</b>	: Karasal Baz İstasyonu
<b>K-Cov</b>	: K-ortalama Kümeleme Temelli DBİ Konumlandırma Yöntemi
<b>K-APSO</b>	: Yatayda K-ortalama Kümeleme Yükseklikte PSO Temelli DBİ Konumlandırma Yöntemi

<b>KCEP</b>	: Kestirimsel Kullanıcı Pozisyonları ile DBİ Kümeleme (İng. K-means Clustering Based Drone Base Station Positioning with Estimated User Positions)
<b>Kmeans</b>	: DBİ'leri K-ortalama Kümeleme ile Konumlandırın Yöntem (İng. K-mean Clustering)
<b>KmeansL</b>	: DBİ'leri K-ortalama Kümeleme ile Konumlandırıp Yük Farkında DBİ Kullanıcı Eşleşmesi Yapan Yöntem (İng. K-mean Clustering with Load Balance)
<b>LinPSO</b>	: Kullanıcı Kapasitelerinin Toplamını PSO ile Maksimize Eden DBİ Konumlandırma Yöntemi (İng. Linear Capacity Maximization with PSO)
<b>LogPSO</b>	: Kullanıcı Kapasitelerinin Logaritmalarının Toplamını PSO ile Maksimize Eden DBİ Konumlandırma Yöntemi (İng. Logarithmic Capacity Maximization with PSO)
<b>LogPSOL</b>	: Kullanıcı Kapasitelerinin Logaritmalarının Toplamını DBİ Konumları ve Yük Farkında DBİ Kullanıcı Eşleşmesi ile birlikte Maksimize Eden Yöntem (İng. Logarithmic Capacity Maximization with DBSs Positioning and Load Balance)
<b>MLE</b>	: Maksimum Olabilirlik Kestirimi (İng. Maximum Likelihood Estimation)
<b>MTBF</b>	: Arıza Arası Ortalama Zaman (İng. Mean Time Between Failure)
<b>NATO</b>	: Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (İng. North Atlantic Treaty Organisation )
<b>OS</b>	: Operasyon Sahası
<b>PSO</b>	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (İng. Particle Swarm Optimization)
<b>RSSI</b>	: Alınan Sinyal Güç Göstergesi (İng. Received Signal Strength Indicator)
<b>RAM</b>	: Rastgele Erişim Hafızası (İng. Random Access Memory)
<b>RAD</b>	: Dayanıklı DBİ Konumlandırma (ing. Resilient Aware Drone Base Station Deployment)
<b>Rand</b>	: DBİ'leri Rastgele Konumlandırın Yöntem (İng. Random Deployment)
<b>RandL</b>	: DBİ'leri Rastgele Konumlandırıp, Yük Farkında DBİ Kullanıcı Eşleşmesi Yapan Yöntem (İng. Random Deployment with Load Balance)
<b>SA</b>	: Benzetimli Tavlama (İng. Simulated Annealing)
<b>SINR</b>	: Sinyal Girişim Artı Gürültü Oranı (İng. Signal to Interference Plus Noise Ratio)
<b>SIV</b>	: Uygunluk İndeks Değişkenleri (İng. Suitability Index Variables - SIV)
<b>SS</b>	: Savaş Sahası

<b>SIV</b>	: Uygunluk İndeks Değişkenleri (İng. Suitability Index Variables - SIV)
<b>SS</b>	: Savaş Sahası
<b>SI</b>	: Senaryo I (Kullanıcıların Ağda Düzgün Dağıldığı Senaryo)
<b>SII</b>	: Senaryo II (Kullanıcıların Ağda Düzensiz Dağıldığı Senaryo)
<b>TS</b>	: Tabu Arama (İng. Tabu Search)
<b>TACEP</b>	: Kestirimsel Kullanıcı Pozisyonları ile Tehdit Farkında DBİ Kümeleme (İng. Threat Aware Clustering with Estimated Positions)
<b>UKB</b>	: Uçuş Kontrol Bilgisayarı (İng. Flight Control Computer)
<b>VL</b>	: Veri Linki
<b>X-Cov</b>	: X-ortalama Kümeleme Temelli DBİ Konumlandırma Yöntemi
<b>YKİ</b>	: Yer Kontrol İstasyonu



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılan simgeler ve açıklamaları aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$(a, b)$	Görüş hattı ihtimalinin hesabında kullanılan çevre şartlarına ve frekansa bağlı parametreler
$d_i^k$	Asker $i$ ile grup lideri $k$ arasındaki açı
$B$	Kanal bant genişliği (Hz)
$C$	Veri kapasitesi (bps)
$C_{ij}$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki bölünmemiş tam kapasite (bps)
$c_{ij}$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki bölünmüş kapasite (bps)
$c_i$	Kullanıcı $i$ 'nin bölünmüş veri kapasitesi (bps)
$c$	Işık hızı (m/sn)
$C(s)$	Tek çözüm temelli meta sezgisel yöntemlerde aday çözüm seti
$C_{TH}$	Bir kullanıcının kapsanması için baz alınan kapasite eşik değeri
$c_{lk}$	Normal durumdan kısıtlanmış duruma DBİ atamalarını gösteren ikili karar değişkeni
$C_{log}$	Kullanıcı kapasitelerinin logaritmalarının alınarak toplanması ile bulunan kapasite. Diğer bir ifadeyle ağın logaritmik kapasitesi
$C_{lin}$	Kullanıcı kapasitelerinin toplanması ile bulunan kapasite. Diğer bir ifadeyle ağın doğrusal kapasitesi
$C_{min}$	Ağdaki en düşük kullanıcı kapasitesi
$C_{min}^N$	Normal durumda ağdaki en düşük kullanıcı kapasitesi
$C_{min}^G$	Geçiş durumunda ağdaki en düşük ortalama kullanıcı kapasitesi
$(C_1, C_2)$	PSO yöntemindeki öğrenme faktörü sabitleri
$\mathcal{D}$	DBİ seti
$d_{ij}(\theta_{ij})$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki mesafe (m)
$D$	Hücredeki toplam DBİ sayısı
$d_{ij}$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki mesafe (m)
$d_i^k$	Asker $i$ ile grup lideri $k$ arasındaki mesafe (m)
$d_{jk}$	DBİ $j$ ile tehdit unsuru $k$ arasındaki mesafe
$d_{\Delta}^h$	TACEP yönteminde bir DBİ'nin bir tekrarda aldığı mesafe (m)
$d_{max}^h$	TACEP yönteminde bir DBİ'nin ilk konumundan uzaklaşabileceği maksimum mesafe (m)
$d_{lk}$	Normal durumda DBİ $l$ ile kısıtlanmış durumda DBİ $k$ arası mesafe (m)
$\mathcal{D}_j$	DBİ $j$ 'ye bağlı kullanıcı seti
$\mathcal{D}_h$	Bir DBİ devre dışı kaldıktan sonra kalan DBİ'leri gösteren set
$E_M$	BBO yönteminde maksimum göç verme oranı

$E[PL_{LoS}^{ij}]$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki görüş hattındaki yol kaybının beklenen değeri
$E[PL_{NLoS}^{ij}]$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki görüş hattı dışındaki yol kaybının beklenen değeri
$f_c$	Haberleşme sisteminin çalışma frekansı (Hz)
$g$	DBİ yakınlaştırma katsayısı
$G_{ij}$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki anten kazancı (dB)
$H_i$	BBO yönteminde habitat $i$
$h_{min}$	DBİ yüksekliğinin alabileceği minimum değer (m)
$h_{max}$	DBİ yüksekliğinin alabileceği maksimum değer (m)
$h_j^d$	DBİ $j$ 'nin yüksekliği
$I$	Girişim
$\mu_i$	BBO yönteminde göç verme oranı
$I_M$	BBO yönteminde maksimum göç alma oranı
$J$	Jain'nin eşitlik indeksi
$K_M$	Kümeleme temelli DBİ konumlandırma olabilecek maksimum DBİ sayısı
$k$	Boltzmann sabiti
$l_{cov}^i$	Kullanıcı $i$ 'nin kapsama durumunu gösteren ikili karar değişkeni
$\mu_{LoS}$	Ortalama görüş hattı aşırı yol kaybı (dB)
$N_0$	AWGN gürültü spektral yoğunluğu (W/Hz)
$N_{par}$	PSO yönteminde toplam parçacık sayısı
$N_E$	BBO yönteminde elit çözüm sayısı
$N_{hab}$	BBO yönteminde habitat sayısı
$N_t$	Geçiş durumunda yapılan kullanıcı kapasite hesabının toplam sayısı
$N_{kd}$	Ağda $C_{TH}$ 'nin altında kapasiteye sahip (kapsama dışı) kullanıcı sayısı
$N_{DBi}^{akt}$	Ağda aktif olarak kullanılan DBİ sayısı
$N_s$	Ağda $C_{TH}$ ya da daha fazla kapasiteye sahip kullanıcı sayısı
$N_{tk}$	Tekrarlı algoritmalarda kullanılan tekrar sayısı
$N_{kd}^G$	Geçiş durumunda kapsanmayan ortalama kullanıcı sayısı
$N_{kd}^N$	Normal durumda kapsanmayan kullanıcı sayısı
$\mu_{NLoS}$	Ortalama görüş hattı dışı aşırı yol kaybı (dB)
$PL_{LoS}^{ij}(\theta_{ij})$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki görüş hattı yol kaybı(dB)
$PL_{NLoS}^{ij}(\theta_{ij})$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki görüş hattı dışı yol kaybı(dB)
$P_T$	DBİ yayın çıkış gücü
$p_{mut}$	BBO yönteminde mutasyon olasılığı
$p_{vur}(d)$	DBİ'nin (hedefin) mesafeye bağlı vurulma olasılığı
$p_{vur}^0$	Ağdaki DBİ'lerden hiçbirinin vurulmaması olasılığı
$p_{vur}^j$	DBİ $j$ 'nin en yakın tehdit unsuru/unsurları tarafından vurulması olasılığı



$p_{LoS}^{jk}$	DBİ $j$ ile tehdit unsuru $k$ arasındaki görüş hattı ihtimali
$f(\mathbf{PL}_i; \theta_i)$	Kullanıcı $i$ 'nin pozisyonunun yükseliş açıları cinsinden bilinmesi durumunda yol kayıplarının olasılık yoğunluk fonksiyonu
$\mathbf{PL}_i$	Kullanıcı $i$ 'nin DBİ'ler ile olan yol kaybını gösteren vektör
$r_C$	Hücrenin yarıçapı (m)
$r_{ij}$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki yatay mesafe (m)
$r_{OS}$	Operasyon sahası yarıçapı
$r_{SS}$	Savaş sahası yarıçapı
$r_{GA}$	Güvenli alan yarıçapı
$r_S$	Dayanıklı konumlandırma arama yarıçapı (m)
$R_{ij}$	DBİ $j$ yayınının kullanıcı $i$ terminalindeki gücü (W)
$\hat{r}_{ij}$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki kestirimsel yatay mesafe (m)
$S_M$	BBO yönteminde maksimum tür sayısı
$S_i$	BBO yönteminde habitat $i$ 'deki tür sayısı
$s$	Tek çözüm temelli meta sezgisel yöntemlerde geçerli çözüm
$s'$	Tek çözüm temelli meta sezgisel yöntemlerde yeni çözüm
$T$	Savaş sahası içerisindeki DBİ tehditlerinin sayısı
$T_b$	Benzetimli tavlama yönteminde kötü çözüm kabul olasılığını kontrol eden sıcaklık parametresi
$T_t$	Geçiş durumunun süresi (sn)
$\mathcal{T}$	Tehdit unsuru seti
$t_\Delta$	Geçiş durumu zaman dilimi süresi (sn)
$\mathcal{T}_j$	DBİ $j$ 'yi hedef alan tehdit unsurları seti
$U_j$	DBİ $j$ 'ye bağlanan toplam kullanıcı sayısı
$U$	Hücredeki toplam kullanıcı sayısı
$\mathcal{U}$	Kullanıcı seti
$v$	DBİ'nin yatay eksenindeki hızı (m/sn)
$x_i^u$	Kullanıcı $i$ 'nin x eksenindeki koordinatı
$x_j^d$	DBİ $j$ 'nin x eksenindeki koordinatı
$x^{ij}$	$i$ 'ninci kullanıcının $j$ 'ninci DBİ'ye bağlı olup olmadığını gösteren ikili değişken
$x_j^c$	DBİ $j$ 'nin K-ortalama yöntemi ile bulunan x eksenindeki koordinatı
$x_R^j$	DBİ $j$ 'nin dayanıklı konumlandırma ile bulunan x eksenindeki koordinatı
$x_j^L$	DBİ $j$ 'nin adalet farkında konumlandırma ile bulunan x eksenindeki koordinatı
$x_z^K$	DBİ $z$ 'nin K-ortalama kümeleme ile bulunan x eksenindeki koordinatı
$\hat{x}_i^u$	Kullanıcı $i$ 'nin x eksenindeki kestirimsel koordinatı
$y_i^u$	Kullanıcı $i$ 'nin y eksenindeki koordinatı
$y_j^d$	DBİ $j$ 'nin y eksenindeki koordinatı

$y_j^c$	DBİ $j$ 'nin K-ortalama yöntemi ile bulunan $y$ eksenindeki koordinatı
$y_R^j$	DBİ $j$ 'nin dayanıklı konumlandırma ile bulunan $y$ eksenindeki koordinatı
$y_j^L$	DBİ $j$ 'nin adalet farkında konumlandırma ile bulunan $y$ eksenindeki koordinatı
$\widehat{y}_i^u$	Kullanıcı $i$ 'nin $y$ eksenindeki kestirimsel koordinatı
$y_z^K$	DBİ $z$ 'nin K-ortalama kümeleme ile bulunan $y$ eksenindeki koordinatı
$\alpha_i$	Kullanıcı $i$ 'nin bağlandığı DBİ indeksi
$(\alpha_1, \beta_1)$	Görüş hattı aşırı yol kaybının frekans ve çevre şartlarına bağlı parametreleri
$(\alpha_2, \beta_2)$	Görüş hattı aşırı yol kaybının frekans ve çevre şartlarına bağlı parametreleri
$\gamma$	Yol kaybı katsayısı
$\gamma_C$	Maksimum kullanıcı kapasitesinin minimum kullanıcı kapasitesine oranı
$\Delta_E$	Benzetimli tavlama yönteminde yeni çözüm ile geçerli çözüm arasındaki fark
$\eta_{LoS}(\theta_{ij})$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki aşırı yol kaybı (dB)
$\eta_{NLoS}(\theta_{ij})$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki aşırı yol kaybı (dB)
$\theta_B$	DBİ anten hüzmeye genişliği
$\theta_{ij}$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki yükseliş açısı
$\theta_i$	Kullanıcı $i$ 'nin DBİ'ler ile olan yükseliş açılarını gösteren vektör
$\widehat{\theta}_{ij}$	Kullanıcı $i$ ile DBİ $j$ arasındaki kestirimsel yükseliş açısı
$(\kappa, \lambda, \zeta)$	ITU görüş hattı ihtimali parametreleri
$\lambda_i$	BBO yönteminde göç alma oranı
$\sigma_{LoS}(\theta_{ij})$	Görüş hattı aşırı yol kaybının standart sapması
$\sigma_{NLoS}(\theta_{ij})$	Görüş hattı dışı aşırı yol kaybının standart sapması
$\sigma_e$	Kullanıcının gerçek ve kestirilmiş pozisyonu arasındaki uzaklık(m)
$\phi_i^u$	Kullanıcı $i$ 'nin pozisyonu
$\phi_j^d$	DBİ $j$ 'nin pozisyonu

## 1. GİRİŞ

Elektromekanik sistemler, fabrikasyon, elektrikli motorlar ve batarya teknolojilerinde son yıllarda meydana gelen teknolojik gelişmeler ile düşük maliyetli, uzun süre havada kalabilen ve güvenilirliği yüksek İnsansız Hava Aracı (İHA) ya da daha çok bilinen adıyla dron (İng. drone) üretimi mümkün hale gelmiştir. Dronlar günümüzde birçok farklı uygulamada kullanılmakta ve eski yöntemlere göre çok daha düşük maliyetli, güvenilir ve daha kolay uygulanabilir çözümler sağlamaktadır [1]. Bu sebeple dron temelli uygulamalar hem endüstrinin hem de akademinin ilgisini çekmektedir. Dronlar, tarımcılıkta mahsul gelişimlerinin gözlenmesi ve korunmasında [2], güvenlik amaçlı gözetleme faaliyetlerinde [3, 4], elektrik, gaz altyapı sistemlerinin ve rüzgar türbini gibi erişimi zor sistemlerin denetlenmesinde [5–7], taktik sahalarda çeşitli görevlerin icrasında [8, 9], arama kurtarma faaliyetlerinde [10], çevresel gözetleme sensörlerinden veri toplanmasında [11], malzeme dağıtımında [12, 13], trafik gözetlemede [14] ve haberleşmede [15–17] kullanılmaktadır.

Dron Baz İstasyonu (DBİ), dron üzerine baz istasyonunun (Bİ) entegre edilmesi ile oluşan sistemdir. Bİ'lerin daha küçük form faktörlerde üretilebilmesi ve dron platformlarındaki gelişmeler DBİ üretimini olanaklı hale getirmiştir. DBİ'lerin, karasal baz istasyonlarına (KBİ) göre önemli avantaj sağlamasının tespiti ile birlikte hem endüstri hem de akademi bu alana önemli kaynaklar ayırmaya başlamıştır. Konu ile ilgili artan literatür [15, 16, 18–26] akademinin; Facebook, Google, Huawei ve Nokia gibi büyük şirketlerin çalışmaları [13, 27–29] ise endüstrinin konuya olan ilgisini göstermektedir.

DBİ'lerin KBİ'lere göre sağladığı iki temel avantaj bulunduğu söylenebilir. İlki, DBİ'ler ihtiyaç duyulan bölgelerde hızlı bir şekilde sevk edilebilirler ve kullanıcılara hizmet vermeye başlayabilirler [15, 16]. Bu özellik sayesinde DBİ'ler değişen kullanıcı dağılımlarına ve ihtiyaçlarına göre 3 Boyutlu (3B) düzlemde konumlarını değiştirebilirler. Hızlı şekilde ihtiyaç duyulan bölgeye sevk olma ve havada serbestçe konumlanmanın avantajları bir çok senaryoda görülebilir. DBİ'ler sel, deprem gibi çeşitli afet durumlarında haberleşme altyapısının zarar görmesi durumunda hızlı bir şekilde iletişim ağının tekrar kurulmasını sağlayabilirler [30–33]. Kullanıcı yoğunluğunun çeşitli olaylar veya toplu organizasyonlar (konser, eylem, spor olayı vb.) sebebiyle artması durumunda destekleyici baz istasyonu olarak ilgili bölgeye sevk edilebilirler [20, 34–36]. Askeri alanda ise, haberleşme altyapısını taşımanın mümkün olmadığı riskli bölgelere sızarak dost birliklerin iletişimini iyileştirmede kullanılabilirler [9, 37]. DBİ'lerin KBİ'lere göre sağladığı ikinci temel avantaj da görüş hattı (İng. line of sight - LOS) ihtimalinin yüksek oluşudur [38, 39]. Daha iyi kanal şartlarında iletişim yapılması ile hem kapsama alanında hem de veri kapasitesinde önemli artış elde edilebilmektedir.

DBİ'lerin kullanımı adreslenmesi gereken bir takım sorunlar üretmektedir. Özellikle DBİ'lerin nasıl konumlandırılması gerektiği zor bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu konumlandırma probleminin çözümünde kullanıcıların hücre içerisindeki konumları, her bir kullanıcının ihtiyaç duyduğu servis kalitesi, kullanıcı hareketliliği, kullanıcı ile DBİ arasındaki kanalın durumu gibi parametreler dikkate alınmalıdır. Ayrıca, birden çok DBİ'nin kullanılması durumunda ortaya çıkan girişim, DBİ'ler tarafından sağlanacak servisin kalitesini önemli şekilde etkileyeceği için mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır [40]. DBİ yerleşim probleminde değerlendirilmesi gereken bir diğer konu da dronların radyo sistemlerine göre daha düşük kullanılabilirlik (İng. availability) oranına sahip olmasıdır. Dronlar kompleks elektro-mekanik sistemlerdir ve özellikle mekanik birimler içermesi nedeniyle de bozulmalara karşı tamamen elektronik komponentlerden meydana gelen radyo sistemlerine göre daha yatkındırlar [41]. Bozulma farkında DBİ konumlandırma yaparak, bozulma sonrası sağlam DBİ'lerin yeni konumlarına geçişi aşamasında kullanıcı kapasitelerinin iyileştirilmesi sağlanabilir [42, 43].

Askeri uygulamaların ihtiyaçları incelendiğinde problem daha da zorlaşmaktadır. Konumlandırma probleminin çözümü için yukarıda da ifade edilen kullanıcı konumlarına ihtiyaç vardır. Pratikte, kullanıcı konumları cep telefonlarında bulunan küresel konumlandırma sistemi (İng. global positioning system - GPS)[44] alıcısı ile elde edilebilmektedir. Bununla birlikte GPS sinyalleri çok zayıf olduğu için düşük güçteki bir karıştırıcı (İng. jammer) bile cep telefonunda konum bilgisinin üretilmesine engel olabilmektedir [45, 46]. Karıştırıcı dayanaklı GPS sistemi [47-50] ile donatılmış DBİ'ler, kullanıcı terminallerinden GPS çalışma frekanslarından (L1: 1575.42 Mhz, L2: 1227.60 MHz) farklı frekanslarda alınan sinyal güç göstergelerini (İng. received signal strength indicator - RSSI) kullanarak kullanıcı konumlarını kestirebilirler ve buna göre kendi konumlarını belirleyebilirler.

Taktik sahada düşmanın dronları imha etmek için konuşlandığı riskli bölgelerin bulunması da DBİ'leri konumlandırırken göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur. DBİ'ler tarafından taşınacak verinin kritikliği, dronun düşman unsurlar tarafından etkisiz hale getirilme ihtimali gibi kritik parametreler kullanılarak DBİ'lerin konumlandırılması gerçekleştirilmelidir. Servis verilecek bölgede kullanıcıların hareketli olması durumunda KBİ'lerden farklı olarak DBİ'ler kendi konumlarını değiştirebilirler ve kullanıcıları takip ederek kullanıcı servis kalitesini iyileştirebilirler [51]. Bunu başarmak için hücrede bulunan DBİ'lerin rotalarının belirlenmesi ve kullanıcı pozisyonlarına göre rotalarını güncellemesi gerekmektedir. DBİ'lerin rotalarını belirlerken, hem kullanıcı servis kalite hedeflerine ulaşmak hem de dronların enerji tüketimlerini minimize edilerek ağın en uzun süre operasyonel olması hedeflenmelidir.

## **1.1 Çalışmanın Amacı**

Bu tez çalışmasında yeni nesil sivil ve askeri ağlarda kullanılması öngörülen DBİ'lerin kullanım senaryoları incelenmiş ve özgün DBİ konumlandırma yöntemleri sunulmuştur. Geliştirilen her yöntem, kullanım senaryosunun ihtiyaçları dikkate alınarak oluşturulmuş ve kullanıcı kapasitesinin ve kapsama alanının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Önerilen yöntemlerin temelinde daha önce sıkça çalışılan ve literatürde bulunan KBİ konumlandırma probleminde kullanılan stratejiler olmakla birlikte, dronların havada serbestçe hareket edebilmesi, bozulmaya yatkın olması, taktik sahada kullanımda bazı avantajlar içermesi sebebiyle mevcut yöntemlerde değişiklik yapılarak ya da birden fazla yöntemi biraraya getirerek özgün konumlandırma yöntemleri elde edilmiştir.

## 1.2 Problem Tanımı

DBİ'lerin servis verilecek bölgede kullanıcı kapasitesini ve kapsama alanını iyileştirmek için konumlandırılması DBİ'lerin kullanımındaki en temel konulardan bir tanesidir. Bu tez çalışmasında kullanım senaryoları hala gelişmekte olan DBİ ağlarının kullanım senaryoları incelenerek ilgili senaryoya özgü DBİ konumlandırma yöntemleri önerilmiştir. Temel senaryo olarak bir ağda kullanılması gereken DBİ sayısı ve 3B uzaydaki konumları farklı konumlandırma stratejileri önerilerek incelenmiş ve çeşitli ağ metriklerine göre performans karşılaştırması yapılmıştır. İkinci kullanım senaryosunda çok yoğun kullanıcı içeren bir ağda DBİ kullanıcı eşleşmesi problemi DBİ konumları ile birlikte çözülmüştür. Önerilen DBİ konumlandırma yöntemleri için hem sinyal seviyesine hem de yük durumuna göre DBİ kullanıcı eşleşmesi yapılarak ağ metrikleri karşılaştırılmıştır. Üçüncü senaryoda kullanıcı GPS sinyallerinin karıştırıldığı ve DBİ'yi etkisiz hale getirmek isteyen unsurların olduğu bir taktik saha modellenmiş ve DBİ'lerin konumlandırılması incelenmiştir. Bir diğer senaryoda ise DBİ ağındaki dronlardan bir tanesinin devre dışı kalacağı (hangi DBİ'nin devre dışında kalacağı bilinen ve bilinmeyen) göz önünde bulundurularak bozulma sonrası ağıdaki kayıpların azaltılması hedeflenmiştir. Son olarak DBİ konumlandırma probleminin çözümünde kullanılan meta sezgisel (İng. metaheuristic) algoritmaların performansları incelenmiştir. Bu tez çalışması aşağıdaki araştırma sorularına cevap vermeyi amaçlamaktadır:

1. Hangi stratejiler ile DBİ'ler ağda konumlandırılabilir? Ağda kaç adet DBİ kullanılmalıdır? Farklı DBİ konumlandırma stratejileri kullanıcı metriklerini nasıl etkilenmektedir?
2. Hem gerekli DBİ sayısını hem de konumlarını belirleyen, hızlı çalışan bir algoritma tasarlanabilir mi?
3. Kullanıcı dağılımları DBİ konumlandırma yöntemlerinin performansını nasıl etkilemektedir?
4. Taktik sahada DBİ kullanımında hangi kısıtlar göz önünde bulundurulmalıdır?
5. DBİ'lerden gelen sinyallerin RSSI değerleri kullanılarak yapılan kullanıcı konum tahmininde ortalama hata nedir? Kullanıcı konum tahmini ile yapılan DBİ konumlandırma ile gerçek kullanıcı konumları ile yapılan DBİ konumlandırma arasındaki performans farkı nedir?
6. Bir DBİ'nin operasyon anında devre dışı kalması durumunda ağ performansı nasıl etkilenmektedir? DBİ'lerin yeniden konumlandırıldığı sürecin performansını iyileştirmek için DBİ'ler ilk aşamada (devre dışı kalma öncesi) daha etkin şekilde

konumlandırılabilir mi? Bu konumlandırma tüm DBİ'lerin operasyonel olduğu durumdaki ağ performansını nasıl etkiler?

7. DBİ konumlandırma probleminin çözümünde kullanılması uygun olan çeşitli meta sezgisel algoritmalarından hangisi en etkin çözümü sağlamaktadır?

### 1.3 Katkılar

Şehir ortamı hava yer kanal modelinin matematiksel olarak modellenmesi [38] ile birlikte DBİ yerleşimi problemi incelenmeye başlanmıştır [52–55] . DBİ'lerin yerleşimi konusunda yapılan bu çalışmalarda ya tek bir DBİ'nin yerleşimi incelenmiş ya da girişim göz önünde bulundurulmadan yüksekliğe bağlı olarak değişen kapsama alanlarında kullanıcıların kapsanması hedeflenmiştir. Bu tez çalışmasında DBİ kullanım senaryoları sistematik olarak incelenmiş ve kullanım ihtiyaçları göz önünde bulundurularak özgün yöntemler önerilmiştir. Ayrıca, bu tez çalışması DBİ'lerin yerleşimi ile ilgili özgün senaryolar tanımlamaktadır. Bu kapsamda, özellikle ağda kullanıcıların düzensiz dağılması durumunda önem kazanan DBİ konumları ve kullanıcı-DBİ eşleşmelerinin birlikte optimize edilmesi önerilmiş ve bu şekilde kullanıcı kapasitesinin önemli oranda iyileştiği gösterilmiştir. DBİ'lerin taktik sahada kullanımı ve dronların bozulma farkında konumlandırılması mevcut literatürde incelenmemiş senaryolardır. İlk senaryoda kullanıcı RSSI'ları kullanılarak kullanıcı pozisyonları tahmin edilmiş ve bu pozisyonlara göre kendi konumları belirlenmiştir. Ayrıca sahada DBİ'yi etkisiz hale getirmek isteyen unsurların olması durumu tanımlanarak sezgisel (İng. heuristic) bir yöntem ile vurulma ihtimali ve kapasite ödünleşimi içeren bir yöntem önerilmiştir. İkinci senaryo da ise DBİ'ler konumlanırken bir dronun bozulması sonrasında meydana gelecek kayıpların azaltılması için yöntemler önerilmiş ve özellikle DBİ sayısının kısıtlı olması durumunda kullanıcı kapasitelerinde önemli bir artış elde edilmiştir. DBİ konumlandırma probleminin konveks (İng. convex) ve doğrusal olmaması (İng. non-linear) sebebiyle çözümde meta sezgisel algoritmalar kullanılmıştır.

### 1.4 Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışmasının organizasyonu şu şekildedir: Bölüm 2'de dronlar, matematiksel optimizasyon ve meta sezgisel yöntemler ile ilgili temel bilgiler anlatılmıştır. Bölüm 3'te bu tez çalışmasında kullanılan sistem modeli (hava yer kanal modeli, kullanıcı veri kapasitesi hesaplama yöntemi ve varsayımlar ) sunulmuştur. Bölüm 4'te DBİ'lerin konumlandırılması 4 farklı senaryo için incelenmiştir. Bu kapsamda Bölüm 4.1'de temel 3B DBİ konumlandırma problemi ele alınarak Bölüm 4.2, Bölüm 4.3 ve Bölüm 4.4'teki senaryolara ve çözüm stratejilerine kaynak oluşturulmuştur. Bölüm 4.5'te meta sezgisel yöntemlerin DBİ konumlandırma problemini çözmedeki performansları karşılaştırılmıştır. Bölüm 4'ün her alt bölümünde ilgili literatür taraması sunulmuş, problem tanımlanmış, çözüm önerilmiş ve simülasyon sonuçları ve bulgular paylaşılmıştır. Bölüm 5'te bu tez çalışmasının sonuçları özetlenmiş ve gelecekte ele alınabilecek konular aktarılmıştır.

## 2. TEMEL BİLGİLER

### 2.1 Dronlar

Dronlar ya da diğerk adıyla İHA'lar uzun süre havada kalıp binlerce kilometre uçabilen ya da ev gibi fiziksel olarak kısıtlı ortamlarda kullanılabilen robotik sistemlerdir. Dronlar insan taşımazlar. Elle uzaktan kumanda edilebilirler ya da otonom şekilde kullanılabilirler [1]. Dronların yaygınlaşması fabrikasyon, uzaktan kontrol, navigasyon, güç depolaması gibi alanlarda meydana gelen teknolojik gelişmeler ile mümkün olmuştur. Günümüzde farklı kabiliyetlere sahip dronlar hem askeri hem de sivil uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle insan hayatını riske atan, operatör kullanımının zor olduğu ya da mümkün olmadığı uygulamalarda dronların kullanımı daha önce gerçekleştirilemeyen uygulamaların gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır. Dronlar sivil kullanımda sınır gözetleme, arama ve kurtarma, yabancı hayatın araştırılması, hava durumu izleme, trafik gözetleme, tehlikeli alan tetkiki, haritalama, taşımacılık, tarımda mahsullerin durumlarının takibi, haberleşme; askeri kullanımda ise istihbarat, gözetleme ve keşif (İng. intelligence, surveillance and reconnaissance - ISR), saldırı, kimlik tanımlama ve gösterme (İng. target identification and designation), elektronik atak ve askeri haberleşme gibi geniş bir yelpazede kullanılmaktadır [56].

#### 2.1.1 Dronların tarihçesi

Nikola Tesla geliştirdiği uzaktan kontrol sisteminin uygulama alanları hakkında görüşlerini ifade ederken ilk kez dronlar ile ilgili öngörülerde bulunmuştur[57]. Hatta dronların en büyük değerinin sivil alandaki uygulamalardan çok askeri alandaki uygulamalardan kaynaklanacağını öngörmüş ve günümüz için bile geçerli olacak bir öngöründe bulunarak askeri dronların getireceği limitsiz yıkım potansiyelinin anlaşılacak nihayetinde dünya barışına hizmet edeceğini belirtmiştir [58]. İlk insansız sistemler, I. Dünya Savaşı sırasında geliştirilmeye başlanmıştır. 1918 yılında Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Kettering Bug adı verilen modern güdümlü füzelerinde habercisi olan insansız hava torpidolarını geliştirmeye başlamıştır. İlk testler başarıyla tamamlanmış ancak savaşın sona ermesi ile bu sistemin iyileştirilmesi için yapılacak faaliyetler durdurulmuştur [59].

I. Dünya Savaşı sonrası dönemde 1930 yılına kadar dron geliştirme faaliyetlerinde durgunluk yaşanmıştır. 1930'lu yıllarda dron çalışmaları tekrar başlamıştır. Bu dönemde hem İngiltere hem de ABD uzaktan kontrol edilen uçaksavar (İng. anti-aircraft) eğitimi amaçlı kullanılan insansız hedef uçaklar üretmiştir. Dron kelimesi de, 1935 yılında insansız hedef uçağı olarak üretilen DH82 Queen Bee adlı sistemden esinlenerek kullanılmaya başlanmıştır. II. Dünya Savaşı'nda da hedef dronlar uçaksavar eğitimlerinde

kullanılmıştır. Bu dönemde ABD, B-17 Flying Fortresses isimli uçakları insansızlaştırıp silahlandırdıktan sonra Alman hedeflerine karşı kullanmayı planlamış ancak bu planını gerçekleştirememiştir. Keşif ve istihbarat toplama amaçlı üretilen dronlar ilk kez Vietnam savaşı sırasında kullanılmaya başlanmıştır. Bu dönemde dronlar ayrıca savaşta tuzak, sabit hedefleri vurma ve psikolojik savaş operasyonlarında halka havadan broşür atmak için kullanılmıştır. Dronların etki gücünün anlaşılmasıyla ABD ve İngiltere dışındaki ülkelerde dronları keşfetmeye başlamıştır [60]. Diğer devletlerin ilgisi, navigasyon, uzaktan kontrol, fabrikasyon, güç depolama sistemlerinde meydana gelen gelişmeler neticesinde dronların maliyeti düşmüş ve marketten alınarak evde hobi amaçlı kullanılabilen sistemler haline gelmiştir. Yukarıda bahsedilen platformlar Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



(a) Kettering Bug



(b) DH82 Queen Bee



(c) MQ-9 Reaper



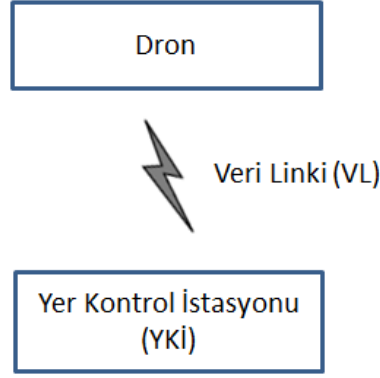
(d) DJI Spark

Şekil 2.1: Geçmişten günümüze dronlar

### 2.1.2 Dron sistem bileşenleri

Günümüzde dronlar otonom, yarı otonom ya da operatör aracılığıyla uzaktan kontrol ile kullanılabilir. Dron, sistem olarak ele alındığında Şekil 2.2’de gösterildiği gibi 3 ana bileşenden meydana gelmektedir: dron (platform), Yer Kontrol İstasyonu (YKİ) ve Veri Linki (VL) [61]. Dron operatör tarafından kontrol edildiğinde kontrol verileri sürekli olarak VL aracılığıyla drona gönderilmektedir. Ayrıca, VL üzerinden

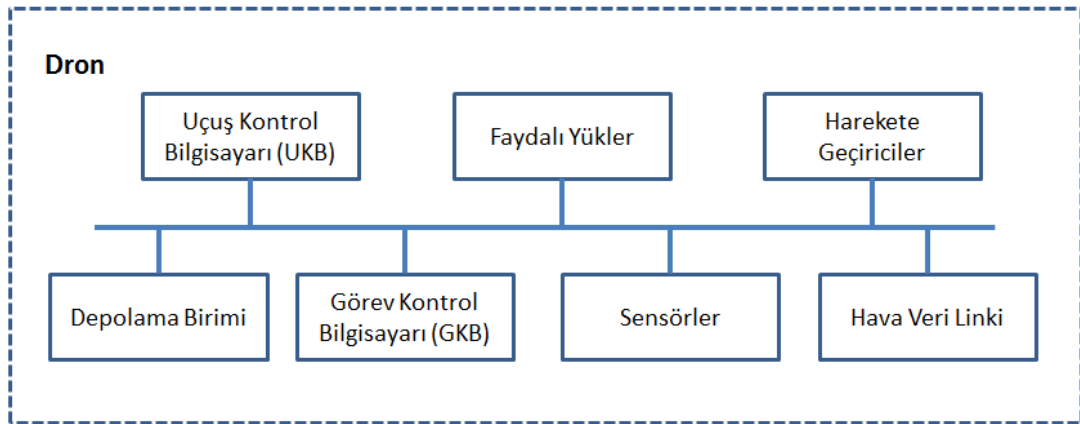




Şekil 2.2: Dron sistem bileşenleri

faydalı yükler (İng. payload) ait veriler ve dron durum bilgileri YKI'ye gönderilmektedir. Bu verilerin kritik olması sebebiyle VL genelde yedekli şekilde tasarlanmaktadır [9]. Askeri sistemlerde belli bir frekans bandının karıştırılması ihtimali düşünülerek genelde yedek VL'nin ana VL'den farklı frekans bandında çalışması tercih edilmektedir. Otonom kullanımda ise dron, üzerine önceden yüklenen rota bilgilerini takip edebilmekte ya da dinamik olarak tamamen otonom şekilde görev ihtiyaçlarını göz önünde bulundurarak kendi rotasını ve kontrolünü gerçekleştirebilmektedir. Dronlar Şekil 2.3'te gösterilen ana bileşenlerden oluşmaktadır: Uçuş Kontrol Bilgisayarı (UKB), Görev Kontrol Bilgisayarı (GKB), sensörler, faydalı yükler (İng. payloads) ve harekete geçiriciler (İng. actuators), depolama birimi, hava VL birimi.

UKB, dronun takip edeceği rotaya uygun olarak uçuş kontrol yüzeylerini sürer ve stabilite için ince ayarları sağlar. Bu fonksiyonun kritikliği düşünülerek UKB'ler ikili ya da üçlü şekilde kullanılırlar. UKB yazılım ve donanım olarak DO-178 ve DO-254 gibi güvenlik standartlarına uyumlu şekilde geliştirilirler. GKB ise görevin başarıyla tamamlanmasını sağlayacak karar destek yazılımlarını içerir ve faydalı yüklerin göreve uygun şekilde kontrolünü sağlar. Sensörler dronun seyri ve genel durumu ile ilgili verileri toplayan sistemlerdir. Ataletsel ölçüm birimi (İng. inertial measurement unit),



Şekil 2.3: Dron bileşenleri

manyetikölçer, basınç ölçer ve GPS gibi birimler sensörlere örnek verilebilir [62]. Faydalı yükler, dronun görevini icra ederken kullandığı birimlerdir.

Marketlerden alınabilen ticari dronlar üzerinde bulunan video kameralardan, askeri dronlarda kullanılan sentetik açıklık radarları (İng. synthetic aperture radar), lazer ışaretleyiciler gibi farklı birimler faydalı yükler olarak tanımlanmaktadır. Depolama birimi hem uçuş ve görev ile ilgili kritik verileri hem de VL'nin sınırlı kapasitesi nedeniyle yere indirilmesi mümkün olmayan faydalı yük verilerini (video, radar verisi vb.) saklamaktadır. Harekete geçiriciler, UKB'den aldığı kontrol bilgilerini kullanarak dron kontrol yüzeylerini sürerler. Son olarak hava VL birimi, yer VL birimi ile haberleşerek tüm verilerin uzaktan transferini sağlar.

