T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ORMAN YANGINLARININ İHA SÜRÜLERİYLE ERKEN TESPİTİ İÇİN KAPSAMA PLANLAMA ALGORİTMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Hazırlayan
Şaban AYVAZ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN

Yüksek Lisans Tezi

Şubat 2026
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ORMAN YANGINLARININ İHA SÜRÜLERİYLE ERKEN TESPİTİ İÇİN KAPSAMA PLANLAMA ALGORİTMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Şaban AYVAZ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN

Şubat 2026
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Şaban AYVAZ

İmza

“Orman Yangınlarının İHA Sürüleriyle Erken Tespiti İçin Kapsama Planlama Algoritmalarının Değerlendirilmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Şaban AYVAZ	Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN

Mekatronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN danışmanlığında **Şaban AYVAZ** tarafından hazırlanan **"Orman Yangınlarının İHA Sürüleriyle Erken Tespiti İçin Kapsama Planlama Algoritmalarının Değerlendirilmesi"** adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Mekatronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

06/ 02/2026

JÜRİ:

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN .....

Üye : Doç. Dr. Samet GÜLER .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Memduh SUVEREN .....

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun …… tarih ve …… sayılı kararı ile onaylanmıştır.

……. /……../ ……

Prof. Dr. Munise Didem DEMİRBAŞ

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında, yalnızca akademik bir emeğin değil; sabrın, anlayışın ve sevginin de büyük payı vardır. Sürecin her aşamasında bilgi ve deneyimiyle beni yönlendiren, yolumu açan, gerektiğinde cesaretlendiren ve emeğimi daha nitelikli hale getiren değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecimin en zor anlarında dahi yanımda duran, yükümü hafifleten ve bana güç veren en büyük destekçim sevgili eşim Ayşegül AYVAZ'a minnettarım. Zaman zaman yorulduğumda beni yeniden toparlayan, anlayışıyla bana alan açan ve her koşulda "yanındayım" diyen varlığı bu çalışmanın görünmeyen ama en güçlü dayanağı olmuştur.

Bu süreçte en çok payına düşeni sabırla taşıyan sevgili oğlum Çağan AYVAZ'a ise bambaşka bir teşekkür borçluyum. Ben sayfalar arasında kaybolurken, onun bir gülüşüyle yeniden hayata döndüğüm çok oldu. Bazen ona ayırmam gereken zamanı tezime ayırdığım anlarda, çocuk kalbiyle sessizce anlayış göstermesi ve sevgisini eksiltmemesi, benim için tarifsiz bir güç kaynağıydı. İyi ki varsın oğlum.

Hayatım boyunca beni koşulsuz sevgiyle saran, varlığıyla huzur veren, dualarıyla beni ayakta tutan değerli annem Gülten AYVAZ'a; her zaman arkamda dağ gibi duran, emeğiyle, dirayetiyle ve güven veren duruşuyla bana yol gösteren değerli babam Ali AYVAZ'a en derin şükranlarımı sunarım. Bugün geldiğim her noktada onların emeği, alın teri, fedakârlığı ve inancı vardır. İyi ki sizin evladınızım.

Ayrıca, her zaman yanımda olduklarını hissettiren, desteği ve güveniyle beni yalnız bırakmayan kıymetli ablam Nur Emel KÜÇÜKSARI'ya ve kıymetli manevi abim Yahya KÜÇÜKSARI'ya da içten teşekkür ederim.

Şaban AYVAZ

Şubat 2026, KAYSERİ

ORMAN YANGINLARININ İHA SÜRÜLERİYLE ERKEN TESPİTİ İÇİN KAPSAMA PLANLAMA ALGORİTMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Şaban AYVAZ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2026
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Erdem ARSLAN

ÖZET

Bu çalışma, erken orman yangını tespiti görevini görev planlama hiyerarşisi içinde Kapsama Planlama (CPP) ve Çoklu İHA Kapsama Planlama (mCPP) çerçevesinde ele almaktadır. Erken tespitte operasyonel başarı; yanabilir alanların sistematik taranması ve yeniden ziyaret süresinin düşürülmesi hedeflerinin zaman/mesafe/manevra kısıtları altında sürdürülebilmesine bağlıdır. Bu çalışma, geniş alanların sürekli gözetlenmesine elverişli sabit kanatlı İHA'lar için farklı mCPP bölütleme ve CPP rota üretimi yöntemlerini karşılaştırmaktadır.

Çalışma kapsamında MATLAB tabanlı bir simülasyon ve değerlendirme altyapısı geliştirilmiştir. Deneyler, kontrollü sentetik senaryolar (orman parçalılığı, nehir/su bariyeri, yerleşim/engel yoğunluğu) ve ESA WorldCover 2021 tabanlı gerçek arazi örtüsü haritaları üzerinde yürütülmüştür. Gerçek haritalar için maskeleme/filtreleme ön-işleme uygulanmış; ayrıca İHA sayısı değişiminin etkisi incelenmiştir.

Her senaryoda 7 mCPP ve 5 CPP yaklaşımı birlikte değerlendirilerek harita başına 35 algoritma çifti, altı metrikle nicelleştirilmiştir: toplam yol uzunluğu, görev süresi, dönüş sayısı, tekrar tarama oranı, kapsama oranı, iş yükü dengesidir. Bulgular, tek bir yöntemin tüm senaryolarda sürekli üstün olmadığını; performansın harita topolojisine, çevresel kısıtlara, filtreleme düzeyine ve filo büyüklüğüne duyarlı biçimde değiştiğini göstermektedir. Bu nedenle yöntem seçimi, "tek bir en iyi" yerine özellikle görev süresi–tekrar tarama–dönüş maliyetleri ile iş yükü dengesi birlikte gözetilerek yapılmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Orman Yangını Tespiti, Yörünge Planlama, İHA Sürüsü, Sabit Kanatlı İHA, CPP, mCPP.

EVALUATION OF COVERAGE PLANNING ALGORITHMS FOR EARLY DETECTION OF FOREST FIRES USING UAV SWARMS

Şaban AYVAZ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, February 2026
Supervisor: Assis Prof. Erdem ARSLAN

ABSTRACT

This study addresses early forest fire detection by formulating the mission as Coverage Path Planning (CPP) and multi-UAV Coverage Path Planning (mCPP). Effective early detection requires systematic scanning of burnable areas while reducing revisit time under time, distance, and maneuvering constraints. Accordingly, the study compares different mCPP partitioning and CPP intra-region route generation methods for fixed-wing UAVs suited to persistent wide-area surveillance.

A MATLAB-based simulation and evaluation framework is developed. Experiments are conducted on (i) controlled synthetic scenarios (forest fragmentation, river/water barriers, and settlement/obstacle density) and (ii) real land-cover maps derived from ESA WorldCover 2021. Real maps are adapted via masking/filtering preprocessing, and the impact of varying the number of UAVs is also examined.

Across scenarios, 7 mCPP and 5 CPP approaches are jointly evaluated (35 algorithm pairs per map) using six metrics: total path length, mission completion time, number of turns, re-coverage ratio, coverage ratio, and workload balance. Results indicate no single method consistently dominates; performance depends on map topology, environmental constraints, filtering level, and fleet size. Therefore, method selection should rely on a multi-metric view—particularly mission time, overlap, turning cost, and workload balance—rather than a single "best" solution.

Keywords: Early Forest Fire Detection, UAV Swarms, Path Planning, Fixed-wing UAV, CPP, mCPP.

İÇİNDEKİLER

ORMAN YANGINLARININ İHA SÜRÜLERİYLE ERKEN TESPİTİ İÇİN KAPSAMA PLANLAMA ALGORİTMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii

YÖNERGEYE UYGUNLUK iii

TEŞEKKÜR v

ÖZET vi

ABSTRACT vii

İÇİNDEKİLER viii

KISALTMALAR xi

TABLOLAR LİSTESİ xii

ŞEKİLLER LİSTESİ xiii

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Orman Yangınları: Tanım, Sınıflandırma ve Yangın Davranışı 5

1.2. İklim Değişikliği ve Değişen Yangın Rejimleri 8

1.3. Orman Yangınlarının Ekolojik ve Sosyoekonomik Etkileri 12

1.4. Orman Yangınlarında Operasyonel Yönetim ve Kaynak Planlaması 15

1.5. Erken Tespit ve Müdahale Gecikmesinin Yangın Boyutu Üzerindeki Etkisi 18

1.6. Yangın Tespit Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi 20

1.7. Yangın Tespitinde İHA Sürülerinin Kullanımı 23

1.8. İHA Sürüsü ile Sürekli Gözetleme Konsepti 25

1.9. Görev Planlama Hiyerarşisi ve Kapsama Planlama Yaklaşımları 28

1.10. Sürü İHA'larda Kapsam Planlaması İçin Kullanılacak Haritalar 31

1.11. Afet Yönetimi Sistemleri ve Yangın Planlama Dinamikleri 33

1.12. Literatürün Değerlendirilmesi ve Araştırma Boşluğu 34

2. BÖLÜM

GÖREV PLANLAMA VE HARİTA ÜRETİMİ

2.1. Otonom Görev Planlama Hiyerarşisi ve Çalışmanın Kapsam Sınırı 37

2.2. Erken Tespit Görevinin Kapsama Problemine İndirgenmesi 39

2.3. Harita Üretimi ve Senaryo Seti 41

3. BÖLÜM

KAPSAM PLANLAMA ALGORİTMALARI VE PERFORMANS METRİKLERİ

3.1. Kullanılan mCPP ve CPP Algoritmaları: Bölütleme ve Kapsama Yolu Üretimi.....46

3.1.1. mCPP Algoritmaları: Bölütleme/Atama (partitioning).....47

3.1.1.1. Voronoi Algoritması 48

3.1.1.2. Ağırlıklı (Power)Voronoi Algoritması.....49

3.1.1.3. Trapezoidal/Boustrophedon Algoritması.....51

3.1.1.4. BSP / ORB Tabanlı Bölütleme Algoritması 53

3.1.1.5. Graph Tabanlı Bölütleme Algoritması.....55

3.1.1.6. Watershed Tabanlı Bölütleme Algoritması.....56

3.1.1.7. DARP Algoritması.....58

3.1.2. CPP Algoritmaları: Bölge İçi Kapsama Yolu Üretimi 60

3.1.2.1. Lawnmower Algoritması 62

3.1.2.2. Spanning Tree Coverage (STC) Algoritması.....64

3.1.2.3. Spiral Spanning Tree Coverage (Spiral–STC) Algoritması.....67

3.1.2.4. Dubins Lawnmower Algoritması 69
3.1.2.5. Euler–Postman (Çinli Postacı) Tabanlı CPP Algoritması 72
3.2. Performans Metrikleri 74
3.2.1.Toplam yol uzunluğu (Total Path Length 76
3.2.2.Toplam Görev Süresi (Makespan) 77
3.2.3. Dönüş sayısı (Number of Turns) 78
3.2.4. Tekrar tarama oranı (Overlap) 79
3.2.5. Kapsama oranı (Coverage ratio) 80
3.2.6. İş yükü dengesi (Uniformity) 82

4. BÖLÜM

SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER

4.1. MATLAB Simülasyon Altyapısı ve Harita Ön-İşleme Bileşenleri 86
4.1.1. MATLAB Tabanlı Kapsama Planlama Simülatörü 86
4.1.2. Kapsama Yolu Görselleştirme ve Animasyon Arayüzü 88
4.1.3. ESA WorldCover Heterojen Haritalarda Kapsama Odağı 89
4.2. Simülasyon Sonuçları 90
4.2.1. Orman Parçalılığı Senaryosu 91
4.2.2. Nehir/Su Yoğunluğu Senaryosu 95
4.2.3. Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu Senaryosu 101
4.2.4. Harita Filtreleme Seviyesi 106
4.2.5. İHA Sayısı Senaryosu 110
4.3. Tartışma ve Öneriler 115
KAYNAKÇA 119
ÖZGEÇMİŞ 129

KISALTMALAR

CLC	: CORINE Land Cover
CPP	: Coverage Path Planning
DARP	: Divide Areas Algorithm for Rectilinear Polygons
EFFIS	: European Forest Fire Information System
ICS	: Incident Command System
İHA	: İnsansız Hava Aracı
mCPP	: Multi-Agent Coverage Path Planning
NASA FIRMS	: Fire Information for Resource Management System
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NIMS	: National Incident Management System
OBIA	: Object-Based Image Analysis
ROI	: Region of interest
SAR	: Synthetic Aperture Radar

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Akdeniz ülkelerinde yıllık ortalama yangın sayısı ve yanan alanlar 10
Tablo 2. Mevcut yangın tespit yöntemlerinin nitel maliyet–fayda karşılaştırması 22
Tablo 3. Bu çalışmada kullanılan CPP/mCPP algoritmaları 31
Tablo 4. Bu çalışma ne yapıyor / ne yapmıyor? (Katman bazlı kapsam sınırı) 39
Tablo 5. WorldCover 2021 özgün sınıflar ve çalışmada kullanılan yangın grupları . 44
Tablo 6. mCPP (Bölütleme/Atama) için ortak semboller ve tanımlar 47
Tablo 7. CPP (Bölge İçi Kapsama Yolu Üretimi) için ortak semboller ve tanımlar .. 61
Tablo 8. Performans metriklerinde kullanılan ortak semboller ve tanımlar 75
Tablo 9. Performans metriklerinin birimleri 75
Tablo 10. Matlab yangın simülatöründeki sabit parametreler 88
Tablo 11. Orman parçalılığı senaryosu için en yüksek performans gösteren algoritmalar 93
Tablo 12. Orman parçalılığı senaryosu için en düşük performans gösteren algoritmalar 93
Tablo 13. Nehir/su yoğunluğu senaryosu için en yüksek performans gösteren algoritmalar 97
Tablo 14. Nehir/su yoğunluğu senaryosu için en düşük performans gösteren algoritmalar 97
Tablo 15. Yerleşim yeri/engel yoğunluğu senaryosu için yüksek performans gösterenler algoritmalar 102
Tablo 16. Yerleşim yeri/engel yoğunluğu senaryosu için en düşük performans gösteren algoritmalar 103
Tablo 17. Harita filtreleme senaryosu için en yüksek performans gösteren mCPP+CPP çifti 107
Tablo 18. Harita filtreleme senaryosu için en düşük performans gösteren mCPP+CPP çifti 107
Tablo 19. Farklı İHA sayısı senaryosu için en yüksek performans gösteren mCPP+CPP çifti 111
Tablo 20. Farklı İHA sayısı senaryosu için en düşük performans gösteren mCPP+CPP çifti 112

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Orman yangınlarının sınıflandırılması 7
Şekil 2. 1937–2024 yılları arasındaki orman yangını sayısı ve yanan alanı miktarı. 10
Şekil 3. Yanan alan ile toplam toplumsal/maliyet arasındaki ilişki 14
Şekil 4. Yangın yönetim sistemi blok diyagramı 16
Şekil 5. Müdahale gecikmesi ile toplam yanan alan büyüklüğü arasındaki ilişki..... 19
Şekil 6. Orman yangını görevlerinde tek İHA ve sürü İHA karşılaştırması 24
Şekil 7. İstasyon destekli sürekli gözetleme için planlama ve yürütme mimarisi..... 26
Şekil 8. CPP/mCPP'nin hareket planlama hiyerarşisindeki konumu..... 29
Şekil 9. Sentetik ve ESA WorldCover tabanlı haritaların 30 m grid temsili..... 33
Şekil 10. Afet tipi-hava platformu türü arasındaki tipik eşleşmeler..... 34
Şekil 11. Görev Planlama Hiyerarşisi ve CPP/mCPP' nin Konumu 37
Şekil 12. Klasik Gözetleme ile CPP/mCPP Temelli Sürekli Kapsama Arasındaki Tespit Gecikmesi..... 40
Şekil 13. MATLAB ortamında oluşturulan sentetik senaryo haritaları 42
Şekil 14. Web arayüz ekran görüntüsü (ROI seçimi + WorldCover sınıfları + yangın grupları)..... 42
Şekil 15. Harita üretimi akış hattı..... 43
Şekil 16. Sentetik senaryolarda Voronoi bölütleme..... 49
Şekil 17. Sentetik senaryolarda Ağırlıklı Voronoi bölütleme 51
Şekil 18. Sentetik senaryolarda Trapezoidal/Boustrophedon bölütleme..... 53
Şekil 19. Sentetik senaryolarda BSP / ORB Tabanlı bölütleme..... 55
Şekil 20. Sentetik senaryolarda Graph Tabanlı bölütleme 56
Şekil 21. Sentetik senaryolarda Watershed bölütleme 58
Şekil 22. Sentetik senaryolarda DARP bölütleme..... 61
Şekil 23. Sentetik senaryolarda Lawnmower algoritması kapsama yolu 64
Şekil 24. Sentetik senaryolarda STC algoritması kapsama yolu..... 66
Şekil 25. Sentetik senaryolarda Spiral-STC algoritması kapsama yolu 69
Şekil 26. Sentetik senaryolarda Dubins-Lawnmower algoritması kapsama yolu 71
Şekil 27. Sentetik senaryolarda Euler-Postman algoritması kapsama yolu 74
Şekil 28. Toplam yol uzunluğu (Total Path Length) – Görselleştirilmesi 76

Şekil 29. Toplam görev süresi (Makespan) – Görselleştirilmesi 78
Şekil 30. Dönüş sayısı (number of turns) – Görselleştirilmesi..... 79
Şekil 31. Tekrar tarama oranı (Overlap) - Görselleştirilmesi..... 80
Şekil 32. Kapsama oranı (Coverage ratio) - Görselleştirilmesi..... 81
Şekil 33. İş yükü dengesi (Uniformity) - Görselleştirilmesi 83
Şekil 34. MATLAB tabanlı simülasyon arayüzü 87
Şekil 35. CSV tabanlı yörünge görselleştirme arayüzü..... 89
Şekil 36. ESA WorldCover Tabanlı Haritaların Filtreleme Arayüzü..... 90
Şekil 37. Orman parçalılığı senaryosu için kullanılan sentetik haritalar..... 91
Şekil 38. Orman parçalılığı senaryosundaki tekrar tarama oranına göre ısı haritası... 94
Şekil 39. Orman parçalılığı senaryosundaki görev tamamlama sürelerine göre ısı haritası 95
Şekil 40. Nehir/Su yoğunluğu senaryosu için kullanılan sentetik haritalar..... 96
Şekil 41. Nehir/Su yoğunluğu senaryosundaki tekrar tarama oranına göre ısı haritası 99
Şekil 42. Nehir/Su yoğunluğu senaryosundaki görev tamamlama süresi göre ısı haritası 100
Şekil 43. Yerleşim yeri/engel yoğunluğu senaryosu için kullanılan sentetik haritalar..... 101
Şekil 44. Yerleşim yeri/engel yoğunluğu senaryolarındaki tekrar tarama oranına göre ısı haritası 104
Şekil 45. Yerleşim yeri/engel yoğunluğu senaryolarındaki görev tamamlama süresi göre ısı haritası 105
Şekil 46. Harita filtreleme seviyesi için kullanılan ESA WorldCover haritaları 106
Şekil 47. Harita filtreleme seviyesi senaryolarındaki tekrar tarama oranına göre ısı haritası 109
Şekil 48. Harita filtreleme seviyesi senaryolarındaki görev tamamlama süresine göre ısı haritası 109
Şekil 49. Farklı İHA sayıları için ESA WorldCover haritasında bölütleme 111
Şekil 50. Farklı İHA sayısı senaryolarındaki tekrar tarama oranına göre ısı haritası 113
Şekil 51. Farklı İHA sayısı senaryolarındaki görev tamamlama süresine göre ısı haritası 114

GİRİŞ

Orman ekosistemleri, karbon döngüsünün dengelenmesi, biyolojik çeşitliliğin korunması, su rejiminin düzenlenmesi ve kırsal ekonominin sürdürülebilirliği açısından kritik bir role sahiptir. Ancak küresel iklim değişikliğine bağlı olarak yükselen sıcaklıklar, uzayan kurak dönemler ve aşırı hava olayları, dünya genelinde orman yangınlarının başlama ve yayılma riskini belirgin biçimde artırmaktadır [1]. Akdeniz iklim kuşağında yer alan ülkelerde yangına elverişli gün sayısının artması, yangın sezonlarının uzaması ve daha yüksek şiddetli yangınların görülmesi, orman yangınlarını çok boyutlu ve giderek ağırlaşan bir problem hâline getirmektedir. Türkiye de coğrafi konumu ve iklim özellikleri nedeniyle bu risklere duyarlıdır; özellikle güney ve batı kıyı şeridinde yaz aylarında görülen yüksek sıcaklık, düşük nem ve kuvvetli rüzgâr kombinasyonu, yoğun yakıt varlığıyla birleştiğinde hızla büyüyen yangınlara zemin hazırlamaktadır. 2021 yazında yaşanan büyük orman yangınları, binlerce hektarlık alanın zarar gördüğü ve ekonomik ile ekolojik kayıpların dramatik biçimde arttığı bir dönüm noktası olmuştur [2].

Yangın, yakıt–ısı–oksijen bileşenlerinin belirli koşullar altında başlattığı kimyasal bir reaksiyon olup, yangın mühendisliğinde bu üçlü yapı "yangın üçgeni" ile kavramsallaştırılmaktadır [3]. Orman yangınları; yer altı (ground), yüzey (surface) ve tepe (canopy) yangınları olarak sınıflandırılmakta, yüzey yangınlarının tepe yangınlarına dönüşmesi ise söndürme güçlüğü açısından kritik bir eşik oluşturmaktadır [4]. Kanopi yapısının sık ve süreklilik göstermesi, "merdiven yakıtları" aracılığıyla yüzeyden tepeye sıçramayı kolaylaştırmakta; buna karşılık seyrek kanopide tepe yangını ihtimali daha düşüktür [5]. Kanopi morfolojisindeki bu farklılıklar yalnızca yangının fiziksel gelişimini değil, aynı zamanda geleneksel tespit sistemlerinin performansını da etkilemekte; sık kanopili sahalarda kulelerden yapılan gözlemlerde kör alanlar oluşabilmektedir.

Orman yangınlarıyla mücadele, kara ve hava unsurlarının koordineli biçimde yürütüldüğü çok bileşenli bir operasyonel sisteme dayanır. Kara unsurları (orman işçileri, itfaiye

ekipleri, arazözler, dozerler) ve hava unsurları (sabit kanatlı uçaklar, helikopterler ve giderek artan ölçüde İHA sistemleri) yangının yayılımını baskılamak için farklı taktiklerle görevlendirilmektedir [4]. Yangın söndürme taktiklerinin uygun kara veya hava unsurlarıyla eşleştirilmesi, operasyonel planlamanın temel unsurudur. Bununla birlikte özellikle hava araçlarının işletme maliyetleri (yakıt, bakım, uçuş ekibi) oldukça yüksektir; büyük yangınlarda haftalar boyunca süren operasyonlar milyonlarca doları bulan maliyetlere yol açabilmektedir [6-8]. Yangın geç tespit edildiğinde müdahale süresi uzamakta, kullanılan araç sayısı artmakta ve buna bağlı olarak maliyetler katlanarak yükselmektedir. Bu nedenle, söndürme sürecindeki başarılı operasyonel planlamaya rağmen, yangının ne zaman tespit edildiği toplam müdahale etkinliğinde belirleyici bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Günümüzde kullanılan tespit yöntemleri; gözetleme kuleleri, kamera destekli görüntü işleme sistemleri, uydu görüntüleri, pilotlu hava araçları ve operatör kontrollü İHA'lardan oluşmaktadır. Gözetleme kuleleri uzun yıllardır tespit zincirinin temel bileşenlerinden biri olmasına rağmen, insan bağımlılığı, görüş kısıtları, operatör yorgunluğu ve 7/24 görev gereksinimi nedeniyle birçok sınırlamaya sahiptir. Video işleme algoritmaları bu kısıtları azaltmayı amaçlasa da geniş orman alanlarını homojen olarak kapsamak pratik ve ekonomik değildir [9, 10]. Uydu görüntüleri geniş alanları izleme avantajı sunmakla birlikte, tekrar ziyaret sürelerinin uzunluğu hızlı gelişen yangınlar için yeterli değildir. Pilotlu keşif uçakları ve helikopterler yüksek çözünürlüklü görüntü sağlayabilse de yakıt, bakım ve personel maliyetleri nedeniyle düzenli devriye görevlerini sürdürmek ekonomik açıdan uygulanabilir değildir. Operatör kontrollü İHA'lar da benzer şekilde insan kaynağına bağımlıdır. Dolayısıyla bu yöntemler belirli ölçüde etkili olsa da sürekli ve gerçek zamanlı bir tespit kapasitesine ulaşmak için yeterli değildir.

Erken tespit gereksinimi yalnızca orman yangınlarıyla sınırlı değildir. Türkiye'nin son büyük depremleri, afet sonrası durum tespitinin ne kadar hayati olduğunu göstermiştir. Yıkımın yoğunlaştığı bölgelerin belirlenmesi, yolların kullanılabilirliği ve arama-kurtarma ekiplerinin öncelikli konuşlandırılması gibi kritik kararlar için hızlı ve doğru mekânsal bilgi gereklidir [11]. Ancak afet sonrası geniş alanların pilotlu uçaklarla sürekli taranması maliyet, risk ve personel gereksinimleri nedeniyle mümkün değildir. Bu ihtiyaçlar, insan bağımlılığı düşük, kesintisiz çalışabilen otonom tespit sistemlerinin önemini artırmaktadır.

Bu çerçevede, otonom çalışan, gerektiğinde kendi kendine şarj olabilen ve sürü halinde organize olabilen İHA sistemleri hem orman yangınlarının erken tespiti hem de afet sonrası durum farkındalığı için uygulanabilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır Görünür ışık (Red-Green-Blue), termal ve multispektral gibi farklı spektral aralıklarda veri toplama kapasitesine sahip algılayıcı faydalı yükleri (sensor payloads) ile donatılan İHA'lar, bu donanımlardan elde edilen zengin gözlemsel veriyi uygun görev planlama stratejileriyle birleştirerek otonom devriye faaliyetlerini kesintisiz sürdürebilir. Ancak İHA tasarımı, batarya kapasitesi ve aerodinamik yapı gibi parametreler havada kalış süresini sınırlamakta; uzun süreli tek bir büyük platformun maliyeti çoğu zaman uygulanabilirlik sınırlarını aşmaktadır [12, 13]. Bu nedenle daha küçük ve düşük maliyetli birden fazla İHA'nın sürü halinde görev paylaşımı yapması hem maliyet hem de operasyonel esneklik açısından daha uygun bir çözüm sunmaktadır

Kapsama planlama, tek araç için Coverage Path Planning (CPP), çoklu araç için ise multi-agent Coverage Path Planning (mCPP) başlığı altında ele alınmaktadır [14]. CPP, tüm erişilebilir noktaların en az bir kez ziyaret edilmesini sağlayan bir yol planı üretmeyi; mCPP ise görev alanının birden fazla araca dengeli şekilde bölünmesini ve toplam görev süresinin minimize edilmesini amaçlar [14, 15]. Ancak ormanlık alanlar yangın riski açısından homojen değildir. Su yüzeyleri, tarım alanları veya yerleşim bölgeleri gibi düşük öncelikli alanların yoğun orman bölgeleriyle aynı sıklıkta taranması hem enerji hem de süre açısından verimsizlik yaratır. ESA WorldCover 10 m 2021 arazi örtüsü ürünü, arazi sınıflarını yüksek mekânsal çözünürlükle temsil ederek bu heterojenliğin kapsama planlamasına entegre edilmesine olanak sağlamaktadır [16].

Bu çalışmada; hem idealize edilmiş izole sentetik haritalar hem de ESA WorldCover verisinden elde edilen gerçek heterojen arazi modelleri üzerinde, farklı CPP ve mCPP algoritmalarının performans analizleri gerçekleştirilmiştir. 100×100 hücrelik bir ızgara yapısında yürütülen bu karşılaştırmalı analizler, sürü tipi İHA sistemleri için erken tespit görevlerinin etkinliğini artırmayı amaçlamaktadır. Erken yangın tespiti senaryolarında, riskin yüksek olduğu geniş ormanlık alanlara öncelikli müdahale edilmesi, görev tamamlama süresinin minimize edilmesi açısından kritiktir. Ancak heterojen haritalarda yerleşim yerleri arasında kalan park ve bahçe gibi küçük ölçekli yanabilir alanlar, geniş ormanlık alanların taranması sırasında algoritma karmaşıklığını artırarak toplam görev süresini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durum, stratejik önemi düşük alanların elenmesi

için bir harita maskeleme ihtiyacını doğurmuştur. Geliştirilen web tabanlı araç ile harita verisi ızgara formuna dönüştürülmekte; MATLAB tabanlı grafiksel arayüz ile kullanıcı farklı algoritmaları seçerek bölütleme ve kapsama planlamasını otomatik olarak gerçekleştirebilmektedir. Sistem, toplam görev süresi, tekrar tarama oranı, dönüş sayısı ve iş yükü dengesi gibi performans göstergelerini hesaplayıp sunmakta; üretilen rotalar ayrıca zaman tabanlı bir simülasyon arayüzünde görselleştirilebilmektedir. Bu yapı, farklı arazi senaryolarında ve farklı İHA sayılarında algoritmaların davranışlarını nicel olarak karşılaştırmaya imkân vermektedir.

Bu çalışmada önerilen yaklaşım, sürü İHA'ları yalnızca eşzamanlı uçan araçlar topluluğu olarak değil; otomatik iniş–kalkış ve şarj/batarya değişimi ile desteklenen bir istasyon altyapısı üzerinden görev devri döngüsü (rotation) ile sürekli gözetleme sağlayan operasyonel bir konsept olarak ele almaktadır. Bu konsept altında problem, kapsama planlama (CPP/mCPP) hiyerarşisi içinde tanımlanarak; bölütleme–atama ve bölge içi kapsama rotası üretimi bileşenleri birlikte değerlendirilmektedir. Bu bütünleşik çerçeve, istasyon altyapısı üzerinden otomatik iniş–kalkış ve şarj/batarya değişimi ile desteklenen görev devri döngüsü sayesinde filonun kesintisiz çalışmasını ve böylece sürekli gözetleme hedefini gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, erken tespitte geniş alanların periyodik kapsanması gereksinimi dikkate alındığında sabit kanatlı İHA'lar, alan kapsama verimliliği ve menzil/kalış süresi avantajları nedeniyle uygun bir platform sınıfı olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın temel araştırma sorusu şu şekilde ifade edilmektedir: "ESA WorldCover tabanlı heterojen bir harita üzerinde, farklı CPP ve mCPP algoritmaları görev süresi, tekrar tarama oranı, dönüş sayısı ve iş yükü dengesi açısından nasıl bir karşılaştırmalı performans sergilemektedir ve bu performans sürüdeki İHA sayısı ile nasıl ilişkilendirilebilir?"

İlerleyen bölümlerde orman yangınlarının fiziksel ve operasyonel bağlamı, tespit sistemleri, kapsama temelli görev planlama yöntemleri ve deneysel sonuçlar ayrıntılı olarak sunulacaktır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu bölüm, çalışmada ele alınan erken orman yangını tespiti probleminin kavramsal ve literatür temellerini oluşturmak üzere; öncelikle orman yangınının tanımı, sınıflandırılması ve yangın davranışını belirleyen temel yakıt katmanları çerçevesini sunmaktadır.

Ardından, iklim değişikliği ile ilişkilendirilen güncel eğilimler bağlamında dünya ve Türkiye ölçeğinde yangın rejimindeki değişimler; yangın sayısı–yanan alan dinamikleri ve uzun dönemli istatistiksel bulgular üzerinden tartışılmaktadır.

Bölümün devamında orman yangınlarının ekolojik ve ekonomik etkileri ile kaynak kullanımı boyutu özetlenmekte; yangın yönetiminde komuta-kontrol ve görev/unsur planlaması yaklaşımlarının literatürdeki yeri açıklanmaktadır.

Bunu takiben erken tespit kavramı, tespit ve ilk müdahale gecikmelerinin sonuçları ve başlıca tespit yöntemlerinin (kule/kamera, uydu, pilotlu hava araçları, İHA) maliyet–fayda eksenindeki karşılaştırması verilmektedir.

Son olarak sürü İHA yaklaşımının sürekli gözetleme açısından gerekçesi ortaya konulmakta; görev planlama (mission planning) hiyerarşisi içinde CPP/mCPP'nin konumu belirlenerek, çalışmada kullanılan CPP/mCPP algoritma aileleri ve değerlendirme mantığı genel hatlarıyla çerçevelenmektedir.

1.1. Orman Yangınları: Tanım, Sınıflandırma ve Yangın Davranışı

Orman yangını, orman ekosistemi içinde veya çevresinde yer alan ağaçlar, çalılar, otsu bitkiler ve orman altı örtüsü gibi yanıcı bitki örtüsünde, kontrol dışı olarak gelişen ve yayılımı ancak müdahale ile sınırlandırılabilen açık alan yangını olarak tanımlanmaktadır [17, 18]. Bu bağlamda orman yangınları; tutuşma kaynağı (doğal/insan kaynaklı), yanan

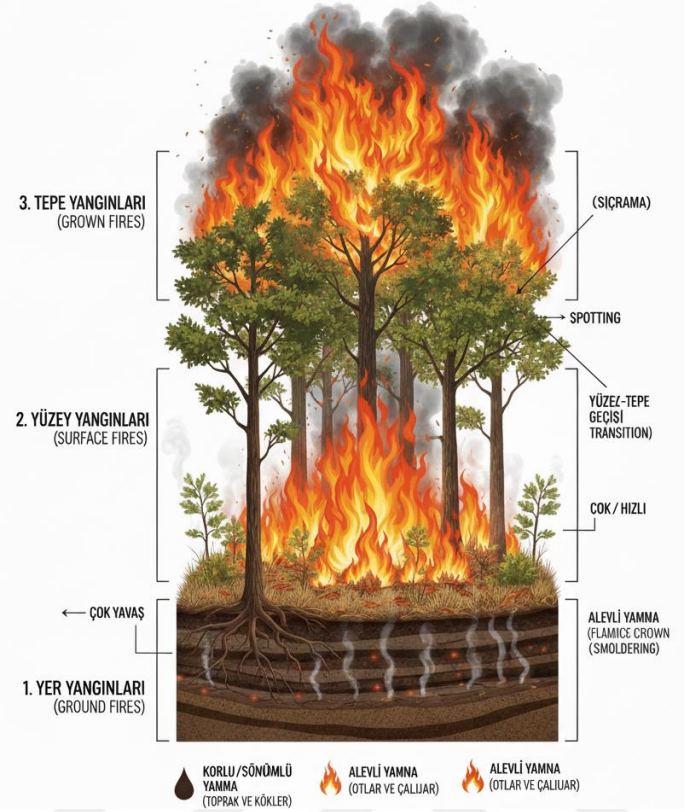
yakıt türü, yangının dikey konumu (yakıt tabakası) ve davranış özellikleri (yayılma hızı, alev boyu, şiddet) temelinde sınıflandırılabilmektedir [18, 19].

Yakıt tabakası esas alınarak yapılan en yaygın sınıflandırma; yer (ground) yangınları, yüzey (surface) yangınları ve tepe (crown) yangınları ayrımına dayanmaktadır [19- 21].

Yer yangınları, organik toprak ve humus tabakası, kısmen ayrışmış bitki artıklarının oluşturduğu duff tabakası ve ağaç kökleri gibi, yüzeyin hemen altında bulunan organik materyalin çoğunlukla düşük hızda, dumanı az, korlu/sönümlü yanma (smouldering) biçiminde yanması ile karakterize edilir [19, 20]. Bu tür yangınlar, çoğu zaman uzun süre tespit edilmeden yanmaya devam edebilmeleri ve söndürülmelerinin güç olması nedeniyle özellikle turbalık ve organik maddece zengin topraklarda önemli bir risk oluşturmaktadır [19].

Yüzey yangınları, orman altı örtüsünde yer alan kuru otlar, yaprak-litter tabakası, çalılar, genç fidanlar ve gövde alt kısımlarına yakın ince yakıtların, genellikle alevli yanma (flaming combustion) şeklinde tüketildiği yangınlardır [19, 21]. Yüzey yangınları çoğu ekosistemde en sık gözlenen yangın tipidir ve yangının yatay yayılımını büyük ölçüde bu tabakadaki yakıtlar belirler; rüzgâr hızı, eğim, yakıt nemi ve yakıt sürekliliği gibi etmenlere bağlı olarak yangın şiddeti düşükten çok yükseğe kadar değişebilmektedir [20, 21].

Tepe yangınları ise, ağaç taçlarındaki canlı ve ölü iğne-yaprak, ince dallar ve ağaç tepelerinin oluşturduğu taç yakıtlarının yanması ile tanımlanır; çoğu zaman alttaki şiddetli bir yüzey yangınından tepe tabakasına doğru geçiş (surface-to-crown transition) sonucu ortaya çıkar [20, 22]. Tepe yangınlarında alevler, ağaç tepeleri arasında daha bağımsız bir şekilde ilerleyebilir; yüksek alev boyları, hızlı yayılım, yoğun ısı açığa çıkışı ve sıçrama (spotting) özellikleri nedeniyle bu yangınların kontrol altına alınması oldukça güçtür [20, 22].



Şekil 1. Orman yangınlarının sınıflandırılması

Şekil 1'de orman yangınlarını dikey katmanlaşma temelinde sınıflandırarak her kademenin özgün davranış dinamiğini açıklamaktadır: Organik toprak tabakasında derinlemesine ve yavaş ilerleyen 'yer yangınları', zemin ve çalı örtüsünde hız kazanan 'yüzey yangınları' ve merdiven yakıtlar aracılığıyla kanopiye sıçrayan yüksek yoğunluklu 'tepe yangınları'. Şema, bu süreçteki yakıt etkileşimlerini, yayılım hızlarını ve yanma karakterindeki morfolojik değişimleri sistematik bir bütünlük içinde sunmaktadır.

Yangınların sınıflandırılmasında dikey yakıt tabakasının yanı sıra yanan alan büyüklüğü de yaygın biçimde kullanılmaktadır. Uygulamada alan büyüklüğüne göre "küçük–orta–büyük" sınıfları benimsenirken, son yıllarda "mega yangın (megafire)" ve "aşırı yangın olayları (extreme wildfire events)" kavramları literatürde daha görünür hâle gelmiştir [2, 22, 24, 25]. Ancak küçük/orta/büyük sınıfları için hektar cinsinden eşik değerler ülke ve kurumlara göre değişmekte; "mega yangın" için ise evrensel tek bir eşikten ziyade, olağan yangın rejimlerinin tipik üst sınırlarını belirgin biçimde aşan ve yangın davranışı/etkileri bakımından "aşırı" nitelik sergileyen olaylar üzerinde bir uzlaşı oluşmaktadır [2, 22- 25]. Bazı çalışmalarda 10.000 ha ve üzeri gibi nicel eşikler önerilse de bu değerlerin ekosistem

ve yönetim bağlamına bağlı olarak farklılaşabileceği vurgulanır [23, 24]. Bu nedenle yangın büyüklüğü; yanan alanın yanında yanma süresi, açığa çıkan ısı (yangın şiddeti ve yoğunluğu), aşırı davranış özellikleri ve müdahale zorluğu ile değerlendirilmelidir [22, 25]. Bu kavramsal çerçeve hem yangın yönetimi uygulamalarını yorumlamak hem de bu tezde ele alınan erken tespit ve görev planlama probleminin bağlamını netleştirmek için temel bir zemin sunmaktadır [2, 22- 25].

Yangınların büyük bir kısmı sahada çoğu zaman görünür dumanın fark edilmesiyle tespit edilmektedir; ancak multispektral/termal algılayıcılar (kamera tabanlı sistemler) kullanıldığında, duman oluşumu başlamadan önce veya dumanın zayıf olduğu erken evrelerde sıcaklık anomalileri üzerinden daha erken tespit olanağı doğmaktadır [26–28]. Bu bağlamda düzenli tarama (periyodik kapsama) yaklaşımı yalnızca "alanı bir kez görmek" değil, bölgenin zamansal olarak izlenmesini de mümkün kılar: ardışık taramalardan elde edilen verilerle ortalama sıcaklık eğilimindeki artışın gözlemlenebilmesi, potansiyel riskli alt bölgelerin belirlenmesine ve bu bölgelere daha yüksek yeniden-ziyaret önceliği atanmasına olanak sağlayarak erken tespit olasılığını artırabilir [29, 30].

Yangınların büyük bir kısmı sahada çoğu zaman görünür dumanın fark edilmesiyle tespit edilmektedir; ancak multispektral/termal algılayıcılar (kamera tabanlı sistemler) kullanıldığında, duman oluşumu başlamadan önce veya dumanın zayıf olduğu erken evrelerde sıcaklık anomalileri üzerinden daha erken tespit olanağı doğmaktadır. Bu bağlamda düzenli tarama (periyodik kapsama) yaklaşımı yalnızca "alanı bir kez görmek" değil, bölgenin zamansal olarak izlenmesini de mümkün kılar: ardışık taramalardan elde edilen verilerle ortalama sıcaklık eğilimindeki artışın gözlemlenebilmesi, potansiyel riskli alt bölgelerin belirlenmesine ve bu bölgelere daha yüksek yeniden-ziyaret önceliği atanmasına olanak sağlayarak erken tespit olasılığını artırabilir.

1.2. İklim Değişikliği ve Değişen Yangın Rejimleri

Orman yangını rejimi, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkisiyle son yirmi yılda hem dünya genelinde hem de Türkiye özelinde belirgin biçimde değişmektedir [31, 32]. İstatistiksel çalışmalar, yangın sayısı, yangın başına ortalama yanan alan ve yangın sezonunun süresi gibi temel parametrelerde, özellikle yangına hassas bölgelerde anlamlı artışlar olduğunu göstermektedir [32, 33]. Küresel ölçekte yapılan analizler, toplam yıllık

yanan alanın bazı savan ve otlak ekosistemlerinde azalma eğilimi göstermesine karşın, Kuzey Amerika, Avustralya ve Akdeniz kuşağı gibi ormancılık açısından kritik bölgelerde çok büyük ölçekli ve yüksek etkili yangın olaylarının daha sık ve şiddetli biçimde rapor edildiğini ortaya koymaktadır [33- 35]. Bu durum, mega/aşırı yangın olaylarının, yalnızca yanan alan büyüklüğü açısından değil; karbon salımı ve sosyoekonomik etkiler gibi ikincil göstergeler bakımından da belirgin sonuçlar doğurabildiğine işaret etmektedir [34, 35]. Literatür, orman yangınları ile iklim değişikliği arasındaki ilişkiyi büyük ölçüde yangına elverişli iklim koşullarının sıklaşması üzerinden açıklamaktadır [1].

Bu ilişki üç ana mekanizma çerçevesinde özetlenebilir:

i. Artan hava sıcaklıklarının yakıtın daha erken ve daha uzun süre kurumasına yol açması [36],

ii. Bağıl nemdeki azalma ile yakıt nem içeriğinin kritik eşiklerin altına düşmesi [37],

iii. Yağış rejimindeki düzensizlikler ve kurak dönemlerin uzamasıyla kuru yakıt birikimi ve sürekliliğinin artması [38].

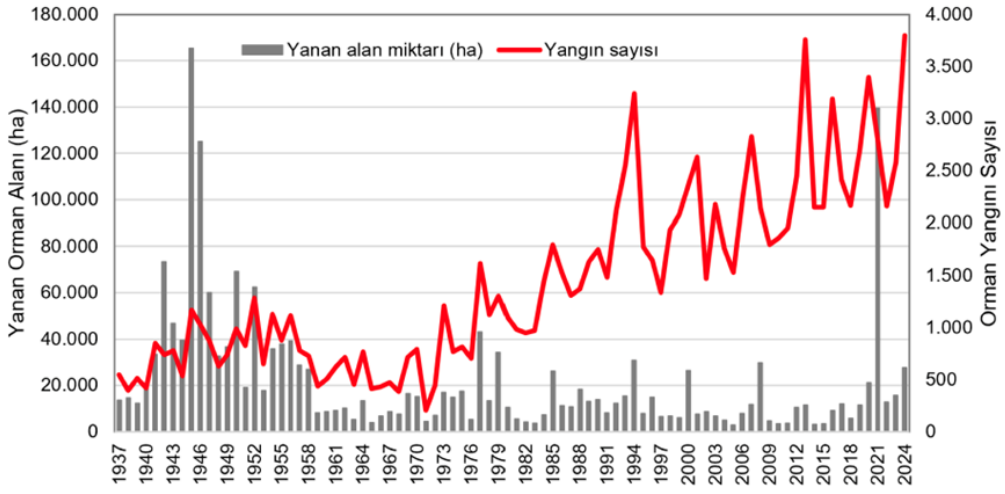
Avrupa'da orman yangınlarının sık görüldüğü ülkeler, iklim özellikleri nedeniyle Akdeniz'e kıyısı olan ülkelerdir [39]. Bu ülkelerden Portekiz, İspanya, Fransa, İtalya, Yunanistan ve Türkiye'deki orman yangınlarının 2011–2020 dönemi yıllık ortalamaları Tablo 1'de sunulmaktadır [39]. Tablo 1 incelendiğinde, Portekiz ve İspanya'nın yıllık ortalama yangın sayısı bakımından öne çıktığı; yanan orman alanı bakımından ise özellikle Portekiz'in yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir [39]. Buna karşılık Türkiye, yangın sayısı açısından orta düzeyde bir konumda yer almasına rağmen, yıllık ortalama yanan alan büyüklüğü bakımından incelenen ülkeler arasında en düşük değere sahiptir [39]. Bu durum, Akdeniz kuşağında yangın riskini değerlendirirken yalnızca "yangın sayısı"na değil, yangınların büyüklüğünü ve büyük olay yıllarının toplam zarar üzerindeki etkisini temsil eden "yanan alan" göstergesinin de birlikte ele alınmasının gerekliliğini göstermektedir [39].

Tablo 1. Akdeniz ülkelerinde yıllık ortalama yangın sayısı ve yanan alanlar

Ülke	Ortalama yıllık orman yangını sayısı (adet/yıl)	Ortalama yıllık yanan orman alanı (ha/yıl)
Portekiz	15.559	127.716
İspanya	11.462	95.629
Fransa	4.235	12.941
İtalya	5.418	60.373
Yunanistan	951	24.234
Türkiye	2.631	9.896

Bu karşılaştırma, Türkiye'nin Akdeniz ülkeleri içindeki göreli konumunu nicel olarak görünür kılarak, ulusal eğilimlerin bölgesel bağlamda yorumlanmasına olanak sağlamaktadır [39].

Türkiye'ye ilişkin uzun dönem istatistikler, yıllık toplam yangın sayısında dönemsel dalgalanmalar olmakla birlikte, özellikle son yıllarda yangın rejiminin yapısal olarak değiştiğine işaret eden bir görünüm sunmaktadır [40- 42]. Bu kapsamda Türkiye'de yangın sayısı ile yanan alan değişkenlerinin aynı hızda artmadığı; bazı yıllarda yangın sayısı görece sınırlı değişse dahi, tekil büyük yangınların toplam yanan alanı belirgin biçimde yükseltebildiği vurgulanmalıdır [41, 42]. Türkiye'de Akdeniz iklim özelliklerinin baskın olduğu güney ve batı bölgeleri hem yangın sayısı hem de toplam yanan alan bakımından öne çıkmakta ve ulusal istatistiklerin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır [42].



Şekil 2. 1937–2024 yılları arasındaki orman yangını sayısı ve yanan alanı miktarı [40]

Şekil-2 incelendiğinde, 1937–2024 döneminde yangın sayısı ile yanan alan değişkenlerinin farklı eğilimler sergilediği görülmektedir [40]. Yanan alan miktarı (ha) çoğu yılda görece düşük bir bantta seyrederken, 1945 ve 2021 gibi münferit yıllarda çok belirgin sıçramalar gözlenmektedir (yaklaşık 165.000 ha ve 140.000–150.000 ha) [40]. Buna karşılık, yangın sayısı 1970'li yıllardan itibaren belirgin bir artış eğilimine girmiş; 1990'lar sonrasında daha yüksek bir bantta devam etmiş ve 2024'e doğru 3.500'ün üzerindeki seviyelere ulaşmıştır [40]. Bu görünüm, yangın sayısındaki artışın daha süreklilik gösterdiğini; yanan alanın ise bazı yıllarda çok büyük olayların etkisiyle keskin dalgalanmalarla yükselebildiğini göstermektedir [40]. Dolayısıyla Türkiye'de yangın riskinin değerlendirilmesinde, yalnızca yangın sayısına değil; büyük yangın yıllarında toplam yanan alanı belirleyen dinamiklere ve müdahale kapasitesine de birlikte odaklanılması gerekmektedir [31- 33].

Türkiye, iklim değişikliğine duyarlılığı yüksek Akdeniz Havzası'nda yer almakta; bölgesel projeksiyonlar özellikle güney ve batıda sıcaklık artışı, yaz yağışlarında azalma ve kurak dönemlerin uzamasına işaret etmektedir [43, 44]. Türkiye ölçeğindeki çalışmalar da kuraklık ile yangın oluşumu ve/veya büyüklüğü arasında anlamlı ilişkiler bildirerek aşırı kurak yıllarda yangın sayısı ve/veya yanan alanın arttığını göstermektedir [45]. Bu nedenle mücadele stratejilerinin yalnızca söndürme kapasitesine odaklanmayıp erken uyarı, hızlı tespit ve risk temelli planlamayı içeren bütüncül bir çerçevede ele alınması gerekmektedir [1, 43, 45].

Artan küresel ısınma etkileriyle birlikte önümüzdeki yıllarda yangın sıklığında ve yangın sezonlarının şiddetinde belirgin bir artış beklenmektedir. Bu artışın yaşandığı bir bağlamda, klasik yöntemlerde yapılacak kapasite artırımlarının (daha fazla ekip/araç/devriye) geniş alanların 7/24 izlenmesi ihtiyacını sürdürülebilir biçimde karşılaması güçtür; zira maliyet, insan kaynağı ve operasyonel süreklilik bakımından yapısal sınırlamalar söz konusudur.

Bu nedenle yangının erken evrede tespit edilmesine ve sahadaki durumun düzenli aralıklarla kontrol edilmesine yönelik alternatif gözetleme yaklaşımlarına ihtiyaç vardır. Erken tespit, yangının büyümeden fark edilmesini sağlayarak müdahalenin daha küçük ölçekte yapılabilmesine imkân tanırken; riskin yükseldiği alt bölgelerin daha sık

izlenmesini sağlayacak periyodik izleme ve yeniden ziyaret stratejilerini gerekli kılmaktadır.

1.3. Orman Yangınlarının Ekolojik ve Sosyoekonomik Etkileri

Orman ekosistemleri; biyolojik çeşitliliğin korunması, karbonun uzun süreli depolanması, toprak ve su rejiminin düzenlenmesi, erozyon kontrolü ve mikro iklimin dengelenmesi gibi düzenleyici işlevlerin yanı sıra, doğada dinlenme ve açık alan kullanımına olanak tanıyan çok sayıda ekosistem hizmetini eşzamanlı sağlayan karmaşık doğal sistemlerdir. Bu nedenle orman yangınları, yalnızca yanıcı biyokütlenin yanması olarak değil; ekosistem hizmetlerinin geçici ya da kalıcı biçimde zayıflamasına yol açabilen çok boyutlu bir bozulma süreci olarak değerlendirilmelidir [46- 48]. Özellikle yüksek şiddetli yangınlar, yangına uyumsuz türlerin baskın olduğu ormanlarda tür kompozisyonunda değişim, habitat bütünlüğünde bozulma ve ekosistemin önceki durumuna geri dönme kapasitesinde zayıflama gibi sonuçlar doğurabilmektedir [47- 49].