YKİ, dron tipine ve operasyon ihtiyacına göre taşıt üzerinde taşınabilir şeltr şeklinde ya da operatör tarafından taşınabilen dayanıklı kutular kullanılarak oluşturulan sistemlerdir. Şekil 2.4, şeltr ve dayanıklı kutu kullanılarak oluşturulmuş YKİ örnekleri göstermektedir. Tüm operatör işlemleri YKİ'de sağlanan insan makine arayüzleri (İng. human machine interface - HMI) aracılığıyla gerçekleştirilir. YKİ'de gerçekleştirilen fonksiyonlar aşağıda sıralanmıştır:

- Dronun operatör tarafından manuel olarak kontrol edilmesi.
- Faydalı yüklerin operatör tarafından manuel olarak kontrol edilmesi.
- Görev öncesi faydalı yük kullanımlarının ve dron rotasının planlanması.
- Dronun gelen platform ve faydalık yüklerle ait durum bilgilerinin izlenmesi ve arıza tespiti.
- Dronun gelen verilerin kayıt edilmesi.
- Faydalı yük verilerinin işlenerek istihbarat oluşturulması.



(a) ALTI YKİ



(b) Bayraktar TB2 YKİ

Şekil 2.4: Yer kontrol istasyonları

### 2.1.3 Dronların sınıflandırılması

Farklı uygulamaların ihtiyaçlarını ve çevresel şartlarını göze alarak tasarlanmış farklı özelliklerde dronlar bulunmaktadır. Dronların kabul edilen standart bir sınıflandırması olmamakla birlikte uçuş irtifalarına göre yapılan sınıflandırmalar yaygındır. Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (İng. the north atlantic treaty organization - NATO) tarafından yapılmış sınıflandırmaya göre 3 ana dron sınıfı bulunmaktadır. Sınıf I (600 kg'dan fazla); muhabere, yüksek irtifa uzun havada kalış (İng. high altitude, long endurance - HALE) ve orta irtifa, uzun havada kalış (İng. medium altitude, long endurance - MALE ) Sınıf II (150 kg-600 kg); taktik Sınıf III (150 kg'dan az); küçük, mini ve mikro tipi dronlardan oluşmaktadır. Çizelge 2.1 ilgili kategorilerdeki dronların temel özelliklerini göstermektedir [63].

Çizelge 2.1: NATO dron sınıflandırması.

Kategori	Kullanımı	Kullanım irtifası	Görev çapı
Muhabere	Stratejik	65000 fit'e kadar	Limitsiz
HALE	Stratejik	65000 fit'e kadar	Limitsiz
MALE	Operasyonel	45000 fit'e kadar	Limitsiz
Taktik	Taktik formasyon	10000 fit'e kadar	200 km
Küçük	Taktik birim	5000 fit'e kadar	50 km
Mini	Taktik alt-birim	3000 fit'e kadar	25 km
Mikro	Taktik alt-birim	200 fit'e kadar	5 km

## 2.2 Matematiksel Optimizasyon

Matematiksel optimizasyon (MO) bir sistemdeki kaynakların bir hedef doğrultusunda en iyi şekilde kullanılmasını inceleyen disiplindir. Optimizasyon, modelleme ve çözümlenme olarak iki ayrı bileşenden oluşur. Modellemede amaç, gerçek hayatta karşılaşılan bir problemi matematiksel olarak tanımlamaktır. Model sistemden arzu edilen davranışını elde etmek için tanımlanan amaç fonksiyonundan ve kısıtlardan oluşur. Tanımlanan amaç fonksiyonu maksimize ya da minimize edilir. Kısıtlar ise eşitlik ve eşitsizlik denklemleri olarak tanımlanır. Çözümlemenin amacı ise modellenen problemin en iyi şekilde çözülerek sonuç elde edilmesidir. En iyi çözüm en kısa sürede doğru sonuca ulaşma olarak tanımlanabilir. Özellikle karar değişken sayısının çok olduğu gerçek zamanlı karar problemlerinde hızlı çalışan çözüm yöntemlerin kullanılması gerekir.

Bir optimizasyon probleminin çözümünde kesin (İng. exact), sezgisel ve meta sezgisel yöntemler uygulanabilir. Kesin yöntemler en iyi çözümü garanti ederler ve P sınıfındaki problemleri problem boyutuna bağlı olarak polinom zamanda çözerler. Ancak problemin NP-zor (İng. nondeterministic polynomial time-hard) olması durumunda

kesin algoritmalar üssel bir çaba ile çözüm üretebilmektedir. Ayrıca, orta boyutlu problemlerde bile kesin yöntemler çözümü imkansız hale getirebilmektedir. Bu durumda çözüm uzayının belli bir kısmının tarandığı hızlı çalışan sezgisel ya da meta sezgisel yöntemler ile optimal olmayan ancak optimale yakın çözümler bulmak uygun bir yaklaşımdır [64]. Sezgisel yöntemler probleme özel olarak tasarlanırken meta sezgisel yöntemler genel tasarımlardır ve birçok probleme uygulanabilirler.

## 2.2.1 Matematiksel optimizasyonun temel özellikleri

Genel bir MO modeli Şekil 2.5'deki gibi tanımlanmaktadır. Burada  $x = (x_1, \dots, x_n)$  vektörü problemin karar değişkenini, fonksiyon  $f_0 : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  minimize edilmek istenen amaç fonksiyonunu,  $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, \dots, m$ , kısıt fonksiyonlarını (eşitsizlik),  $b_1, \dots, b_m$  kısıtlar için limitleri,  $x \in \mathbb{R}^n$  karar değişken vektörünün tanım kümesini göstermektedir [65].

<p>Minimum <math>f_0(x)</math> Kısıtlar:</p> $f_i(x) \leq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.1)$ $x \in \mathbb{R}^n \quad (2.2)$
---

Şekil 2.5: Genel bir MO modeli

Bir MO problemi amaç ve kısıt fonksiyonlarının formuna göre doğrusal (İng. linear) program ya da doğrusal olmayan (İng. nonlinear) program şeklinde sınıflandırılır. Şekil 2.5'deki problemde amaç ve kısıt fonksiyonlarının  $f_0, \dots, f_m$  doğrusal olması durumunda problem, doğrusal problem olarak adlandırılır. Bu durum matematiksel olarak Şekil 2.6'daki eşitlikle ifade edilir. Bir problem doğrusal değilse doğrusal olmayan problem olarak isimlendirilir.

<p><math>f_i(\alpha x + \beta y) = \alpha f_i(x) + \beta f_i(y), \quad i = 1, \dots, m</math> Kısıtlar:</p> $x, y \in \mathbb{R}^n \quad (2.3)$ $\alpha, \beta \in \mathbb{R} \quad (2.4)$
--

Şekil 2.6: MO modelinde doğrusallık şartı

MO problemlerinin bir diğer sınıflandırması da problemin konveks olup olmamasına göre yapılır. Eğer amaç ve kısıt fonksiyonları konveks ise problem konveks optimizasyon problemi olarak tanımlanır. Matematiksel olarak Şekil 2.7'deki eşitsizliğin ve kısıtların sağlanması durumunda problemin konveks olduğu ifade edilir. Şekil 2.6 ve

Şekil 2.7'deki tanımlamalara göre konveksite daha geneldir ve her doğrusal problem bir konveks optimizasyon problemidir.

$f_i(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f_i(x) + \beta f_i(y), \quad i = 1, \dots, m$ <p>Kısıtlar:</p> $x, y \in \mathbb{R}^n \quad (2.5)$ $\alpha, \beta \in \mathbb{R} \quad (2.6)$
--

Şekil 2.7: MO modelinde konveksite şartı

Amaç ve kısıt fonksiyonlarının herhangi birinde ya da her ikisinde konveks olmayan (İng. non convex) bileşenlerin olması durumunda problem konveks olmayan optimizasyon problemi olarak tanımlanır. Optimizasyon alanının geliştiği dönemlerde daha çok konveks problemler üzerinde çalışılmıştır [66]. Ancak son zamanlarda sinyal işleme, makine öğrenmesi, kontrol, haberleşme sistemleri gibi alanlardaki modern uygulamalarda tanımlanan problemler konveks olmayan yapıda olmaktadır. Bu problemlerin gevşetilmesi (İng. relaxation) ile elde edilen konveks problemler klasik yöntemlerle çözüldüğünde sonuçlarda önemli kayıplar olabileceği gibi büyük ölçekli problemlerin çözümünde tamamen etkisiz kalabilmektedirler. [67, 68]. Bu durum en az NP-zor olduğu bilinen konveks olmayan optimizasyon problemlerine [69] olan ilgiyi arttırmıştır. Bu kapsamda belli kaynak limitleri içerisinde zor problemlere optimuma yakın çözümler üreten meta sezgisel yöntemlere olan ilgi de artmıştır.

### 2.3 Meta sezgisel optimizasyon yöntemleri

Zor optimizasyon problemleri genel olarak optimal olarak çözülemeyen ya da kesin yöntemlerle mantıklı bir sürede çözülemeyen problemler olarak tanımlanırlar. Meta sezgisel yöntemler özellikle bu problemlerin çözülmesinde kullanılmaktadır [70]. Meta sezgisel yöntemler, probleme özgü özel bir tasarım gerektirmeden bilimin farklı alanlarında ortaya çıkan zor optimizasyon problemleri çözmek için tasarlanmıştır. Bu kapsamda bakıldığında, Yunanca kökenli Türkçede üst seviye anlamına gelen Meta öneki, bu algoritmaların problem spesifik yöntemlerden (sezgisel) farklı olduğunu ifade etmektedir. Günümüzde meta sezgisel yöntemler finans, işletme, mühendislik, temel bilimler gibi birçok alanda zor problemlerin çözümünde kullanılmaktadır.

Meta sezgisel yöntemler benzer karakteristik özelliklere sahiptirler. Doğada gözlenen bir takım olaylardan yada canlı davranışlarından esinlenerek geliştirilirler. Bu yöntemler bir takım rastgele elemanlar içerirler. Bu sayede yerel optimal değerde takılma olasılıklarını düşürürler. Amaç fonksiyonu bir takım matematiksel operasyonlara tabi tutulmaz. Problemin en iyi şekilde çözümü için bazı parametrelerin ayarlanması gerekir[64]. Bir meta sezgisel yöntemin başarılı olması birbirine zıt olan çeşitlendirme ve yoğunlaştırma arasında kuracağı dengeye bağlıdır. Çeşitlendirme çözüm uzayının geniş şekilde taranmasını sağlar. Bu sayede yerel optimuma takılma ihtimali azaltılır.

Yoğunlaştırma ise iyi bir çözüm bulunduğu bölgeyi daha sık şekilde tarayarak optimum çözümü elde etmeye çalışır. Çeşitlendirmede ve yoğunlaştırmada arama uzayının nasıl tarandığı, kaynakların nasıl kullanıldığı meta sezgisel yöntemleri birbirinden ayıran karakteristik özelliklerdir [71]. Meta sezgisel yöntemler popülasyon temelli ya da tek çözüm temelli yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır [72]. Çizelge 2.2’de meta sezgisel yöntemlerin sınıflandırılması sunulmuştur.

Çizelge 2.2: Meta sezgisel yöntemler.

Popülasyon temelli optimizasyon yöntemleri	Tek çözüm temelli optimizasyon yöntemleri
Parçacık sürü optimizasyonu	Tabu arama
Karınca kolonisi algoritması	Tekrarlı yerel arama
Biyocoğrafya tabanlı optimizasyon	Değişken komşuluk arama
Arı kolonisi algoritması	Benzetimli tavlama
Evrimsel programlama	Rehberli yerel arama

### 2.3.1 Meta sezgisel optimizasyonun tarihçesi

Meta sezgisel yöntemlere olan ilgi 1980’li yıllardan başlayarak günümüze kadar artarak devam etmiştir. Kirkpatrick ve arkadaşlarının 1982 yılında geliştirdiği benzetimli tavlama (İng. simulated annealing - SA) meta sezgisel yöntemler için bir dönüm noktası olmuştur [73]. SA yöntemi, [73]’teki çalışmada bilgisayar tasarımı esnasında ortaya çıkan kombinasyonel optimizasyon problemlerine uygulanmıştır. 1986 yılında Glover tabu arama (İng. tabu search - TS) metodunu önermiştir [74]. 1988 yılına gelindiğinde Koza genetik programlama (İng. genetic programming) ile ilgili ilk patent başvurusunu yapmış ve sonrasında genetik programlama ile ilgili kitabını 1992 yılında yayınlamıştır [75]. Genetik programlama ile ilgili bir diğer önemli çalışma Goldberg tarafından yapılmış ve 1989 yılında kitap olarak yayınlanmıştır [76]. 1992 yılında Dorigo doktora çalışmaları sırasında geliştirdiği yenilikçi yöntemi karınca kolonisi (İng. ant colony) algoritması olarak sunmuştur [77]. Walker ve arkadaşları 1993 yılında arı kolonisi algoritmasını önermişlerdir [78]. Meta sezgisel yöntemlerde bir diğer önemli gelişme 1995 yılında olmuştur. Kennedy ve Eberhart parçacık sürü optimizasyonu (İng. particle swarm optimization - PSO) yöntemini geliştirdiler [79]. Storn ve Price, 1997 yılında diferansiyel evrim (İng. differential evolution) algoritmasını geliştirmişlerdir. 2008 yılında Simon biyocoğrafya tabanlı optimizasyon (İng. biogeography based optimization - BBO) yöntemini sunmuştur. Bu tez çalışmasında yukarıda bahsedilen yöntemlerden PSO ve BBO popülasyon temelli optimizasyon yöntemi olarak; TS, ve SA tek çözüm temelli optimizasyon yöntemi olarak kullanılmıştır.

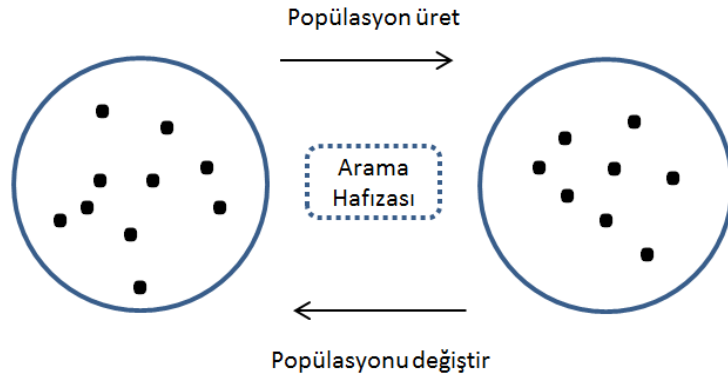
### 2.3.2 Popülasyon Temelli Meta Sezgisel Yöntemler

Popülasyon temelli yöntemler ilk olarak üretilmiş çözüm popülasyonunu ile başlar. Daha sonra tekrarlı şekilde yeni popülasyon üretilir ve mevcut popülasyon ile yer de-

ğiştirilir. Yer değiştirme aşamasında bir takım seçim kriterleri uygulanır. İteratif olarak devam eden bu sũreę durdurma kriterine ulaşıldığında sona erer. Popũlasyon ũretiminde ve yer değiştirmede hafızadan yararlanılabilmektedir. Hafıza olmaması durumunda popũlasyon ũretimi ve yer değiştirme sadece mevcut popũlasyona gũre yapılır. Bu iki aşamada hafızadan yararlanılması durumunda geğmiş popũlasyonlara ait bazı bilgiler kayıt edilmekte ve kullanılmaktadır. Popũlasyon temelli algoritmaların çoğu doğadan esinlenerek tasarlanmıştır. Paręacık sũrũ optimizasyonu, karınca kolonisi algoritması, arı kolonisi algoritması yaygın kullanılan popũlasyon temelli meta sezgisel yũntemlerdir. Şekil 2.8 popũlasyon temelli meta sezgisel yũntemlerin temel yaklaşımını gũstermektedir.

Popũlasyon temelli meta sezgisel yũntemler popũlasyon ũretim methoduna, popũlasyonlar arası seçim kriterlerine ve arama hafızası kullanım yũntemine gũre birbirlerinden ayrılırlar.

- 1. Arama Hafızası:** Popũlasyon temelli yũntemlerde hafıza arama sırasında ęıkarılan ve kaydedilen bilgi setini ifade eder. Hafızanın iğeriği kullanılan popũlasyon temelli yũnteme gũre değişiklik gũsterir. Örneğin, evrimsel algoritmalarda arama hafızası ęözũm popũlasyonu ile sınırlıyken, karınca kolonisi algoritmasında feromon matrisi (İng. pheromone matrix) arama hafızasının temel komponentidir. ęizelge 2.3, sıklıa kullanılan bazı popũlasyon temelli algoritmalarının kullandığı arama hafızası yũntemlerini gũstermektedir.
- 2. Popũlasyon ũretimi:** Bu aşamada ũretim stratejisine gũre yeni ęözũm popũlasyonları ũretilir. ũretim stratejisi evrimsel temelli ve karatahta temelli olarak gruplanabilir. İlkinde popũlasyon ũretimi varyasyon operatũrũnũn işleyişine gũre yapılmaktadır. Varyasyon operatũrũ biyolojik sistemlerde meydana gelen mutasyon, rekombinasyon gibi işlemlerden esinlenir ve ęözũm popũlasyonunda benzer yaklaşımla yeni ęözũm popũlasyonları ũretir. Karatahta temelli ũretimde ęözũm popũlasyonu paylaşılan hafızanın ũretiminde kullanılır. Paylaşılan hafıza yeni ęözũm popũlasyonu için ana girdiyi oluşturur. Arı kolonisi algoritması karatahta temelli popũlasyon ũretimine ũrnektir. Bu algoritmada paylaşılan hafıza feromon matrisi ile temsil edilmektedir.



Şekil 2.8: Popũlasyon temelli meta sezgisel yũntemlerde temel yaklaşım

- 3. Seçim Yöntemi:** Mevcut popülasyondan ve üretilen popülasyondan yeni çözümlerin seçilmesi ile çözümde kullanılacak popülasyon elde edilir. Bazı yöntemlerde üretilen popülasyon yeni çözüm popülasyonu olarak kullanılırken bazı yöntemlerde elitlik durumu göz önünde bulundurularak seçim işlemi yapılır. Örneğin parçacık sürü optimizasyonunda yeni popülasyon üretilirken hem en iyi parçacık konumu hem de ilgili parçacığın en iyi yerel pozisyonu dikkate alınır.

Çizelge 2.3: Popülasyon temelli yöntemlerde arama hafızaları.

Popülasyon temelli yöntem	Arama hafızası
Parçacık sürü optimizasyonu	Parçacık popülasyonu, global ve yerel çözümler
Karınca kolonisi algoritması	Feromon matrisi
Biyocoğrafya tabanlı optimizasyon	Birey popülasyonu
Arı kolonisi algoritması	Arı popülasyonu

### 2.3.2.1 Parçacık sürü optimizasyonu

PSO sürü zekasından esinlenmiş olasılıksal popülasyon temelli meta sezgisel bir yöntemdir [80]. Bu yöntem yiyecek bulmaya çalışan balık ya da kuş sürüsü gibi hayvan sürülerinin sosyal davranışını taklit eder. Bu sürülerde popülasyondaki hayvanlar merkezi bir kontrol olmadan yerel hareketlerle koordineli bir davranış ortaya çıkarırlar. Başlangıçta sürekli optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir ancak birçok farklı tipteki optimizasyon probleminde başarıyla uygulanmaktadır.

PSO'da  $N$  adet parçacıktan oluşan bir sürü,  $D$  boyutlu bir arama uzayında hareket eder. Her parçacık problem için bir çözüm adayıdır. Her  $i$  parçacığı kendi pozisyonu  $x_i$  ve pozisyondaki değişimi gösteren vektörü  $v_i$  (hız olarak da ifade edilmektedir) ile karakterize edilmektedir. Hız, parçacığın yerel en iyi pozisyonu  $lbest_i$  ve parçacıklar içerisindeki global en iyi pozisyonu  $gbest$  ile birlikte olasılıksal parametreler kullanılarak elde edilir.  $x_i(t)$  her iterasyonda Şekil 2.9'daki şekilde hareket eder. Burada tanımlanan  $\varphi_1$  ve  $\varphi_2$  rastgele değişkenlerdir ve  $U[0, 1]$  aralığından rastgele seçilirler.  $C_1$  ve  $C_2$  öğrenme faktörü sabitleri olarak adlandırılır ve parçacığın kendi tecrübesi ile sosyal öğrenmesi arasındaki ilişkiyi yönetirler. Eğer  $C_1 \leq C_2$  ise parçacık sosyal öğrenmeden daha çok yararlanırken,  $C_2 \leq C_1$  ise parçacık kendi tecrübesini önceliklendirir. Eylemsizlik katsayısı  $\omega$  ise geçmiş hızın yeni hızdaki ağırlığını kontrol eder. Büyük  $\omega$  kullanılması durumunda global arama artar ve çeşitlilik sağlanır, küçük  $\omega$  kullanıldığında ise yerel arama iyileşir. Sistemde ayrıca  $V_{max}$  tanımlanarak arama uzayında patlayıcı şekilde büyük adımlarla taramanın yapılmaması sağlanır.

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t-1) \quad (2.7)$$

$$v_i(t) = \omega v_i(t-1) + C_1 \varphi_1(lbest_i - x_i(t-1)) + C_2 \varphi_2(gbest - x_i(t-1)) \quad (2.8)$$

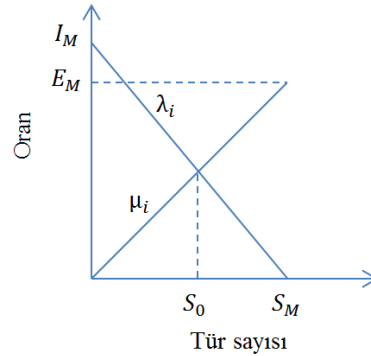
Şekil 2.9: Parçacık hareket modeli



### 2.3.2.2 Biyocoğrafya tabanlı optimizasyon

İsminden anlaşılacağı gibi BBO yöntemi, hayvanların ve bitkilerin farklı habitatlarda belli bir zaman diliminde dağılımını inceleyen biyocoğrafya biliminden yararlanılarak geliştirmiştir. Biyocoğrafya temelde A. Wallace [81] ve C. Darwin [82] tarafından geliştirilmiş tanımlayıcı bir çalışma alanıdır. Ancak 1967 yılında MacArthur ve Wilson [83] türlerin bir habitat içerisindeki sayılarını tahmin etmeye yönelik matematiksel modeller geliştirerek biyocoğrafya bilimine bakışı değiştirmişlerdir. Literatüre bakıldığında BBO yöntemi tek amaçlı [84], çok amaçlı [85, 86] ve kısıtlı optimizasyon [87] problemlerinde başarılı olarak uygulandığı görülmektedir.

Biyocoğrafyanın matematiksel modelleri çeşitli adalardaki türlerin göçlerini, türleşmelerini ve nesillerinin yokoluşunu tanımlamaktadır. Ada ifadesi birbirinden coğrafik olarak izole olan habitatlar için kullanılmaktadır. Türler için uygun yaşam koşulları sağlayan habitatlar yüksek habitat uygunluk indeksine (İng. high suitability index - HSI) sahiptirler. HSI değeri yağış durumu, hava sıcaklığı, bitkisel ve topografik farklılık gibi bir çok faktöre bağlıdır. Yaşanabilirliği karakterize eden faktörler uygunluk indeks değişkenleri (İng. suitability index variables - SIV) olarak tanımlanmaktadır. Yüksek HSI değerine sahip habitatlarda tür sayısı fazladır. Bir  $H_i$  habitatında göç alma oranı  $\lambda_i$  ve göç etme oranı  $\mu_i$ , Şekil 2.10'da gösterilen doğrusal modele göre hesaplanabilir [88].



Şekil 2.10: Bir adadaki türlerin göç modeli

Göç alma ve göç etme oranları

$$\lambda_i = I_M \left( 1 - \frac{S_i}{S_M} \right) \mu_i = E_M \left( \frac{S_i}{S_M} \right) \quad (2.9)$$

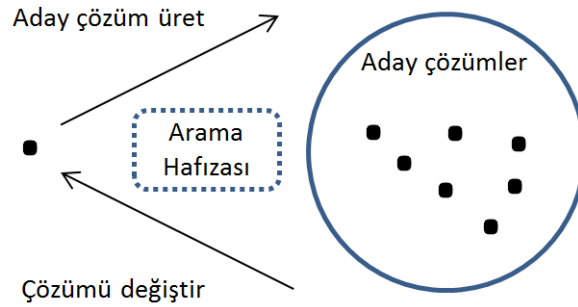
şeklinde hesaplanır. Burada  $I_M$  maksimum göç alma oranını,  $E_M$  maksimum göç verme oranını,  $S_i$  habitat  $H_i$ 'deki tür sayısını,  $S_M$  maksimum tür sayısını göstermektedir.

BBO yöntemine aday çözümler habitat, habitatın HSI değeri de amaç fonksiyonunun değerine karşılık gelmektedir. Yüksek HSI'lı habitatdan düşük HSI değerli habitatla göç edilmesi durumunda zayıf habitatların HSI değeri artmaktadır. HSI değeri yüksek olan habitatlar değişime karşı dirençlidirler ve düşük HSI'lı habitatların iyileştirilme-

sine yardımcı olurlar. BBO'nun algoritmik akışı iki mekanizma yardımı ile gerçekleşir; göç ve mutasyon. Göç, iyi bir HSI değeri olan habitatın özelliklerinin düşük HSI değerli bir habitat ile paylaşılmasını sağlayan operatördür. Mutasyon ise her habitatda rastgele seçilen SIV'lerin değiştirilmesini sağlayan diğer operatördür. Mutasyonun amacı arama uzayının daha iyi taranması ve bu sayede daha iyi çözüm elde etmektir. BBO yönteminde mutasyon olasılığının ( $p_{mut}$ ) yüksek olması üretilen çözümlerin değişme olasılığının yüksek olduğunu gösterir. BBO'daki bir diğer önemli parametrede elit çözümlerin sayısıdır ( $N_E$ ). Elit çözümler her tekrardaki en iyi çözümlerdir. BBO'da, istenen sonuç performansına ve çözüm zamanına göre toplam habitat sayısı ( $N_{hab}$ ) ve tekrar sayısı ( $N_{ik}$ ) ilkendirme parametreleri olarak tanımlanır.

### 2.3.3 Tek Çözüm Temelli Meta Sezgisel Yöntemler

Tek çözüm temelli meta sezgisel yöntemler tek bir çözümün iyileştirilmesi hedefler. Çözüm uzayında bir rotada ya da bir alanda tekrarlı dolaşım gerçekleştirilerek en iyi çözüm aranır [89]. Bu yöntemlerde geçerli çözüm üzerinden tekrarlı şekilde yeni çözüm üretilmesi ve çözümün değiştirilmesi Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Çözüm üretim aşamasında geçerli çözüm  $s$  üzerinden aday çözüm seti  $C(s)$  üretilir. Yer değiştirme aşamasında  $C(s)$  içerisinde yeni çözüm  $s'$  seçilir. Bu tekrarlı süreç durma kriteri sağlanana kadar devam eder. Çözüm üretim süreci hafızasız olabilir. Bu durumda hem üretim hem de yer değiştirme aşamalarında geçerli çözüm temel alınır. Hafıza olması durumunda, geçmiş arama sonuçlarından yararlanılarak aday çözümler üretilir. Yerel arama, SA, TS, tek çözüm temelli meta sezgisel yöntemlere örnek olarak verilebilir.



Şekil 2.11: Tek çözüm temelli meta sezgisel yöntemlerde temel yaklaşım

#### 2.3.3.1 Benzetimli tavlama

Maddelerin ısıtılması ve yavaşça soğutulmuş güçlü krital yapıların oluşturulması sürecinden esinlenerek geliştirilen SA optimizasyon yöntemi kolay şekilde uygulanabilmesi ve başarılı sonuçlar üretmesi sebebiyle ilk aşamada kombinasyonel optimizasyon problemlerinde [73] uygulanmış daha sonra sürekli optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır [90–92]. Olasılıksal bir yöntem olan SA, bazı şartlar

altında çözümün kötüleşmesini kabul eder. Böylece yerel optimumdan kaçınılır. SA arama geçmişinden yararlanmadığı için hafızasız bir yöntemdir.

SA, ilk çözümden başlayarak tekrarlı şekilde durma kriteri karşılanana kadar devam eder. Her tekrarda rastgele bir komşu yaratılır. Amaç fonksiyonunu iyileştiren tüm hareketler kabul edilir. Amaç fonksiyonunda iyileşme yoksa üretilen çözüm geçerli sıcaklığa ( $T_b$ ) ve çözümdeki kötüleşmeye ( $\Delta_E$ ) bağlı bir olasılık ile kabul edilir.  $\Delta_E = f(s') - f(s)$ , yeni komşu çözüm ile geçerli çözüm arasındaki farkı göstermektedir. Tekrar adımı ilerledikçe kötü çözümlerin kabul edilme olasılığı düşer. Kötü çözümün kabul edilme olasılığı

$$p(\Delta_E, T_b) = \exp^{-\frac{\Delta_E}{kT_b}} \quad (2.10)$$

şeklinde formüle edilmektedir. Burada  $k$  Boltzmann sabitidir.  $T_b$ , kötü çözümün kabul edilme olasılığını kontrol eder. T, tekrar adımı küçükken çözüm uzayında çok sayıda keşif yapılmasına olanak sağlarken denge durumuna ulaşıldığında  $T_b$  kontrollü şekilde azaltılarak sadece bazı kötü çözümlerin kabul edilmesi sağlanır.

### 2.3.3.2 Tabu arama

TS yöntemi, SA yönteminden farklı olarak geçmiş arama hafızasını kullanarak yeni çözüm üretir. TS yönteminde geçmiş aramalara ilişkin tabu listesi oluşturulur ve bu liste kullanılarak aynı çözümlerin tekrar kullanılması önlenir [74]. Bunu yapmak için çözümler etrafında tabu adı verilen hiperdörtgenler oluşturulur. Bu bölgelerde tekrar arama yapılmasını önlemek amacıyla bu alan giren çözümler reddedilirler.

TS yönteminde öncelikle belli sayıda rastgele çözüm üretilir. Tabu bölgeleri hiperdörtgenler olarak her çözüm etrafında belirlenir. En iyi çözüm etrafında tekrar belli bir dağılıma göre çözümler üretilir. Bu çözümler içerisinde tabu listesinde olanlar reddedilirler. Reddedilen çözüm sayısının çok olması durumunda yeni çözüm üretiminde kullanılan dağılımın standart sapması azaltılarak reddedilen çözüm sayısı azaltılır. Tekrar adımı ilerledikçe hiperdörtgenler küçültülür ve yoğunlaşma artırılarak belli bölgelerde en iyi çözüm aranır [93].



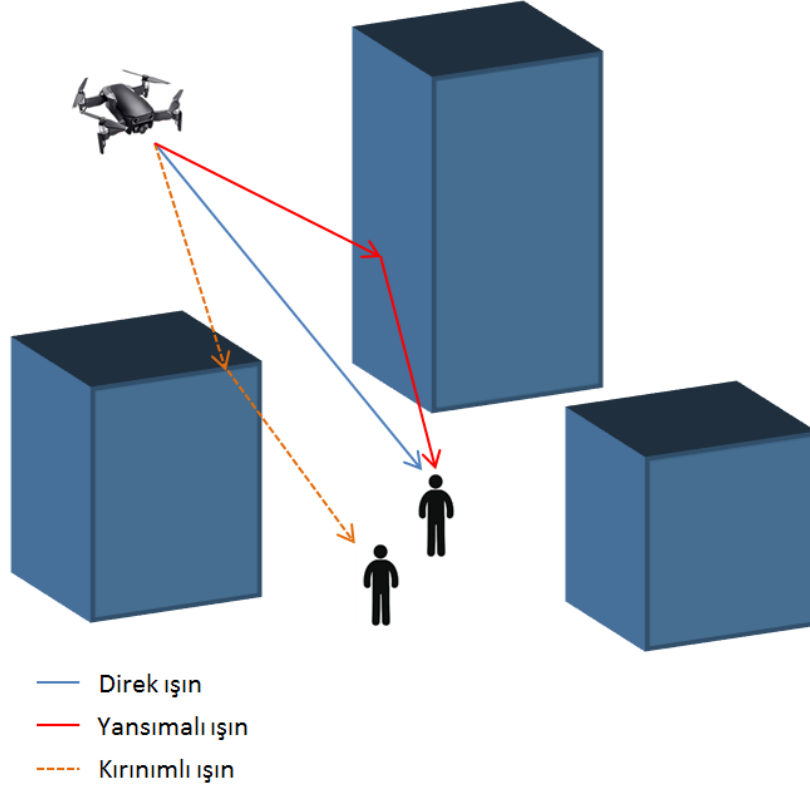
### 3. SİSTEM MODELİ

Tez çalışmasının bu bölümünde hava yer kanal modeli ve kullanıcı veri kapasitesinin bulunması için kullanılan formülasyonlar sunulmuştur.

#### 3.1 Hava Yer Kanal Modeli

DBİ konumlama problemlerine olan ilgi Al-Hourani'nin 2014 yılında yayımlandığı hava yer kanal modeli çalışması ile büyük hız kazanmıştır[38]. Bu çalışmada sönümlenme (İng. fading) göz önünde bulundurulmadan mesafe ve gölgeleme (İng. Shadowing) etkilerini içeren istatistiksel bir kanal modeli geliştirilmiştir. Kanal modelinin sönümlenme etkilerini içermemesi DBİ'lerin çok küçük olan sönümlenme süresi içerisinde konum değiştirmesinin mümkün olmaması sebebiyle bir eksiklik olarak görülmektedir. Geliştirilen kanal modeli, şehir yoğunluk tipine (banliyö, şehir, yoğun şehir, çok yoğun şehir) göre değiştirilebilir parametreler içerdiği için genel ve kullanışlı bir model sunmaktadır. Bu sebeple literatürde çok yaygın şekilde kullanılmaktadır. Hava yer kanal modeli oluşturulurken kabul edilen varsayımlar aşağıda sıralanmıştır.

- Bina yükseklikleri rastgele şekilde [94]'te sunulan yükseklik dağıtım fonksiyonu kullanılarak üretilmiştir.
- Binaların genişlikleri ve binalar arası mesafeler sabit tutulmuştur.
- Binaların dikdörtgen şeklinde olduğu varsayılmıştır.
- Bina yüzeylerinin beton olduğu varsayılmıştır. Böylelikle yansıma göz önünde bulundurulmuştur.
- Saçılım (İng. scattering) için tüm bina köşelerinin bıçak sırtı gibi olduğu varsayılmıştır. Bu deterministik yayılım hesaplarının yapılmasına olanak sağlamıştır. Yüzeyin düzgün olmamasından kaynaklanan yayılım etkileri göz önünde bulundurulmamıştır.
- Ağaçlar, mobil nesnelere, trafik lambaları gibi yapılar ihmal edilmiştir.
- Radyo yayılımının direk, yansıma ve kırınım (İng. diffraction) esaslarında olduğu varsayılmış, bina içerisinden geçen sinyaller ihmal edilmiştir. Şekil 3.1'de radyo ışın yayılım tipleri gösterilmiştir.



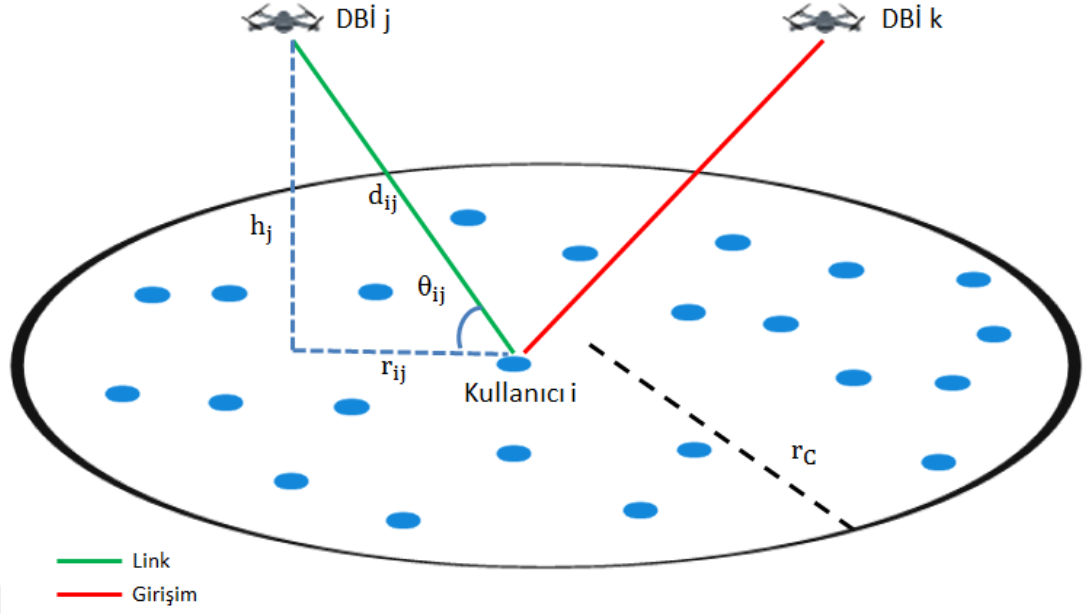
Şekil 3.1: Radyo ışın yayılım tipleri

Hava yer kanal modelinde alınan sinyaller özelliklerine göre 3 grup altında toplanmaktadır. İlk gruptaki sinyaller alıcının tam görüş hattı ya da görüş hattına yakın olarak aldığı sinyallerdir. İkinci grup sinyaller, alıcı görüş hattı içerisinde değilken elde edilir. Alıcının görüş hattı içerisinde olmamasına rağmen, yansıma ve kırınım ile güçlü sinyaller alınabilmektedir. Üçüncü tip sinyaller, yine alıcının görüş hattı içerisinde olmadığı aynı zamanda düşük güçteki sinyallerden oluşur. Üçüncü gruptaki sinyaller, toplam sete çok az katkıda buldukları için ihmal edilebilirler.

Girişimin göz önünde bulundurulduğu, birden çok DBİ'nin  $r_C$  yarıçaplı bir hücrede kullanımını gösteren sistem modeli Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Kullanıcılar  $\mathcal{U} = \{1, \dots, U\}$  seti ile DBİ'ler ise  $\mathcal{D} = \{1, \dots, D\}$  seti ile gösterilmektedir. DBİ  $j$ 'nin yayınladığı sinyal kullanıcı  $i$  tarafından görüş hattında ya da görüş hattı dışında alınabilir. Kullanıcı  $i$  ile DBİ  $j$  arasındaki görüş hattı yol kaybı  $PL_{LoS}^{ij}(\theta_{ij})$  ile gösterilmekte,

$$PL_{LoS}^{ij}(\theta_{ij}) = 10\gamma \log \left( \frac{4\pi d_{ij}(\theta_{ij}) f_c}{c} \right) + \eta_{LoS}(\theta_{ij}), \quad (3.1)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada,  $\gamma$  yol kaybı katsayısını,  $f_c$  sistemin çalıştığı frekansı,  $c$  ışık hızını,  $d_{ij}(\theta_{ij}) = \frac{h_j}{\sin(\theta_{ij})}$  ve  $\theta_{ij}$  sırasıyla kullanıcı  $i$  ile DBİ  $j$  arasındaki uzaklığı ve yükseliş açısını,  $h_j$  DBİ  $j$ 'nin irtifasını,  $\eta_{LoS}(\theta_{ij})$  kullanıcı  $i$  ile DBİ  $j$  arasındaki görüş hattı aşırı yol kaybı bileşenini göstermektedir.



Şekil 3.2: Sistem modeli

Görüş hattı dışı yol kaybı  $PL_{NLoS}^{ij}$  ile gösterilmekte,

$$PL_{NLoS}^{ij}(\theta_{ij}) = 10\gamma \log \left( \frac{4\pi d_{ij}(\theta_{ij}) f_c}{c} \right) + \eta_{NLoS}(\theta_{ij}), \quad (3.2)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada  $\eta_{NLoS}(\theta_{ij})$  kullanıcı  $i$  ile DBI  $j$  arasındaki görüş hattı dışı aşırı yol kaybı bileşenini göstermektedir. Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 arasındaki fark aşırı yol kaybı bileşenlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu bileşenler Gaussian dağılımlı değişkenler olarak,

$$\eta_{LoS}(\theta_{ij}) \sim \mathcal{N}(\mu_{LoS}, \sigma_{LoS}^2(\theta_{ij})), \quad (3.3)$$

$$\eta_{NLoS}(\theta_{ij}) \sim \mathcal{N}(\mu_{NLoS}, \sigma_{NLoS}^2(\theta_{ij})), \quad (3.4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $\mu_{LoS}$  ve  $\mu_{NLoS}$  sırasıyla görüş hattı ve görüş hattı dışı ortalama aşırı kayıpları,  $\sigma_{LoS}$  ve  $\sigma_{NLoS}$  ise linklerdeki standart sapmaları göstermektedir.  $\sigma_{LoS}$  ve  $\sigma_{NLoS}$  değerleri yükseliş açısına bağlı olarak değişmektedir ve

$$\sigma_{LoS}(\theta_{ij}) = \alpha_1 \exp(-\beta_1 \theta_{ij}), \quad (3.5)$$

$$\sigma_{NLoS}(\theta_{ij}) = \alpha_2 \exp(-\beta_2 \theta_{ij}), \quad (3.6)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Denklemlerdeki  $(\alpha_1, \beta_1)$  and  $(\alpha_2, \beta_2)$  kullanılan frekansa ve çevre şartlarına göre (banliyö, şehir, yoğun şehir, çok katlı şehir) belirlenmiş parametrelerdir.