Biyolojik çeşitlilik açısından geniş alanları etkileyen yangınlar; bitki ve hayvan türleri üzerinde doğrudan canlı kayıpları, üreme/yuvalama alanlarının kaybı ve yaşam ortamlarının parçalanması gibi etkiler yaratmaktadır [48, 49]. Yangın rejiminin (sıklık, şiddet, mevsimsellik) değişmesi; özellikle yavaş rejenerasyon gösteren veya dar yayılışlı türler için popülasyon daralması ve yerel yok oluş riskini artırabilmektedir. Her ne kadar bazı yangına uyum sağlamış ekosistemlerde düşük–orta şiddetteki yangınların "yamalı" bir habitat yapısı oluşturarak çeşitliliği destekleyebildiği bildirilse de iklim değişikliğiyle birlikte daha sık ve daha şiddetli yangınların meydana gelmesi, bu doğal rejim aralığının aşılmasına ve ekosistem bütünlüğünün tehdit edilmesine neden olabilmektedir [47- 49].

Karbon dengesi bakımından orman yangınları iki kanaldan kritik önem taşır:

i. Yangın sırasında atmosfere salınan CO_2 ve diğer sera gazları,

ii. Yangın sonrasında ormanın karbon yutak kapasitesinin zayıflaması.

Küresel değerlendirmeler, yangın emisyonlarının küresel arazi kaynaklı CO_2 bütçesinde kayda değer bir paya sahip olduğunu ve bazı bölgelerde yangın aktivitesinin artış gösterebildiğini ortaya koymaktadır [50, 51]. Özellikle boreal orman kuşağında (taiga) ve Akdeniz kuşağında gerçekleşen büyük yangınlar, uzun yıllar boyunca birikmiş karbon stoklarının kısa sürede atmosfere geri salınmasına yol açarak ormanların net karbon

yutağı rolünü zayıflatabilmekte; bazı koşullarda bu rolün tersine dönmesine kadar varan sonuçlar doğurabilmektedir [50, 51].

Toprak ve su kaynakları üzerindeki etkiler, yangınların ekolojik sonuçlarının "gecikmeli" fakat yüksek maliyetli bileşenlerindendir. Yüksek şiddetli yangınlar, toprak organik maddesini ve mikrobiyal toplulukları tahrip ederek toprağın yapısını, geçirgenliğini ve su tutma kapasitesini olumsuz etkileyebilmektedir [52]. Toprak yüzeyinde hidrofobik (su itici) tabaka oluşumu yağış sonrası yüzey akışını artırmakta; bu durum erozyon, sediman taşınımı ve heyelan riskinde belirgin artışlara neden olabilmektedir [52, 53]. Yangın sonrası dönemde akarsulara, barajlara ve göllere taşınan kül/sediman yükü su kalitesinin bozulmasına, içme suyu arıtma maliyetlerinin artmasına ve bazı durumlarda su temininde süreklilik sorunlarına yol açabilmektedir [52, 53]. Bu yönüyle ormanlar, yalnızca odun üretimi perspektifinde değil; su havzalarının korunması ve hidrolojik dengenin sürdürülebilirliği bakımından da kritik bir doğal kaynak olarak değerlendirilmelidir.

Ekonomik etkiler doğrudan ve dolaylı kayıplar olarak ele alınmaktadır. Doğrudan kayıplar; yanan odun serveti ve odun dışı orman ürünleri, tarım alanları ve yerleşimler, ulaşım/enerji altyapısında fiziksel hasar ile söndürme operasyonlarına ilişkin harcamaları kapsar [46, 54]. Özellikle yerleşim alanlarına yakın bölgelerde meydana gelen büyük yangınların, tekil olay bazında çok yüksek yeniden inşa ve zarar telafi maliyetleri doğurduğu rapor edilmektedir [54, 55]. Buna ek olarak, yangın sonrası ağaçlandırma, erozyon kontrolü, mühendislik yapıları ve ekosistem restorasyonu için gereken uzun vadeli yatırımlar doğrudan maliyetleri daha da artırmaktadır [46, 54].

Dolaylı ekonomik kayıplar ise sıklıkla doğrudan kayıpların ötesine geçmektedir. Turizm gelirlerindeki azalma, duman kaynaklı hava kirliliğine bağlı sağlık harcamaları ve iş gücü kayıpları, tarımsal verimlilikte uzun vadeli düşüş, geçici/kalıcı tahliyelerden kaynaklanan sosyal maliyetler bu kapsamda öne çıkmaktadır [46, 54, 55]. Ayrıca karbon depolama, rekreasyon ve kültürel hizmetler gibi piyasa dışı ekosistem hizmetlerindeki azalma da toplam toplumsal maliyetin önemli bir bileşenidir [48, 55]. Kaynak kullanımı perspektifinden bakıldığında ise yangınla mücadele yalnızca "söndürme giderleri" ile sınırlı değildir; insan gücü, hava-kara araçları, lojistik, ekipman amortismanı ve organizasyonel kapasite gereksinimi gibi kalemler, yangın sezonu uzadıkça sistem üzerinde birikimli baskı oluşturmaktadır [54].

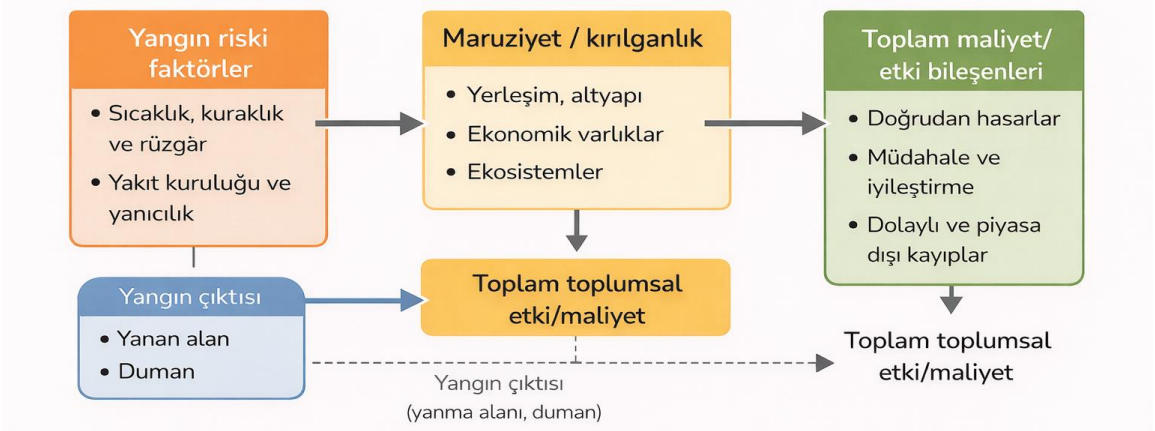
Orman yangınlarının etkisi çoğu zaman "yanan alan (ha)" göstergesi üzerinden raporlansa da, bu metrik yangının toplam toplumsal yükünü tek başına temsil etmez. Çünkü toplam etki;

i. Doğrudan hasarlar ve yeniden inşa giderleri (konut, altyapı, endüstriyel tesisler) [55].

ii. Müdahale ve olay sonrası iyileştirme/rehabilitasyon harcamaları (enkaz kaldırma, erozyon kontrolü, restorasyon uygulamaları) [55].

iii. Dolaylı ekonomik kayıplar (turizm ve üretim kaybı, iş gücü kaybı, tedarik zinciri etkileri) [55].

iv. Piyasa dışı kayıplar (sağlık etkileri, hava kalitesi, ekosistem hizmet kaybı) gibi bileşenlerin birleşimiyle oluşur [55].



Şekil 3. Yanan alan ile toplam toplumsal/maliyet arasındaki ilişki

Bu nedenle yangın rejiminin değerlendirilmesinde, yalnızca "yanan alan" artışına odaklanmak yerine, yangın çıktılarının hangi toplumsal ve ekonomik bileşenlere dönüştüğünü gösteren çok boyutlu bir bakış benimsenmelidir. Şekil 3'te gösterildiği üzere, aynı büyüklükte yanan alan farklı maruziyet düzeylerinde çok farklı maliyet sonuçları üretebilir: yerleşim alanlarına yakın veya kritik altyapının yoğun olduğu bölgelerde görece sınırlı alan yakan yangınlar dahi yüksek parasal kayıplara yol açabilirken; daha geniş alan yakan olaylarda toplam etki, müdahale/iyileştirme gereksinimleri ve uzun dönemli ekosistem kayıpları üzerinden belirginleşebilir [55]. Dolayısıyla risk değerlendirmesi ve planlama süreçlerinde "yanan alan" göstergesi, maruziyet/kırılganlık göstergeleri ve maliyet bileşenleri ile ele alınmalıdır [55].

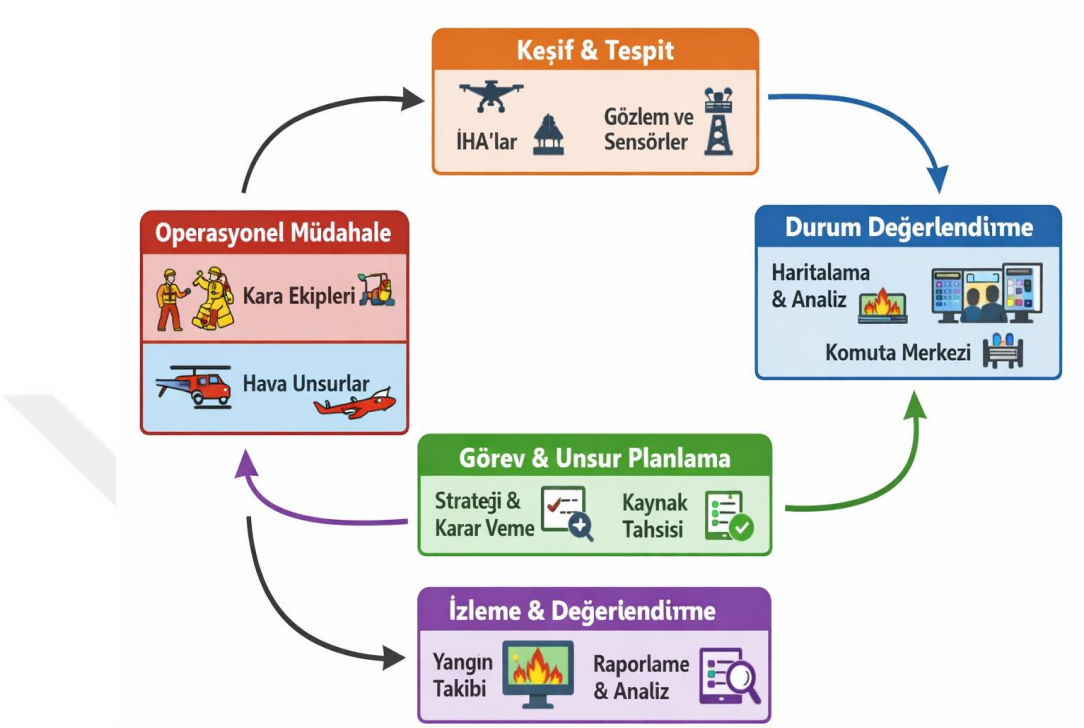
Orman yangınlarının sosyo-ekonomik maliyetleri incelendiğinde, hasarın boyutu sadece yanan alanın büyüklüğüyle değil, yangının yerleşim merkezleri ve kritik altyapı üzerindeki etkisiyle de doğrudan ilişkilidir. Bu durumun en somut örneklerinden biri olan Camp Fire, yaklaşık 62 bin hektarlık bir alanı etkilemesine rağmen 18.804 yapının yıkılmasına ve 85 can kaybına yol açmıştır [56]. CAL FIRE raporlarına göre toplam maliyet 16,5 milyar ABD doları seviyesine ulaşırken [57], Sigorta Müdürlüğü tarafından Kasım 2018 yangınlarına ilişkin ödenen tazminatların 12 milyar ABD dolarını aştığı kamuoyuyla paylaşılmıştır [58]. Söz konusu vaka, mekânsal olarak görece sınırlı kalan yangınların bile kentsel dokuya temas etmesi durumunda ekonomik kaybın katlanarak arttığını kanıtlamaktadır.

Geniş ölçekli yangın rejimlerinin etkilerine bir diğer örnek ise 2017 Portekiz Yangın Sezonu'dur. Bu dönemde yaklaşık 539.920 hektarlık alanın yanması sonucu 117 kişi hayatını kaybetmiş [59], Portekiz hükümeti Haziran–Ekim dönemindeki toplam hasarın 1,5 milyar avro mertebesinde olduğunu tahmin etmiştir [59]. Portekiz örneği, geniş alanlı yangınların etkisinin salt arazi kaybı üzerinden değerlendirilmemesi gerektiğini; altyapı, ormancılık, tarımsal üretim kayıpları ve uzun vadeli rehabilitasyon gereksinimleri gibi çok bileşenli bir perspektifle ele alınmasının zorunluluğunu ortaya koymaktadır.

1.4. Orman Yangınlarında Operasyonel Yönetim ve Kaynak Planlaması

Orman yangınlarıyla mücadele; kara unsurları (orman işçileri, profesyonel itfaiye ekipleri, gönüllüler, dozer ve greyder gibi ağır iş makineleri, su tankerleri, arazi araçları), hava unsurları (helikopterler, amfibik ve tanker uçaklar, İHA'lar) ve bu unsurların tümünü koordine eden komuta-kontrol altyapısı (olay komuta sistemi, acil durum operasyon merkezleri, çok İHA'lı koordinasyon yapıları vb.) üzerinden yürütülen çok aktörlü bir sistem olarak ele alınmaktadır [60]. Modern yangın yönetimi dokümanlarında bu mimari, Olay Komuta Sistemi (Incident Command System, ICS) ve Ulusal Olay Yönetim Sistemi (National Incident Management System, NIMS) çerçevesinde standartlaştırılmış; tekil yangınlardan bölgesel afetlere kadar farklı ölçeklerde aynı terminoloji ve süreçlerin kullanılmasına olanak sağlayan bir yapı olarak tanımlanmaktadır [60]. Bu bütünleşik süreç, tespit/keşiften olay sonrası izleme–değerlendirmeye uzanan aşamaların planlama kararları üzerinden kara/hava icrasını

beslediği geri beslemeli bir karar döngüsü olarak Şekil 4'te blok diyagram biçiminde gösterilmektedir [60].



Şekil 4. Yangın yönetim sistemi blok diyagramı

Görev/unsur planlaması literatürü, yangın sezonu öncesi hazırlık kararları ile olay anındaki dinamik sevk-idare kararlarını birlikte kapsayan geniş bir karar destek birikimine sahiptir. Yangın söndürme süreci; "kaynak edinimi ve stratejik konuşlandırma", "kaynak mobilizasyonu", "ilk müdahale (initial attack)" ve "genişlemiş taarruz (extended attack)" aşamalarına ayırmakta; her aşama için operasyon araştırması temelli matematiksel modeller (özellikle karışık tamsayılı programlama, stokastik/senaryo tabanlı optimizasyon) ve sezgisel yaklaşımlar altında çok sayıda çalışmayı sınıflandırmaktadır [61]. Bu bağlamda, hava ve kara unsurlarının sezon başlamadan önce hangi üslerde konuşlandırılacağı, hangi tip uçağın/helikopterin hangi bölgeleri hangi tepki süreleri içinde kapsayabileceği ve sınırlı bütçe altında hangi kaynak bileşiminin marjinal fayda üreteceği gibi kararlar, performans ölçütleri ile risk dağılımını birlikte dikkate alan optimizasyon çerçeveleriyle ele alınmaktadır [61, 62]. Senaryo tabanlı standart cevap modeli, farklı yangın senaryoları altında kaynakların konuşlandırılması ve sevk kararlarını eş zamanlı optimize ederek, uygulama kurumları tarafından da test edilmiş planlama yaklaşımlarına örnek teşkil etmektedir [62].

Yangın başladıktan sonra yürütülen görev/unsur planlama çalışmaları ise ilk müdahale (ilk sevk edilen ekip ve araçların sayısı, tipi ve güzergâhı) ile genişlemiş taarruz (yangın büyüdükten sonra ek kaynakların ne zaman, nereye ve hangi yoğunlukta transfer edileceği) kararlarını birlikte ele almaktadır. Bu kapsamda, belirli bir zamanda mevcut helikopter, uçak, kara ekibi ve ağır makine parkının; korunacak yerleşim birimleri ve kritik altyapı, beklenen yangın büyüme hızı ve rüzgâr/yakıt senaryoları ile değerlendirildiği çok amaçlı karar destek sistemleri geliştirilmiştir [61- 63]. Büyük yangınlarda kaynak kullanım örüntülerini inceleyen çalışmalar, karar vericilerin "değerlerin korunması" odağıyla bazı durumlarda sahaya gerekenden fazla kaynak sevk edebildiğini; buna karşın yangın davranışı üzerinde meteorolojik koşullar ve yakıt özelliklerinin, salt kaynak bolluğundan daha belirleyici olduğunu göstermektedir [58]. Bu bulgu, görev/unsur planlama algoritmalarının pratikte kritik olmakla birlikte, operasyonel başarının "doğru kaynak–doğru yer–doğru zaman" üçlüsüne ve yangın davranışının dayattığı fiziksel sınırlara bağlı olduğunu ortaya koymaktadır [61- 63].

Ulusal ve bölgesel raporlar, gelişmiş yangın yönetim sistemlerine sahip ülkelerde yangınların çok büyük bir kısmının ilk müdahale aşamasında kontrol altına alınabildiğini; ancak küçük bir alt grubun "karmaşık olay/mega yangın" ölçeğine ulaştığında yanık alan ve söndürme maliyeti üzerinde orantısız etki yarattığını rapor etmektedir [64, 65]. ABD verilerine dayanan bulgular, yangınların yüksek bir oranının erken evrede söndürülebildiğini; buna karşın karmaşık olaylara dönüşen sınırlı sayıdaki yangının toplam yanık alanın ve maliyetlerin büyük bir bölümünden sorumlu olduğunu göstermektedir [63, 64]. Benzer şekilde Türkiye odaklı bir değerlendirmede, yangınların çok küçük bir kısmının toplam hasarın çok büyük bölümünü oluşturduğu; özellikle yangın hattı ısı yoğunluğunun 3000–4000 kW/m eşiğini aşması durumunda doğrudan saldırı tekniklerinin işlevsiz hâle geldiği ve bu koşullarda "kaynak artırmanın" tek başına yangını kontrol altına almaya yetmeyebileceği belirtilmektedir [65]. Bu bulgular, aşırı hava koşulları, yüksek yakıt yükü ve geç tespitin birleştiği "kritik eşiği aşmış" yangınlarda, operasyonel planlama ve görev/unsur optimizasyonunun tek başına afet süresini kısaltmak için yeterli olmayabileceğini; dolayısıyla en iyi planlanmış söndürme operasyonlarının dahi geç tespit durumunda uzun süreli olayları tamamen önleyemeyebileceğini göstermektedir [61, 63- 65].

Sonuç olarak literatür;

i. Kara ve hava unsurlarının ICS/NIMS benzeri standart komuta-kontrol yapıları altında yönetilebildiğini [60],

ii. Görev/unsur planlama için olgun bir optimizasyon ve karar destek yaklaşım repertuvarı bulunduğunu [61, 62].

iii. Ancak kritik eşiklerin aşıldığı yangın koşullarında operasyonel planlamanın etkisinin sınırlanabildiğini göstermektedir [63- 65].

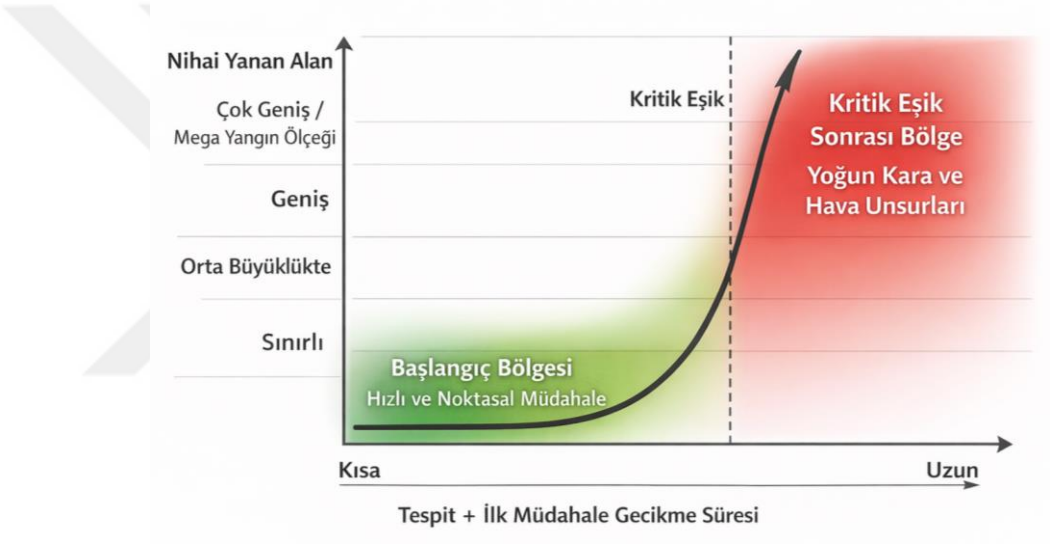
Bu nedenle, erken tespit ve hızlı ilk müdahale kapasitesinin güçlendirilmesi; bu çalışma kapsamında ele alınan otonom/sürü tabanlı hava gözetleme ve kapsama planlama yaklaşımlarının, mevcut görev/unsur planlama literatürünü tamamlayan kritik bir bileşen olarak konumlandırılmasını gerekli kılmaktadır.

1.5. Erken Tespit ve Müdahale Gecikmesinin Yangın Boyutu Üzerindeki Etkisi

Orman yangını yönetimi literatüründe müdahale başarısını belirleyen kritik değişkenlerden biri, yangının ne kadar erken tespit edildiği ve buna bağlı olarak ilk müdahalenin ne ölçüde geciktiğidir [54, 61- 63]. Bu kapsamda *erken tespit*, çoğu çalışmada ilk duman/alev oluşumundan yangının algılanmasına kadar geçen süre (tespit gecikmesi) olarak; *müdahale gecikmesi* ise tespit anından ilk kara/hava unsurunun yangın sahasına fiilen ulaşmasına kadar geçen süre olarak ele alınmaktadır [61- 63]. Söz konusu iki bileşenin toplamı, yangının serbestçe gelişebildiği "kontrol penceresi"ni (kontrolsüz yanma süresi) belirlemekte; yangın davranışı ve yayılım modelleri, bu sürenin uzamasının yangının büyüklüğü üzerinde doğrusal olmayan (çoğunlukla hızlanan) bir artış üretebildiğini göstermektedir [7, 66]. Bu nedenle, yangın yönetiminde yalnızca söndürme kapasitesi değil; tespit–sevk–ilk müdahale zincirinin gecikmelerini azaltmaya yönelik sistem tasarımı da temel bir performans belirleyicisi olarak değerlendirilmektedir [7, 54].

Bu nedensel ilişki, çalışma kapsamındaki kavramsal çerçeveyle uyumlu biçimde Şekil 5'te şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 5'te yatay eksen "tespit + ilk müdahale gecikme süresi"ni (kısa→uzun), düşey eksen ise "nihai yanan alan"ı (sınırlı→mega yangın ölçeği) temsil etmektedir. Eğrinin başlangıç bölgesinde gecikme artışı, nihai yanan alanda görece daha sınırlı bir büyümeyle ilişkilidir; bu evrede yangın çoğu senaryoda daha küçük cephe uzunluğu ve daha düşük şiddetle seyrettiğinden, daha düşük maliyetli ve daha sınırlı

kaynaklarla etkili ilk müdahale olanağı artmaktadır [7, 54, 61, 62]. Buna karşılık, "kritik eşik" sonrasında yangın büyümesi hızlanmakta ve olay, daha yoğun kara/hava konuşlandırmasına rağmen çoğu zaman meteorolojik koşullara yüksek duyarlılık gösteren "karmaşık olay" karakterine yaklaşmaktadır [7, 63, 66]. Literatürde bu durum, artan kaynak tahsisinin marjinal faydasının azalabildiği; önceliğin "tam durdurma"dan ziyade değerlerin/altyapının korunmasına kayabildiği bir operasyonel çerçeveyle tartışılmaktadır [7, 63]. Dolayısıyla yangınların büyük ölçekli olaylara dönüşmesini sınırlamak için, kritik eşik öncesi süreyi kısaltan erken tespit çözümleri stratejik bir tamamlayıcı unsur olarak konumlanmaktadır [7, 54].



Şekil 5. Müdahale gecikmesi ile toplam yanan alan büyüklüğü arasındaki ilişki

Yangın tespit yöntemleri, uygulamada genellikle;

i. İnsan gözlemine dayalı yaklaşımlar (gözetleme kuleleri, devriye, ihbar),

ii. Sabit algılayıcı/kamera sistemleri (optik/termal kameralar ve otomatik alarm altyapıları),

iii. Uzaktan algılama (uydu tabanlı aktif yangın/termal anomali tespiti)

iv. Hava platformları (helikopter/uçak devriyeleri ve İHA tabanlı gözlem) olarak sınıflandırılabilir.

Bu yöntemlerin her biri; kapsama alanı, tekrar ziyaret sıklığı, yanlış alarm hassasiyeti, arazi/meteoroloji bağımlılığı ve işletme maliyeti gibi boyutlarda farklı üstünlükler taşır.

Bu çalışma kapsamında ele alınan İHA tabanlı erken tespit ve kapsama planlaması yaklaşımı ise, özellikle geniş ve heterojen alanlarda tespit gecikmesini azaltmayı hedefleyerek, kritik eşik öncesi bölgenin olabildiğince uzun tutulmasına ve ilk müdahale başarısının artırılmasına hizmet eden bir bileşen olarak değerlendirilmektedir [7, 54].

1.6. Yangın Tespit Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Orman yangınlarında erken tespit; yangının başlangıç evresinde yakalanmasını, dolayısıyla ilk müdahalenin düşük maliyetli ve daha güvenli taktiklerle yürütülebilmesini sağlayan kritik bir fonksiyondur. Güncel uygulamada erken tespit yaklaşımları, genel olarak dört ana sınıfta ele alınmaktadır. Bunlar:

i. Sabit noktalı yer gözlem sistemleri (insanlı gözetleme kuleleri ve/veya kamera–algoritma destekli kule ağları) [67- 69].

ii. Uydu tabanlı termal ve multispektral gözlem sistemleri [70, 71].

iii. Pilot kontrollü hava araçlarıyla yürütülen devriye faaliyetleri [26, 68].

iv. Operatör kontrollü insansız hava araçlarına (İHA) dayalı tespit yaklaşımlarıdır [26, 27].

Bu yöntemler; mekânsal kapsama, zamansal çözünürlük (yeniden ziyaret/izleme sürekliliği), tespit doğruluğu, yanlış alarm duyarlılığı, insan bağımlılığı ve birim alan başına maliyet gibi ölçütlerde belirgin biçimde farklılaşmaktadır [68, 69].

İnsanlı gözetleme kuleleri, pek çok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de uzun yıllardır kullanılan temel tespit mekanizmalarından biridir. Uygun topografik noktalara yerleştirilen kulelerde deneyimli personelin görüş hattı içinde dumanı erken aşamada gözlemleyebilmesi mümkün olmakla birlikte, performansın operatör dikkatine ve deneyimine bağımlı olması, görüş hattının sis/pus ve topoğrafya tarafından sınırlanması ve 7/24 sürekliliğin vardiya ve insan kaynağı ile kısıtlanması bu yaklaşımın temel zayıflıklarıdır [67, 68]. Buna karşın, kule sistemleri yerel ölçekte düşük–orta düzeyde işletme maliyetiyle sürekli gözetim sağlayabildiğinden, erken tespit mimarisinin "yer tabanlı" bileşeni olarak önemini korumaktadır [67].

Bu kısıtları azaltmaya yönelik olarak, kule ağlarına optik/termal kamera sistemleri ve görüntü işleme tabanlı akıllı algılama yazılımları entegre edilmektedir. Kamera destekli

kule sistemleri; gözlemi kayda alınabilir hâle getirmesi, aynı anda birden fazla noktanın izlenebilmesi ve derin öğrenme tabanlı duman/alev algılama modelleriyle otomatik uyarı üretilebilmesi bakımından insanlı kulelere göre daha standardize edilebilir bir yapı sunmaktadır [68, 69]. Bununla birlikte bu yaklaşım; enerji, haberleşme ve bakım altyapısı gereksinimi nedeniyle başlangıç yatırımı gerektirmekte; ayrıca yanlış alarm yönetimi (bulut, sis, toz, endüstriyel duman vb.) operasyonel iş yükü yaratabilmektedir [68, 69].

Uydu tabanlı gözlem sistemleri, özellikle geniş coğrafyalarda durum farkındalığını artıran üst-ölçek bir bileşen olarak değerlendirilmektedir. Operasyonel düzeyde EFFIS benzeri altyapılar, farklı uydu ürünlerini birleştirerek yangın tehlikesi/yangın aktivitesi ve yanmış alan haritalaması gibi çıktılar üretebilmektedir [70]. Benzer şekilde NASA FIRMS gibi platformlar, uydu tabanlı "aktif yangın" (termal anomali) ürünlerini operasyonel kullanıma açmaktadır [71]. Bununla birlikte uyduların yeniden ziyaret aralığı ve atmosferik koşullar (bulutluluk, yoğun duman, aerosoller) tespit performansını sınırlayabilmekte; bu nedenle uydu tabanlı tespit pratikte çoğunlukla "üst ölçek izleme ve doğrulama" rolünde konumlanmaktadır [70, 71].

Pilot kontrollü hava araçları (uçak/helikopter) ile yürütülen devriyeler, özellikle erişimi güç alanlarda yüksek mekânsal ayrıntı sağlayabilmekte ve hedefli doğrulama görevlerinde etkili olabilmektedir. Ancak uçuş saati maliyeti, personel ve bakım gereksinimleri ile uçuş emniyeti kısıtları (düşük görüş, rüzgâr, türbülans, yoğun duman) dikkate alındığında, geniş alanların sürekli devriyesi maliyet–fayda açısından sınırlı bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir [28, 68]. Bu nedenle pilotlu platformlar, birçok senaryoda "sürekli erken tespit" yerine "olay anı doğrulama/haritalama ve operasyonel destek" görevlerinde daha rasyonel bir kullanım profiline sahiptir [29, 68].

Operatör kontrollü İHA'lar ise düşük operasyonel maliyet, hızlı konuşlanma ve RGB/termal gibi sensörlerle göreve özel veri toplayabilme kabiliyeti nedeniyle yangın tespiti ve izleme uygulamalarında hızla yaygınlaşmaktadır. Literatür, İHA görüntülerinden duman/alev tespitinin görüntü işleme ve derin öğrenme tabanlı yöntemlerle yüksek doğrulukla yapılabildiğini göstermektedir [26, 27]. Bununla birlikte tek bir İHA'nın kapsama yarıçapının sınırlı olması ve batarya/endürans kısıtları nedeniyle havada kalış süresinin tipik olarak kısa aralıklarda kalması, bu yaklaşımın geniş alanlarda 7/24 kesintisiz erken tespit sağlamasını zorlaştırmaktadır [26, 27]. Bu nedenle operatör

kontrollü İHA'lar, uygulamada çoğunlukla kule/uydu/ihbar kaynaklı şüpheli olayların doğrulanması, yangın cephesinin anlık izlenmesi ve afet sonrası durum tespiti gibi noktasal görevlerde yoğunlaşmaktadır [26, 27].

Bu yöntemleri maliyet–fayda perspektifinde özetlemek amacıyla Tablo 2'te; kapsama, süreklilik, insan bağımlılığı, 7/24 uygunluk, yanlış alarm duyarlılığı ve göreli maliyet ölçütleri üzerinden nitel bir karşılaştırma verilmektedir.

Tablo 2. Mevcut yangın tespit yöntemlerinin nitel maliyet–fayda karşılaştırması

Tespit yöntemi	Kapsama Alanı	Süreklilik (zaman)	Personel ihtiyacı	7/24 çalışma durumu	Yanlış alarm riski	Yatırım İşletme Maliyeti	Referanslar
İnsanlı gözetleme kuleleri	Orta	Orta–Yüksek	Çok yüksek	Kısmen	Düşük–Orta	Düşük–Orta	[67, 68]
Kamera destekli / akıllı kule sistemleri	Orta	Yüksek	Orta	Evet	Orta	Orta	[69]
Uydu tabanlı termal / multispektral izleme	Çok yüksek	Düşük–Orta	Düşük	Evet	Düşük–Orta	Çok düşük	[70, 71]
Pilot kontrollü hava devriyeleri	Orta–Yüksek	Düşük–Orta	Çok yüksek	Hayır	Düşük–Orta	Çok yüksek	[28, 68]
Operatör kontrollü İHA'lar	Orta	Düşük–Orta	Yüksek	Hayır	Düşük–Orta	Orta	[26, 27]

Tablo 2'ün işaret ettiği temel sonuç, mevcut yöntemlerin her birinin belirli bağlamlarda güçlü tarafları olsa da "geniş alanların 7/24 izlenmesi ve erken tespit" gereksiniminde tek başına yeterli bir çözüm sunmakta zorlandığıdır. Bu çerçevede, geleneksel tespit bileşenlerini tamamlayacak şekilde; sürekli kapsama, zamanında tespit ve hızlı yönlendirme sağlayabilen (yarı)otonom İHA mimarileri ile kapsama planlama (CPP/mCPP) temelli yaklaşımların, erken tespit ekosisteminde tamamlayıcı bir rol üstlenebileceği değerlendirilmektedir [26, 27, 68].

Literatürdeki bulgular, erken tespit görevlerinde başarımın yalnızca algılayıcı türü veya platform seçimi ile açıklanamayacağını; geniş alanın düzenli aralıklarla izlenmesini gerektiren senaryolarda sistem düzeyi performansın büyük ölçüde operasyonun

sürekliliğine ve araçlar arası eşgüdüm kararlarına bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle problem, "tek bir aracın kapasitesini artırma" yaklaşımından ziyade, birden fazla aracın görev yükünü paylaşabildiği ve alanın periyodik olarak yeniden ziyaret edilebildiği bir işletim çerçevesi içinde ele alınmalıdır.

Bu çerçeve, otonom iniş–kalkış ve şarj/batarya değişimi ile desteklenen bir istasyon altyapısı üzerinden görev devri döngüsü kurgulanmasını ve böylece sürekli gözetleme hedefinin sürdürülebilir biçimde gerçekleştirilmesini gerekli kılmaktadır. Dolayısıyla konsept tasarım ihtiyacı; (i) heterojen görev sahasının araçlar arasında dengeli biçimde paylaştırılması, (ii) risk/öncelik farklılıklarının planlamaya yansıtılması ve (iii) her alt bölgede sistematik kapsama rotalarının üretilmesi gerekliliklerinin aynı çatı altında birleştirilmesiyle ortaya çıkmaktadır.

1.7. Yangın Tespitinde İHA Sürülerinin Kullanımı

Geleneksel insansız hava aracı (İHA) tasarım yaklaşımında amaç çoğunlukla tek bir platformun görev etkinliğini, özellikle de havada kalış süresini (endürans) ve menzilini artırmak olarak ele alınmaktadır. Bu kapsamda aerodinamik iyileştirmeler, batarya/enerji yoğunluğu, toplam kütle–taşıma oranı, seyir hızı ve irtifa gibi değişkenler; belirli bir görev profili için "tek araç" performansını maksimize etmeye dönük tasarım parametreleri olarak değerlendirilir [72, 73]. Tek hedefli gözetleme veya sınırlı alan keşfi gibi görevlerde bu paradigma rasyonel bir çözüm sunabilmektedir. Bununla birlikte, erken yangın tespiti gibi geniş alanın sürekli/tekrarlı taranmasını gerektiren ve arıza/kayıp durumlarında görevin sürdürülebilirliğinin kritik olduğu uygulamalarda, "tek büyük İHA" yaklaşımının operasyonel dayanıklılık ve kapsama sıklığı açısından sınırlılıkları olabileceği literatürde vurgulanmaktadır [74, 75].

Sürü temelli yaklaşım, aynı görev setinde tek bir platformu ölçeklemek yerine daha küçük ve daha çok sayıda İHA'nın koordineli işletilmesine dayanır. Her bir aracın endüransı sınırlı olsa dahi, görev paylaşımı/devri sayesinde alanın daha kısa aralıklarla yeniden taranması ve güncel durum bilgisinin korunması mümkün olur [29, 74, 75]. Yangın gibi hızlı gelişen olaylarda kapsama sıklığı (yeniden ziyaret süresi) erken tespit olasılığını doğrudan etkileyen temel bir performans göstergesidir. Ayrıca herhangi bir İHA'nın arıza, kaza veya haberleşme kaybıyla devre dışı kalması durumunda kalan araçların görev

yükünü yeniden dağıtması, tek noktadan arıza hassasiyetini azaltarak "zarif bozulma (graceful degradation)" avantajı sağlar [75].



Şekil 6. Orman yangını görevlerinde tek İHA ve sürü İHA karşılaştırması

Bu çalışma kapsamında önerilen kavramsal işletim çerçevesi, sürü İHA'ların yalnızca eşzamanlı uçan araçlar topluluğu olarak değil; aynı zamanda otomatik iniş–kalkış ve şarj/batarya değişim istasyonlarıyla bütünleşik bir "görev devri halkası" biçiminde kurgulanmasını esas alır. Şekil 6'te kavramsal olarak gösterildiği üzere, filonun bir kısmı görev sahasında kapsama uçuşunu icra ederken diğer bir kısmı yer istasyonunda şarj/batarya değişimi için hazır bekler; planlama ufku doğrultusunda görevdeki ve dinlenmedeki araçlar arasında periyodik görev devri gerçekleştirilir. Bu yapı, literatürde "devamlı gözetleme" olarak adlandırılan problem sınıfıyla yakından ilişkilidir ve kapsama sıklığının, endürans kısıtlarının ve istasyon çevrim zamanlarının birlikte planlanmasını gerektirir [29, 74].

Bu perspektiften bakıldığında, sürü mimarisinin başarısı yalnızca araç tasarımına (batarya kapasitesi, faydalı yük, itki sistemi vb.) indirgenemez; eşgüdüm ve görev planlama algoritmalarının etkinliği en az platform parametreleri kadar belirleyicidir [29, 75]. Benzer toplam filo kapasitesi varsayımı altında dahi, hangi aracın ne zaman kalkış yapacağı, hangi alt bölgeyi hangi sırayla tarayacağı, ne zaman istasyona döneceği ve görev devrinin sürü genelinde nasıl senkronize edileceği; kapsama performansı, yeniden ziyaret süresi, erken tespit olasılığı ve sistemin arıza toleransı üzerinde doğrudan etkilidir [29,75]. Bu nedenle sürü yaklaşımı, erken tespit problemini yalnızca "sensör ve platform

seçimi" değil, aynı zamanda "kapsama planlama (CPP/mCPP) ve görev devri optimizasyonu" problemi olarak da yeniden çerçevelendirmektedir [5].

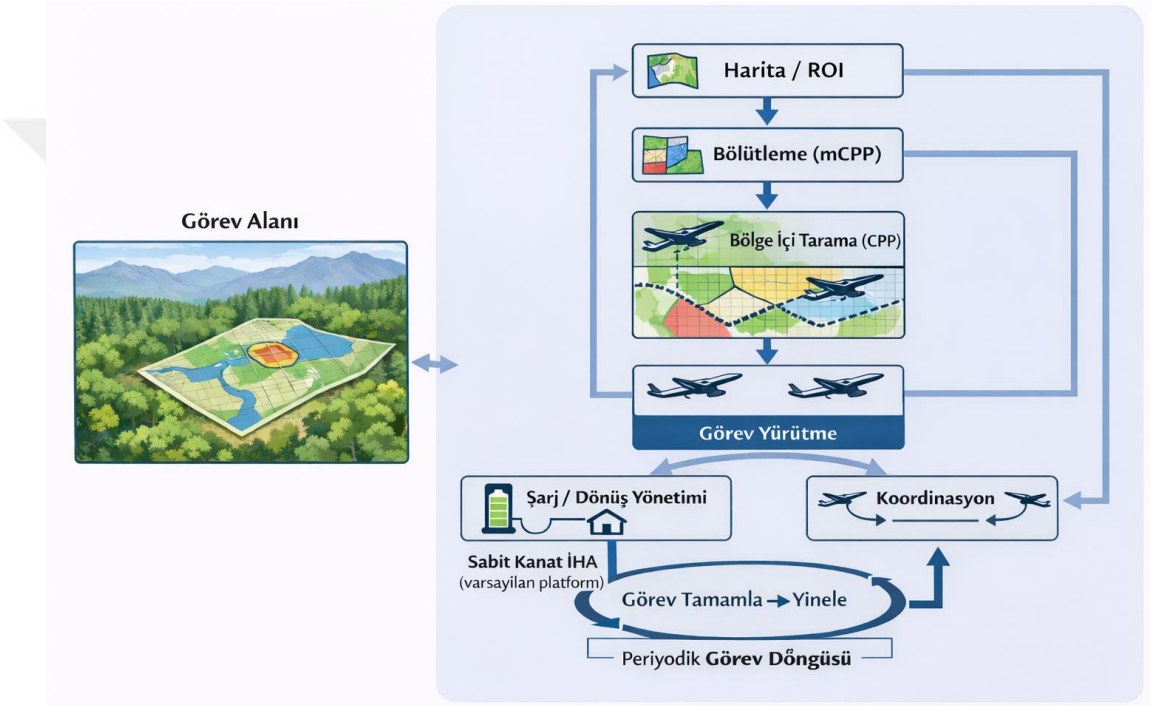
1.8. İHA Sürüsü ile Sürekli Gözetleme Konsepti

Sürekli gözetleme (continuous surveillance), geniş bir alanın tek seferlik taranmasından ziyade, alanın belirli bir yeniden ziyaret eşiği (revisit constraint) altında periyodik olarak yeniden izlenmesi hedefiyle tanımlanmaktadır. Bu problem sınıfı, özellikle çoklu İHA senaryosunda; görev yükünün araçlar arasında paylaştırılması, yeniden ziyaret süresinin yönetilmesi ve sistem düzeyinde kapsamanın sürekliliğinin sağlanması gibi kararları birlikte gerektiren bütünleşik bir çerçeve olarak ele alınmaktadır. Çoklu İHA ile sürekli gözetleme literatürü, yeniden ziyaret süresinin (revisit time) erken tespit gibi zaman duyarlı görevlerde kritik bir performans göstergesi olduğunu; ayrıca operasyonel gereksinimlere bağlı olarak bazı alt bölgelerin diğerlerine göre daha sık ziyaret edilmesinin (dinamik öncelikler/risk temelli izleme) gerekebileceğini vurgulamaktadır [76, 77].

Sürekli gözetlemenin sahada uygulanabilirliği yalnızca planlama/koordinasyon kararlarına değil, aynı zamanda enerji kısıtına da doğrudan bağlıdır. İHA'ların sınırlı batarya/kalış süresi nedeniyle sistemin kesintisiz işletimi çoğu zaman bir üs/istasyon varsayımı altında ele alınmakta; araçların iniş–enerji ikmali–yeniden kalkış adımlarını otonom biçimde yürütebilmesi operasyonel sürekliliğin temel belirleyicilerinden biri hâline gelmektedir. Bu kapsamda literatürde docking/istasyon çözümleri ile otonom şarj veya batarya değişimi yaklaşımları, uzun süreli görevlerde insan bağımlılığını azaltmaya ve görev sürekliliğini artırmaya yönelik önemli bileşenler olarak değerlendirilmektedir [78, 79]. Dolayısıyla "sürekli gözetleme" konsepti, pratikte yalnızca alanın yeniden ziyaret edilmesini değil, aynı zamanda bu yeniden ziyaretin enerji ikmali ile sürdürülebilir kılındığı bir işletim düzenini de içeren sistem yaklaşımını gerektirmektedir.

Bu tez kapsamında "İHA sürüsü ile sürekli gözetleme konsepti", literatürdeki bu çerçeve ile uyumlu biçimde; istasyon destekli bir işletim düzeninde, filodaki araçların intikal–tarama–geri dönüş–iniş–enerji ikmali–yeniden kalkış adımlarını periyodik olarak yürüttüğü bir görev devri döngüsü (rotation) üzerinden kavramsallaştırılmaktadır. Konseptin planlama düzeyindeki karşılığı ise iki temel karar sınıfında somutlaşmaktadır: görev sahasının araçlar arasında dengeli biçimde bölütlenmesi ve araca atanması ile her

bir alt bölgede sistematik kapsama rotalarının üretilmesidir. Bu bağlamda Şekil 7, sürekli gözetlemenin planlama–yürütme düzeyindeki ilişkisini; Harita/ROI → Bölütleme (mCPP) → Bölge içi Tarama (CPP) → Görev Yürütme akışı ve bunu besleyen şarj/dönüş yönetimi ile koordinasyon blokları üzerinden, periyodik görev döngüsü çerçevesinde özetlemektedir. Böylece sürekli gözetleme hedefi, yeniden ziyaret gereksinimi ve enerji ikmali kısıtı birlikte düşünülerek, izleyen bölümlerde ele alınan kapsama planlama yaklaşımının problem bağlamı netleştirilmektedir.



Şekil 7. İstasyon destekli sürekli gözetleme için planlama ve yürütme mimarisi

Bu çalışma kapsamında ele alınan yaklaşım, sürü İHA'ları yalnızca eşzamanlı uçan araçlar topluluğu olarak değil; otomatik iniş–kalkış ve şarj/batarya değişim istasyonlarıyla bütünleşik bir "görev devri döngüsü" (görev devri halkası) olarak ele alınmaktadır. Bu işletim çerçevesinde filonun bir kısmı görev sahasında kapsama uçuşunu yürütürken diğer kısmı istasyonda şarj/batarya değişimi için hazır bekler; belirlenen planlama ufku doğrultusunda görevdeki araçlar ile istasyondaki araçlar arasında periyodik görev devri gerçekleştirilmektedir. Böylece her bir aracın endürans kısıtı, sürü düzeyinde dönüşümlü işletim ile yönetilerek sürekli ve tekrarlı kapsama sağlanmaktadır. Bu işletimsel kurgunun ana alt bileşenleri, Şekil 7'de "Şarj/Dönüş Yönetimi" ve "Koordinasyon" blokları altında şematik olarak gösterilmektedir. Bununla

birlikte, bu alt bölümde şarj/istasyon ve görev devri; sürekli gözetleme ihtiyacını açıklamak amacıyla operasyonel bir konsept olarak verilmiş olup, batarya dinamiği, şarj süresi ve istasyon tasarımı bu tez kapsamında sayısal olarak modellenmemiştir [29, 74].

İnsansız Hava Araçları (İHA), tasarım ve operasyonel karakteristiklerine göre temel olarak döner kanatlı, sabit kanatlı ve dikey iniş-kalkış yapabilen hibrit (VTOL) platformlar olmak üzere farklı kategorilere ayrılmaktadır. Döner kanatlı sistemler, yüksek manevra kabiliyeti ve noktasal gözetleme yeteneklerine karşın; özellikle uzun süreli devriye görevlerinde enerji tüketimi ve menzil açısından belirgin aerodinamik kısıtlar barındırmaktadır. Buna karşın, aerodinamik kaldırma kuvvetinden faydalanan sabit kanatlı sistemler, aynı enerji bütçesiyle daha yüksek havada kalış sürelerine ulaşarak geniş alanların sistematik biçimde taranmasına daha elverişli bir zemin sunmaktadır. Bu bağlamda sürekli gözetleme görevlerinde sabit kanatlı İHA'lar, birim enerji başına kapsanan alan verimliliği ve kararlı seyir rejimleri sayesinde düzenli ve geniş ölçekli kapsama örüntüleriyle daha uyumlu bir operasyon yapısı sergilemektedir. Bu nedenle, sürekli ve tekrarlı kapsama hedefinin öne çıktığı erken tespit görevlerinde sabit kanatlı platformların daha uygun bir seçenek olduğu değerlendirilmektedir [29, 74, 75].

Görev devri döngüsü yalnızca kapsama sıklığını artırmakla kalmaz; aynı zamanda sistemin dayanıklılığını da yükseltir. Herhangi bir İHA'nın arıza, kaza veya haberleşme kaybı ile devre dışı kalması durumunda kalan araçların görev yükünü yeniden dağıtabilmesi, tek noktadan arıza hassasiyetini azaltarak zarif bozulma (graceful degradation) avantajı sağlar. Bu nedenle sürü mimarisinin başarısı yalnızca platform parametreleriyle değil; eşgüdüm ve görev planlama kararlarının etkinliğiyle de belirlenir [29, 75].

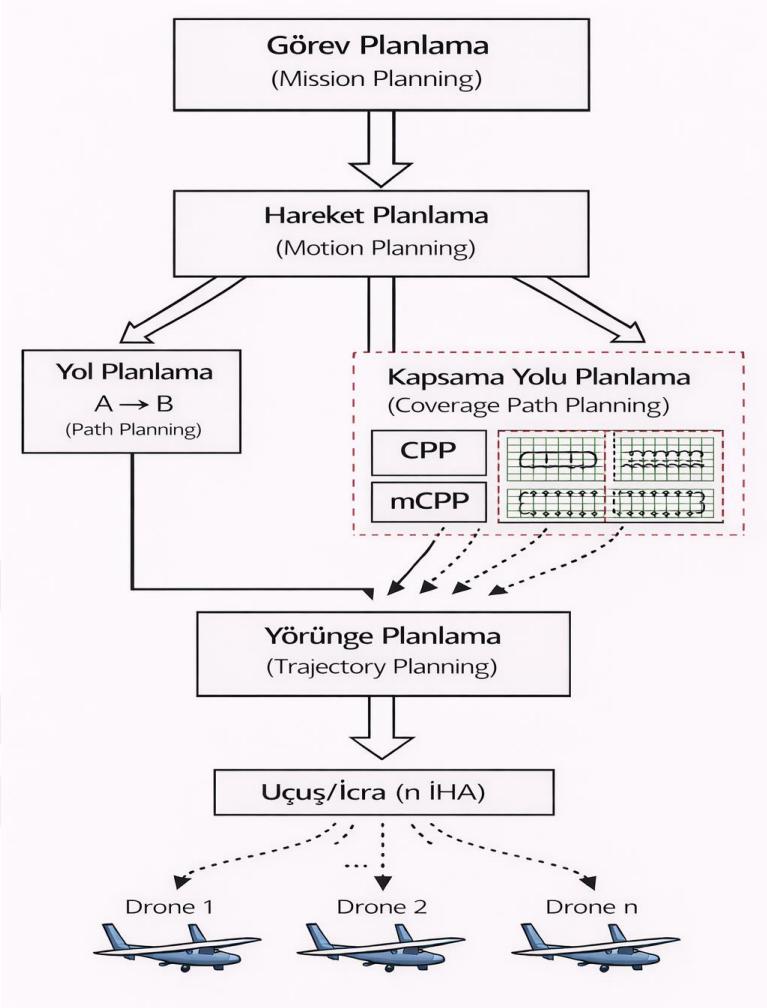
Bu çalışmada görev devri döngüsü, iki İHA'nın karşılıklı (ardışık) çalışması mantığı ile açıklanabilir: İHA-1 görev sahasında kapsama uçuşunu sürdürürken, İHA-2 otomatik iniş–kalkış altyapısı üzerinden istasyonda şarj/batarya değişimi işlemini tamamlar; planlanan görev devri zamanlaması geldiğinde İHA-2 görevi devralır ve bu kez İHA-1 istasyona döner. Böylece kapsama faaliyeti kesintiye uğramadan sürdürülür. "Kaldığı yerden devam" ilkesi ise, kapsama görevinin planlama düzeyinde bir kapsama durumu / kalan iş listesi olarak temsil edilmesi ve görev devrinde yeni aktif aracın kalan kapsama işini devralacak şekilde görevlendirilmesiyle sağlanır [29, 75].