Uluslararası telekomünikasyon birliğinin (İng. the international telecommunication union - ITU) yayınladığı tavsiye dokümanında kullanıcı ile baz istasyonu arasındaki linkin

geometrik olarak görüş hattında olma ihtimali alıcının ve vericinin yüksekliğine ve 3 farklı istatistiksel parametreye ( $\kappa, \lambda, \zeta$ ) bağlı olarak tanımlanmıştır [94]. Buna göre kullanıcı  $i$  ile DBİ  $j$  arasındaki linkin yükseliş açısına bağlı olarak görüş hattında olma ihtimali  $p_{LoS}^{ij}(\theta_{ij})$

$$p_{LoS}^{ij}(\theta_{ij}) = \prod_{n=0}^m \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\left[ h_j - \frac{(n+\frac{1}{2})(h_j-h_i)}{m+1} \right]^2}{2\zeta^2} \right) \right], \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilebilir [39]. Burada  $m = \lfloor (r_{ij}\sqrt{\kappa\lambda} - 1) \rfloor$  ve  $r_{ij} = \frac{h_j}{\tan(\theta_{ij})}$  kullanıcı  $i$  ile DBİ  $j$  arasındaki yatay mesafeyi,  $\kappa$  şehirde inşa edilmiş alanın toplam alana oranını,  $\lambda$  birim alanda ( $km^2$ ) bulunan ortalama bina sayısını,  $\zeta$  ise bina yüksekliklerini tanımlayan Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonundaki  $f(H) = \frac{H}{\zeta^2} \exp\left(-\frac{H^2}{\zeta^2}\right)$  ölçeklendirme parametresidir. Denklem 3.7 incelendiğinde görüş hattı ihtimalinin çalışma frekansından bağımsız olduğu görülmektedir. [39]'da Denklem 3.7,  $\kappa, \lambda, \zeta$  parametreleri banliyö (0.1, 750, 8), şehir (0.3, 500, 15), yoğun şehir (0.5, 300, 20) ve çok katlı şehir (0.5, 300, 50) için uygulanmış ve bu denklem basitleştirilerek,

$$p_{LoS}^{ij}(\theta_{ij}) = \frac{1}{1 + a \exp(-b(\theta_{ij} - a))}, \quad (3.8)$$

şeklinde bir s-biçimli fonksiyon elde edilmiştir. Bu denklemde  $a$  ve  $b$  fonksiyon parametreleridir ve banliyo için (0.1, 21), şehir için (1.0, 20), yoğun şehir için (1.6, 23), çok katlı şehir için (2.3, 34) olarak bulunmuşlardır. Linkin görüş hattı içinde olmaması ihtimali ise  $p_{NLoS}^{ij}$  şeklinde ifade edilir ve

$$p_{NLoS}^{ij}(\theta_{ij}) = 1 - p_{LoS}^{ij}(\theta_{ij}), \quad (3.9)$$

şeklinde hesaplanır.

Görüş hattı ihtimal denklemleri 3.8, 3.9 ve yol kaybı denklemleri 3.1, 3.2 kullanılarak yükseliş açısına bağlı ortalama yol kaybı

$$PL_{ij}(\theta_{ij}) = PL_{LoS}^{ij}(\theta_{ij})p_{LoS}^{ij}(\theta_{ij}) + PL_{NLoS}^{ij}(\theta_{ij})(1 - p_{LoS}^{ij}(\theta_{ij})), \quad (3.10)$$

şeklinde formüle edilir.

DBİ yerleşim problemlerinde Denklem 3.1 ve 3.2 basitleştirilerek kullanılabilir. Bu durumda Gauss dağılıma sahip aşırı yol kaybı bileşenleri  $\eta_{LoS}(\theta_{ij})$ ,  $\eta_{NLoS}(\theta_{ij})$  yerine dağılım ortalamaları  $\mu_{LoS}$  ve  $\mu_{NLoS}$  kullanılır. Bu durumda ortalama yol kayıpları

$$PL_{LoS}^{ij}(\theta_{ij}) = 10\gamma \log \left( \frac{4\pi d_{ij}(\theta_{ij}) f_c}{c} \right) + \mu_{LoS}, \quad (3.11)$$

$$PL_{NLoS}^{ij}(\theta_{ij}) = 10\gamma \log \left( \frac{4\pi d_{ij}(\theta_{ij}) f_c}{c} \right) + \mu_{NLoS}, \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilir.



### 3.2 Kullanıcı Veri Kapasitesi

Kullanıcı veri kapasitesinin hesaplanmasında Shannon kapasite denklemi kullanılmıştır. Bu denklem, belli bir bant genişliğinde, toplanır beyaz Gauss gürültülü (İng. additive white Gaussian noise - AWGN) bir kanalda son derece düşük bir hata oranıyla gönderilebilecek veri kapasitesinin teorik üst sınırını tanımlamaktadır [95]. Veri kapasitesi bit/saniye (İng. bits per seconds - bps) olarak,

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{R}{N_0 B} \right), \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $C$  kapasiteyi,  $R$  alınan sinyalin gücünü (Watts),  $N_0$  AWGN gürültü spektral yoğunluğunu (Watts/Hertz),  $B$  kanalın bant genişliğini (Hertz) göstermektedir.  $S$  alıcı tarafında ölçülmektedir ve vericiden yayımlanan sinyalin gücüne ve kanalın karakterine bağlıdır. Bu denklemdeki  $R/N_0 B$  sinyal gürültü oranı olarak tanımlanmaktadır. Denklem 3.13, veri kapasitesinin sinyal gürültü oranına ve kanal bant genişliğine bağlı olduğunu ifade eder. Kanalın bant genişliği gürültü gücünü de arttırdığı için veri kapasitesini kısıtlamaktadır.

Şekil 3.2’de gösterildiği gibi girişim olan ağların veri kapasitesi analizlerinde gürültü gücü girişim gücü ile toplanır [96]. Şekil 3.2’de kullanıcı  $i$  DBİ  $j$ ’den servis almaktadır. Aynı alanda başka kullanıcılara servis sağlayan DBİ  $k$ ’nın yayını kullanıcı  $i$  için girişim oluşturmaktadır. Bu gibi ağlarda genel veri kapasitesi

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{R}{N_0 B + I} \right), \quad (3.14)$$

şeklinde formüle edilir.  $I$  girişim gücünü göstermektedir.  $R/(N_0 B + I)$  bileşeni, sinyal girişim artı gürültü oranı (İng. signal to interference plus noise ratio - SINR) olarak tanımlanmaktadır.

Girişimin göz önünde bulundurulduğu  $D$  adet DBİ’nin  $U$  adet kullanıcıya servis sağladığı bir DBİ inişlinki (İng. downlink) ağında, Denklem 3.14 kullanılarak DBİ  $j$  ve kullanıcı  $i$  arasındaki kapasite  $C_{ij}$  hesaplanabilir. Aynı frekans kaynağının kullanıldığı, kullanıcıların zaman bölmeli çoklu erişim yöntemi (İng. time division multiple access - TDMA) ile kanala eriştiği ve DBİ’lerin ve kullanıcıların konumlarının bilindiği durumda kullanıcı için bölünmüş kapasite,

$$c_{ij} = \frac{B}{U_{\alpha_i}} \log_2 \left( 1 + \frac{R_{ij}}{N_0 B + \sum_{j \neq \alpha_i} R_{ij}} \right), \quad (3.15)$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $\alpha_i$  kullanıcı  $i$ ’nin bağlı olduğu DBİ’yi,  $R_{ij}$  DBİ  $j$ ’nin yayınladığı sinyalin kullanıcı  $i$  terminalinde alındığı gücü göstermektedir. Kullanıcı  $i$ ’nin bağlı olmadığı DBİ’lerin yaptıkları yayınların kullanıcı  $i$  terminalinde oluşturduğu girişim  $\sum_{j \neq \alpha_i} R_{ij}$  ile hesaplanmaktadır.  $U_{\alpha_i}$  ise kullanıcı  $i$ ’nin bağlandığı DBİ’ye bağlanan toplam kullanıcı sayısını ifade etmektedir. TDMA ile kanala erişim sağlandığı için her kullanıcıya belli bir zaman diliminin atanması gerekmektedir. Her kullanıcıya eşit zaman dilimi atanması ile her kullanıcı için toplam kapasite  $U_{\alpha_i}$ ’ye bölünmekte ve

kullanıcı  $i$ 'nin veri kapasitesi bulunmaktadır. DBİ  $j$ 'ye bağlanan toplam kullanıcı sayısı,

$$U_j = \sum_{i \in \mathcal{U}} l(\alpha_i = j), \quad (3.16)$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada  $l(\alpha_i = j) \in \{0, 1\}$

$$l(\alpha_i = j) = \begin{cases} 1, & \text{eger } \alpha_i = j, \\ 0, & \text{başka türlü} \end{cases} \quad (3.17)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Kullanıcı  $i$ 'nin hangi DBİ'ye bağlanacağıının belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılabilir. Çalışmamızda literatürde sıklıkla kullanılan en yüksek güç alımına dayalı yöntem ile birlikte daha karışık olan yük farkında DBİ ile kullanıcı eşleşmesi yöntemi (bkz. Bölüm 4.2) kullanılmıştır. En yüksek güce dayalı eşleşmede kullanıcı  $i$ 'nin bağlanacağı DBİ,

$$\alpha_i = \arg \max_j R_{ij}, \quad (3.18)$$

ile bulunmaktadır.

DBİ  $j$  yayınının kullanıcı  $i$  terminalindeki sinyal gücü  $R_{ij}$ , DBİ  $j$  yayın gücüne ve kullanıcı ile DBİ arasındaki anten kazancına ve kanal kaybına bağlı olarak,

$$R_{ij} = 10^{\frac{P_T + G_{ij} - PL_{ij}}{10}}, \quad (3.19)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada,  $P_T$  DBİ yayın gücünü (dB) göstermektedir ve çalışmalarımızda tüm DBİ'ler için sabit ve aynı olduğu varsayılmıştır.  $G_{ij}$ , kullanıcı  $i$  ile DBİ  $j$  arasındaki anten kazancını (dB) göstermektedir ve

$$G_{ij} = \begin{cases} \frac{29000}{\theta_B^2}, & \text{if } r_{ij} \leq h_j \tan \frac{\theta_B}{2} \\ 0, & \text{if } r_{ij} > h_j \tan \frac{\theta_B}{2}, \end{cases} \quad (3.20)$$

şeklinde hesaplanmaktadır[97]. Burada,  $r_{ij}$  Şekil 3.2'de gösterildiği gibi kullanıcı  $i$  ile DBİ  $j$  arasındaki yatay mesafeyi,  $h_j$  ise DBİ  $j$ 'nin yüksekliğini,  $\theta_B$  DBİ anteninin hüzmeye genişliğini göstermektedir.

## 4. DRON BAZ İSTASYONLARININ KONUMLANDIRILMASI

Tez çalışmasının bu bölümünde DBİ'lerin farklı senaryolar altında konumlandırılması incelenmiştir. Her bir senaryoya ilişkin literatür taraması sunulmuş, ilgili problem tanımlanmış, çözüm yöntemleri önerilmiş ve nümerik sonuçlarla birlikte değerlendirmeler sunulmuştur. Özet olarak; Bölüm 4.1'de Bölüm 3.1'de sunulan sistem modeli ve Bölüm 3.2'de detayları verilen girişim altında kullanıcı kapasitesi hesaplama yöntemi kullanılarak DBİ'lerin 3B uzayda çeşitli stratejiler ile konumlandırılması incelenmiştir. Bölüm 4.1 diğer bölümlerde incelenen senaryoların temelini oluşturmaktadır ve kapsam olarak daha geniş bir literatüre sahiptir. Bölüm 4.2'de Bölüm 4'te kullanılan en yüksek güce dayalı DBİ kullanıcı eşleşmesi yerine yük farkında DBİ kullanıcı eşleşmesi yöntemi, DBİ konumlandırma problemi ile birlikte ele alınmıştır. Bölüm 4.3'te DBİ'lerin askeri amaçlı kullanımı detaylı şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda, öncelikle literatür kapsamlı şekilde incelenerek pratik bir senaryo modellenmiştir. Bölüm 3.1'de sunulan kanal modeli kullanılarak kullanıcı pozisyonları kestirilmiş ve tehdit unsurlarının konumlarına göre DBİ'lerin konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.4'te DBİ'lerden birinin (hangi DBİ'nin bozulacağı bilinerek ve bilinmeyerek) bozulması olasılığı göz önünde bulundurularak farklı DBİ konumlandırma yöntemleri önerilmiştir. Son olarak Bölüm 4.5'te çeşitli meta sezgisel yöntemlerin 3B DBİ konumlandırma problemini çözmedeki performansları incelenmiştir.

### 4.1 DBİ'lerin 3 Boyutlu Uzayda Konumlandırılması

#### 4.1.1 Literatür taraması

Karasal baz istasyonlarının yeni nesil ağların kapsama ve kapasite ihtiyaçlarını karşılamada yetersiz kalacağının öngörülmesi ile birlikte DBİ'lerin kullanımına yönelik araştırmalar başlamıştır. Öncelikle Bölüm 3.1'de detayları sunulan hava yer kanal modeli tanımlanmış ve sonrasında bu modelin kullanıldığı DBİ konumlandırma problemleri çalışılmaya başlanmıştır. Literatürde yer alan DBİ konumlandırma problemleri incelendiğinde ya tek bir DBİ'nin optimal şekilde konumlandırıldığı ya da girişimin ihmal edildiği görülmüştür.

Literatürde en çok kullanılan ve bu tez çalışmasında da benimsenen hava yer kanal modelini ortaya atan Al-Hourani ve arkadaşları [39]'da bir hücrede kapsama alanını maksimize etmek için DBİ yüksekliğini optimize etmişlerdir. Mozaffari ve arkadaşları [33]'te hücresel kapsama alanını maksimize etmek için hem DBİ yükünü hem de DBİ yayın gücünü optimize etmişlerdir. Bu çalışmada ayrıca iki DBİ'nin kullanımı incelenmiş ve girişimi de göz önünde bulundurularak DBİ konumlandırma problemi çalışılmıştır. Bir DBİ'nin 3B uzayda konumlandırılması problemi ilk defa [98]'de ele

alınmıştır. Bu çalışmada tek bir DBİ'nin kullanıcıların servis kalitesi ihtiyacını (belli bir yol kaybı eşiği kullanılmaktadır) karşılayacak şekilde 3B uzayda konumlandırılması sağlanmıştır. Burada, konumlandırma problemi karma tamsayı doğrusal olmayan program (İng. mixed integer non-linear program - MINLP) olarak tanımlanmış ve iç nokta algoritması (İng. interior point algorithm) ve ikiye bölme arama (İng. bisection search) yöntemleri ile çözülmüştür.

Hava kanal modelinin oluşturulması ve bir DBİ'nin yükseklikte, yatayda ve 3B uzayda konumlandırılması problemleri çalışıldıktan sonra farklı senaryolar altında DBİ'lerin konumlandırılması ile ilgili çalışmalar literatüre girmeye başlamıştır. Kalantari ve arkadaşları kullanıcıların farklı servis kalitesi ihtiyaçlarının olduğu ve arabağlanım (İng. backhaul) kapasitesinin sınırlı olduğu bir senaryo tanımlamıştır [99]. Bu senaryodan elde edilen kısıtları da formüle ederek DBİ'nin 3B uzayda konumlandırılması problemi incelenmiştir. Yazarlar, DBİ konumunu belirlerken ağ merkezli ve kullanıcı merkezli olmak üzere iki yöntem önermişlerdir. Ağ merkezli yöntemde kullanıcı servis kalitesi ihtiyaçlarına bakılmaksızın en yüksek sayıda kullanıcının kapsanmasına çalışılmıştır. Kullanıcı merkezli yöntemde ise kullanıcı servis ihtiyaçları ve öncelikleri göz önünde bulundurularak DBİ konumlandırılması yapılmıştır.

Alzenad ve arkadaşları, 3B uzayda DBİ konumlandırma problemini, yatay ve dikey eksenleri ayrıştırarak ele almıştır [55]. Yatay ekseninde DBİ konumunun bulunması problemi, daire yerleştirme problemi olarak ele alınmış ve MINLP formatında tanımlama yapılmıştır. Yatay düzlemde DBİ konumunun bulunmasından sonra yayın gücünü minimize edecek şekilde DBİ yüksekliği belirlenmiştir. Yazarların bir diğer çalışmasında farklı servis kalitesi gereksinimleri olan kullanıcıların olduğu bir ağda DBİ konumunu belirlemek için yine yatay ve dikey düzlemler ayrıştırılmış, yatay düzlemde daire yerleştirme problemi çözülmüş yükseklik için ise kapsamlı arama (ing. exhaustive search) uygulanmıştır [100].

Hücrel ağda birden çok DBİ'nin konumlandırılması konusunda Kalantari ve arkadaşları, [101]'de sunulan karasal baz istasyonlarının konumlarının ve sayılarının belirlenmesi için yapılan çalışmayı temel olarak almış ve DBİ'lerin konumlandırılması problemine uygulamışlardır [52]. Bu çalışmada kapsama alanı maksimize edilmeye çalışılmıştır ancak girişim konusu ve kullanıcı kapasitesine etkisi incelenmemiştir. Mozaffari ve arkadaşları [53]'de aynı yükseklikte olduğu varsayılan DBİ'lerin yatay ekseninde konumlandırılmasını incelemiştir. Bu çalışmada DBİ konumlandırılmasının bulunmasında daire yerleşim teorisinden yararlanılmıştır. [102]'de çoklu DBİ yerleşim problemi her kullanıcıya en az bir DBİ tarafından hizmet verilecek şekilde tanımlanmış ve DBİ sayısı ve yatay eksenindeki konumu belirlenmiştir. Bu çalışmada da DBİ yüksekliklerinin aynı olduğu varsayılmış ve DBİ'lerin yatay eksenindeki konumlarının bulunmasında geometrik disk kapsama (İng. geometric disk cover) kullanılmıştır.

#### 4.1.2 Problemin tanımı ve çözümü

DBİ konumlarının bulunmasında kullanılan geometrik tabanlı yaklaşımlar girişimin oluşturduğu etkilerin ağ kapasitesine etkilerini tam olarak dikkate almamaktadır. An-

çak DBİ konumlarının optimize edilmesinde girişimin dikkate alınması gerekmektedir. Bölüm 3.2’de sunulan modelde, kullanıcı kapasitesi girişime sebep olan diğer DBİ’lerin varlığı altında hesaplanmaktadır. Kullanıcı konumları kullanılarak DBİ konumları farklı stratejiler doğrultusunda optimize edilmektedir. Bu kapsamda girişimi yönetmeyi sağlayan kapasite farkında konumlandırma ile birlikte kümeleme esasına dayalı yöntemler sunulmuştur.

#### 4.1.2.1 Kapasite farkında DBİ konumlandırma

Bölüm 3.2’de sunulan kullanıcı kapasitesi formülasyonu kullanılarak DBİ’ler, kullanıcı kapasitesilerinin toplamını ( $C_{lin}$ ) ya da kullanıcı kapasitelerinin logaritmalarının toplamını ( $C_{log}$ ) maksimize edecek şekilde 3B uzayda konumlandırılabilir. İlk durumda elde edilen problemin formülasyonu Şekil 4.1’de, ikinci durumda oluşan problemin formülasyonu da Şekil ’de sunulmuştur. Modeldeki karar değişkenleri  $|\mathcal{D}| = D$  adet DBİ’nin 3B uzaydaki koordinatlarıdır ve  $(x_j^d, y_j^d, h_j^d), \alpha \in \mathcal{D}$  şeklinde tanımlanmıştır. Bu tanımlamaya göre 3D adet karar değişkeni bulunmaktadır. Modeldeki birinci kısıt fonksiyonu DBİ’lerin yatay düzlemde hücre dışına çıkmayacağını ifade etmektedir. İkinci fonksiyon ise DBİ yüksekliklerinin belli bir aralıkta olması gerektiğini ifade etmektedir.

<p>Maksimum <math>\sum_{i \in \mathcal{U}} \frac{1}{U_{\alpha_i}} B \log_2 \left( 1 + \frac{R_{i\alpha_i}(x_{\alpha_i}^d, y_{\alpha_i}^d, h_{\alpha_i}^d)}{N_0 B + \sum_{j \neq \alpha_i, j \in \mathcal{D}} R_{ij}(x_j^d, y_j^d, h_j^d)} \right)</math></p> <p>Kısıtlar:</p> $\sqrt{(x_j^d)^2 + (y_j^d)^2} \leq r_c \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.1)$ $h_{min} \leq h_j^d \leq h_{max} \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.2)$
---

Şekil 4.1: Toplam kapasiteyi maksimize eden DBİ konumlandırma modeli

İkinci DBİ konumlandırma stratejisi olarak kullanıcı kapasitelerinin logaritmalarının toplamı maksimize edilmiştir. Bu sayede kullanıcı kapasiteleri arasında belli ölçüde eşitlik sağlanması amaçlanmaktadır. Bu durumda DBİ konumlandırma problemi Şekil 4.2’deki şekilde tanımlanmaktadır.

<p>Maksimum <math>\sum_{i \in \mathcal{U}} \log \left( \frac{1}{U_{\alpha_i}} B \log_2 \left( 1 + \frac{R_{i\alpha_i}(x_{\alpha_i}^d, y_{\alpha_i}^d, h_{\alpha_i}^d)}{N_0 B + \sum_{j \neq \alpha_i, j \in \mathcal{D}} R_{ij}(x_j^d, y_j^d, h_j^d)} \right) \right)</math></p> <p>Kısıtlar:</p> $\sqrt{(x_j^d)^2 + (y_j^d)^2} \leq r_c \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.3)$ $h_{min} \leq h_j^d \leq h_{max} \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.4)$
---

Şekil 4.2: Logaritmik kapasitelerin toplamını maksimize eden (eşitlik farkında) DBİ konumlandırma modeli

Tanımlanan DBİ konumlandırma problemleri konveks ve doğrusal olmayan problemlerdir. Bu tür problemler meta sezgisel yöntemler ile çözülebilir. Algoritma 1, Şekil 4.1’de ve Şekil 4.2’de tanımlanan 3B DBİ konumlandırma problemlerinin Bölüm 2.3.2.1’de açıklanan PSO yöntemi ile çözümünü göstermektedir. Toplam doğrusal kapasiteyi maksimize eden yöntem bundan sonra kısaca *LinPSO*, kapasite logaritmalарının toplamını maksimize eden yöntem *LogPSO* olarak adlandırılmıştır.

---

**Algorithm 1** PSO ile 3B DBİ konumlandırma(LinPSO ve LogPSO)

---

```

1: Rastgele aday çözüm matrisi üret  $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{N_{par} \times 3D}$  ve hesapla  $\mathbf{V}$ :  $\mathbf{V} = \mathbf{P} \times 0.3 \times$ 
   ( $rand(N_{par}, 3D) - 1$ )
2: while durma kriteri sağlanmadı do
3:   for  $i = 1 : N_{par}$  do
4:      $\mathbf{P}(i, :)$  kullanarak  $\mathbf{F}(i)$ 'yi (Şekil 4.1’de sunulan amaç fonksiyonu) hesapla
     (ya da LogPSO için Şekil 4.2’de sunulan amaç fonksiyonunu hesapla )
5:   end for
6:    $newgbest = \max(\mathbf{F})$ ;
7:    $index = \operatorname{argmax}(\mathbf{F})$ ;
8:   if  $newgbest > gbest$  then
9:      $gbest = newgbest$ 
10:     $gbest\mathbf{P} = \mathbf{P}(index, :)$ 
11:   end if
12:   for  $i = 1 : N_{par}$  do
13:     if  $\mathbf{F}(i) > lbest(i)$  then
14:        $lbest(i) = \mathbf{F}(i)$ 
15:        $lbest\mathbf{P}(i, :) = \mathbf{P}(i, :)$ 
16:     end if
17:   end for
18:   for  $i = 1 : N_{par}$  do
19:      $\mathbf{V}(i, :) = C_1 \times \mathbf{V}(i, :) + C_2 \times \operatorname{rand}(1, 3|D|)(lbest\mathbf{P}(i, :) - \mathbf{P}(i, :)) + C_2 \times$ 
      $\operatorname{rand}(1, 3|D|)(gbest\mathbf{P}(i, :) - \mathbf{P}(i, :))$ 
20:   end for
21:    $\mathbf{P} = \mathbf{P} + \mathbf{V}$ 
22: end while

```

---

Algoritma 1’de  $N_{par}$  toplam parçacık sayısını,  $\mathbf{P}$  çözüm uzayında rastgele saçılmış parçacıkların oluşturduğu aday çözüm matrisini,  $\mathbf{F}$  amaç fonksiyonunu,  $\mathbf{V}$  parçacık konumlarının parçacıkların kendi en iyi pozisyonlarına ve global en iyi pozisyona göre güncellenmesini sağlayan hız matrisini,  $newgbest$  global en iyi çözümün sonucunu,  $lbest$  parçacığın kendi en iyi çözümüne ait sonucu,  $gbestP$  global en iyi çözümün pozisyonunu,  $lbestP$  parçacığın kendi en iyi çözümüne ait pozisyonu,  $C_1$  ve  $C_2$  PSO yöntemine ait öğrenme faktörü sabitlerini göstermektedir.

Algoritma 1 adım 1’de  $N_{par}$  adet rastgele çözüm adayı parçacık popülasyonu  $\mathbf{P}$  ve her bir parçacığa ait hız vektörünü içeren  $\mathbf{V}$  matrisi oluşturulur. Algoritma adım 2 ile 22 arasında durma kriteri sağlanmadığı müddetçe devam eder. Durma kriteri parçacıkların birbirine yakınlığı olabileceği gibi toplam tekrar sayısı da olabilir. Her tekrarda

adım 3 ile 5 arasında her parçacığa ait amaç fonksiyon sonucu  $\mathbf{F}(\mathbf{i})$  hesaplanır. Amaç fonksiyonu LinPSO için kullanıcı kapasitelerinin toplamı, LogPSO içinse kullanıcı kapasitelerinin logaritmalarının toplamıdır. Adım 6 ile 11 arasında global en iyi çözüm güncellenir. Adım 12 ile 17 arasında her parçacığın kendi en iyi çözümü güncellenir. Son olarak, elde edilen global çözüm ve her parçacığın kendi en iyi çözümlerine göre adım 18 ile 21 arasında parçacıkların bir sonraki tekrardaki pozisyonları belirlenir. Öğrenme faktörü sabitleri  $C_1 = 0.72$  ve  $C_2 = 2.3$  olarak belirlenmiştir.

#### 4.1.2.2 K-ortalama kümeleme

K-ortalama kümeleme (İng. K-means clustering - KC) yöntemi DBİ konumlandırma problemine girişimi göz önünde bulundurmadan çözüm sağlamaktadır. Bu anlamda Bölüm 4.1.1’de anlatılan daire yerleştirme yöntemi gibi geometrik temelli bir konumlandırma yöntemidir. K adet kümeye ayrılan hücresel ağın küme merkezlerine DBİ’ler yerleştirilir. Matematiksel olarak Şekil 4.3’de tanımlanan optimizasyon probleminin çözümü ile DBİ’lerin yatay düzlemdeki konumları belirlenir. Modelde  $\phi_i^u, i \in \mathcal{U}$  yatay ekseninde bilinen kullanıcı konumlarını,  $\phi_j^d, j \in \mathcal{D}$  yatay ekseninde karar değişkenleri olan DBİ konumlarını göstermektedir.  $x_{ij}$  ikili değişkeni  $i$ ’ninci kullanıcının  $j$ ’ninci DBİ’ye bağlı olup olmadığını göstermektedir. Modelde tanımlanan ilk kısıt fonksiyonu bir kullanıcının sadece bir DBİ’ye bağlanabileceğini ifade etmektedir.

<p>Maksimum <math>\sum_{i \in \mathcal{U}} \sum_{j \in \mathcal{D}} x_{ij} \ \phi_i^u - \phi_j^d\ ^2</math>  Kısıtlar:</p> $\sum_{j \in \mathcal{D}} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{U} \quad (4.5)$ $x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathcal{U}, \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.6)$
---

Şekil 4.3: K-ortalama kümeleme ile DBİ konumlandırma

Stuart P. Lloyd Şekil 4.3’de verilen problemin çözümü için etkin bir algoritma geliştirmiştir [103, 104]. Bu algoritma modeldeki probleme uygulandığında öncelikle ağda D adet rastgele DBİ konumu ( $\phi_j^d$ ) belirlenmektedir. Daha sonra kullanıcılar kendilerine en yakın olan DBİ’ye bağlanmaktadır. Kullanıcı pozisyonlarının ortalaması yani merkez noktası yeni DBİ konumu olarak tayin edilmektedir. Bu süreç DBİ konumlarında önemli bir değişiklik olmayana kadar devam etmektedir. DBİ konumlarının bulunmasından sonra DBİ yükseklikleri

$$h_j^d = \max(h_{min}, \frac{d_{max}^j}{\tan(\theta_B/2)}), \quad j \in \mathcal{D}, \quad (4.7)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada  $d_{max}^j$ ,  $j$ ’ninci DBİ’ye bağlı olan en uzaktaki kullanıcının mesafesini göstermektedir. Bu algoritma kısaca *K-Cov* olarak isimlendirilmiştir.

### 4.1.2.3 KC yöntemi ve PSO ile DBİ konumlandırma

KC yöntemi DBİ'lerin yatay düzlemde konumlandırılmasında kullanıcı konumlarını kullanarak hızlı çalışan bir yöntem olmakla birlikte hücredeki girişi dikkate almamaktadır. Algoritma 2, KC yönteminin hızlı çalışmasının sağladığı avantajı girişim yönetimi ile birleştirmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda LinPSO ve LogPSO yöntemlerindeki  $3 \times D$  olan karar değişken sayısını sadece DBİ yüksekliklerini ( $h_j^d, j \in \mathcal{D}$ ) optimize etmek suretiyle  $D$ 'ye indirmektedir. Tasarlanan algoritma kısaca *K-APSO* olarak isimlendirilmiştir. Burada  $\mathbf{A}$  çözüm uzayında rastgele saçılmış çözüm matrisini (DBİ yükseklikleri),  $lbestA$  parçacığın kendi en iyi sonucunu,  $gbestA$  ise global en iyi sonucu göstermektedir.

---

**Algorithm 2** KC ve PSO birlikte DBİ konumlandırma (K-APSO)

---

```
1: Lloyd algoritmasını uygula ve bul:  $x_j^d$  ve  $y_j^d \quad j \in \mathcal{D}$ 
2: DBİ yükseklikleri için aday çözüm matrisi üret  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{N_{par} \times |D|}$  hesapla  $\mathbf{V}$  by:  $\mathbf{V} = \mathbf{A} \times 0.3 \times (rand(npar, |D|) - 1)$ 
3: while durma kriteri sağlanmadı do
4:   for  $i = 1 : N_{par}$  do
5:     Şekil 4.2'de sunulan amaç fonksiyonu  $\mathbf{F}(i)$  'yi,  $\mathbf{A}(i, :)$ 'da verilen DBİ yüksekliklerini kullanarak hesapla
6:   end for
7:    $newgbest = \max(\mathbf{F})$ ;
8:    $index = \operatorname{argmax}(\mathbf{F})$ ;
9:   if  $newgbest > gbest$  then
10:     $gbest = newgbest$ 
11:     $gbestA = \mathbf{A}(index, :)$ 
12:   end if
13:   for  $i = 1 : N_{par}$  do
14:     if  $\mathbf{F}(i) > lbest(i)$  then
15:        $lbest(i) = \mathbf{F}(i)$ 
16:        $lbestA(i, :) = \mathbf{A}(i, :)$ 
17:     end if
18:   end for
19:   for  $i = 1 : N_{par}$  do
20:      $\mathbf{V}(i, :) = C_1 \times \mathbf{V}(i, :) + C_2 \times \operatorname{rand}(1, |D|)(lbestA(i, :) - \mathbf{A}(i, :)) + C_2 \times \operatorname{rand}(1, |D|)(gbestA(i, :) - \mathbf{A}(i, :))$ 
21:   end for
22:    $\mathbf{A} = \mathbf{A} + \mathbf{V}$ 
23: end while
```

---

### 4.1.2.4 X-ortalama kümeleme

Bu yöntem KC'nin hızlı çalışma esasından esinlenerek tasarlanmıştır. KC hızlı çalışmasına karşın girişimi göz önünde bulundurmamaktadır. Ayrıca ağda kaç adet DBİ'nin



kullanılması gerektiğine dair bir çıktı üretmemektedir. Ağda kullanılacak DBİ sayısının ilgili planlamacı tarafından girilmesi gerekmektedir. Bu iki önemli probleme çözüm üretmek için Algoritma 3 tasarlanmıştır. Algoritma 2 adet DBİ'nin ağda konumlandırılacağını varsayarak çalışmaya başlamaktadır. DBİ konumları Lloyd'un algoritması ile belirlenmektedir. Daha sonra her kümede ikiye bölünme esasıyla yeni DBİ konumları belirlenmektedir. Diğer bir deyişle, bir DBİ tarafından hizmet edilen kullanıcılara iki adet DBİ hizmet etmeye başlamaktadır. Eğer ilgili kümedeki kullanıcıların kapasitelerinin logaritmalarının toplamında artış varsa bölünme kabul edilmekte ve yeni iterasyon başlamaktadır. Kapasitede artış yoksa ya da maksimum sayıda DBİ'ye ( $K_M$ ) ulaşıldıysa algoritma sonlanmaktadır. Bu algoritma kısaca *X-Cov* olarak isimlendirilmiştir.

---

**Algorithm 3** X-ortalama kümeleme ile DBİ konumlandırma (X-Cov)

---

```

1:  $D = 1$  ile başla
2: Lloyd algoritmasını uygula ve bul:  $x_j^d$  ve  $y_j^d$   $j \in \mathcal{D}$ 
3: DBİ yüksekliklerini Denklem 4.7 ile bul.
4: while DBİ iki ayrılma gerçekleşti ve  $D < K_M$  do
5:   Lloyd algoritmasını her kümede uygula ve bul  $x_{js}^d$  ve  $y_{js}^d$   $j \in \mathcal{D}$ 
6:   for  $i = 1 : D$  do
7:     oldVal = Şekil 4.2'de sunulan amaç fonksiyonu  $\mathbf{F}(i)$ 'yi  $x_j^d$  ve  $y_j^d$  ile hesapla
8:     newVal = Şekil 4.2'de sunulan amaç fonksiyonu  $\mathbf{F}(i)$ 'yi  $x_j^{ds}$  ve  $y_j^{ds}$  ile hesapla
9:     if newVal-oldVal >0 then
10:      Güncelle:  $x_j^d <- x_j^{ds}$ 
11:      Güncelle:  $y_j^d <- y_j^{ds}$ 
12:     end if
13:   end for
14:   Güncelle:  $D$ 
15: end while

```

---

Burada  $x_{js}^d$  ve  $y_{js}^d$  bölünmüş DBİ  $j$ 'nin yatay eksenindeki koordinatlarını göstermektedir. Burada her DBİ'den iki DBİ oluştuğuna dikkat edilmelidir.  $K_M$  maksimum DBİ sayısını göstermektedir. Algoritma 3  $D = 1$  ile başlayıp tekrarlı şekilde  $C_{log}$  değerini arttırmak amacıyla DBİ'leri çoğaltmaktadır. Yani bir DBİ'nin servis sağladığı kullanıcılara iki DBİ servis sağlamaya başlamaktadır.  $C_{log}$  artmaya devam ettikçe ve  $K_M$ 'ye ulaşılmamışsa bölünme devam etmektedir.

#### 4.1.2.5 Basit geometriksel yaklaşım

Kullanıcı konumlarının ya da dağılımlarının bilinmemesi durumunda DBİ'ler, hücresel ağı kapsayacak şekilde geometrik bir yaklaşımla konumlandırılabilir. Buna göre, hücresel ağ hücre merkezine bir adet DBİ yerleştirilmekte diğer DBİ'ler dairesel olarak simetrik biçimde yerleştirilmektedir. Bu yöntem kullanıcı konumlarını kullanmadığı için girişim yönetimi yapmamaktadır. Ağda kaç adet DBİ kullanılmalı sorusu yanıt

vermemekte, kullanılacak DBİ sayısının girilmesi gerekmektedir. Bu yöntem kısaca BG olarak adlandırılmıştır.

### 4.1.3 Sonuçlar

Tasarlanan algoritmalar iki farklı senaryoda test edilmiştir. Senaryo I'de (SI) kullanıcılar hücrede düzgün dağılıma göre konumlandırılmıştır. Senaryo II'de (SII) ise kullanıcılar hücrede düzgün olmayan bir dağılımla konumlandırılmıştır. Bu dağılımda hücrede 10 adet yoğun bölge olduğu varsayılmış ve kullanıcılar bu bölge merkezlerinden [0,300] metre mesafede konumlandırılmıştır. Her iki senaryo içinde 100 kullanıcıdan oluşan 100 farklı ağ oluşturulmuştur ve ortalamalar alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Simülasyon parametreleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Simülasyonlar MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1: 3B DBİ konumlandırma simülasyon parametreleri.

Parametre	Değer
$U$	100
$f_c$	2GHz
$r_C$	1500m
$B$	20MHz
$N_0$	-170dBm/Hz
$\theta_B$	140°
$(a, b)$	9.61, 0.16
$\mu_{LoS}, \mu_{LoS}$	1dB, 20dB
$P_T$	30dBm
$N_{par}$	100
$h_{min}, h_{max}$	200m, 800m

DBİ konumlandırma yöntemlerinin performanslarının değerlendirilmesinde dört farklı metrik kullanılmıştır:

1. Ağın logaritmik kapasitesi ( $C_{log}$ ).  $C_{log}$  tüm kullanıcıların kapasitelerinin logaritmaları alındıktan sonra toplanması ile elde edilir.
2. Ağın doğrusal kapasitesi ( $C_{lin}$ ).  $C_{lin}$  tüm kullanıcıların kapasitelerinin toplanması ile bulunur.
3. Jain'nin eşitlik indeksi ( $J$ ).
4. Maksimum kullanıcı kapasitesinin minimum kullanıcı kapasitesine oranı ( $\gamma_C$ ).
5.  $C_{TH}$ 'nin altında kapasiteye sahip kullanıcı sayısı ( $N_{kd}$ ).

Jain'nin eşitlik indeksi [105] haberleşme ağlarının eşitlik performanslarının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır [106].  $U$  adet kullanıcının olduğu bir ağda Jain'nin eşit-

lik indeksi Denklem 4.8'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.  $J$ 'nin 1'e yakın olması kullanıcı kapasiteleri arasındaki benzerliğin yüksek olduğunu gösterir.

$$J = \frac{(\sum_{i=1}^U c_i)^2}{U \sum_{i=1}^U c_i^2} \quad (4.8)$$

Burada  $c_i$  kullanıcı  $i$ 'nin bölünmüş veri kapasitesini göstermektedir. İkinci performans metriği olarak kullanılan  $\gamma_C$  ağdaki en yüksek kullanıcı kapasitesinin ağdaki en düşük kullanıcı kapasitesine bölünmesi ile bulunmaktadır [106]. Üçüncü performans metriği ( $N_{kd}$ ), ağda bir kullanıcının kapsanması için gerekli olan  $C_{TH}$ 'nin altında kapasiteye sahip kullanıcı sayısını göstermektedir.

Çizelge 4.2'de DBİ konumlandırma yöntemlerinin eşitlik ile ilgili metrikleri ( $C_{lin}$  hariç), ağda kullanılabilir DBİ sayısının 7'ye eşit olduğu durum için sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde LogPSO yöntemi ile hem Senaryo I hem de Senaryo II için tüm performans metriklerinde en yüksek değerler elde edilmiştir. Doğrusal kapasiteyi maksimize eden LinPSO yönteminin ise tüm eşitlik metriklerinde en kötü sonuçları üretmektedir. Genel olarak LogPSO'ya en yakın değerler, arama uzayının önemli ölçüde küçültüldüğü K-APSO ve çok hızlı çalışan K-Cov ile elde edilmiştir. K-APSO ile K-Cov performanslarına bakıldığında, K-Cov'un basit DBİ yükseklik belirleme yönteminin yeterli bir yöntem olduğu değerlendirilebilir. Hızlı çalışan sezgisel X-Cov yöntemi özellikle Senaryo II'de başarılı sonuçlar üretmiştir. Yöntemlerin  $C_{log}$  değerlerine bakıldığında LogPSO'dan sonra en iyi sonucu X-Cov üretmiştir. Bunun sebebi, Senaryo II'deki öbeklenmiş düzensiz dağılımın, X-Cov'un logaritmik kapasite farkında bölünme usulu DBİ sayısı belirleme yöntemine uygun olması ve gereksiz DBİ sayısını azaltarak girişimi azaltmasıdır.

Çizelge 4.2: DBİ konumlandırma yöntemlerinin eşitlik performansları ( $D = 7$ ).

Metrik	LogPSO	LinPSO	K-Cov	K-APSO	X-Cov	BG
SI $C_{log} (\times 10^3)$	1.618	1.571	1.615	1.615	1.587	1.574
SII $C_{log} (\times 10^3)$	1.618	1.610	1.609	1.611	1.615	1.574
SI $\gamma_C$	17.03	311.8	20.29	23.05	27.25	65.78
SII $\gamma_C$	12.40	61.03	24.76	25.54	26.66	25.15
SI $J$	0.82	0.37	0.80	0.81	0.78	0.63
SII $J$	0.73	0.65	0.69	0.69	0.71	0.62
SI $N_{kd}$	0.03	7.15	0.14	0.18	0.54	3.52
SII $N_{kd}$	0	2.19	0.27	0.31	0.37	17.16

$J$  metriği incelendiğinde K-Cov ve K-APSO Senaryo I'de LogPSO'ya çok yakın sonuçlar üretmiştir. Senaryo II'de ise LogPSO  $J$  değerinin, K-Cov ve K-APSO'dan %5.7 daha fazla olduğu görülmektedir. Beklendiği gibi en düşük  $J$  değerleri BG ve LinPSO ile elde edilmiştir. Çizelge 4.2 incelendiğinde LinPSO yönteminin SI'de sağladığı  $J$  değerinin 0.37 gibi çok düşük bir değer olduğu görülmektedir. SI'de baz istasyonuna yakın bazı kullanıcılara maksimum kapasite sağlanırken özellikle hücre dışında konumlanan kullanıcılara çok düşük kapasite sağlanmaktadır. Bu sebeple çok düşük bir  $J$  değeri elde edilmektedir. LinPSO'nun SII'de  $J$  değeri 0.65 olarak elde edilmiştir.

Diğer yöntemlerde SII'de  $J$  değeri düşme eğilimindeyken LinPSO için tersi bir durum söz konusudur. Bunun sebebi de LinPSO'nun kümelenmiş kullanıcıların kapasitelerini birlikte arttırması ve hücre kenarlarında daha az sayıda düşük kapasiteli kullanıcı bulunmasındandır. DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI ve SII'de ürettikleri  $J$  değerleri Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

Yöntemlerin  $\gamma_C$  değerlerine bakıldığında beklendiği gibi LinPSO'nun hem Senaryo I hem de Senaryo II için diğer yöntemlerle elde edilen sonuçların çok üzerinde sonuçlar ürettiği görülmektedir. LinPSO yöntemi, LogPSO'nun Senaryo I'de ürettiği  $\gamma_C$  değerinin 18.3 katı, Senaryo II'de ürettiği değerin ise 4.9 katı değerler üretmiştir. Bu durum LinPSO'nun kanal durumu iyi olan kullanıcılara odaklanarak kanal durumu kötü olan kullanıcılardan uzaklaşması ile açıklanabilir. BG yöntemi, LinPSO'dan sonra eşitlik metriklerinde en kötü sonuçları üretmiştir. Kullanıcı pozisyonlarının göz önünde bulundurulmadığı BG yönteminin düşük performansı, DBİ konumlandırmada ileri tekniklere ihtiyaç olduğunu göstermektedir. DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI ve SII'de ürettikleri  $\gamma_C$  değerleri Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI'de  $D = 7$  için yürütme zamanları Çizelge 4.5'te sunulmuştur.  $D \times 3$  karar değişkenini sürekli uzayda optimize etmeye çalışan PSO temelli algoritmalar diğer yöntemlere göre çok daha uzun sürede sonlanmıştır. Eşitlik metrikleri LogPSO'ya yakın olan K-Cov, K-APSO ve X-Cov ise 1 sn'nin altında yürütme zamanlarına sahiptir. Sadece DBİ yüksekliklerinin optimize edildiği  $D$  karar değişkeni olan K-APSO'nun yürütme zamanı, yatay düzlemdeki  $2 \times D$  karar değişkeninin problemi çok daha karışık hale getirdiğini göstermektedir. Bu sonuçlara göre kaynakların kısıtlı olduğu, topolojinin kullanıcıların hareketliliği ile değiştiği durumlarda PSO temelli algoritmalar yerine SI tipi ağlarda K-Cov ya da K-APSO, SII tipi ağlarda X-Cov kullanılması değerlendirilebilir.

Şekil 4.4'te DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI için farklı  $D$  değerleri için  $C_{log}$  değerleri sunulmuştur.  $C_{log}$ 'u maksimize etmeyi amaçlayan LogPSO ile beklendiği gibi en yüksek değerler elde edilmiştir. BG ve LinPSO en düşük performansı sağlayan yöntemler olmuştur. Bu durum, doğrusal kapasitenin maksimize edilmesine dayanan ya da kullanıcı konumlarından bağımsız yapılan DBİ konumlandırmanın kullanıcı kapasitelerinin eşitliği noktasında önemli kayıplara sebep olduğunu göstermektedir. K-APSO'nun ve K-Cov'un performansları en iyi yöntem olan LogPSO'ya oldukça yakındır. Özellikle yüksek  $D$  için bu yöntemlerin  $C_{log}$  değerleri çok yakındır. Bunun sebebi, ağda yeterli sayıda DBİ olması ile düşük kapasiteye sahip kullanıcı sayısının azalmasıdır.

DBİ konumlandırma yöntemleri ile elde edilen doğrusal kapasite  $C_{lin}$  sonuçları farklı  $D$  değerleri için Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Beklendiği gibi doğrudan  $C_{lin}$ 'i maksimize eden LinPSO ile en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin,  $D = 5$  iken LinPSO en iyi ikinci yöntem olan LogPSO'dan %11.2 ve en iyi üçüncü yöntem olan K-APSO'dan %15 daha fazla kapasite sağlamaktadır. Yöntemlerin  $C_{log}$  performansında olduğu gibi  $D$ 'in artması ile kapasite farkı azalmaktadır. En kötü sonuçlar BG ile elde edilmiştir. Özellikle  $D = 7$ 'den sonra kapasitedeki düşüş önemlidir. Artan DBİ sayısı ile girişim artmakta ve  $C_{lin}$ 'de azalma meydana gelmektedir. LinPSO  $D = 10$  iken, BG'nin sağ-

Çizelge 4.3: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI ve SII'de J performansları

<b>SI</b>									
<b>Yöntem</b>	<b>D = 3</b>	<b>D = 4</b>	<b>D = 5</b>	<b>D = 6</b>	<b>D = 7</b>	<b>D = 8</b>	<b>D = 9</b>	<b>D = 10</b>	
LogPSO	0.849	0.823	0.812	0.824	0.821	0.818	0.813	0.791	
LinPSO	0.458	0.366	0.373	0.364	0.377	0.381	0.405	0.357	
K-Cov	0.825	0.826	0.816	0.822	0.818	0.808	0.802	0.783	
K-APSO	0.836	0.840	0.821	0.822	0.814	0.790	0.795	0.773	
X-Cov	0.723	0.729	0.714	0.730	0.728	0.724	0.711	0.707	
BG	0.500	0.526	0.587	0.627	0.638	0.646	0.614	0.626	
<b>SII</b>									
<b>Yöntem</b>	<b>D = 3</b>	<b>D = 4</b>	<b>D = 5</b>	<b>D = 6</b>	<b>D = 7</b>	<b>D = 8</b>	<b>D = 9</b>	<b>D = 10</b>	
LogPSO	0.734	0.710	0.730	0.730	0.736	0.745	0.758	0.758	
LinPSO	0.488	0.552	0.601	0.630	0.653	0.662	0.642	0.645	
K-Cov	0.737	0.693	0.692	0.697	0.693	0.673	0.648	0.627	
K-APSO	0.741	0.707	0.695	0.702	0.695	0.683	0.661	0.648	
X-Cov	0.696	0.687	0.683	0.699	0.704	0.698	0.693	0.691	
BG	0.503	0.521	0.587	0.627	0.638	0.646	0.614	0.626	

Çizelge 4.4: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI ve SII'de %C performansları

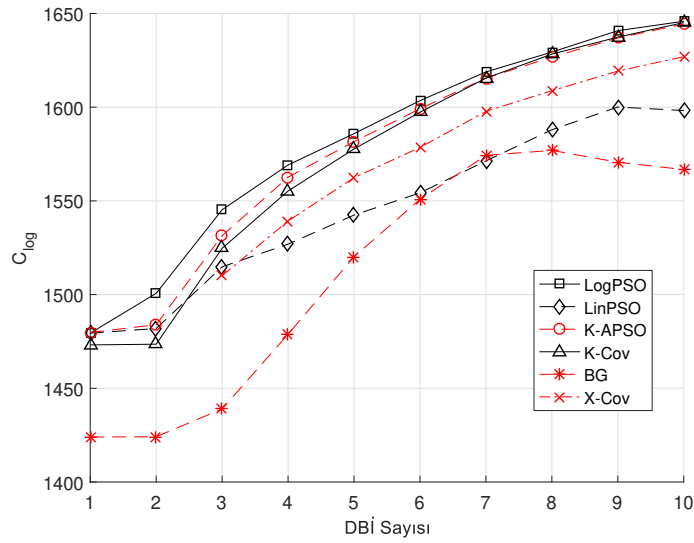
<b>SI</b>									
<b>Yöntem</b>	<b>D = 3</b>	<b>D = 4</b>	<b>D = 5</b>	<b>D = 6</b>	<b>D = 7</b>	<b>D = 8</b>	<b>D = 9</b>	<b>D = 10</b>	
LogPSO	9.72	14.08	20.17	18.07	17.03	17.36	19.61	22.91	
LinPSO	100.52	204.11	183.78	282.59	311.86	314.66	362.12	386.47	
K-Cov	15.78	16.50	16.75	18.68	20.29	17.44	18.24	18.87	
K-APSO	16.40	16.43	19.36	20.91	23.05	24.43	20.88	24.54	
X-Cov	23.45	24.97	29.69	40.07	42.91	41.86	45.11	45.64	
BG	41.54	59.02	58.37	62.18	65.78	50.62	53.12	47.74	
<b>SII</b>									
<b>Yöntem</b>	<b>D = 3</b>	<b>D = 4</b>	<b>D = 5</b>	<b>D = 6</b>	<b>D = 7</b>	<b>D = 8</b>	<b>D = 9</b>	<b>D = 10</b>	
LogPSO	10.21	11.31	12.77	13.26	12.40	13.96	13.20	13.67	
LinPSO	69.07	58.19	69.68	77.72	61.03	71.87	80.42	88.48	
K-Cov	19.66	21.60	25.67	24.81	24.76	25.68	24.70	24.28	
K-APSO	15.20	18.42	24.91	25.12	25.54	23.56	24.46	21.96	
X-Cov	27.29	28.39	30.04	26.12	26.66	24.83	24.41	24.86	
BG	41.54	59.02	58.37	62.18	65.78	50.62	53.12	47.74	

Çizelge 4.5: DBİ konumlandırma yöntemlerinin yürütme zamanları (SI,  $D = 7$ ).

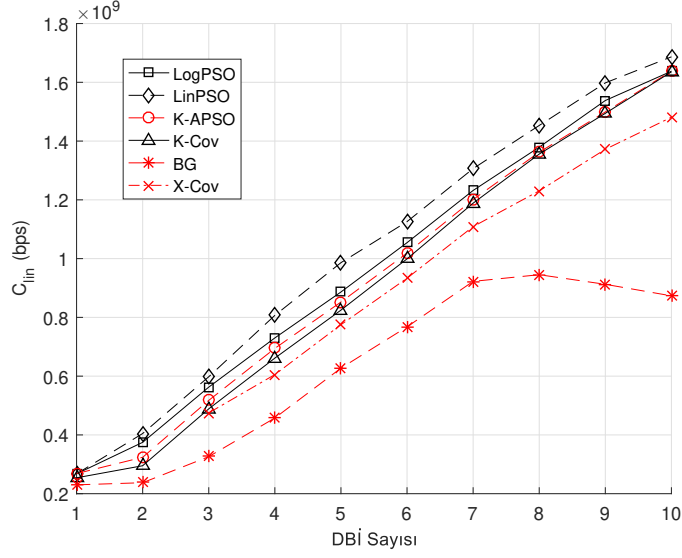
Yöntem	Yürütme zamanı(sn)
LogPSO	35.24
LinPSO	36.32
K-Cov	0.032
K-APSO	0.82
X-Cov	0.18
BG	0.003

ladığı kapasitenin iki katını ağa sağlayabilecek şekilde DBİ'leri konumlandırmaktadır. BG'den sonra en kötü performans X-Cov ile elde edilmiştir. X-Cov'un kullanıcı kapasite eşitliğini arttırmayı hedefleyen  $C_{log}$  farkında tasarımı  $C_{lin}$ 'de kayıplara neden olmaktadır.

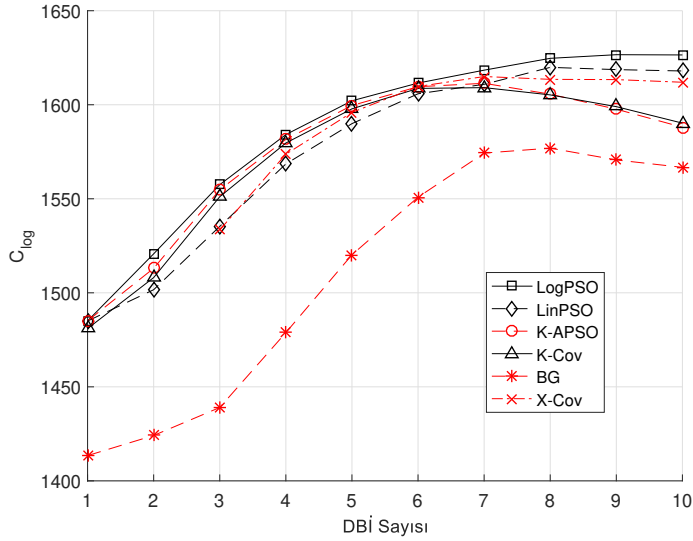
Şekil 4.6'da DBİ konumlandırma yöntemlerinin SII'deki  $C_{log}$  değerleri sunulmuştur. LogPSO, SI'de olduğu gibi SII'de de en yüksek  $C_{log}$  değerlerini tüm  $D$  değerleri için üretmiştir. SI'deki sonuçlardan farklı olarak LinPSO ve X-Cov, LogPSO'ya yakın değerler üretmiştir. SI'de her  $D$  değeri için LogPSO'dan sonra en iyi sonuçları üreten öbikleme temelli K-Cov ve K-APSO, SII'de  $D = 7$ 'den sonra daha düşük  $C_{log}$  değerleri üretmeye başlamıştır. K-Cov'da girişim göz önüne alınmamakta, K-APSO ise sadece DBİ yükseklikleri ile girişim yönetilebilmektedir. Bu yöntemlerde verilen  $D$  sayısı kadar DBİ'nin aktif olması ve kullanıcıların düzensiz dağılımı bazı DBİ'lerin birbirlerine çok yaklaşmasına ve girişim nedeniyle kapasite kayıplarının oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.4: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI'de  $C_{log}$  performansları



Şekil 4.5: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SI'de  $C_{lin}$  performansları



Şekil 4.6: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SII'de  $C_{log}$  performansları

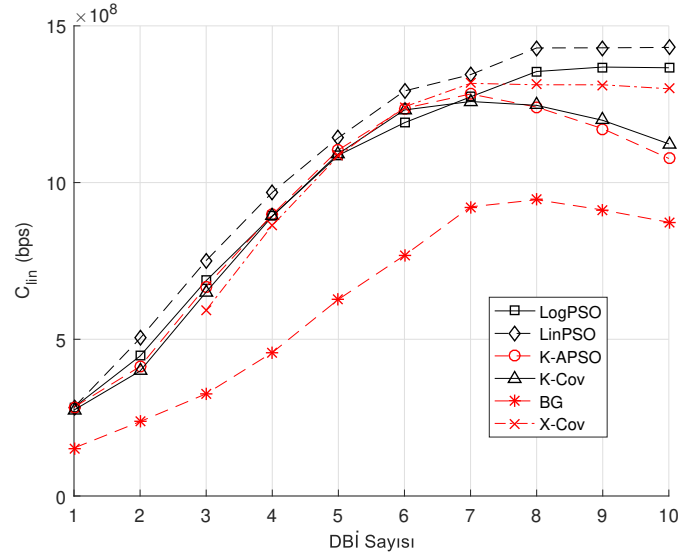
Bazı DBİ konumlandırma yöntemlerinin girişimi yönetmede kullandığı taktik, aşırı sayıda DBİ'nin kullanıma verilmesi durumunda sadece bazılarını aktif olarak ağda kullanmadır. Diğer bir deyişle  $D$  adet DBİ verildiği zaman tüm DBİ'leri konumlandırıp kullanmak yerine bazı DBİ'ler pasif duruma alınmaktadır.  $N_{DB}^{akt}$  ağda kaç adet DBİ'nin aktif olarak kullanıldığını göstermektedir. Bir DBİ'ye bağlanan herhangi bir kullanıcı varsa o DBİ aktif DBİ olarak tanımlanmaktadır. DBİ konumlandırma yöntemlerinin SII'de  $D = 4, 7, 10$  iken kaç adet DBİ'yi aktif şekilde kullandığı Çizelge 4.6'da sunulmuştur. Öbeleme temelli K-Cov ve K-APSO verilen tüm DBİ'leri aktif olarak ağda kullanmaktadır. Bu fazla DBİ kullanımını da Şekil 4.6'da ve SII'de  $C_{lin}$  performanslarını



Çizelge 4.6: SII’de DBİ konumlandırma yöntemleri ile belirlenen aktif DBİ sayıları.

Yöntem	$N_{DBi}^{akt} (D = 4)$	$N_{DBi}^{akt} (D = 7)$	$N_{DBi}^{akt} (D = 10)$
LogPSO	3.94	5.91	7.03
LinPSO	3.99	6.17	7.50
K-Cov	4	7	10
K-APSO	4	7	9.74
X-Cov	4	6.89	6.29
BG	3.92	6.29	7.92

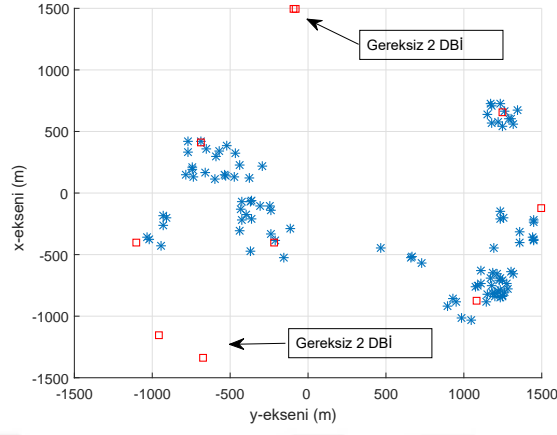
gösteren Şekil 4.7’de görüldüğü gibi  $D = 7$  ve sonrasında girişim artışına bağlı olarak kapasite kayıplarına neden olmaktadır. PSO temelli yöntemler ve X-Cov, verilen DBİ sayısı kadar aktif DBİ kullanmak yerine, girişimi göz önünde bulundurarak bazı DBİ’leri kullanım dışında bırakmaktadır. LinPSO ve LogPSO yöntemlerinde, fazla DBİ’ler hücre sınırlarında konumlandırılmakta ve girişim azaltılmaktadır. X-Cov ise bölünme kararını vermeyerek daha az sayıda DBİ ile servis sağlamaktadır.



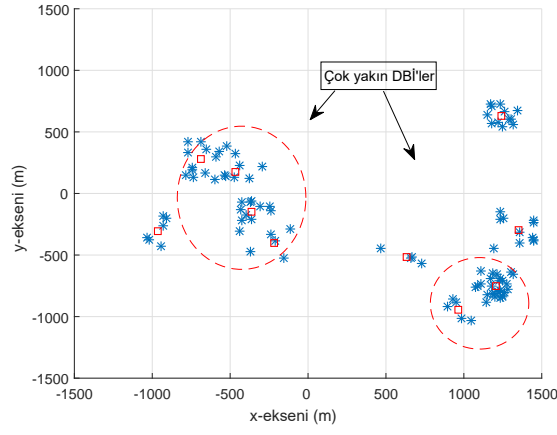
Şekil 4.7: DBİ konumlandırma yöntemlerinin SII’de  $C_{lin}$  performansları

Örnek bir ağda  $D = 10$  için LogPSO, K-Cov ve X-Cov yöntemleri ile yapılan DBİ konumlandırma Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Bu örnek ağda DBİ’ler LogPSO ile konumlandırıldığında Şekil 4.8a’de görüldüğü gibi 6 adet aktif DBİ kullanılmış, diğer 4 DBİ girişime neden olan aşırı DBİ’ler olarak ağ sınırlarında konumlandırılmış ve girişim azaltılmıştır. DBİ konumlandırma K-Cov ile gerçekleştirildiğinde 10 DBİ’de kullanıcı pozisyonlarına göre girişim göz önünde bulundurulmadan konumlandırılmış ve Şekil 4.8b’de görülebileceği gibi çok yakın DBİ yerleşimleri meydana gelmiştir. X-Cov yöntemi kullanıldığında Şekil 4.8c’de gösterildiği gibi 7 adet DBİ aktif olarak kullanılmıştır. X-Cov, LogPSO’dan 1 adet daha fazla DBİ kullanmış ancak diğer 3 DBİ’yi çözüme hiç dahil etmemiştir. Çok büyük ağlarda LogPSO ya da LinPSO gibi kaynak ihtiyacı çok olan yöntemlerle uygun DBİ sayısını belirlemek mümkün olma-

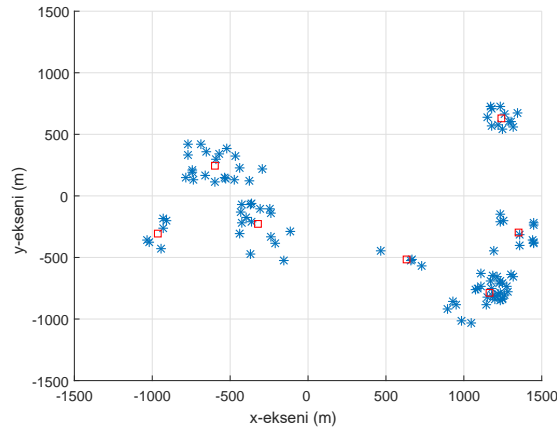
yabilir. Bu durumda hızlı çalışan X-Cov ile optimuma yakın şekilde ağda aktif olması gereken DBİ sayısı belirlenebilir.



(a) LogPSO



(b) K-Cov



(c) X-Cov

Şekil 4.8: Örnek bir ağda  $D = 10$  için LogPSO, K-Cov ve X-Cov ile DBİ konumlandırma

## 4.2 Yük Farkında DBİ Konumlandırma

### 4.2.1 Literatür taraması

DBİ'ler ya da KBİ'ler, kullanıcı terminallerinde alınan sinyal gücüne göre kullanıcılar ile eşleştirilebilir. Bu yöntem kolay uygulanabilir olsa da kullanıcıların düzgün dağılımlı olmadığı ağlarda dengesiz yük dağılımına sebep olarak kullanıcı servis kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Öte yandan çoktürlü (İng. heterogenous) ağlarda yüksek çıkış gücüne sahip makro Bİ'ler, daha küçük Bİ'leri sinyal gücü dikkate alındığında kullanışsız hale getirmektedir. Çok sayıda kullanıcının makro Bİ'ye bağlanması ile kapasite çok sayıda kullanıcıya bölünmekte ve çoktürlü ağın küçük Bİ'ler aracılığıyla sağlayacağı faydadan yararlanılamamaktadır [107, 108].

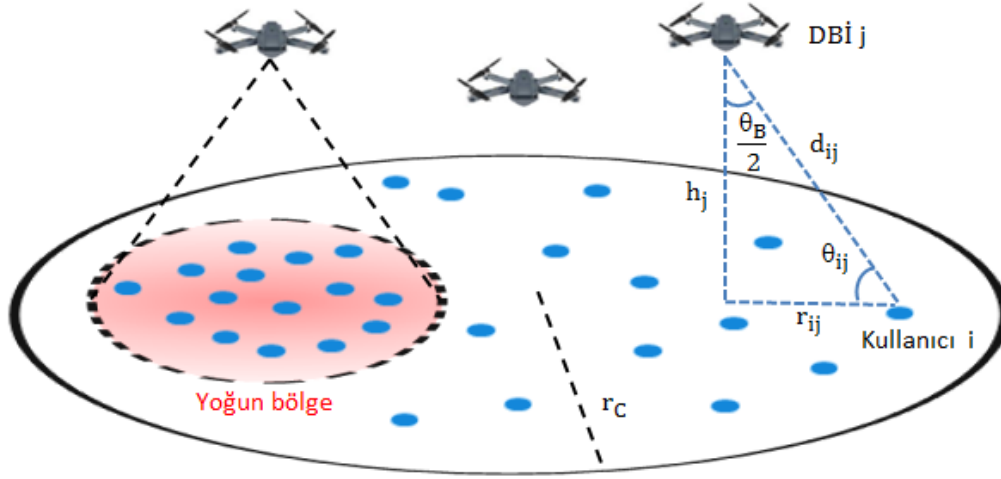
Çoktürlü KBİ'lerin yük durumlarını göz önünde bulundurarak kullanıcılarla eşleşmesini ya da yük dengelemesini inceleyen geniş bir literatür vardır [109, 110]. Kullanıcı kapasitesi temelli optimizasyonda, kullanıcı çizelgeleme ve Bİ ile eşleştirme Bİ yük durumu ve girişim ile ilişkili olduğundan sistem seviyesinde optimizasyon yapılmasını gerektirir. Ancak, kullanıcı Bİ eşleşmesi kombinasyonel optimizasyon problemidir ve kompleksite üssel şekilde artmaktadır. Bu sebeple büyük bir ağda optimal kullanıcı Bİ eşleşmesini bulmak mümkün olmayabilir ya da problemin çözümü için çok fazla süre gerekeceğinden elde edilen sonuç pratikte kullanışsız olabilir. Literatürde gevşetilmiş optimizasyon [111], Markov karar süreçleri [112, 113], oyun teorisi [114, 115], yanlı eşleştirme [111], olasılıksal geometri [116, 117] gibi farklı yük dengeleme teknikleri bulunmaktadır.

Bİ kullanıcı eşleştirme teknikleri merkezi ya da dağıtık şekilde uygulanabilir. Merkezi şekilde tanımlanan problemler genellikle NP-zor problemlerdir ve bir takım kolaylaştırıcı varsayımlar ile çözümler. Corroy ve arkadaşları [118], çoktürlü KBİ ağı için merkezi kullanıcı eşleştirme problemini incelemiş ve gevşetme yöntemini kullanarak toplam kapasite toplamı için üst sınır belirlemişlerdir. Ayrıca optimal sonuca yakın sonuçlar üreten sezgisel bir eşleştirme yöntemi geliştirmişlerdir. Kim ve arkadaşları [119], dağıtık tekrarlı Bİ kullanıcı eşleştirme tekniği önermişlerdir. Bu teknikte tekrarlı şekilde kullanıcı terminalleri eşleşme kararlarını verirler ve Bİ'ler yük durumlarını ağa yayınlırlar. Shen ve arkadaşları [120]'de fiyatlandırma temelli dağıtık çalışan Bİ kullanıcı eşleştirme tekniği önermişlerdir. Bu teknik ağ fayda maksimizasyonu ikincil problemin (İng. dual problem) düzenli iniş algoritması ile çözümüne dayanır. Ye ve arkadaşları [111] merkezi ağ fayda maksimizasyon problemini ele almış ve bu problemi asıl-ikincil ayrıştırma (İng. primal-dual decomposition) yöntemini kullanarak dağıtık şekilde çözen bir teknik geliştirmişlerdir.

### 4.2.2 Problemin tanımı ve çözümü

DBİ kullanıcı eşleşmesinin maksimum sinyal gücü seviyesine göre yapıldığı ve kullanıcıların düzensiz dağıldığı ağlarda Bölüm 4.1.3'de ifade edildiği gibi bazı DBİ'lere çok fazla sayıda kullanıcı bağlanmaktadır. Çok sayıda kullanıcının bir DBİ'ye bağlan-

ması kullanıcı kapasitelerinde azalmaya neden olmaktadır. Şekil 4.9’da kullanıcıların düzensiz dağıldığı, 3 DBİ ile servis sağlanan örnek bir ağ gösterilmiştir. Kullanıcıların belli bölgelerde yoğunlaşması sosyal olaylar (eylem, miting vb.), konserler ve spor aktivitelerine katılım sebebiyle meydana gelebilir. Bu gibi durumlarda Şekil 4.9’da gösterildiği gibi bir DBİ’ye diğer DBİ’lere bağlanan kullanıcı sayısından çok daha fazla sayıda kullanıcı bağlanabilir.



Şekil 4.9: Kullanıcıların düzensiz dağıldığı örnek bir DBİ ağı

DBİ ağlarında meydana gelen dengesiz DBİ kullanıcı eşleşmesi sorunu Bölüm 4.2.1’de bahsedilen yöntemler ile çözülebilir. Ancak bu çalışmalarda KBİ’lerin hareket kabiliyeti olmadığı gerçeği göz önünde bulunularak KBİ pozisyonlarının Bİ kullanıcı eşleşmesi ile birlikte optimize edilmesi problemi incelenmemiştir. 2B düzlemde DBİ pozisyonlarının ve DBİ kullanıcı eşleşmelerinin logaritmik kapasiteyi maksimize etmek için bulunduğu problem modeli Şekil 4.10’da sunulmuştur.

<p>Maksimum <math>\sum_{j \in \mathcal{D}} \sum_{i \in \mathcal{U}} x_{ij} \log \left( \frac{B}{L_j} \log_2 \left( 1 + \frac{R_{ij}(x_j^d, y_j^d)}{N_0 B + \sum_{k \neq j, k \in \mathcal{D}} R_{ik}(x_k^d, y_k^d)} \right) \right)</math></p> <p>Kısıtlar:</p> $\sqrt{(x_j^d)^2 + (y_j^d)^2} \leq r_c \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.9)$ $\sum_{j \in \mathcal{D}} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{U} \quad (4.10)$ $x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathcal{U} \quad \text{ve} \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.11)$
---

Şekil 4.10: DBİ konumlarını ve DBİ kullanıcı eşleşmelerini birlikte optimize eden problem modeli

Bu modelde  $x_{ij} \in \{0, 1\}$  kullanıcı  $i$  ile DBİ  $j$  arasında eşleşme olup olmadığını gös-

teren ikili karar değişkeni,  $L_j = \sum_{i \in \mathcal{U}} x_{ij}, \forall i \in \mathcal{U}, \forall j \in \mathcal{D}$  DBİ  $j$ 'ye bağlanan toplam kullanıcı sayısını göstermektedir. Birinci kısıt, DBİ'lerin hücre dışına çıkamayacağını göstermektedir. İkinci kısıt ise her kullanıcının sadece bir DBİ'ye bağlanabileceğini göstermektedir. Şekil 4.10'daki problemin çözümünde Bölüm 4.1.2'de sunulan PSO yöntemi ile birlikte Ye ve arkadaşlarının geliştirdiği dağıtık DBİ kullanıcı eşleştirme yöntemi [111] birlikte kullanılmıştır. Bu yöntemde, Bölüm 4.1.2.1'de sunulan Algoritma 1'de 4.adımda amaç fonksiyonu hesaplanırken sinyal gücüne bağlı DBİ kullanıcı eşleşmesi yerine yük farkında DBİ kullanıcı eşleşmesi yapılarak kapasite hesaplanmıştır.

DBİ pozisyonları  $(x_j^d, y_j^d, j \in \mathcal{D})$  verildikten sonra problem DBİ kullanıcı eşleştirme problemine dönmektedir. Bu durumda Şekil 4.10'daki problem rahatlatma da yapılarak Şekil 4.11'deki Şekilde yazılır.

<p>Maksimum <math>\sum_{j \in \mathcal{D}} \sum_{i \in \mathcal{U}} x_{ij} \log \left( \frac{C_{ij}}{\sum_{k \in \mathcal{U}} x_{kj}} \right)</math>  Kısıtlar:</p> $\sum_{j \in \mathcal{D}} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{U} \quad (4.12)$ $0 \leq x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in \mathcal{U} \quad \text{ve} \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.13)$
--

Şekil 4.11: DBİ kullanıcı eşleştirme problem modeli

Burada  $C_{ij}$  Bölüm 3.2'de tanımlanan kullanıcı  $i$  ile DBİ  $j$  arasındaki bölünmemiş kapasitedir. Modeldeki birinci kısıt kullanıcı  $i$ 'nin birden çok DBİ'ye bağlanabileceğini ifade etmektedir ve Şekil 4.10'daki DBİ kullanıcı eşleşme problemini gevşetmektedir. Tanımlanan bu problem yük metriği  $L_j$  kullanılarak Şekil 4.12'deki Şekilde yazılabilir.

<p>Maksimum <math>\sum_{j \in \mathcal{D}} \sum_{i \in \mathcal{U}} x_{ij} \log(C_{ij}) - \sum_{j \in \mathcal{D}} L_j \log(L_j)</math>  Kısıtlar:</p> $\sum_{j \in \mathcal{D}} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{U} \quad (4.14)$ $\sum_{i \in \mathcal{U}} x_{ij} = L_j, \quad \forall i \in \mathcal{D} \quad (4.15)$ $L_j \leq U \quad (4.16)$ $x_{ij}, L_j \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{U} \quad \text{ve} \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.17)$
---

Şekil 4.12: DBİ kullanıcı eşleştirme probleminin eşdeğer modeli

Bu problem modelindeki tek bağlayıcı kısıt  $\sum_i x_{ij} = L_j$ 'dir. Buradan hareketle Lagrange arpanı  $\mu$  tanıtılarak bağlayıcı kısıt gevşetilebilir. Buna göre ikincil problem Şekil 4.13'teki Şekilde tanımlanır.

$$\begin{aligned}
& \text{Minimum } D(\boldsymbol{\mu}) = f_x(\boldsymbol{\mu}) + g_L(\boldsymbol{\mu}) \\
& f_x(\boldsymbol{\mu}) \begin{cases} \text{Maksimum } \sum_{i \in \mathcal{U}} \sum_{j \in \mathcal{D}} x_{ij} (\log(c_{ij} - \mu_j)) \\ \text{Kısıtlar:} \\ \sum_{j \in \mathcal{D}} x_{ij} = 1 \\ 0 \leq x_{ij} \leq 1 \end{cases} \\
& g_L(\boldsymbol{\mu}) = \text{Maksimum } \sum_{j \in \mathcal{D}} L_j (\mu_j - \log(L_j)) \quad (4.18)
\end{aligned}$$

Şekil 4.13: DBİ kullanıcı eşleştirme probleminin ikincil problem modeli

Modeldeki DBİ kullanıcı eşleştirme probleminin çözümünde tekrarlı çalışan bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde  $f_x$  ve  $g_L$  problemleri dağıtık şekilde çözdürülmektedir. Dağıtık algoritma şu şekilde çalışmaktadır: Tekrar adımını  $t$ 'de her kullanıcı tüm DBİ'lerden gelen pilot sinyallerin SINR değerini ölçer ve her DBİ'den gelen  $\mu_j$  yayınlarını alır. Sonrasında kullanıcı  $i$  bağlanacağı DBİ'yi,

$$j^* = \text{Maksimum} (\log(c_{ij} - \mu_j(t))), \quad (4.19)$$

problemini çözerek belirler. DBİ'ler daha sonra  $L_j$  ve  $\mu_j$  değerlerini günceller.  $g_L$  fonksiyonu Denklem 4.20 ile maksimize edilir.

$$L_j(t+1) = \min\{U, e^{(\mu_j(t)-1)}\} \quad (4.20)$$

Lagrange çarpanı,

$$\mu_j(t+1) = \mu_j(t) - \delta(t) \left( L_j(t) - \sum_{i \in \mathcal{U}} x_{ij}(t) \right), \quad (4.21)$$

şeklinde güncellenir. Burada  $\delta(t) > 0$  dinamik olarak seçilen basamak boyudur.

Bu yöntemde Lagrange çarpanı  $\mu$ , DBİ'lerin yük durumlarına göre belirlenen fiyatı olarak düşünülür. Eğer  $\sum_i x_{ij}$  servis talebi,  $L_j$ 'de DBİ  $j$ 'nin sağlayabileceği servisi göstermektedir. Buna göre Denklem 4.21 arz talep kanununa göre DBİ fiyatını belirlemektedir. Bir DBİ'ye kapasitesinden fazla talep olduğunda DBİ'nin  $\mu_j$  değeri artmakta ve daha az kullanıcının bağlanması sağlanmaktadır. Eğer servis talebi az olursa  $\mu_j$  değeri düşmekte ve kullanıcıların o DBİ'ye bağlanması teşvik edilmektedir. Açıklanan bu yük farkında DBİ kullanıcı eşleştirme yöntemi farklı DBİ konumlandırma yöntemlerine uygulanmıştır.

### 4.2.3 Sonuçlar

Yük farkında DBİ kullanıcı eşleşme yöntemi kullanıcıların düzgün dağılmadığı, yoğun bölgeler içeren 400 kullanıcıdan oluşan 100 farklı ağda test edilmiştir. Kullanıcıların yarısı ağda düzenli şekilde dağıtılmış diğer yarısı yarıçapı 500m olan bir dairede

konumlandırılarak hücre içerisinde yoğun bir bölge oluşturulmuştur. DBİ yüksekliklerinin aynı olduğu varsayılmıştır. Sonuçlar tüm simülasyonların ortalamaları alınarak elde edilmiştir.

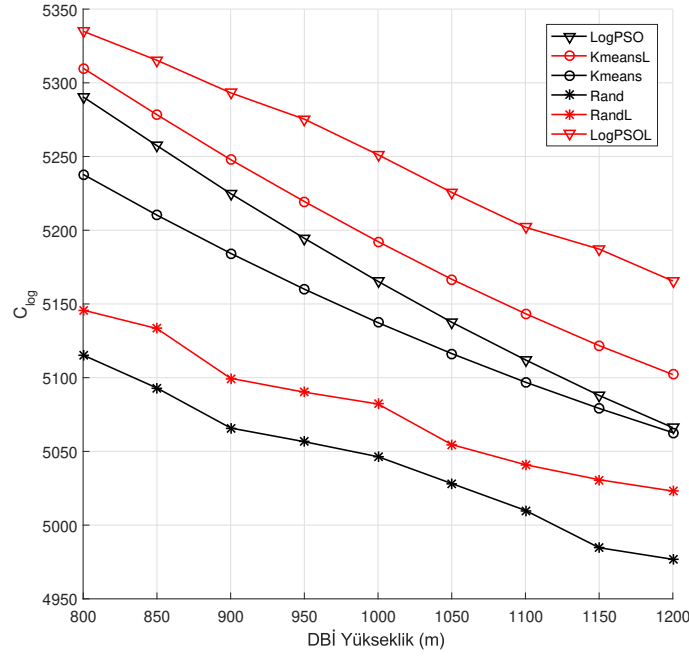
Önerilen LogPSO temelli yük farkında konumlandırma yöntemi, hem DBİ'lerin konumlandırılması hem de DBİ kullanıcı eşleşmesi farklı olan yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda 4.1.2.1'de sunulan LogPSO (bu bölümde DBİ'lerin 2B düzlemde konumlandırılması yapılmıştır), K-ortalama kümeleme ve rastgele DBİ yerleştirme yöntemlerinde DBİ kullanıcı eşleşmesi maksimum sinyal gücüne göre yapılmıştır. Bu yöntemler sırasıyla LogPSO, Kmean ve Rand olarak isimlendirilmiştir. Aynı DBİ konumlandırma yöntemleri ile Bölüm 4.2.2'de açıklanan yük farkında DBİ kullanıcı eşleşmesi yapılması ile elde edilen yöntemlere sırasıyla LogPSOL, KmeansL ve RandL isimleri verilmiştir. İsimlerin sonundaki L harfi yöntemin yük farkında DBİ kullanıcı eşleşmesi yaptığını göstermektedir. Kullanılan yöntemlerin sınıflandırılması Çizelge 4.7'de sunulmuştur. Simülasyon parametreleri  $U=400$  ve  $B=40\text{Mhz}$  dışında Bölüm 4.1.3 Çizelge 4.1'de sunulduğu gibidir.