Son olarak, bu operasyonel konsept altında planlama problemi doğal biçimde CPP/mCPP çerçevesine indirgenmekte olup, görev sahasının araçlar arasında dengeli bölünmesi (mCPP/bölütleme–atama) ve her alt bölgede sistematik kapsama yolunun üretilmesi (CPP/bölge içi rota) temel bileşenlerdir. Bu indirgeme, Şekil 7'de üstten alta doğru "Harita/ROI → Bölütleme (mCPP) → Bölge İçi Tarama (CPP)" akışıyla açıkça gösterilmekte; görev devri döngüsü ise bu iki bileşenin "sürekli gözetleme" hedefiyle bütünleştiği üst çerçeveyi oluşturmaktadır. Böylece erken tespit problemi, yalnızca sensör ve platform seçimi değil, aynı zamanda görev devri optimizasyonu bağlamında ele alınması gereken bir görev planlama problemi olarak yeniden çerçevelendirilmektedir [5].

1.9. Görev Planlama Hiyerarşisi ve Kapsama Planlama Yaklaşımları

Orman yangınlarının erken tespiti ve müdahale başarısı, yalnızca sensör ve platform kapasitesine değil; görevlerin nasıl tasarlandığı, kaynakların nasıl tahsis edildiği ve saha operasyonunun nasıl planlandığına da doğrudan bağlıdır. Bu nedenle erken tespit odaklı insansız hava aracı (İHA) uygulamaları literatürde çoğunlukla görev planlama (mission planning) şemsiyesi altında ele alınır. Görev planlama; hedeflerin (ör. riskli bölgelerin sürekli gözetlenmesi, yeniden ziyaret süresinin azaltılması), kısıtların (enerji/endürans, hava koşulları, haberleşme, güvenlik) ve kaynakların (İHA sayısı, sensörler, istasyonlar) birlikte değerlendirildiği üst seviye bir karar problemidir [80, 81].

Bu hiyerarşik yapıdaki ilişkiler ve bu çalışmanın odak noktası Şekil-8 üzerinden gösterilmektedir.



Şekil 8. CPP/mCPP'nin hareket planlama hiyerarşisindeki konumu

Görev planlamanın altında yer alan hareket planlama (motion planning), sahada icra edilecek hareketin hangi temsiller üzerinden üretileceğini belirler. Literatürde yaygın ayrım, yol planlama (path planning) ve yörünge planlama (trajectory planning) arasındadır: yol planlama engeller altında çarpışmasız geometrik rotayı (A→B) üretirken; yörünge planlama bu rotayı araç dinamik/kinematik kısıtları (ör. hız–ivme limitleri, minimum dönüş yarıçapı) altında zamana bağlı ve uçulabilir biçimde gerçekler [81]. Bu çalışmada amaç "A'dan B'ye en kısa sürede ulaşma" değil, belirli bir alanın sistematik biçimde taranması olduğundan, kapsama yolu planlama hareket planlama ailesi içinde ayrı bir alt problem sınıfı olarak ele alınmakta; üretilen yol/kapsama çıktılarının uçuşa uygun hâle getirilmesi ise yörünge planlama katmanında değerlendirilmektedir.

Kapsama yolu planlama (coverage path planning), erişilebilir alanın boşluk bırakmadan taranmasını hedefler; bunu yaparken yol uzunluğu, görev süresi (makespan), dönüş sayısı

ve tekrar tarama oranı (overlap) gibi maliyetleri sınırlamayı amaçlar [80, 81]. Tek araç için problem Coverage Path Planning (CPP), çoklu araç için Multi-Agent Coverage Path Planning (mCPP) olarak adlandırılır [81]. mCPP'de rota üretimine ek olarak alanın araçlar arasında paylaştırılması (bölütleme/atanım) ve koordinasyon ilkeleri de tasarımın parçasıdır [81, 82].

Bu çalışma, erken tespit bağlamında alan bölütleme/atanım (mCPP) ve alt bölgede kapsama rotası üretimi (CPP) adımlarını birlikte ele almakta; yöntemlerin ızgara (grid) tabanlı harita temsili üzerinde tutarlı biçimde uygulanmasını ve ortak metriklerin üretilebilmesini temel tasarım ölçütü olarak benimsemektedir [14]. Başarım değerlendirmesinde, yol uzunluğu/görev süresi, kapsama oranı, tekrar tarama oranı ve dönüş sayısı gibi ölçütlere ek olarak çoklu araçta iş yükü dengesi (araçlar arası yol/süre dağılımı) özellikle dikkate alınmaktadır [14, 83].

CPP literatüründe yöntemler genel olarak geometrik desen tabanlı (ör. paralel şerit tarama/lawnmower, spiral), hücresel ayrışım tabanlı (ör. trapezoidal ayrışım, boustrophedon hücresel ayrışım) ve ızgara/çizge tabanlı (ör. STC ve benzeri çizge dolaşım yaklaşımları) çerçevelerinde ele alınmaktadır [14, 80, 81, 83]. Öte yandan mCPP literatürü; alanın çoklu araçlara bölünmesi ve iş yükünün dengelenmesi açısından Voronoi ve türevleri, grid tabanlı atanım yaklaşımları (DARP benzeri), hiyerarşik/katmanlı bölme şemaları (BSP/ORB) ve maliyet/risk haritalarına duyarlı yöntemler (watershed benzeri) gibi farklı aileler içermektedir [82, 84- 87].

Bu çalışmada MATLAB tabanlı simülatörde, mCPP tarafında DARP, Voronoi, Power Voronoi, trapezoidal/boustrophedon, BSP/ORB ve watershed; CPP tarafında ise lawnmower, spiral-STC, STC, Dubins lawnmower ve Euler–Postman yaklaşımları kullanılmıştır. Bu seçimin temel gerekçesi, literatürdeki ana yaklaşım ailelerini temsil eden ve aynı zamanda bu çalışmada benimsenen grid tabanlı çevre temsiliyle uyumlu yöntemlerin bir arada değerlendirilmesidir. Böylece hem "baz çizgi" niteliğinde, yaygın ve yorumlanabilir çözümler (lawnmower, BCD, STC) hem de çoklu araçta iş yükü dengesi ve heterojenlik gibi pratik gereksinimleri yansıtan bölütleme/atanım yöntemleri (DARP, Voronoi/Power Voronoi, watershed) aynı değerlendirme çerçevesinde karşılaştırılabilir hâle gelmektedir [14, 80, 81, 85-87].

Bu kapsamda, çalışmada kullanılan yöntem seti; problem katmanı, yöntem ailesi, simülatördeki rol ve seçilme gerekçesi boyutlarıyla Tablo 3'te kompakt biçimde özetlenmiştir. Bu bölümde amaç, CPP/mCPP algoritmalarını ayrıntılı olarak türetmekten ziyade, ele alınan problem sınıfını görev planlama hiyerarşisi içinde konumlandırmak ve kullanılan yöntem ailesini ana hatlarıyla gerekçelendirmektir. CPP/mCPP'nin formülasyonu, uygulama adımları, performans metrikleri ve MATLAB simülatöründeki algoritmik akış bir sonraki bölümde sunulacaktır.

Tablo 3. Bu çalışmada kullanılan CPP/mCPP algoritmaları

Katman	Algoritma	Yöntem sınıfı	Simülatörde rol/çıktı	Seçilme gerekçesi	Kaynak
mCPP	Voronoi	Geometrik bölütleme	Alt bölge ataması	Basit–hızlı, yorumlanabilir	[84]
mCPP	Power Voronoi	Ağırlıklı bölütleme	Ağırlıklı alt bölge ataması	Heterojenlik (kapasite/endurans)	[85]
mCPP	DARP	Grid tabanlı atanım	Dengeli/bitişik alt bölgeler	İş yükü dengesi, grid uyumu	[86]
mCPP	Trapezoidal / Boustrophedon	Hücresel ayrışım	Engel-uyumlu alt hücreler	Engel uyumu, klasik yaklaşım	[80]
mCPP	BSP / ORB	Hiyerarşik bölme	Hiyerarşik alt bölge üretimi	Ölçeklenebilir, hızlı bölme	[82]
mCPP	Graph tabanlı Multi-Source BFS	Hiper-graf bölütleme	Topoloji duyarlı hiyerarşik bölge	Risk duyarlılığı, klasik yaklaşım	[83]
mCPP	Watershed	Maliyet/risk-haritası tabanlı	Risk/maliyet duyarlı bölütleme	Risk duyarlılığı, topoğrafik ayrım	[87]
CPP	Lawnmower	Geometrik desen	Yerel kapsama rotası	Bas-çizgi, sade ve kıyaslanabilir	[14, 83]
CPP	Spiral–STC	Grid/çizge tabanlı	Yerel kapsama rotası	Grid uyumu, sistematik tarama	[81]
CPP	STC	Spanning-tree tabanlı	Tam kapsama rotası	Engelli gridde güçlü, yaygın	[14, 81]
CPP	Dubins Lawnmower	Kinematik kısıtlı	Min. dönüş yarıçapı ile rota	Gerçekçi kinematik uyum	[88]
CPP	Euler–Postman	Çizge turu	Çizge üzerinde tur üretimi	Alternatif graph-tabanlı kıyas	[89]

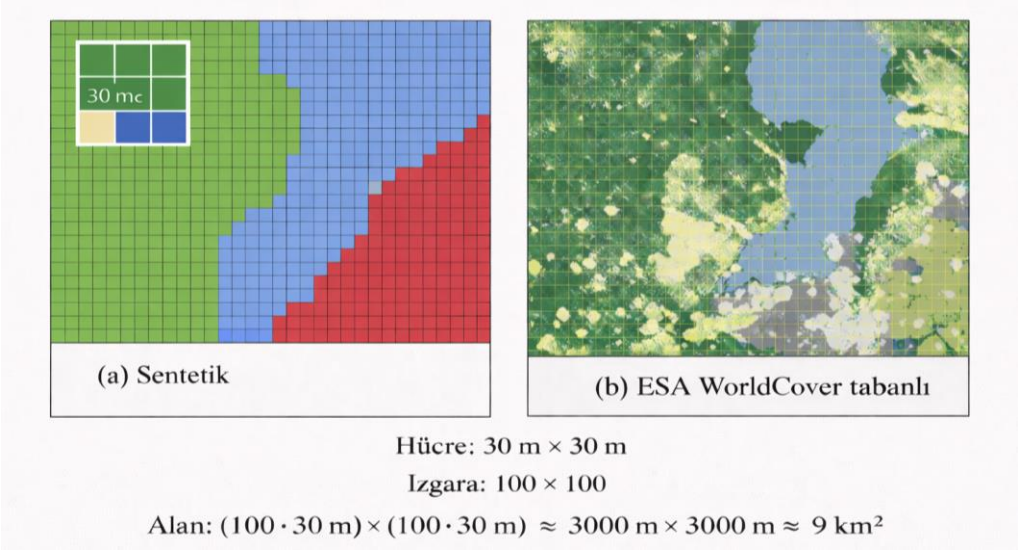
1.10. Sürü İHA'larda Kapsam Planlaması İçin Kullanılacak Haritalar

Gerçek dünya gözlem ve devriye görevlerinde "kapsanacak alan" çoğunlukla homojen değildir; bitki örtüsü yoğunluğu, yerleşim dokusu, su yüzeyleri, çıplak zemin ya da tarımsal alanlar gibi farklı arazi örtüsü sınıfları hem algılama olasılığını hem de operasyonel maliyeti (uçuş süresi/enerji, manevra sayısı, güvenlik riski) değiştirmektedir. Bu nedenle klasik CPP yaklaşımlarında sık görülen "tüm grid hücreleri eşit önemdedir"

varsayımı, heterojen sahalarda gereksiz tarama (ör. düşük ilgi/erişilebilirlikte bölgeler) veya kritik bölgelerde yetersiz yoğunluk gibi sonuçlara yol açabilmektedir [90].

Heterojenliğin nicel biçimde modele dâhil edilmesinin yaygın bir yolu, arazi sınıflandırma araçlarından türetilen önem/risk haritaları ile kapsama problemini ağırlıklandırmaktır. Özellikle uydu tabanlı sınıflandırma veri setleri; geniş alanlarda tutarlı sınıf tanımları, çok sınıflı tematik yapı ve düzenli güncellemeler nedeniyle görev tahsisi ve kapsama planlama çalışmalarında girdi katmanı olarak tercih edilmektedir. Örneğin ESA WorldCover 2021 küresel ölçekte 10 m çözünürlükte arazi örtüsü sınıfları sunarak "orman–tarım–yerleşim–su–çıplak zemin" gibi ayrımları tek tip bir şemada elde etmeyi mümkün kılar [16]. Benzer şekilde CORINE Land Cover (CLC), Avrupa ölçeğinde standart sınıflandırma sistemi (44 sınıf), minimum haritalama birimi ve doğruluk hedefleriyle Avrupa arazi örtüsü envanteri sağlayarak özellikle bölgesel risk/önem katmanlarının üretilmesinde temel kaynaklardan biridir [91].

Literatürde bu yaklaşım, kapsama hedefinin "tam kapsama"dan "öncelikli/ödül tabanlı kapsama"ya genişletilmesiyle formüle edilir. Ağırlıklandırılmış Kapsama Yol Planlama (WCPP) çerçevesinde her konum için bir öncelik/olasılık (ödül) dağılımı tanımlanır ve planlayıcı, yalnızca geometriyi değil önem yoğunluğunu da maksimize edecek biçimde yol üretir; bu kurgu özellikle arama-kurtarma veya gözetim gibi hedef varlık olasılığının uzamsal olarak değiştiği görevler için tipiktir [92]. Bununla ilişkili biçimde, keşif/kapsama planlamasına gezinilebilirlik riski gibi maliyet bileşenleri ekleyen çalışmalarda, heterojen çevrelerde "en kısa yol" yerine "güvenli ve faydalı kapsama" dengesinin kritik olduğunu göstermektedir [93].



Şekil 9. Sentetik ve ESA WorldCover tabanlı haritaların 30 m grid temsili

Harita temsilinin çözünürlüğü seçiminde yalnızca veri mevcudiyeti değil, erken tespit için hedeflenen sürekli/periyodik gözetleme konseptinin pratik işletim kısıtları da belirleyicidir. Bu çalışmada kullanılan sentetik ve ESA WorldCover tabanlı görev alanı haritalarının seçilen ızgara (grid) temsiline indirgenmesi ve buna karşılık gelen ölçek Şekil 9'da gösterilmektedir. Çok daha yüksek çözünürlüklü haritalar (örn. 10 m ve altı) ayrıntıyı arttırsa da, problem boyutunu büyüterek planlamayı gereksiz biçimde karmaşıklaştırabilir ve konseptin odağı olan enerji verimli, düzenli devriye/kapsama üretiminden uzaklaşma riski doğurabilir. Bu nedenle seçilen orta çözünürlüklü grid temsili, sabit kanatlı İHA'ların geniş alanlarda verimli tarama yapabilmesi ve dönüş/manevra sınırlarıyla uyumlu kapsama rotalarının üretilebilmesi açısından pratik bir denge sunmaktadır. Böylece istasyon destekli görev devri döngüsü altında periyodik kapsama yürütmeyi hedefleyen yaklaşımın planlama katmanına (CPP/mCPP) doğrudan girdi sağlanmaktadır [16, 91].

1.11. Afet Yönetimi Sistemleri ve Yangın Planlama Dinamikleri

Deprem, sel/taşkın, heyelan ve endüstriyel kazalar gibi afetlerde havadan gözlem; hızlı durum farkındalığı sağlamak, hasar ve etki düzeyini haritalamak ve müdahale kararlarını desteklemek amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Geniş alanların kısa sürede değerlendirilmesini gerektiren senaryolarda uydu sistemleri ile insanlı ve insansız hava platformlarından üretilen ortofoto ve tematik haritalar; arama-kurtarma, lojistik planlama

ve kritik altyapı önceliklendirme süreçlerine doğrudan girdi sağlamaktadır [91, 94]. Farklı afet türleri ile hava platformlarının tipik kullanım rollerine ilişkin özet bir karşılaştırma Şekil 10'da sunulmaktadır.

Deprem sonrası çalışmalarda uzaktan algılama verileri ağırlıklı olarak bina hasar tespiti ve sınıflandırmasına odaklanmakta; yüksek çözünürlüklü görüntüler, 3B nokta bulutları ve derin öğrenme tabanlı yöntemlerle hasar göstergeleri üretilebilmektedir [95, 96]. Bu bağlamda İHA'lar, erişimi kısıtlı alanlarda esnek uçuş geometrisi ve yüksek mekânsal çözünürlük avantajı sunmaktadır [97]. Sel ve taşkın afetlerinde SAR uydu verileri, bulutluluk ve aydınlatma kısıtlarından bağımsız çalışabilmesi nedeniyle yaygın biçimde kullanılırken; yerel ölçekte İHA tabanlı fotogrametri, taşkın yayılımı ve altyapı erişilebilirliğinin daha hassas değerlendirilmesine olanak tanımaktadır [98, 99]. Heyelan çalışmalarında ise İHA ve LiDAR tabanlı yüksek çözünürlüklü yüzey modelleri, deformasyon ve kütle hareketlerinin izlenmesinde tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir.

Afet tipi	Uydu	İnsanlı hava aracı	Sabit kanat İHA	Multikopter İHA	Hibrit / VTOL İHA
Deprem	●	◐	◐	●	◐
Sel / Taşkın	●	◐	●	◐	◐
Heyelan	◐	◐	◐	●	◐
Orman yangını	●	●	◐	◐	●
Endüstriyel kaza	○	◐	○	●	◐

Açıklama: ● yaygın/birincil kullanım | ◐ sık kullanılan (tamamlayıcı) | ○ duruma bağlı/sınırlı | — tipik değil

Şekil 10. Afet tipi-hava platformu türü arasındaki tipik eşleşmeler

1.12. Literatürün Değerlendirilmesi ve Araştırma Boşluğu

Afet yönetimi literatürünün önemli bir ortak paydası, senaryoların büyük ölçüde olay sonrası ve görece süreksiz veri toplamaya dayanmasıdır. Orman yangınlarında ise problem yalnızca hasar haritalama değil; erken tespit ile sürekli izleme gereksinimlerinin birlikte ele alınmasıdır. Bu nedenle yangın bağlamında platform seçimi kadar, sürekli kapsama ihtiyacını maliyet/enerji kısıtları altında karşılayacak görev planlama ve kapsama stratejileri belirleyici hâle gelmektedir.

Bu çalışmada yapılan literatür incelemesi, yangın yönetiminin “yanan alan” gibi tek bir çıktıyla açıklanamayacak; iklimsel eğilimler, kaynak kısıtları ve operasyonel zaman baskısı altında yönetilen çok katmanlı bir karar problemi olduğunu göstermiştir. Görev planlama ve alt katmanlarında (hareket/yol/yörünge planlama) olgun yöntem aileleri bulunsa da hızlı evrilen yangın senaryolarında operasyonel başarımı belirleyen kritik eşik çoğu zaman tespit–ilk müdahale penceresinin zamanında yakalanmasıdır. Tespit geciktiğinde, planlama katmanları ne kadar iyi kurgulanırsa kurgulansın müdahale başarımının hızla düşebildiği görülmektedir.

Bu çerçevede araştırma boşluğu, erken tespit hedefinin pratikte “sürekli gözetleme” ve yeniden ziyaret süresinin (revisit time) azaltılması gereksinimleri üzerinden tanımlanmasıyla belirginleşmektedir. Bu gereksinimler, tekil hedefe ulaşma odaklı planlama problemlerinden ziyade, alanın sistematik taranmasına dayalı kapsama planlama problem sınıfına (CPP/mCPP) odaklanmayı gerektirir. Dolayısıyla bu tez, erken tespit dar boğazını merkeze alarak çoklu İHA senaryosunda alan bölütleme/atanım (mCPP) ve alt bölgede kapsama rotası üretimi (CPP) adımlarını bütünleşik bir değerlendirme çerçevesinde ele almaktadır. Bu yaklaşım, tek bir platformun kapasitesini artırmaktan çok, filonun işletim ve eşgüdüm kararlarıyla sürdürülebilir bir görev döngüsünün kurulmasını hedefler; geniş alan devriyesinde enerji verimliliği nedeniyle sabit kanatlı platformların öne çıkması ve endürans kısıtını aşmak için istasyon temelli görev devri mantıklarının tamamlayıcı rolü bu bağlamda önem kazanmaktadır.

İzleyen bölümde CPP/mCPP algoritmalarının formülasyonları ve uygulama adımları ile MATLAB tabanlı simülatördeki algoritmik akış sunulacaktır. Yöntemler; kapsama oranı, toplam yol uzunluğu ve görev süresi, tekrar tarama oranı, dönüş sayısı ve iş yükü dengesi gibi metriklerle karşılaştırılarak sürekli gözetleme bağlamındaki performansları nicel olarak değerlendirilecektir.

2. BÖLÜM

GÖREV PLANLAMA VE HARİTA ÜRETİMİ

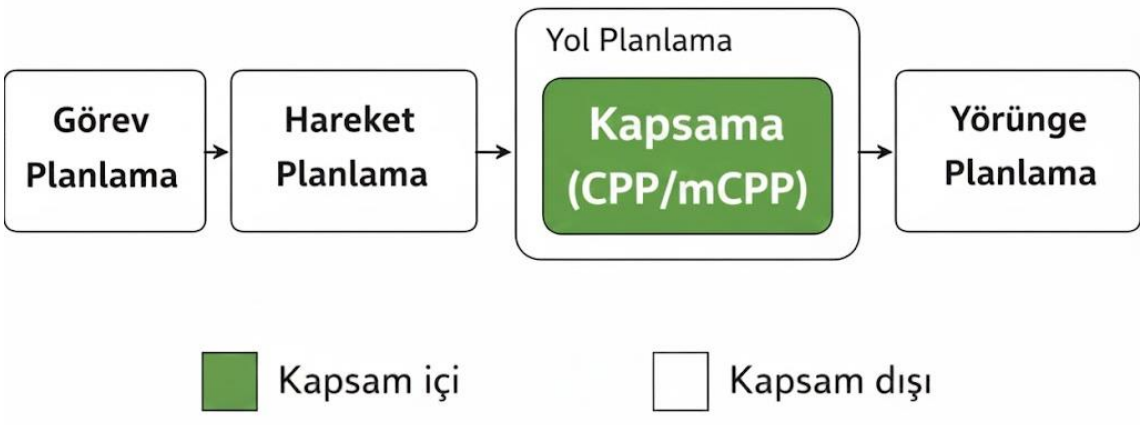
Bu bölümde, çalışmanın yöntemsel omurgasını tekrarlanabilir biçimde tanımlamak üzere kurgulanmıştır. Bölüm 1'de sunulan literatür ve kavramsal arka plan üzerine inşa edilerek, bu çalışmada çözülen problemin hangi problem sınıfına ait olduğu, hangi veri/harita temsili üzerinden modellendiği, kullanılan algoritmaların hangi işlem sırası ile çalıştırıldığı ve performansın hangi nicel ölçütlerle değerlendirildiği açık ve sistematik bir çerçeve içinde verilecektir. Bu bağlamda, çalışma; erken tespit amaçlı sürü tabanlı gözetleme konseptinde, bilinen/önceden üretilmiş bir arazi haritası üzerinde kapsama planı üretmeye odaklanan bir CPP/mCPP problemine indirgenmekte; algoritmaların ürettiği bölütleme sonuçları, kapsama yolları ve görev çıktıları ortak bir değerlendirme protokolü ile karşılaştırılmaktadır.

Bölümün akışı şu şekildedir: Öncelikle çalışmanın görev planlama hiyerarşisi içindeki konumu ve kapsam sınırı özetlenerek, bu çalışmanın neden "kapsama planlama" katmanında konumlandığı netleştirilir. Ardından ESA WorldCover 2021 tabanlı harita verisinin web arayüzü üzerinden alınarak 100×100 grid temsiline dönüştürülmesi ve farklı arazi sınıfları üzerinden senaryo setinin oluşturulmasına ilişkin materyal ve haritalama adımları verilir. Takiben, CPP ve mCPP problemlerinin bu çalışmadaki konumu ve belirlenen yöntemlerin neden seçildiği açıklanmaya çalışılır. Bu çerçeve üzerinde, çalışmada kullanılan mCPP algoritmaları (Voronoi, Power Voronoi, DARP, Trapezoidal/Boustrophedon, BSP/ORB, Graph-based Multi-Source BFS ve Watershed) ile CPP algoritmaları (Lawnmower, Spiral–STC, STC, Dubins Lawnmower ve Euler–Postman) yöntemsel rol ve çıktı türleri bakımından yapılandırılır.

2.1. Otonom Görev Planlama Hiyerarşisi ve Çalışmanın Kapsam Sınırı

Görev Planlama (mission planning), otonom (veya yarı-otonom) sistemlerde birden fazla aracın ve sensörün eşgüdümlü hedefleri gerçekleştirecek biçimde organize edilmesini; hedeflerin, kaynakların ve operasyonel kısıtların birlikte ele alındığı üst seviye karar-verme problemini ifade etmektedir. Bu çerçevede görev planlama; *ne yapılacak, kim yapacak, hangi sırayla yapılacak ve saha koşulları değiştikçe plan nasıl güncellenecek* sorularını kapsayan bir çatı katman olarak konumlanmaktadır [75].

Robotik planlama literatüründe görev planlamanın altında yer alan hareket planlama (motion planning) katmanı, İHA'nın çevre içinde güvenli ve uygulanabilir hareketini sağlayacak kararların üretilmesiyle ilgilenmektedir ve çoğu çalışmada iki alt probleme ayrıştırılmaktadır. Bunlar, yol planlama (path planning) ve rota planlamadır (trajectory planning) [100- 102]. Bu ayrım pratikte, yol planlamanın "nereden geçileceğini" (uzamsal yol), yörünge planlamanın ise "ne zaman ve hangi hız/ivme profiliyle geçileceğini" (zamansal profil) belirlemesi anlamına gelmektedir [101, 102]. Bu çalışmada ele alınan problem ailesinin bu hiyerarşi içindeki konumu Şekil 11'da gösterilmektedir.



Şekil 11. Görev Planlama Hiyerarşisi ve CPP/mCPP' nin Konumu

Görev planlama bağlamında sık karşılaşılan bir diğer alt görev görev tahsis / görev atama (task allocation / task assignment) problemidir. Çoklu İHA sistemlerinde hangi görevin hangi İHA'ya (veya İHA takımına) atanacağı; performans, maliyet ve kısıtlar altında ayrı bir optimizasyon problemi olarak ele alınır ve literatürde çoklu-robot görev atama (MRTA) taksonomisi ile sistematik biçimde sınıflandırılmaktadır [103]. Görev atama

çıktıları, özellikle çoklu araçlı kapsama görevlerinde, hangi aracın hangi bölgeyi tarayacağını belirleyerek hareket planlama katmanında üretilecek yol/yörünge kararlarını doğrudan etkilemektedir [103].

Saha koşullarında belirsizlik ve değişim söz konusu olduğunda (ör. yeni engellerin keşfi, maliyet haritalarının güncellenmesi, hedeflerin değişmesi), planın izleme ve yeniden planlama (monitoring / replanning) döngüsüyle güncellenmesi gerekmektedir. Bu gereksinim, robotik literatürde artımlı/çevrimiçi yeniden planlama yöntemleriyle (ör. D* Lite) standart bir problem ailesi olarak ele alınmaktadır [104].

Bu çalışma, yukarıdaki hiyerarşi içinde *yol planlama* sınıfına girmektedir. Klasik *yol planlama* genellikle başlangıç–hedef arasında uygun/en iyi rotayı bulmaya odaklanırken, kapsama yolu planlama bir alanın tamamını (veya hedeflenen alt-kümeyi) belirli ölçütlere göre sistematik biçimde taramayı amaçlayan ayrı bir problem ailesidir [14, 83]. Çoklu araç söz konusu olduğunda problem mCPP'ye genişlemektedir:

i. Alanın araçlar arasında bölütlenmesi ve her alt bölgenin bir İHA'ya eşlenmesi

ii. Her İHA'nın kendi bölgesi içinde kapsama yolu üretimi birlikte değerlendirilir [14].

Bu çalışmada geçen "atama/eşleme" ifadesi, MRTA literatüründeki genel görev tahsisi probleminden farklı olarak kapsama görevine özgü geometrik alan bölütleme çıktısı (alt bölge–İHA eşlemesi) anlamındadır. Dolayısıyla heterojen görev/araç eşlemesi, fayda/ödül fonksiyonlarına dayalı görev seçimi, dinamik görev listeleri ve çevrimiçi yeniden atama gibi MRTA bileşenlerini içeren genel bir görev atama problem sınıfı bu çalışma kapsamında çözülmemektedir. Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan CPP ve mCPP algoritmaları, kapsama görevinin bu iki aşamalı yapısına karşılık gelen farklı çözüm ailelerini temsil etmektedir.

Bu çalışma, önceden bilinen (offline) harita temsili üzerinde (100×100 grid) mCPP ile bölütleme/atama ve CPP ile kapsama yolu üretimi adımlarını çalıştırmakta; ardından ortaya çıkan görev çıktıları metrik tabanlı biçimde karşılaştırılmaktadır. Buna karşılık söndürme unsuru tahsisi, yangın yayılım modeliyle çevrimiçi yeniden planlama, algılama/sensör füzyonu ve haberleşme gecikmesi gibi bileşenler bu

çalışmanın kapsamı dışındadır; bu bileşenler görev planlama ailesi içinde farklı katmanlarda ele alınan ve farklı veri/model varsayımları gerektiren problem sınıflarıdır [75, 101, 103, 104]. Bu kapsam sınırı, katman bazında Tablo 4'de özetlenmektedir.

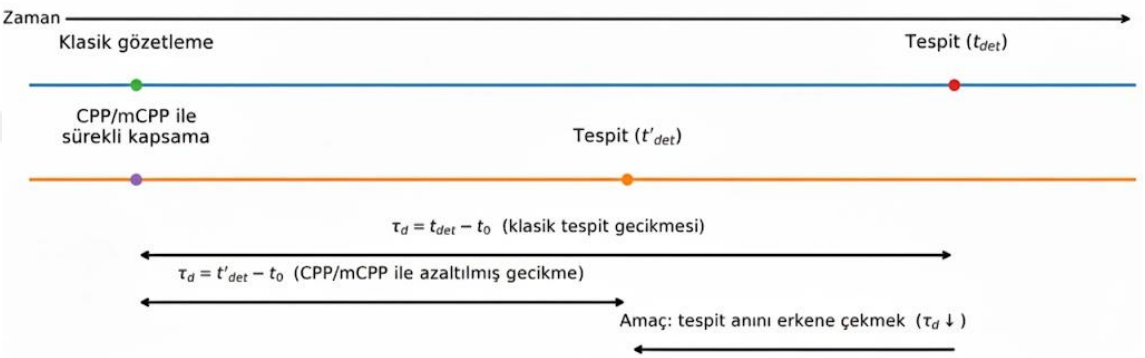
Tablo 4. Bu çalışma ne yapıyor / ne yapmıyor? (Katman bazlı kapsam sınırı)

Katman / bileşen	**Katmanın karara odağı**	**Çalışmada ele alınma biçimi**	**Çalışmadaki çıktısı**	**Kaynak**
Görev planlama	Görev hedeflerini, başarı ölçütünü ve kısıtları tanımlar (ne/niçin).	Konumlandırma (kavramsal)	—	[6, 75]
Görev tahsisi / Çoklu İHA görev atama (MRTA)	Heterojen görev/araç eşlemesi, ödül/fayda fonksiyonlarına dayalı görev seçimi, dinamik görev listesi ve çevrimiçi yeniden atama (kim, hangi görevi alır?).	Kapsam dışı	—	[103]
Kapsama Planlama (mCPP + CPP)	Alanı İHA'lar arasında alt bölgelere ayırır ve her İHA için kapsama rotası üretir (nasıl taranır).	Ana yöntem (uygulama + karşılaştırma)	Geometrik alt bölge–İHA eşlemesi (mCPP) + kapsama yolu/waypoint (CPP)	[14, 83]
Yörünge Planlama	Yolun zaman-parametreli ve dinamik/kinematik olarak uygulanabilir sürümünü üretir (ne zaman/hangi profil).	Kapsam dışı	—	[101, 102]
İzleme / Yeniden Planlama	Çevre/koşullar değiştiğinde planı günceller (nasıl uyarlanır).	Kapsam dışı	—	[104]
Algılama + icra/müdahale katmanı	Sensör verisiyle tespit/doğrulama yapar ve icra/müdahaleyi tetikler (ne oldu/ne yapılır).	Kapsam dışı	—	[75]

2.2. Erken Tespit Görevinin Kapsama Problemine İndirgenmesi

Erken tespit, orman yangını yönetim zincirinde (tespit–doğrulama–izleme–müdahale) yalnızca kronolojik olarak ilk adım değil; aynı zamanda sonraki adımların ne kadar erken başlatılabileceğini ve hangi etkinlikle yürütülebileceğini belirleyen kritik bir eşiktir. Yangın davranışının kısa zaman ölçeklerinde hızla değişebilmesi nedeniyle, tespit gecikmesi arttıkça yangının yayılımı ve şiddeti büyüyebilmekte; bu durum aynı müdahale kaynaklarıyla kontrol altına alma olasılığını düşürerek daha yüksek koordinasyon ve kaynak ihtiyacını tetikleyebilmektedir [66]. Bu nedenle, söndürme kapasitesinin ve müdahale metodolojilerinin olgunlaşmış olması tek başına yeterli değildir; birçok

senaryoda operasyonel başarımı belirleyen temel darboğaz, zamanında tespit ve buna bağlı olarak "müdahale penceresi"nin kaçırılmamasıdır [66]. İHA tabanlı izleme ve sürü robotik yaklaşımları, bu darboğaza doğrudan temas ederek geniş alanlarda daha sık/planlı gözetleme ile tespit gecikmesini düşürmeyi ve böylece doğrulama–ilk müdahale hattının daha erken tetiklenmesini hedefler [74, 75]. Bu çalışmada problem seçimi ve yöntem kurgusu da erken tespitin belirleyiciliğini "planlama katmanı" düzeyinde ele alarak tespit gecikmesini azaltma motivasyonuna dayanmaktadır [66, 74].



Şekil 12. Klasik Gözetleme ile CPP/mCPP Temelli Sürekli Kapsama Arasındaki Tespit Gecikmesi

Bu motivasyon, Şekil 12' da kavramsal olarak gösterilmektedir. Şekilde zaman ekseni üzerinde iki farklı gözetleme düzeni karşılaştırılmaktadır: Üst çizgi, yeniden ziyaret aralığı sınırlı olan klasik gözetleme düzenini (ör. kule/uydu/periyodik devriye) temsil eder ve tutuşma anı t_0 ile tespit anı t_{det} arasındaki gecikme $\tau_d = t_{det} - t_0$ ile ifade edilir. Alt çizgi ise CPP/mCPP ile üretilen planlara dayalı sürekli kapsama düzenini temsil eder; bu durumda tespit anının daha erkene çekilmesi $t'_{det} < t_{det}$ şeklinde kavramsallaştırılır ve azaltılmış gecikme $\tau'_d = t'_{det} - t_0$ ile gösterilir. Şekildeki oklar, temel hedefin tespit anını sola kaydırmak (yani τ_d'yi azaltmak) olduğunu vurgular. Bu görsel ölçekli bir zaman ölçümü sunmak için değil; bu çalışmanın araştırma sorusunun dayandığı mantığı (erken tespit → gecikmeyi azaltma → planlı kapsama ihtiyacı) okuyucuya tek bakışta aktarmak için kavramsal olarak tasarlanmıştır.

Bu çerçevede erken tespit görevi, yöntemsel olarak kapsama (coverage) problemine indirgenebilir: belirli bir çalışma alanının (veya risk/öncelik maskesi ile tanımlanan alt-kümelerinin), zaman/enerji gibi kısıtlar altında, bir veya birden çok İHA tarafından sistematik biçimde taranması ve böylece yeniden ziyaret süresinin ve/veya tespit

gecikmesinin azaltılması. Robotikte Coverage Path Planning (CPP), bir alanın tamamının veya hedeflenen alt bölgelerinin planlı biçimde taranması için yerleşik bir problem ailesidir [75], [14]. Çoklu İHA senaryosunda problem mCPP'ye genişleyerek iki temel bileşeni birlikte içerir: alanın araçlar arasında bölütlenmesi ve her alt bölgenin bir araca eşlenmesi her bir aracın kendi bölgesi içinde kapsama yolu üretmesidir [14].

2.3. Harita Üretimi ve Senaryo Seti

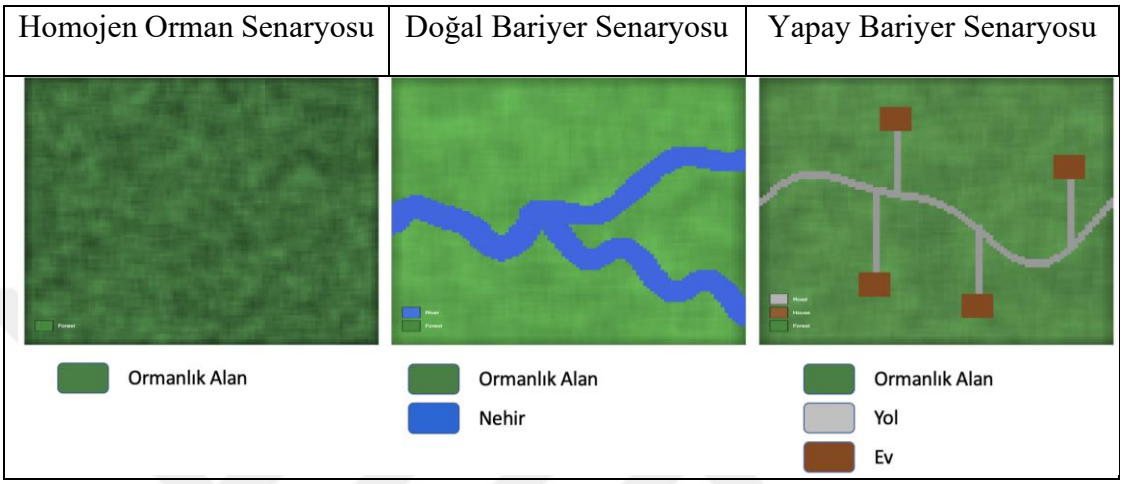
Bu çalışma kapsamında erken orman yangını tespiti problemi, mission planning hiyerarşisi içinde kapsama planlama (CPP/mCPP) problem sınıfına indirgenerek ele alınmaktadır. Bu indirgeme; erken tespit başarımını belirleyen kritik ihtiyacın, "yanabilir alanların sistematik biçimde taranması" ve "yeniden ziyaret süresinin azaltılması" gibi göstergeler üzerinden doğrudan ölçülebilir olmasına dayanmaktadır [14, 83].

Belirlenen amaç doğrultusunda çevre modellemesi iki tamamlayıcı hat üzerinden kurgulanmıştır. İlk aşamada, algoritmaların bariyer ve heterojenlik etkisi altındaki davranışlarını izole edebilmek amacıyla MATLAB ortamında Şekil 13'de sunulan üç farklı sentetik kontrol senaryosu tasarlanmıştır:

- Homojen Orman Senaryosu: Bölgenin bütünüyle yanıcı materyalden oluştuğu ve herhangi bir fiziksel engelin bulunmadığı bu senaryo, yayılımın en yüksek potansiyelde gerçekleştiği baz durumu temsil etmektedir.
- Doğal Bariyer (Nehir) Senaryosu: Orman dokusunu boydan boya kesen bir nehir modelinin eklendiği bu senaryoda, nehir doğal bir yanmaz alan (engel) olarak tanımlanmıştır. Bu sayede, yangın yayılımının yanıcı madde içermeyen su kütlesi gibi doğal bariyerlerle karşılaştığında algoritmaların sergilediği tutumun incelenmesi hedeflenmiştir.
- Yapay Bariyer ve Yerleşim (Ev/Yol) Senaryosu: Bu modelde, orman içerisindeki meskûn mahaller ve bu noktalara ulaşım sağlayan yol ağları ele alınmıştır. Senaryo temsili gereği, yollar ve yerleşim alanları yanmaz yüzeyler olarak kabul edilerek, algoritmaların insan eliyle oluşturulmuş yapay engeller ve parçalı arazi yapısı altındaki performansının test edilmesi amaçlanmıştır.

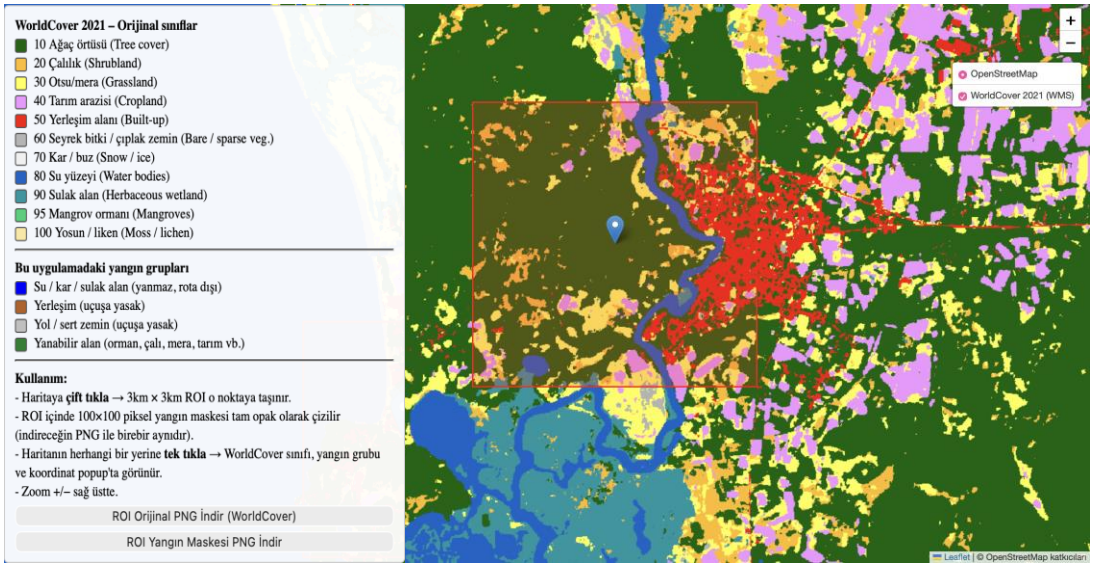
Söz konusu senaryolarla elde edilen sınıf kararlarını standart bir veri sözlüğüne oturtmak ve gerçek arazi temsiline yaklaşmak için ESA WorldCover 2021 veri seti üzerinden

seçilen bir ROI (region of interest) kullanılarak 100×100 grid tabanlı standart bir çevre modeli elde edilmiştir [16]. Bu metodoloji sayesinde, önerilen yöntemlerin hem kontrollü sentetik ortamlarda hem de gerçek dünya veri yapısıyla uyumlu temsiller üzerinde kapsamlı bir karşılaştırılması mümkün kılınmıştır.



Şekil 13. MATLAB ortamında oluşturulan sentetik senaryo haritaları

ESA WorldCover 2021 (v200) ürünü, küresel ölçekte 10 m çözünürlükte arazi örtüsü sınıfları sağlayan raster bir veri setidir [16]. Çalışmada WorldCover verisinden; yanabilir–yanamaz sınıflandırmasının nesnel bir temele dayandırılması, yöntemlerin gerçekçi sınıf bileşimleri altında test edilmesi ve tekrarlanabilir bir ROI tabanlı çevre temsili kurulması amacıyla yararlanılmıştır [16].



Şekil 14. Web arayüz ekran görüntüsü (ROI seçimi + WorldCover sınıfları + yangın grupları)

Hesaplama maliyetini yönetmek ve tüm algoritmalara standart veri girişi sağlamak amacıyla, ROI içerisindeki 10 m çözünürlüklü ham sınıf haritası 100×100 grid yapısına indirgenmektedir. Bu ölçekleme sonucunda her bir grid hücresi yaklaşık 30 m × 30 m alanı temsil etmektedir. İndirgeme işlemi sırasında, her hücre içerisindeki alt pikseller arasında baskın sınıf (majority class) kuralı işletilerek tek bir etiket belirlenmiştir. Bu standardizasyon, CPP/mCPP algoritmalarına ortak boyutta girdi sunarak yöntemler arası adil bir kıyaslama yapılmasına ve performans metriklerinin aynı ayrık uzay üzerinde tutarlı biçimde hesaplanmasına imkân tanımaktadır [14, 83].



Şekil 15. Harita üretimi akış hattı

Erken tespit odaklı operasyonlarda tüm hücrelerin eşit ağırlıkla taranması verimliliği düşürebilmektedir; zira yanmaz veya hedef dışı bölgelerin kapsanması yol uzunluğu, dönüş sayısı ve tekrar tarama maliyetini artırmaktadır [14, 83]. Bu nedenle WorldCover sınıfları, operasyonel hedeflerle uyumlu olacak şekilde iki ana "yangın grubu" altında yeniden yapılandırılmıştır:

- Yanabilir Alanlar (hedef kapsama): Ağaç örtüsü, çalılık, otsu/mera, tarım arazisi, mangrov ormanı, yosun/liken — WorldCover kodları [10, 20, 30, 40, 95, 100]
- Yanamaz Alanlar (hedef dışı / kısıt): Kar/buz, su yüzeyi, sulak alan, yerleşim alanı (evler), seyrek bitki, çıplak zemin ve yollar/sert zemin

Bu karar kuralı, kapsama planlamasının yalnızca yakıt sürekliliği bulunan hücrelere odaklanmasını sağlayarak karşılaştırmalı analizlerin operasyonel bir zemine oturmasına yardımcı olmaktadır [14, 83].

Tablo 5. WorldCover 2021 özgün sınıflar ve çalışmada kullanılan yangın grupları

WorldCover kodu	Özgün sınıf	Bu çalışmadaki yangın grubu	Planlama kararı
10	Ağaç örtüsü	Yanabilir alan	Taranır
20	Çalılık	Yanabilir alan	Taranır
30	Otsu/mera	Yanabilir alan	Taranır
40	Tarım arazisi	Yanabilir alan	Taranır
50	Yerleşim alanı	Yerleşim	Rota dışı (yanmaz)
60	Seyrek bitki / çıplak zemin	Yollar/sert zemin	Üzerinden Geçer (yanmaz))
70	Kar / buz	Su/kar/sulak alan	Üzerinden Geçer (yanmaz)
80	Su yüzeyi	Su/kar/sulak alan	Üzerinden Geçer (yanmaz)
90	Sulak alan	Su/kar/sulak alan	Üzerinden Geçer (yanmaz)
95	Mangrov ormanı	Yanabilir alan	Taranır
100	Yosun / liken	Yanabilir alan	Taranır

Sınıflandırma sonuçlarının kapsama problemine aktarımı, ayrık grid uzayı üzerinde tanımlanan ikili bir maske matrisi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kurguda, her bir hücrenin hedef (yanabilir) alan mı yoksa engel (yanmaz) alan mı olduğu belirlenerek bir karar kuralı uygulanmaktadır. Buna göre taranabilir hedef hücre kümesi tanımlanmakta; kapsama oranı ve tekrar tarama oranı (overlap) gibi performans metrikleri yalnızca bu hedef küme üzerinde hesaplanmaktadır [14, 83]. Engel olarak tanımlanan hücreler ise planlama ve başarı ölçümü süreçlerinde kapsam dışı tutulmuştur.

Grid tabanlı çevre modellemede hareket ve erişilebilirlik, temel bir komşuluk tanımı ile belirlenir. Literatürde, grid hücreleri arasındaki topolojik ilişkiler ve bölütleme (segmentation) işlemleri yaygın olarak 4-komşuluk (Von Neumann) veya 8-komşuluk (Moore) yapıları üzerinden kurgulanmaktadır. 8-komşuluk yapısı, diyagonal hareket serbestliği sağlayarak daha kısa ve az dönüşlü yollar üretilmesine olanak tanısa da, özellikle dar geçitlerde ve engel sınırlarında fiziksel gerçekçilikten uzak sonuçlar doğurabilmektedir [14, 83].

Bu bölümde, orman yangınlarının erken tespitine yönelik mevcut yaklaşımlar ile kapsama planlama ve çoklu İHA sistemlerine ilişkin materyaller incelenmiş; farklı yöntemlerin güçlü ve sınırlı yönleri ortaya konulmuştur. İncelenen çalışmalar, erken tespit başarımının sistematik tarama, yeniden ziyaret süresi ve görev alanının mekânsal özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, heterojen gerçek haritalar üzerinde sürekli gözetleme gereksinimini merkeze alan kapsama planlama uygulamalarının sınırlı biçimde ele alındığı görülmektedir.

Bir sonraki bölümde, bu değerlendirmelerden hareketle, erken orman yangını tespiti problemine yönelik olarak kullanılan CPP ve mCPP yaklaşımları, seçilen algoritmalar ve performans metrikleri ayrıntılı biçimde tanımlanmakta; çalışmada benimsenen yöntemsel çerçeve ve değerlendirme altyapısı sunulmaktadır.

3. BÖLÜM

KAPSAM PLANLAMA ALGORİTMALARI VE PERFORMANS METRİKLERİ

Bu çalışmada erken orman yangını tespiti problemi, görev planlama hiyerarşisi içinde Kapsama Planlama (Coverage Path Planning, CPP) ve Çoklu İHA Kapsama Planlama (multi-robot CPP, mCPP) sınıflarına indirgenerek modellenmektedir. Bu indirgeme; erken tespit başarısını belirleyen operasyonel ihtiyacın "yanabilir alanların sistematik taranması" ve "yeniden ziyaret süresinin optimizasyonu" gibi doğrudan ölçülebilir parametreler üzerinden tanımlanabilmesine dayanmaktadır [83, 105]. Klasik yol planlama yaklaşımları çoğu zaman belirli bir başlangıç–hedef çifti arasında en kısa/engelsiz rotayı ararken, CPP belirlenen bir bölgenin tamamının (veya kritik alt kümelerinin) planlı biçimde taranmasını hedefleyen özgün bir problem ailesi sunmaktadır [14, 83].

3.1. Kullanılan mCPP ve CPP Algoritmaları: Bölütleme ve Kapsama Yolu Üretimi

Çoklu İHA sistemleri, alan bölütleme (partitioning) ve rota üretimi (path generation) olmak üzere iki temel aşamada modellenmektedir [14, 105]. İş yükü dengesi ve eş zamanlı rota üretimini esas alan mCPP [83], bu çalışmada erken tespit süresini kısaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışma, erken tespit kritik süresini daraltmayı hedeflerken; kapsama, örtüşme, makespan ve denge metrikleriyle algoritmik kıyaslama sağlayan bir altyapı sunar [83].