Çizelge 4.7: Sinyal gücüne ve yük durumuna göre DBİ konumlandırma yöntemleri.

Yöntem	DBİ kullanıcı eşleşme	DBİ konumlandırma
LogPSO	Maks. sinyal gücü	LogPSO
Kmeans	Maks. sinyal gücü	K-ortalama öbekleme
Rand	Maks. sinyal gücü	Rastgele
LogPSOL	Yük farkında	LogPSO
KmeansL	Yük farkında	K-ortalama öbekleme
RandL	Yük farkında	Rastgele

Şekil 4.14'de  $D = 3$  iken farklı DBİ yüksekliklerinde elde edilen  $C_{log}$  değerleri gösterilmektedir. Beklendiği gibi LogPSOL en yüksek  $C_{log}$  değerini sağlamıştır. KmeansL ikinci en iyi performansı sağlamış ve yük farkında olmayan LogPSO yöntemine göre çok daha iyi performans sağlamıştır. Bu özellikle hesaplama kaynaklarının sınırlı olduğu durumlar için önemli bir sonuçtur. Bölüm 4.1.3'te gösterildiği gibi PSO, K-ortalama öbekleme yöntemine göre çok fazla kaynak kullanmaktadır. Basit dağıtık çalışan algoritmanın desteği ile direk K-öbekleme yöntemine kıyasla çok daha iyi performans elde edilebilir. Kmeans ile KmeansL arasındaki performans farkı DBİ yüksekliğinin artması ile bir miktar kapanırken, LogPSO ile LogPSOL arasındaki performans farkı tam tersine DBİ yüksekliği ile artmaktadır.

Yöntemler içinde en kötü sonucu DBİ'lerin rastgele yerleştirildiği Rand ve RandL üretmiştir. Bununla birlikte RandL, Rand'a göre oldukça iyi kazanç sağlamıştır. Değerlere daha detaylı bakıldığında, DBİ yükseliği 900m iken LogPSOL, LogPSO, KmeansL, Kmeans, RandL ve Rand yöntemleri ile elde edilen ortalama doğrusal kullanıcı kapasiteleri sırasıyla 557Kbps, 470Kbps, 498Kbps, 424Kbps, 343Kbps, 316Kbps olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre LogPSOL yöntemi, yük farkında olmayan LogPSO yönteminden %18.5, KmeansL yöntemi yük farkında olmayan Kmeans yönteminden %17.4, RandL yöntemi yük farkında olmayan Rand yönteminden %8.5 daha fazla kullanıcı kapasitesi sağlamıştır. Rand ve RandL arasındaki performans farkı-



Şekil 4.14: Maksimum sinyal gücüne ve yük farkında DBİ kullanıcı eşleşmesine göre farklı yüksekliklerde  $C_{log}$  değerleri ( $D = 3$ )

nın daha az olması bu yöntemlerin optimal konumlandırmadan uzak olması ve bu sebeple yük farkında eşleşmenin kazancından tam olarak yararlanamamasıdır. DBİ yüksekliği 1100m iken ortalama kullanıcı kapasiteleri bir önceki sırayla 444Kbps, 354Kbps, 383Kbps, 341Kbps, 296Kbps, 274Kbps olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre LogPSOL yöntemi, yük farkında olmayan LogPSO yönteminden %25.4, KmeansL yöntemi yük farkında olmayan Kmeans yönteminden %12.3, RandL yöntemi yük farkında olmayan Rand yönteminden %9.2 daha fazla kullanıcı kapasitesi sağlamıştır. DBİ yüksekliğinin artması ile LogPSOL ile logPSO arasındaki fark %18.5'ten %25.4'e yükselmiştir. Bununla birlikte KmeansL ile Kmeans arasındaki fark %17.4'ten %12.3'e düşmüştür. Bu sonuç DBİ konumlarının DBİ kullanıcı eşleşme mekanizması ile birlikte optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Şekil 4.15'de  $D = 3$  iken farklı DBİ yüksekliklerinde elde edilen  $C_{min}$  değerleri sunulmuştur. Beklendiği gibi LogPSOL yöntemi en başarılı  $C_{min}$  performansını sağlamıştır. Bununla birlikte hızlı çalışan KmeansL yöntemi LogPSOL yöntemine yakın bir performans sağlamıştır. LogPSO ile KmeansL yöntemleri arasındaki önemli fark, kullanıcıların düzensiz dağıldığı ağlarda kullanıcı eşleştirme tekniğinin ağ performansı açısından önemini göstermektedir. Beklenmeyen bir performans DBİ yüksekliği 1080m ve daha fazla iken gözlenmektedir. DBİ'lerin rastgele konumlandırıldığı RandL yöntemi ile LogPSO yönteminden daha iyi  $C_{min}$  performansı sunmaktadır. Bu durumda kullanıcı DBİ eşleşmesinde yük farkındalığının son derece başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. RandL ve Rand yöntemlerinin diğer yöntemlerden farklı olarak ürettiği bir sonuçta diğer yöntemlerde DBİ yüksekliğine bağlı  $C_{min}$  değerinde düşüş meydana gelirken Rand ve RandL yöntemlerinde önemli bir artış vardır. Bunun sebebi de DBİ'ler

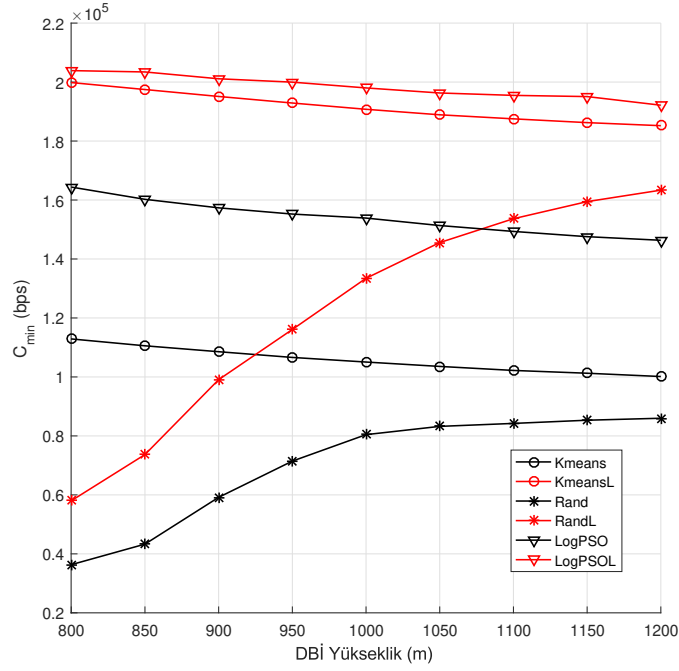


ile kullanıcılar arasındaki görüş hattı ihtimalinin ve anten kazancının artmasıdır.

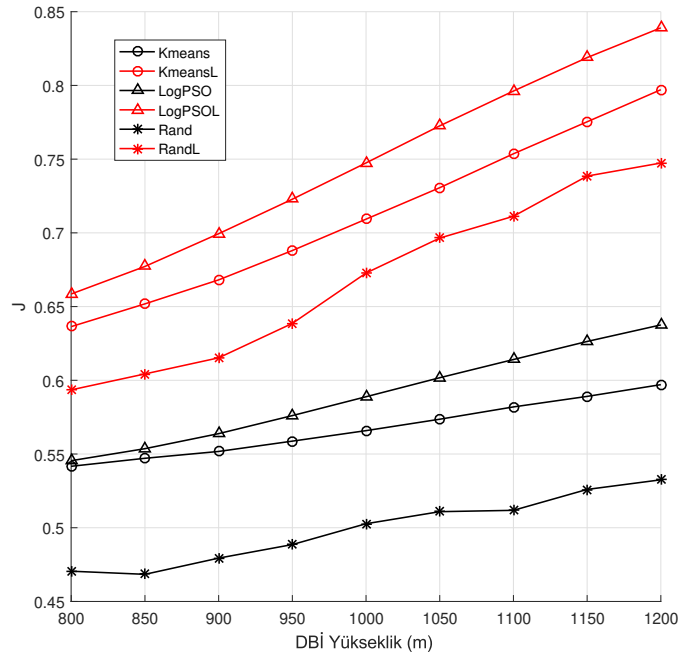
Elde edilen değerlere sayısal olarak baktığımızda, DBİ yükseliği 900m iken LogPSOL, LogPSO, KmeansL, Kmeans, RandL ve Rand yöntemleri ile sağlanan  $C_{min}$  değerleri sırasıyla 201Kbps, 157Kbps, 195Kbps, 108Kbps, 99Kbps, 59Kbps olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre LogPSOL yöntemi, LogPSO yönteminden %28.02, KmeansL yöntemi Kmeans yönteminden %80.55, RandL yöntemi Rand yönteminden %67.79 daha fazla kullanıcı kapasitesi sağlamıştır. DBİ yüksekliği 1100m iken ortalama kullanıcı kapasiteleri bir önceki sırayla 195Kbps, 149Kbps, 187Kbps, 102Kbps, 153Kbps, 84Kbps olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre LogPSOL yöntemi, LogPSO yönteminden %30.87, KmeansL yöntemi Kmeans yönteminden %83.33, RandL yöntemi Rand yönteminden %82.14 daha fazla kullanıcı kapasitesi sağlamıştır. KmeansL ve RandL yöntemleri ile yük farkında olmayan versiyonlarına göre çok ciddi kapasite kazancı elde edilmiştir. Buna sonuçlara göre DBİ konumlandırmanın iyi yapılmadığı durumlarda DBİ kullanıcı eşleşmesi çok büyük önem kazanmaktadır.

Bölüm 4.1.3’de bir eşitlik metriği olarak açıklanan J indeksi kullanıldığında  $D = 3$  için Şekil 4.16’deki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre tüm yük farkında yöntemler, tüm DBİ yüksekliklerinde yük farkında olmayan karşılıklarına göre önemli kazançlar sağlamışlardır. En yüksek J değerleri sırasıyla LogPSOL, KmeansL ve RandL ile elde edilmiştir. DBİ yüksekliğindeki artışa bağlı olarak J değeri de tüm yöntemler için artmıştır. Bu artışın sebebi yol kaybındaki artışa bağlı kullanıcı kapasitelerinde genel olarak düşüş yaşanması ve kapasiteler arasındaki farkların azalmasıdır. Sonuçları yukarıdaki benzer yaklaşımla sayısal olarak değerlendirdiğimizde daha önceki sırayla J değerleri 900m’de 0.699, 0.563, 0.668, 0.551, 0.615, 0.479 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre LogPSOL yöntemi, LogPSO yönteminden %24.15, KmeansL yöntemi Kmeans yönteminden %21.23, RandL yöntemi Rand yönteminden %28.39 daha fazla J kazancı sağlamıştır. 1100m’de aynı sırayla J değerleri 0.796, 0.614, 0.730, 0.573, 0.696, 0.510 olmuştur. Bu sonuçlara göre LogPSOL yöntemi, LogPSO yönteminden %29.64, KmeansL yöntemi Kmeans yönteminden %27.39, RandL yöntemi Rand yönteminden %36.47 daha fazla J kazancı sağlamıştır.

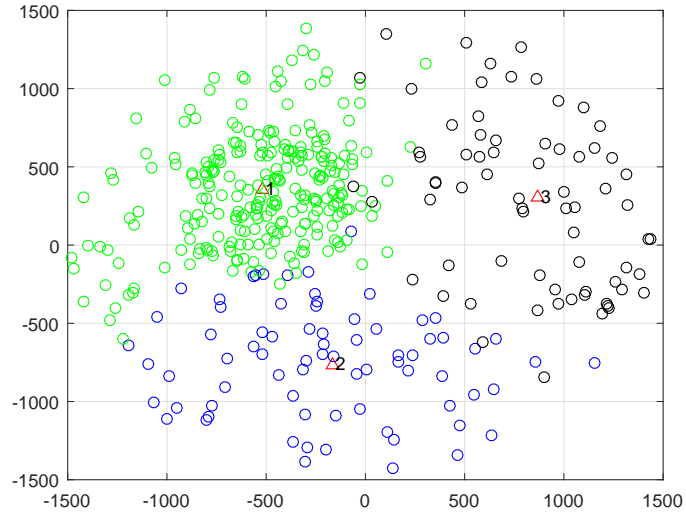
Şekil 4.17’de  $D = 3$  için DBİ yükseklikleri 900m iken K-ortalama kümeleme yöntemi ile DBİ’lerin yatay düzlemde konumlandırılıp, DBİ kullanıcı eşleşmelerinin maksimum sinyal gücüne (Kmeans) ve DBİ’ye bağlanan kullanıcı sayısını yani yükü göz önünde bulundurarak (KmeansL) yapıldığı örnek bir senaryo gösterilmiştir. Şekil 4.17a’da yeşil renk ile gösterilen kullanıcılar yoğun bölge çevresinde bulunan kullanıcılardır. Şekilde görüldüğü gibi 1 numaralı DBİ yoğun bölgede konumlanmış ve diğer DBİ’lerden daha yakın olduğu tüm kullanıcılar ile eşleşmiştir. Bu durum kullanıcıların DBİ’lere dengesiz şekilde dağılmasına neden olmuştur. Şekil 4.17b’ye bakıldığında ise yoğun bölgedeki yeşil renkli kullanıcıların azaldığı görülmektedir. Yük farkında DBİ kullanıcı eşleşmesi ile bazı kullanıcılar kendilerinden uzakta da olsa en yakın DBİ’ye değil uzaktaki bir DBİ’ye bağlanmaktadır. Bu bazı kullanıcıların yol kaybı daha fazla olan DBİ’lere bağlanması demek olsa bile kapasitenin daha az sayıda kullanıcı arasında paylaşılması ile ağın  $C_{log}$ ,  $C_{min}$  ve  $J$  değerlerinde önemli iyileşme meydana gelmektedir.



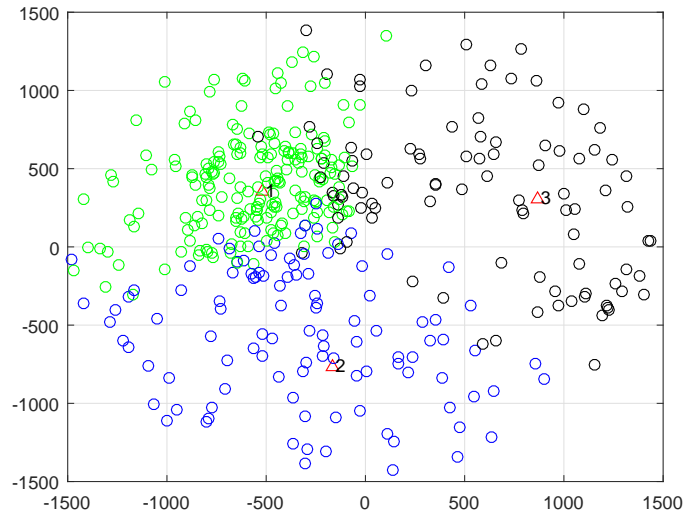
Şekil 4.15: Maksimum sinyal gücüne ve yük farkında DBİ kullanıcı eşleşmesine göre farklı yüksekliklerde  $C_{min}$  değerleri ( $D = 3$ )



Şekil 4.16: Maksimum sinyal gücüne ve yük farkında DBİ kullanıcı eşleşmesine göre farklı yüksekliklerde  $J$  değerleri



(a) Kmeans



(b) KmeansL

Şekil 4.17: Örnek bir ağda Kmeans ve KmeansL yöntemleri ile DBİ kullanıcı eşleştirme ( $D = 3$ )

### 4.3 Şehir Çatışmalarında DBİ Konumlandırma

#### 4.3.1 Literatür taraması

Dünyamız her geçen gün daha fazla şehirleşmektedir. 2008 yılında ilk kez dünya popülasyonunun yarısından fazlası şehirlerde yaşamaya başlamıştır ve bu oran hızla artmaktadır [121]. Ancak, şehirleşmenin artması ile sınırlı kaynaklara (su, enerji, besin vb.) talep artmakta ve toplumsal sistemde baskı oluşmaktadır. Bunun sonucu olarak

da yoğun olarak şehirleşmiş bölgelerde huzursuzluğun artması ve şiddet eylemlerinin meydana gelmesi olasıdır. Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü'nün (İng. North Atlantic Treaty Organisation - NATO) bir raporuna göre 2030 yılına gelindiğinde dünya üzerindeki savaşların büyük bir kısmı şehir ortamlarında gerçekleşecektir. NATO 2016 yılında başlattığı proje ile şehir operasyonlarındaki gereksinimleri tespit etmek, kabiliyetleri belirlemek ve eğitim ile ilgili ihtiyaçları tespit etmek için proje başlatmıştır [122].

Şehir çatışmalarını açık saha çatışmalarına göre çok daha zor hale getiren iki temel faktör vardır. Öncelikle şehir çatışmalarında sivillerin mevcudiyeti operasyonel yaklaşımı değiştirmekte ve bilgi paylaşımına ve kesin atışa dayalı çatışma tekniği gerektirmektedir [123]. Ayrıca şehir ortamının karmaşası dost ateşi riskini de beraberinde getirmektedir. Bu ihtiyaçlar durumsal farkındalığın ve ekipler arasındaki iletişimin en üst seviyede olmasını gerektirmektedir. Bu sebeple şehir çatışmalarında güvenilir haberleşme ekipmanlarının kullanılması büyük önem taşımaktadır [123, 124].

Şehir ortamında taktik amaçlı kablosuz iletişim ağı kurmada önemli zorluklar bulunmaktadır. Binaların ve çeşitli yapıların mevcudiyeti iletişimin ağırlıklı olarak görüş hattı dışında yapılmasına sebep olmaktadır. Röle (ing. relay) kullanımı ile görüş hattı iletişimi yapılması mümkün olsa da hem planlama hem de güvenlik ile ilgili sorunlar sebebiyle röle kullanımı etkin bir yöntem değildir [123]. Röle ya da baz istasyonlarının sahadaki kullanıcıların pozisyonlarına göre hareket ettirilmesi tehditlerin varlığı sebebiyle mümkün olmayabilir. Bu sebeple, DBİ'lerin taktik sahalarda kullanımı önemli bir uygulama alanıdır.

Taktik sahalarda GPS karıştırılmasına sıklıkla rastlanmaktadır [125]. GPS karıştırıcılar rahatlıkla tedarik edilebilmekte [126] ve çok düşük sinyal güç seviyelerinde çalışan alıcıları rahatlıkla karıştırabilmektedir [46]. Bununla birlikte GPS karıştırmaya kullanılabilen karşı tedbir yöntemleri bulunmaktadır [47–50]. Bu sistemler anten dizilerini ve sinyal işleme algoritmalarını (uzaysal filtreleme (İng. spatial filtering), hüzmeye oluşturma (İng. beamforming)) kullanarak GPS karıştırmaya dayanıklı hale gelmektedirler [127, 128].

Taktik sahalarda baz istasyonlarının ya da röle sistemlerinin etkin şekilde konumlandırılmasında kullanıcı konum bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bahsedildiği gibi GPS karıştırma işlemi rahatlıkla yapılabilen ve dayanım için özel sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Öte yandan, GPS karıştırmaya dayanıklı sistemlerin boyut, ağırlık ve maliyetleri düşünüldüğünde her kullanıcıya bu sistemlerin sağlanması mümkün görünmemektedir. Bunun yerine GPS karıştırma dayanıklı sistemler DBİ'lere entegre edilip GPS bandı dışında bir frekansta, RSSI değerlerinden elde edilen yol kayıpları kullanılarak kullanıcı pozisyonları tahmin edilebilir.

RSSI temelli konum tahmini kolay yapılabilir olması ve açı temelli konum tahmin sistemlerinde gerekli olan anten dizileri gibi ekstra donanımlara ihtiyaç duymaması [129] sebebiyle DBİ'de kullanım için uygun bir tekniktir. Ayrıca, zaman temelli konum tahmin sistemlerinde gereken hassas zaman senkronizasyonuna da [130] ihtiyaç duyulmamaktadır. RSS temelli konumlandırma konusu kablosuz sensör ağları kapsamında çalışılmıştır [131–135]. Caballero ve arkadaşları, [51]'de kendi pozisyonunu



ya da kullanıcılar arası haberleşmenin olduğu alandır. Bu alan operasyon sahası (OS) olarak tanımlanmıştır ve yarıçapı  $r_{OS}$  olarak gösterilmiştir. Diğer alan ise T adet düşman unsurunun ( $\mathcal{T} = 1, \dots, T$ ) bulunduğu OS'den daha büyük olan alandır. Bu alan savaş sahası (SS) olarak tanımlanmıştır ve yarıçapı  $r_{SS}$  olarak tanımlanmıştır. Her kullanıcının çevresinde  $r_{GA}$  yarıçaplı bir güvenli alan bulunduğu varsayılmıştır. Bu alanda tehdit unsurlarının DBİ'leri hedef alamayacağı ya da diğer bir ifadeyle tehdit unsurlarının bu alanda bulunamayacağı varsayılmıştır.



Şekil 4.19: DBİ tehdit unsuru

#### 4.3.2.1 Kullanıcı konumlarının kestirilmesi

Bölüm 4.3.1'de ifade edildiği gibi taktik sahalarda GPS ile kullanıcı ya da asker konumlarını sağlamak GPS karıştırıcıların varlığı nedeniyle mümkün olmayabilir. Bu durumda kullanıcı konumlarının farklı yöntemlerle tahmin edilmesi gerekmektedir. Elde edilen kestirimsel sonuçlara göre DBİ'lerin konumlandırılması yapılabilir. RSSI değerleri terminallerde ölçüldükten sonra yol kaybı basitçe belirlenebilir. Kullanıcı  $i$ 'nin DBİ'lerle arasındaki yol kaybı vektörü  $\mathbf{PL}_i = [PL_{i1}, \dots, PL_{iD}]$  şeklinde tanımlansın. Kullanıcı  $i$ 'nin konumunun yükseliş açısı cinsinden,  $\theta_i = [\theta_{i1}, \dots, \theta_{iD}]$ , verilmesi durumunda kullanıcı  $i$ 'nin yol kaybı vektörünün olasılık yoğunluk fonksiyonu (İng. probability density function),  $f(\mathbf{PL}_i; \theta_i)$

$$f(\mathbf{PL}_i; \theta_i) = \prod_{j=1}^D \left( \frac{p_{LoS}^{ij}(\theta_{ij})}{\sqrt{2\pi\sigma_{LoS}^2(\theta_{ij})}} \exp\left(-\frac{(PL_{ij} - E[PL_{LoS}^{ij}])^2}{2\sigma_{LoS}^2(\theta_{ij})}\right) + \frac{p_{NLoS}^{ij}(\theta_{ij})}{\sqrt{2\pi\sigma_{NLoS}^2(\theta_{ij})}} \exp\left(-\frac{(PL_{ij} - E[PL_{NLoS}^{ij}])^2}{2\sigma_{NLoS}^2(\theta_{ij})}\right) \right), \quad (4.22)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $E[PL_{LoS}^{ij}]$  ve  $E[PL_{NLoS}^{ij}]$ , kullanıcı  $i$  ile DBİ  $j$  arasındaki sırasıyla görüş hattı içi ve görüş hattı dışı yol kaybının beklenen değerleridir ve

$$E[PL_{LoS}^{ij}] = 10\gamma \log\left(\frac{4\pi d_{ij} f_c}{c}\right) + \mu_{LoS}, \quad (4.23)$$

$$E[PL_{NLoS}^{ij}] = 10\gamma \log \left( \frac{4\pi d_{ij} f_c}{c} \right) + \mu_{NLoS}, \quad (4.24)$$

olarak hesaplanırlar. Denklem 4.22 kullanılarak logaritmik olabilirlik fonksiyonu (İng. log likelihood function)

$$L(\theta_{\mathbf{i}}) = \sum_{j=1}^D \log \left( \frac{p_{LoS}^{ij}(\theta_{ij})}{\sqrt{2\pi\sigma_{LoS}^2(\theta_{ij})}} \exp \left( -\frac{(PL_{ij} - E[PL_{LoS}^{ij}])^2}{2\sigma_{LoS}^2(\theta_{ij})} \right) + \frac{p_{NLoS}^{ij}(\theta_{ij})}{\sqrt{2\pi\sigma_{NLoS}^2(\theta_{ij})}} \exp \left( -\frac{(PL_{ij} - E[PL_{NLoS}^{ij}])^2}{2\sigma_{NLoS}^2(\theta_{ij})} \right) \right), \quad (4.25)$$

şeklinde yazılır ve aşağıdaki problemin çözülmesi ile kullanıcı  $i$ 'nin DBİ'ler ile olan kestirimsel yükseliş açıları  $\hat{\theta}_{\mathbf{i}} = [\hat{\theta}_{i1}, \dots, \hat{\theta}_{iD}]$  elde edilir.

$$\hat{\theta}_{\mathbf{i}} = \arg \max L(\theta_{\mathbf{i}}) \quad (4.26)$$

Kullanıcı yükseliş açılarını bulduktan multilaterasyon (İng. multilateration) ile kestirimsel kullanıcı konumu 2B düzlemde elde edilir. Matematiksel olarak

$$\hat{r}_{ij} = \frac{h_j}{\tan \hat{\theta}_{ij}}, \quad (4.27)$$

ile kullanıcı  $i$  ile DBİ  $j$  arasındaki yatay mesafenin kestirimi  $\hat{r}_{ij}$  elde edilir ve aşağıdaki optimizasyon probleminin çözümü ile kestirimsel koordinatlar elde edilir.

$$(\hat{x}_i^u, \hat{y}_i^u) = \arg \min_{x_i^u, y_i^u} \sum_{j=1}^D \left( \sqrt{(x_j^d - x_i^u)^2 + (y_j^d - y_i^u)^2} - \hat{r}_{ij} \right)^2, \forall i \in U \quad (4.28)$$

#### 4.3.2.2 Tehdit modeli ve DBİ'lerin vurulmama olasılığı

Taktik sahalarda iletişim sürekliliğinin sağlanmasındaki temel sorunlardan birisi iletişim altyapılarına yapılan saldırılardır [139]. Bu bölümde şehir çatışmalarında Bölüm 4.3.2'da tanımlanan tehdit unsurları ile yapılacak bir saldırının başarımlı ihtimali [140]'de sunulan verilerden yararlanılarak matematiksel olarak modellenmiştir. Isby'nin çalışmasında tarihsel verilerden yararlanılarak çeşitli silahların (5.56mm M-16A1 saldırı tüfeği, 40mm M203 bomba atar, 7.62mm PK hafif makineli tüfek vb.) insan ya da araç boyutlarında hedefleri belli mesafelerden vurulma ihtimalleri sunulmuştur. Bu çalışmada 7.62mm SVD Dragunov keskin nişancı tüfeğinin insan boyutlarında bir hedefi belli mesafelerde vurma olasılıkları Çizelge 4.8'de sunulmuştur. Baker ve arkadaşları insan yüzey alanını  $1.86m^2$  olarak hesaplamışlardır [141]. Bu yüzey alanı, 77cm yarıçapa sahip bir dronun yüzey alanına denk gelmektedir. Bu boyutlarda bir dron yaklaşık 8-10kg yük taşıyabilmekte ve yaklaşık yarım saat havada kalabilmektedir [142, 143].

Çizelge 4.8: 7.62mm SVD Dragunov tüfeğinin hedef vurma olasılıkları.

Hedefe uzaklık	Vurma olasılığı
50	95+ (97)
200	95
300	90
500	80
700	60
800	50
1000	20
1600	5

Çizelge 4.8'deki verileri kullanarak bir dronun mesafeye bağlı olarak vurulma olasılığının modeli Şekil 4.20'de sunulmuştur.

$$p_{vur}(d) = \begin{cases} \frac{100 - 5 \exp(0.0028 \times d)}{100}, & \text{eğer } d < 985m \\ \frac{210.58 \exp(-0.0023 \times d)}{100}, & \text{diğer türlü} \end{cases} \quad (4.29)$$

Şekil 4.20: DBİ'nin mesafeye göre vurulma olasılığı modeli

DBİ'lerden birinin ya da birden çoğunun vurularak görev dışı kalması durumunda ağdaki servis kalitesi olumsuz şekilde etkilenmektedir. Bu durumda DBİ'ler yeniden konumlandırılarak servis kalitesi iyileştirilebilir. DBİ konumlandırma yaparken hem DBİ'lerin hiçbirinin vurulmaması ihtimalini ( $p_{vur}^0$ ) hem de haberleşme servis kalitesini göz önünde bulundurarak DBİ'leri konumlandırmak etkili bir yöntemdir. Çalışmamızda tehdit unsurları en yakın DBİ'yi hedef almaktadır. DBİ ile tehdit unsuru arasındaki görüş hattı ihtimalinin hesabında Bölüm 3.1'de verilen Denkem 3.8 kullanılmıştır. Bu yaklaşımla DBİ'lerin hiçbirinin vurulmaması ihtimali

$$p_{vur}^0 = \prod_{j=1}^D (1 - p_{vur}^j), \quad (4.30)$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $p_{vur}^j$  DBİ  $j$ 'nin en yakın tehdit unsuru/unsurları tarafından vurulması olasılığıdır ve

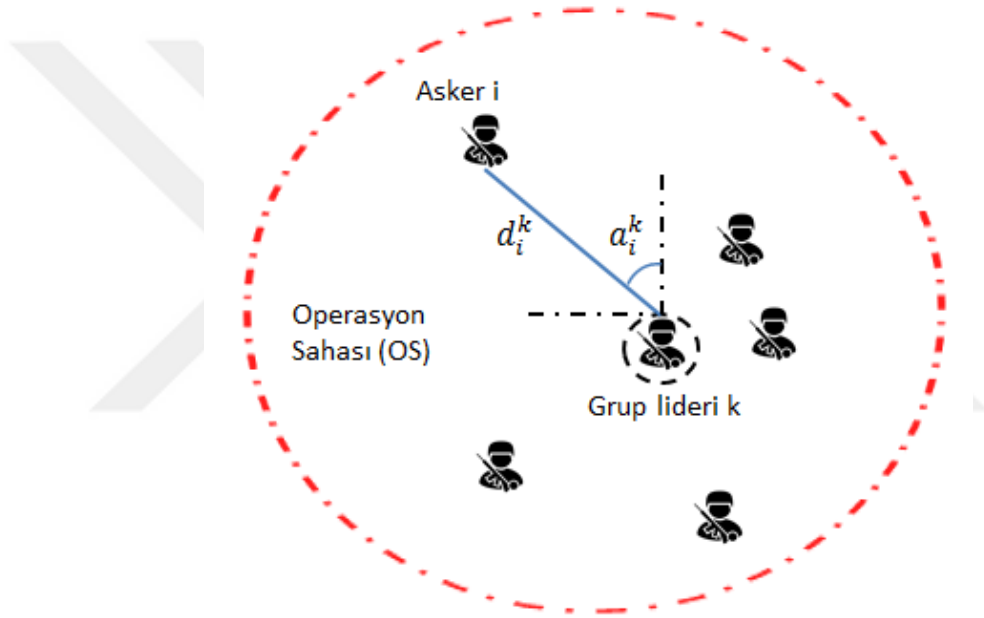
$$p_{vur}^j = 1 - \prod_{k \in \mathcal{T}_j} (1 - p_{vur}(d_{jk}) p_{LoS}^{jk}), \quad (4.31)$$

şeklinde formüle edilir. Burada  $\mathcal{T}_j$  DBİ  $j$ 'yi hedef alan tehdit unsuru setini,  $d_{jk}$  DBİ  $j$  ile tehdit unsuru  $k$ ,  $k \in \mathcal{T}$  arasındaki mesafeyi,  $p_{LoS}^{jk}$  DBİ  $j$  ile tehdit unsuru  $k$  arasındaki görüş hattı olasılığını göstermektedir.



### 4.3.2.3 Kullanıcı dağılım modeli

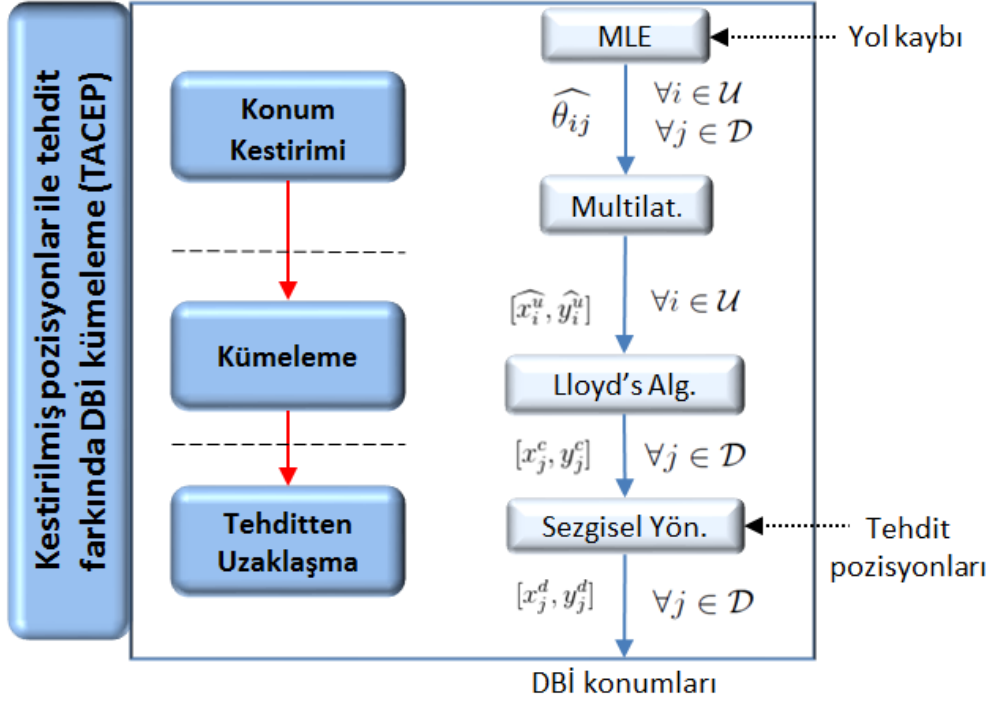
Kullanıcı ya da şehir çatışması senaryosunda asker dağılımlarının doğru şekilde modellenmesi DBİ konumlandırma yöntemlerinin performanslarını anlamada Bölüm 4.1’de gösterildiği gibi önemli bir konudur. Askerler şehir çatışmalarında küçük takımlar halinde kendilerine atanan operasyonları gerçekleştirmektedirler [144]. Araştırmacılar taktik ağlarda asker dağılımlarının gerçekçi şekilde modellenmesinde yapısal grup hareketlilik modelinden (İng. structured group mobility model - SGMM) yararlanmaktadır [145, 146]. SGMM modeli kullanıldığında grup liderleri OS’de düzgün dağılıma göre yerleştirilmekte daha sonra askerler ilgili grup liderleri etrafında konumlandırılmaktadır. Şekil 4.21, asker  $i$ ’nin grup lideri  $k$ ’ya göre konumlandırılmasını göstermektedir. Şekilde  $d_i^k$  ve  $a_i^k$  sırasıyla asker  $i$  ile grup lideri  $k$  arasındaki mesafeyi ve açığı göstermektedir.  $d_i^k$  Gauss dağılımlı,  $a_i^k$  ise düzgün dağılımlı setlerden seçilmektedir.



Şekil 4.21: SGMM modeli ile asker ve grup liderinin konumlandırılması

### 4.3.2.4 Tehdit unsuru farkında DBİ kümeleme

Bölüm 4.1’de sivil uygulamalar düşünülerek önerilen DBİ konumlandırma yöntemleri askeri sahalarda bulunan tehdit unsurlarını ve GPS karıştırmasını göz önünde bulundurmamaktadır. Burada önerilen yöntem ile önce kullanıcı pozisyonları MLE yöntemi ile kestirilerek  $(\hat{x}_i^u, \hat{y}_i^u)$  elde edilmekte sonrasında DBİ pozisyonları KC yöntemi ile  $(x_j^c, y_j^c)$  ve sezgisel bir yöntem ile elde edilmektedir. Sezgisel yöntem,  $p_{vur}^0$ ’ı arttırırken kullanıcı kapasitelerinde önemli bir kayıp olmamasını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Şekil 4.22’de tasarlanan kestirimsel kullanıcı pozisyonları ile tehdit farkında DBİ kümeleme (İng. threat aware clustering with estimated positions - TACEP) algoritmasında kullanılan yöntemler, girdiler ve çıktılar gösterilmektedir.



Şekil 4.22: TACEP yönteminin genel modeli

Kullanıcı pozisyonlarının MLE ile kestirilmesi Bölüm 4.3.2.1’de, KC yöntemi ile DBİ pozisyonlarının belirlenmesi de Bölüm 4.1.2.2’de sunulmuştur. Şekil 4.22’de gösterilen sezgisel yöntem tekrarlı şekilde çalışarak  $p_{vur}^0$ ’ı yükseltmeye çalışmaktadır. Bu işlem yapılırken DBİ’ler KC yöntemi ile bulunan konumlarından her tekrarda  $d_{\Delta}^h$  kadar uzaklaşabilmektedir. Herhangi bir DBİ’nin ilk konumlarından uzaklaşma mesafesi  $d_{max}^h$  ile sınırlandırılmıştır. Bu kısıt ile kullanıcı kapasitesinde önemli kayıplar olmaması hedeflenmiştir. Kısıt olmaması durumunda DBİ’lerden mümkün oldukça uzaklaşılırken aynı zamanda kullanıcılardan da uzaklaşılacak ve yol kaybının artışı ile birlikte kullanıcı kapasiteleri hızla düşecektir. Algoritma,  $p_{vur}^0$ ’da bir önceki tekrara göre artış olmaması ya da DBİ’lerin ilk konumlarına göre  $d_{max}^h$  mesafeye ulaşmaları durumunda sonlanmaktadır.

#### 4.3.2.5 DBİ konumlandırma yöntemleri

Bölüm 4.1.2’de toplam kullanıcı kapasitesini ve kullanıcı kapasitelerinin logaritmalarının toplamını maksimize eden sırasıyla LinPSO ve LogPSO olarak isimlendirilen yöntemler sunulmuştur. Bu bölümde kapasite yükseltmeyi temel alan bu yöntemlerden farklı olarak kapsama alanını iyileştirmeyi hedefleyen iki yaklaşım sunulmuştur. En çok sayıda kullanıcının belli bir kapasite eşik değerinden ( $C_{TH}$ ) yüksek kapasitede olmasını hedefleyen yöntem matematiksel olarak Şekil 4.23’teki şekilde modellenmiştir. Bu problemin çözümünde PSO yönteminden yararlanılmış ve *CovKP* olarak isimlendirilmiştir.

Maksimum  $\sum_{i \in \mathcal{U}} l_{cov}^i$

Kısıtlar:

$$\sqrt{(x_j^d)^2 + (y_j^d)^2} \leq r_c \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.32)$$

$$h_{min} \leq h_j^d \leq h_{max} \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.33)$$

Şekil 4.23: Kapsanan kullanıcı sayısını maksimize eden DBİ konumlandırma modeli

Burada  $l_{cov}^i$  ikili karar değişkeni

$$l_{cov}^i = \begin{cases} 1, & \text{eğer } \frac{1}{U_{\alpha_i}} B \log_2 \left( 1 + \frac{R_{i\alpha_i}(x_{\alpha_i}^d, y_{\alpha_i}^d, h_{\alpha_i}^d)}{N_0 B + \sum_{j \neq \alpha_i, j \in \mathcal{D}} R_{ij}(x_j^d, y_j^d, h_j^d)} \right) \geq C_{TH} \\ 0, & \text{diğer türlü} \end{cases} \quad (4.34)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Tasarlanan ikinci DBİ konumlandırma yöntemi, PSO yönteminde hem kapsanan kullanıcı sayısını ( $N_s$ ) hem de kullanıcı kapasitelerinin logaritmalarının toplamını göz önünde bulundurmaktadır. Bu yöntem global en iyi çözümü belirlerken en yüksek  $N_s$  değerine sahip parçacıkları belirlemekte ve bunlar içerisinde en yüksek  $C_{log}$  değerine sahip olan parçacığı global en iyi çözüm olarak seçmektedir. Bu yöntem gerçek kullanıcı pozisyonları ile uygulanırsa CLogKP, kestirimsel kullanıcı pozisyonları ile uygulanırsa CLogEP olarak ifade edilir. Kullanılan DBİ konumlandırma yöntemlerinin özellikleri Çizelge 4.9'da sunulmuştur. Bazı yöntem isimlerinin sonundaki "EP" o yöntemde kestirimsel kullanıcı pozisyonlarının kullanıldığını, "KP" ise o yöntemde gerçek kullanıcı pozisyonlarının kullanıldığını ifade etmektedir.

Çizelge 4.9: DBİ konumlandırma yöntemlerinin özellikleri.

Yöntem	Kullanıcı konum tahmini	Tehdit farkındalık	Amaç
CLogKP	-	-	Maks. log kapasite ve $N_s$
CovKP	-	-	Maks. $N_s$
LogPSO	-	-	Maks. log kapasite
LinPSO	-	-	Maks. doğrusal kapasite
TACEP	+	+	Kümeleme ve sezgisel kaçınma
KCEP	+	-	Kümeleme
CLogEP	+	-	Maks. log kapasite ve $N_s$
EQT	-	-	Üçgenleme

### 4.3.3 Sonuçlar

Simulasyonlar MATLAB ortamında, 4 çekirdekli i7 işlemcili (2.6GHz) ve 4GB rastgele erişim hafızasına (İng. random access memory - RAM) sahip bir bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Simulasyonlarda 100 farklı ağ kullanılmış ve sonuçların ortalaması alınarak bu bölümde sunulan değerler elde edilmiştir. Aksi ifade edilmedikçe simulasyonlarda kullanılan parametrelerin değerleri Çizelge 4.10'da sunulmuştur. Simulasyonlar öncelikle tehdit unsurlarını düşünmeden en iyi  $N_{kd}$  performansını bulmak için gerçekleştirilmiştir. Buradaki motivasyon hesaplama kaynaklarının kısıtlı olduğu bir ortamda kullanıcı kapsamını maksimize edecek şekilde DBİ konumlarını bulmaktır. Bölüm 4.1.3'te sunulduğu gibi PSO temelli yöntemlerin yürütme zamanları yüksektir. CovKP ve CLogKP bu amaçla geliştirilmiştir. Her yöntemdeki tekrar sayısı ( $N_{tk}$ ) 100 ile sınırlandırılmıştır.

Tehdit unsurları ve minimum hesaplama kaynakları göz önünde bulundurularak geliştirilen öbekleme ve sezgisel tehditten kaçınma tekniklerini kullanan TACEP'in  $N_{kd}$  ve  $p_{vur}^0$  performansları aşağıdaki yöntemler ile birlikte incelenmiştir.

1. EQT: Kullanıcı pozisyonlarından bağımsız şekilde hücrede DBİ'ler üçgen şeklinde (her köşede bir DBİ) konumlandırılır.
2. KCEP: Kestirilmiş kullanıcı konumlarını K-öbekleme yöntemi ile öbeklenir. Her öbek merkezine DBİ yerleştirilir.
3. CLogEP: CLogKP gerçek kullanıcı konumları ile çalıştırıldığında optimale yakın  $N_{kd}$  performansı sağlamaktadır. CLogEP'de, kestirilmiş kullanıcı pozisyonlarını kullanır.

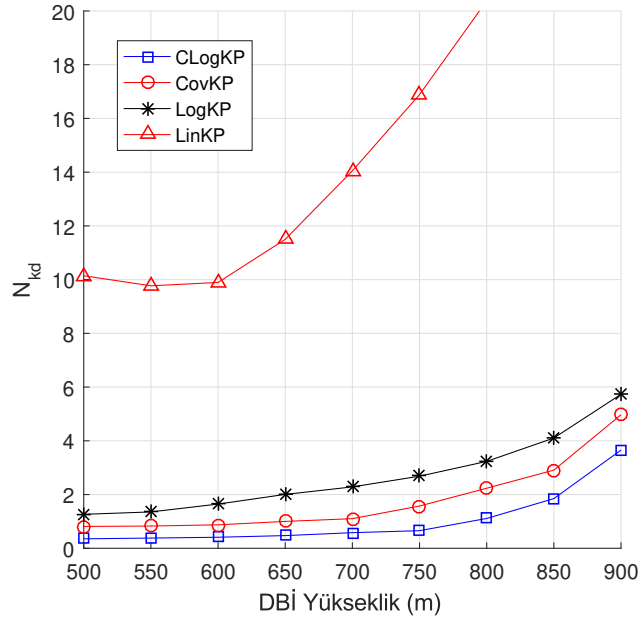
DBİ konumlandırmasının kullanıcıların gerçek pozisyonları ile yapıldığı durumda elde edilen yüksekliğe bağlı  $N_{kd}$  değerleri Şekil 4.24'te sunulmuştur. Doğrusal veri kapasitesini maksimize etmeyi amaçlayan LinKP'nin,  $N_{kd}$  değerlerinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Her kullanıcının temel veri ihtiyaçlarının karşılanması gerektiği askeri ya da kamu güvenliği ile ilgili ağlarda yüksek toplam veri kapasitesi temelli yaklaşımın kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamaktan uzak olduğu anlaşılmaktadır. Hem kapasite hem de kullanıcı kapasitelerinde eşitlik farkında olan LogKP, LinKP'den çok daha iyi performans sağlarken bu bölümde önerilen CLogKP ve CovKP'nin gerisinde kalmıştır. Örneğin, DBİ yüksekliklerinin 700m olduğu durumda LogKP ile kullanıcıların %2.82'si kapsam dışında kalırken, CovKP ve CLogKP'de kullanıcıların %1.37'i ve %0.71'i kapsam dışında kalmıştır.

CovKP'yi hızlandırmayı amaçlayan CLogKP'nin önemli performans kazancı sağladığı görülmektedir. DBİ yükseklikleri 600m iken CovKP'de kullanıcıların %1'i kapsam dışında kalırken, CLogKP'de bu oran %0.51'dir. 800m'deki sonuçlara bakıldığında CovKP'de kapsam dışında kalan kullanıcı oranı %2.27 iken CLogKP'de %1.38'dir. Bu sonuçlara göre 500m ve 800m'deki kapsanmayan kullanıcı oranı CLogKP'den sırasıyla ortalama %96 ve %64 daha fazladır. Bu sonuçlar kapsanan kullanıcı sayısını

Çizelge 4.10: Şehir çatışmaları simülasyon parametreleri.

Parametre	Değer
$U$	80
$D$	3
$T$	3
$f_c$	2GHz
$B$	20MHz
$N_0$	$-170dBm/Hz$
$r_{SS}$	1500m
$r_{OS}$	1000m
$r_{GA}$	50m
$C_{TH}$	500Kbps
$d_{\Delta}^h, d_{max}^h$	20m, 100m
$\theta_B$	$140^\circ$
$(a, b)$	9.61, 0.16
$\mu_{LoS}, \mu_{LoS}$	1dB, 20dB
$P_T$	30dBm
$N_{par}$	100
$N_{tk}$	100

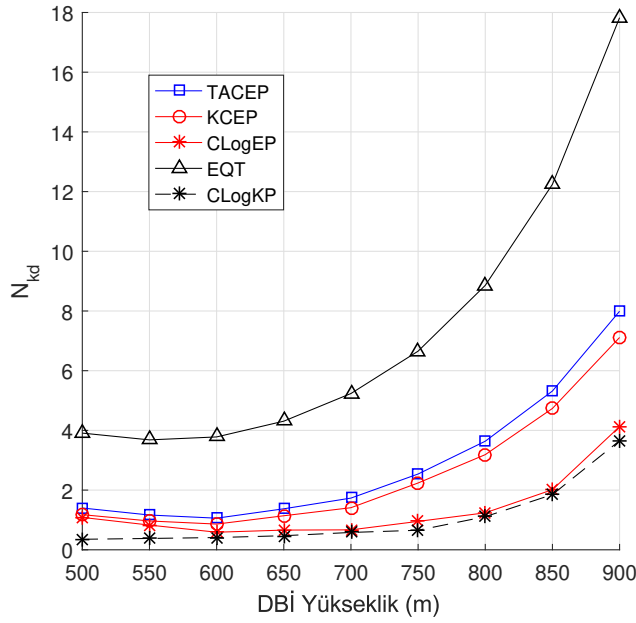
maksimize ederken ağıın logaritmik kapasitesini de göz önünde bulundurarak aynı sürede daha düşük  $N_{kd}$ 'ye ulaşılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.24: Gerçek kullanıcı pozisyonları ile farklı yüksekliklerde  $N_{kd}$  değerleri

DBİ'ler kestirilmiş kullanıcı pozisyonlarına göre konumlandığında yüksekliğe göre elde edilen  $N_{kd}$  değerleri Şekil 4.25'te sunulmuştur. Şekilde en iyi durum performansı

olarak gerçek kullanıcı konumlarının kullanıldığı CLogKP'nin sonuçları da gösterilmektedir. Beklendiği gibi en iyi  $N_{kd}$  performansı CLogKP ile elde edilmiştir. Bununla birlikte kestirilmiş kullanıcı pozisyonlarını kullanan CLogEP'nin 600m ve sonrasında CLogKP'ye çok yakın sonuçlar ürettiği görülmektedir. Bu sonuca göre Bölüm 4.3.2.1'de sunulan RSSI temelli MLE yönteminin  $N_{kd}$  açısından kullanıcı pozisyonlarını başarılı şekilde kestirdiği anlaşılmaktadır. DBİ yükseklikleri 700m olduğunda CLogEP, CLogKP'ye en yakın  $N_{kd}$  değerini üretmiştir. Burada kullanıcı pozisyon kestirim hatası ( $\sigma_e$ ) 112m'dir. Farklı DBİ sayılarına ve yüksekliklerine göre elde edilen  $\sigma_e$  değerleri Çizelge 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.25: Kestirilmiş kullanıcı pozisyonları ile farklı yüksekliklerde  $N_{kd}$  değerleri

DBİ'lerin kullanıcı pozisyonlarını kullanmadan konumlandırıldığı EQT yöntemi ile en kötü  $N_{kd}$  değerleri elde edilmiştir. DBİ yükseklikleri 600m ve 800m iken ağda kapsanmayan kullanıcı oranları %4.72 ve %11.06 olarak bulunmuştur. DBİ yüksekliklerinin 650m'yi geçmesi ile  $N_{kd}$  hızla kötüleşmekte ve 900m yükselikte kullanıcıların %22.21'si kapsama dışında kalmaktadır. DBİ'lerin tehdit unsurları farkında konumlandırıldığı TACEP yöntemi ile LogPSO'ya yakın değerler elde edilmiştir. TACEP yöntemi ile DBİ yükseklikleri 600m ve 800m iken ağda kapsanmayan kullanıcı oranları %1.31 ve %4.54 olarak elde edilmiştir. DBİ yüksekliklerin 700m'yi aşması ile birlikte TACEP'in  $N_{kd}$  performansındaki düşüş hızlanmaktadır. TACEP,  $N_{kd}$  performansında en iyi yöntem olan CLogEP'yi yakalamamakla birlikte yöntemlerin  $p_{vur}^0$  değerleri göz önüne alındığında TACEP'in performansındaki kaybın tolere edilebilir olduğu değerlendirilebilir.

Şekil 4.26'da farklı DBİ yüksekliklerinde DBİ'lerin  $p_{vur}^0$  sunulmuştur. TACEP tüm yüksekliklerde en iyi performansı sağlamıştır. Çizelge 4.12'de DBİ yükseklikleri 600m ve 800m iken elde edilen  $N_{kd}$  ve  $p_{vur}^0$  değerleri sunulmuştur. Çizelgedeki sonuçlara

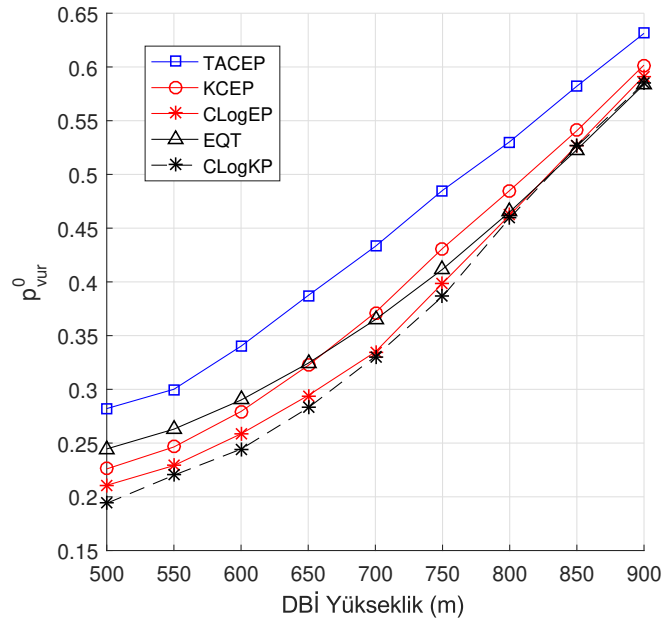
göre TACEP'in  $p_{vur}^0$  performansı kestirilmiş kullanıcı pozisyonları ile en iyi  $N_{kd}$  performansını sağlayan CLogEP'den %36 ve %15 daha yüksektir. Burada  $p_{vur}^0$ 'daki artışın tüm ağır performansını etkilediği göz önünde bulundurulmalıdır. DBİ yükseklikleri 700m iken farklı tehdit sayılarına göre elde edilen  $p_{vur}^0$  değerleri Şekil 4.27'de sunulmuştur. Buna göre TACEP, tüm tehdit sayıları için kendisine en yakın yöntemden en az %30 daha yüksek  $p_{vur}^0$  değeri üretmiştir. Elde edilen sonuçlara göre TACEP yöntemi  $N_{kd}$  ve  $p_{vur}^0$  performanslarında iyi bir denge sağlamıştır.

Çizelge 4.11: DBİ yüksekliğine ve sayısına göre  $\sigma_e$  değerleri.

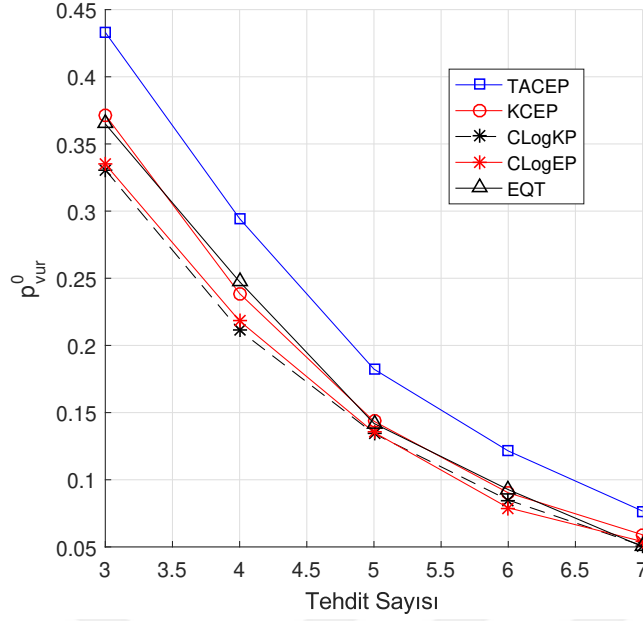
DBİ Yükseklik (m)	D=3 için $\sigma_e(m)$	D=4 için $\sigma_e(m)$	D=5 için $\sigma_e(m)$	D=6 için $\sigma_e(m)$
500	166.12	124.67	83.45	67.32
600	132.56	94.34	78.01	55.25
700	112.27	88.19	66.41	54.05
800	99.14	74.54	62.06	53.12
900	95.17	70.23	60.21	52.13

Çizelge 4.12: Farklı DBİ yüksekliklerinde  $N_{kd}$  ve  $p_{vur}^0$  değerleri.

DBİ Yükseklik (m)	$N_{kd}$ (DBİ yüks.=600m)	$p_{vur}^0$ (DBİ yüks.=600m)	$N_{kd}$ (DBİ yüks.=800m)	$p_{vur}^0$ (DBİ yüks.=800m)
TACEP	1.03	0.34	3.66	0.53
KCEP	0.87	0.27	3.20	0.48
EQT	3.78	0.29	8.81	0.46
CLogEP	0.58	0.25	1.24	0.46
CLogKP	0.41	0.24	1.09	0.45



Şekil 4.26: DBİ'lerin farklı yüksekliklerde  $p_{vur}^0$  değerleri



Şekil 4.27: 700m’de farklı tehdit sayılarına göre  $p_{vur}^0$  değerleri

## 4.4 Dayanıklı DBİ Konumlandırma

### 4.4.1 Literatür taraması

Taktik [37] ya da kamu güvenliği hizmeti veren ağlarda [147] bilgi akışının sürekliliği kritik bir ihtiyaçtır. Bu kapsamda hem DBİ platformunun hem de üzerindeki haberleşme ekipmanlarının yüksek güvenilirlikte teknik bir ifade ile yüksek arıza arası ortalama zamana (İng. mean time between failure - MTBF [148]) ve kullanılabilirlik (İng. availability) oranına sahip olması gerekmektedir. Hücresel haberleşmede kullanılan haberleşme ekipmanları için beklenen genel kullanılabilirlik oranı %99.999’dur [149]. Bu oran bir yıl içerisinde ekipmanın sadece 5 dakika 15.6 saniye kullanılmaz olduğunu ifade etmektedir. Ancak dron platform olarak ele alındığında bu değerlere ulaşılması özellikle çevresel etkenler de düşünüldüğünde çok zorlu bir gereksinimdir [150]. Taktik sahalarda ise Bölüm 4.3’te anlatıldığı gibi DBİ’lerin vurulması ihtimali vardır. DBİ’nin vurulması durumunda DBİ’lerin pozisyon değiştirerek ağdaki servis kalitesini iyileştirmesi gerekmektedir. Aksi takdirde devre dışı kalan DBİ’ye bağlı kullanıcıların servis kalitelerinde çok ciddi kayıpların meydana gelmesi beklenmektedir.

Literatürde DBİ’lerin kullanımı ile ilgili çalışmalarda dronların çok yüksek güvenilirlikte olduğu varsayılmaktadır. Vurulma ya da bozulma ile DBİ’nin devre dışında kalması senaryosu tanımlanmamıştır. Bir DBİ’nin devre dışı kalması ve kalan DBİ’lerin kullanıcılara kaliteli servis sağlayabilmek için belirlenen pozisyonlara gitmesi rota belirleme problemi olarak literatürde yer almaktadır. Fotouhi ve arkadaşları DBİ’nin, değişen kullanıcı pozisyonlarına bağlı olarak gelişen DBİ ile kullanıcılar arasındaki mesafe artışına ve görüş hattı dışında olma olasılıklarının artışına karşı kendi pozisyonunu

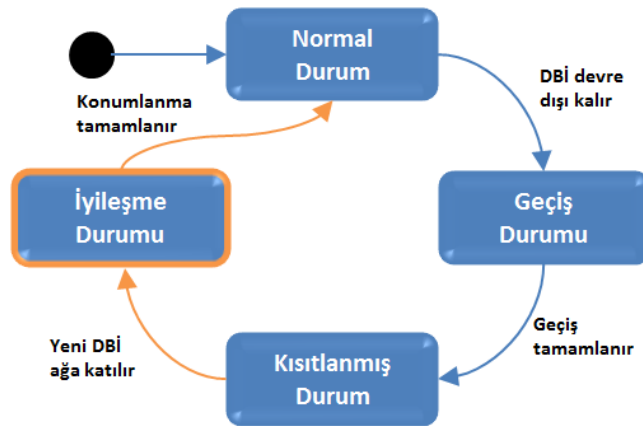


tekrar belirleyerek spektral verimliliği iyileştirmeyi hedefleyen bir model önermişlerdir [151]. Zeng ve arkadaşları [152], bir DBİ'nin bir kullanıcıya doğru olan rotasını hem haberleşme kapasitesini hem de DBİ enerji verimliliğini birlikte göz önünde bulundurarak optimize etmişlerdir. Aynı yazarlar [153]'te önceki çalışmalarını geliştirerek bir DBİ'nin birden çok kullanıcıya en kısa sürede dosya dağıtımını yapabilmesi için rotasını optimize etmişlerdir. Wu ve arkadaşları [154], birden çok DBİ'nin rotalarını ve güç çıkışlarını optimize ederek en düşük kullanıcı kapasitesini maksimize etmeye çalışmışlardır.

#### 4.4.2 Problemin tanımı ve çözümü

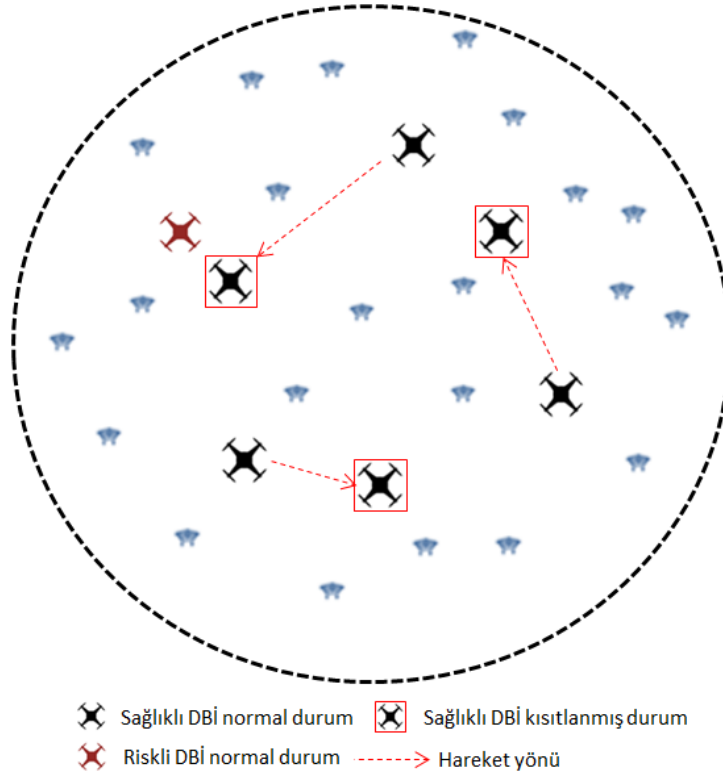
DBİ konumlandırma temel hedef kullanıcı servis ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde DBİ pozisyonlarını belirlemektir. DBİ rotalama da ise bir ya da daha fazla DBİ'nin rotaları kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde belirlenmeye çalışılır. Klasik yaklaşımda DBİ ağına belli sayıda kullanıcı ve belli sayıda DBİ vardır. Ağda önemli bir hareketlilik olmadıkça DBİ pozisyonlarında önemli bir değişiklik beklenmez. Ayrıca DBİ'lerin sürekli hareket etmesi de bir takım güvenlik sorunlarını beraberinde getirmektedir [155]. Bu sebeple DBİ konumlandırma araştırmalarında kullanıcı pozisyonlarının statik olduğu varsayımı makul bir varsayımdır. Bununla birlikte DBİ hareketliliğini ya da yeniden konumlanmasını zorunlu kılan senaryolar bulunmaktadır. Acil bir ihtiyaç neticesinde kurulan kamu güvenlik ağları ya da taktik ağlarda kullanıcı servis ihtiyaçlarını karşılayacak sayıda DBİ bulmak mümkün olmayabilir. Bu durumda bir DBİ'nin bozulma ya da vurulma sebebiyle devre dışı kalması durumunda zaten kısıtlı sayıda DBİ ile kurulan ağın tekrar yapılması kullanıcıların iletişim kayıplarını minimize etmek için kritik bir gereksinimdir.

Şekil 4.28'de vurulma ya da arızalanma ile devre dışı kalma durumu olan riskli bir DBİ'nin bulunduğu ağın 4 farklı durumu gösterilmiştir. Bu bölümde normal durum ve geçiş durumu üzerinde çalışılmıştır. Kısıtlanmış durum DBİ pozisyonları ağ performansını maksimize edecek şekilde belirlenmiştir.



Şekil 4.28: Riskli DBİ'nin bulunduğu ağın olası durumları

1. **Normal Durum:** Bu durumda  $D$  adet DBİ, kullanıcı servis kalitesi ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde konumlandırılır. Tüm DBİ'ler operasyoneldir.
2. **Geçiş Durumu:** Geçiş durumu, bir DBİ'nin vurulması ya da bozulması ile başlar ve  $D - 1$  adet sağlıklı DBİ'nin yeni pozisyonlarına geçişi ile sonlanır. Geçiş durumunda sağlıklı DBİ'lerin sabit bir hızda yatay ekseninde hareket ettikleri varsayılmıştır.
3. **Kısıtlanmış Durum:** Bu durum geçiş durumunun sonlanması ile başlar.  $D - 1$  DBİ operasyonel olarak kullanıcılara servis verir.
4. **iyileşme Durumu:** İyileşme durumu bir merkezden yeni bir DBİ'nin sisteme dahil edilmesi ile başlar ve tüm DBİ'lerin nihai konumlara ulaşmasına kadar devam eder.



Şekil 4.29: DBİ'nin devre dışı kaldığı örnek bir senaryo

Bir DBİ'nin devre dışı kaldığı örnek bir senaryo Şekil 4.29'de gösterilmiştir. Normal durumda 4 adet DBİ ağa hizmet vermektedir. Kırmızı renk ile gösterilen DBİ riskli DBİ'dir. Riskli DBİ taktik sahada vurulma riski yüksek olan ya da lojistik verilerin değerlendirilerek bozulma riskinin yüksek olduğu bilinen DBİ'dir. Riskli DBİ'nin devre dışı kalması durumunda kalan 3 DBİ yeni konumlarına doğru hareket etmektedir. DBİ'lerin hareketi sabit bir hızda ve yatay ekseninde gerçekleşmektedir. Geçiş durumunun en kısa sürede sonlanarak kalan DBİ'ler ile kısıtlanmış durumda en iyi hizmetin

verilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda kalan DBİ'lerin geçiş durumunda katettiği toplam yol minimize edilmektedir. Ortaya çıkan atama problemi

<p>Minimum <math>\sum_{l,k \in \mathcal{D}_h} d_{lk} c_{lk}</math>  Kısıtlar:</p> $\sum_{l \in \mathcal{D}_h} c_{lk} = 1, \quad \forall k \in \mathcal{D}_h \quad (4.35)$ $\sum_{k \in \mathcal{D}_h} c_{lk} = 1, \quad \forall l \in \mathcal{D}_h \quad (4.36)$
---

Şekil 4.30: Geçiş durumu DBİ atama problemi

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $\mathcal{D}_h$  bir DBİ devre dışı kaldıktan sonra kalan DBİ setini,  $d_{lk}$  DBİ  $l$ 'nin normal durumdaki ve DBİ  $k$ 'nin kısıtlanmış durumdaki pozisyonları arasındaki mesafeyi göstermektedir.  $c_{lk} \in 0, 1$  ikili karar değişkenidir. Eğer normal durumda DBİ  $l$ , kısıtlanmış durumda DBİ  $k$ 'nin konumuna atanmışsa 1 değilse 0 değerini almaktadır. Şekil 4.30'da birinci kısıt kısıtlanmış durumdaki bir DBİ'ye normal durumdan sadece bir DBİ'nin atanabileceğini, ikinci kısıt ise normal durumdaki her DBİ'nin kısıtlanmış durumdaki bir DBİ'ye atandığını göstermektedir.

Riskli DBİ'nin bilinmemesi durumu da farklı bir senaryodur. Bu sebeple iki senaryoyu ayrı ayrı ele alarak çözüm geliştirmek gerekmektedir. Bölüm 4.4.2.1'de Şekil 4.29'de gösterildiği gibi riskli DBİ'nin bilindiği durum için dayanıklı DBİ konumlandırma yöntemi önerilmektedir. Öte yandan Bölüm 4.4.2.2'de riskli DBİ bilgisinin olmadığı durum ele alınarak dayanıklı DBİ konumlandırma yöntemi sunulmaktadır.

#### 4.4.2.1 Riskli DBİ'nin bilindiği durumda DBİ konumlandırma

Riskli DBİ uygulama tipine göre değerlendirilebilir. Taktik sahada vurulma ihtimali yüksek olan, sivil kullanımda ise sensör verileri sağlıklı olan DBİ riskli DBİ olarak tanımlanabilir. Bu bölümde önerilen yöntem temelde şu esasa dayanır: DBİ devre dışı kaldıktan sonra yani geçiş durumunun başlamasıyla bazı kullanıcıların servis kalitesi ciddi şekilde azalmakta ve iletişim kesintileri (kullanıcının belli bir eşik kapasitenin daha az kapasiteye sahip olması durumu) meydana gelmektedir. Bununla birlikte DBİ'lerin normal durumdaki konumları riskli DBİ'nin bozulma durumu göz önüne alınarak belirlenebilir. Bu durumda geçiş durumundaki ağır kayıplar belli oranda telafi edilebilir.

Normal durumda DBİ konumlandırma genel ağ performansını maksimize edecek şekilde yapılırken, geçiş durumunun performansını iyileştirme amacıyla DBİ konumlarının değiştirilmesi normal durumdaki performansta kayıplara yol açacaktır. Öyle bir konumlandırma yapılmalıdır ki normal durum ağ performansında en iyi duruma göre fazla kayıp olmamalı, geçiş durumunda ise ağ performansında önemli bir iyileşme olmalıdır. Normal durumda  $D$ , geçiş durumunda  $D - 1$  adet DBİ'nin kullanıcılara hizmet verdiği düşünüldüğünde geçiş durumundaki kazancın önemi anlaşılabilir.

Statik durumda kullanıcı kapasitelerinin hesaplanması Bölüm 3.2’de sunulmuştur. Aynı temel yaklaşımı kullanarak kullanıcıların geçiş durumundaki ortalama kapasiteleri hesaplanabilir. Geçiş durumunda her DBİ Şekil 4.30 sunulan atama probleminin çözümünde belirlenen atamalara göre yeni pozisyonlarına sabit  $v$  hızıyla hareket eder. Bu şekilde bir DBİ  $vt_\Delta$  kadar yol katedebilir. Geçiş durumundaki zaman dilim  $t_\Delta$  ile gösterilmektedir. Tüm DBİ’lerin kısıtlanmış durumdaki pozisyonlara geçişinin tamamlanması  $T_i$  sn sürmektedir. Buna göre toplam  $N_t = T_i/t_\Delta$  kez kullanıcı kapasiteleri hesaplanır. Eğer bir DBİ yeni konumuna diğer DBİ’lerden önce ulaşırsa yeni zaman diliminde hareketsiz kalır.

Bölüm 4.1.2.1’de sunulan logaritmik kapasitelerin maksimize edilmesi yönteminden esinlenerek Şekil 4.31’de sunulan dayanıklı DBİ konumlandırma problemi elde edilmiştir. Bu problemin çözümü ile hem normal durumdaki ağ performansında fazla kayıp olmaması hem de geçiş durumunda önemli bir kazanç elde edecek şekilde DBİ konumlarının bulunması hedeflenmektedir.

<p>Maksimum <math>\frac{1}{N_t} \sum_{n=1}^{N_t} \sum_{i \in \mathcal{U}} \log(DR_i(n))</math>  Kısıtlar:</p> $\sqrt{(x_j^L - x_j^R)^2 + (y_j^L - y_j^R)^2} \leq r_S \quad \forall j \in \mathcal{D}_h \quad (4.37)$ $\sqrt{(x_j^L)^2 + (y_j^L)^2} \leq r_C \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.38)$
---

Şekil 4.31: Dayanıklı DBİ konumlandırma modeli

Şekil 4.31’de  $(x_j^L, y_j^L)$  DBİ  $j$ ’nin normal durumdaki 2B konumunu göstermektedir. Sabit yükseklikte olduğu varsayılan DBİ’lerin 2B konumları Bölüm 4.1.2.1’de sunulan Algoritma 1 ile bulunmaktadır.  $(x_j^R, y_j^R)$  ise devre dışında kalmaya dayanıklı DBİ konumlarını göstermektedir. Birinci kısıt, devre dışında kalmaya dayanıklı DBİ konumlarının logaritmik kapasiteyi maksimize eden konumlardan en fazla belli bir mesafede ( $r_S$ ) olacağını ifade eder. İkinci kısıt ise DBİ koordinatlarının hücre dışında olamayacağını gösterir. DBİ’lerin kısıtlanmış durumdaki pozisyonları Algoritma 1 ile bulunmaktadır.

Dayanıklı DBİ konumlandırma yöntemi kısaca *RAD* (İng. resilient aware deployment) olarak adlandırılmıştır. Karşılaştırmalı değerlendirme yapmak için hem normal durum hem de kısıtlanmış durum konumları Algoritma 1 ile bulunan yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem kısaca *FAD* (İng. fairness aware deployment) adlandırılmıştır. Çizelge 4.13, RAD ve FAD yöntemlerinde normal durumda ve kısıtlanmış durumda DBİ konumlarının hangi modeller ile bulunduğunu göstermektedir.

#### 4.4.2.2 Riskli DBİ’nin bilinmediği durumda DBİ konumlandırma

Vurulma olasılığı ya da platform üzerindeki sensörlerden toplanan verilerin olmadığı durumlarda riskli DBİ belirlenemeyebilir. Bu durumda Şekil 4.29’de gösterilen bir adet

riskli DBİ yerine ağda servis sağlayan tüm DBİ'ler riskli DBİ olarak değerlendirilir. Bu durumda DBİ'leri birbirlerine yaklaştırarak merkeze daha yakın hale getirip kısıtlanmış durum pozisyonlarına daha hızlı ulaşım sağlanabilir. Devre dışı kalma farkında kümelemede (FAC) öncelikle Şekil 4.3'de tanımlanan KC yöntemi ile DBİ pozisyonları  $(x_z^K, y_z^K), z \in \mathcal{D}$  bulunur. Daha sonra her DBİ için diğer DBİ pozisyonları bir  $g$  katsayısı ile çarpılır ve kendisine bağlı kullanıcı koordinatlarının toplamına eklenir. Daha sonra bu değer ilgili DBİ'ye bağlanan kullanıcı sayısı ile  $g(D-1)$  toplamına bölünerek DBİ konumları elde edilir. FAC konumlandırma modeli Şekil 4.32 sunulmuştur. Burada  $\mathcal{D}_j$  DBİ  $j$ 'ye bağlanan kullanıcı setini,  $g$  DBİ yakınlştırma katsayısını göstermektedir.

Çizelge 4.13: RAD ve FAD yöntemlerinde kullanılan modeller.

Yöntem	Normal Durum	Kısıtlanmış Durum
<i>RAD</i>	Dayanıklı DBİ konumlandırma modeli (Şekil 4.31)	Logaritmik kapasitelerin toplamını maksimize eden DBİ konumlandırma modeli (Şekil 4.2)
<i>FAD</i>	Logaritmik kapasitelerin toplamını maksimize eden DBİ konumlandırma modeli (Şekil 4.2)	Logaritmik kapasitelerin toplamını maksimize eden DBİ konumlandırma modeli (Şekil 4.2)

$$x_j^d = \frac{\sum_{i \in \mathcal{D}_j} x_i^u + g \sum_{z \in \mathcal{D}, z \neq j} x_z^K}{|\mathcal{D}_j| + g(D-1)} \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.39)$$

$$y_j^d = \frac{\sum_{i \in \mathcal{D}_j} y_i^u + g \sum_{z \in \mathcal{D}, z \neq j} y_z^K}{|\mathcal{D}_j| + g(D-1)} \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (4.40)$$

Şekil 4.32: Devre dışı kalma farkında DBİ kümeleme modeli

FAC yönteminin performansını değerlendirmek için KC yöntemi kullanılmıştır. Her iki yöntemde de DBİ'lerin kısıtlanmış durum pozisyonları KC yöntemi ile bulunmuştur. Çizelge 4.14, FAC ve KC yöntemlerinde normal durumda ve kısıtlanmış durumda DBİ konumlarının hangi modeller ile bulunduğunu göstermektedir. FAC yönteminde DBİ'ler normal durumda devre dışı kalma farkında kümeleme ile konumlandırılırken, KC yönteminde K-ortalama kümeleme kullanılmaktadır. Her iki yöntem de kısıtlanmış durumda DBİ konumlarını K-ortalama kümeleme ile belirlemektedir. Geçiş durumunda DBİ atamaları Şekil 4.30'teki model ile gerçekleşmektedir.

Çizelge 4.14: FAC ve KC yöntemlerinde kullanılan modeller.

Yöntem	Normal Durum	Kısıtlanmış Durum
<i>FAC</i>	Devre dışı kalma farkında DBİ kümeleme modeli (Şekil 4.32)	K-ortalama kümeleme ile DBİ konumlandırma modeli (Şekil 4.3)
<i>KC</i>	K-ortalama kümeleme ile DBİ konumlandırma modeli (Şekil 4.3)	K-ortalama kümeleme ile DBİ konumlandırma modeli (Şekil 4.3)

### 4.4.3 Sonuçlar

Simülasyonlar MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Kullanıcıların düzgün dağıtıldığı 100 farklı ağ için simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve bulunan değerlerin ortalamaları sunulmuştur. Bu bölümde öncelikle hangi DBİ'nin devre dışında kalacağını bilindiği senaryo için RAD ve FAD yöntemlerine ait sonuçlar sunulmuştur. Sonrasında rastgele bir DBİ'nin devre dışında kaldığı senaryo için öbekleme temelli FAC ve KC yöntemlerinin sonuçları sunulmuştur. Çizelge 4.15'de simülasyon parametreleri gösterilmektedir. Performans değerlendirmelerinde aşağıdaki metrikler kullanılmıştır.

1. Normal durumda ağdaki en düşük kullanıcı kapasitesi ( $C_{min}^N$ )
2. Geçiş durumunda ağdaki en düşük ortalama kullanıcı kapasitesi ( $C_{min}^G$ )
3. Geçiş durumunda kapsanmayan ortalama kullanıcı sayısı ( $N_{kd}^G$ )

Çizelge 4.15: Dayanıklı konumlandırma simülasyon parametreleri.

Parametre	Değer
$U$	100
$f_c$	2GHz
$r_C$	1500m
$B$	20MHz
$N_0$	-170dBm/Hz
$\theta_B$	140°
$(a, b)$	9.61, 0.16
$\mu_{LoS}, \mu_{LoS}$	1dB, 20dB
$P_T$	30dBm
$v$	30m/sn
$C_{TH}$	500Kbps
$t_\Delta$	100ms

Şekil 4.33'de DBİ yüksekliklerinin 500m olduğu durumda  $D=4$  ve  $D=5$  için farklı  $r_S$  değerleriyle elde edilen  $C_{min}^N$  değerleri sunulmuştur. Şekilde FAD yöntemine ait  $C_{min}^N$  değerleri sabit olarak görülmektedir. Bunun sebebi, Bölüm 4.4.2.1'de açıklandığı gibi FAD yönteminin normal durumdaki ve geçiş durumundaki  $C_{log}$  kapasitesini maksimize edecek şekilde  $r_S$  parametresinden bağımsız olarak DBİ'leri konumlandırmasıdır. Sonuçlar incelendiğinde FAD'ın beklendiği gibi daha yüksek  $C_{min}^N$  performansı sağladığı görülmektedir. RAD'ın tasarımında ifade edildiği gibi normal durumda  $C_{min}^N$  performansında belli kayıplar öngörülmektedir. Çizelge 4.16'da FAD yönteminin RAD yöntemine göre sağladığı  $C_{min}^N$  kazancı yüzdesel olarak sunulmuştur. Bu değerlere göre  $r_S = 50$  iken RAD ve FAD oldukça yakın  $C_{min}^N$  performansı sunmaktadır.  $r_S$  değerindeki artışa bağlı olarak yöntemlerin  $C_{min}^N$  performans farkı artmaktadır. Performans kaybındaki artışın  $D = 5$  için  $D = 4$ 'e göre önemli seviyede olmasada daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 4.34’de  $D = 4$  ve  $D = 5$  için DBİ yüksekliklerinin 500m olduğu durumda elde edilen  $C_{min}^G$  değerleri gösterilmektedir. Daha önce ifade edildiği gibi  $r_S$ , FAD yöntemi için bir parametre olmadığından şekilde sabit değerler görülmektedir. Elde edilen değerlere göre RAD yöntemi  $C_{min}^G$  performansında önemli kazançlar sağlamıştır. Çizelge 4.17’de RAD yönteminin FAD yöntemine göre sağladığı  $C_{min}^G$  kazançları  $D = 4$  ve  $D = 5$  için yüzdesel olarak sunulmuştur. Bu değerlere göre  $C_{min}^G$  değerlerinde hem  $D = 4$  hem de  $D = 5$  için önemli bir artış görülmektedir. DBİ sayısının azalması ile meydana gelen genel kapasite düşüşü göz önüne alındığında geçiş aşamasında sağlanan artışın değerli olduğu ve kullanıcı servis kalitesinde ciddi iyileşme sağlayacağı değerlendirilmektedir. Özellikle DBİ kaynaklarının kısıtlı olduğu durumda RAD yöntemi ile önemli kazançlar elde edilebilmektedir. DBİ sayısı arttıkça genel kapasite artışına ve daha az DBİ hareketliliğine bağlı olarak kazanç azalmaktadır.