Bu doğrultuda kullanılan yöntem hattı, mCPP'nin literatürde yaygın iki-aşamalı ayrışımına uygun biçimde kurgulanmaktadır. Modüler kurgu hem tasarımı yönetilebilir kılar hem de "bölütleme stratejisi + kapsama deseni" kombinasyonlarının heterojenlik ve bariyer koşulları altındaki etkilerini deneysel olarak ayrıştırmaya imkân vermektedir. Çalışma, tek bir "mutlak en iyi" yöntem iddiası yerine; farklı senaryo tipolojilerinde hangi

mCPP/CPP ailesinin göreli üstünlük sağladığını göstererek senaryoya duyarlı yöntem seçimi için gerekçeli bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır [105].

Bu çalışma kapsamında kullanılan algoritma kümesi, aşağıdaki üç temel ilke doğrultusunda seçilmiştir:

Temsil Kabiliyeti: Geometrik bölütleme, dengelemeli bölge atama, hücresel ayrıştırma, graf büyütme (graph augmentation) ve morfolojik analiz gibi ana yaklaşım ailelerini temsil edecek çeşitlendirilmiştir.

Karşılaştırılabilirlik ve Yorumlanabilirlik: Aynı çevre temsili üzerinde uygulanabilen ve çıktıları doğrudan bölge etiketi ile waypoint dizisi olarak okunabilen algoritmalar tercih edilmiştir.

Uygulanabilirlik ve Hesaplama Verimliliği: Sabit araç sayısı (N=6) ile çok senaryolu koşum hattında MATLAB ortamında tekrarlanabilir çalıştırmaya uygun yöntemler seçilmiştir.

3.1.1. mCPP Algoritmaları: Bölütleme/Atama (partitioning)

mCPP katmanı, heterojen arazi yapısı ve çevresel engelleri dikkate alarak iş yükünü İHA'lar arasında dengeli paylaştırmayı hedefler. Temel işlev, operasyon sahasını geometrik/topolojik özelliklerine göre anlamlı alt bölgelere ayırmak ve her İHA için erişilebilir ve iş yükü açısından dengeli görev alanları tanımlamaktır. mCPP aşamasında kullanılan ortak semboller Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 6. mCPP (Bölütleme/Atama) için ortak semboller ve tanımlar

Sembol	Tanım
Ω	İki boyutlu çalışma alanı
Ω_F	Taranabilir hücreler kümesi
N	İHA sayısı
s_k	k. İHA başlangıç konumu
p	Bir hücre merkezi / konum örneği
$l(p)$	Konumun atandığı İHA etiket fonksiyonu
Ω_k	k. İHA'ya atanan alt bölge
A_k	k. alt bölgenin alanı / hücre sayısı
$\bar{A}$	Hedef ortalama alan
$w(p)$	Konum ağırlığı (öncelik/tehlike/yanıcılık vb.)
W_k	k. alt bölgenin toplam ağırlığı

3.1.1.1. Voronoi Algoritması

Voronoi diyagramı, iki boyutlu çalışma alanı Ω üzerinde taranabilir hücreler kümesi Ω_F 'yi, her hücre merkezinin/konum örneğinin p en yakın İHA başlangıç konumuna atanması prensibiyle bölütleyen düşük maliyetli bir mCPP yaklaşımıdır. Çoklu İHA kapsama problemlerinde, geometrik yakınlığa dayalı bu bölütleme, hızlı bir başlangıç çözümü üretmesi nedeniyle literatürde yaygın bir baseline olarak kullanılmaktadır [5, 106].

Bu çalışmada Voronoi bölütleme; hesaplama yükünün düşük olması ve çıktı etiket haritasının yorumlanabilirliği sayesinde, diğer mCPP yaklaşımlarına kıyas için referans başlangıç noktası olarak seçilmiştir.

Voronoi'de temel fikir, her serbest konumu en yakın üretici noktaya (İHA başlangıcı) atamaktır. Bu ilke, önce Voronoi bölgesinin küme tanımı ile verilmektedir:

$$V_k=\{p\in\Omega_F \mid \|p-s_k\|_2\leq\|p-s_j\|_2,\ \forall j\neq k\} \quad (1)$$

Denklem (1), k. İHA'nın bölgesi"nin, tüm serbest noktalar içinde s_k'ya diğer tüm s_j'lerden daha yakın olanlardan oluştuğunu ifade etmektedir. Bir sonraki adımda, bu küme tanımı pratikte kullanılacak etiketleme kuralına dönüştürülür; yani her p noktası için hangi İHA'nın seçileceği belirlenmektedir:

$$l(p)=\arg\min_{k\in\{1,\ldots,N\}} d(p,s_k),\ p\in\Omega_F \quad (2)$$

Denklem (2), Voronoi bölütlemeyi "her hücre için en yakın üretici" kararına indirgemektedir. Buradaki kararın ölçütü olan uzaklık fonksiyonu tipik olarak Öklid normu ile verilmektedir:

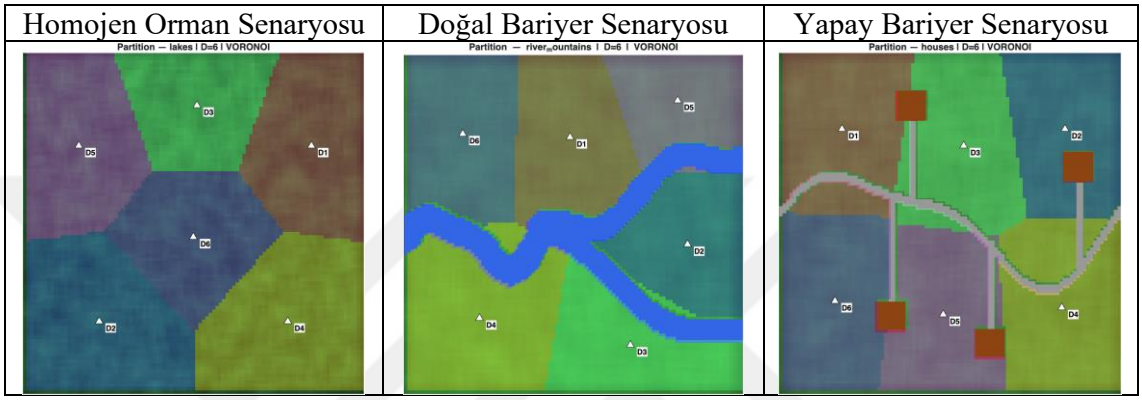
$$d(p,s_k)=\|p-s_k\|_2 \quad (3)$$

Uygulamada karşılaştırma maliyetini azaltmak için, aynı sıralamayı koruyan kareli uzaklık da kullanılabilir; bu dönüşüm argmin sonucunu değiştirmez:

$$d^2(p,s_k)=\|p-s_k\|_2^2 \quad (4)$$

MATLAB ortamında geliştirilen simülatör kullanılarak Voronoi bölütlemenin sentetik senaryolar üzerindeki davranışı karşılaştırmalı biçimde incelenmiştir. Bu kapsamda homojen orman, doğal bariyer ve yapay bariyer ve yerleşim senaryoları için çevre

maskeleri ve bu maskeler üzerinde *N*=6 İHA ile üretilen Voronoi sorumluluk bölgeleri Şekil 16'te birlikte sunulmaktadır. Nehir ve yapı/altyapı unsurları gibi bariyerlerin bulunduğu senaryolarda, Öklid mesafesine dayalı klasik Voronoi'nin engel/topoloji etkisini doğrudan modellemediği; bu nedenle bazı sorumluluk bölgelerinin bariyerler tarafından parçalanabildiği (bağlantısallık) ve görev yükü dağılımında farklılaşmalar oluşabildiği gözlenmektedir.



Şekil 16. Sentetik senaryolarda Voronoi bölütleme

3.1.1.2. Ağırlıklı (Power)Voronoi Algoritması

Power (ağırlıklı) Voronoi, klasik Voronoi'nin "yakınlık" ölçütünü her İHA için bir ağırlık terimi ile esneterek daha dengeli bölütleme üretmeyi hedeflemektedir. Literatürde bölge dengesizliği sorununa karşı pratik bir iyileştirme olarak değerlendirilmektedir [6, 84]. Bu çalışmada Power Voronoi, özellikle homojen olmayan dağılımlarda alan/iş yükü dengesine etkisini gözlemek amacıyla havuza dahil edilir.

Power Voronoi'de her İHA için "güç uzaklığı" (power distance) tanımlanır:

$$D_k(p)=\|p-s_k\|_2^2-w_k \tag{5}$$

Denklem (5) ile w_k arttıkça k. İHA'nın "çekim alanı" genişler; böylece sadece geometrik yakınlık değil, dengeleme amacı da karar sürecine girer. Bu yeni uzaklık tanımı ile power Voronoi bölgesi:

$$V_k^{pow}=\{p\in\Omega_F \mid D_k(p)\le D_j(p),\ \forall j\neq k\} \tag{6}$$

(6), (1) ile aynı mantığı korur; fark yalnızca karşılaştırma ölçütünün $D_k(\cdot)$ olmasıdır. Dolayısıyla etiketleme kuralı da doğrudan bu ölçüte taşınır:

$$l(p)=\arg\min_{k\in\{1,\ldots,N\}}\left(\|p-s_k\|_2^2-w_k\right),\ p\in\Omega_F \tag{7}$$

Pratikte her hücre için tüm k'lar açısından $D_k(p)$ hesaplanır:

$$\{D_1(p),D_2(p),\ldots,D_N(p)\} \tag{8}$$

ve minimum değeri veren indeks seçilerek etiket atanır:

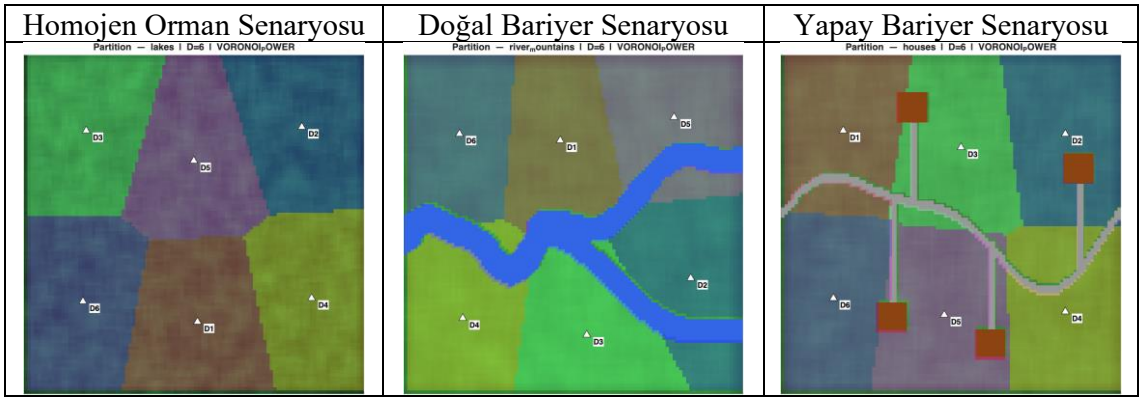
$$l(p)=\arg\min_k D_k(p) \tag{9}$$

Buradaki kritik nokta, ağırlıkların sabit seçilmesi halinde Power Voronoi'nin yalnızca "önyargılı bir yakınlık" üreteceğidir. Bu nedenle ağırlıklar iteratif biçimde güncellenerek alan/iş yükü farkı azaltılır. Tipik güncelleme biçimi:

$$w_k^{(t+1)}=w_k^{(t)}+\eta\left(\bar{A}-A_k^{(t)}\right),\ \eta>0 \tag{10}$$

Denklem (10), A_k hedef ortalamadan küçükse w_k'yı artırarak bölgeyi büyütür; büyükse azaltarak bölgeyi daraltır. Bu geri besleme mantığı, bölütleme dengesini kademeli biçimde iyileştirir [84].

MATLAB ortamında geliştirilen simülatörde, Ağırlıklı Voronoi bölütlemenin davranışını göstermek amacıyla üç sentetik senaryo tanımlanmıştır: homojen orman, doğal bariyer, yapay bariyer Şekil 17'da her bir senaryonun çevresel maskesi ve bu maskeler üzerinde *N*=6 İHA ile üretilen bölütleme çıktısı birlikte sunulmaktadır. Doğal/yapay bariyer içeren senaryolarda engel hücreleri taranabilir kümeden çıkarıldığı için, aynı etikete sahip bölgelerin bağlantısız parçalara ayrılabildiği görülmektedir. Bu durum, Voronoi tabanlı bölütlemenin tek başına bağlantısallık garantisi vermediğini; dolayısıyla bölge-içi CPP üretiminde engel etkileşimi ve bağlantısallık kısıtlarının ayrıca ele alınması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 17. Sentetik senaryolarda Ağırlıklı Voronoi bölütleme

3.1.1.3. Trapezoidal/Boustrophedon Algoritması

Trapezoidal ve Boustrophedon hücresel ayrıştırma yöntemleri, serbest alanı engel sınırlarına göre hücrelere böler ve her hücre içinde düzenli kapsama üretimini kolaylaştırmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle engelli ortamlarda "parçala ve yönet" mantığı ile güçlü bir yapı sunmaktadır [107].

Bu yöntemde önce taranabilir alan, belirli bir yönde dilimlenir ve her dilimde serbest alanın kesitleri çıkarılır. Dilimleme doğrultusu $x$ekseni olarak seçildiğinde, ilgili dilim doğrusu $I(x)$ ile kesit:

$$S(x)=\Omega_F \cap I(x) \tag{11}$$

Denklem (11), şeklinde tanımlanır. Burada $S(x)$ kesitinin bağlı bileşen sayısı $c(x)$ ile gösterilsin. Boustrophedon ayrıştırmada kritik olaylar, kesitin bağlı bileşen sayısının sol ve sağ limitlerde farklılaştığı x konumlarıdır. Dolayısıyla kritik değerler kümesi:

$$x_i \in X_c : c(x_i^-) \neq c(x_i^+) \tag{12}$$

Denklem (12), "engel sınırı nedeniyle topoloji değişimi" gerçekleşen noktaları tanımlar; bu noktalar, hücre ayrıştırmanın dönüm noktalarıdır [108]. Bu eşitsizlik, süpürme sırasında serbest alanın kesit topolojisinin (ör. bir bileşenin ikiye ayrılması, iki bileşenin birleşmesi veya bir bileşenin yok olması) değiştiği noktaları yakalar ve hücre sınırlarının oluştuğu yerleri belirler.

$$\Omega_F = \bigcup_{m=1}^{M} C_m \, , C_m \cap C_n = \emptyset \ (m \neq n) \tag{13}$$

Burada C_m m. Hücr0eyi, M ise toplam hücre sayısını göstermektedir.

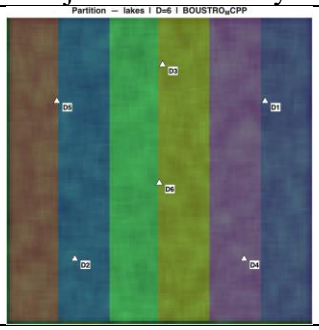
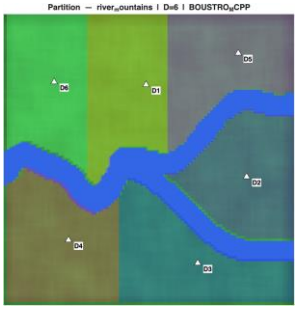
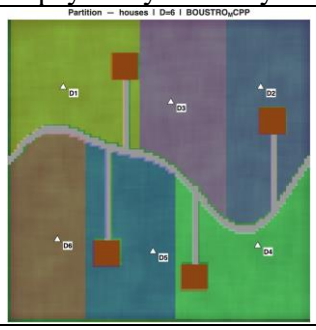
Denklem (13), ayrıştırmanın çıktısını kesinleştirir: Ω_F, M adet hücre birleşimidir ve hücreler çakışmaz. Bu aşamadan sonra mCPP düzeyinde yapılacak iş, hücreleri İHA'lara dengeli biçimde paylaştırmaktır. Hücre tabanlı atama, genellikle "en kötü iş yükünü azaltma" hedefiyle şu biçimde yazılır:

Çoklu İHA senaryosunda, elde edilen hücrelerin araçlar arasında paylaştırılması, iş yükü dengesini gözeten bir atama problemi olarak modellenebilir. N adet İHA için, her bir İHA'ya atanmış hücre indeksleri kümesi I_k ile gösterilsin. Her hücrenin yükü/bedeli A_m (ör. alan, kapsama maliyeti veya yol uzunluğu kestirimi) olarak tanımlandığında, en kötü (maksimum) toplam yükü azaltmaya dönük min-max amaç aşağıdaki gibidir:

$$\min \max \sum_{m \in I_k} A_m \;\; I_k \cap I_l = \emptyset (k \neq l), \;\; \bigcup_{k=1}^{N} I_k = \{1,\ldots,M\} \tag{14}$$

Denklem (14), her İHA'ya atanacak hücre indeks kümelerini I_k üzerinden tanımlar; kısıtlar hücrelerin tekil atanmasını garanti eder. A_m, m. hücrenin kapsanması için gereken tahmini görev süresini (eşdeğer maliyetini) temsil eder; bu büyüklük hücre geometrisi nedeniyle oluşan rota uzunluğu ve dönüş maliyetlerini içerir. Bu yöntemde bariyerlerin hücre sınırı üretme etkisi doğrudan görülebildiği için engelli senaryolarda yorumlanabilirlik artar [108].

MATLAB ortamında üretilen sentetik senaryolarda trapezoidal/boustrophedon ayrıştırmanın, engellerin süpürme doğrultusundaki "görünürlük" etkisiyle hücre üretimini nasıl değiştirdiği Şekil 18'de özetlenmiştir. Homojen orman senaryosunda hücre sayısı görece az ve düzenliyken; doğal bariyer (örn. nehir) senaryosunda bariyerin neden olduğu bölütleme/birleşme olayları hücre sayısını artırmakta ve hücre sınırları bariyer geometrisiyle uyum göstermektedir. Yapay bariyer (örn. yol/yerleşim) senaryosunda ise daha sık kritik olay oluştuğundan, daha parçalı bir hücre yapısı ortaya çıkmakta ve hücre grafı üzerinden tahsis kararları daha belirgin hâle gelmektedir.

Homojen Orman Senaryosu	Doğal Bariyer Senaryosu	Yapay Bariyer Senaryosu
		

Şekil18. Sentetik senaryolarda Trapezoidal/Boustrophedon bölütleme

3.1.1.4. BSP / ORB Tabanlı Bölütleme Algoritması

BSP/ORB (Binary Space Partitioning / Orthogonal Recursive Bisection) tabanlı bölütleme, alanı rekürsif biçimde ikiye bölerek denge hedefini doğrudan kurgunun merkezine alır. Literatürde özellikle yük dengeleme ve hesaplama sadeliği nedeniyle tercih edilen bir aile sunmaktadır [105].

ORB yaklaşımında temel hedef, Nadet İHA için elde edilen alt bölgelerin (bölütlerin) her birinin yaklaşık eşit iş yüküne sahip olmasını sağlamaktır. En basit durumda iş yükü "alan" ile temsil edilir. Bu amaçla önce hedef ortalama alan tanımlanır:

$$\bar{A} = \frac{|\Omega_F|}{N} \tag{15}$$

Denklem (15), her İHA'nın yaklaşık olarak üstlenmesi beklenen hücre sayısını verir. ORB'de amaç, bölütlemenin sonunda her alt bölgenin $\bar{A}$'ya mümkün olduğunca yakın olmasını sağlamaktır; bu hedef sapma-minimizasyonu ile ifade edilmektedir:

$$\min \max_{k \in \{1,\dots,N\}} | A_k - \bar{A} | \tag{16}$$

Eğer alanın her noktası aynı "önem" düzeyine sahip değilse, ağırlıklı iş yükü tanımlanır. Bu durumda hedef ortalama ağırlık:

$$\bar{W} = \frac{\sum_{p \in \Omega_F} w(p)}{N} \tag{17}$$

ve denge hedefi ağırlık üzerinden yazılır:

$$\min \max_{k \in \{1,\dots,N\}} | W_k - \bar{W} | \tag{18}$$

ORB'nin işleyişi, (16)–(18)'deki denge hedefini sağlayacak biçimde uzayı ortogonal kesmelerle ikiye ayırır. Her adımda bir eksen seçilir, kümülatif alan/ağırlık dağılımına göre bölme noktası bulunur ve bölge iki alt bölgeye ayrılır. Bu süreç, bölge sayısı Nolana kadar sürer [105].

ORB'de bölme işlemi rekürsif olduğundan, adım t'deki bir bölge $\Omega^{(t)}$ ikiye ayrılır:

$$\Omega^{(t)} = \Omega_L^{(t)} \cup \Omega_R^{(t)},\ \Omega_L^{(t)} \cap \Omega_R^{(t)} = \emptyset \tag{19}$$

Bölme doğrultusu seçildiğinde, bölme eşiği τdenge şartını yaklaşık sağlar:

$$\sum_{p\in\Omega_L^{(t)}} w(p) \approx \frac{1}{2} \sum_{p\in\Omega^{(t)}} w(p),\ \sum_{p\in\Omega_R^{(t)}} w(p) \approx \frac{1}{2} \sum_{p\in\Omega^{(t)}} w(p) \tag{20}$$

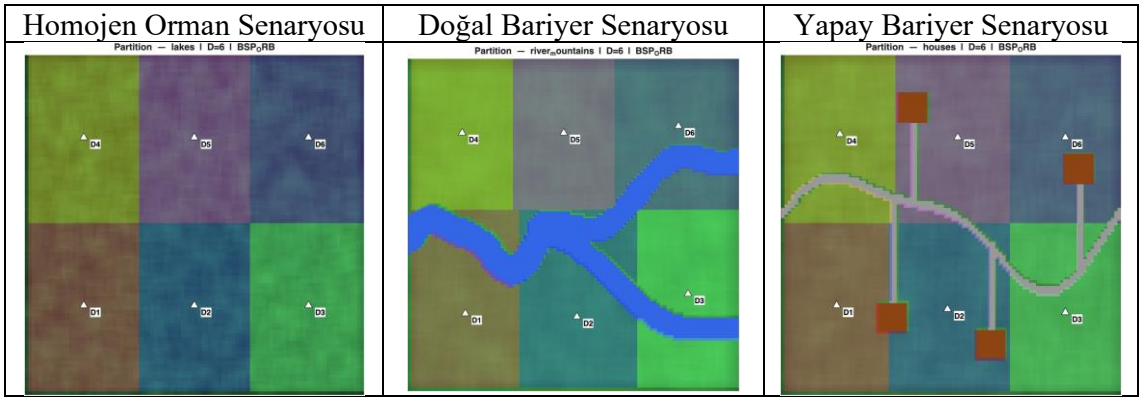
Aynı mantık alanla da kurulabilir:

$$|\ \Omega_L^{(t)}\ | \approx \frac{1}{2} |\ \Omega^{(t)}\ |,\ |\ \Omega_R^{(t)}\ | \approx \frac{1}{2} |\ \Omega^{(t)}\ | \tag{21}$$

Buradaki "≈"

ifadesi, ayrılık ızgara temsili, engel geometrisi ve bölme çizgisinin kısıtlı konumlarda seçilebilmesi nedeniyle her adımda tam olarak yarı yarıya bölmenin her zaman mümkün olmamasını yansıtır. Bu mekanizma sayesinde ORB, her rekürsif adımda yükü (ağırlık alan) yaklaşık iki eş parçaya ayırarak ilerler ve nihai aşamada çoklu İHA senaryosunda dengeli alt bölgeler üretmeyi hedeflemektedir.

Şekil 19'da, MATLAB ortamında üretilen sentetik haritalar üzerinde BSP/ORB tabanlı bölütlemenin örnek çıktıları sunulmaktadır. Homojen orman senaryosunda bölütleme, eksen hizalı kesmeler nedeniyle yaklaşık dikdörtgensel alt bölgeler üretme eğilimindedir. Doğal bariyer (ör. nehir/yarık) içeren senaryoda, bariyerin taranabilir alanı fiilen ayırdığı bölgelerde ORB kesmeleri bariyer boyunca "uyumlu" görünse de, dar geçitli topolojilerde bağlantısallık zayıflayabilir. Yapay bariyer (ör. yollar/engeller) senaryosunda ise kesmelerin bariyer geometrisini takip etmemesi, bazı bölgelerde düzensiz sınırlar ve çok bileşenli atamalar üretebilir. Bu gözlemler, ORB/BSP'nin hızlı bir başlangıç çözümü üretmekte güçlü; ancak engel-uyumlu ve bağlantısal bölge üretimi açısından sınırlı bir yöntem olduğunu göstermektedir.



Şekil 19. Sentetik senaryolarda BSP / ORB Tabanlı bölütleme

3.1.1.5. Graph Tabanlı Bölütleme Algoritması

Graf tabanlı bölütleme, serbest hücreleri düğüm; komşuluk ilişkilerini kenar olarak tanımlar ve bölütlemeyi graf üzerinde yürütür. Bu yaklaşım, engellerin doğal biçimde graf dışında kalmasını sağlar; dolayısıyla erişilebilirlik koşulu topolojik olarak daha tutarlı biçimde ele alınır. Özellikle Multi-Source BFS gibi yöntemler, çoklu İHA atamasını "en yakın kaynak" mantığıyla graf düzleminde hızlı biçimde üretir [14, 84].

Serbest hücrelerden kurulan graf:

$$G = (V, E) \tag{22}$$

şeklinde tanımlanır. Burada Vdüğüm kümesi (serbest hücreler), E ise seçilen komşuluk kuralına göre tanımlanan kenar kümesidir. Her İHA'nın başlangıç konumu graf üzerinde bir kaynak düğüm s_k ile gösterilir. Multi-Source BFS, tüm kaynaklardan eşzamanlı yayılım ile her düğümün kaynaklara olan en kısa topolojik uzaklığını hesaplar. Buna göre bir düğüm v için en kısa uzaklık

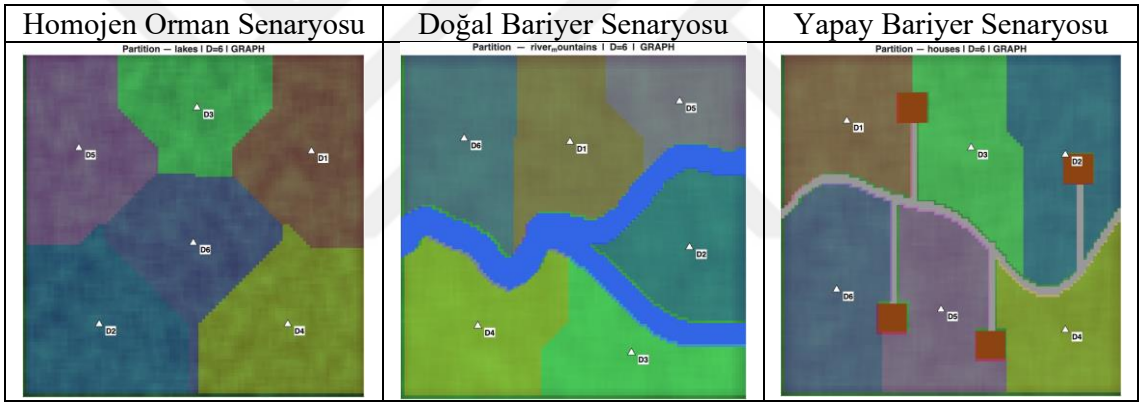
$$d(v) = \min_{k \in \{1,\dots,N\}} dist_G(v, sk) \tag{23}$$

ve atamayı, graf uzaklığı üzerinden verir:

$$l(v) = \arg \min_{k \in \{1,\dots,N\}} dist_G(v, s_k) \tag{24}$$

Voronoi'deki (2) ile aynı karar mantığını taşır; fark, uzaklığın artık Öklid değil "engel-dostu" graf uzaklığı olmasıdır. Böylece bariyerlerin arkasındaki hücreler yanlışlıkla "yakın" görünmez; atama erişilebilirliği daha iyi yansıtır [14, 84, 101].

Şekil 20'de, MATLAB ortamında üretilen sentetik haritalar üzerinde Graph tabanlı (Multi-Source BFS) bölütlemenin örnek çıktıları sunulmaktadır. Homojen orman senaryosunda dalga cepheleri yaklaşık izotropik yayıldığı için bölgeler geometrik Voronoi'ye benzer bir karakter gösterebilir. Doğal bariyer senaryosunda (ör. nehir/yarık), dalga cepheleri bariyer boyunca "kırılarak" ilerlediğinden, sınırlar erişilebilirlik açısından anlamlı biçimde bariyerle hizalanır. Yapay bariyer senaryosunda (ör. evler+yollar), engellerin oluşturduğu dar geçitler ve koridorlar BFS mesafesini değiştirdiği için atamalar pratikte platformun geçiş kabiliyetini daha iyi yansıtır.



Şekil 20. Sentetik senaryolarda Graph Tabanlı bölütleme

3.1.1.6. Watershed Tabanlı Bölütleme Algoritması

Watershed dönüşümü, bir skaler alanı (ör. maliyet/yoğunluk/risk ya da gradyan büyüklüğü haritası) topografik bir yüzey gibi yorumlayarak, bu yüzey üzerindeki "yakalama havzaları" (catchment basins) ve bunları ayıran "sırt çizgileri" (watershed ridge lines) üzerinden bölütleme yapan morfolojik bir yaklaşımdır [87, 109]. Klasik watershed'in bilinen temel zorluğu, yüzeydeki her küçük yerel minimumun ayrı bir havza üretmesi nedeniyle aşırı bölütleme (over-segmentation) eğilimidir; bu nedenle uygulamada sıklıkla marker-controlled (işaretleyici kontrollü) watershed kullanılır. Marker-controlled yaklaşımda, bölütleme hedeflenen nesne/bölgeleri temsil eden işaretleyiciler (markers) "zorunlu minimum" hâline getirilir; böylece gereksiz yerel minimumların ürettiği bölge patlaması bastırılır ve daha anlamlı, kontrol edilebilir alt

bölgeler elde edilir [104]. Bu çalışmada watershed; özellikle bariyerli ve heterojen çevre temsillerinde, sınırların yalnızca geometrik yakınlıkla değil, seçilen skaler yüzeyin (ör. risk/maliyet/mesafe) yapısıyla da uyum gösterebilmesi nedeniyle mCPP havuzuna dahil edilmiştir [87, 108, 109].

Önce serbest alan üzerinde bir skaler yüzey tanımlanır:

$$G : \Omega_F \rightarrow R \tag{25}$$

Bu yüzey, uygulama amacına bağlı olarak bir maliyet/risk alanı (ör. engellere yakınlık cezası, öncelik yoğunluğu) ya da doğrudan bir görüntü-türevi büyüklük olabilir. Bu çalışmada G, serbest alan Ω_F üzerinde tanımlı skaler bir yüzeyi (maliyet/risk/yoğunluk haritasını) temsil etmektedir. Watershed sınırlarının (ridge lines) belirginleşmesi için pratikte sıklıkla yüzeyin gradyan büyüklüğü kullanılır. Buna göre ∇G, G'nin uzaysal gradyanını; $\frac{\partial G}{\partial x}$ ve $\frac{\partial G}{\partial y}$ ise sırasıyla x ve y doğrultularındaki kısmi türevlerini göstermektedir. Gradyan büyüklüğü $\| \nabla G \|$, bu kısmi türevlerin Öklid normu olarak;

$$\|\nabla G\|, = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2} \tag{26}$$

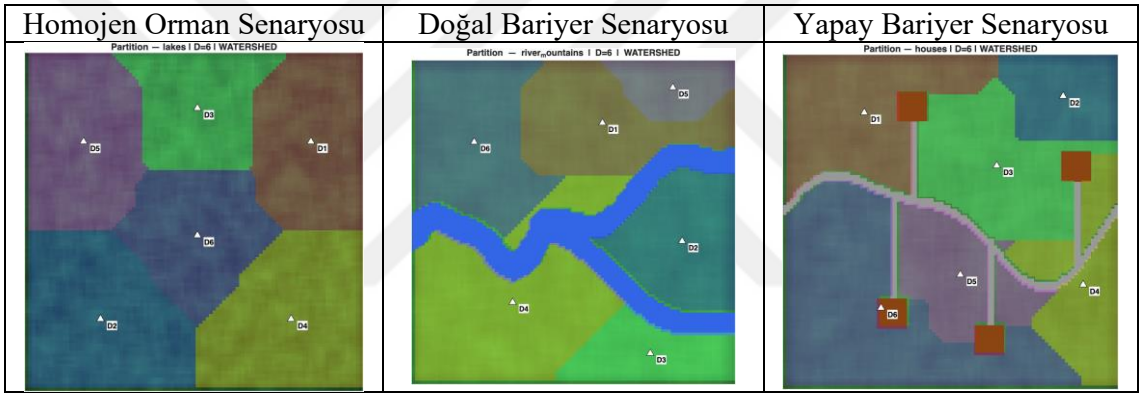
şeklinde hesaplanmaktadır. Watershed dönüşümü, (marker-controlled kullanımda işaretleyicilerle sınırlandırılmış) yerel minimumların çekim havzalarını çıkarır ve bu havzaları ayıran sırt çizgileri üzerinden alt bölgeleri üretir. Bu ayrıştırma sonucunda serbest alan Ω_F, toplam M adet hücreye bölünür. Burada Mhücre sayısını, C_m ise m. hücreyi ($m = 1, \dots, M$) temsil etmektedir. Hücrelerin birleşimi serbest alanı tam olarak örterken, hücreler birbirleriyle çakışmaz:

$$\Omega_F = \bigcup_{m=1}^{M} C_m\,,\ C_m \cap C_n = \emptyset\ (m \neq n) \tag{27}$$

Bu ifade, $\cup$ operatörü ile tüm hücrelerin birleşimi alınarak Ω_F'nin elde edildiğini; $\cap$ operatörü ile gösterilen kesişimin boş küme ($\emptyset$) olmasının ise hücrelerin ayrık (örtüşmeyen) olduğunu belirtmektedir.

(27), (13) ile benzer bir ayrıştırma çıktısı verir; fark, hücre sınırlarının topolojik olaylar yerine morfolojik "havza" mantığıyla oluşmasıdır [87, 108, 109]. Bu özellik, heterojen öncelik haritalarında anlamlı alt bölge sınırları üretmeyi kolaylaştırır.

Şekil 21'de, MATLAB ortamında üretilen sentetik haritalar üzerinde (marker-controlled) watershed tabanlı bölütlemenin örnek çıktıları sunulmaktadır. Homojen orman senaryosunda bölge sınırları, seçilen yüzey G'nin (örn. gradyan) yapısına bağlı olarak genellikle daha "pürüzsüz" ve dengeli oluşur. Doğal bariyer senaryosunda (örn. nehir/yarık), bariyerin oluşturduğu yüksek maliyet/gradient bantları sınırların bariyer boyunca hizalanmasına yardımcı olur. Yapay bariyer senaryosunda (örn. evler+yollar), engellerin neden olduğu yerel gradyan artışları ve koridor yapıları, havzaların büyüme dinamiğini değiştirerek bölge sınırlarını çevresel kısıtlarla daha uyumlu hâle getirebilir. Bu nedenle watershed, yalnızca "yakınlık" değil, seçilen skaler yüzey üzerinden tanımlanan maliyet/risk bilgisiyle de uyumlu sınırlar üretmesi açısından mCPP havuzunda tamamlayıcı bir yöntemdir.



Şekil 21. Sentetik senaryolarda Watershed bölütleme

3.1.1.7. DARP Algoritması

DARP (Divide Areas based on Robots initial Positions), çoklu İHA kapsama görevlerinde çalışma alanını İHA'lar arasında yaklaşık eş iş yükü sağlayacak ve aynı zamanda her İHA için bağlantılı (tek parça) bir alt bölge üretecek biçimde bölen iteratif bir mCPP yaklaşımı sunar [86].

DARP'ta temel amaç, her İHA'ya atanacak alt bölgenin yükünü (bu çalışmada alan tabanlı) dengelerken bölgelerin bağlantılı kalmasını sağlamaktır. Bu amaçla serbest alan Ω_F, N adet İHA için $\Omega_1, \dots, \Omega_N$ alt bölgelerine ayrıştırılsın. Burada Ω_k, k. İHA'ya atanan hücreler/bölgeyi; $A(\Omega_k)$ ise bu alt bölgenin alanını ifade eder. Hedef ortalama alan $\bar{A} = A(\Omega_F)/N$ olmak üzere, alan dengesini "en kötü sapmayı azaltma" yaklaşımıyla ifade eden fonksiyon:

Denklem (28) ile yetinilirse, geometrik olarak parçalı/bağlantısız bölgeler oluşabilir. Bu nedenle bağlantısallığı zorlayan bir kısıt ya da ceza terimi eklenir. Bağlantılı bölge koşulu şu biçimde ile indüklenen alt grafı ifade eder; "bağlantılı" şartı, k. İHA'ya atanan bölgenin tek parça olmasını garanti etmeyi hedefler. DARP'ın iteratif doğası, (28)'deki denge hedefi ile (29)'daki bağlantısallık gereksinimini aynı çözüm hattında birleştirerek; mCPP adımında her orman senaryosunda, topolojik mesafe haritaları göreli olarak düzgün olduğu için bölge sınırları çoğunlukla dengeli ve kompakt oluşur. Doğal bariyer senaryosunda (örn. nehir/yarık), engeller topolojik mesafeyi keskin biçimde değiştirdiğinden, DARP sınırları erişilebilirlik yapısını yansıtacak şekilde bariyer boyunca hizalanma eğilimi gösterir. Yapay bariyer senaryosunda (örn. evler+yollar), geçitler ve koridorlar topolojik mesafeyi yeniden şekillendirdiği için bölgelerin geometresi yalnızca Öklidyen yakınlığa sonuçlar, DARP'nin engel yoğunluğu yüksek ortamlarda denge–uygulanabilirlik dengesini kurma katmanı, çoklu İHA kapsama probleminde "alanın İHA'lar arasında paylaştırılması" kararını üreterek, her bir İHA için sorumluluk bölgesini (alt alan maskesi/etiket haritası) belirlemektedir. Literatürde yaygın olan bu iki-aşamalı ayrışımda, mCPP'nin çıktısı CPP'ye doğrudan girdi olur: her İHA, yalnızca kendisine atanan bölge üzerinde sistematik tarama yapacak biçimde bir kapsama yolu üretir. Bu ayrışım hem problemin bileşimsel (olasılıksal) karmaşıklığını yönetilebilir kılar hem de "bölütleme stratejisi" ile "bölge içi tarama deseni" etkilerini birbirinden ayrıştırarak karşılaştırılabilir hâle getirmektedir [14, 83, 86].

Bu çalışmada da aynı yaklaşım izlenerek mCPP adımı, her bir İHA için bağlantısallığı ve iş yükü dengesini etkileyen bir alt bölge tanımı üretmekte; ardından CPP adımı, ilgili alt bölgeyi tam kapsama hedefiyle tarayacak bir waypoint dizisine dönüştürmektedir. Dolayısıyla CPP alt bölümünde sunulacak yöntemler, "bölge verildiğinde yol üretme" problemine odaklanır; üretilen yolların toplam yol uzunluğu, dönüş sayısı, tekrar tarama (overlap) ve makespan gibi çıktılara etkisi, mCPP kaynaklı bölge geometrisi (sınır pürüzlülüğü, bölge parçalanması, dar boğazlar) ile değerlendirilir. Bu çerçeve, hücresel ayrıştırma tabanlı kapsama yaklaşımlarında da vurgulanan "önce alanı yapısal alt parçalara ayır, sonra her parçada şerit/iz taraması üret" ilkesinin çoklu-İHA sürümüne karşılık gelmekte ve CPP bölümünün kapsamını netleştirmektedir [14, 80].

3.1.2. CPP Algoritmaları: Bölge İçi Kapsama Yolu Üretimi

Bu alt bölümde, mCPP katmanının ürettiği alt bölgeler (bölütlenmiş sorumluluk alanları) üzerinde her bir İHA için kapsama yolunun nasıl üretildiği açıklanmaktadır. Kapsama planlama (Coverage Path Planning, CPP), belirli bir başlangıç-hedef çifti arasında geçerli bir güzergâh bulmayı amaçlayan klasik path planning probleminden farklı olarak; hedeflenen bir bölgenin tamamının (veya tanımlanan hedef alt kümenin) sistematik biçimde taranmasını sağlayan yolların üretilmesini hedefleyen bir problem ailesidir. CPP literatüründe yöntemler çoğunlukla süpürme/şerit tarama (sweepline-lawnmower) ve hücresel ayrıştırma tabanlı yaklaşımlar, graf tabanlı kapsama (spanning tree, Euler turu, postman problemleri) ve kinematik kısıtları doğrudan modelleyen (ör. minimum dönüş yarıçapı) araç-özgül yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır [14, 80].

Bu çalışma kapsamında CPP algoritmaları, her bir İHA için verilen sorumluluk bölgesi Ω_k üzerinde bir kapsama yolu P_k ve bu yolu uçuşa uygun şekilde temsil eden bir waypoint dizisi üretmek üzere kullanılmaktadır. CPP katmanının çıktıları, mCPP ile belirlenen iş bölümü üzerinde "bölge içi tarama verimliliğini" belirler; dolayısıyla aynı mCPP çıktısı altında farklı CPP desenleri (ör. şerit tarama, STC temelli dolaşım) tekrar tarama oranı (overlap), dönüş sayısı

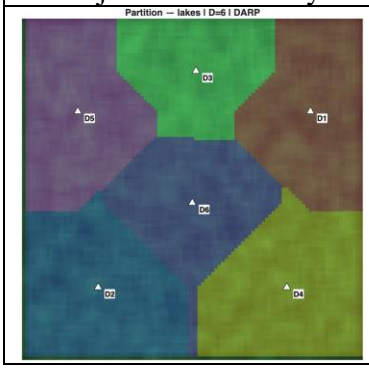
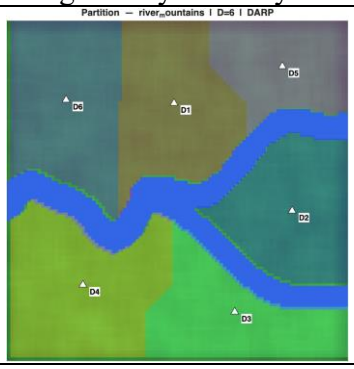
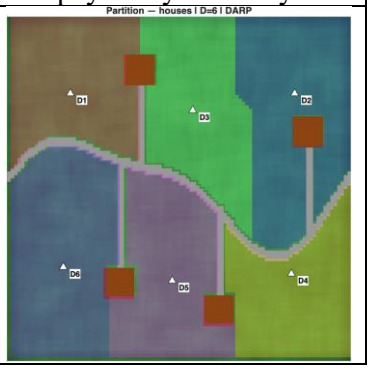
$$\min \max_{k \in \{1,\dots,N\}} | A(\Omega_k) - \bar{A} | \tag{28}$$

şeklinde yazılır. Ancak sadece ifade edilebilir:

$G|\Omega_k|$ bağlantılıdır, $\forall k \in \{1,\dots,N\}$ (29)

Burada $G[\Omega_k]$, G grafında düğüm kümesi Ω_k İHA için bağlantılı ve dengeli bir alt bölge üretir, ardından CPP adımı bu alt bölge üzerinde tam kapsama yolu üretir [7, 86].

Şekil 22'de, MATLAB ortamında üretilen sentetik haritalar üzerinde DARP bölütlemenin örnek çıktıları sunulmaktadır. Homojen değil, pratikte geçiş yapılabilir alanlara göre belirlenir. Bu potansiyelini görsel olarak desteklemektedir [7].

Homojen Orman Senaryosu	Doğal Bariyer Senaryosu	Yapay Bariyer Senaryosu
		

Şekil 22. Sentetik senaryolarda DARP bölütleme

mCPP ve toplam yol uzunluğu gibi metrikler üzerinde belirgin farklar oluşturabilir [14]. Bu nedenle çalışmada, farklı çevresel heterojenlik ve bariyer koşulları altında "bölütleme stratejisi + kapsama deseni" kombinasyonlarının göreli üstünlüklerini analiz etmeye imkân veren, literatürde yaygın kullanılan temsil gücü yüksek CPP yöntem aileleri seçilmiştir [14, 80]. CPP denklemlerinde kullanılan ortak notasyon Tablo 7'de verilmektedir.

Tablo 7. CPP (Bölge İçi Kapsama Yolu Üretimi) için ortak semboller ve tanımlar

Sembol	Tanım
Ω_k	k. İHA'ya atanan alt bölge
P_k	k. İHA için kapsama yolu (waypoint dizisi)
$p_{k,i}$	k. İHA'nın i. waypoint'i
m_k	k. İHA yolundaki waypoint sayısı
$\mathcal{N}(p)$	p hücresinin komşuluk kümesi
δ	Şerit aralığı (Lawnmower)
$\theta_{k,i}$	k. İHA'nın i. adımındaki başlık açısı
$R_{\min}$	Minimum dönüş yarıçapı
$G_k = (V_k, E_k)$	Ω_k üzerinde kurulan hücre grafı
T_k	G_k üzerinde kapsama germe ağacı (spanning tree)
$L_D(\cdot)$	Dubins bağlantı uzunluğu

Her İHA için kapsama yolu, Ω_k içinde kalan waypoint dizisi olarak tanımlanır:

Denklem (30), yolun waypoint dizisi olarak gösterimi

$$P_k = [\, p_{k,1}, p_{k,2}, \dots, p_{k,m_k} \,], \qquad p_{k,i} \in \Omega_k \tag{30}$$

Denklem (30), tüm CPP yöntemlerini tek bir çıktı biçimine indirger. Bu temsilin kritik noktası, ardışık waypoint'ler arasında "zıplama" oluşmamasıdır. Grid tabanlı uygulamada bu, komşuluk koşulu ile güvence altına alınır:

Denklem (31), komşuluk tabanlı uygulanabilir adım koşulu

$$p_{k,i+1} \in \mathcal{N}(p_{k,i}), \qquad i = 1,2, \dots, m_k - 1 \tag{31}$$

Denklem (31), üretilen rotanın her adımda yerel komşuluk içinde kalmasını şart koşar; bu sayede rota hem uygulanabilir kalır hem de metrik hesapları tutarlı olur. Bu ortak çerçeve üzerinde aşağıdaki CPP algoritmaları, P_k'yı üretmek için farklı stratejiler sunar [14, 80].

3.1.2.1. Lawnmower Algoritması

Lawnmower yaklaşımı, Ω_k bölgesini paralel şeritler halinde tarar ve ardışık şeritlerde yön tersleyerek sistematik kapsama sağlar [14, 80]. Süpürme doğrultusu seçildikten sonra şerit aralığı δ ile belirlenir. Şeritler, seçilen süpürme doğrultusuna dik yerel eksen üzerinde (yerel koordinat (u, v) ile) $u = j\delta$ seviyeleriyle tanımlanabilir. Buna göre j. şeridin merkez doğrusu:

$$\ell_j = \{(u, v) \mid u = j\delta\} \tag{32}$$

şeklinde verilir. j. şeritte taranacak nokta/hücre kümesi, bölge ile şeridin kesişimi olarak tanımlanır:

$$S_{k,j} = \Omega_k \cap \ell_j \tag{33}$$

Engel/bariyer geometrisi nedeniyle $S_{k,j}$ tek bileşenli olmak zorunda değildir; aynı şerit üzerinde birden fazla kesit (segment) oluşabilir.

Şerit içi waypoint sıralaması ve ardışık şeritlerde yön terslemesi, j. şeritte üretilen waypoint dizisi $P_{k,j}$ üzerinden şu şekilde ifade edilir:

$$P_{k,j} = \begin{cases} sort\,(S_{k,j}), & j \text{ tek} \\ rev(sort\,(S_{k,j})), & j \text{ çift} \end{cases} \tag{34}$$

Bu ifadede kullanılan operatörler aşağıdaki şekilde tanımlanır:

- sort $(S_{k,j})$: $S_{k,j}$ kümesindeki noktaları şerit doğrultusundaki ilerleme eksenine göre (yerel koordinat seçiminde $v$ekseni boyunca) artan sırada dizerek bir waypoint dizisi

üretir. Başka bir deyişle, sort $(S_{k,j})$ sonucu elde edilen dizi, şerit üzerinde tek yönlü bir tarama sırasını temsil eder.

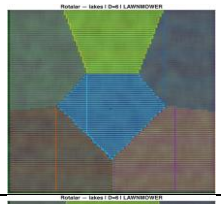
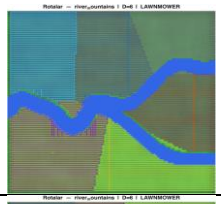
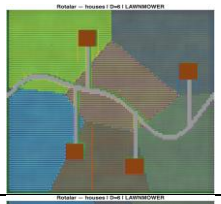
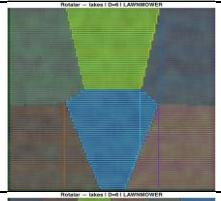
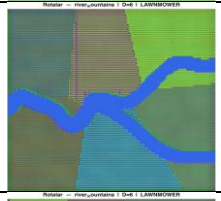
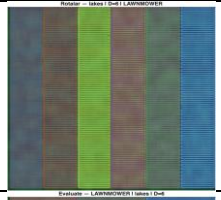
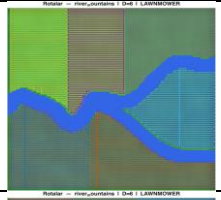
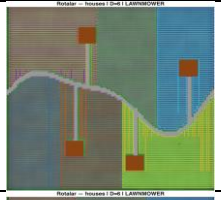
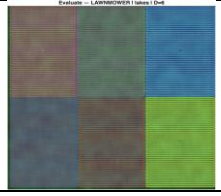
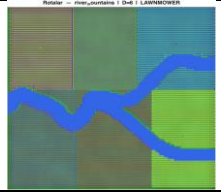
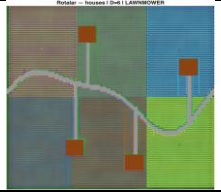
- rev $(\cdot)$: Bir waypoint dizisinin eleman sırasını tersine çeviren operatördür. Dolayısıyla rev (sort $(S_{k,j})$), aynı şeridin ters yönde taranmasını sağlayacak sıralamayı üretir.