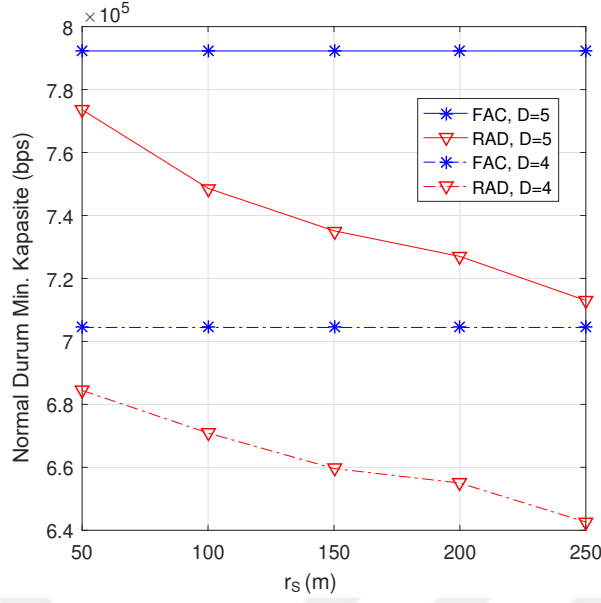
Örneğin,  $D = 4$  için  $r_S = 150$  iken normal durumda RAD yöntemi ile elde edilen  $C_{min}^N$  değeri, FAD yöntemi ile elde edilen değerden %6.82 daha düşükken, geçiş durumunda RAD ile elde edilen  $C_{min}^G$  değeri, FAD ile elde edilen değerden %41.53 daha fazladır. Normal durumda  $D$  adet DBİ ile kullanıcılara hizmet sağlanırken geçiş durumunda  $D - 1$  adet DBİ kullanılmaktadır. Bu sebeple de kullanıcı kapasitesi zaten azalmaktadır. Geçiş durumunda sağlanan iyileşme bu sebeple çok değerlidir.

Şekil 4.35’de farklı  $r_S$  değerleri için  $D = 4$  ve  $4D = 5$  iken geçiş aşamasında elde edilen  $N_{kd}^G$  değerleri sunulmuştur. Elde edilen değerlere göre  $r_S$  arttıkça RAD yönteminin  $N_{kd}^G$  değerleri düşmekte yani daha çok kullanıcı  $C_{TH} = 500$ Kbps eşik değerini geçmektedir. Diğer sonuçlarda olduğu gibi DBİ sayısı arttıkça RAD’daki performans artışı yavaşlamaktadır. Örneğin,  $r_S = 150$ m iken  $D = 4$  için RAD yöntemi ile  $N_{kd}^G$  değeri 3.21, FAD yöntemi ile  $N_{kd}^G$  değeri 5.20 olarak bulunmuştur. Buna göre RAD yöntemi ile DBİ konumlandırma yapıldığında geçiş aşamasında ortalama 2 kullanıcı daha az kapsama dışında kalmıştır. Bu değerlendirme  $D = 5$  için yapıldığında RAD yöntemi ile ortalama 0.5 kullanıcı daha az kapsama dışında kalmıştır. DBİ ağlarının yaşam süresinin kısıtlılığı da göz önüne alındığında elde edilen performans kazancının önemli olduğu değerlendirilmektedir.

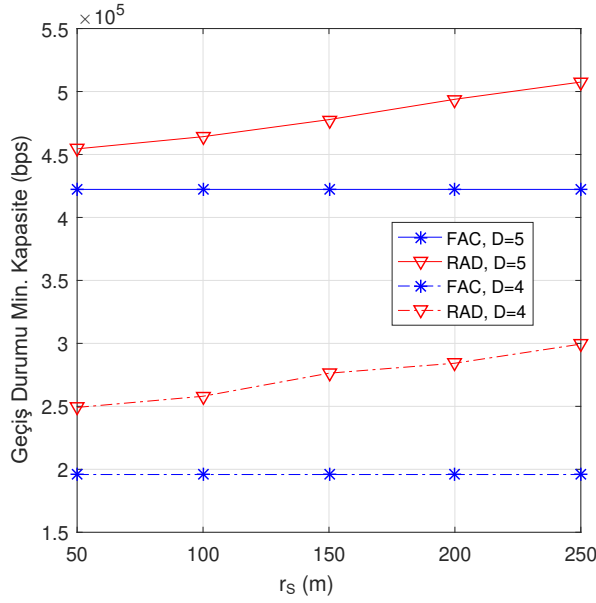
Devre dışında kalacak DBİ’nin bilinmemesi durumunda belirsizlik artmakta ve genel bir yaklaşımla geçiş durumundaki ağ performansı iyileştirilmektedir. Şekil 4.32’deki kümeleme modeli ile DBİ’ler belli bir  $g$  katsayısı ile birbirlerine yaklaştırılmakta ve kısıtlanmış durum pozisyonlarına daha kısa yol katederek ulaşmaktadırlar. Önerilen dayanıklı DBİ konumlandırma yöntemi FAC’ın performansı, Bölüm 4.1.3’te düzgün dağılımlı kullanıcılardan oluşan ağlarda fazla sayıda öbekleme yapılmadığı takdirde başarılı sonuçlar üreten K-ortalama kümeleme temelli KC yöntemi ile kıyas edilmiştir.

Çizelge 4.16: Farklı  $r_S$  değerleri için FAD’ın RAD’a göre sağladığı  $C_{min}^N$  kazançları.

$r_S$ (m)	D=4	D=5
50	2.92	2.45
100	5.01	5.88
150	6.82	7.77
200	7.48	9.69
250	9.66	10.76



Şekil 4.33: Normal durumda farklı  $r_S$  değerlerine göre  $C_{min}^N$  değerleri

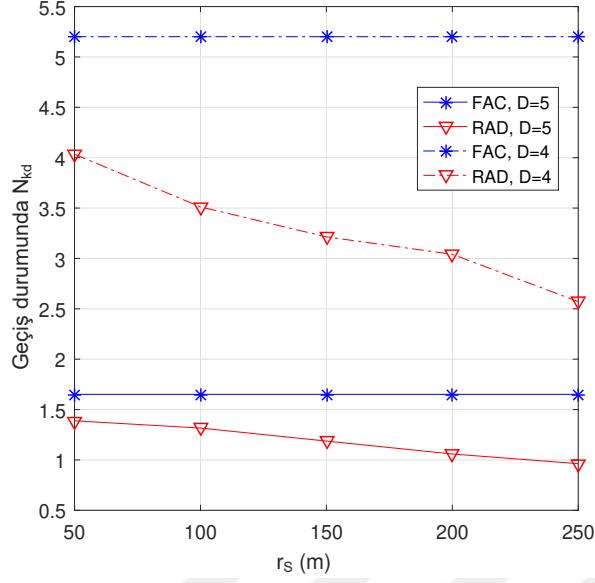


Şekil 4.34: Geçiş durumunda farklı  $r_S$  değerlerine göre  $C_{min}^G$  değerleri

Çizelge 4.17: Farklı  $r_S$  değerleri için RAD'ın FAD'a göre sağladığı  $C_{min}^G$  kazançları.

$r_S$ (m)	D=4	D=5
50	27.69	7.58
100	32.30	10.18
150	41.53	13.03
200	45.64	16.82
250	53.33	20.37



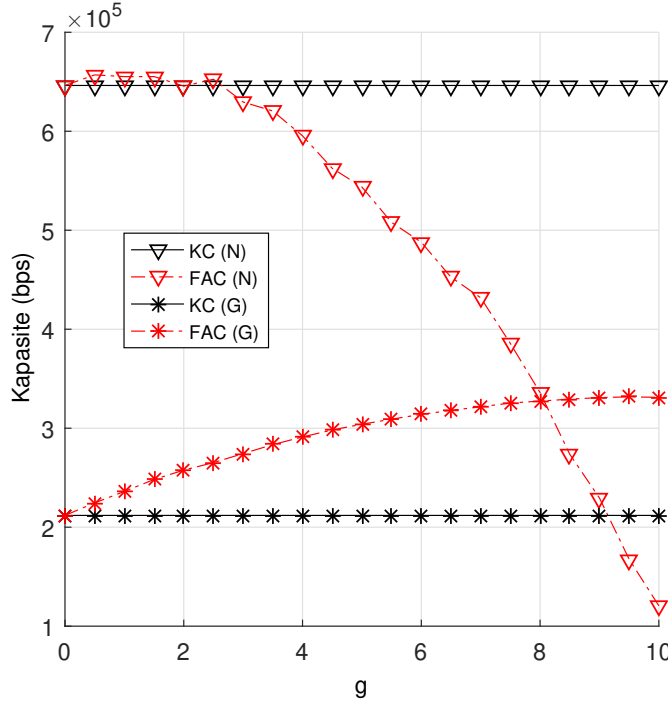


Şekil 4.35: Geçiş durumunda farklı  $r_s$  değerlerine göre  $N_{kd}^G$  değerleri

Şekil 4.36'da DBİ'ler  $D = 4$  ve DBi yükseklikleri 450m iken KC ve FAC yöntemleri ile konumlandığında elde edilen  $C_{min}^N$  ve  $C_{min}^G$  değerleri gösterilmektedir. FAC düşük  $g$  değerlerinde ( $g \leq 3$ ) KC ile benzer  $C_{min}^N$  performansı sağlamaktadır. Bununla birlikte  $C_{min}^G$  değerlerine bakıldığında  $g = 3$ 'de KC yönteminin sağladığı değerden %29.85 daha fazla kapasite sağlamıştır.  $C_{min}^N$  değerinde belli bir kaybın toleransı ile  $C_{min}^G$  değerini arttırmak mümkündür. Örneğin,  $g = 5.5$  iken ( $C_{min}^N = 507.3Kbps > C_{TH} = 500Kbps$ ), FAC yöntemi ile  $C_{min}^G = 309.2Kbps$  olarak bulunurken KC yöntemi ile  $C_{min}^G = 211.9Kbps$  olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre geçiş durumunda %46.44 kapasite kazancı elde edilmiştir.

FAC yönteminde  $g > 3$  olduğunda  $C_{min}^N$  değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. Meydana gelen bu kapasite kaybının iki sebebi vardır. Birincisi merkeze çok yaklaşan DBİ'ler hücre sınırlarındaki kullanıcılara iyi hizmet vermemektedir. İkinci sebep ise yaklaşan DBİ'lerin ortasında kalan bazı kullanıcı terminalerinde girişimin çok fazla artmasıdır. Bu sebeple  $g$  parametresinin seçiminde kullanıcıların normal durumda ve geçiş durumunda ihtiyaç duydukları kapasiteler belirlenmeli ve buna göre  $g$  değeri seçilerek DBİ pozisyonları belirlenmelidir. Çizelge 4.18'de farklı  $g$  değerleri için elde edilen kazançlar yüzdesel olarak gösterilmektedir. Çizelgedeki kazancın hangi yöntem ile sağlandığı ifade edilmiştir.

Şekil 4.37'de  $D = 4$  ve DBi yükseklikleri 450m iken farklı  $g$  değerleriyle elde edilen  $N_{kd}^N$  ve  $N_{kd}^G$  değerleri gösterilmektedir. Bu değerlere göre  $g \leq 5.5$  iken FAC ve KC ile elde edilen  $N_{kd}^N$  değerleri birbirine çok yakındır. Bununla birlikte FAC yöntemi ile elde edilen  $N_{kd}^G$  değerleri sürekli şekilde azalmakta yani daha az kullanıcı kapsama dışında kalmaktadır. FAC yöntemi ile  $g = 5.5$  iken  $N_{kd}^G = 2.26$  iken KC yöntemi ile  $N_{kd}^G = 3.58$  olarak bulunmaktadır. Bu da FAC yöntemi ile geçiş durumunda ortalama 1.5 kullanıcının daha fazla  $C_{TH} = 500Kbps$  eşiğini aştığını göstermektedir.



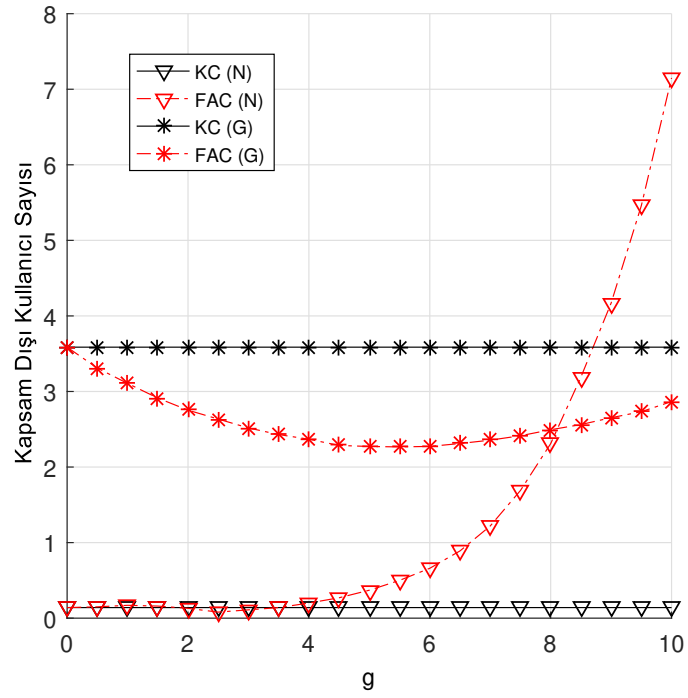
Şekil 4.36: Farklı g değerlerine göre  $C_{min}^N$  ve  $C_{min}^G$  değerleri

FAC ve KC yöntemlerinin  $D = 4$  için farklı DBİ yüksekliklerine göre  $N_{kd}^N$  ve  $N_{kd}^G$  performansları Şekil 4.38’de sunulmuştur. Hem FAC hem de KC yönteminde  $N_{kd}^G$  değerlerinde yükseklik ile azalma görülmektedir. Ancak FAC yöntemi KC yöntemine göre DBİ yükseklikleri 300m ile 600m arasındayken ortalama olarak 1.35 kullanıcı daha fazla kapsama sağlamıştır. Bu aralıkta FAC yöntemi  $N_{kd}^N$  performansında önemli bir kayıp vermeden  $N_{kd}^G$  performansında iyileşme sağlamıştır.

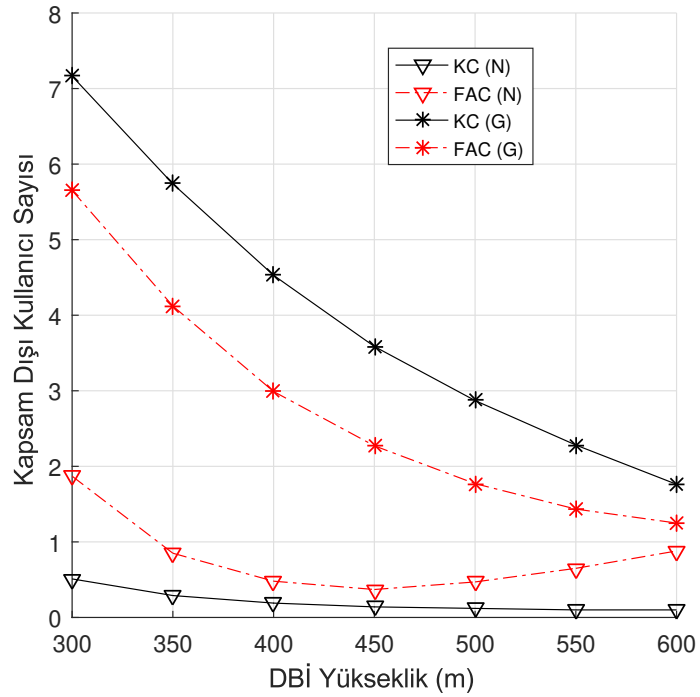
DBİ sayısının kullanıcı kapsama performansına etkisini anlamak için Şekil 4.39 sunulmuştur. Şekil 4.38’de gösterilen  $N_{kd}^N$  değerlerine göre  $D = 4$  iken ortalama olarak kullanıcıların tamamına yakını kapsamaktadır. Ancak  $N_{kd}^G$  performansında önemli fark bulunmaktadır. Bu fark  $D = 3$  iken çok belirgin iken (FAC yöntemi geçiş durumunda ortalama 2.5 daha fazla kullanıcıya servis sağlamaktadır)  $D$ ’nin artışı ile fark kapanmakta ve  $D = 6$  iken iki yöntemde benzer  $N_{kd}^G$  değerlerini üretmektedir. Beklendiği gibi fazla sayıda DBİ kullanımı ile geçiş durumundaki performans kayıpları tolere edilebilir.

Çizelge 4.18: Farklı g değerleri için yüzdesel  $C_{min}^N$  ve  $C_{min}^G$  kazançları ( $D = 4$ , DBİ yükseklik=450m).

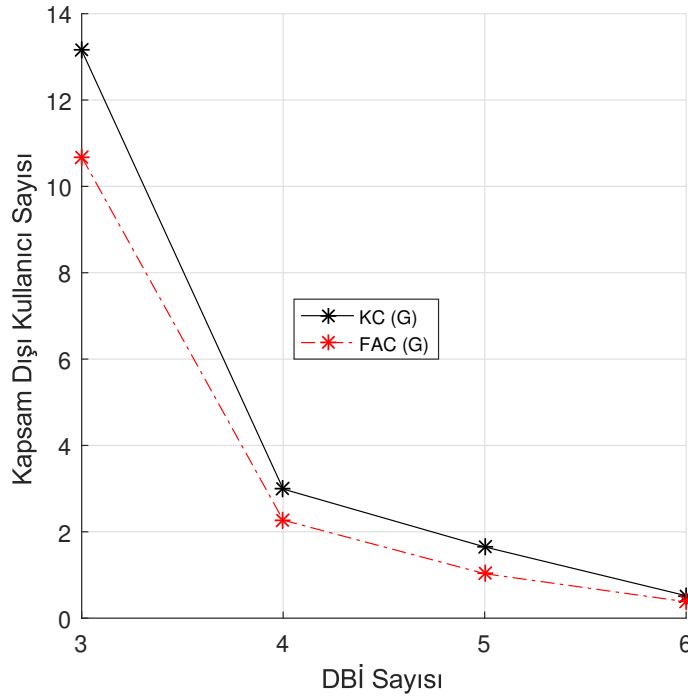
g	$C_{min}^N$ Kazanç (%)	$C_{min}^G$ Kazanç (%)
1	FAC 1.38	FAC 11.84
2	KC 0.15	FAC 21.80
3	KC 1.09	FAC 29.85
4	KC 8.57	FAC 37.90
5	KC 18.96	FAC 44.07



Şekil 4.37: Farklı  $g$  değerlerine göre  $N_{kd}^N$  ve  $N_{kd}^G$  değerleri ( $D = 4, DBİ$  yükseklik=450m)



Şekil 4.38: Farklı DBİ yüksekliklerinde  $N_{kd}^N$  ve  $N_{kd}^G$  değerleri ( $D = 4, g = 5.5$ )



Şekil 4.39: Farklı DBİ sayılarına göre  $N_{kd}^G$  değerleri

## 4.5 DBİ Konumlandırma Meta Sezgisel Yöntemler

### 4.5.1 Literatür taraması

Meta sezgisel yöntemler telekomünikasyon, kablosuz sensör ağları, ağ rotalama gibi haberleşme alanlarında ortaya çıkan problemlerin çözümünde yaygın şekilde kullanılmaktadır [156–158]. Bu kapsamda kullanılması gereken düğüm sayısı, düğümlerin lokasyonları, rotalama, kaynak atama problemlerine meta sezgisel yöntemler ile çözüm bulunmaktadır. Genellikle temel hedef düşük maliyetli ağ konfigürasyonunu gecikme, kapasite, güvenilirlik ve girişim gibi kısıtlar altında sağlamaktır. Haberleşmede ortaya çıkan bu tür problemler genellikle konveks olmayan problemlerdir ve kesin yöntemlerle ancak küçük boyutlu problemler çözülebilmektedir [159]. SA, TS, BBO ve PSO gibi meta sezgisel yöntemler çeşitli haberleşme problemlerinin çözümünde yaygın şekilde kullanılmaktadır [160].

Kalantari ve arkadaşları [52], ağın kapsama alanını maksimize etmek için gerekli minimum sayıda DBİ'yi ve konumlarını PSO yöntemi kullanarak belirlemişlerdir. DBİ'lerin kullanıcı kapasiteleri arasında eşitlik gözeterek 3B uzayda konumlandırılması problemi yine PSO yöntemi ile çözdürülmüştür [40]. [161]'de yazarlar ağın doğrusal kapasitesini maksimize etmek için DBİ kullanıcı eşleşmesini, DBİ konumlandırma ile birlikte ele almışlardır. Bu kapsamda önerilen yöntemde DBİ konumlarının bulunmasında PSO'dan yararlanılmıştır. Shakhathreh ve arkadaşları [162], kullanıcıların bina içerisinde düzgün dağıldığı bir senaryoda tek DBİ'nin 3B uzayda kapsama alanını

maksimize etmek için konumlandırılmasını PSO yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir.

DBİ konumlandırmada ortaya çıkan bazı problemler kablosuz sensör ağlarında düğüm konumlandırma problemlerine benzetilebilir. Kablosuz örgü ağlarında kullanıcıların kapsanması ve bağlantılılık en temel hedeflerdir. Bu hedeflerin formüle edilmesi ile elde edilen optimizasyon problemleri DBİ konumlandırmada olduğu gibi zor problemlerdir. Bu kapsamda literatür incelendiğinde düğüm yerleşimlerinin belirlenmesinde meta sezgisel yöntemlerden yararlandığı görülmektedir. Xhafa ve arkadaşları [163], örgü konuşlanma alanında düğümlerin konumlandırılmasında kullanıcı kapsanmasını maksimize etmek için TS yönteminden yararlanmışlardır. Oda ve arkadaşları [164], kablosuz örgü ağları kapsama problemini TS ve tepe çıkma (İng. hill climbing) yöntemleri ile çözmüş ve sonuçları parametrik olmayan istatistiksel Friedman testi [165] ile karşılaştırmışlardır. Lee ve arkadaşları [166], hücresele ağlarda baz istasyonlarının konumlandırılmasını ve kapasite tahsisini tamsayılı doğrusal program olarak tanımlamış ve çözümünü TS yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Barolli ve arkadaşları ağ bağlantılılığını birincil, kullanıcı kapsamını ikincil amaç fonksiyonu olarak tanımlamış ve bu fonksiyonlar çok amaçlı optimizasyon modeli kurmuşlardır. Formüle edilen modelin çözümünde TS yönteminden yararlanmışlardır.

Bir diğer önemli meta sezgisel yöntem olan SA'da kablosuz ağlarda sensör konumlandırmada yaygın şekilde kullanılmaktadır. Lin ve arkadaşları [167], düğüm yerleşim problemini kullanıcı servis önceliklerini göz önünde bulundurarak SA yöntemi çözmüşlerdir. Önerilen çözüm yönteminde momentum terimleri kullanılmış ve tavlama sürecinin verimliliği ve doğruluğu artırılarak kabul ihtimal fonksiyonu değerlerinde dalgalanma önlenmiştir. Puspitasari ve arkadaşları [168], kapsama alanını iyileştirmek için erişim noktası yerleşimini optimize etmişlerdir. Kurulan bir test düzeneği ile toplanan veriler ağgözlü algoritma ve SA yöntemi kullanılarak, erişim noktası yerleşiminin modellenmesinde kullanılmıştır. [169]'da örgü kullanıcılarının farklı dağılımlarla konumlandıkları ağlarda en iyi bağlantılılığı ve kapsamayı bulmak için SA yönteminden yararlanılmıştır.

Kablosuz sensör ağlarında hedef düğümün doğru lokalizasyonu tüm ağ performansına etkisi olduğu için kritik bir konudur [170]. Bu alandaki problemlerin çözülmesinde BBO yönteminden yararlanılmaktadır [171, 172]. Yadav ve arkadaşları sensör düğümlerine paket iletimi için optimal öbek başı belirleme problemini BBO yöntemi ile çözmüşlerdir [173]. Goudos ve arkadaşları iç alanda kablosuz ağ planlamasını kapsama alanını maksimize edecek ve güç tüketimini minimize edecek şekilde çoklu hedef optimizasyonu problemi olarak modellemiş ve BBO yöntemi ile çözmüşlerdir.

#### **4.5.2 Problemin tanımı ve çözümü**

DBİ konumlandırma probleminde bu tez çalışmasında gösterildiği gibi farklı hedefler tanımlanabilir. Bu kapsamda ağın logaritmik kapasitesi, doğrusal kapasitesi ya da minimum kullanıcı kapasitesi maksimize edilebileceği gibi belli bir eşik değerinin altında kalan kullanıcı sayısı minimize edilebilir. Bununla birlikte genel bir uygulama düşünüldüğünde hem yüksek ağ kapasitesi sağlanması hem de kullanıcı kapasiteleri arasında

bir denge gözetmesi nedeniyle ağın logaritmik kapasitesini maksimize edecek şekilde DBİ'leri konumlandırmak Bölüm 4.1.3'te elde edilen sonuçlara göre uygun bir yaklaşımdır. Bu sebeple meta sezgisel yöntemlerin performanslarını karşılaştırırken Bölüm 4.1.2.1'de sunulan Şekil 4.2'deki 3B DBİ konumlandırma modeli kullanılmıştır.

Logaritmik kapasitenin maksimize edilmesinde meta sezgisel yöntemlerden PSO kullanılmış ve önerilen yöntemlere göre başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte PSO yönteminin performansını değerlendirmek için literatürde zor problemlerin çözümünde kullanılan TS, SA ve BBO yöntemleri kullanılmıştır. Tekrarlı şekilde çalışarak amaç fonksiyonunu maksimize ya da minimize etmeye yarayan bu yöntemlere ait açıklamalar Bölüm 2.3.2'de ve Bölüm 2.3.3'te sunulmuştur.

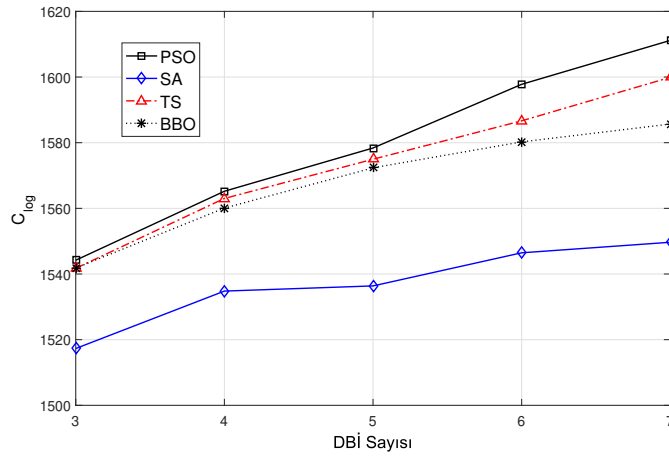
### 4.5.3 Sonuçlar

PSO, SA, TS ve BGO yöntemleri, Bölüm 4.1.3'te tanımlanan düzgün dağılımlı SI senaryosu ve düzensiz dağılımlı SII senaryosunda test edilmiştir. Her iki senaryo içinde 100 kullanıcıdan oluşan 30 farklı ağ oluşturulmuştur ve ortalamalar alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Her yöntemde aynı sayıda amaç fonksiyonu değerlendirilmesini yapılarak eşitlik sağlanmıştır. Simülasyon parametreleri Bölüm 4.1.3 Çizelge 4.1'de verildiği gibidir.

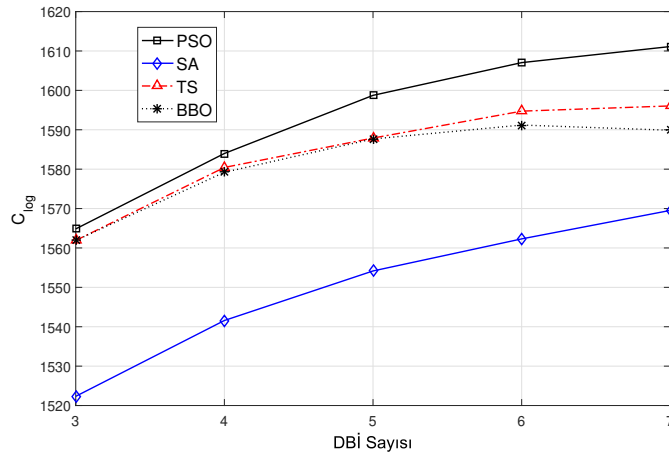
Şekil 4.40'da SI senaryosunda farklı DBİ sayılarına göre meta sezgisel yöntemlerle elde edilen  $C_{log}$  değerleri gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre PSO yöntemi en iyi  $C_{log}$  performansını sağlamıştır. En düşük performans SA yöntemi ile elde edilmiştir. TS yöntemi  $3 \leq D \leq 5$  iken PSO yöntemine yakın sonuçlar üretmektedir.  $D > 5$  iken PSO ile TS arasındaki performans farkının arttığı görülmektedir. PSO yöntemi, DBİ sayısındaki artışa bağlı girişimi daha iyi yönetmektedir.  $C_{log}$  kapasitesinden ortalama doğrusal kullanıcı kapasitelerini elde ettiğimizde PSO'nun başarımı daha iyi görülmektedir. Örneğin  $D = 4$  iken PSO, TS, BBO ve SA ile elde edilen ortalama kullanıcı kapasiteleri sırasıyla 626Kbps, 612Kbps, 595Kbps ve 462Kbps'dir. Buna göre PSO yöntemi, TS yönteminden %2.22, BBO yönteminden %5.21 ve SA yönteminden %35.49 daha fazla kapasite sağlamıştır. BBO yöntemi çok kötü olmasa da PSO ve TS'nin gerisinde kalmıştır. DBİ sayısı fazlayken PSO'nun performansı bahsedildiği gibi diğer yöntemlere kıyasla artmaktadır. Örneğin  $D = 7$  iken PSO, TS, BBO ve SA ile elde edilen ortalama kullanıcı kapasiteleri sırasıyla 992Kbps, 886Kbps, 768Kbps ve 536Kbps'dir. Buna göre PSO yöntemi, TS yönteminden %11.96, BBO yönteminden %29.16 ve SA yönteminden %85.49 daha fazla kapasite sağlamıştır.

Şekil 4.41'de SII senaryosunda farklı DBİ sayılarına göre meta sezgisel yöntemlerle elde edilen  $C_{log}$  değerleri gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre PSO yöntemi yine en iyi  $C_{log}$  performansını sağlamıştır. En düşük performans SA yöntemi ile elde edilmiştir. PSO yönteminin diğer yöntemlere göre performansı SI senaryosundakinden daha yüksektir. Bu performans farkı düzensiz dağılımda artan girişimden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte SI'deki sonuçlardan farklı olarak  $D \leq 6$  iken BBO yöntemi ve TS yöntemi birbirlerine çok yakın değerler üretmiştir. Sonuçları ortalama doğrusal kapasitelere göre analiz ettiğimizde;  $D = 4$  için PSO, TS, BBO ve SA ile elde edilen

ortalama kullanıcı kapasiteleri sırasıyla 756Kbps, 729Kbps, 720Kbps, 494Kbps'dir. Buna göre PSO yöntemi, TS yönteminden %3.70, BBO yönteminden %5 ve SA yönteminden %53.09 daha fazla kapasite sağlamıştır. TS ve BB arasındaki fark %1.25'dir. Bu fark SI'de %2.28'dir.  $D = 7$  iken elde edilen ortalama kapasiteler bir önceki sırayla 992Kbps, 853Kbps, 801Kbps ve 653Kbps'dir. PSO yöntemi TS yönteminden %16.29, BBO yönteminden %23.84 ve SA yönteminden %51.91 daha fazla kapasite sağlamıştır. TS ile BBO arasındaki fark %6.49'a yükselmiştir. Her iki senaryoda da PSO yöntemi diğer yöntemlere göre daha yüksek performans sağlamıştır. Bu fark özellikle artan DBİ sayısı ile artmaktadır. bu sonuçlara göre PSO yöntemi ile DBİ konumlandırma probleminde optimale yakın sonuçlar elde edildiği değerlendirilebilir.



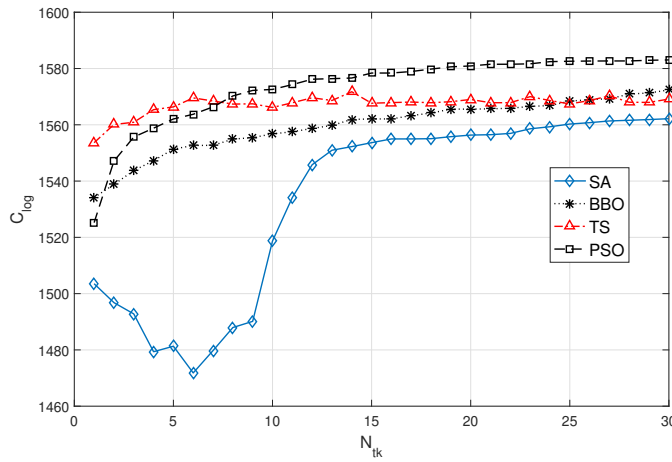
Şekil 4.40: Meta sezgisel yöntemlerin SI'de DBİ sayılarına göre  $C_{log}$  değerleri



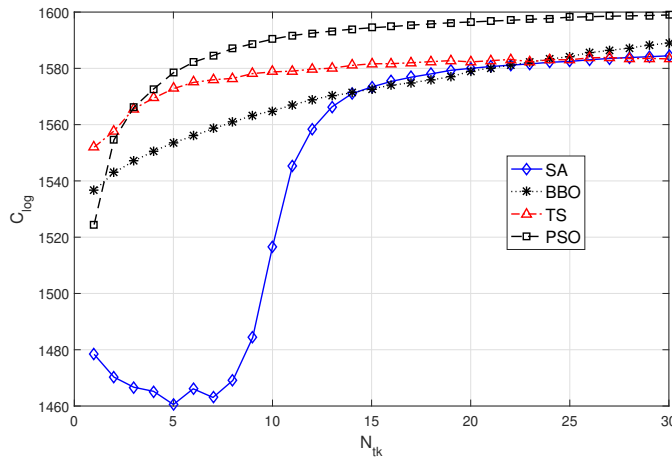
Şekil 4.41: Meta sezgisel yöntemlerin SII'de DBİ sayılarına göre  $C_{log}$  değerleri

Şekil 4.42'de ve Şekil 4.43'te  $D = 5$  için sırasıyla SI ve SII senaryolarında tekrar adımlarına göre elde edilen  $C_{log}$  değerleri gösterilmektedir. PSO ve BBO'nun ürettiği değerler monoton bir şekilde her adımda artmaktadır. Bununla birlikte TS ve SA

yöntemlerinde dalgalanma görünmektedir. Bunun sebebi bu yöntemlerin tekrar başlangıcında iyi olmayan değerlerle başlatılmasıdır İlk adımlarda TS'nin en iyi sonuçları ürettiği görülmektedir ancak PSO daha sonra en iyi çözüme odaklanarak hareket ettiği için daha hızlı şekilde performansta iyileşme sağlamaktadır. Örneğin SII'de tekrar adımı 5'de PSO, TS, BBO ve SA ile elde edilen  $C_{log}$  değerleri ( $\times 10^3$ ) sırasıyla 1.5784, 1.5728, 1.5536, 1.4605 iken tekrar adımı 20'de bu değerler ( $\times 10^3$ ) sırasıyla 1.5965, 1.5823, 1.5790 ve 1.5800 olmuştur. Buna sonuçlara göre 15 adımda  $C_{log}$  değerlerinde sırasıyla %1.14, %0.60, %1.63 ve %8.18 artış meydana gelmiştir. SA'da çok önemli bir kazanç olmasına rağmen sonuç itibarıyla PSO ve BBO'nun gerisinde kalmıştır. Bununla birlikte SI'de çok başarısız olurken SII'de TS yöntemi ile benzer nihai sonuç üretmiştir. Çizelge 4.19'da tüm yöntemler için SI ve SII senaryolarında  $D = 3, 5, 7$  iken ve tekrar adımları 5, 15, 25 iken elde edilen  $C_{log}$  değerleri sunulmuştur.



Şekil 4.42: Meta sezgisel yöntemlerin SI'de tekrar adımlarında  $C_{log}$  değerleri ( $D = 5$ )



Şekil 4.43: Meta sezgisel yöntemlerin SII'de tekrar adımlarında  $C_{log}$  değerleri ( $D = 5$ )



Çizelge 4.19: Meta sezgisel yöntemlerin SI ve SII tipi ağlarda tekrar adımına göre  $C_{log}$  değerleri

SI												
Yöntem	D = 3			D = 5			D = 7					
	$N_{tk} = 5$	$N_{tk} = 15$	$N_{tk} = 25$	$N_{tk} = 5$	$N_{tk} = 15$	$N_{tk} = 25$	$N_{tk} = 5$	$N_{tk} = 15$	$N_{tk} = 25$			
PSO	1.5428	1.5446	1.5621	1.5784	1.5826	1.581	1.6011	1.6079	1.6109			
SA	1.4611	1.5222	1.5276	1.4813	1.5336	1.5603	1.4759	1.5666	1.5826			
TS	1.5194	1.5202	1.5385	1.5664	1.5677	1.5674	1.5783	1.5858	1.5901			
BBO	1.5289	1.5353	1.5414	1.5514	1.5621	1.5684	1.5553	1.5749	1.5827			
SII												
Yöntem	D = 3			D = 5			D = 7					
	$N_{tk} = 5$	$N_{tk} = 15$	$N_{tk} = 25$	$N_{tk} = 5$	$N_{tk} = 15$	$N_{tk} = 25$	$N_{tk} = 5$	$N_{tk} = 15$	$N_{tk} = 25$			
PSO	1.5558	1.5627	1.5639	1.5784	1.5944	1.5982	1.5785	1.6028	1.6088			
SA	1.4843	1.5528	1.5569	1.5825	1.5734	1.5825	1.4459	1.5634	1.5766			
TS	1.5112	1.5187	1.5381	1.5728	1.5816	1.583	1.5732	1.5858	1.5882			
BBO	1.5449	1.5548	1.5604	1.5536	1.5727	1.5842	1.5464	1.5708	1.5856			



## 5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında özgün DBİ kullanım senaryoları tanımlanarak bu senaryolarda DBİ'lerin konumlandırılmasına yönelik yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bu kapsamda DBİ'lerin 3B uzayda konumlandırılması, kullanıcı dağılımının düzensiz olduğu ve yoğun bölge içeren ağlarda DBİ'lerin kullanıcı eşleşmelerini gözeterek konumlandırılması, sivil uygulamalardan farklı ihtiyaçları olan taktik sahalarda DBİ'lerin konumlandırılması, bozulma ya da vurulma gibi sebeplerden devre dışında kalma durumu olan bir DBİ'nin bulunduğu ağlarda DBİ'lerin konumlandırılması problemleri incelenmiş ve önerilen DBİ konumlandırma yöntemlerin performansları simülasyonlar ile test edilmiştir. Bu tez çalışmasının motivasyonu olan Bölüm 1.2'de sorulan sorular için elde edilen cevaplar aşağıda sıralanmıştır:

1. DBİ'lerin konumlandırılmasında ağın doğrusal kapasitesi ya da logaritmik kapasitesi maksimize edilebileceği gibi daha hızlı çalışan kümeleme temelli yöntemler kullanılabilir. Doğrusal kapasitenin maksimize edilmesi kanal durumu iyi olan kullanıcıları önceliklendirdiği için ağdaki kullanıcıların kapasiteleri arasında büyük farklar meydana gelmektedir. Kapasiteler arasındaki dengesizlik özellikle  $\gamma_C$  metriğinin büyüklüğü ile gözlenmiştir. Logaritmik kapasitenin maksimize edilmesi ile doğrusal kapasitede tolere edilebilir kayıp olurken kullanıcı eşitliğinde ciddi kazanç sağlanmıştır. Örneğin, SI tipi ağda 7 DBİ LinPSO ile konumlandırıldığında  $\gamma_C = 311.80$  olurken LogPSO ile bu değer 17.03 olarak elde edilmiştir. Kapasite farkında yöntemler çok fazla hesaplama gücüne ihtiyaç duymaktadırlar. Bu noktada kümeleme temelli yöntemler önem kazanmaktadır. SI tipi ağlarda K-Cov ve K-APSO yöntemleri ile iyi sonuçlar elde edilmiştir. SII tipi ağlarda ise bu yöntemlerde girişim kontrolü yapılmadığı için özellikle ağda fazla DBİ kullanıldığı zaman kötü sonuçlar elde edilmiştir. Bu probleme çözüm üretme motivasyonu ile hızlı çalışan ve girişim farkında X-Cov yöntemi geliştirilmiştir.