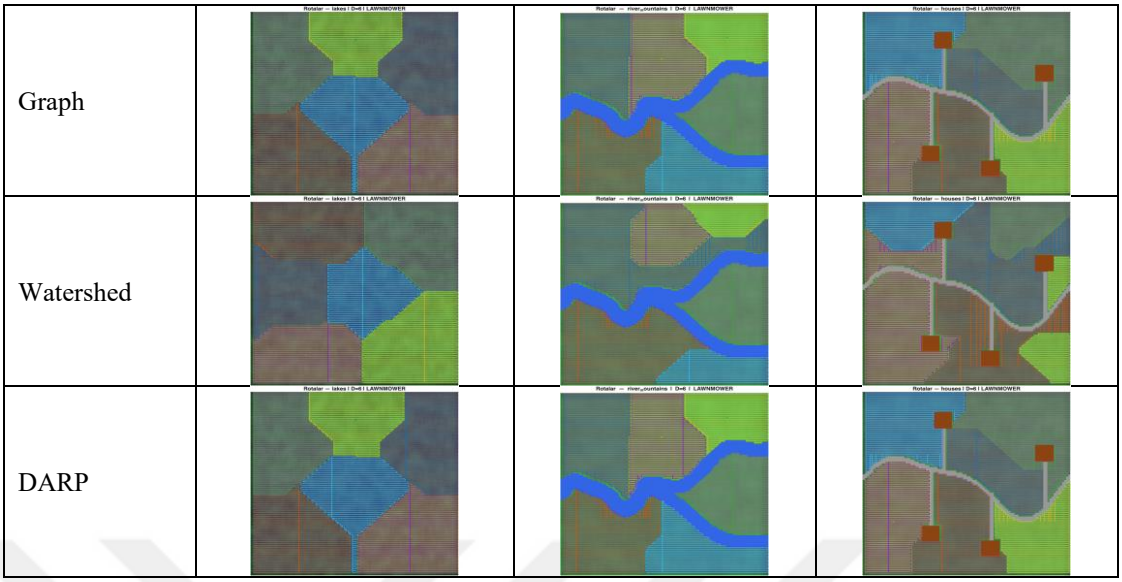
Bu tanımlar altında denklem (34), ardışık şeritlerde "ileri–geri" (boustrophedon) tarama desenini açık biçimde modellemektedir. Son olarak tüm şerit dizileri ardışık biçimde birleştirilerek kapsama yolu elde edilir:

$$P_k = P_{k,1} \parallel P_{k,2} \parallel \cdots \parallel P_{k,j} \tag{35}$$

Burada $\parallel$ operatörü waypoint dizilerinin ardışık birleştirilmesini, J ise Ω_k'yı örten şerit sayısını ifade eder. Böylece Lawnmower, δ parametresi ile belirlenen şerit aralığı üzerinden kapsama yoğunluğunu ve dönüş sıklığını kontrol edebilen, basit ve deterministik bir kapsama deseni sunar [14, 80].

Denklem (35), Lawnmower'ın rota üretimini "şerit bazlı birleştirme" olarak özetler.

CPP/ Senaryo	Homojen Orman Senaryosu	Doğal Bariyer Senaryosu	Yapay Bariyer Senaryosu
Voronoi			
Ağırlıklı Voronoi			
Trapezoidal/ Boustrophedon			
BSP/ORB			



Şekil 23. Sentetik senaryolarda Lawnmower algoritması kapsama yolu

Şekil 23'de, MATLAB ortamında üretilen sentetik haritalar üzerinde Lawnmower kapsama planının örnek çıktıları sunulmaktadır. Homojen orman senaryosunda şeritler genellikle tek parça ve düzenli olup başlık dönüşleri öngörülebilir şekilde oluşmaktadır. Doğal bariyer senaryosunda (örn. nehir/yarık) şerit kesitleri bölünebildiğinden segmentler arası geçişler artabilir. Yapay bariyer senaryosunda (örn. evler+yollar) engel kümeleri şeritleri daha sık parçaladığı için, transit hareketleri ve dönüş sayısı belirgin biçimde yükselebilir. Bu gözlemler, engel yoğunluğu arttıkça hücresel/bağlantılı kapsama yöntemlerinin tercih edilme gerekçesini desteklemektedir.

Bu yapı basit ve hızlıdır; ancak engelli sahalarda şerit kesitleri parçalandığında bağlantı geçişleri artabilir. Bu durum, dönüş sayısı ve toplam süre metriklerinde belirginleşir [80], [14]. Bu noktada, topolojik tutarlılığı daha güçlü biçimde ele alan STC yaklaşımı doğal bir sonraki adımdır [81].

3.1.2.2. Spanning Tree Coverage (STC) Algoritması

STC (Spanning Tree Coverage), k. İHA'ya atanmış bölge Ω_k üzerinde bir hücre grafı kurar ve bu graf üzerinde seçilen bir germe ağacı (spanning tree) üzerinden tüm hücreleri sistematik biçimde ziyaret eden bir dolaşım üretir [81]. Bu yaklaşım, komşuluk koşulunu yapısal olarak koruduğu için (31)'deki "ardışık adım komşuluk içinde kalır" şartını doğal biçimde sağlar ve dolayısıyla "zıplama" problemini azaltır; özellikle engelli ortamlarda güçlü bir CPP seçeneği sunar [81].

Öncelikle $\Omega_k$için hücre grafı tanımlanır. Burada düğüm kümesi serbest hücreleri, kenar kümesi ise seçilen komşuluk kuralına göre (4/8-komşuluk) birbirine komşu hücre çiftlerini temsil eder. Bu graf

$$G_k=(V_k,E_k), \quad V_k=\Omega_k, \quad E_k=\{(u,v) \mid u,v \in V_k, v \in N(u)\} \tag{36}$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (36), (31)'deki komşuluk kuralını graf biçimine taşımaktadır.

Ardından $G_k$üzerinde tüm düğümleri bağlayan bir germe ağacı seçilir. $T_k = (V_k, E_k^T)$ olmak üzere germe ağacı koşulu

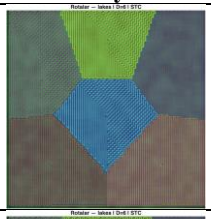
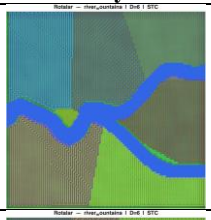
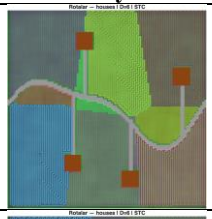
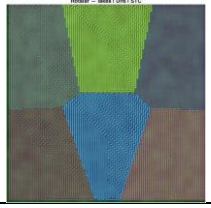
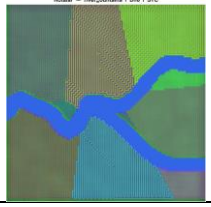
$$E_k^T \subseteq E_k, \qquad T_k \text{ bağlantılı ve çevrimsizdir} \tag{37}$$

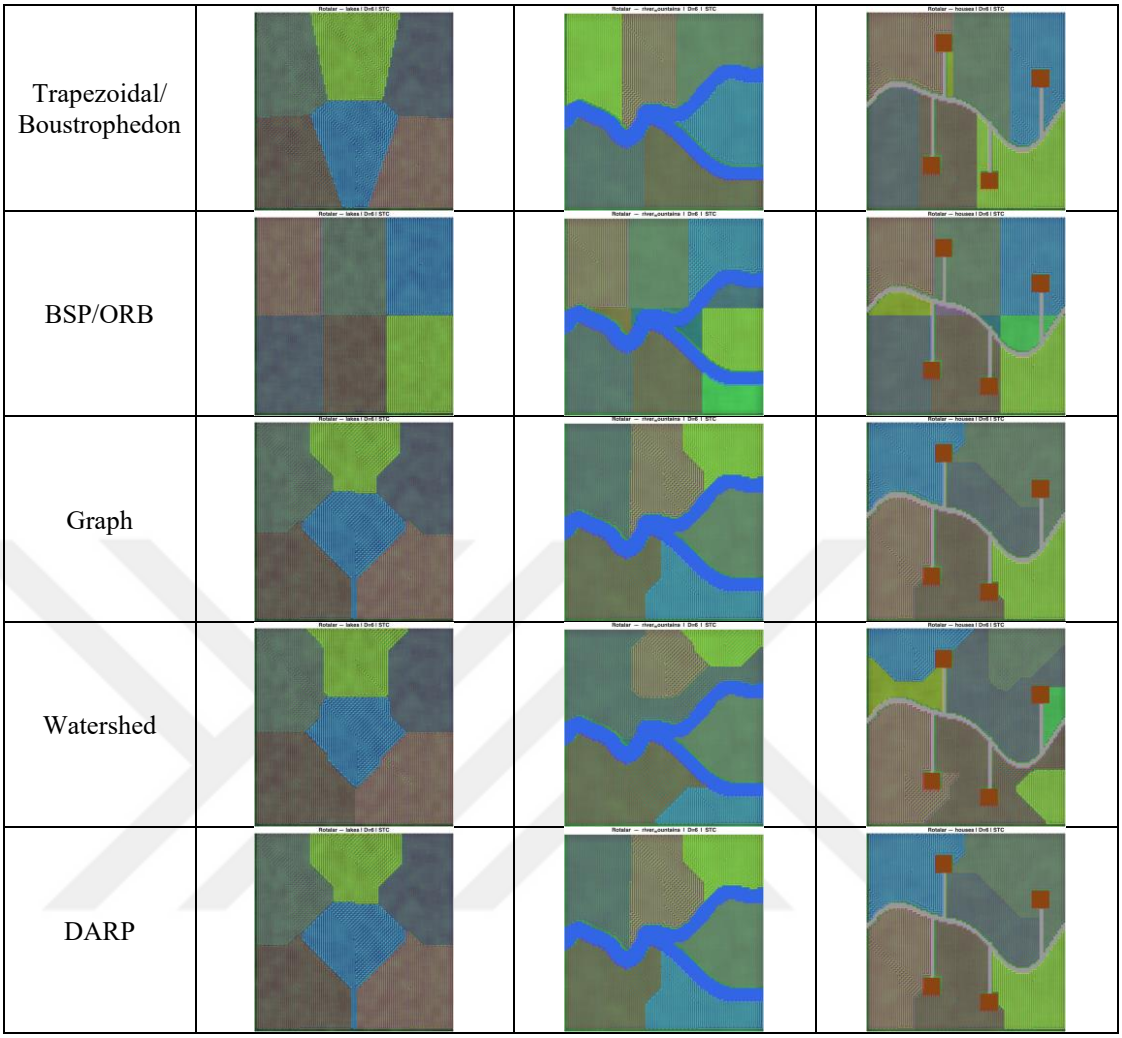
şeklinde verilebilir. Denklem (37), tüm hücreleri kapsayan çevrimsiz bir "omurga" elde edildiğini ifade eder.

Kapsama yolu, bu ağaç üzerinde sistematik bir dolaşım ile üretilir. Uygulamada bu dolaşım genellikle DFS tabanlı ağaç yürüyüşü veya Euler-turu mantığıyla elde edilir; sonuçta (30)'da tanımlanan waypoint dizisi $P_k$üretilir:

$$P_k = Traverse\,(T_k) \tag{38}$$

Burada Traverse $(\cdot)$, germe ağacının kenarlarını/komşuluk ilişkilerini izleyerek tüm düğümlerin ziyaret edilmesini sağlayan dolaşım operatörünü ifade eder; böylece ardışık waypoint'ler arasında komşuluk korunur [81].

mCPP/ Senaryo	**Homojen Orman Senaryosu**	**Doğal Bariyer Senaryosu**	**Yapay Bariyer Senaryosu**
Voronoi			
Ağırlıklı Voronoi			



Şekil 24. Sentetik senaryolarda STC algoritması kapsama yolu

Şekil 24'te, MATLAB ortamında üretilen sentetik haritalar üzerinde STC'nin ürettiği kapsama yollarına ilişkin örnek çıktılar sunulmaktadır. Homojen orman senaryosunda komşuluk grafı düzenli olduğu için kapsayan ağaç ve buna bağlı Euler turu daha az parçalı bir yapı sergiler; buna karşılık yolun ızgara yönelimli olması nedeniyle 90° dönüşler belirgin hâle gelir. Doğal bariyer senaryosunda (örn. nehir/yarık) bariyer, graf bağlantısallığını etkilediğinden kapsayan ağaç bariyer etrafında dolaşacak biçimde şekillenir ve tur, geçit/köprü noktalarında yoğunlaşabilir. Yapay bariyer senaryosunda (örn. evler+yollar) engel kümeleri grafı daha düzensiz hâle getirdiğinden, kapsayan ağaç üzerinde geri dönüşler artabilir ve dönüş sayısı yükselme eğilimindedir. Bu gözlemler, izleyen alt bölümde ele alınacak Spiral–STC gibi varyantların "dönüş sayısını azaltma" motivasyonunu desteklemektedir [14, 83].

STC'nin topolojik güvencesi güçlüdür; ancak ızgara yönelimli hareket yapısı, bazı bölgelerde dönüş yoğunluğunu artırabilir. Bu nedenle "yol karakterini" daha düzenli hale getirmeyi hedefleyen Spiral-STC yaklaşımı bir sonraki seçenek olarak değerlendirilir [81].

3.1.2.3. Spiral Spanning Tree Coverage (Spiral–STC) Algoritması

Spiral–STC, STC'nin kapsama güvencesini korurken yolun dıştan-içe (katmanlı) daha düzenli bir dolaşım karakteri göstermesini hedefler [81]. Bu fikir, Ω_k bölgesinin sınır katmanlarının ardışık olarak çıkarılması ve kalan bölge üzerinde STC dolaşımının yürütülmesi mantığıyla ifade edilir.

Öncelikle Ω_k bölgesinin sınır hücreleri tanımlanır. Burada $N(v)$, v hücresinin komşuluk kümesini göstermektedir. Buna göre Ω_k'nın sınırı, komşuları arasında bölge dışına (yani Ω_k'ya ait olmayan hücrelere) temas eden hücreler kümesi olarak

$$\partial\Omega_k = \{v \in \Omega_k \mid \exists u \in N(v),\ u \notin \Omega_k\} \tag{39}$$

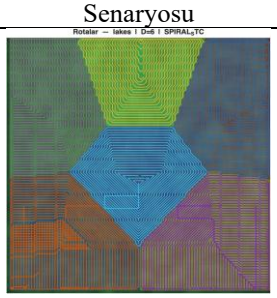
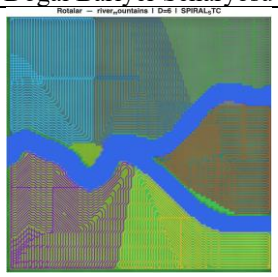
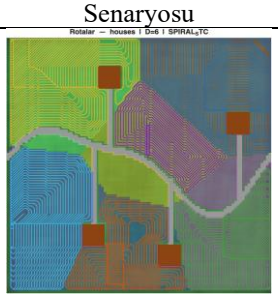
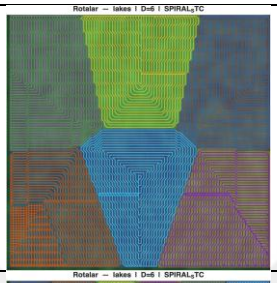
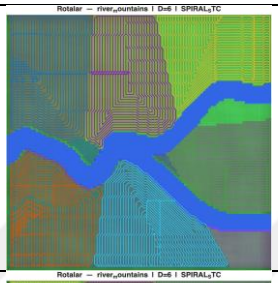
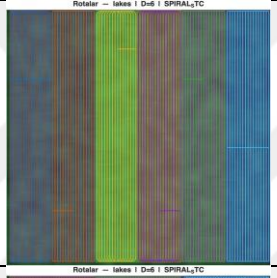
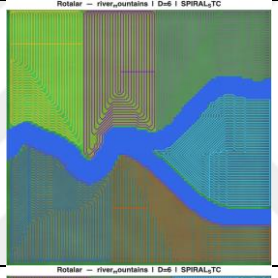
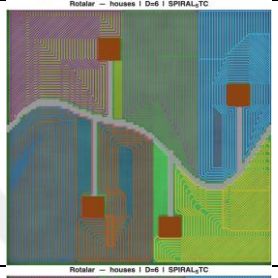
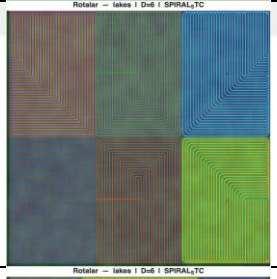
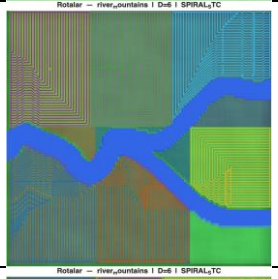
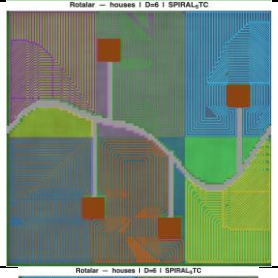
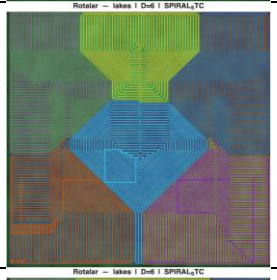
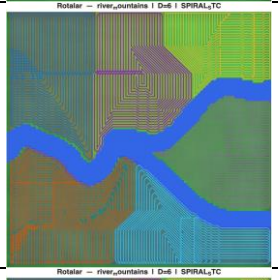
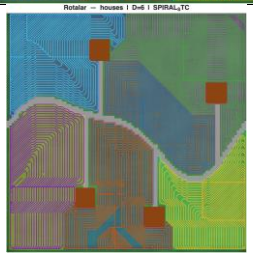
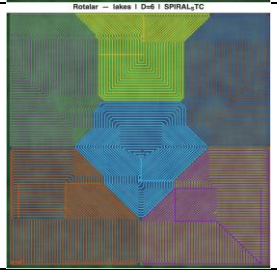
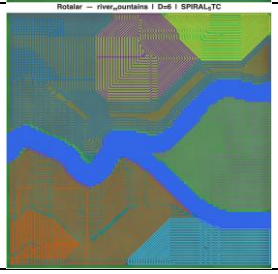
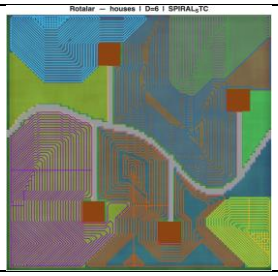
şeklinde tanımlanır. Denklem (39)'da $\partial\Omega_k$ sınır hücreleri kümesini, v ve u ise hücreleri (düğümleri) ifade etmektedir; "$\exists$" en az bir komşu bulunduğunu belirtir.

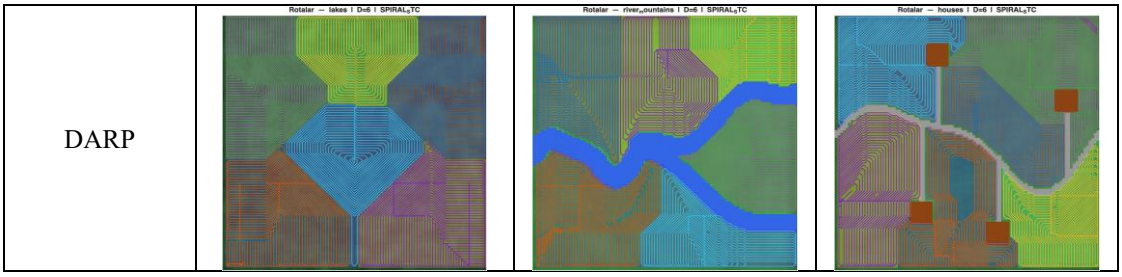
Katman çıkarma (dıştan-içe ilerleme) işlemi iteratif olarak, her adımda mevcut bölgeden sınır kümesinin çıkarılması ile yazılır. $\Omega_k^{(0)} = \Omega_k$ olmak üzere

$$\Omega_k^{(t+1)} = \Omega_k^{(t)} \setminus \partial\Omega_k^{(t)}, \qquad t = 0,1,2, \tag{40}$$

ifadesi, her iterasyonda bir sınır katmanının soyulduğunu ve böylece kalan bölgenin içe doğru "spiral benzeri" bir katman yapısı oluşturduğunu gösterir [81]. Burada $\Omega_k^{(t)}$, t. iterasyondaki kalan bölgeyi; "\" ise küme farkını (çıkarma) temsil eder.

Pratikte bu katman yapısı STC dolaşımıyla birleştirilerek kapsama yolu elde edilir; bir başka deyişle Spiral–STC, STC'nin (36)–(38) çerçevesini koruyup dolaşımın sıralamasını "dıştan-içe katmanlar" üzerinden daha düzenli hâle getirmeyi amaçlar [81]. Kompakt bölgelerde bu düzen, dönüş davranışını daha öngörülebilir kılabilir; ancak dar geçitler ve girintili sınırlar altında katmanların parçalanması geri izlemeyi artırabileceğinden overlap ve dönüş sayısının birlikte değerlendirilmesi gerekir [81].

mCPP/Senaryo	Homojen Orman Senaryosu	Doğal Bariyer Senaryosu	Yapay Bariyer Senaryosu
Voronoi			
Ağırlıklı Voronoi			
Trapezoidal/ Boustrophedon			
BSP/ORB			
Graph			
Watershed			



Şekil 25. Sentetik senaryolarda Spiral-STC algoritması kapsama yolu

Şekil 25'te, MATLAB ortamında oluşturulan sentetik senaryolar üzerinde Spiral–STC algoritmasının ürettiği kapsama çıktıları sunulmaktadır. Homojen orman senaryosunda, spiral cephe çoğu bölgede düzenli biçimde ilerleyerek sınırlı geri izleme ile kapsama sağlayabilmektedir. Doğal bariyer senaryosunda (örn. nehir/yarık), bariyer çevresinde sınır izleme davranışı belirginleşmekte ve kapsanmamış adacıklara erişim için geri izleme adımları artabilmektedir. Yapay bariyer senaryosunda (örn. euler+yollar) engel kümeleri daha sık girinti-çıkıntı oluşturduğu için, spiral ilerleme sık sık kesilmekte ve parent (v_t) üzerinden geri izleme daha yoğun gözlenmektedir. Bu gözlemler, engel yoğunluğu ve topolojik dar boğazların dönüş sayısı ve toplam yol uzunluğu üzerindeki etkisini görünür kılmaktadır [14, 83].

Bu noktaya kadar anlatılan yöntemler grid uyumludur. Eğer platform kinematik kısıt taşıyorsa, dönüş yarıçapı etkisini doğrudan hesaba katan Dubins Lawnmower yaklaşımına geçmek gerekir [88].

3.1.2.4. Dubins Lawnmower Algoritması

Dubins Lawnmower, klasik Lawnmower'ın şerit tarama mantığını korur; ancak ardışık şeritler arası geçişleri minimum dönüş yarıçapı $R_{\min}$ kısıtı altında kinematik olarak uygulanabilir hâle getirir [14, 88, 110]. Bu nedenle özellikle sabit kanatlı platformlar veya dönüş kısıtının baskın olduğu araçlar için daha gerçekçi rota üretimi sağlar [88].

Bu yaklaşımda önce waypoint dizisi $P_k = \{p_{k,1}, \dots, p_{k,n_k}\}$ Denklem (30) ile elde edilir; ardından her bir ardışık waypoint çifti için hareket yönünü temsil eden başlık açısı tanımlanır. $p_{k,i} = (x_{k,i}, y_{k,i})$ olmak üzere i. noktadan $i+1$. noktaya geçişin başlık açısı:

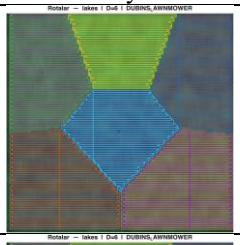
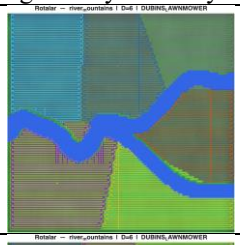
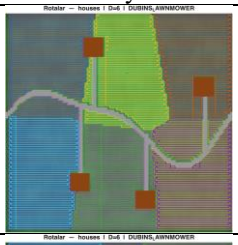
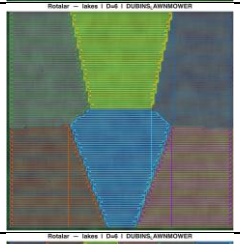
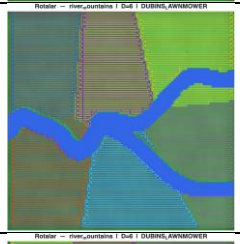
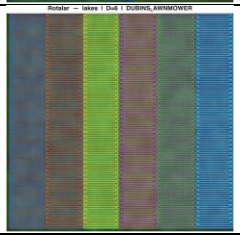
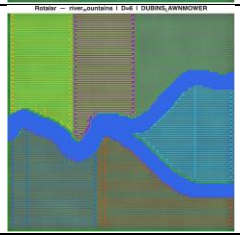
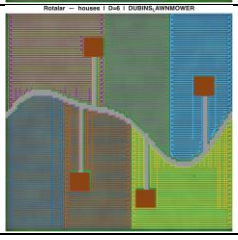
$$\psi_{k,i} = atan2\big(y_{k,i+1} - y_{k,i}, x_{k,i+1} - x_{k,i}\big), \qquad i = 1, \dots, n_k - 1 \tag{41}$$

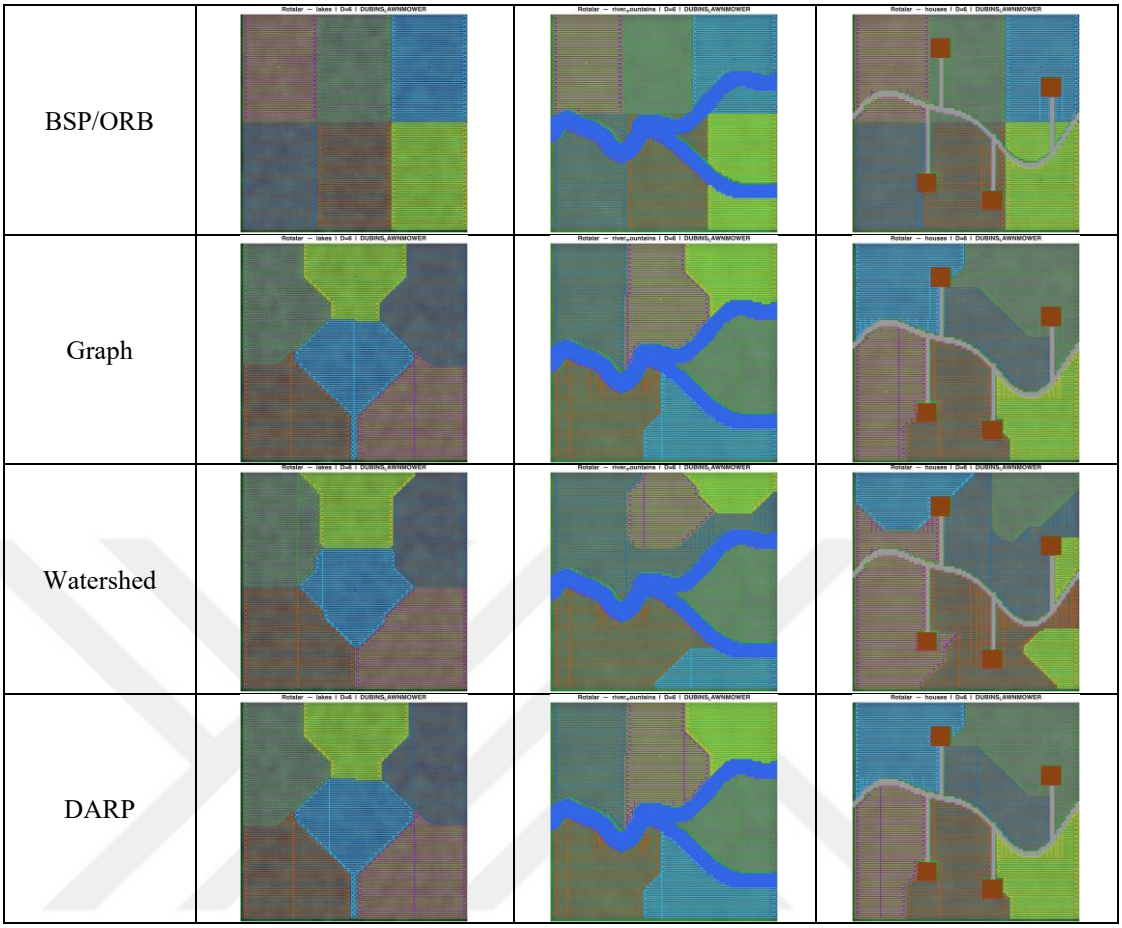
şeklinde ifade edilir. Burada $\mathrm{atan2}\,(\cdot,\cdot)$fonksiyonu, yön bilgisini $(-\pi,\pi)$ aralığında doğru dördünle üretir; $\psi_{k,i}$ise $p_{k,i} \rightarrow p_{k,i+1}$ geçişinin yönelimini (heading) temsil eder.

Dubins bağlantısı, "durum" (konum+başlık) çiftleri arasında, minimum dönüş yarıçapı $R_{\min}$ kısıtı altında en kısa kinematik yol uzunluğunu veren bağlantıdır [88, 110]. Buna göre i. geçiş için başlangıç ve bitiş durumları $(p_{k,i}, \psi_{k,i})$ ve $(p_{k,i+1}, \psi_{k,i+1})$ olarak alınırsa, ilgili Dubins bağlantı uzunluğu $L_D(\cdot)$ ile gösterilebilir. Toplam Dubins yol uzunluğu (toplam Dubins maliyeti) ise ardışık tüm bağlantıların toplamı olarak:

$$L_{\{D,toplam\}}(P_k) = \sum_{i=1}^{n_k-2} L_D\left(\left(p_{k,i}, \psi_{k,i}\right), \left(p_{k,i+1}, \psi_{k,i+1}\right)\right); Rmin) \qquad (42)$$

şeklinde yazılır. Denklem (42), aynı waypoint dizisi üzerinde yalnızca düz çizgi mesafelerinin toplamını değil, dönüş kısıtını içeren kinematik uygulanabilir maliyeti verir. Bu nedenle performans kıyaslamasında özellikle gerçek uçuşa yakın değerlendirmede Dubins maliyeti, rota uzunluğu ve dönüş davranışını daha doğru yansıtan ayırt edici bir ölçüttür [14, 88, 110].

mCPP/Senaryo	Homojen Orman Senaryosu	Doğal Bariyer Senaryosu	Yapay Bariyer Senaryosu
Voronoi			
Ağırlıklı Voronoi			
Trapezoidal/ Boustrophedon			



Şekil 26. Sentetik senaryolarda Dubins-Lawnmower algoritması kapsama yolu

Şekil 26'te, MATLAB ortamında oluşturulan sentetik senaryolarda Dubins Lawnmower yaklaşımının ürettiği kapsama yolları gösterilmektedir. Homojen orman senaryosunda Dubins dönüşleri düzenli aralıklarla tekrarlandığı için yol yapısı öngörülebilir ve kinematik açıdan uygulanabilir niteliktedir. Doğal bariyer senaryosunda (örn. nehir/yarık) bariyerin şeritleri bölmesi nedeniyle bağlantı sayısı artabilmekte; bu durum Dubins dönüş maliyetini ve dolayısıyla toplam yolu büyütebilmektedir. Yapay bariyer senaryosunda (örn. euler+yollar) dar boğazlar ve girintiler, minimum dönüş yarıçapı kısıtı altında daha uzun bağlantılar gerektirebilir. Bu gözlemler, kinematik uyumlu kapsama üretiminin özellikle süre/enerji hesaplarında neden kritik olduğunu somutlaştırmaktadır [88, 110]. Sabit kanat ile uçuş yapıldığında bu yöntemin daha etkili olacağı düşünülmektedir. Çünkü döner kanattan farklı olarak uçak hızı ile dönme çapı arasında makul bir tercih yapılması gerekir. Bu çalışmada pikseller 30mx30m seçildiği için klasik bir sabit kanat için bu dönme mesafesi bir piksel olarak kabul edilmiştir. Haraket hızına göre dönme çapı artırılma ihtiyacı olursa yöntemde rmin değerinin güncellenmesi gerekmektedir.

Grid kapsama yerine ağ/koridor yapısı baskın olduğunda ise rota üretimini "kenarların dolaşılması" olarak ele alan Euler–Postman yaklaşımı anlam kazanır [89].

3.1.2.5. Euler–Postman (Çinli Postacı) Tabanlı CPP Algoritması

Euler–Postman tabanlı yaklaşımlar, kapsama problemini bir graf üzerinde "dolaşılması gereken kenarların en az bir kez ziyaret edilmesi" olarak formüle eder. Bu yaklaşım, özellikle yol ağı/koridor temsiline uygun sahalarda güçlü bir çerçeve sunar [89, 111]. Bu çalışma bağlamında Euler–Postman, graf tabanlı CPP ailesini temsil eden bir seçenek olarak değerlendirilir; toplam yol uzunluğu, overlap ve makespan üzerindeki etkisi üzerinden kıyaslanır [14, 83].

Önce bölgeyi temsil eden bir görev grafı tanımlanır:

Denklem (43), görev grafı

$$G_k = (\mathcal{V}_k, E_k) \tag{43}$$

Burada G_k, k. İHA'ya ait bölge Ω_k için türetilen görev grafını; V_k düğüm kümesini; E_k ise dolaşılması gereken kenarları temsil eder. Bu graf, uygulamada koridor/kenar iskeleti (skeleton) veya hücre bağlantı çizgileri üzerinden oluşturulabilir.

Her bir kenar için maliyet (mesafe/zaman) tanımlanır:

$$c\colon E_k \to \mathbb{R} \geq 0,\ c(e) \text{ kenar maliyeti} \tag{44}$$

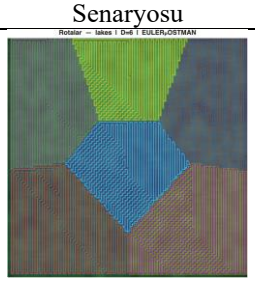
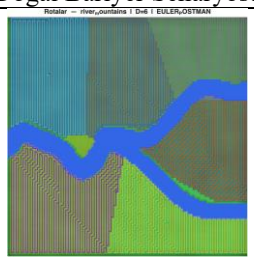
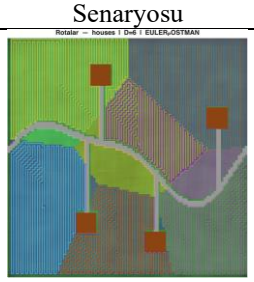
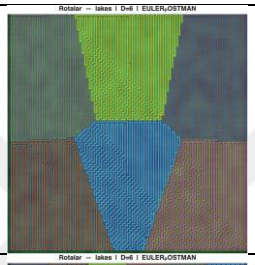
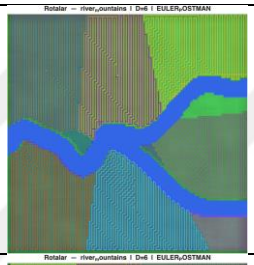
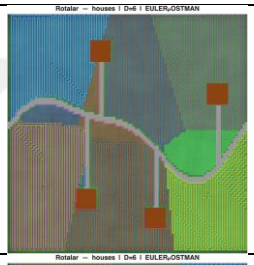
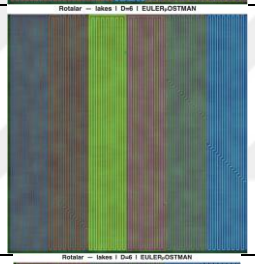
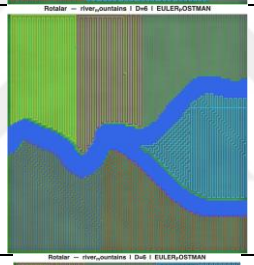
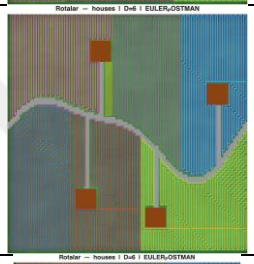
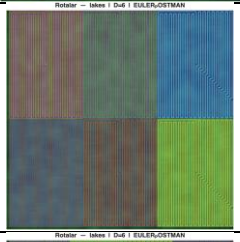
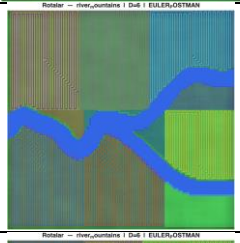
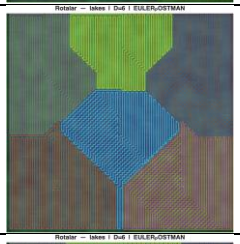
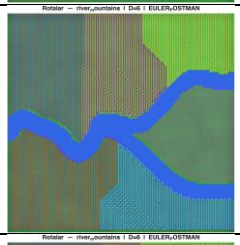
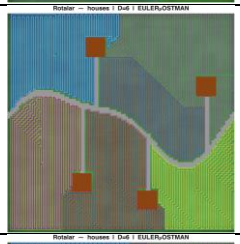
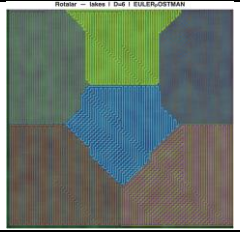
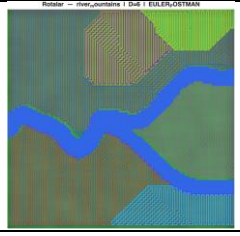
Burada $c(e)$, $e \in E_k$ kenarının uzunluk veya süre eşdeğer maliyetidir (bu çalışma kapsamında metriklerle uyumlu olacak şekilde uzunluk temelli alınabilir).

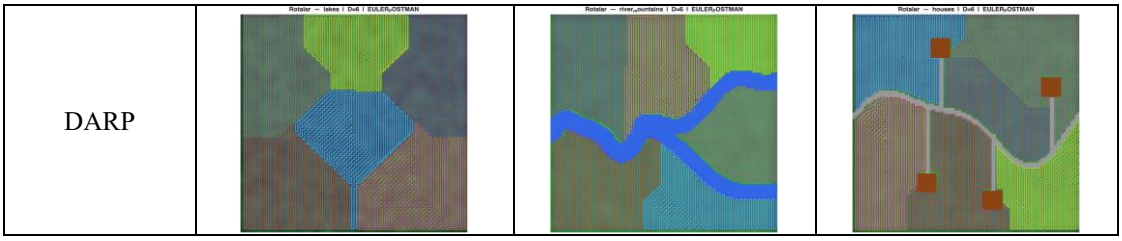
Amaç, gerekli kenarların tamamını kapsayan ve toplam maliyeti minimize eden bir yürüyüş (walk) bulmaktır. $W_k = (e_1, e_2, \dots, e_L)$ olmak üzere, W_k graf üzerinde ardışık kenarlardan oluşan bir yürüyüşü; E_k ise kapsanması gereken kenar kümesini göstersin. Postacı tipi kapsama hedefi:

$$\min_k \ \sum_{i=1}^{L} c(e_i)\ \ \forall e \in E_k,\ \ \exists i \in \{1, \dots, L\}\colon e_i = e \tag{45}$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (45), gerekli kenarların (E_k) en az bir kez yürüyüş içinde yer almasını garanti ederken toplam maliyeti minimize etmeyi hedefler [89, 111]. Elde

edilen yürüyüş daha sonra waypoint dizisine dönüştürülerek Denklem (30) biçimine getirilir; böylece metrikler tüm CPP yöntemleri için aynı çerçevede hesaplanır [14, 83].

mCPP/Senaryo	Homojen Orman Senaryosu	Doğal Bariyer Senaryosu	Yapay Bariyer Senaryosu
Voronoi			
Ağırlıklı Voronoi			
Trapezoidal/ Boustrophedon			
BSP/ORB			
Graph			
Watershed			



Şekil 27. Sentetik senaryolarda Euler-Postman algoritması kapsama yolu

Şekil 27'da, MATLAB ortamında oluşturulan sentetik senaryolarda Euler–Postman tabanlı CPP, kapsama problemini graf düzlemine indirgediği için; özellikle yol ağı, sınır hattı veya iskelet/koridor temelli görevlerde doğal ve güçlü bir çerçeve sunmaktadır. En önemli avantajı, Euler turu üretimi sayesinde "her zorunlu kenarın sistematik biçimde geçilmesini" garanti etmesi ve tekrar geçişleri (overlap) doğrudan optimizasyon yapısının bir parçası hâline getirmesidir [89, 111]. Bununla birlikte, alan kapsama (2B sürekli yüzey) problemlerinde graf temsiline indirgeme adımı tasarım tercihine bağlıdır ve çözümün gerçek kapsama kalitesi bu indirgeme kalitesinden etkilenir. Bir sonraki alt bölümde, CPP algoritmalarının başarımını karşılaştırmak için kullanılan performans metrikleri (kapsama, overlap, yol uzunluğu, makespan, dönüş sayısı, iş yükü dengesi vb.) sistematik biçimde tanımlanacaktır.

Lawnmower, basit ve hızlı bir baseline olarak şerit tarama mantığı sunar [14, 80]. Engelli sahalarda topolojik tutarlılığı güçlendirmek için STC, graf tabanlı kapsama yaklaşımıyla doğal bir alternatif oluşturur [81]. STC'nin dönüş karakterini daha düzenli hale getirmek için Spiral-STC dıştan-içe katman mantığıyla değerlendirilir [81]. Platform kinematiği belirleyici olduğunda Dubins Lawnmower minimum dönüş yarıçapı kısıtını doğrudan modele taşır [14, 88, 110]. Ağ/koridor temsiline uygun görevlerde ise Euler–Postman, kapsama hedefini graf üzerinde rotalama formuna dönüştürerek tamamlayıcı bir bakış sağlar [14, 83, 89, 111].

3.2. Performans Metrikleri

Bu çalışmada çoklu İHA tabanlı kapsama görevlerinin başarımı yalnızca taranan alan oranı ile değil, toplam yol uzunluğu (total path length), görev tamamlama süresi (makespan), dönüş sayısı (number of turns), tekrar tarama oranı (overlap), kapsama oranı (coverage ratio) ve iş yükü dengesi (uniformity) gibi ölçütlerle birlikte değerlendirilmektedir [14, 83, 112]. Bu bölümde kullanılan metrikler, mCPP

katmanındaki kapsama yolları üzerinde tutarlı biçimde hesaplanacak şekilde tanımlanmaktadır. Performans metriklerinde kullanılan ortak semboller ve birimler Tablo 8 ve 9'da sunulmaktadır.

Tablo 8. Performans metriklerinde kullanılan ortak semboller ve tanımlar

Sembol	Tanım
p, q	Grid üzerinde iki ardışık konum/hücre merkezi
$\mathcal{N}_4(p)$	p hücresinin 4-komşuluk kümesi
$\mathcal{N}_8(p)$	p hücresinin 8-komşuluk kümesi
s	Hücre ölçek katsayısı (hücre kenar uzunluğu)
$d(p, q)$	Komşuluk temelli ayrık mesafe
$p_{k,i}$	k. İHA'nın i. adımındaki konumu (waypoint)
m_k	k. İHA'nın yolundaki toplam adım/waypoint sayısı
L_k	k. İHA'nın toplam yol uzunluğu
L_{toplam}	Tüm İHA'ların toplam yol uzunluğu
v_k	k. İHA'nın efektif ortalama hızı
T_k	k. İHA'nın görev süresi
T_{MS}	Takım makespan değeri
$u_{k,i}$	k. İHA'nın i. adımındaki hareket yön vektörü
$\mathbb{I}(\cdot)$	Gösterge (indicator) fonksiyonu
$\nu(p)$	p hücresinin ziyaret sayısı
T_{vis}	Toplam ziyaret sayısı
C_{uni}	En az bir kez ziyaret edilen benzersiz hücre sayısı
ρ_{ov}	Tekrar tarama (overlap) oranı
Ω_T	Taranabilir alan/hücreler kümesi
Ω_{cov}	En az bir kez ziyaret edilen (kapsanan) hücreler kümesi
η_{cov}	Kapsama oranı (coverage ratio)
w_k	k. İHA'nın iş yükü
J	Jain adalet indeksi
U	J'nin [0,1] aralığına normalize edilmiş hâli
N	İHA sayısı

Tablo 9. Performans metriklerinin birimleri

Performans Metriği	Birim
Toplam yol uzunluğu	Adım
Görev tamamlama süresi	Adım (maksimum adım sayısı)
Dönüş sayısı	Adet
Tekrar tarama oranı	Yüzdelik oran
Kapsama oranı	Yüzdelik oran
İş yükü dengesi	Yüzdelik oran

Denklem (46), komşuluk tabanlı ayrık mesafede ardışık iki konum p ve q komşu ise

$$d(p,q) = \begin{cases} 1, & q \in \mathcal{N}_4(p) \\ \sqrt{2}, & q \in \mathcal{N}_8(p) \setminus \mathcal{N}_4(p) \end{cases} \tag{46}$$

3.2.1. Toplam Yol Uzunluğu (Total Path Length)

Burada $\mathcal{N}_4$ $(\cdot)$ ve $\mathcal{N}_8$ $(\cdot)$ sırasıyla 4- ve 8- komşuluk kümeleridir. Fiziksel mesafe gerekiyorsa, her terim s ile çarpılarak metre cinsine çevrilir.

Toplam yol uzunluğu, İHA sürüsünün görevi icra ederken katettiği toplam mesafeyi inceler ve enerji tüketimi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle CPP karşılaştırmalarında temel bir verimlilik ölçütü olarak raporlanmaktadır [14, 83, 112].

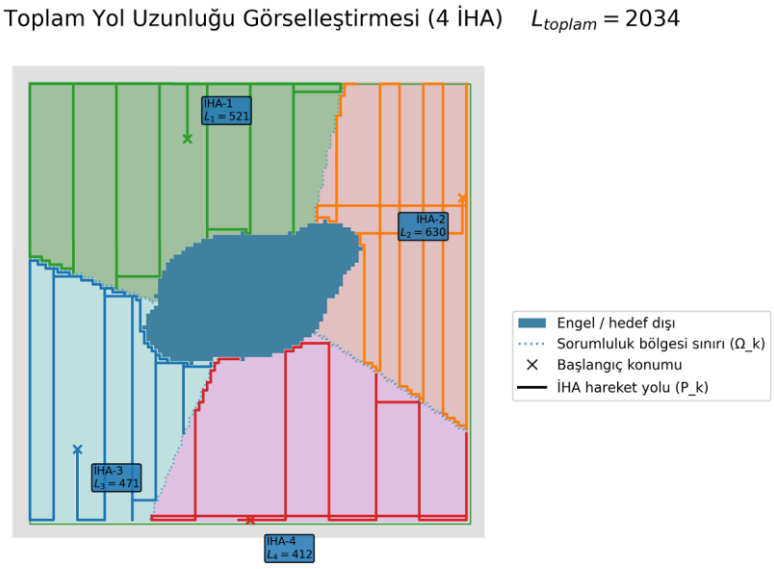
Dneklem (47), k. İHA'nun toplam yol uzunluğudur.

$$L_k = \sum_{i=1}^{m_k-1} d\left(p_{k,i}, p_{k,i+1}\right) \tag{47}$$

Denklem (48), tüm İHA'ların toplam yol uzunluğu,

$$L_{\text{toplam}} = \sum_{k=1}^{N} L_k \tag{48}$$

Yukarıdaki tanımda, her İHA için yol uzunluğu ardışık konumlar arası mesafelerin toplamı olarak hesaplanmaktadır. Sürü düzeyinde toplam yol uzunluğu ise tüm İHA'ların toplam yol uzunluklarının toplamıdır. Şekil 28'de, her bir İHA'nın kendi sorumluluk bölgesi içerisinde görev icrası sırasında izlediği kısmi hareket yolu görselleştirilmiştir. İHA'lara ait yollar farklı renklerle gösterilmiş olup, bu yolların uzunluklarının toplamı L_{toplam} değerini vermektedir.



Şekil 28. Toplam yol uzunluğu (Total Path Length) – Görselleştirilmesi

3.2.2. Toplam Görev Süresi (Makespan)

Çoklu İHA görevlerinde operasyonel tamamlanma süresi, tipik olarak en geç tamamlayan İHA tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle takımın görev bitiş süresi makespan olarak tanımlanır ve CPP/mCPP performans yorumlarında temel bir ölçüttür [14, 112, 113].

Denklem (49), k'ncı İHA'nın görev süresidir.

$$T_k = \frac{L_k}{v_k} \tag{49}$$

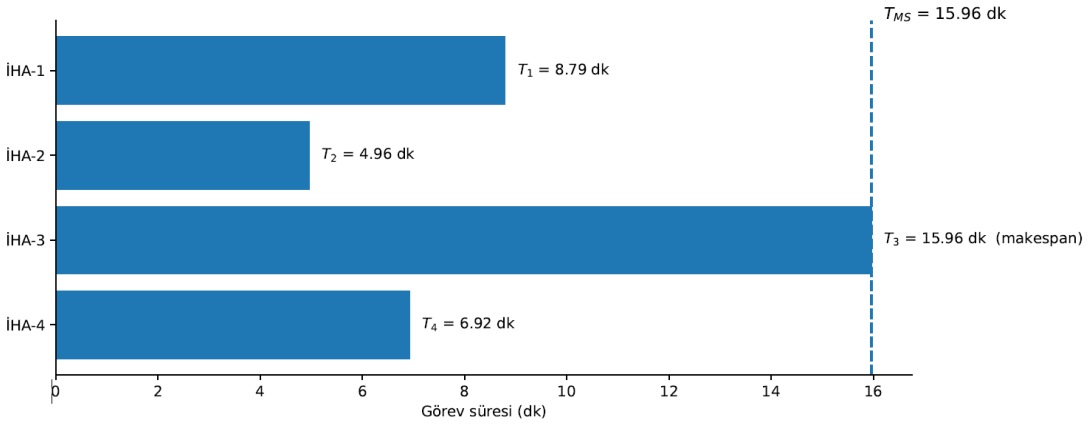
Bu denklem, k. İHA'nın görev süresini, kat edilen yol uzunluğu L_k ile efektif hız v_k üzerinden doğrudan ilişkilendirir ve süre maliyetini ölçülebilir hale getirir. Buna göre L_k büyüdükçe T_k artar; aynı yol uzunluğunda v_k yükseldikçe görev süresi azalır. Bu tanım, takım düzeyinde tamamlanma süresini belirlemek üzere Denklem (50)'de kullanılan maksimum operatörüne temel oluşturur.

Denklem (50), İHA sürüsünün makespan değeridir.

$$T_{\{MS\}} = \max_{\{k\in\{1,\dots,N\}\}} T_k \tag{50}$$

Bu denklem, takımın toplam görevi bitirme süresini (makespan) en uzun görev süresine sahip İHA üzerinden tanımlar; bu nedenle metrik doğrudan "en yavaş İHA" etkisini yakalar. Bölütleme dengesizliği veya bariyer kaynaklı rota uzaması, bazı T_k değerlerini büyüterek makespan'i yükseltir ve sistem performansını sınırlar. Bu yüzden makespan, yol uzunluğu ve tekrar tarama gibi metriklerle birlikte yorumlandığında mCPP–CPP kombinasyonlarının operasyonel etkinliği daha net görünür.

Şekil 29'de her bir İHA'ya ait görev süreleri yatay çubuklar halinde gösterilmiş; en uzun görev süresine karşılık gelen çubuk (örnekte İHA-3) takımın görev tamamlanma anını belirlemiştir. Şekilde kesikli düşey çizgi ile işaretlenen değer T_{MS} olup, tüm İHA'ların görevini tamamlaması için gerekli minimum toplam operasyon süresini temsil etmektedir. Bu çerçevede makespan metriği, özellikle mCPP aşamasındaki bölütleme/atama kararlarının "yük dengeleme" başarımını ve CPP aşamasında üretilen yolların süreye etkisini birlikte değerlendirmeye imkân verir.



Şekil 29. Toplam görev süresi (Makespan) – Görselleştirilmesi

3.2.3. Dönüş Sayısı (Number of Turns)

Dönüş sayısı, kapsama yolunun manevra yoğunluğunu nicelleyen bir metriktir. Özellikle grid tabanlı kapsama yollarında sık yön değişimi; enerji tüketimini, zaman kaybını ve izleme hatası riskini artırabildiğinden, rota karmaşıklığını karşılaştırmada ayırt edici bir ölçüt sağlar [14, 112, 113].

k. İHA'nın kapsama yolu $P_k = \{p_{k,1}, \dots, p_{k,n_k}\}$ için i. adım yönü $\mathrm{u}_{k,i} = p_{k,i+1} - p_{k,i}$ olarak tanımlanır. $N_{\{turn,k\}}$, k. İHA'nın kapsama yolu boyunca gerçekleştirdiği toplam dönüş sayısıdır ve ardışık iki adımın yön vektörünün değiştiği durumların sayısı olarak

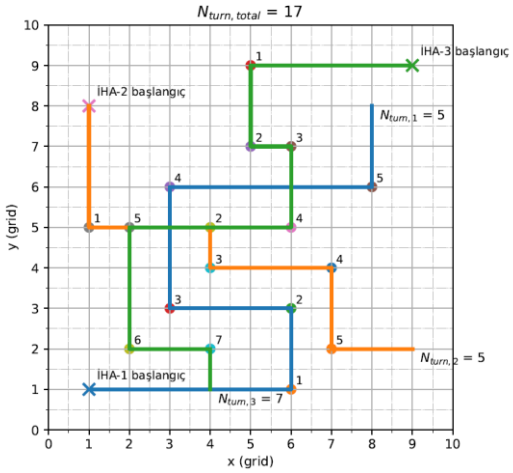
$$N_{\{turn,k\}} = \sum_{i=2}^{m_k-1} \mathbb{I}\left(u_{k,i} \neq u_{k,i-1}\right) \tag{51}$$

şeklinde hesaplanır. Burada $\mathbb{I}(\cdot)$ gösterge (indicator) fonksiyonudur; parantez içindeki koşul doğruysa 1, aksi hâlde 0 değerini alır.

İHA sürüsünün toplam dönüş sayısı ise tüm İHA'ların dönüş sayılarının toplamı olarak:

$$N_{\{turn,total\}} = \sum_{k=1}^{N} N_{\{turn,k\}} \tag{52}$$

biçiminde tanımlanır. Bu metrik, CPP aşamasında üretilen rotaların manevra karmaşıklığını karşılaştırmak ve görev icrası sırasında oluşabilecek zaman/enerji kayıplarını dolaylı olarak değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır [14, 112, 113].



Şekil 30. Dönüş sayısı (number of turns) – Görselleştirilmesi

3.2.4. Tekrar Tarama Oranı (Overlap)

Tekrar tarama oranı (overlap), kapsama sırasında aynı hücrelerin birden fazla kez ziyaret edilmesini niceler. Erken tespit bağlamında amaç geniş alanı verimli biçimde taramak olduğundan, kontrolsüz tekrar tarama verimlilik kaybı olarak değerlendirilir [14, 30, 112]. Denklem (53), tüm hücreler üzerindeki ziyaretlerin toplamıdır.

$$T_{\{vis\}} = \sum_{\{p\in\Omega_T\}} v(p) \tag{53}$$

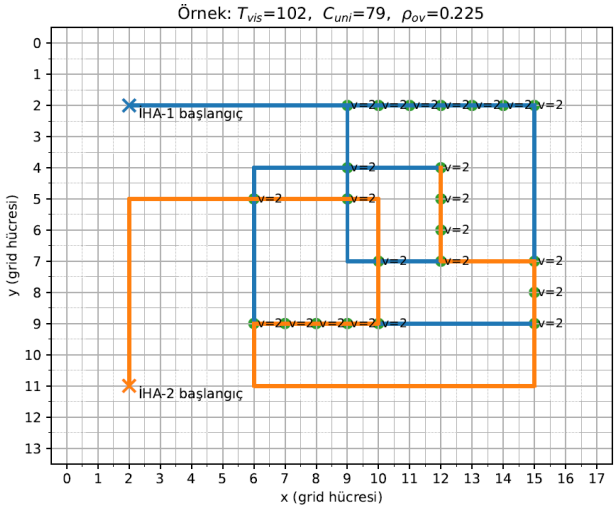
Denklem (54), en az bir kez ziyaret edilen benzersiz hücre sayısıdır.

$$C_{\{uni\}} = \sum_{\{p\in\Omega_T\}} \mathbb{I}(\, v(p) > 0\,) \tag{54}$$

Denklem (55), tekrar tarama (overlap) oranıdır.

$$\rho_{\{ov\}} = 1 - \left(\frac{C_{\{uni\}}}{T_{\{vis\}}}\right) \tag{55}$$

olarak tanımlanır. ρ_{ov} değeri 0'a yaklaştıkça tekrar tarama azalmakta; 1'e yaklaştıkça ziyaretlerin büyük bir bölümü aynı hücrelerde tekrar etmektedir. Bu denklem, ziyaret sayısı $v(p)$ en az 2 olan hücreleri seçerek tekrar taranan alanı Ω_{ov} kümesi olarak tanımlar ve "gereksiz tekrar" bileşenini ayrıştırır. Böylece yalnızca kapsanan alan değil, kapsanan alanın ne kadarının yeniden ziyaret edildiği de ayrı bir büyüklük olarak izlenebilir. Bu küme tanımı, tekrar tarama oranının sayısal olarak hesaplandığı Denklem (56)'ya doğrudan girdi sağlar.



Şekil 31. Tekrar tarama oranı (Overlap)- Görselleştirilmesi

Şekil 31'da iki İHA'ya ait örnek görev yolları grid üzerinde gösterilmiştir. Şekilde ayrıca birden fazla kez ziyaret edilen hücreler işaretlenmiş ve ilgili hücrelerdeki ziyaret sayısı $v(p)$ değerleri üzerinde gösterilmiştir. Bu görselleştirme, T_{vis} büyüdükçe ancak C_{uni} aynı hızda artmadığında (yani ziyaretlerin önemli kısmı tekrar hücrelerde gerçekleştiğinde) ρ_{ov} değerinin yükseldiğini doğrudan ortaya koymaktadır. Bununla birlikte overlap metriği kapsama oranıyla birlikte yorumlanmalıdır; zira düşük ρ_{ov} değeri tek başına yüksek kapsama başarımı anlamına gelmeyebilir.

3.2.5. Kapsama oranı (Coverage ratio)

Kapsama oranı, taranabilir alanın (Ω_T) ne kadarının en az bir kez gözlemlendiğini ifade eder ve görevin temel başarı kriteridir [14, 83, 112].

Denklem (56), en az bir kez ziyaret edilen (kapsanan) hücreler kümesidir.

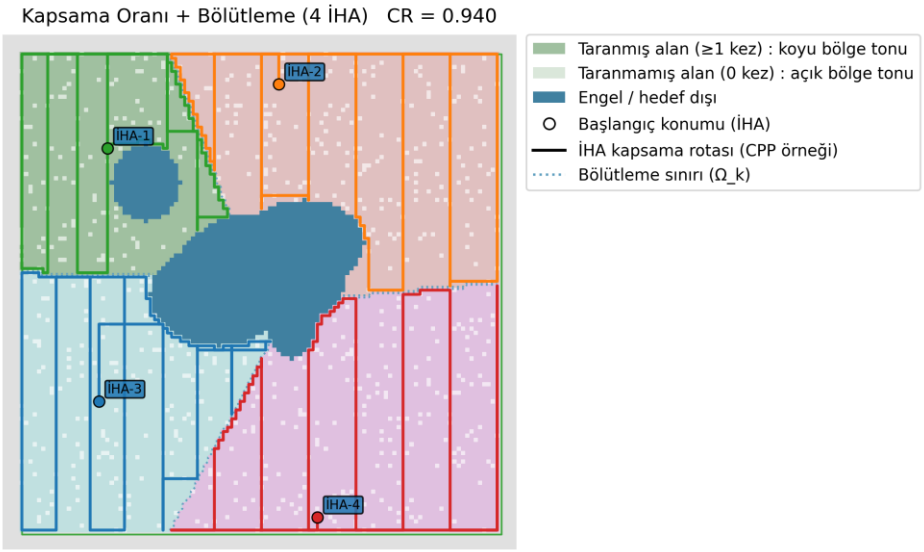
$$\Omega_{\{cov\}} = \{\, p \in \Omega_T : v(p) > 0 \,\} \tag{56}$$

Bu denklem, overlap'ı Ω_{ov} kümesinin büyüklüğünü uygun referans kümeye oranlayarak $[0-1]$ aralığında bir oran şeklinde ifade eder; raporda yüzde kullanılacaksa değer 100 ile çarpılarak sunulur. Oranın artması, aynı kapsama başarımı altında daha fazla tekrar ziyaret yapıldığını ve bunun yol/süre maliyetini büyütebileceğini gösterir. Bu nedenle overlap, kapsama başarımını temsil eden oranla birlikte değerlendirilir ve kapsama oranı Denklem (57) ile tamamlanır.

$$\eta_{\{cov\}} = \frac{|\Omega_{\{cov\}}|}{|\Omega_T|} \tag{57}$$

Bu denklem, taranabilir alanın (Ω_T veya Ω_F) ne kadarının en az bir kez ziyaret edildiğini oranlayarak kapsama başarımını η_{cov} ile niceler. η_{cov} değeri 1'e yaklaştıkça taranabilir alanın tamamına yakın bir kısmı kapsanır; düşük değerler ise eksik taramayı işaret eder. Kapsama yüksek olsa bile tekrar tarama artabileceği için, sonraki metriklerde verimlilik boyutu (overlap, yol uzunluğu ve süre) ayrıca izlenir.

Şekil 32'de örnek bir 4-İHA senaryosu üzerinde görselleştirilmiştir. Şekilde taranabilir alan Ω_T, mCPP çıktısı olarak dört sorumluluk bölgesine (Ω_k) ayrılmış; her bölge için ilgili İHA'nın başlangıç konumu ve yalnızca kendi bölgesinde ürettiği kapsama rotası gösterilmiştir. Koyu tonlu hücreler en az bir kez ziyaret edilen Ω_{cov} kümesini (kapsanan alan), açık tonlu hücreler ise $v(p) = 0$ olan kapsanamayan bölgeleri temsil etmektedir. Engel/hedef dışı alanlar taranabilir uzaydan çıkarıldığı için Ω_T dışında kalmakta ve η_{cov} hesabına dâhil edilmemektedir.



Şekil 32. Kapsama oranı (Coverage ratio) - Görselleştirilmesi

Grid tabanlı simülasyonda $|\Omega_T|$ ve $|\Omega_{cov}|$ doğrudan hücre sayımı ile elde edilir. Tam kapsama mümkün olduğunda $\eta_{cov} \approx 1$ beklenmektedir; ancak engeller ve bağlantısallık sınırlamaları altında kapsanamayan bölgeler oluşabilmekte ve bu durum η_{cov} değerini düşürmektedir. Bu nedenle kapsama oranı, hem bölütleme (mCPP) kararlarının erişilebilirlik üzerindeki etkisini hem de bölge içi kapsama yolu (CPP) tasarımının etkinliğini birlikte yansıtan bir performans göstergesi olarak raporlanmıştır.

3.2.6. İş yükü dengesi (Uniformity)

İş yükü dengesi, takımın görevi İHA'lar arasında ne kadar eşit paylaştığını nicelleştirir. Dengesiz yük dağılımı, bazı İHA'ların erken tamamlayıp beklemeye geçmesine ve dolayısıyla takım tamamlanma süresinin (makespan) artmasına yol açabilir. Bu çalışmada farklı İHA sayıları (N) arasında karşılaştırmaya elverişli, 0–1 aralığında yorumlanabilir bir ölçüt sunması nedeniyle Jain adalet indeksi kullanılmıştır [4].

w_k, k. İHA'nın iş yükünü temsil etsin ($k = 1, \dots, N$). Bu çalışma kapsamında w_k, simülasyon çıktılarından türetilen bir iş yükü büyüklüğüdür ve örnek görselleştirmede "erişilebilir hücre sayısı" üzerinden gösterilmiştir. Jain adalet indeksi, iş yükü değerleri üzerinden:

$$J = \frac{\left(\left(\sum_{\{k=1\}}^{\{N\}} w_k\right)^2\right)}{N \sum_{\{k=1\}}^{\{N\}} W_k^2} \tag{58}$$

şeklinde hesaplanır. Burada $J \in \left[\frac{1}{N}, 1\right]$ olup J değeri 1'e yaklaştıkça iş yükleri birbirine yaklaşır ve dağılım daha dengeli hâle gelir; bazı w_k değerleri belirgin biçimde büyüdüğünde J düşer ve dengesizlik artar. Ancak J'nin alt sınırı N'ye bağlı olduğundan, farklı N değerleri arasında doğrudan kıyas için normalize edilmiş gösterim daha uygundur.

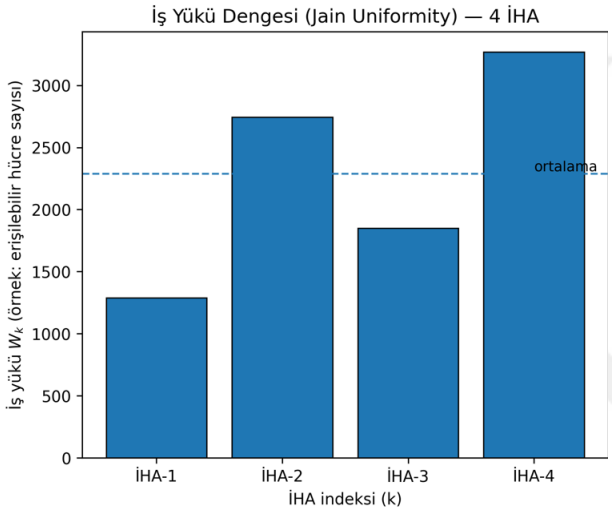
Bu amaçla Jain indeksini [0,1] aralığına taşıyan normalize denge metriği:

$$U = \frac{\left(J - \frac{1}{N}\right)}{\left(1 - \frac{1}{N}\right)} \tag{59}$$

olarak tanımlanır. Buna göre U yükseldikçe iş dağılımı daha dengeli hâle gelir; düşük U değerleri bazı İHA'ların aşırı yük aldığını, bazılarının ise erken tamamlayıp beklemeye geçebileceğini ve bunun takım makespan'ini büyütebileceğini gösterir. Bu nedenle U, süre temelli metriklerle (özellikle makespan) birlikte değerlendirildiğinde bölütleme/atama kalitesinin operasyonel etkisini daha açık biçimde görünür kılar.

Bu metrik, Şekil 33'de örnek bir 4-İHA senaryosu üzerinden görselleştirilmiştir. Şekilde her bir İHA için iş yükü w_k değerleri sütun grafik biçiminde sunulmakta; kesikli yatay çizgi ise takımın ortalama iş yükü düzeyini göstermektedir. Sütunların ortalama çizgi

etrafında birbirine yakın olması, iş yüklerinin daha dengeli dağıtıldığını; bazı sütunların ortalamanın belirgin biçimde altında/üstünde kalması ise yük dağılımında dengesizlik oluştuğunu ifade eder. Bu çalışmada w_k, simülasyon çıktılarından türetilen bir iş yükü büyüklüğünü temsil etmekte olup Şekil 33'de örnek olarak "erişilebilir hücre sayısı" üzerinden gösterilmiştir. Bu bağlamda, daha yüksek $w_k$değerine sahip İHA'nın daha fazla alan/iş üstlendiği; daha düşük w_k değerine sahip İHA'nın ise görevi daha erken tamamlayıp bekleme durumuna geçebileceği ve bunun da takım makespan'ini olumsuz etkileyebileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 33. İş yükü dengesi (Uniformity)- Görselleştirilmesi

Özetle, bu bölümde tanımlanan metrik seti; kapsama başarımını ($\eta_{\{cov\}}$), verimliliği ($L_{toplam}, T_{\{MS\}}$) manevra yoğunluğunu ($N_{\{turn,total\}}$), tekrar taramayı ($\rho_{\{ov\}}$) ve takım içi dengeyi (U) birlikte değerlendirmeye imkân vermektedir. Sonraki bölümde, farklı mCPP–CPP kombinasyonlarının senaryo bazlı sonuçları bu metrikler üzerinden karşılaştırmalı tablolar ve şekillerle sunulacaktır.

Bu bölümde, erken orman yangını tespiti problemine yönelik CPP ve mCPP yaklaşımları, kullanılan algoritmalar ve performans metrikleri ortak bir değerlendirme zemini oluşturacak biçimde sunulmuştur. Ayrıca, heterojen gerçek haritaların kapsama planlama problemine uyarlanabilmesi için benimsenen harita temsili ile maskeleme/filtreleme yaklaşımı tanımlanmıştır.

İzleyen bölümde, bu çerçeve temel alınarak MATLAB tabanlı simülasyon altyapısı üzerinden elde edilen sonuçlar; orman parçalılığı, nehir/su yoğunluğu, yerleşim/engel yoğunluğu, filtreleme seviyesi ve İHA sayısı gibi değişkenler açısından karşılaştırmalı olarak incelenmekte ve algoritmaların erken tespit odaklı sürekli gözetleme görevlerindeki performans eğilimleri değerlendirilmektedir.

4. BÖLÜM

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu bölümde, otonom erken orman yangını tespit sistemine yönelik çoklu İHA kapsama planlama (mCPP) ve kapsama planlama (CPP) yaklaşımlarının, farklı çevresel karmaşıklık koşulları altında gösterdikleri performans karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Orman parçalılığı, nehir/su yoğunluğu ve yerleşim yeri/engel yoğunluklarındaki artışın algoritmalara yansıması senaryo kümeleri üzerinden ele alınmakta; üretilen kapsama planları toplam yol uzunluğu, görev süresi (makespan), kapsama oranı, tekrar tarama oranı (overlap), dönüş sayısı ve iş yükü dengesi (uniformity) metrikleri ile nicel olarak değerlendirilmektedir.

Çevresel değişkenlerin etkisini daha açık biçimde ayrıştırabilmek amacıyla MATLAB ortamında özgün olarak tasarlanan sentetik kontrol haritaları kullanılmıştır. Orman, su ve engel yoğunluklarının kademeli olarak değiştirildiği bu senaryolar, mCPP/CPP problem tanımına uygun biçimde üretilmiş; böylece tek bir değişkenin artırılmasıyla oluşan etkinin diğer koşullardan bağımsız biçimde izlenmesi sağlanmıştır.

Bu değerlendirme, yöntemlerin yalnızca tekil örneklerdeki çıktılarının karşılaştırılmasıyla sınırlı değildir; senaryo kümeleri, algoritmaların çevresel karmaşıklık arttıkça gösterdikleri davranış değişimlerini, kırılma eğilimlerini ve denge–verimlilik takasını görünür kılacak biçimde bir stres testi yaklaşımıyla kurgulanmıştır. Bu stres testi; sentetik haritalarda orman parçalılığının kademeli artırılması, nehir/su yoğunluğunun artırılması, yerleşim yeri/engel yoğunluğunun artırılması, ESA WorldCover 2021 tabanlı haritalarda orijinal (ham) ve filtrelenmiş temsillerin karşılaştırılması ve aynı ESA WorldCover haritasında İHA sayısı artırıldıkça mCPP/CPP kombinasyonlarının metriklerde ürettiği değişimin izlenmesi eksenlerinde yürütülmüştür. Böylece yöntemlerin yalnızca “en iyi koşul” altında değil, çevresel zorluklar ve operasyonel

parametreler değiştikçe sağlamlık (robustness) bakımından nasıl davrandığı karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmiştir.

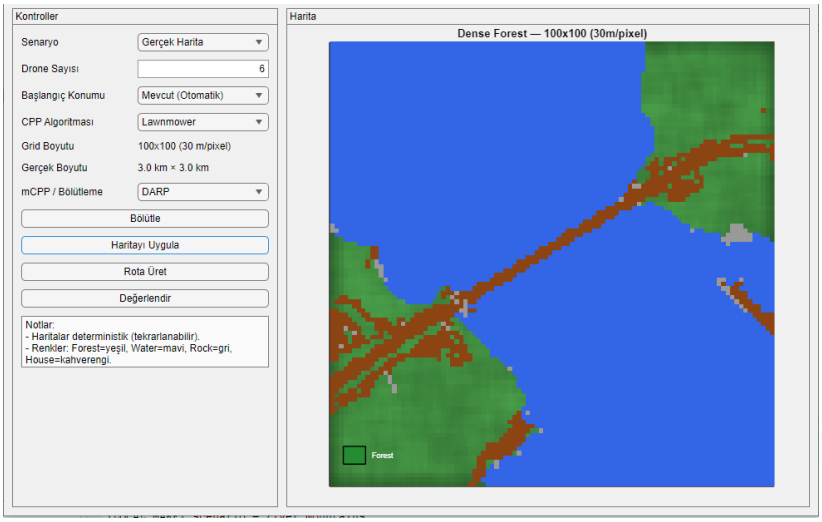
Gerçek dünya koşullarını temsil etmek üzere ESA WorldCover 2021 veri seti temel alınmış; Şekil 15'te verilen iş akışı izlenerek seçilen ROI 100×100 grid temsiline dönüştürülmüş ve sınıf kararları tek bir veri sözlüğü altında birleştirilmiştir. WorldCover sınıfları "yanabilir (hedef kapsama)" ve "yanamaz (hedef dışı/kısıt)" olarak iki gruba indirgenmiş; kapsama odağı yakıt sürekliliği bulunan orman kütlelerine yönlendirilmiştir. Heterojen haritalarda yerleşim alanları çevresindeki küçük yanabilir adacıkların operasyonel önceliğinin düşük olması nedeniyle filtreleme/maskeleme düzeyi ayrıca kontrol edilmiş; aynı ROI üzerinde farklı filtreleme seviyeleri ve farklı İHA sayıları altında algoritma kombinasyonları uygulanarak metriklerdeki değişim karşılaştırmalı biçimde ortaya konulmuştur.

4.1. MATLAB Simülasyon Altyapısı ve Harita Ön-İşleme Bileşenleri

Bu alt bölümde, çalışmada kullanılan MATLAB tabanlı simülasyon altyapısı ve bu altyapıyı tamamlayan yardımcı arayüzler bütüncül bir çerçevede sunulmaktadır. Ana simülatör; senaryo türü, İHA sayısı ve seçilen mCPP/CPP algoritma kombinasyonunu girdi olarak alarak harita üretimi, bölütleme, rota üretimi ve performans metriklerinin kaydı adımlarını tek bir iş akışı içinde yürütmektedir. Yardımcı arayüzler ise CSV tabanlı yörünge görselleştirme ile kapsama örüntülerinin mekânsal olarak izlenmesini ve ESA WorldCover tabanlı haritaların maskeleme/filtreleme ön-işlemesini desteklemektedir.

4.1.1. MATLAB Tabanlı Kapsama Planlama Simülatörü

Bu çalışmada kullanılan MATLAB tabanlı kapsama planlama simülatörü, erken orman yangını tespiti görevine yönelik olarak geliştirilen kapsama planlama (CPP) ve çoklu İHA kapsama planlama (mCPP) yaklaşımlarının bütünleşik biçimde değerlendirilmesini sağlayan bir ana kontrol ve görselleştirme altyapısı sunmaktadır. Şekil 34'de örnek arayüzü verilen simülatör, kullanıcının senaryo türünü, İHA sayısını, bölütleme (mCPP) ve kapsama yolu üretim (CPP) algoritmalarını seçmesine olanak tanımakta; seçilen yapılandırma altında harita üretimi, bölütleme, rota oluşturma ve performans çıktılarının elde edilmesini tek bir platform üzerinden gerçekleştirmektedir.



Şekil 34. MATLAB tabanlı simülasyon arayüzü

Arayüzün sol bölümünde yer alan kontrol paneli aracılığıyla senaryo türü (sentetik veya gerçek harita), İHA sayısı, başlangıç konumu tanımı, CPP algoritması ve mCPP bölütleme yöntemi belirlenmektedir. Sağ bölümde ise seçilen senaryoya karşılık gelen 100×100 grid temelli harita temsili gösterilmektedir. Bu temsilde her bir hücre yaklaşık 30 m × 30 m'lik bir alanı ifade etmekte olup toplam görev alanı yaklaşık 3 km × 3 km boyutundadır. Harita üzerinde farklı arazi sınıfları renk kodlarıyla ayırt edilmekte; yanabilir alanlar (orman) kapsama hedefi olarak ele alınırken, yanamaz alanlar (ör. su, yerleşim, kaya vb.) ve engel etkileri kapsama planlama sürecinde ilgili kısıtlar altında değerlendirilmektedir.

Simülatörün temel amacı, farklı çevresel senaryolar ve algoritma kombinasyonları altında üretilen kapsama planlarının karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir bir yapı içinde incelenmesidir. Bu nedenle senaryolar arasında değişkenlik gösteren unsurlar yalnızca harita içeriği, filtreleme düzeyi veya İHA sayısı ile sınırlandırılmış; diğer tüm parametreler sabit tutularak elde edilen çıktılar üzerinde doğrudan etkisi olan faktörlerin daha açık biçimde ortaya konulması hedeflenmiştir.

Bu sabit parametre seti Tablo 10'da özetlenmiştir. Buna göre ortak mekânsal temsil 100×100 grid ve 30 m×30 m hücre boyutu ile tanımlanmış; simülasyon kapsamı yaklaşık 3 km×3 km olarak sabitlenmiştir. Grid üzerinde hareket/erişilebilirlik değerlendirmesinde 4-komşuluk bağlantı varsayımı kullanılarak rota üretimi ve metrik hesapları aynı komşuluk kuralı altında tutarlı biçimde yürütülmüştür. Süre temelli karşılaştırmalarda hız

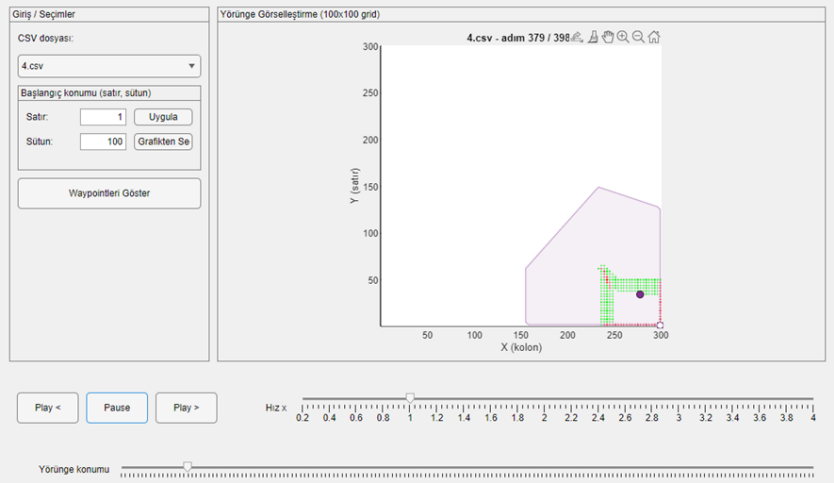
değişkenliğinin sonucu maskelemesini önlemek amacıyla hareket modeli normalize sabit hız varsayımıyla ele alınmış; dolayısıyla süre ve makespan hesapları eşit hız kabulü altında yapılmıştır. Tekrarlanabilirliği sağlamak üzere simülasyon deterministik çalışacak biçimde kurgulanmış ve rastgelelik kapalı tutulmuştur. Son olarak, tüm deneylerde aynı performans metrik setinin aynı kayıt biçimiyle üretilmesi hedeflenmiş ve çıktılar sabit formatta kaydedilmiştir.

Tablo10. Matlab yangın simülatöründeki sabit parametreler

Parametre	Değer	Açıklama
Izgara / çözünürlük	100×100; 30 m×30 m	Ortak mekânsal temsil
Görev alanı	3 km×3 km	Simülasyon kapsamı
Bağlantı varsayımı	4-komşuluk	Grid geçiş kuralı
Hareket modeli	Sabit hız (normalize)	Süre hesaplarında eşit hız varsayımı
Başlangıç koşulu	Otomatik atama	Senaryoya göre başlangıç noktası seçimi
Arazi sınıfları	Yanabilir / Yanamaz	İkili maske (WorldCover/sentetik)
Tekrarlanabilirlik	Deterministik	Rastgelelik kapalı
Çıktı/metrik kaydı	Sabit metrik seti + kayıt	Sonuçlar aynı formatta kaydedilir

4.1.2. Kapsama Yolu Görselleştirme ve Animasyon Arayüzü

Bu alt bölümde, ana simülatör tarafından üretilen CSV formatındaki waypoint (kapsama yolu) çıktılarının MATLAB ortamında geliştirilen yardımcı bir arayüz aracılığıyla içe aktarılması ve İHA'ların kapsama sürecindeki hareketlerinin 100×100 grid temsili üzerinde görselleştirilmesi sunulmaktadır. Bu görselleştirme bileşeni, değerlendirmeyi yalnızca sayısal performans metrikleri üzerinden yürütmekle sınırlamayıp; kapsama düzeninin mekânsal (hangi bölgelerin hangi sırayla tarandığı) ve zamansal (ilerleme örüntüsü) karakterinin de izlenebilmesini amaçlamaktadır.



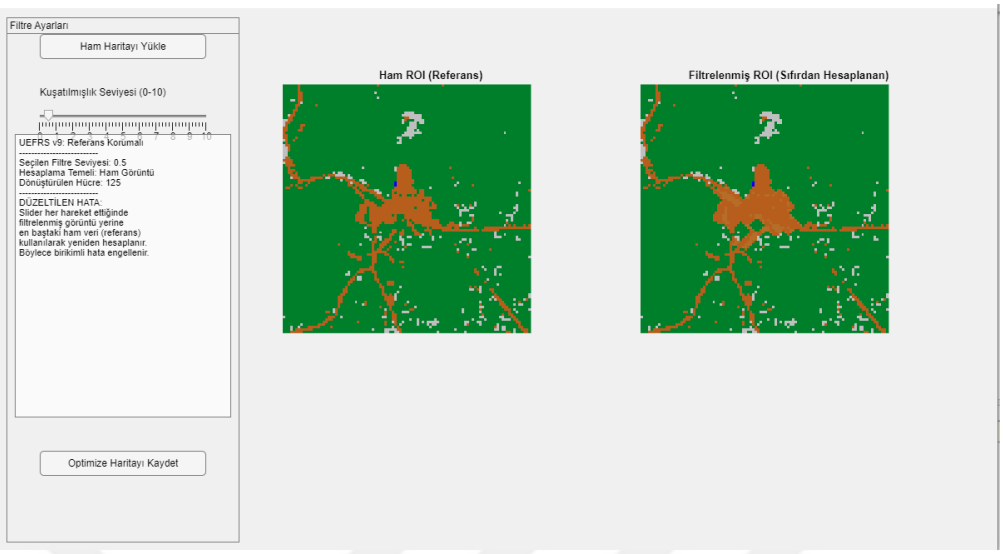
Şekil 35. CSV tabanlı yörünge görselleştirme arayüzü

Şekil 35'te CSV dosyasının seçimi, başlangıç konumunun (satır–sütun) tanımlanması ve waypoint gösterimi gibi ayarlar sol panel üzerinden yapılmakta; sağ panelde ise seçilen İHA'ya ait kapsama yolu 100×100 grid üzerinde adım adım izlenebilmektedir. Alt bölümde yer alan zaman ve hız kontrolleri ile görselleştirme/animasyon ileri–geri sarma ve farklı hızlarda yürütme seçenekleriyle yönetilmektedir.

Bu arayüzün temel amacı, üretilen kapsama yollarının geometrik tutarlılığını ve kapsama örüntüsünü görsel olarak izleyerek; özellikle heterojen haritalarda ortaya çıkabilecek yol atlaması, sınır ihlali veya düzensiz kapsama örüntüsü gibi durumların yorumlanmasını desteklemektir. Dolayısıyla arayüz, tek başına bir doğrulama mekanizması olarak değil; sayısal performans metriklerinin mekânsal bağlamda okunmasına yardımcı olan tamamlayıcı bir analiz/görselleştirme bileşeni olarak kullanılmaktadır.

4.1.3. ESA WorldCover Heterojen Haritalarda Kapsama Odağı

Bu alt bölümde, ESA WorldCover 2021 tabanlı gerçek arazi örtüsü haritalarının kapsama planlama problemine uygun hâle getirilmesi için geliştirilen maskeleme ve filtreleme arayüzü sunulmaktadır. Gerçek haritalar, kapsama açısından düşük öncelikli küçük ve parçalı bileşenler (özellikle yerleşim çevresindeki küçük yanabilir adacıklar) içerebildiğinden, bu alanların kapsama yüküne dâhil edilmesi yol uzunluğunu artırabilmekte ve iş yükü dengesini bozabilmektedir. Bu nedenle, WorldCover verisi doğrudan kullanılmayarak görev amacına uyumlu bir ön-işleme adımı uygulanmıştır.



Şekil 36. ESA WorldCover Tabanlı Haritaların Filtreleme Arayüzü

Şekil 36'te, seçilen bir ROI için ham WorldCover görünümü ile filtreleme sonrası elde edilen optimize edilmiş harita yan yana gösterilmektedir. Kuşatılmışlık (enclosure) temelli filtreleme ile küçük/izole yanabilir yamalar, süreklilik gösteren orman kütlelerinden ayrıştırılmakta; böylece kapsama odağı erken tespit açısından daha öncelikli geniş orman alanlarına yönlendirilmektedir. Filtreleme seviyesinin kademeli ayarlanması, aynı ROI üzerinde farklı maskeleme düzeylerinin üretilmesine ve bu düzeylerin performans metriklerine etkisinin karşılaştırılmasına imkân vermektedir.

Bu arayüz, görsel düzenlemeden ziyade heterojen arazi örtüsünü kapsama planlamanın varsayımlarıyla tutarlı hâle getiren bir standardizasyon bileşenidir. Filtreleme sayesinde, mCPP/CPP performansı sınıflandırma gürültüsü ve düşük öncelikli alanların etkisi azaltılarak daha temsilî bir zeminde değerlendirilebilmekte; gerçek haritalarda filtreleme düzeyinin yol uzunluğu, görev süresi ve iş yükü dengesi üzerindeki etkisi doğrudan incelenebilmektedir.

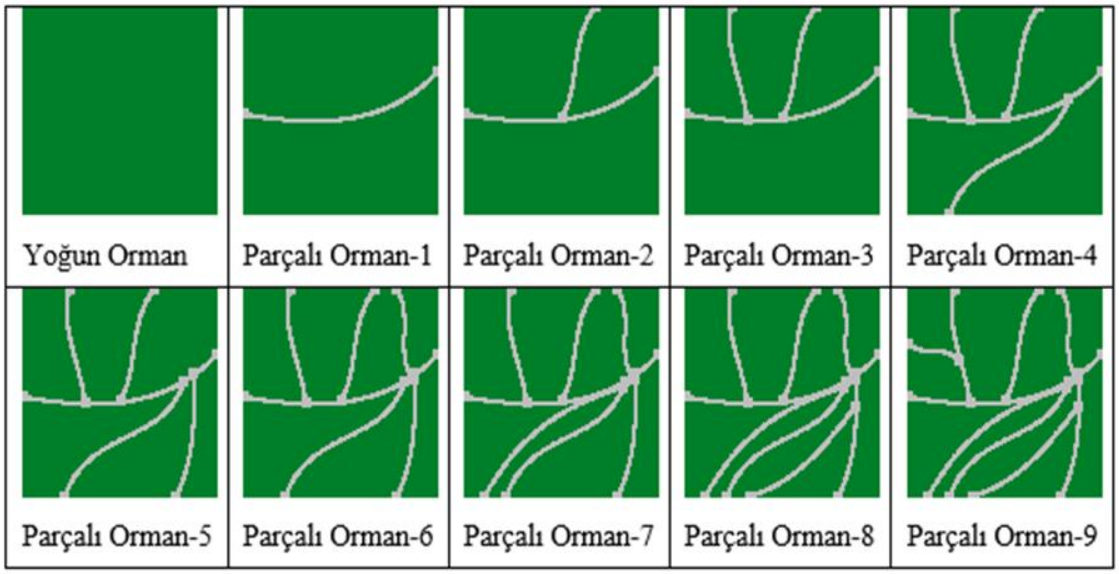
4.2. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, çevresel karmaşıklığın tek bir eksende kontrollü biçimde artırıldığı senaryo setlerinde (orman parçalılığı, nehir/su yoğunluğu, yerleşim/engel yoğunluğu), gerçek arazi örtüsü senaryosunda (ESA WorldCover + filtreleme) ve İHA sayısı senaryosunda elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Her senaryoda 7 bölütleme (mCPP) ve 5 bölge içi

kapsama yolu (CPP) algoritması birlikte değerlendirilmiş; her harita için toplam 35 kombinasyon, 6 performans metriği ile nicelleştirilmiştir.

4.2.1. Orman Parçalılığı Senaryosu

Orman parçalılığı senaryosu kapsamında, Şekil 37'deki gibi çevresel karmaşıklık "Yoğun Orman"dan "Parçalı Orman-9"a doğru kademeli olarak artırılmış ve toplam 10 sentetik harita üzerinde mCPP–CPP algoritma çiftlerinin performansı değerlendirilmiştir. Parçalılık arttıkça hedef alanın sürekliliği azalmış, dar geçitler ve parçalı sınırlar belirginleşmiş; bu durum bölütleme sınırlarının geometrik karmaşıklığını ve rota üretiminde sınır boyunca yeniden giriş/çıkış davranışını artırmıştır. Bu doğrultuda ilgili senaryo seti; yöntemlerin tekil bir harita üzerindeki performansından ziyade, kademeli artan zorluk seviyeleri karşısında sergiledikleri dayanıklılığı (robustness) ve denge-verimlilik ilişkisini nicel olarak ortaya koyan bir stres testi işlevi görmektedir.



Şekil 37. Orman parçalılığı senaryosu için kullanılan sentetik haritalar

Bu senaryoda performans metrikleri Tablo 9'da verilen birimlerle sunulmuştur: toplam yol uzunluğu ve görev tamamlama süresi adım, dönüş sayısı adet, tekrar tarama oranı, kapsama oranı ve iş yükü dengesi % cinsinden değerlendirilmiştir.

Parçalılık boyunca görev tamamlama süresi (adım), metrik uzayında en yüksek ayrışmanın gözlendiği göstergelerden biridir: ilgili senaryolarda en yüksek performans

sergileyen mCPP–CPP algoritma çiftlerinin görev süresi 1542–1722 adım bandında kalırken, en düşük performans sergileyen çiftlerde görev süresi 2732–23213 adım aralığına kadar yükselmektedir. Benzer biçimde tekrar tarama oranı parçalılık arttıkça belirginleşen bir verimlilik kaybı göstergesi olarak öne çıkmış; tekrar tarama oranı, üst performans bandında %1.40–%5.76, alt performans bandında ise %18.00–%35.90 aralığında gözlenmiştir. Dönüş sayısı (adet) açısından da parçalılık etkisi kuvvetlidir: üst performans bandında 34.0–78.5 adet dönüş seviyeleri görülürken, alt performans bandında 526.5–1047.8 adet aralığına çıkılmaktadır. Bu nicel aralıklar, parçalılığın özellikle rota karmaşıklığı (dönüş) ve tekrar tarama davranışı üzerinde baskın bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Toplam yol uzunluğu (adım) metriğinde gözlemlenen farklılaşma, diğer parametrelere kıyasla daha dar bir aralıkta seyretse de istatistiksel açıdan belirgin düzeydedir: üst performans bandında 981–1689 adım, alt performans bandında 2026.17–2523.50 adım aralığı gözlenmiştir. Kapsama oranında ise tavan etkisi mevcuttur; üst performans bandında kapsama oranı tüm seviyelerde %100'e ulaşabilmekte, alt performans bandında kapsama oranı bazı seviyelerde %61.62'ye kadar düşebilmektedir. İş yükü dengesi (uniformity) metriği 0–1 ölçeğinden yüzdeye çevrilerek yorumlandığında, üst performans bandında %82.37–%89.61, alt performans bandında %71.45–%75.65 aralığı elde edilmiştir; bu sonuç, parçalılık arttıkça iş yükü dağılımında dengenin korunmasının yöntemler arasında ayrıştırıcı bir ölçüt hâline geldiğine işaret etmektedir.

Algoritmaların performans eğilimleri, Tablo 11–12 ve ilgili ısı haritaları üzerinde belirgin bir biçimde sunulmaktadır. Tablo 11, belirli metriklerde bazı mCPP–CPP eşleşmelerinin parçalılık seviyeleri boyunca tekrarlı biçimde üst performans bandında yer aldığını göstermektedir; örneğin kapsama oranında DARP + Lawnmower eşleşmesi tüm haritalarda üst performans bandında raporlanmıştır. Dönüş sayısında ise BSP-ORB + Lawnmower eşleşmesi haritaların büyük çoğunluğunda üst performans bandında yer alarak dönüş yoğunluğu açısından tutarlı bir davranış sergilemiştir. Buna karşılık Tablo 12, görev süresi metriğinde Watershed + Dubins eşleşmesinin tüm seviyelerde alt performans bandında yer aldığını; dolayısıyla parçalılık arttıkça bazı yöntem ailelerinde performans bozulmasının sistematikleşebildiğini göstermektedir.

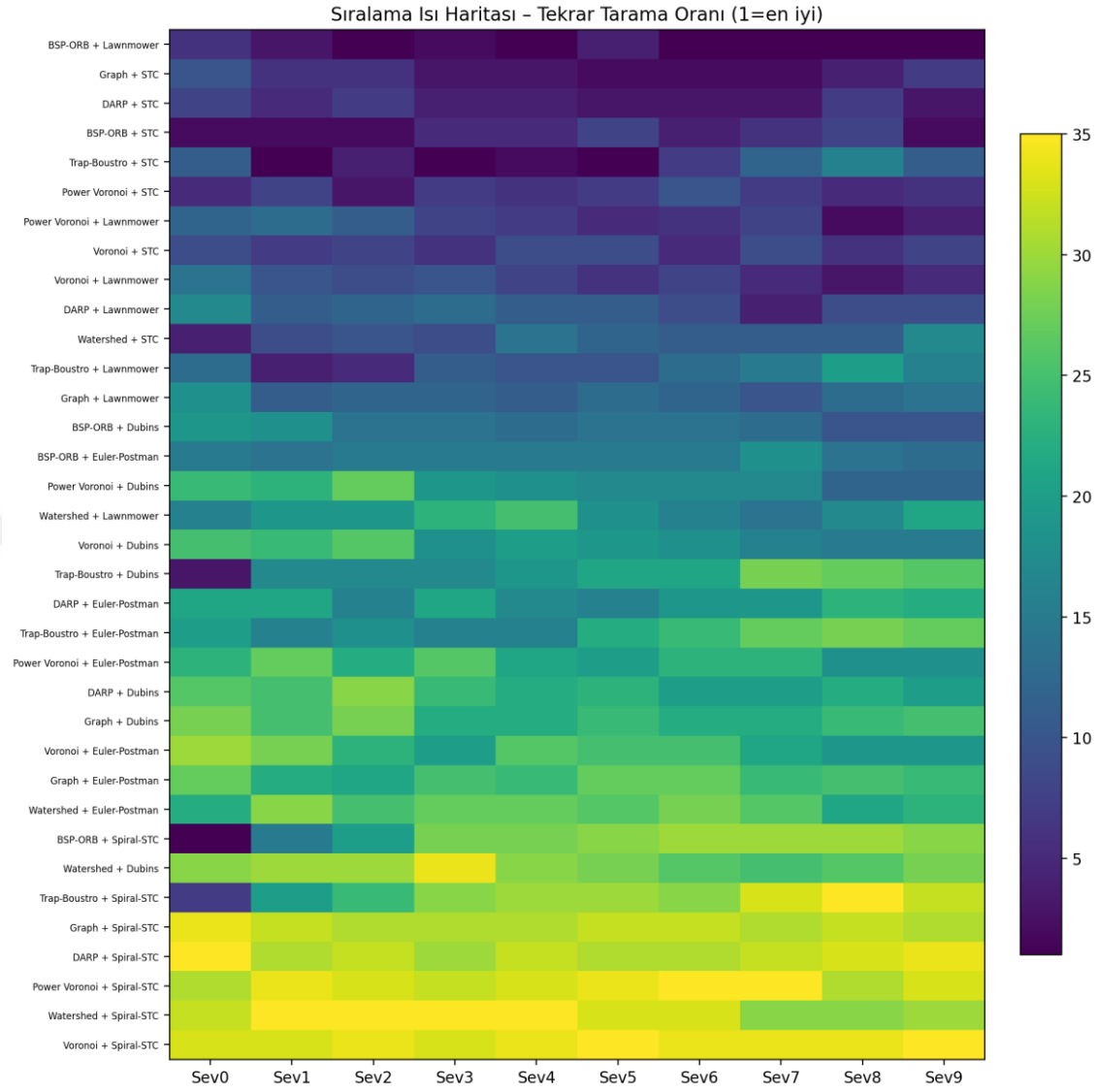
Tablo 11. Orman parçalılığı senaryosu için en yüksek performans gösteren algoritmalar

Harita	Toplam Yol Uzunluğu	Toplam Görev Süresi	Dönüş Sayısı	Tekrar Tarama Oranı	Kapsama Oranı	Uniformluk Oranı
Yoğun Orman	BSP-ORB + Spiral-STC	BSP-ORB + Spiral-STC	Trap-Boustro + Lawnmower	BSP-ORB + Spiral-STC	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Spiral-STC
Parçalı Orman-1	Trap-Boustro + STC	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Lawnmower	Trap-Boustro + STC	DARP + Lawnmower	Trap-Boustro + STC
Parçalı Orman-2	BSP-ORB + STC	Power Voronoi + STC	BSP-ORB + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower
Parçalı Orman-3	Trap-Boustro + STC	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Lawnmower	Trap-Boustro + STC	DARP + Lawnmower	Trap-Boustro + STC
Parçalı Orman-4	Trap-Boustro + STC	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower
Parçalı Orman-5	Graph + STC	Power Voronoi + STC	BSP-ORB + Lawnmower	Trap-Boustro + STC	DARP + Lawnmower	Graph + STC
Parçalı Orman-6	Graph + STC	Power Voronoi + STC	BSP-ORB + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower
Parçalı Orman-7	Graph + STC	Power Voronoi + STC	BSP-ORB + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower
Parçalı Orman-8	Trap-Boustro + STC	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower
Parçalı Orman-9	Trap-Boustro + STC	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower

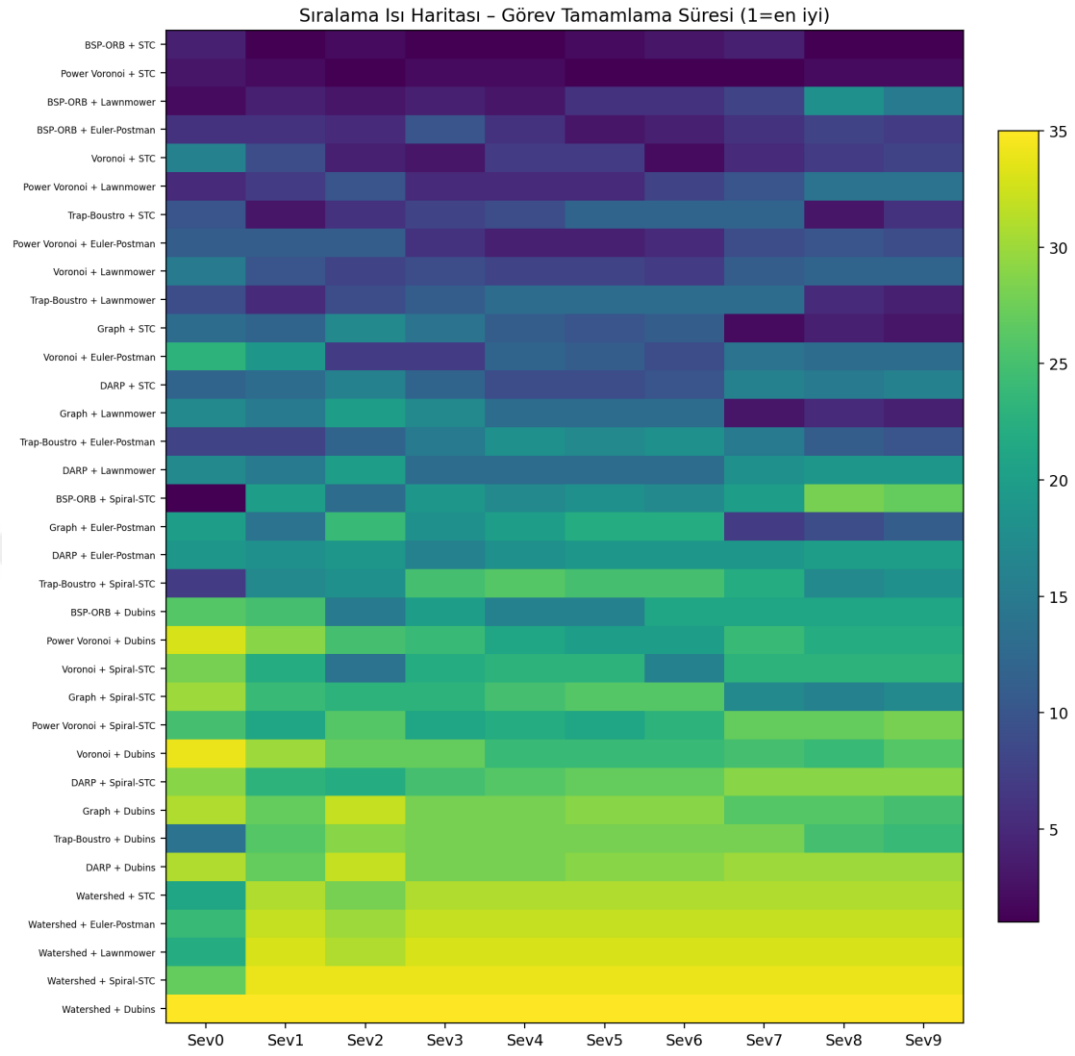
Tablo 12. Orman parçalılığı senaryosu için en düşük performans gösteren algoritmalar

Harita	Toplam Yol Uzunluğu	Toplam Görev Süresi	Dönüş Sayısı	Tekrar Tarama Oranı	Kapsama Oranı	Uniformluk Oranı
Yoğun Orman	Graph + Spiral-STC	Watershed + Dubins	DARP + Spiral-STC	DARP + Spiral-STC	DARP + Dubins	DARP + Spiral-STC
Parçalı Orman-1	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins
Parçalı Orman-2	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins
Parçalı Orman-3	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins
Parçalı Orman-4	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	DARP + Dubins	Watershed + Dubins
Parçalı Orman-5	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Voronoi + Spiral-STC	DARP + Dubins	Watershed + Dubins
Parçalı Orman-6	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Power Voronoi + Spiral-STC	Trap-Boustro + Dubins	Watershed + Dubins
Parçalı Orman-7	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Power Voronoi + Spiral-STC	Trap-Boustro + Dubins	Watershed + Dubins
Parçalı Orman-8	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Trap-Boustro + Spiral-STC	Trap-Boustro + Dubins	Watershed + Dubins
Parçalı Orman-9	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Voronoi + Spiral-STC	Trap-Boustro + Dubins	Watershed + Dubins

Şekil 38 (tekrar tarama oranı sıralama ısı haritası) ile Şekil 39 (görev tamamlama süresi sıralama ısı haritası) birlikte değerlendirildiğinde, parçalılık boyunca üst bantta daha sık yer alan eşleşmelerin yalnızca tek bir metrikte değil, farklı metriklerde de görece tutarlı performans sergilediği; alt bantta yoğunlaşan eşleşmelerin ise özellikle orta–yüksek parçalılık seviyelerinde tekrar tarama ve görev süresi açısından belirgin biçimde olumsuzlaştığı görülmektedir. Bu bulgular, orman parçalılığı altında performansın yalnızca rota üretim desenine değil, mCPP katmanında oluşan alt bölge geometrisine ve bu geometrinin CPP katmanında sınır davranışını (dönüş/overlap) nasıl tetiklediğine güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 38. Orman parçalılığı senaryosundaki tekrar tarama oranına göre ısı haritası



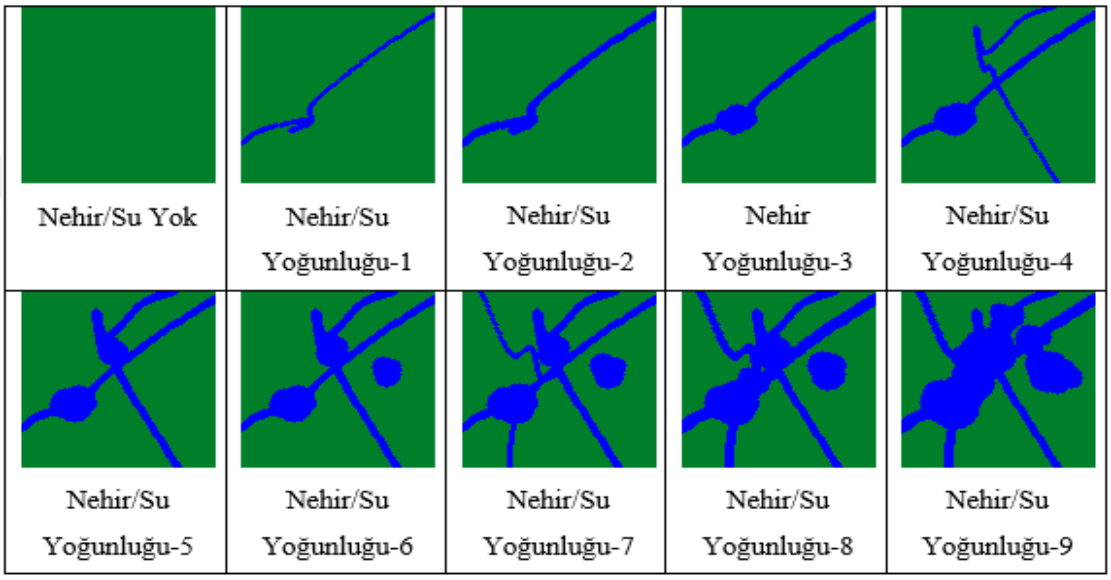
Şekil 39. Orman parçalılığı senaryosundaki görev tamamlama sürelerine göre ısı haritası

Orman parçalılığı arttıkça kapsama oranı üst performans bandında korunabilse de görev tamamlama süresi, tekrar tarama oranı ve dönüş sayısı metriklerinde belirgin bir ayrışma oluşmaktadır. Bu nedenle erken tespit bağlamında yöntem seçimi tek bir metrik yerine, özellikle görev süresi, tekrar tarama ve dönüş sayısı üçlüsü ile iş yükü dengesi birlikte dikkate alınarak yapılmalıdır. İzleyen alt bölümde, benzer bir nicel çerçeve ile nehir/su yoğunluğu senaryosunda topolojik bariyer etkisinin yöntem davranışını nasıl değiştirdiği değerlendirilecektir.