2. Kümeleme temelli K-APSO ve K-Cov yöntemleri hızlı çalışmasına karşın girişimi göz önünde bulundurmadığı için SII tipi ağlarda performans kaybına sebep olmaktadır. Bu kapsamda kümeleme yönteminden yararlanılarak X-Cov yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde ağda kaç adet DBİ kullanılacağını tanımlamaya ihtiyaç bulunmamaktadır. Tek DBİ'den başlayarak her DBİ'ye ikiye bölünmekte  $C_{log}$  kapasitesinde artış oldukça bölünme devam etmektedir. Diğer kümeleme temelli yöntemlerden farklı olarak gereksiz DBİ'ler konumlandırılmamakta ve girişim bu şekilde yönetilmektedir.

3. Kullanıcı dağılımları kullanılan yöntemin performansını önemli şekilde etkilemektedir. Bu durum kümeleme temelli K-Cov ve K-APSO'da kapasite kayıpları olarak, LinPSO'da ise kullanıcı kapasite eşitliğinde kayıp olarak gözlenmektedir. Kullanıcıların gruplar halinde belli alanlarda yoğunlaşması durumunda kümeleme ile DBİ'ler birbirlerine çok yaklaşmakta ve ağın genel performansı düşmektedir. Öte yandan

bu durum kullanıcıların düzenli dağıldığı SI tipi ağda çok belirgin değildir. Ancak çok fazla DBİ kullanılması durumunda aynı etkinin gözlenmesi beklenebilir. LinPSO yöntemi SI tipi ağlarda kullanıcı kapasite eşitliği bakımından yetersiz olmakla birlikte SII tipi ağlarda daha makul bir performans sağlamıştır. Bunun sebebi, düzenli dağılımda çok sayıda kullanıcı hücre sınırlarında bulunmakta ve kanal durumu iyi olan kullanıcılar temel alındığı için yukarıda da ifade edildiği gibi kullanıcı kapasitelerinde ciddi farklar meydana gelmektedir. Öte yandan logaritmik kapasitenin maksimize edildiği LogPSO hem SI hem de SII tipi ağlarda çok başarılı sonuçlar üretmiştir. Bu sonuçlara göre LogPSO'nun performansında kullanıcı dağılımlarının çok etkin olmadığı değerlendirilebilir.

4. Taktik sahalarda GPS kullanımında ciddi zorluklar vardır. GPS karıştırıcılar rahatlıkla tedarik edilmekte ve çok düşük sinyal seviyelerinde çalışan GPS alıcıları rahatlıkla karıştırabilmektedir. Literatürde DBİ konumlandırma problemleri kullanıcı konumlarının bilindiği varsayımı ile incelenmektedir. Ancak taktik sahalarda kullanıcı konumlarını kestirmek ve buna göre DBİ'leri konumlandırmak gerekebilir. Bu kapsamda yol kaybı değerleri kullanılarak MLE yöntemi kullanıcı pozisyonları kestirilmiş ve pozisyon hataları belirlenmiştir. Taktik sahalarda göz önünde bulundurulması gereken bir diğer konu da DBİ'leri hedef alan tehdit unsurlarıdır. Günümüzde dron imhasında düşük maliyetli kinematik silahlar yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu silahların DBİ'leri vurma olasılıklarını göz önünde bulundurarak DBİ'leri konumlandırmak hem iletişimin devamı hem de operasyonel maliyetlerin azaltılması noktasında önemlidir. Bu gereksinimleri karşılayacak şekilde hızlı çalışan sezgisel bir yöntem ile kapasitede belli bir kayıpla DBİ'lerin vurulma olasılığı azaltılmıştır.

5. DBİ'ler kompleks elektromekanik sistemler olarak radyo terminallerine kıyasla bozulmaya daha yatkındırlar. Bununla birlikte taktik sahalarda dronların tehdit unsurları tarafından hedef alınma olasılığı bulunmaktadır. Bu sebeple özellikle iletişim devamlılığının kritik olduğu ağlarda bir DBİ'nin devre dışı kalması durumunda meydana gelen kayıpların azaltılması büyük önem taşımaktadır. Bu özgün senaryo modellendikten sonra geçiş durumundaki performansın iyileştirilmesi için iki farklı yöntem önerilmiştir. Önerilen RAD yöntemi kullanılan DBİ'lerden bilinen bir tanesinin devre dışında kalması durumunda devre dışında kalma öncesi kapasiteden tolere edilebilir bir kayıpla geçiş performansını önemli şekilde iyileştirmiştir. DBİ'lerden rastgele birinin devre dışında kalması durumu için önerilen kümeleme temelli FAC ile de benzer şekilde devre dışı kalma öncesi durumda düşük bir kayıpla geçiş durumunda önemli bir kazanım sağlanmıştır.

6. Zor problemlerin çözümünde yaygın şekilde kullanılan popülasyon temelli PSO ve BBO, tek çözüm temelli TS ve SA logaritmik kapasiteyi maksimize eden DBİ konumlandırma problemine uygulanmıştır. SI ve SII tipi ağlar için simülasyonlar yapılmış ve her iki durumda da en iyi performans PSO yöntemi ile elde edilmiştir. PSO'dan sonra en iyi performansı tek çözüm temelli TS yöntemi sağlamıştır.

Açık araştırma konuları olarak aşağıdaki alanlar belirlenmiştir:

1. DBİ'lerin dinamik şekilde kullanıcı hareketliliğine göre enerji tüketimlerini de minimize ederek konumlandırılması.

2. Birden çok DBİ'nin devre dışında kalması durumu düşünülerek geçiş durumu performansının iyileştirilmesi için yöntemler geliştirilmesi.
3. Kısıtlanmış durumdan normal duruma geçerken yeni DBİ'nin ve diğer DBİ'lerin çıkış güçleri ile birlikte rotalarının belirlenmesi.
4. LogPSO yöntemine daha yakın sonuçlar üreten hızlı DBİ konumlandırma yöntemlerinin geliştirilmesi.
5. Ağda kullanıcıların bağlantı güvenilirliğini arttırmak için normalden daha fazla sayıda DBİ'nin çok fazla girişim yaratmadan konumlandırılması ve çıkış güçlerinin belirlenmesi.
6. DBİ havada kalma sürelerini göz önünde bulundurarak bir alanda sürekli servis sağlamak için gerekli DBİ sayısının ve iniş konumlarının ve rotalarının belirlenmesi





## KAYNAKLAR

- [1] **Hassanalian, M., Abdelkefi, A.,** (2017). Classifications applications and design challenges of drones: A review, *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 99-131.
- [2] **Pederi, Y. A., Cheporniuk, H. S.,** (2015) Unmanned aerial vehicles and new technological methods of monitoring and crop protection in precision agriculture, *IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, Kiev, Ukraine, Oct 13-15.
- [3] **Sun, Z., Wang, P., Al-Rodhaan, M.,** (2011). Bordersense: Border patrol through advanced wireless sensor networks, *Ad Hoc Networks*, 9, 3, 468–477.
- [4] **Maza, I., Caballero, F., Dios, J. M.,** (2011). Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications, *J. Intelligent and Robotic Systems*, 61, 563-585.
- [5] **Url-1** <[https://www.pge.com/en/about/newsroom/newsdetails/index.page?title=20160518\\_pge\\_testing\\_safety\\_drones\\_to\\_inspect\\_electric\\_and\\_gas\\_infrastructure](https://www.pge.com/en/about/newsroom/newsdetails/index.page?title=20160518_pge_testing_safety_drones_to_inspect_electric_and_gas_infrastructure)>, Alındığı tarih: 20.07.2019.
- [6] **Url-2** <<https://thecyberhawk.com/cyberhawk-plays-key-role-in-development-of-uk-drone-guidelines-for-offshore-oil-and-gas>>, Alındığı tarih: 20.07.2019.
- [7] **Url-3** <<https://industrialskyworks.com/drone-inspections-services>>, Alındığı tarih: 20.07.2019.
- [8] **Wargo, C. A., Church, G. C., Glaneueski, J., Strout, M.,** (2014) Unmanned aircraft systems research and future analysis, *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, March 1-8.
- [9] **Valavanis, K., Oh, P., L., P.,** *Unmanned Aircraft Systems: International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles*. Springer, (2008).
- [10] **Scherer, J., Yahyanejad, S., Hayat, S., Yanmaz, E., Andre, T., Khan, A., Vukadinovic, V., Bettstetter, C., Hermann, H., Bernhard, R.,** (2015). An Autonomous Multi-UAV System for Search and Rescue, *Proc. of the First Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use*, 33-38.

- [11] **Sudarshan, S. K. V., Montano, V., Nguyen, A., McClimans, M., Chang, L., Stewart, R. R., Becker, A. T.,** (2017). A heterogeneous robotics team for largescale seismic sensing, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2, 3, 1328-1335.
- [12] **Url-4** Ackerman, E., Drone inspections services, <<https://spectrum.ieee.org/robotics/medical-robots/mini-uavs-could-be-the-cheapest-way-to-deliver-medicine>>, Alındığı tarih: 21.07.2019.
- [13] **Url-5** Maguire, Y. Building communications networks in the stratosphere, <<https://engineering.fb.com/connectivity/buildingcommunications-networks-in-the-stratosphere/>>, Alındığı tarih: 21 Temmuz 2019.
- [14] **Kanistras, K., Martins, G., Rutherford, M. J., Valavanis, K. P.,** *Survey of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Traffic Monitoring*. Springer, (2014).
- [15] **Fotouhi, A., Qiang, H., Ding, M., Hassan, M., Giordano, L. G., Garcia-Rodriguez, A., Yuan, J.,** (2019). Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 21, 4, 3417-3442.
- [16] **Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y., Debbah, M. A.,** (2019). A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 21, 3, 2334-2360.
- [17] **Url-6** Qualcomm, Paving the path to 5G: optimizing commercial LTE networks for drone communication, <<https://www.qualcomm.com/news/onq/2016/09/06/pavingpath-5goptimizing-commercial-lte-networks-drone-communication>>, Alındığı tarih: 21.07.2019.
- [18] **Cao, X., Yang, P., Alzenad, M., Xi, X., Wu, D., Yanikomeroglu, H.,** (2018). Airborne communication networks: A survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36, 9, 1907-1926.
- [19] **Zeng, Y., Zhang, R., Lim, T. J.,** (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges, *IEEE Communications Magazine*, 54, 5, 36-42.
- [20] **Bor-Yaliniz, I., Yanikomeroglu, H.,** (2016). The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells, *IEEE Communications Magazine*, 54, 11, 48-55.
- [21] **Chandrasekharan, S., Gomez, K., Al-Hourani, A., Kandeepan, S., Rasheed, T., Goratti, L., Reynaud, L., Grace, D., Bucaille, I., Wirth, T., Allsopp S.,** (2016). Designing and implementing future aerial



- communication networks, *IEEE Communications Magazine*, 54, 5, 26-34.
- [22] **Gupta, L., Jain, R., Vaszkun, G.,** (2016). Survey of important issues in UAV communication networks, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18, 2, 1123-1152.
- [23] **Yanmaz, E., Yahyanejad, S., Rinner, B., Hellwagner, H., Bettstetter, C.,** (2018). Drone networks: Communications coordination and sensing, *Ad Hoc Networks*, 68, 1-5.
- [24] **Andre, T., Hummel, K. A., Schoellig, A. P., Yanmaz, E., Asadpour, M., Bettstetter, C., Grippa, P., Hellwagner, H., Sand, S., and Zhang, S.,** (2014). Application-driven design of aerial communication networks, *IEEE Communications Magazine*, 52, 5, 129-137.
- [25] **Hayat, S., Yanmaz, E., Muzaffar, R.,** (2016). Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18, 4, 2624-2661.
- [26] **Baldini, G., Karanasios, S., Allen, D., Vergari, F.,** (2014). Survey of wireless communication technologies for public safety, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 16, 2, 619–641.
- [27] **Url-7** <<https://www.google.com/intl/en-US/loon>>, Alındığı tarih: 22.07.2019.
- [28] **Url-8** <<http://www.ibtimes.co.uk/nokia-ee-trial-mobile-base-stationsfloatingdrones-revolutionise-rural-4g-coverage-1575795>>, Alındığı tarih: 22.07.2019.
- [29] **Url-9** <<http://www.huawei.com/en/industryinsights/innovation/xlabs/useca-smbfd2017-connected-aerial-vehicle-live>>, Alındığı tarih: 22.07. 2019.
- [30] **Tuna, G., Nefzi, B., Conte, G.,** (2014). Unmanned aerial vehicle-aided communications system for disaster recovery, *Journal of Network and Computer Applications*, 41, 27–36, 2014.
- [31] **Tuna, G., Mumcu, T. V., Gulez, K.,** (2012) Design strategies of unmanned aerial vehicle-aided communication for disaster recovery, *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, Istanbul, Turkey, Dec. 12-14.
- [32] **Gomez, K., Kandeepan, S., Vidal, M. M., Boussemart, V., Ramos, R., Hermenier, R., Rasheed, T., Goratti, L., Reynaud, L., Grace, D., Zhao, Q., Han, Y., Rehan, S., Morozs, N., Jiang, T., Bucaille, I., Wirth, T., Campo, R., Javornik, T.,** (2016). Aerial base stations with opportunistic links for next generation emergency communications, *IEEE Communications Magazine*, 54, 4, 31-39.

- [33] **Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Debbah, M.**, (2015) Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis, *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, CA, USA, Dec. 6-10.
- [34] **Rohde, S., Wietfeld, C.**, (2012) Interference aware positioning of aerial relays for cell overload and outage compensation, *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Quebec City, QC, Canada, Sept. 3-6.
- [35] **Lyu, J., Zeng, Y., Zhang, R.**, (2018). UAV-aided offloading for cellular hotspot, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17, 6, 3988-4001.
- [36] **Yang, P., Cao, X., Yin, C., Xiao, Z., Xi, X., Wu, D.**, (2017). Proactive drone-cell deployment: Overload relief for a cellular network under flash crowd traffic, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18, 10, 2877-2892.
- [37] **Bucaille, I., Hethuin, S., Munari, A., Hermenier, R., Rasheed, T., Allsopp, S.**, (2013) Rapidly deployable network for tactical applications: Aerial base station with opportunistic links for unattended and temporary events absolute example, *IEEE Military Communications Conference*, San Diego, CA, USA, Nov. 18-20.
- [38] **Al-Hourani, A., Kandeepan, S., and Jamalipour, A.**, (2014) Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments, *IEEE Global Communications Conference*, Austin, TX, USA, Dec. 8-12.
- [39] **Al-Hourani, A., Kandeepan, S., Lardner, S.**, (2014). Optimal lap altitude for maximum coverage, *IEEE Wireless Communications Letters*, 3, 6, 569-572.
- [40] **Akarsu, A., Girici, T.**, (2018). Fairness aware multiple drone base station deployment, *IET Communications*, 12, 4, 425-431.
- [41] **Petritoli, E., Leccese, F., Ciani, L.**, (2018). Reliability and maintenance analysis of unmanned aerial vehicles, *Sensors*, 18, 9, 3171.
- [42] **Akarsu, A., Girici, T.**, (2018) Failure aware deployment of drone base stations, *Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, Nov. 26-27.
- [43] **Akarsu, A., Girici, T.**, (2019) Resilient deployment of drone base stations. *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Istanbul, Turkey, June 18-20.
- [44] **Kaplan, E. D., Hegarty, C. J.**, *Understanding GPS: Principles and Applications*, London, Artech House, (2006).

- [45] **Misra, P., Enge, P.,** *Global Positioning System: Signals Measurements and Performance*, Ganga-Jamuna Press, Lincoln, (2006).
- [45] **Url-10** <<https://www.economist.com/international/2013/07/27/out-of-sight>>, Alındığı tarih: 25.07.2019.
- [47] **Url-11** <<https://www.harris.com/solution/gps-anti-jam>>, Alındığı tarih: 25.07.2019.
- [48] **Url-12** <[https://www.raytheon.com/capabilities/products/gps\\_anti-jam](https://www.raytheon.com/capabilities/products/gps_anti-jam)>, Alındığı tarih: 25.07.2019.
- [49] **Url-13** <<https://www.novatel.com/solutions/anti-jamming-technology>>, Alındığı tarih: 25.07.2019.
- [50] **Url-14** <<http://ssdergilerik.com/tr/HaberDergilik/HAVELSAN-danGPSKoruma-Sistemi-Konumbul>>, Alındığı tarih: 25.07.2019.
- [51] **Caballero, F., Merino, L., Maza, I., Ollero, A.,** (2008) A particle filtering method for wireless sensor network localization with an aerial robot beacon, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, May 19-23.
- [52] **Kalantari, E., Yanikomeroglu, H., Yongacoglu, A.,** (2016) On the number and 3D placement of drone base stations in wireless cellular networks, *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Montreal, QC, Canada, Sept. 18-21.
- [53] **Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Debbah, M.,** (2016). Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage, *IEEE Communications Letters*, 20, 8, 1647-1650.
- [54] **M., Saad, W., Bennis, M., Debbah, M.,** (2016) Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 22-27.
- [55] **Alzenad, M., El-Keyi, A., Lagum, F., Yanikomeroglu, H.,** (2017). 3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage, *IEEE Wireless Communications Letters*, 6, 4, 434-437.
- [56] **Jha, A.,** *Theory, design, and applications of unmanned aerial vehicles*. CRC Press, (2016).
- [57] **Url-15** Tesla, N., Method of and apparatus for controlling mechanism of moving vessels or vehicles, <<https://patents.google.com/patent/US613809A/en>>, Alındığı tarih: 28.07.2019.
- [58] **Djuki, D.,** *The Companion to International Humanitarian Law*. Brill Nijhoff, (2018).

- [59] **Url-16** Stamp, J., Unmanned drones have been around since world war I, <<https://www.smithsonianmag.com/arts-culture/unmanned-drones-have-been-around-since-world-war-i-16055939>>, Alındığı tarih: 28. 07.2019.
- [60] **Blom, J. D.**, *Unmanned Aerial Systems: A Historical Perspective*, CreateSpace Independent Publishing Platform, (2010).
- [61] **Valavanis, K. Vachtsevanos, G. J.**, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Netherlands, Springer, (2015).
- [62] **Beard, R. W. and McLain, T. W.**, *Small unmanned aircraft: Theory and practice*, Princeton university press, (2012).
- [63] **Url-17** NATO, The joint air force competence centre, strategic concept of employment for unmanned aircraft systems in NATO, <<https://www.japcc.org/portfolio/strategic-concept-of-employment-for-unmanned-aircraft-systems-in-nato>>, Alındığı tarih: 28.07.2019.
- [64] **Rothlauf, F.**, *Design of Modern Heuristics*, Springer, (2011).
- [65] **Stephen, B.**, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, (2004).
- [66] **Bertsimas, D., Nohadani, O., Teo, K. M.**, (2010). Nonconvex robust optimization for problems with constraints. *INFORMS Journal on Computing*, 22, 1, 44-58.
- [67] **Jain, P., Kar, P.**, *Non-convex Optimization for Machine Learning*, Now Publishers Inc., (2018).
- [68] **Henrion, D., Lasserre, J.**, (2004). Solving nonconvex optimization problems, *IEEE Control Systems Magazine*, 24, 3, 72-83.
- [69] **Murty, K. G., Kabadi, S. N.**, (1987). Some np-complete problems in quadratic and nonlinear programming, *Math. Program.*, 39, 2, 117-129, 1987.
- [70] **Dreo, J., Petrowski, A., Siarry, P., Taillard, E.**, *Metaheuristics for Hard Optimization*. SpringerVerlag, (2006).
- [71] **Boussaid, I., Lepagnot, J., Siarry, P.**, (2013). A survey on optimization metaheuristics, *Information Sciences*, 237, 82-117, 2013.
- [72] **Talbi, E. G.**, *Metaheuristics: From Design to Implementation*, Wiley-Blackwell, (2009).
- [73] **Kirkpatrick, S., Gelatt, C., Vecchi, M. P.**, (1983). Optimization by simulated annealing, *Science*, 22, 671-680.
- [74] **Glover, F.**, (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computers and operations research*, 13, 5, 533-549.
- [75] **Koza, J. R.**, *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press, (1992).

- [76] **Goldberg, D. E.**, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning Studies in Computational Intelligence*, Longman Publishing Co., (1989).
- [77] **Dorigo, M.**, Optimization, learning and natural algorithms, *PhD thesis*, Politecnico di Milano, (1992).
- [78] **Egea-Lopez, E., Vales-Alonso, J., Martinez-Sala, A. S., Pavon-Mario, P., Garcia-Haro, J.**, (1993). Bee-havior in a mobile robot: The construction of a selforganized cognitive map and its use in robot navigation within a complex, natural environment, *Proc. Int. Conf. on Neural Networks*, 1451–1456.
- [79] **Kennedy, J., Eberhart, R.**, (1995). Particle swarm optimization, *Proceedings of International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948.
- [80] **Eberhart, R., Kennedy, J.**, (1995) A new optimizer using particle swarm theory, *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39–43.
- [81] **Wallace, A. R.**, *The geographical distribution of animals*, Harper & Brothers, (1876).
- [82] **Darwin, C., Beer, G.**, *The Origin of Species*, Books Inc., (1869).
- [83] **MacArthur, R., Wilson, E.**, *The Theory of Island Biogeography*, Princeton University Press, (2001).
- [84] **Zhang, X., Kang, Q., Cheng, T. J., Wang, X.**, (2019). Efficient and merged biogeography-based optimization algorithm for global optimization problems, *Soft Computing*, 23, 12, 4483-4502.
- [85] **Ma, H., Yang, P., You, P., Fei, M.**, (2019). Multi-objective biogeography-based optimization for dynamic economic emission load dispatch considering plug-in electric vehicles charging, *Energy*, 135, 12, 101-111.
- [86] **Guo, W., Wang, L., Wu, Q.**, (2016). Numerical comparisons of migration models for multi-objective biogeography-based optimization, *Information Sciences*, 328, 302-320.
- [87] **Guo, W., Wang, L., Wu, Q.**, (2011). Blended biogeography-based optimization for constrained optimization, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24, 3, 517-525.
- [88] **Simon, D.**, (2008). Biogeography-based optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12, 6, 702-713.
- [89] **Glover, F.W., Kochenberger, G. A.**, *Handbook of Metaheuristics*. Springer, (2003).
- [90] **Dekkers, A., Aarts, E.**, (1991). Global optimization and simulated annealing, *Mathematical Programming*, 50, 367-393.

- [91] **Locatelli, M.**, (2000). Simulated annealing algorithms for continuous global optimization: Convergence conditions, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 29, 1, 87-102.
- [92] **Ozdamar, L., Demirhan, M.**, (2000). Experiments with new stochastic global optimization search techniques, *Computers and Operations Research*, 27, 9, 841-865.
- [93] **Glover, F., Manuel, L.**, *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, (1997).
- [94] **ITU**, (2002) Propagation data and prediction methods for the design of terrestrial broadband millimetric radio access systems. Technical Report 1410-2.
- [95] **Shannon, C. E.**, (1948). A mathematical theory of communication, *Bell Syst. Techn. J.*, 27, 379-423.
- [96] **Yang, S., Ephremides, A.**, (1997). Optimal network design: The base station placement problem, *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*, 3, 2381–2386.
- [97] **Balanis, C. A.**, *Antenna Theory: Analysis & Design*, JohnWiley & Sons, (1997).
- [98] **Bor-Yaliniz, R. I., El-Keyi, A., Yanikomeroglu, H.**, (2016) Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 22-27.
- [99] **Kalantari, E., Shakir, M. Z., Yanikomeroglu, H., Yongacoglu, A.**, (2017) Backhaul-aware robust 3D drone placement in 5G+ wireless networks, *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Paris, France, May 21-25.
- [100] **Alzenad, M., El-Keyi, A., Yanikomeroglu, H.**, (2018). 3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station for maximum coverage of users with different QoS requirements, *IEEE Wireless Communications Letters*, 7, 1, 38-41.
- [101] **Ghazzai, H., Yaacoub, E., Alouini, M., Dawy, Z., Abu-Dayya, A.**, (2016). Optimized LTE cell planning with varying spatial and temporal user densities, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65, 3, 1575-1589.
- [102] **Lyu, J., Zeng, Y., Zhang, R., Lim, T. J.**, (2016). Placement optimization of UAV mounted mobile base stations, *IEEE Communications Letters*, 21, 3, 604-607.
- [103] **Lloyd, S.**, (1982). Least squares quantization in PCM, *IEEE Transactions on Information Theory*, 28, 2, 129-137.
- [104] **Kanungo, T., Mount, D. M., Netanyahu, N. S., Piatko, C. D., Silverman, R., Wu, A. Y.**, (2002). An efficient k-means clustering algorithm: Analysis

and implementation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24, 7, 881-892.

- [105] **Jain, R., Chiu, D., Hawe, W. A.**, (1984). Quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems. Technical Report 301.
- [106] **Shi, H., Prasad, R. V., Onur, E., Niemegeers, I. G. M.**, (2014). Fairness in wireless networks issues, measures and challenges, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 16, 1, 5-24.
- [107] **Andrews, J. G.**, (2013). Seven ways that hetnets are a cellular paradigm shift. *IEEE Communications Magazine*, 51, 3, 136-144.
- [108] **Ghosh, A., Mangalvedhe, N., Ratasuk, R., Mondal, B., Cudak, M., Visotsky, E., Thomas, T. A., Andrews, J. G., Xia, P., Jo, H. S., Dhillon, H. S., Novlan, T. D.**, (2012). Heterogeneous cellular networks: From theory to practice, *IEEE Communications Magazine*, 50, 6, 54-64.
- [109] **Wang, L., Kuo, G. G. S.**, (2013). Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks: A tutorial, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15, 1, 271-292.
- [110] **Andrews, J. G., Singh, S., Ye, Q., Lin, X., Dhillon, H. S.**, (2014). An overview of load balancing in hetnets: Old myths and open problems, *IEEE Wireless Communications*, 21, 2, 18-25.
- [111] **Ye, Q., Rong, B., Chen, Y., Al-Shalash, M., Caramanis, C., Andrews, J. G.**, (2013). User association for load balancing in heterogeneous cellular networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12, 6, 2706-2716.
- [112] **Stevens-Navarro, E., Lin, Y., Wong, V. W. S.**, (2008). An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57, 2, 1243-1254.
- [113] **Elayoubi, S. E., Altman, E., Haddad, M., Altman, Z. A.**, (2010). Hhybrid decision approach for the association problem in heterogeneous networks, *Proceedings IEEE INFOCOM*, 1-5.
- [114] **Aryafar, E., Keshavarz-Haddad, A., Wang, M., Chiang, M.**, (2013). RAT selection games in hetnets, *Proceedings IEEE INFOCOM*, 998-1006.
- [115] **Niyato, D., Hossain, E.**, (2009). Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: An evolutionary game approach, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58, 4, 2008–2017.
- [116] **Dhillon, H. S., Ganti, R. K., Baccelli, F., Andrews, J. G.**, (2012). Modeling and analysis of k-tier downlink heterogeneous cellular networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30, 3, 550-560.

- [117] **Singh, S., Dhillon, H. S., and Andrews, J. G.,** (2013). Offloading in heterogeneous networks: Modeling, analysis, and design insights, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12, 5, 2484-2497.
- [118] **Corroy, S., Falconetti, L., Mathar, R.,** (2012). Dynamic cell association for downlink sum rate maximization in multi-cell heterogeneous networks, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, ON, Canada, June 10-15.
- [119] **Kim, H., Veciana, G., Yang, X., Venkatachalam, M.,** (2012). Distributed a-optimal user association and cell load balancing in wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 20, 1, 177-190.
- [120] **Shen, K. and Yu, W.,** (2014). Distributed pricing-based user association for downlink heterogeneous cellular networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32, 6, 1100-1113.
- [121] **Url-18** <<https://www.prb.org/2008wpds/>>, Alındığı tarih: 27.07.2019.
- [122] **Pendleton, G., Bodnar, J.,** (2017). Joint urban operations and the NATO urbanization project, *Three Swords Magazine*, 31, 56-61.
- [123] **Asymmetric Warfare Group,** (2016) Modern urban operations lessons learned from urban operations from 1980 to the present, Technical report.
- [124] **Medby, J., Russell, W. G.,** (2002) Street smart: Intelligence preparation of the battlefield for urban operations, Technical report.
- [125] **Truffer, P., Scaramuzza, M., Troller, M., Bertschi, M.,** (2017) Jamming of aviation GPS receivers: Investigation of field trials performed with civil and military aircraft, *Proceedings International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 1258-1266.
- [126] **Url-19** <[http://www.naissue\\_25/sosus.htm](http://www.naissue_25/sosus.htm)>, Alındığı tarih: 29.07.2019.
- [127] **Gao, G., Sgammini, M., Lu, M., Kubo, N.,** (2016). Protecting GNSS receivers from jamming and interference, *Proceedings of the IEEE*, 104, 6, 1327-1338.
- [128] **Erdem, F., Dabak, O. C., Sonmez, T., Alatan, L., Koc, S. S.,** (2016) Interference suppression in GPS receivers using spatial filtering, *Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*, Zonguldak, Turkey, May 16-19.
- [128] **Erdem, F., Dabak, O. C., Sonmez, T., Alatan, L., Koc, S. S.,** (2016) Interference suppression in GPS receivers using spatial filtering, *Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*, Zonguldak, Turkey, May 16-19.
- [129] **Yang, C., Shao, H.,** (2015). Wifi-based indoor positioning. *IEEE Communications Magazine*, 53, 3, 150-157.



- [130] **Wang, Y., Ma, X., Leus, G.,** (2011). Robust time-based localization for asynchronous networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 59, 9, 4397-4410.
- [131] **Tomic, S., Beko, M., Dinis, R.,** (2015). RSS-based localization in wireless sensor networks using convex relaxation: Noncooperative and cooperative schemes, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64, 5, 2037-2050.
- [132] **Ouyang, R.W., Wong, A. K., Lea, C.,** (2010). Received signal strength-based wireless localization via semidefinite programming: Noncooperative and cooperative schemes, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59, 3, 1307-1318.
- [133] **Wang, G., Yang, K. A,** (2011). New approach to sensor node localization using RSS measurements in wireless sensor networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10, 5, 1389-1395.
- [134] **Wang, G., Chen, H., Li, Y., Jin, M.,** (2012). On received-signal-strength based localization with unknown transmit power and path loss exponent, *IEEE Wireless Communications Letters*, 1, 5, 536-539.
- [135] **Patwari, N., Ash, J. N., Kyperountas, S., Hero, A. O., Moses, R. L., Correal, N. S.,** (2005). Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks, *IEEE Signal Processing Magazine*, 22, 4, 54-69.
- [136] **Korner, F., Speck, R., Goktogan, A. H., Sukkarieh, S.,** (2010) Autonomous airborne wildlife tracking using radio signal strength, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, Oct 18-22.
- [138] **FM100-7,** (1995) Decisive force: The army in theater operations, Technical report, Department of the Army, USA.
- [139] **Edwards, S. J. A.,** (2000) Mars unmasked: The changing face of urban operations, Technical report.
- [140] **Isby, D. C.,** *Weapons and Tactics of the Soviet Army*, Jane's Information Group, (1985).
- [141] **Baker, S. D., Verweij, J., Rowinsky, E. K., Donehower, R. C., Schellens, J. H.,** (2002). Role of body surface area in dosing of investigational anticancer agents in adults, *Natl. Cancer Inst.*, 94, 24, 1883–1888.
- [142] **Url-20** <<https://www.dji.com/mg-1/info>>, Alındığı tarih: 21.07.2019.
- [143] **Url-21** <<https://www.dji.com/matric00-pro/info>>, Alındığı tarih: 21.07.2019.
- [144] **Vautravers, A.,** (2014). Military operations in urban areas, *International Review of the Red Cross*, 92, 437-452.

- [145] **Blakely, K., Lowekamp, B. A.**, (2004) Structured group mobility model for the simulation of mobile ad hoc networks, *Proceedings of the Second International Workshop on Mobility Management and Wireless Access Protocols*, Philadelphia, PA, USA, Oct. 8-11.
- [146] **Zheng, H., Shi, J., Cao, L.**, (2006) Group-mobility-aware spectrum management for future digital battlefields, *IEEE Military Communications Conference*, Washington, DC, USA, Oct. 23-25.
- [147] **Yu, J., Zhang, R., Gao, Y., Yang, L.**, (2018). Modularity-based dynamic clustering for energy efficient UAVs-aided communications, *IEEE Wireless Communications Letters*, 7, 5, 728-731.
- [148] **Pham, H.**, *Handbook of Reliability Engineering*, Springer, (2003).
- [149] **Pushparatnam, L., Taylor, T.**, (2009) GSM-R implementation and procurement guide. Technical report.
- [150] **Url-22** <<https://www.uvsr.org/Documentatie%20UVS/Publicatiinternationale/ReliabilityStudy-2003.pdf>>, Alındığı tarih: 22.07.2019.
- [151] **Fotouhi, A., Ding, M., Hassan, M.**, (2017) Dynamic base station repositioning to improve spectral efficiency of drone small cells, *IEEE International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Macau, China, June 12-15.
- [152] **Zeng, Y., Zhang, R.**, (2017). Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16, 6, 3747-3760.
- [153] **Zeng, Y., Xu, X., Zhang, R.**, (2018). Trajectory design for completion time minimization in UAV-enabled multicasting, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17, 4, 2233-2246.
- [154] **Wu, Q., Zeng, Y., Zhang, R.**, (2018). Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17, 3, 2109-2121.
- [155] **Url-23** <<https://www.tc.gc.ca/en/services/aviation/drone-safety/flyingdrone-safely-legally.html>>, Alındığı tarih: 21.07.2019.
- [156] **Yoon, Y., Kim, Y.**, (2013). An efficient genetic algorithm for maximum coverage deployment in wireless sensor networks, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 43, 5, 1473-1483.
- [157] **Wang, M., Feng, C., Zhang, T.**, (2011) A simulated annealing algorithm for the transmission mode selection of multicast services in LTE networks, *International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Brest, France, Oct 3-7.

- [158] **Chun-Wei, T., Pei-Wei, T., Jeng-Shyang, P., Han-Chieh, C.,** (2015). Metaheuristics for the deployment problem of WSN: A review, *Microprocessors and Microsystems*, 39, 8, 1305-1317.
- [159] **Ribeiro, C. C., Martins, S. L., I., R.,** (2007). Metaheuristics for optimization problems in computer communications, *Computer Networks*, 30, 4, 656-669.
- [160] **Resende, M. G. C., Pardalos, P.,** *Handbook of Optimization in Telecommunications*, Springer-Verlag US, (2006).
- [161] **Kalantari, E., Bor-Yaliniz, I., Yongacoglu, A., Yanikomeroğlu, H.,** (2017) User association and bandwidth allocation for terrestrial and aerial base stations with backhaul considerations, *IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, QC, Canada, Oct. 8-13.
- [162] **Shakhatreh, H., Khreishah, A., Alsarhan, A., Khalil, I., Sawalmeh, A., Othman, N. S.,** (2017) Efficient 3D placement of a UAV using particle swarm optimization, *International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*, Irbid, Jordan, Apr. 4-6.
- [163] **Xhafa, F., Sanchez, C., Barolli, A., and Takizawa, M.,** (2011) A tabu search algorithm for efficient node placement in wireless mesh networks, *Third International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems*, Fukuoka, Japan, Nov.30 - Dec. 2.
- [164] **Oda, T., Elmazi, D., Lala, A., Kolici, V., Barolli, L., Xhafa, F.,** (2015) Analysis of node placement in wireless mesh networks using friedman test: A comparison study for tabu search and hill climbing. *International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*, Blumenau, Brazil, July 8-10.
- [165] **Friedman, M.,** (1937). The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. *Journal of the American Statistical Association*, 32, 200, 675-701.
- [166] **Lee, C. Y., Kang, H. G.,** (2000). Cell planning with capacity expansion in mobile communications: a tabu search approach, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 49, 5, 1678-1691.
- [167] **Lin, C., Shu, L., Deng, D.** (2016). Router node placement with service priority in wireless mesh networks using simulated annealing with momentum terms. *IEEE Systems Journal*, 10, 4, 1402-1411.
- [168] **Puspitasari, N. F., Fatta, H. A., and Wibowo, F. W.,** (2015) Implementation of greedy and simulated annealing algorithms for wireless access point placement, *International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation*, Kota Kinabalu, Malaysia, Dec. 2-4.

- [169] **Sakamoto, S., Oda, T., Ikeda, M., Xhafa, F., Barolli, L., and Uchida, K.,** (2014) Performance analysis of WMN-SA: Node placement problem using simulated annealing algorithm for different replacement methods, *International Conference on Network-Based Information Systems*, Salerno, Italy, Sept. 10-12.
- [170] **Boukerche, A., Oliveira, H. A. B. F., Nakamura, E. F., Loureiro, A. A. F.,** (2007). Localization systems for wireless sensor networks, *IEEE Wireless Communications*, 14, 6, 6-12.
- [171] **Singh, S., Shivangna, Mittal, E.,** (2013) Range based wireless sensor node localization using PSO and BBO and its variants, *International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, Gwalior, India, Apr. 6-8.
- [172] **Kumar, A., Khosla, A., Saini, J. S., and Singh, S.,** (2012) Computational intelligence based algorithm for node localization in wireless sensor networks, *IEEE International Conference Intelligent Systems*, Sofia, Bulgaria, Sept. 6-8.
- [173] **Yadav, V. K., Yadav, S.,** (2018). Distributed energy efficient clustering algorithm to optimal cluster head by using biogeography based optimization, *Materials Today*, 5, 1, 1545-1551.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Alper Akarsu  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 20.04.1986 - Ankara  
**E-posta** : aakarsu@etu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, Bilkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2013, Southampton Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
- **Doktora** : 2020, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2009-2010	ASELSAN	Sistem Mühendisi
2011-2012	Vestel Savunma	Sistem Mühendisi
2013-2019	HAVELSAN	Kıdmlı Sistem Mühendisi

**YABANCI DİL:** İngilizce, Almanca

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Akarsu, A.**, Girici, T., 2018. Fairness Aware Multiple Drone Base Station Deployment, *IET Communications*, 12(4), 425-431.
- Kulac A. H., **Akarsu, A.**, Girici,T., 2018. Optimal deployment of UAV's for communication, 26th Signal Processing and Communications Applications, May 2-5, Izmir, Turkey.
- **Akarsu A.**, Girici T., 2018. Failure aware deployment of drone base stations, 26th Telecommunications Forum (TELFOR), Nov. 20-21, Belgrade, Serbia.
- **Akarsu A.**, Girici T., 2019. Resilient deployment of drone base stations, International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), June 18-20, Istanbul, Turkey.

- Karaman S. S., **Akarsu A.**, Girici T., 2019. Use of particle filtering in RSSI-based localization by drone base stations, International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), June 18-20, Istanbul, Turkey.
- **Akarsu A.**, T. Girici., 2019. Measurement based Threat Aware Drone Base Station Deployment, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, [kabul edildi].