4.2.2. Nehir/Su Yoğunluğu Senaryosu

Nehir/su yoğunluğu senaryosu kapsamında, Şekil 40'daki gibi bariyer etkisi "Nehir/Su yok"tan "Nehir/Su yoğunluğu-9 "a doğru kademeli olarak artırılmış ve toplam 10 sentetik

harita üzerinde mCPP–CPP algoritma çiftlerinin performansı değerlendirilmiştir. Su/nehir bileşenleri hedef alanı bölerek bağlantılı bileşen sayısını artırmış; geçiş koridorlarını daraltmış ve rota sürekliliği üzerinde topolojik bir kısıt üretmiştir. Bu nedenle söz konusu senaryo seti, parçalılık senaryosundan farklı olarak "sınır karmaşıklığı"ndan ziyade bariyer kaynaklı topolojik kopuşun görev süresi, tekrar tarama ve dönüş yoğunluğu üzerindeki etkisini nicel olarak görünür kılmaktadır.



Şekil 40. Nehir/Su yoğunluğu senaryosu için kullanılan sentetik haritalar

Bu alt bölümde kullanılan performans metrikleri Tablo 9'daki birimlerle sunulmuştur: toplam yol uzunluğu ve görev tamamlama süresi adım, dönüş sayısı adet, tekrar tarama oranı–kapsama oranı–iş yükü dengesi % cinsinden değerlendirilmiştir. Senaryolarda Nehir/Su yok"tan "Nehir/Su yoğunluğu-9 "a doğru boyunca görev tamamlama süresi (adım) için üst performans bandı 1284–1730 adım, alt performans bandı 2732–34681 adım aralığında gözlenmiştir; aynı seviyede üst–alt bant arasındaki göreli fark ortalamada %80.47 düzeyindedir. Tekrar tarama oranı (%) üst performans bandında %1.40–%7.46, alt performans bandında %27.95–%47.60 aralığında gerçekleşmiş; üst–alt bant arasındaki göreli fark ortalamada %89.47 olmuştur. Dönüş sayısı (adet) üst performans bandında 34.0–116.17 adet, alt performans bandında 915.5–1251.33 adet aralığındadır; üst–alt bant göreli farkı ortalama %92.05 düzeyindedir. Toplam yol uzunluğu (adım) için üst performans bandı 863.33–1689 adım, alt performans bandı 2197.0–2754.92 adım aralığında olup, üst–alt bant göreli farkı ortalama %41.36'dır. Kapsama oranında üst

performans bandı tüm seviyelerde %100'e ulaşabilmektedir (tavan etkisi). Buna karşılık alt performans bandında kapsama oranı bazı seviyelerde %58.59'a kadar düşmüş; seviyeler boyunca üst–alt bant farkı ortalamada %9.87 düzeyinde gerçekleşmiştir. İş yükü dengesi (uniformity) metrik değeri dosyalarda 0–1 ölçeğinde üretildiğinden, Tablo 9 ile uyumlu biçimde yüzdeye çevrilerek yorumlanmıştır: üst performans bandı %81.55–%89.61, alt performans bandı %71.41–%74.85 aralığındadır ve üst–alt bant farkı ortalama %13.65 seviyesindedir.

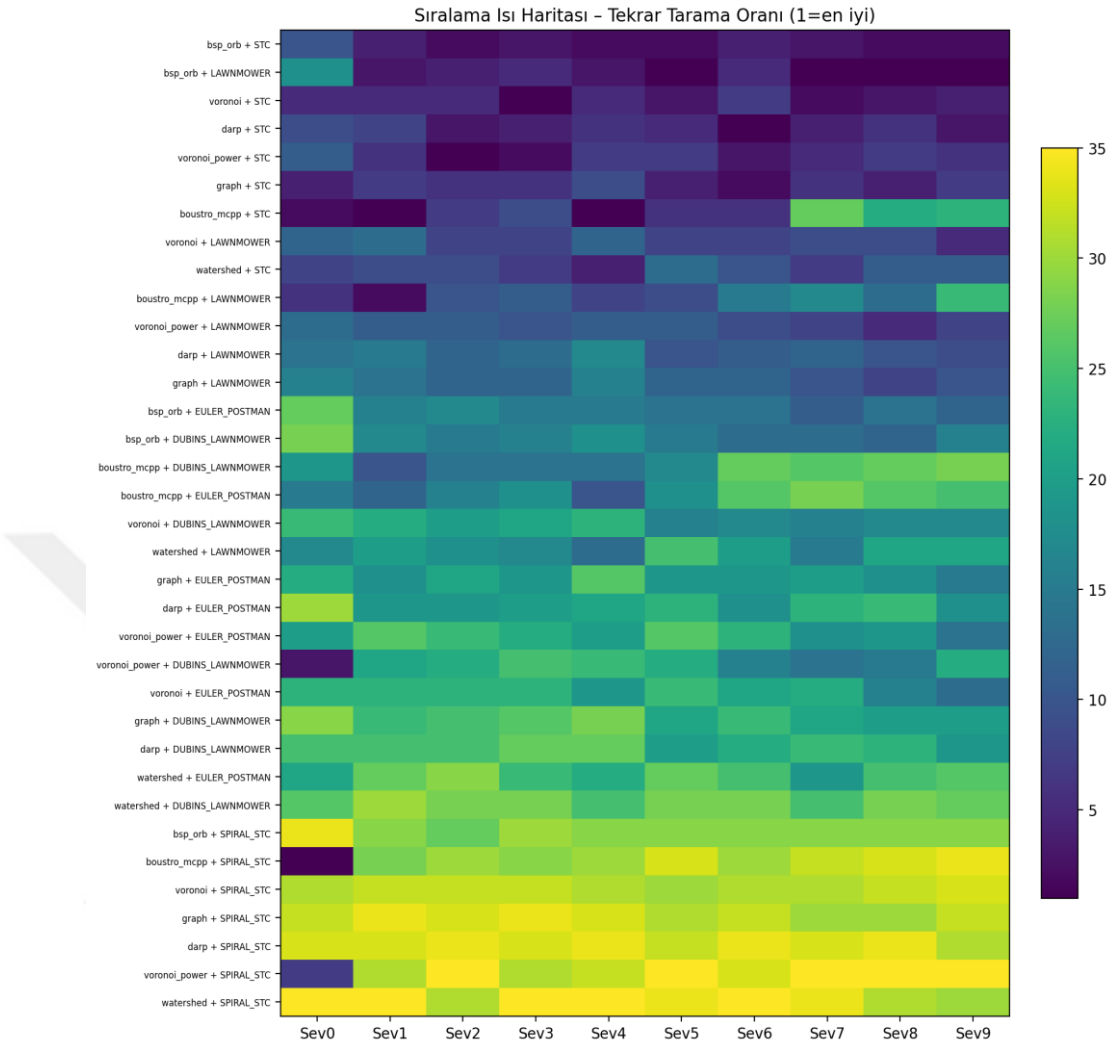
Tablo 13. Nehir/su yoğunluğu senaryosu için en yüksek performans gösteren algoritmalar

Harita	Toplam Yol Uzunluğu	Toplam Görev Süresi	Dönüş Sayısı	Tekrar Tarama Oranı	Kapsama Oranı	Uniformluk Oranı
Nehir/Su Yok	Trap-Boustro + Spiral-STC	Trap-Boustro + Spiral-STC	Power Voronoi + Lawnmower	Trap-Boustro + Spiral-STC	DARP + Lawnmower	Trap-Boustro + Spiral-STC
Nehir/Su Yoğunluğu-1	Trap-Boustro + STC	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Lawnmower	Trap-Boustro + STC	DARP + Lawnmower	Trap-Boustro + STC
Nehir/Su Yoğunluğu-2	Power Voronoi + STC	Power Voronoi + STC	BSP-ORB + Lawnmower	Power Voronoi + STC	DARP + Lawnmower	Power Voronoi + STC
Nehir/Su Yoğunluğu-3	Voronoi + STC	Power Voronoi + STC	BSP-ORB + Lawnmower	Voronoi + STC	DARP + Lawnmower	Voronoi + STC
Nehir/Su Yoğunluğu-4	Trap-Boustro + STC	Power Voronoi + STC	BSP-ORB + Lawnmower	Trap-Boustro + STC	DARP + Lawnmower	Trap-Boustro + STC
Nehir/Su Yoğunluğu-5	Graph + STC	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower
Nehir/Su Yoğunluğu-6	Graph + STC	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + STC	DARP + Lawnmower	DARP + STC
Nehir/Su Yoğunluğu-7	Trap-Boustro + Lawnmower	BSP-ORB + STC	Trap-Boustro + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower
Nehir/Su Yoğunluğu-8	Trap-Boustro + Lawnmower	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower
Nehir/Su Yoğunluğu-9	Graph + STC	Power Voronoi + STC	Voronoi + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower

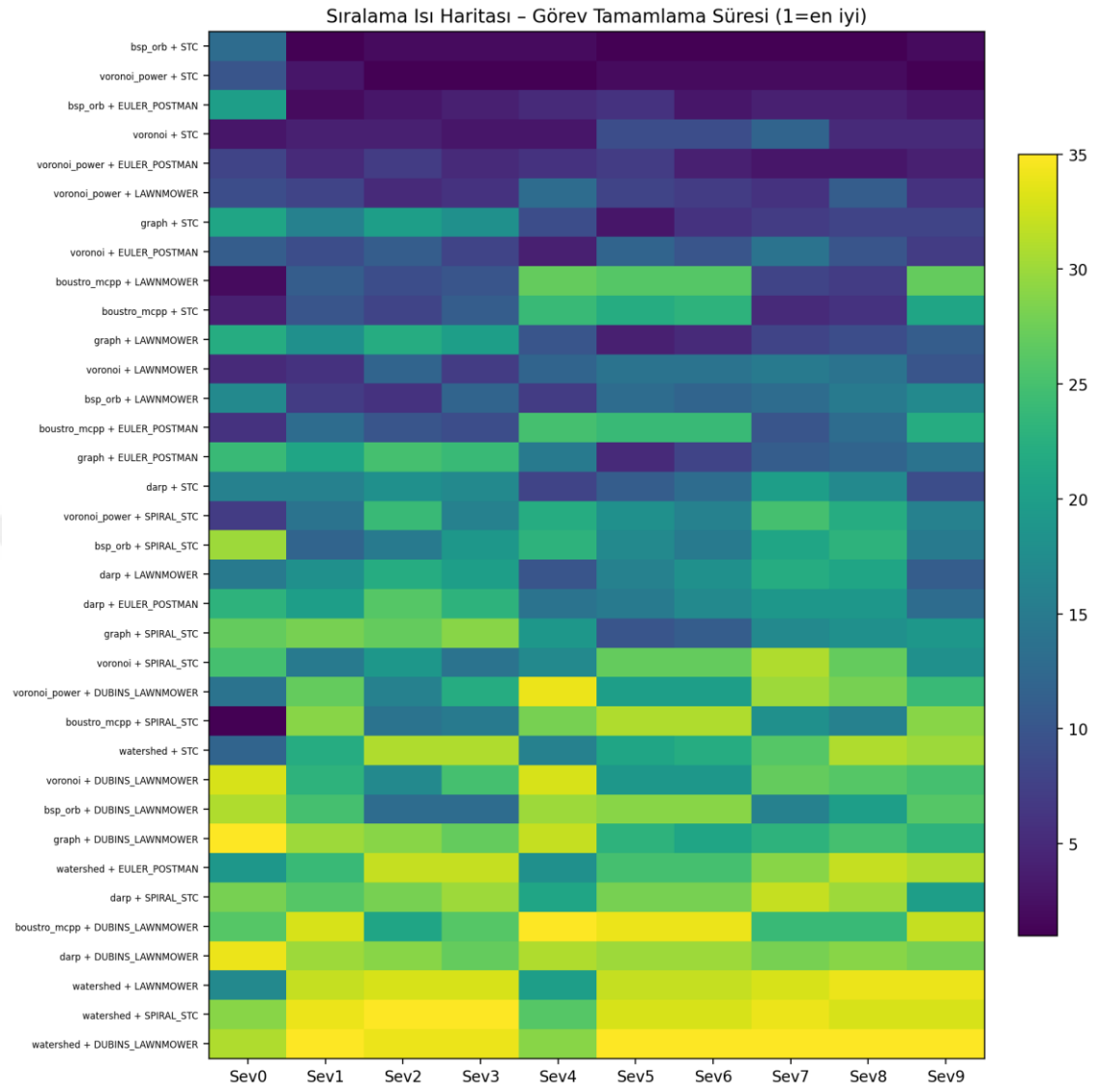
Tablo 14. Nehir/su yoğunluğu senaryosu için en düşük performans gösteren algoritmalar

Harita	Toplam Yol Uzunluğu	Toplam Görev Süresi	Dönüş Sayısı	Tekrar Tarama Oranı	Kapsama Oranı	Uniformluk Oranı
Nehir/Su Yok	BSP-ORB + Spiral-STC	Graph + Dubins Lawnmower	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins Lawnmower	Watershed + Spiral-STC
Nehir/Su Yoğunluğu-1	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins Lawnmower	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins Lawnmower	Watershed + Spiral-STC
Nehir/Su Yoğunluğu-2	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Power Voronoi + Spiral-STC	DARP + Dubins Lawnmower	Watershed + Dubins Lawnmower
Nehir/Su Yoğunluğu-3	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Graph + Dubins Lawnmower	Watershed + Dubins Lawnmower
Nehir/Su Yoğunluğu-4	Watershed + Spiral-STC	Trap-Boustro + Dubins Lawnmower	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins Lawnmower	Watershed + Spiral-STC
Nehir/Su Yoğunluğu-5	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins Lawnmower	Watershed + Spiral-STC	Power Voronoi + Spiral-STC	DARP + Dubins Lawnmower	Watershed + Dubins Lawnmower
Nehir/Su Yoğunluğu-6	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins Lawnmower	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	DARP + Dubins Lawnmower	Watershed + Dubins Lawnmower
Nehir/Su Yoğunluğu-7	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins Lawnmower	Watershed + Spiral-STC	Power Voronoi + Spiral-STC	Trap-Boustro + Dubins Lawnmower	Watershed + Dubins Lawnmower
Nehir/Su Yoğunluğu-8	Watershed + Dubins Lawnmower	Watershed + Dubins Lawnmower	Watershed + Spiral-STC	Power Voronoi + Spiral-STC	Trap-Boustro + Dubins Lawnmower	Watershed + Dubins Lawnmower
Nehir/Su Yoğunluğu-9	Watershed + Dubins Lawnmower	Watershed + Dubins Lawnmower	Watershed + Spiral-STC	Power Voronoi + Spiral-STC	Trap-Boustro + Dubins Lawnmower	Watershed + Dubins Lawnmower

Algoritma düzeyindeki örüntü Tablo 13–14 ve ısı haritaları ile değerlendirildiğinde daha net görünmektedir. Tablo 13, her seviye ve metrik için yorum yönüne göre üst performans bandında yer alan mCPP–CPP algoritma çiftlerini özetlemektedir. Ham metrik değerleri üzerinden yapılan sayım, kapsama oranında DARP + Lawnmower eşleşmesinin 10/10 seviyede üst performans bandında yer aldığını; dönüş sayısında ise BSP-ORB + Lawnmower eşleşmesinin 10 seviyenin 7'sinde üst performans bandını ürettiğini göstermektedir. Buna karşılık Tablo 14, alt performans bandında yoğunlaşan eşleşmeleri göstermekte; özellikle dönüş sayısında Watershed + Spiral-STC eşleşmesinin 10/10 seviyede alt performans bandında bulunması, bariyerli geometride bazı yöntem ailelerinde performans bozulmasının sistematikleşebildiğini işaret etmektedir. Görev tamamlama süresinde de alt bantta Watershed + Dubins eşleşmesinin baskın biçimde tekrar etmesi (seviyelerin çoğunda) aynı yorumu desteklemektedir.



Şekil 41. Nehir/Su yoğunluğu senaryosundaki tekrar tarama oranına göre ısı haritası



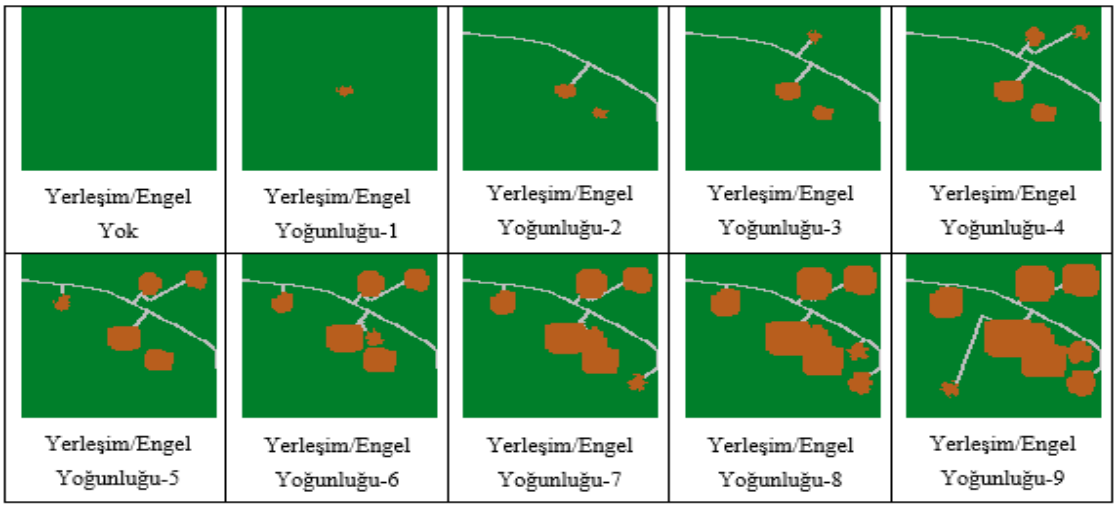
Şekil 42. Nehir/Su yoğunluğu senaryosundaki görev tamamlama süresi göre ısı haritası

Şekil 41 (tekrar tarama oranı sıralama ısı haritası) ile Şekil 42 (görev tamamlama süresi sıralama ısı haritası) birlikte değerlendirildiğinde, bazı mCPP–CPP eşleşmelerinin bariyer yoğunluğu artsa dahi üst bantta görece tutarlı kalabildiği; buna karşılık Spiral-STC içeren bazı eşleşmelerin tekrar tarama açısından ve Watershed tabanlı bazı eşleşmelerin görev süresi açısından alt bantta yoğunlaştığı görülmektedir. Bu desen, nehir/su senaryosunda performansın; (i) mCPP'nin bariyerleri alt bölgelere nasıl "ayırdığı" ve (ii) CPP'nin dar geçitlerde rota sürekliliğini/geri dönüşleri nasıl yönettiği bileşenlerine birlikte duyarlı olduğunu göstermektedir.

Nehir/su yoğunluğu arttıkça, baskın etki bariyer kaynaklı topolojik kopuş üzerinden ortaya çıkmakta; özellikle görev tamamlama süresi (adım) ve tekrar tarama oranı (%) metriklerinde belirgin ayrışma oluşmaktadır. Bu nedenle izleyen alt bölümde (yerleşim/engel yoğunluğu), geçilemez bölgelerin "dar geçit + engel kümelenmesi" karakterinin benzer metrikler üzerindeki etkisi aynı nicel çerçevede karşılaştırılacaktır.

4.2.3. Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu Senaryosu

Yerleşim yeri/engel yoğunluğu senaryosu kapsamında, Şekil 43'deki gibi geçilemez bölge yoğunluğu "Yerleşim/Engel yok"tan "Yerleşim/Engel yoğunluğu-9"a doğru kademeli olarak artırılmış ve toplam 10 sentetik harita üzerinde mCPP–CPP algoritma çiftlerinin performansı değerlendirilmiştir. Bu senaryoda engel kümelenmesi ve dar koridorların oluşması, bölütleme sınırlarının geometrisini ve CPP katmanındaki rota sürekliliğini birlikte etkileyerek özellikle görev süresi, tekrar tarama ve dönüş yoğunluğu metriklerinde yöntemleri ayrıştırmaktadır.



Şekil 43. Yerleşim yeri/engel yoğunluğu senaryosu için kullanılan sentetik haritalar

Bu alt bölümde kullanılan performans metrikleri Tablo 9'daki birimlerle raporlanmıştır: toplam yol uzunluğu ve görev tamamlama süresi adım, dönüş sayısı adet, tekrar tarama oranı–kapsama oranı–iş yükü dengesi % cinsinden değerlendirilmiştir. Sev0–Sev9 boyunca görev tamamlama süresi (adım) açısından üst performans bandı 1438–1767 adım aralığında kalırken, alt performans bandı 2732–55391 adım aralığına kadar genişlemiştir; üst–alt bant arasındaki göreli fark ortalamada %79.40 düzeyindedir. Tekrar tarama oranı

(%) üst performans bandında 1.40–7.56 aralığında, alt performans bandında 28.01–48.80 aralığında gerçekleşmiş; göreli fark ortalamada %85.37 olmuştur. Dönüş sayısı (adet) için üst performans bandı 34.00–186.00 adet, alt performans bandı 813.50–1115.83 adet aralığındadır ve göreli fark ortalama %85.73 düzeyindedir. Toplam yol uzunluğu (adım) için üst/alt bantlar sırasıyla 1270.33–1727.67 ve 2176.50–3568.34 adım aralığında gerçekleşmiş (ortalama göreli fark %35.46); kapsama oranında ise üst bant tüm seviyelerde 100–100% ile tavan değerine ulaşabilmiş, alt bant 97.85–98.16% aralığında kalmıştır (ortalama fark %1.99). İş yükü dengesi (uniformity) değeri dosyalarda 0–1 ölçeğinde üretildiğinden, Tablo 9 ile uyumlu biçimde yüzdeye çevrilerek yorumlanmıştır: üst bant 81.55–89.61%, alt bant 70.52–74.75% aralığında olup ortalama göreli fark %13.04'dir.

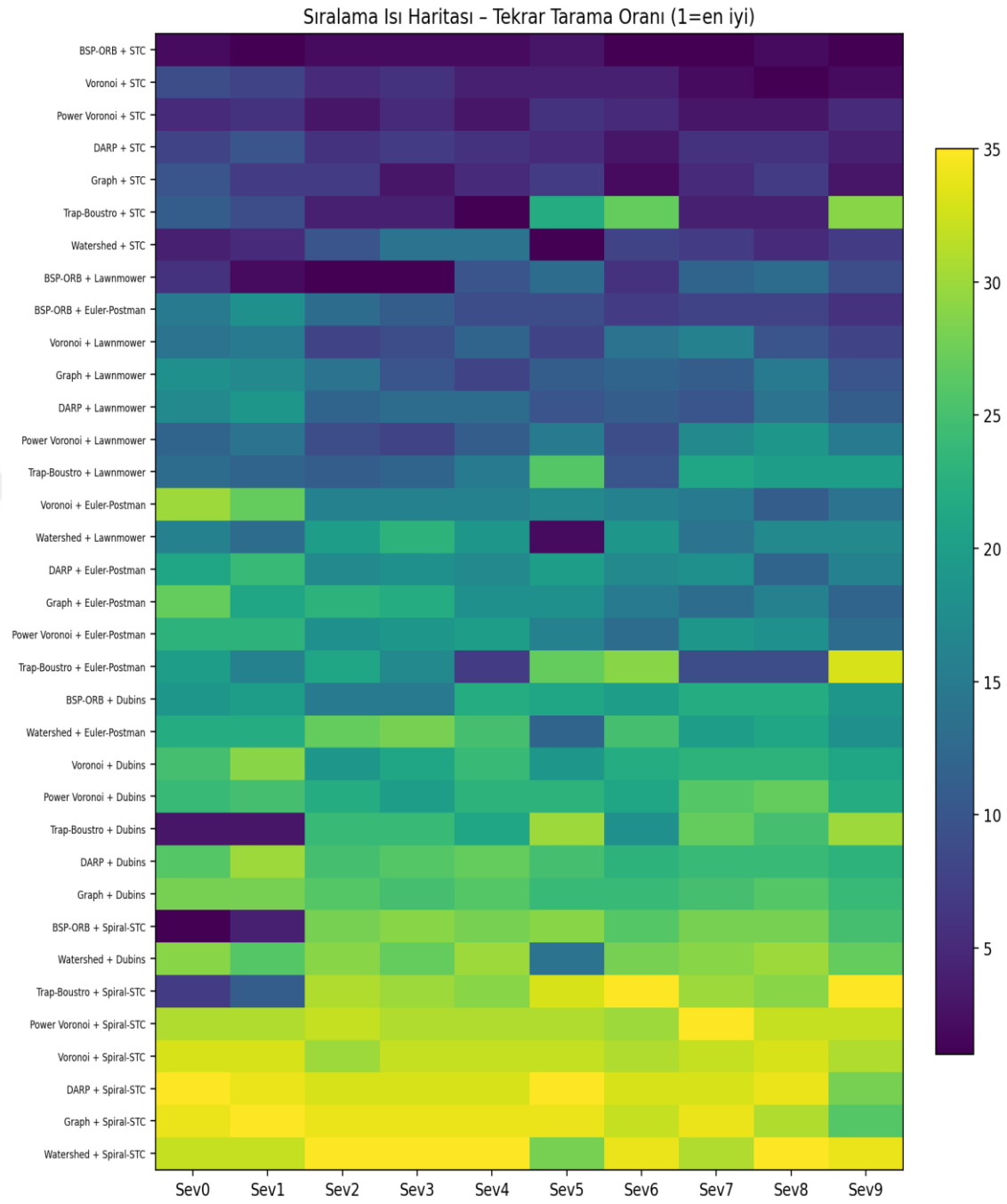
Tablo 15. Yerleşim yeri/engel yoğunluğu senaryosu için yüksek performans gösterenler algoritmalar

Harita	Toplam Yol Uzunluğu	Toplam Görev Süresi	Dönüş Sayısı	Tekrar Tarama Oranı	Kapsama Oranı	Uniformluk Oranı
Yerleşim Yeri/Engel Yok	BSP-ORB + Spiral-STC	BSP-ORB + Spiral-STC	Trap-Boustro + Lawnmower	BSP-ORB + Spiral-STC	Voronoi + Lawnmower	BSP-ORB + Spiral-STC
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-1	Watershed + STC	BSP-ORB + Lawnmower	Trap-Boustro + Lawnmower	BSP-ORB + STC	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Spiral-STC
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-2	BSP-ORB + STC	Voronoi + STC	Voronoi + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-3	Trap-Boustro + STC	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + Lawnmower
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-4	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + STC	Trap-Boustro + Euler-Postman	Trap-Boustro + STC	DARP + Lawnmower	Trap-Boustro + STC
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-5	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + STC	Voronoi + Lawnmower	Watershed + STC	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + STC
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-6	Graph + STC	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Lawnmower	BSP-ORB + STC	DARP + Lawnmower	Trap-Boustro + Lawnmower
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-7	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + STC	Trap-Boustro + Euler-Postman	BSP-ORB + STC	DARP + Lawnmower	Voronoi + STC
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-8	Voronoi + STC	Power Voronoi + STC	Trap-Boustro + Euler-Postman	Voronoi + STC	DARP + Lawnmower	Voronoi + STC
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-9	Graph + STC	BSP-ORB + Euler-Postman	Trap-Boustro + Euler-Postman	BSP-ORB + STC	DARP + Lawnmower	BSP-ORB + STC

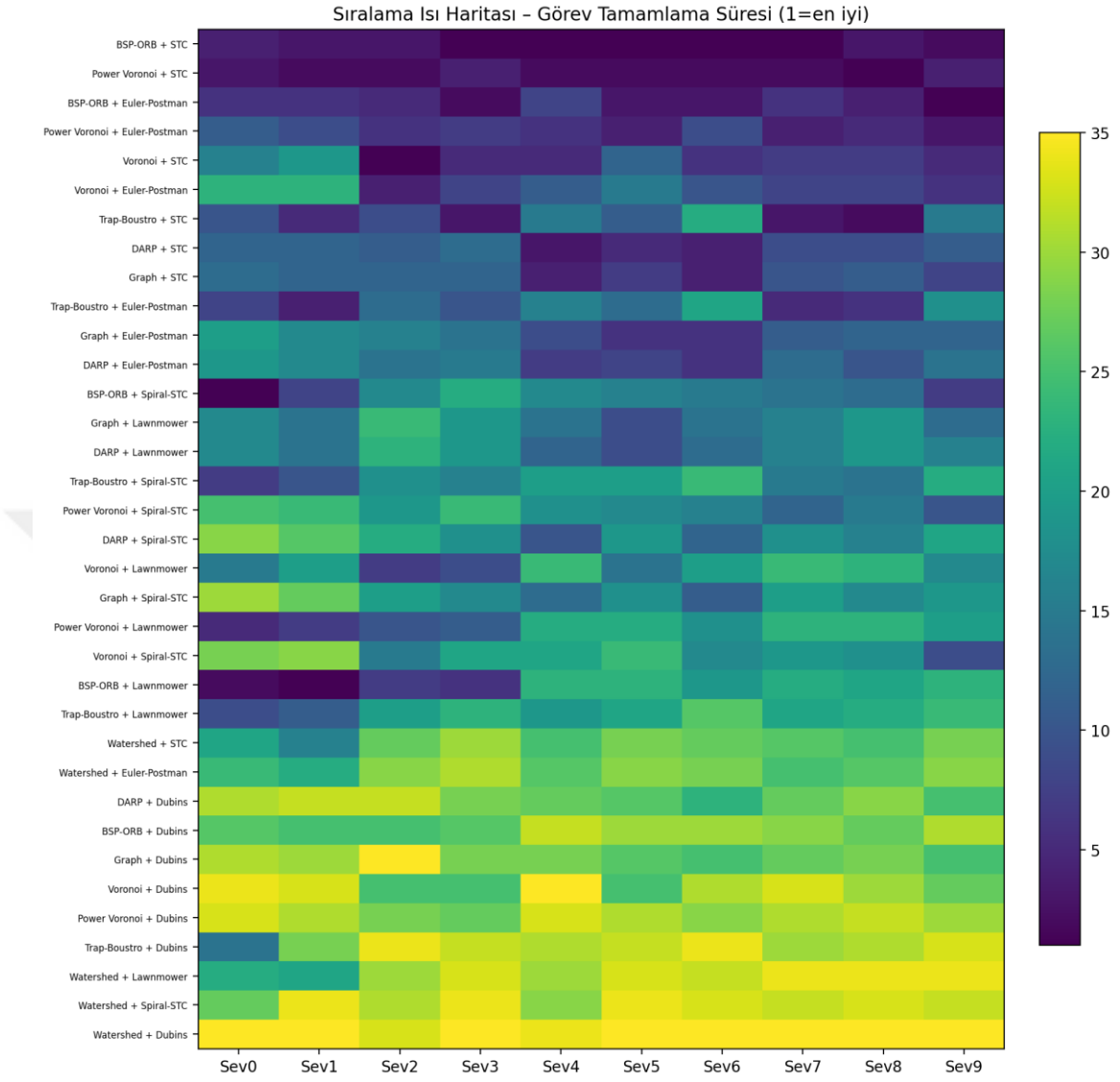
Tablo 16. Yerleşim yeri/engel yoğunluğu senaryosu için en düşük performans gösteren algoritmalar

Harita	Toplam Yol Uzunluğu	Toplam Görev Süresi	Dönüş Sayısı	Tekrar Tarama Oranı	Kapsama Oranı	Uniformluk Oranı
Yerleşim Yeri/Engel Yok	Graph + Spiral-STC	Watershed + Dubins	DARP + Spiral-STC	DARP + Spiral-STC	DARP + Dubins	DARP + Spiral-STC
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-1	DARP + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Graph + Spiral-STC	Graph + Spiral-STC	Graph + Dubins	DARP + Spiral-STC
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-2	Watershed + Spiral-STC	Graph + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-3	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-4	Watershed + Dubins	Voronoi + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Graph + Dubins	Watershed + Dubins
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-5	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	DARP + Spiral-STC	Graph + Dubins	Graph + Spiral-STC
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-6	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Trap-Boustro + Spiral-STC	Graph + Dubins	Watershed + Dubins
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-7	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Power Voronoi + Spiral-STC	DARP + Dubins	Watershed + Dubins
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-8	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	DARP + Dubins	Watershed + Dubins
Yerleşim Yeri/Engel Yoğunluğu-9	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins	Trap-Boustro + Spiral-STC	DARP + Dubins	Watershed + Dubins

Algoritma düzeyindeki örüntü Tablo 15–16 ve ısı haritaları ile birlikte değerlendirildiğinde daha net görünmektedir. Ham metrik değerleri üzerinden yapılan sayım, görev tamamlama süresinde üst bantta en sık yer alan eşleşmelerin BSP-ORB + STC (5/10), BSP-ORB + Euler-Postman (1/10), BSP-ORB + Lawnmower (1/10) olduğunu; tekrar tarama oranında ise BSP-ORB + STC (4/10), BSP-ORB + Lawnmower (2/10), BSP-ORB + Spiral-STC (1/10) eşleşmelerinin öne çıktığını göstermektedir. Kapsama oranı metriğinde DARP + Lawnmower (9/10), Voronoi + Lawnmower (1/10) eşleşmesinin hemen tüm seviyelerde tavan değeri ürettiği görülmektedir. Buna karşılık alt bantta görev süresi açısından Watershed + Dubins (8/10), Graph + Dubins (1/10), Voronoi + Dubins (1/10) ve dönüş sayısı açısından Watershed + Spiral-STC (7/10), DARP + Spiral-STC (1/10), Graph + Spiral-STC (1/10) eşleşmeleri daha sık görülmüş; iş yükü dengesi bakımından ise Watershed + Dubins (6/10), DARP + Spiral-STC (2/10), Graph + Spiral-STC (1/10) eşleşmeleri alt bantta yoğunlaşmıştır.



Şekil 44. Yerleşim yeri/engel yoğunluğu senaryolarındaki tekrar tarama oranına göre ısı haritası



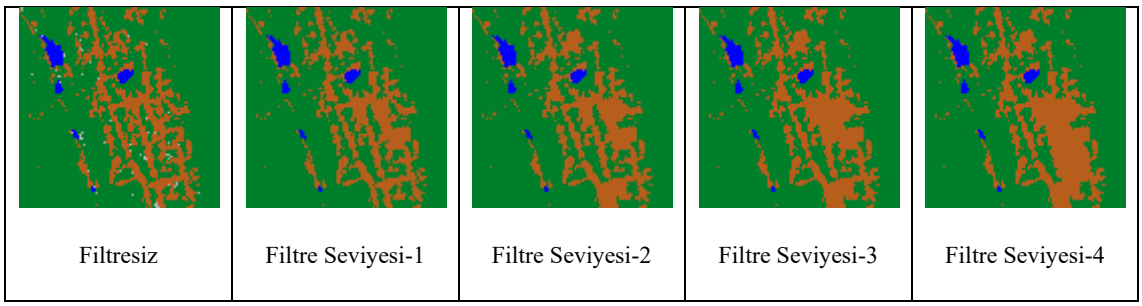
Şekil 45. Yerleşim yeri/engel yoğunluğu senaryolarındaki görev tamamlama süresi göre ısı haritası

Şekil 44 (tekrar tarama oranı sıralama ısı haritası) ile Şekil 45 (görev tamamlama süresi sıralama ısı haritası) birlikte değerlendirildiğinde, bazı mCPP–CPP eşleşmelerinin engel yoğunluğu artsa dahi üst bantta görece tutarlı kalabildiği; buna karşılık özellikle Spiral-STC içeren bazı eşleşmelerin tekrar tarama açısından ve Dubins içeren bazı eşleşmelerin görev süresi açısından alt bantta yoğunlaşabildiği görülmektedir. Bu desen, yerleşim/engel senaryosunda performansın; (i) mCPP'nin engel kümelerini alt bölgelere nasıl dağıttığı ve (ii) CPP'nin dar koridorlarda dönüş/geri dönüş davranışını nasıl yönettiği bileşenlerine birlikte duyarlı olduğunu göstermektedir.

Yerleşim/engel yoğunluğu arttıkça, dar geçitlerin ve engel kümelenmesinin etkisi altında görev tamamlama süresi (adım) ve tekrar tarama oranı (%) metriklerinde belirgin ayrışma oluşmakta; dönüş sayısı (adet) metriği ise rota karmaşıklığındaki artışı güçlü biçimde yansıtmaktadır. Bu nedenle izleyen alt bölümde gerçek arazi örtüsü (ESA WorldCover) senaryolarında, benzer metrikler üzerinden yöntemlerin heterojen arazi koşullarındaki davranışı karşılaştırılacaktır.

4.2.4. Harita Filtreleme Seviyesi

Gerçek arazi örtüsü senaryosunda (ESA WorldCover 2021), Şekil 46'daki gibi çalışma kapsamında geliştirilen filtreleme yaklaşımının etkisi "Filtresiz" durumdan "Filtre Seviyesi-4 "e kadar artan seviyeler üzerinden incelenmiştir. Bu senaryodaki amaç, filtrelemenin sonuçları yapay biçimde iyileştirmesinden ziyade; erken tespit bağlamında görevin odağını büyük pencereye taşıyarak küçük ve dağınık yamaların (yerleşim adacıkları/park-bahçe benzeri küçük alanlar) rota karmaşıklığı ve yeniden ziyaret verimliliği üzerindeki etkisini nicel olarak görünür kılmaktır. Dolayısıyla Filtresiz'den Filtre Seviyesi-4'e senaryoların karşılaştırması, yöntemlerin heterojen ve gerçekçi arazi temsili altında görev süresi, tekrar tarama ve dönüş yoğunluğu metriklerinde nasıl ayrıştığını ortaya koymaktadır.



Şekil 46. Harita filtreleme seviyesi için kullanılan ESA WorldCover haritaları

Bu alt bölümde kullanılan performans metrikleri Tablo 9'daki birimlerle raporlanmıştır: toplam yol uzunluğu ve görev tamamlama süresi adım, dönüş sayısı adet, tekrar tarama oranı–kapsama oranı–iş yükü dengesi % cinsinden değerlendirilmiştir. Filtresiz'den Filtre Seviyesi-4'e senaryolar boyunca görev tamamlama süresi (adım) açısından üst performans bandı 1571–1765 adım aralığında kalırken, alt performans bandı 20811–32915 adım aralığına kadar genişlemiştir; üst–alt bant arasındaki göreli fark ortalamada %93.36 düzeyindedir. Tekrar tarama oranı (%) üst performans bandında 8.16–18.80%

aralığında, alt performans bandında 50.21–55.40% aralığında gerçekleşmiş; göreli fark ortalamada %77.38 olmuştur. Dönüş sayısı (adet) üst performans bandında 204.83–331.83 adet, alt performans bandında 1211.50–1239.67 adet aralığındadır; göreli fark ortalaması %76.94'dir. Toplam yol uzunluğu (adım) için üst performans bandı 946.33–1449.00 adım, alt performans bandı 2850.10–3371.94 adım aralığında olup göreli fark ortalaması %60.77'dir. Kapsama oranında üst bant tüm seviyelerde %100'e ulaşabilmektedir (tavan etkisi); buna karşılık alt bantta kapsama % 60.17–87.68 aralığına düşebilmiş ve göreli fark ortalaması %23.91 düzeyinde gerçekleşmiştir. İş yükü dengesi (uniformity) metriği dosyalarda 0–1 ölçeğinde üretildiğinden, Tablo 9 ile uyumlu biçimde yüzdeye çevrilerek yorumlanmıştır: üst bant 80.31–91.45%, alt bant 60.54–69.97% aralığında olup ortalama göreli fark %23.67'dir.

Tablo 17. Harita filtreleme senaryosu için en yüksek performans gösteren mCPP+CPP çifti

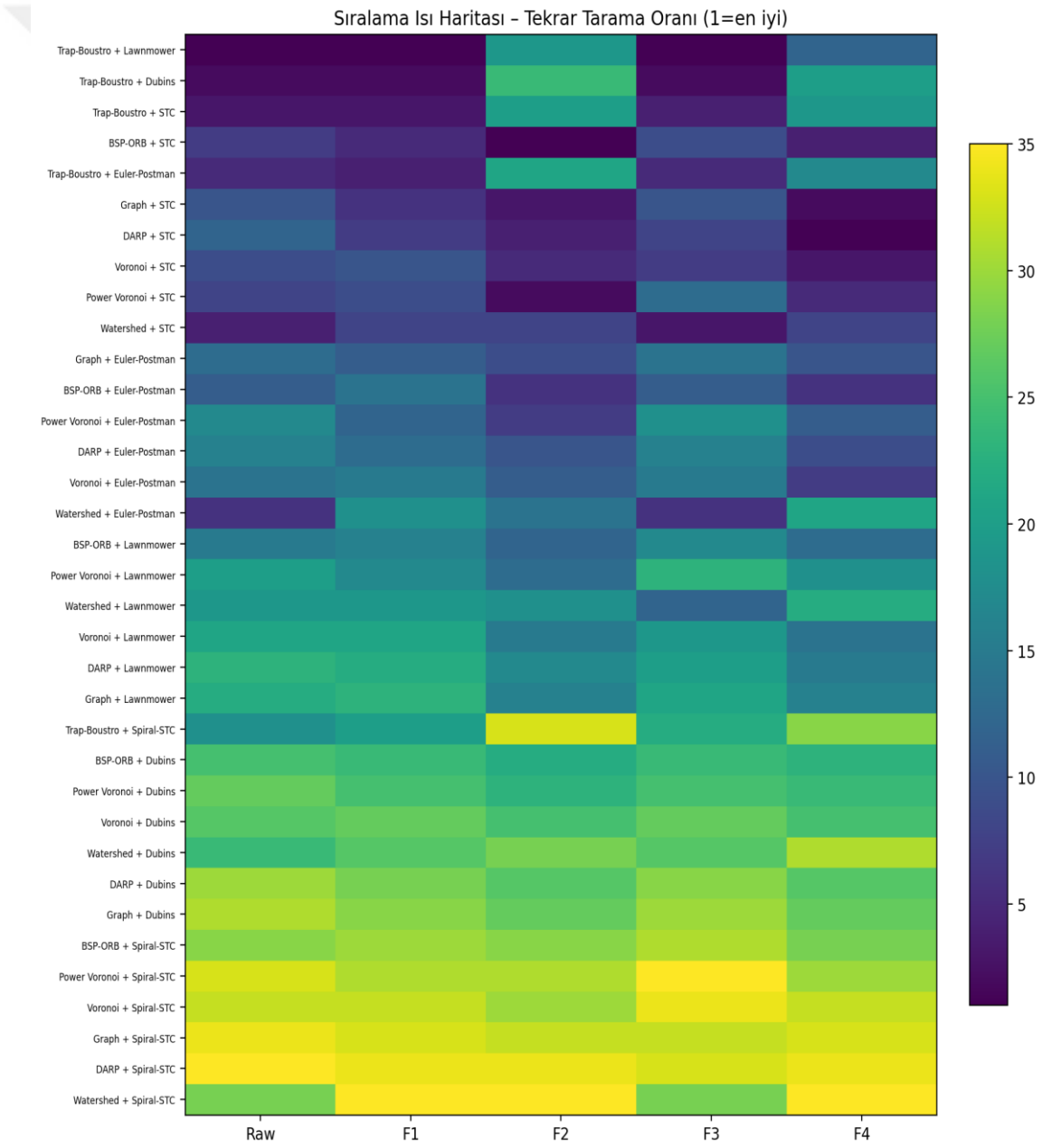
Harita	Toplam Yol Uzunluğu	Toplam Görev Süresi	Dönüş Sayısı	Tekrar Tarama Oranı	Kapsama Oranı	Uniformluk Oranı
Filtresiz	Watershed + STC	Power Voronoi + STC	Watershed + Euler-Postman	Trap-Boustro + Lawnmower	Graph + Lawnmower	Trap-Boustro + Lawnmower
Filtre Seviyesi-1	Watershed + STC	Power Voronoi + Euler-Postman	Power Voronoi + Euler-Postman	Trap-Boustro + Lawnmower	Graph + Lawnmower	Trap-Boustro + Lawnmower
Filtre Seviyesi-2	Watershed + STC	BSP-ORB + STC	Power Voronoi + Euler-Postman	BSP-ORB + STC	Trap-Boustro + Lawnmower	Trap-Boustro + Dubins
Filtre Seviyesi-3	Watershed + STC	BSP-ORB + STC	Watershed + Euler-Postman	Trap-Boustro + Lawnmower	Graph + Lawnmower	Trap-Boustro + Lawnmower
Filtre Seviyesi-4	Watershed + STC	Power Voronoi + STC	BSP-ORB + Euler-Postman	DARP + STC	DARP + Lawnmower	Trap-Boustro + Dubins

Tablo 18. Harita filtreleme senaryosu için en düşük performans gösteren mCPP+CPP çifti

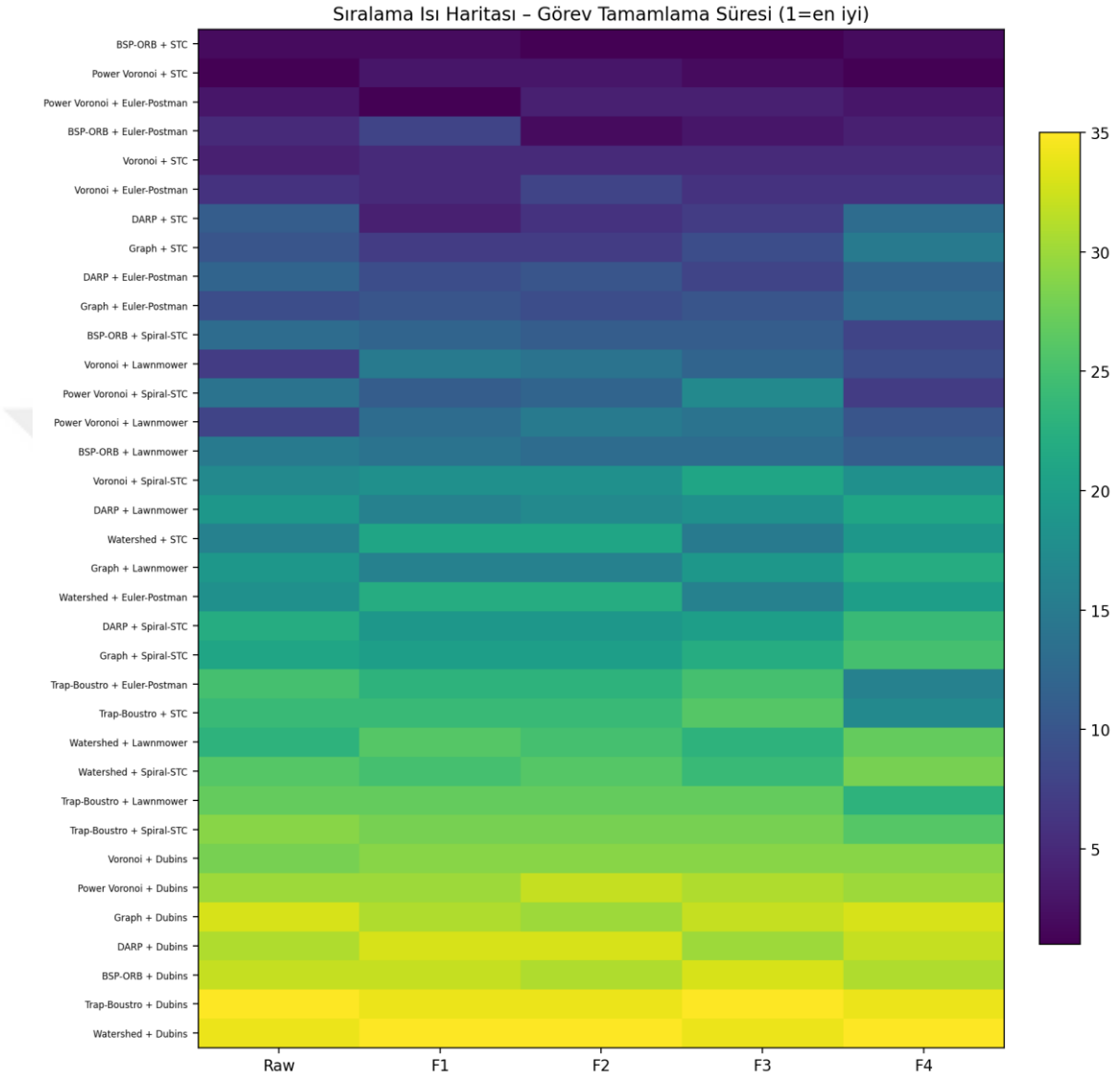
Harita	Toplam Yol Uzunluğu	Toplam Görev Süresi	Dönüş Sayısı	Tekrar Tarama Oranı	Kapsama Oranı	Uniformluk Oranı
Filtresiz	Watershed + Dubins	Trap-Boustro + Dubins	Trap-Boustro + Spiral-STC	DARP + Spiral-STC	Watershed + Lawnmower	Watershed + Spiral-STC
Filtre Seviyesi-1	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins	Trap-Boustro + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Lawnmower	Power Voronoi + Spiral-STC
Filtre Seviyesi-2	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Lawnmower	Power Voronoi + Spiral-STC
Filtre Seviyesi-3	Watershed + Dubins	Trap-Boustro + Dubins	Trap-Boustro + Spiral-STC	Power Voronoi + Spiral-STC	Watershed + Lawnmower	Watershed + Euler-Postman
Filtre Seviyesi-4	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins	DARP + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Lawnmower	Watershed + Euler-Postman

Algoritma düzeyindeki örüntü Tablo 17–18 ve ısı haritaları ile birlikte değerlendirildiğinde daha net görünmektedir. Tablo 17, her filtre seviyesi ve her metrik için yorum yönüne göre üst performans bandında yer alan mCPP–CPP algoritma çiftlerini özetlemektedir. Ham metrik değerleri üzerinden yapılan sayım, görev tamamlama süresinde üst bantta en sık görülen eşleşmelerin BSP-ORB + STC (2/5), Power Voronoi

+ STC (2/5), Power Voronoi + Euler-Postman (1/5) olduğunu; tekrar tarama oranında Trap-Boustro + Lawnmower (3/5), BSP-ORB + STC (1/5), DARP + STC (1/5) eşleşmelerinin öne çıktığını göstermektedir. Kapsama oranı metriğinde Graph + Lawnmower eşleşmesi birçok seviyede üst bantta yer almakta (Tablo 17); buna karşılık alt bantta Watershed + Lawnmower eşleşmesi tüm seviyelerde en düşük kapsama oranını üretmektedir (Tablo 18; Watershed + Lawnmower (5/5)). Öte yandan toplam yol uzunluğu metriğinde alt bantta Watershed + Dubins eşleşmesinin tüm seviyelerde tekrar etmesi (Watershed + Dubins (5/5)), filtreleme seviyesinden bağımsız olarak bazı yöntem ailelerinin maliyet birikimine duyarlı olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 47. Harita filtreleme seviyesi senaryolarındaki tekrar tarama oranına göre ısı haritası



Şekil 48. Harita filtreleme seviyesi senaryolarındaki görev tamamlama süresine göre ısı haritası

Şekil 47 (tekrar tarama oranı sıralama ısı haritası) ile Şekil 48 (görev tamamlama süresi sıralama ısı haritası) birlikte değerlendirildiğinde, filtresiz'den filtre seviyesi-4'e geçişte bazı mCPP–CPP eşleşmelerinin sıralamada görece stabil kaldığı; bazı eşleşmelerin ise filtre seviyesine duyarlı biçimde yer değiştirdiği görülmektedir. Bu durum, filtrelemenin "sahte iyileştirme" üretmesinden ziyade görev geometrisini ve hedef alanın topolojisini yeniden şekillendirerek yöntemlerin güçlü/zayıf yanlarını daha görünür kıldığını göstermektedir. Özellikle tekrar tarama ve görev süresi metriklerinde üst bantta tutarlı

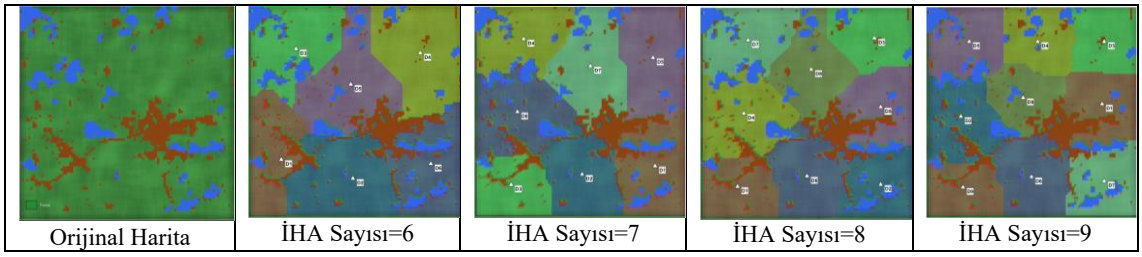
kalan eşleşmelerin, küçük yamaların sebep olduğu gereksiz yeniden giriş/çıkışları sınırlayabildiği; alt bantta yoğunlaşan eşleşmelerin ise daralan/karmaşıklaşan geçişlerde tekrar tarama ve süre maliyetini büyüttüğü gözlenmektedir (Şekil 47–48).

Harita filtreleme seviyesi senaryosu, gerçek arazi örtüsü altında algoritma çiftlerinin yalnızca kapsama başarısını değil, özellikle tekrar tarama oranı (%) ve görev tamamlama süresi (adım) üzerinden operasyonel verimliliğini ayrıştırmaktadır. Bu nedenle izleyen alt bölümde, İHA sayısının artırılmasıyla (filo ölçeği) aynı algoritma çiftlerinin benzer metrikler üzerindeki davranışı karşılaştırılarak, yöntemlerin ölçeklenebilirliği stres testi niteliğinde değerlendirilmiştir.

4.2.5. İHA Sayısı Senaryosu

İHA sayısı senaryosu kapsamında, aynı ESA WorldCover görev alanı üzerinde filo büyüklüğü artırıldığında (İHA6–İHA9) mCPP–CPP algoritma çiftlerinin görev süresi ve tekrar tarama davranışının nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu senaryo, önceki alt bölümlerde ele alınan çevresel stres faktörlerinden (orman parçalılığı, nehir/su bariyerleri, yerleşim/engel yoğunluğu ve filtreleme) farklı olarak, doğrudan ölçeklenebilirlik boyutunu test etmektedir: araç sayısı arttıkça bölütleme katmanının iş yükünü alt bölgelere nasıl dağıttığı ve CPP katmanının her alt bölgede rota üretimini ne ölçüde verimli sürdürebildiği değerlendirilmiştir.

Şekil 49, İHA sayısına bağlı olarak mCPP çıktısı olan bölütleme haritalarını göstermektedir. İHA sayısı arttıkça bölge sayısı artmakta ve her bir alt bölgenin geometrisi daha küçük ve daha yerel hâle gelmektedir. Bu durum, görev tamamlama süresi metriğinde makespan (en geç biten aracın süresi) üzerinden bir azalma eğilimi beklenmesine karşın, alt bölge sınırlarının çoğalması nedeniyle sınır geçişleri, dönüş yoğunluğu ve tekrar tarama oranı üzerinde ikinci mertebe etkiler üretebilmektedir. Dolayısıyla bu alt bölümde amaç, 'daha çok İHA her zaman daha iyi' gibi normatif bir sonuç üretmek değil; yöntem ailelerinin filo ölçeğine duyarlılığını nicel olarak görünür kılmaktır.



Şekil 49. Farklı İHA sayıları için ESA WorldCover haritasında bölütleme

Bu alt bölümde kullanılan performans metrikleri Tablo 9'daki birimlerle değerlendirilmiştir: toplam yol uzunluğu ve görev tamamlama süresi adım, dönüş sayısı adet, tekrar tarama oranı–kapsama oranı–iş yükü dengesi % cinsinden ele alınmıştır. Dört farklı filo büyüklüğü (İHA6–İHA9) için ham metrik değerlerinden türetilen üst/alt performans bantları aşağıdaki nicel aralıklara işaret etmektedir. Görev tamamlama süresi (adım) açısından üst performans bandı 1229–1781 adım aralığında kalırken, alt performans bandı 52571–67027 adım aralığına kadar genişlemiştir; üst–alt bant arasındaki göreli fark ortalamada %97.61 düzeyindedir. Tekrar tarama oranı (%) üst performans bandında 2.72–4.08% aralığında, alt performans bandında 59.14–62.85% aralığında gerçekleşmiş; göreli fark ortalamada %94.50 olmuştur. Dönüş sayısı (adet) üst bantta 247–362 adet, alt bantta 1118.22–1679.00 adet aralığında olup ortalama göreli fark %78.18'dir. Toplam yol uzunluğu (adım) üst bantta 1084.44–1638.83 adım, alt bantta 2293.58–4868.17 adım aralığında gerçekleşmiş ve ortalama göreli fark %62.45 olarak hesaplanmıştır. Kapsama oranında üst bant tüm İHA sayılarında %100'e ulaşabilmekte (tavan etkisi); buna karşılık alt bantta kapsama %97.93–98.75 aralığına düşebilmiş ve ortalama göreli fark %1.61 düzeyinde kalmıştır. Uniformluk (iş yükü dengesi) metriği dosyalarda 0–1 ölçeğinde üretildiğinden Tablo 9 ile uyumlu biçimde yüzdeye çevrilerek yorumlanmıştır: üst bant 95.72–97.15%, alt bant 70.88–71.73% aralığında olup ortalama göreli fark %26.10'dir.

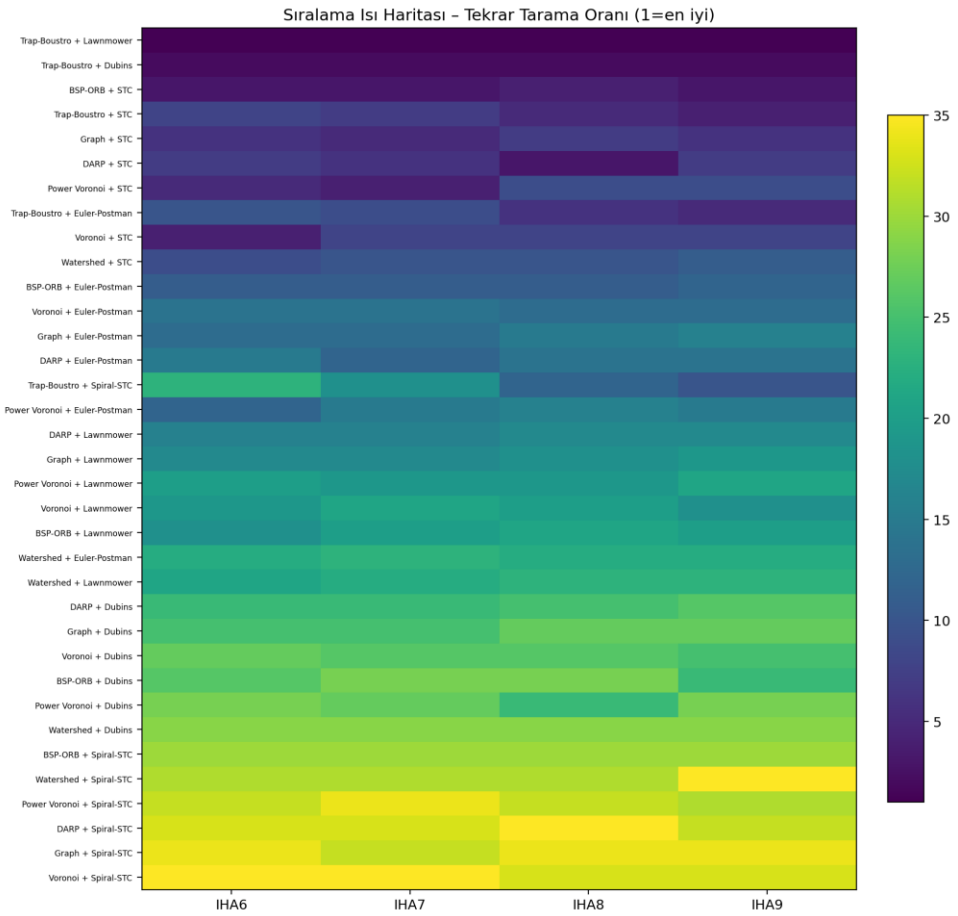
Tablo 19. Farklı İHA sayısı senaryosu için en yüksek performans gösteren mCPP+CPP çifti

İHA Sayısı	Toplam Yol Uzunluğu	Toplam Görev Süresi	Dönüş Sayısı	Tekrar Tarama Oranı	Kapsama Oranı	Uniformluk Oranı
IHA6	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + STC	BSP-ORB + Euler-Postman	Trap-Boustro + Lawnmower	Graph + Lawnmower	Trap-Boustro + Lawnmower
IHA7	Graph + STC	Power Voronoi + STC	Trap-Boustro + Euler-Postman	Trap-Boustro + Lawnmower	Graph + Lawnmower	Trap-Boustro + Lawnmower
IHA8	DARP + STC	Power Voronoi + STC	Trap-Boustro + Euler-Postman	Trap-Boustro + Lawnmower	Graph + Lawnmower	Trap-Boustro + Lawnmower
IHA9	Graph + STC	Power Voronoi + STC	Trap-Boustro + Euler-Postman	Trap-Boustro + Lawnmower	Graph + Lawnmower	Trap-Boustro + Lawnmower

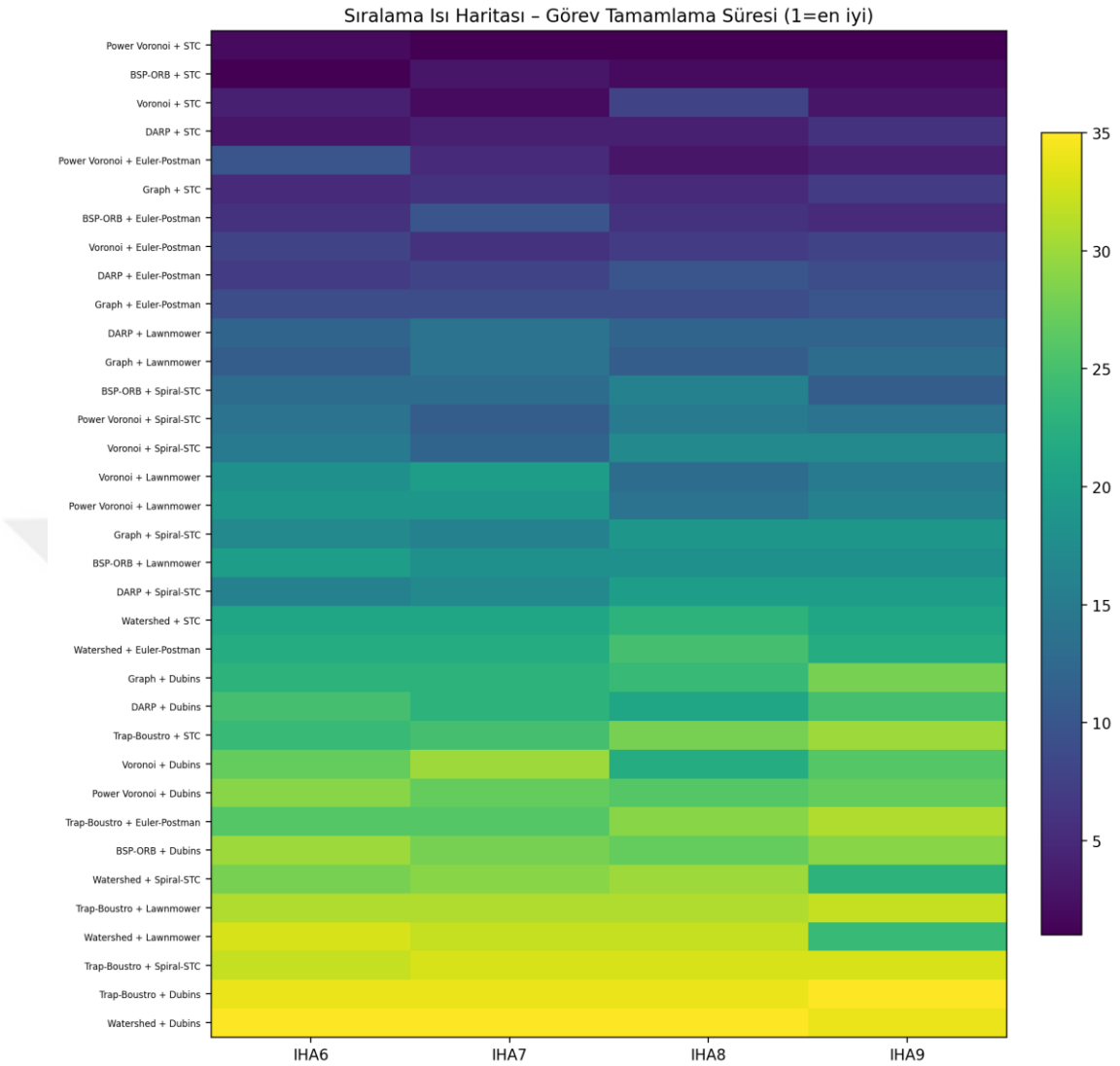
Tablo 20. Farklı İHA sayısı senaryosu için en düşük performans gösteren mCPP+CPP çifti

İHA Sayısı	Toplam Yol Uzunluğu	Toplam Görev Süresi	Dönüş Sayısı	Tekrar Tarama Oranı	Kapsama Oranı	Uniformluk Oranı
IHA6	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins	Trap-Boustro + Spiral-STC	Voronoi + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins
IHA7	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins	Trap-Boustro + Spiral-STC	Voronoi + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins
IHA8	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins	Trap-Boustro + Spiral-STC	DARP + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins
IHA9	Watershed + Dubins	Trap-Boustro + Dubins	Trap-Boustro + Spiral-STC	Watershed + Spiral-STC	Watershed + Dubins	Watershed + Dubins

Algoritma düzeyindeki örüntü, Tablo 19–20 ve ısı haritaları ile birlikte değerlendirildiğinde netleşmektedir. Üst performans bandında görev tamamlama süresi metriğinde en sık görülen eşleşmeler Power Voronoi + STC (3/4), BSP-ORB + STC (1/4) iken; tekrar tarama oranında Trap-Boustro + Lawnmower eşleşmesi tüm İHA sayılarında üst bantta yer almıştır (Trap-Boustro + Lawnmower (4/4)). Kapsama oranı metriğinde Graph + Lawnmower eşleşmesinin tüm İHA sayılarında üst bantta görünmesi (Graph + Lawnmower (4/4)), bölütleme katmanının artan araç sayısı altında da kapsama boşluğu oluşturmadan işleyebildiğini göstermektedir. Buna karşılık alt bantta toplam yol uzunluğu ve kapsama/uniformluk metriklerinde Watershed + Dubins eşleşmesi belirgin biçimde tekrarlamaktadır (yol: Watershed + Dubins (4/4); kapsama: Watershed + Dubins (4/4); uniformluk: Watershed + Dubins (4/4)). Dönüş sayısı açısından alt bantta Trap-Boustro + Spiral-STC eşleşmesinin tüm İHA sayılarında görülmesi (Trap-Boustro + Spiral-STC (4/4)), bazı CPP rota ailelerinin artan alt bölge sınırları altında dönüş maliyetini büyütebildiğine işaret etmektedir.



Şekil 50. Farklı İHA sayısı senaryolarındaki tekrar tarama oranına göre ısı haritası



Şekil 51. Farklı İHA sayısı senaryolarındaki görev tamamlama süresine göre ısı haritası

Şekil 50 (tekrar tarama oranı sıralama ısı haritası) ve Şekil 51 (görev tamamlama süresi sıralama ısı haritası), İHA sayısı arttıkça sıralamanın ne ölçüde stabil kaldığını göstermektedir. Isı haritalarında üst bantta (daha düşük sıra değeri) yoğunlaşan eşleşmeler filo ölçeği değiştiğinde dahi görece tutarlı bir performans üretirken; alt bantta yoğunlaşan eşleşmelerin bazı İHA sayılarında daha belirgin biçimde zayıfladığı görülmektedir. Bu desen, ölçeklenebilirliğin yalnızca araç sayısına değil; mCPP'nin alt bölge geometrisini nasıl ürettiği ve CPP'nin bu geometri içinde dönüş/geri dönüşleri nasıl yönettiği bileşenlerine birlikte bağlı olduğunu göstermektedir.

İHA sayısı senaryosu, yöntemlerin çevresel koşullardan bağımsız olarak filo ölçeğine duyarlılığını ortaya koymaktadır. Bu alt bölümde elde edilen bulgular, 4.2 bölümünün

bütününde kullanılan stres testleriyle birlikte yorumlanarak 4.3 Tartışma ve Öneriler bölümüne aktarılacaktır.

4.3. Tartışma ve Öneriler

Bu bölümde, 4.2'de elde edilen bulgular erken orman yangını tespiti bağlamındaki kapsama planlama (CPP/mCPP) literatürü ile ilişkilendirilerek tartışılmakta ve çalışmanın uygulamaya/gelecek çalışmalara dönük çıkarımları sunulmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen MATLAB tabanlı simülasyon altyapısı üzerinde, farklı çevresel stres faktörleri altında algoritma ailelerinin görev tamamlama süresi, tekrar tarama oranı, dönüş sayısı, toplam yol uzunluğu, kapsama oranı ve iş yükü dengesi metriklerinde nasıl ayrıştığı nicel olarak ortaya konulmuştur.

Elde edilen sonuçlar genel olarak şu iki noktayı vurgulamaktadır: (i) performans, yalnızca seçilen CPP desenine değil, mCPP'nin ürettiği alt bölge geometrisine ve harita topolojisine güçlü biçimde bağlıdır; (ii) farklı metrikler arasında belirgin bir denge–verimlilik (trade-off) bulunmaktadır. Bu gözlemler, kapsama planlaması literatüründe algoritma seçiminin bağlama duyarlı olması gerektiğini vurgulayan tarama/derleme çalışmalarıyla uyumludur [14, 83].

4.2 kapsamındaki stres testlerinden çıkarılan temel tartışma noktaları aşağıda özetlenmiştir:

- Sabit kanatlı İHA konsepti ve görev uygunluğu: Çalışmada ele alınan görev, geniş alanların uzun süreli gözetlenmesini gerektirdiğinden sabit kanatlı platformların menzil ve seyir verimliliği gibi operasyonel avantajlarıyla uyumludur. Bu nedenle sonuçlar, platform kinematiğinden bağımsız bir "en iyi" arayışından çok, sabit kanatlı erken tespit konseptinde CPP/mCPP eşleşmelerinin çevresel karmaşıklık altında nasıl davrandığını göstermektedir [11, 12, 75].

- Konsept düzeyinde çıkarım: Erken tespitte kritik olan yalnızca tek seferlik tam kapsama değil, yeniden ziyaret süresini azaltan ve tekrar taramayı sınırlayan bir "sürekli gözetleme" işletimidir. Bu bakış, metriklerin yorumlanmasında görev süresi–tekrar tarama–dönüş maliyeti üçlüsünün öncelikli ele alınmasını desteklemektedir [7, 54, 74].

- Orman parçalılığı etkisi: Parçalılık arttıkça sınır yoğunluğu yükselmiş; bunun sonucu olarak dönüş sayısı ve tekrar tarama oranı üzerinden rota karmaşıklığı artmıştır. Kapsama oranı bazı durumlarda tavan etkisine yaklaşsa da, operasyonel verimlilik (görev süresi + tekrar tarama + dönüş) metrikleri parçalılık altında daha ayrıştırıcı hâle gelmiştir. Bu durum, hücresel ayrıştırma ve kapsama planlama literatüründe sınır/ayrışım çizgilerinin rota maliyetlerine etkisini vurgulayan bulgularla tutarlıdır [14, 80, 83].

- Nehir/su yoğunluğu (doğal bariyer) etkisi: Bariyerler bağlantılı bileşen yapısını değiştirerek topolojik kopuşlar ve dar geçitler üretmiş; CPP katmanında rota sürekliliğini zorlayarak tekrar tarama ve görev süresi maliyetlerini büyütmüştür. Bu sonuç, heterojen/engelli ortamlarda homojen alan varsayımının maliyet doğurabileceğini vurgulayan yaklaşımlarla uyumludur [14, 83]. Erken tespit perspektifinde ayrıca, geçilebilir ancak düşük öncelikli alanların kapsama içine alınmasının tekrar taramayı büyütebileceği görülmüş; bu durum risk/önem temelli alan önceliklendirme gerekliliğini desteklemektedir [7].

- Yerleşim/engel yoğunluğu etkisi: Geçilemez bölgelerin artması, dar koridorlar ve engel kümelenmesi üzerinden hem mCPP sınır geometrisini hem de CPP rota üretimini birlikte zorlamış; dönüş ve tekrar tarama artışları özellikle görev süresinde belirgin ayrışmaya yol açmıştır. Bu gözlem, engelli ortamlarda geometrik kısıtların rota verimliliğini belirleyici kıldığı literatürle tutarlıdır [14, 83, 112].

- Gerçek arazi örtüsü (ESA WorldCover) ve filtreleme: Filtreleme seviyesi, görevle uyumlu çevre temsili üretmenin kritik bir kontrol değişkeni olduğunu göstermiştir. Artan filtreleme ile küçük ve operasyonel önemi düşük yamaların etkisi azaltılmış; bu durum dönüş/tekrar tarama ve görev süresi üzerinde iyileşme yaratırken, aşırı filtreleme durumunda kapsama oranında sınırlı düşüşler gözlenebilmiştir. Sonuçlar, ham sınıf haritası yerine görev-uyumlu sadeleştirilmiş temsil kullanma yaklaşımıyla uyumludur [16, 14] ve erken tespit bağlamında risk/önem temelli sadeleştirmenin önemini destekler [7, 54].

- İHA sayısı (ölçeklenebilirlik) etkisi: Filo büyüklüğü arttıkça makespan (en geç biten aracın süresi) açısından iyileşme eğilimi gözlense de, kazanımların doğrusal olmadığı ve bazı eşleşmelerde sınır/koordinasyon etkileri nedeniyle dönüş ve tekrar tarama maliyetlerinin artabildiği görülmüştür. Bu bulgu, çoklu robot kapsama literatüründe raporlanan ölçeklenebilirliğin bağlama ve yöntem ailesine duyarlı olduğu görüşüyle uyumludur [14, 82]. Çalışma normatif bir "ideal İHA sayısı" önermemekte; yöntem ailelerinin filo ölçeğine duyarlılığını nicel olarak görünür kılmaktadır.

- Yöntem aileleri düzeyinde çıkarım: Tablo/ısı haritası örüntüleri, performansın yalnızca CPP algoritmasına değil, mCPP'nin ürettiği alt bölge geometrisinin CPP'nin dönüş/geri dönüş davranışını nasıl tetiklediğine de bağlı olduğunu göstermiştir. Bu durum, "bölütleme + bölge içi kapsama" bütünleşik değerlendirmesini öneren yaklaşımlarla uyumludur [14, 15, 83].

Sınırlılıklar (geçerlilik koşulları):

- Değerlendirme, simülasyon ortamında statik/offline varsayımla yürütülmüştür. Dinamik yangın yayılımı, rüzgâr, iletişim kopması, sensör hatası ve çevrimiçi yeniden planlama gereksinimleri bu çalışmanın kapsamı dışındadır [101, 102].

- Bu tez, platform seçimini optimizasyon problemi olarak ele almamakla birlikte, yorumlar sabit kanatlı erken tespit konsepti bağlamında yapılmıştır. Sabit kanatlı kinematik/operasyonel kısıtların (örn. minimum dönüş yarıçapı, seyir hızı, irtifa–yer örnekleme ilişkisi) metriklere etkisi daha ayrıntılı uçuş dinamiği ve sensör modelleriyle birlikte ele alındığında sonuçların genellenebilirliği güçlenecektir [11, 12, 75].

- Metrikler erken tespit bağlamında seçilmiş olsa da, gerçek operasyonel başarı; algılama sensörü, şerit genişliği/irtifa, haberleşme mimarisi ve batarya/şarj operasyonları gibi unsurlarla birlikte ele alındığında daha kapsamlı bir uçtan uca modele ihtiyaç duyabilir [11, 12, 75].

- ESA WorldCover temsili, arazi örtüsünü sınıf haritası olarak sunar. Filtreleme/maskeleme düzeyinin risk/önem haritalarıyla eşlenmesi ve farklı bölgelerde doğrulanması ek saha/deneysel çalışma gerektirebilir [7, 16].

- Öneriler (uygulama ve gelecek çalışmalar):

- Bağlama duyarlı algoritma seçimi: “Tek bir en iyi algoritma” yerine, görev alanının mekânsal yapısı (parçalılık/bariyer/engel yoğunluğu), operasyonel öncelik (min tekrar tarama vs. min süre vs. min dönüş) ve filo ölçeği birlikte değerlendirilerek mCPP–CPP eşleşmesi seçilmelidir [14, 82, 83].

- Sabit kanatlı konsept için operasyonel bütünleme: CPP/mCPP çıktıları, sabit kanatlı platformun operasyonel kısıtları (örn. dönüş yarıçapı, emniyetli irtifa/yerleşim kaçınma, transit koridorları) ile tutarlı şekilde planlama zincirine entegre edilmelidir; böylece “sürekli gözetleme” konseptinde görev icrası gerçekçi kısıtlarla değerlendirilebilir [11, 12, 75].

- Görev-uyumlu harita temsili: Heterojen gerçek haritalarda ham sınıf haritası yerine, düşük öncelikli küçük yamaların rota karmaşıklığına etkisini azaltan maskeleme/filtreleme adımı planlama akışının standart bir bileşeni olarak ele alınmalıdır [14,16]. Filtre seviyesinin belirlenmesinde risk/önem temelli yaklaşım kullanılmalı; kapsama oranını düşürmeyecek şekilde “aşırı filtreleme” sınırı kontrol edilmelidir [7].

- Filo ölçeği eşleştirmesi: İHA sayısı artışının kazanımları doğrusal olmadığından, araç sayısı seçimi alan büyüklüğü ve karmaşıklığı ile ele alınmalı; “alan karmaşıklığı–İHA sayısı” eşleştirme yaklaşımı geliştirilmelidir [82, 113].

- Çevrimiçi yeniden planlama entegrasyonu: Batarya düşümü, yeni engel oluşumu, iletişim kısıtları gibi durumları içerecek biçimde çevrimiçi yeniden planlama (re-planning) senaryoları simülasyon altyapısına entegre edilmelidir [101, 102].

- Algılama katmanı entegrasyonu: Kapsama planlama çıktıları, yeniden ziyaret süresi ve tespit olasılığı gibi algılama katmanı metrikleriyle daha doğrudan bağlanarak sürekli gözetleme hedefi için uçtan uca değerlendirme yapılması önerilir [11, 12, 74].

KAYNAKÇA

1. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S. & Zhou, B. (2021). Climate change 2021: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the İntergovernmental Panel on Climate Change**, 2(1), 2391 s/pp.
2. Acar, Z., & Gonencgil, B., 2023. Forest fires in southern Turkey July-August 2021. **Revista de Climatología, 23**: 1-15.
3. Drysdale, D., 2011. An introduction to fire dynamics. John Wiley & Sons, Chichester, 551 s/pp.
4. National Park Service, 2025. Wildland fire spread and suppression (Web sayfası: **https://www.nps.gov/articles/wildland-fire-spread-and-suppression.htm**), (Erişim tarihi: 11 Şubat 2026).
5. Agee, J.K., Skinner, C.N., 2005. Basic principles of forest fuel reduction treatments. **Forest Ecology and Management, 211** (1-2): 83-96.
6. Donovan, G.H., & Brown, T.C., 2005. An alternative incentive structure for wildfire management on national forest land. **Forest Science, 51** (5): 387-395.
7. Calkin, D.E., Cohen, J.D., Finney, M.A., & Thompson, M.P., 2014. How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland-urban interface. **Proceedings of the National Academy of Sciences, 111** (2): 746-751.
8. National Interagency Fire Center, 2017. Federal firefighting costs (suppression only) (Web sayfası: https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/suppression-costs), (Erişim tarihi: 16 Şubat 2026).
9. Çetin, A.E., Dimitropoulos, K., Gouverneur, B., & Grammalidis, N., 2013. Video fire detection–review. **Digital Signal Processing, 23** (6): 1827-1843.
10. Celik, T., & Demirel, H., 2009. Fire detection in video sequences using a generic color model. **Fire Safety Journal, 44** (2): 147-158.
11. Erdelj, M., Natalizio, E., Chowdhury, K.R., & Akyildiz, I.F., 2017. Help from the sky: leveraging UAVs for disaster management. **IEEE Pervasive Computing, 16** (1): 24-32.

12. Akhloufi, M.A., Couturier, A., & Castro, N.A., 2021. Unmanned aerial vehicles for wildland fires: sensing, perception, cooperation and assistance. **Drones, 5** (1): 15.
13. Achtelik, M., Achtelik, M., Weiss, S., & Siegwart, R., 2011. Onboard IMU and monocular vision based control for MAVs in unknown in-and outdoor environments, 3056-3063. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 9-13 Mayıs 2011, Shanghai, China, IEEE, 6610 s/pp.
14. Galceran, E., Carreras, M., 2013. A survey on coverage path planning for robotics. **Robotics and Autonomous Systems, 61** (12): 1258-1276.
15. Rekleitis, I., New, A.P., Rankin, E.S., & Choset, H., 2008. Efficient boustrophedon multi-robot coverage: an algorithmic approach. **Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 52** (2): 109-142.
16. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., & De Keersmaecker, W., 2022. ESA WorldCover 10 m 2021 v200 (Web sayfası: **https://worldcover2021.esa.int**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).
17. Western Fire Chiefs Association, 2025. Understanding the different types of wildfires (Web sayfası: **https://wfca.com/wildfire-articles/types-of-wildfire**), (Erişim tarihi: 31 Aralık 2025).
18. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2025. UNDRR–ISC hazard information profiles – 2025 update: EN0205 wildfires (Web sayfası: **https://www.undrr.org/understanding-disaster-risk/terminology/hips/en0205**), (Erişim tarihi: 31 Aralık 2025).
19. Bennett, M., Fitzgerald, S., & Pettinger, L., 2010. Reducing fire risk on your forest property (Web sayfası: **https://extension.oregonstate.edu**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).
20. Alexander, M.E., Cruz, M.G., 2014. The general nature of crown fires. **Fire Management Today, 74** (2): 11-24.
21. UK Climate Risk, 2025. Wildfire briefing (Web sayfası: **https://www.ukclimaterisk.org/publications/wildfire-briefing/**), (Erişim tarihi: 31 Aralık 2025).
22. Tedim, F., Leone, V., McCaffrey, S., & McGee, T.K., 2018. Defining extreme wildfire events: difficulties, challenges, and impacts. **Fire, 1** (1): 9.

23. Tedim, F., Remelgado, R., Borges, C., & Carvalho, S., 2013. Exploring the occurrence of mega-fires in Portugal. **Forest Ecology and Management, 294**: 86-96.

24. Linley, G.D., Jolly, W.M., Hoffmann, A.A., & Bowman, D.M.J.S., 2022. What do you mean, 'megafire'?. **Global Ecology and Biogeography, 31** (10): 1906-1922.

25. Stoof, C.R., Ribeiro, L.M., Viegas, D.X., & Conway, S., 2024. Megafire: an ambiguous and emotive term best avoided by science. **Global Ecology and Biogeography, 33** (2): 341-351.

26. Rothermel, R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. **USDA Forest Service Research Paper INT-115**: 1-40.

27. Andrews, P.L., 2014. Current status and future needs of the BehavePlus fire modeling system. **International Journal of Wildland Fire, 23** (1): 21-33.

28. Pastor, E., Zárate, L., Planas, E., & Arnaldos, J., 2003. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. **Progress in Energy and Combustion Science, 29** (2): 139-153.

29. Bowman, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., & Bond, W.J., 2009. Fire in the Earth system. **Science, 324** (5926): 481-484.

30. Snyder, G.A., Shriwastav, S., Morrison, D., & Song, Z., 2022. Path planning for optimal coverage of areas with nonuniform importance, 2546. AIAA SciTech 2022 Forum, 2022, San Diego, USA, AIAA, toplam sayfa sayısı s/pp.

31. Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M., & Wotton, M., 2009. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. **Global Change Biology, 15** (3): 549-560.

32. Jolly, W.M., Cochrane, M.A., Freeborn, P.H., & Holden, Z.A., 2015. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. **Nature Communications, 6** (1): 7537.

33. Jones, M.W., Abatzoglou, J.T., Veraverbeke, S., & Andela, N., 2022. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. **Reviews of Geophysics, 60** (3): e2020RG000726.

34. Westerling, A.L., 2016. Increasing western US forest wildfire activity: sensitivity to changes in the timing of spring. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 371** (1696): 20150178.

35. Cunningham, C.X., Williamson, G.J., Bowman, D.M.J.S., 2024. Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. **Nature Ecology & Evolution, 8** (8): 1420-1425.

36. Trenberth, K.E., Dai, A., Rasmussen, R.M., & Parsons, D.B., 2003. The changing character of precipitation. **Bulletin of the American Meteorological Society, 84** (9): 1205-1218.

37. Balch, J.K., Bradley, B.A., Abatzoglou, J.T., & Nagy, R.C., 2017. Human-started wildfires expand the fire niche across the United States. **Proceedings of the National Academy of Sciences, 114** (11): 2946-2951.

38. Turco, M., Von Hardenberg, J., AghaKouchak, A., & Llasat, M.C., 2017. On the key role of droughts in the dynamics of summer fires in Mediterranean Europe. **Scientific Reports, 7** (1): 81.

39. San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., & Libertà, G., 2023. Forest fires in Europe, Middle East and North Africa (Web sayfası: **https://effis.jrc.ec.europa. eu/reports-and-publications/annual-fire-reports/**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).

40. Tarım Orman-İş Sendikası, 2025. Orman yangınlarıyla mücadele raporu (Web sayfası: **https://www.tarimormanis.org/dosyalar/files/tarimormanissendikasi%28ormanyanginlariylemucadeleraoru2025%29.pdf**), (Erişim tarihi: 15 Aralık 2025).

41. Güngöroğlu, C., Özkara, Z.U., Tutmaz, V., 2024. Türkiye'de orman yangın yönetimi: sorunlar ve çözüm önerileri. **Memleket Siyaset Yönetim, 19** (43): 517-570.

42. Demir, A., Akay, A.E., 2024. Forest fire risk mapping using gis based analytical hierarchy process approach. **European Journal of Forest Engineering, 10** (1): 15-28.

43. Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots. **Geophysical Research Letters, 33** (8): 1-10.

44. Turp, M.T., Öztürk, T., Türkeş, M., & Kurnaz, M.L., 2014. RegCM4.3.5 bölgesel iklim modelini kullanarak Türkiye ve çevresi bölgelerin yakın gelecekteki hava sıcaklığı ve yağış klimatolojileri için öngörülen değişikliklerin incelenmesi. **Ege Coğrafya Dergisi, 23** (1): 1-24.

45. Varol, T., Ertuğrul, M., 2016. Analysis of the forest fires in the Antalya region of Turkey using the Keetch–Byram drought index. **Journal of Forestry Research, 27** (4): 811-819.

46. WWF, 2020. Forests and the future: a crisis raging out of control (Web sayfası: **https://www.worldwildlife.org/publications/forests-and-the-future**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).

47. Pausas, J.G., Keeley, J.E., 2019. Wildfires as an ecosystem service. **Frontiers in Ecology and the Environment, 17** (5): 289-295.

48. Bowman, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., & Bond, W.J., 2009. Fire in the Earth system. **Science, 324** (5926): 481-484.

49. Lindenmayer, D.B., Kooyman, R.M., Taylor, C., & Ward, M., 2020. Recent Australian wildfires made worse by logging and associated forest management. **Nature Ecology & Evolution, 4** (7): 898-900.

50 Van Der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., & Collatz, G.J., 2017. Global fire emissions estimates during 1997–2016. **Earth System Science Data, 9** (2): 697-720.

51. Canadell, J.G., Raupach, M.R., 2008. Managing forests for climate change mitigation. **Science, 320** (5882): 1456-1457.

52. Shakesby, R.A., Doerr, S.H., 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. **Earth-Science Reviews, 74** (3-4): 269-307.

53. Robichaud, P., Wagenbrenner, J., Brown, R., 2010. Rill erosion in natural and disturbed forests: measurements. **Water Resources Research, 46** (10): 2-9.

54. Thompson, M.P., MacGregor, D.G., Dunn, C.J., & Calkin, D.E., 2018. Rethinking the wildland fire management system. **Journal of Forestry, 116** (4): 382-390.

55. Thomas, D., Butry, D., Gilbert, S., & Webb, D., 2017. The costs and losses of wildfires. **NIST Special Publication, 1215** (11): 1-72.

56. California Department of Forestry and Fire Protection, 2026. Camp fire (Web sayfası: **https://www.fire.ca.gov/incidents/2018/11/8/camp-fire/**), (Erişim tarihi: 02 Ocak 2026).

57. National Weather Service, 2020. Service assessment: November 2018 camp fire (Web sayfası: **https://www.weather.gov/media/publications/assessments/sa1162SignedReport.pdf**), (Erişim tarihi: 02 Ocak 2026).

58. California Department of Insurance, 2026. Wildfire insurance losses from November 2018 blazes top $12 billion (Web sayfası: **https://www.insurance.ca.gov/0400-news/0100-press-releases/2019/release041-19.cfm**), (Erişim tarihi: 02 Ocak 2026).

59. Ascia, F., 2022. A Practical Approach to Navigating Uncertainty Within Innovative Markets for Carthago a Fire Prevention and Response Startup Concept: Technology Analysis & Diffusion. Universidade NOVA de Lisboa, Yüksek Lisans Tezi, Lisboa, 145 s/pp.

60. Federal Emergency Management Agency, 2025. 20 years of the National Incident Management System (NIMS) (Web sayfası: **https://www.fema.gov/-sites/default/files/documents/fema_npd-20-years-of-nims.pdf**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).

61. Granda, B., León, J., Vitoriano, B., & Hearne, J., 2023. Decision support models and methodologies for fire suppression. **Fire, 6** (2): 37.

62. Haight, R.G., Fried, J.S., 2007. Deploying wildland fire suppression resources with a scenario-based standard response model. **INFOR: Information Systems and Operational Research, 45** (1): 31-39.

63. Katuwal, H., Dunn, C.J., Calkin, D.E., 2017. Characterising resource use and potential inefficiencies during large-fire suppression in the western US. **International Journal of Wildland Fire, 26** (7): 604-614.

64. Calkin, D.E., Gebert, K.M., Jones, J.G., & Neilson, R.P., 2005. Forest Service large fire area burned and suppression expenditure trends, 1970–2002. **Journal of Forestry, 103** (4): 179-183.

65. Bilgili, E., Küçük, Ö., Sağlam, B., & Coşkuner, A., 2021. Mega forest fires: causes, organization and management. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 45** (6): 777-789.

66. Sullivan, A.L., 2009. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: physical and quasi-physical models. **International Journal of Wildland Fire, 18** (4): 349-368.

67. Cosgun, U., Kucuk, O., Bilgili, E., & Saglam, B., 2023. Visibility evaluation and suitability analysis of fire lookout towers in Mediterranean Region, southwest Anatolia/Türkiye. **Fire, 6** (8): 305.

68. Jiménez-Ortega, A.D., Aguilar Ibarra, A., Galeana-Pizaña, J.M., & Núñez, J.M., 2022. Changes over time matter: a cycle of participatory sustainability assessment of organic coffee in Chiapas, Mexico. **Sustainability, 14** (4): 2012.

69. Govil, K., Welch, M.L., Ball, J.T., & Pennypacker, C.R., 2020. Preliminary results from a wildfire detection system using deep learning on remote camera images. **Remote Sensing, 12** (1): 166.

70. San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., & Libertà, G., 2018. Basic criteria to assess wildfire risk at the pan-European level (Web sayfası: **https://effis.jrc.ec.europa.eu**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).

71. Finney, M.A., 2004. FARSITE: fire area simulator—model development and evaluation. **USDA Forest Service Research Paper RMRS-RP-4** (Revised): 1-47.

72. Scott, J.H., Burgan, R.E., 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. **USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-153**: 1-72.

73. Alexander, M.E., Cruz, M.G., 2013. Are the applications of wildland fire behaviour models getting ahead of their evaluation again? **Environmental Modelling & Software, 41**: 65-71.

74. Moritz, M.A., Parisien, M.A., Batllori, E., & Krawchuk, M.A., 2012. Climate change and disruptions to global fire activity. **Ecosphere, 3** (6): 1-22.

75. Flannigan, M.D., Stocks, B.J., Turetsky, M.R., & Wotton, B.M., 2009. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. **Global Change Biology, 15** (3): 549-560.

76. Nigam, N., Kroo, I., 2014. The multiple unmanned air vehicle persistent surveillance problem: a review. **Machines, 2** (1): 13-72.

77. Feng, L., Katupitiya, J., 2022. UAV-based persistent full area coverage with dynamic priorities. **Robotics and Autonomous Systems, 157**: Art. no. 104244.

78. Swieringa, K.A., Hanson, C., Richardson, T., & White, J., 2010. Autonomous battery swapping system for small-scale helicopters. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010, Anchorage, USA, IEEE, 744 s/pp.

79. Michini, B., Toksoz, T., Redding, J., & Michini, M., 2011. Automated battery swap and recharge to enable persistent UAV missions. AIAA Conference, 2011, 853 s/pp.

80. Abatzoglou, J.T., Williams, A.P., 2016. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. **Proceedings of the National Academy of Sciences, 113** (42): 11770-11775.

81. Calkin, D.E., Cohen, J.D., Finney, M.A., & Thompson, M.P., 2014. How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland–urban interface. **Proceedings of the National Academy of Sciences, 111** (2): 746-751.

82. Jain, P., Wang, X., Flannigan, M.D., 2020. Trend analysis of fire season length and extreme fire weather in North America. **International Journal of Wildland Fire, 29** (6): 531-544.

83. Stephens, S.L., Agee, J.K., Fulé, P.Z., & North, M.P., 2013. Managing forests and fire in changing climates. **Science, 342** (6154): 41-42.

84. Reinhardt, E.D., Keane, R.E., Brown, J.K., 1997. First order fire effects model: FOFEM 4.0 user's guide. **USDA Forest Service General Technical Report INT-GTR-344**: 1-65.

85. Keeley, J.E., Fotheringham, C.J., Morais, M., 1999. Reexamining fire suppression impacts on brushland fire regimes. **Science, 284** (5421): 1829-1832.

86. Pyne, S.J., Andrews, P.L., Laven, R.D., 1996. Introduction to Wildland Fire. John Wiley & Sons, New York, 769 s/pp.

87. Chuvieco, E., 2016. Fundamentals of Satellite Remote Sensing. CRC Press, Boca Raton, 468 s/pp.

88. Turco, M., Rosa-Cánovas, J.J., Bedia, J., & Jerez, S., 2018. Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with nonstationary climate–fire models. **Nature Communications, 9** (1): 3821.

89. European Environment Agency, 2023. Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2022 (Web sayfası: **https://www.eea.europa.eu**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).

90. Jolly, W. M., Cochrane, M. A., Freeborn, P. H., Holden, Z. A., Brown, T. J., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. (2015). Climate-induced variations in

global wildfire danger from 1979 to 2013. **Nature Communications, 6** (1), 1-11.

91. Bowman, D.M.J.S., Williamson, G.J., Abatzoglou, J.T., & Kolden, C.A., 2017. Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. **Nature Ecology & Evolution, 1** (3): 0058.
92. Westerling, A.L., Hidalgo, H.G., Cayan, D.R., & Swetnam, T.W., 2006. Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. **Science, 313** (5789): 940-943.
93. Littell, J.S., McKenzie, D., Peterson, D.L., & Westerling, A.L., 2009. Climate and wildfire area burned in western US ecoprovinces, 1916–2003. **Ecological Applications, 19** (4): 1003-1021.
94. Krawchuk, M.A., Moritz, M.A., Parisien, M.A., & Van Dorn, J., 2009. Global pyrogeography: the current and future distribution of wildfire. **PLoS ONE, 4** (4): 5102 s/pp.
95. Johnston, F.H., Henderson, S.B., Chen, Y., & Randerson, J.T., 2012. Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. **Environmental Health Perspectives, 120** (5): 695-701.
96. Reid, C.E., Brauer, M., Johnston, F.H., & Jerrett, M., 2016. Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. **Environmental Health Perspectives, 124** (9): 1334-1343.
97. Dennison, P.E., Brewer, S.C., Arnold, J.D., & Moritz, M.A., 2014. Large wildfire trends in the western United States, 1984–2011. **Geophysical Research Letters, 41** (8): 2928-2933.
98. Balch, J.K., Bradley, B.A., Abatzoglou, J.T., & Nagy, R.C., 2017. Human-started wildfires expand the fire niche across the United States. **Proceedings of the National Academy of Sciences, 114** (11): 2946-2951.
99. Short, K.C., 2017. Spatial wildfire occurrence data for the United States, 1992–2015. **Forest Service Research Data Archive**: 1-4.
100. Parisien, M.A., Snetsinger, S., Greenberg, J.A., & Nelson, C.R., 2012. Spatial variability in wildfire probability across the western United States. **International Journal of Wildland Fire, 21** (4): 313-327.

101. Ager, A.A., Finney, M.A., Kerns, B.K., & Maffei, H., 2007. Modeling wildfire risk to northern spotted owl habitat in central Oregon, USA. **Forest Ecology and Management, 246** (1): 45-56.
102. Miller, J.D., Safford, H.D., 2012. Trends in wildfire severity: 1984 to 2010 in the Sierra Nevada, California, USA. **Fire Ecology, 8** (3): 41-57.
103. Keeley, J.E., Syphard, A.D., 2016. Climate change and future fire regimes: examples from California. **Geosciences, 6** (3): 37.
104. Abatzoglou, J.T., Williams, A.P., Barbero, R., 2019. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices. **Geophysical Research Letters, 46** (1): 326-336.
105. United Nations Environment Programme, 2022. Spreading like wildfire: the rising threat of extraordinary landscape fires (Web sayfası: **https://www.unep.org**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).
106. NASA Earth Observatory, 2023. Increasing trends in global wildfire activity (Web sayfası: **https://earthobservatory.nasa.gov**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).
107. World Bank, 2022. The global cost of wildfire (Web sayfası: **https://www.worldbank.org**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).
108. OECD, 2023. Responding to wildfire risk in a changing climate (Web sayfası: **https://www.oecd.org**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).
109. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. Global forest resources assessment 2020 (Web sayfası: **https://www.fao.org**), (Erişim tarihi: 26 Şubat 2026).
110. Lewis, J.S., Edwards, W., Benson, K., & Rekleitis, I., 2017. Semi-boustrophedon coverage with a dubins vehicle, 5630-5637. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017, Vancouver, Canada, IEEE, 636 s/pp.
111. Eiselt, H.A., Gendreau, M., Laporte, G., 1995. Arc routing problems, part I: the Chinese postman problem. **Operations Research, 43** (2): 231-242.
112. IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 2391 s/pp.
113. Shah, K., Schmidt, A.E., Ballard, G., & Schwager, M., 2022. Large scale aerial multi-robot coverage path planning. **Field Robotics, 2**: 1971-1998.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı:

Uyruğu:

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum:

e-mail:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev

YABANCI DİL

YAYINLAR