BÖLÜM XIII

ORMAN YANGINLARI İLE MÜCADELEDE YAPAY ZEKA DESTEKLİ SÜRÜ İHA KULLANIMI

Use of Artificial Intelligence-Assisted Swarm Drones in Fighting Forest Fires

Kamil ORMAN

(Doç. Dr.), Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi,
Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Erzincan/Türkiye,
E-mail: korman@erzincan.edu.tr,
ORCID: 0000-0002-7236-9988

1. Giriş

Orman yangınları, küresel iklim değişikliği, artan sıcaklıklar, uzun kuraklık dönemleri ve insan kaynaklı faktörler nedeniyle giderek artış göstermektedir. Dünya genelinde her yıl milyonlarca hektarlık orman alanı yangınlar nedeniyle yok olmakta, bu durum yalnızca ekosistemlerin sürdürülebilirliğini değil, aynı zamanda karbon döngüsünü ve iklim değişikliği ile mücadeleyi de olumsuz etkilemektedir (Yuan, Zhang ve Liu, 2017).

Türkiye gibi Akdeniz iklim kuşağında yer alan ülkelerde yaz aylarında yangın riski oldukça yüksektir. 2021 yılında yaşanan büyük yangınlar, mevcut müdahale yöntemlerinin yetersizliklerini açıkça ortaya koymuştur. Geleneksel yöntemlerde kara ekipleri, helikopterler ve uçaklar kullanılmakta; ancak bu yöntemler hem maliyetli hem de insan hayatı açısından risklidir (Merino vd. 2012). Ayrıca yoğun duman, yüksek sıcaklık ve engebeli araziler, müdahale süreçlerini daha da zorlaştırmaktadır.

Bu noktada insansız hava araçları (İHA'lar) alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Dronlar, yangınların erken tespit edilmesi, ısı haritalarının

çıkarılması, riskli bölgelerin izlenmesi ve ekiplerin koordinasyonu gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Erdelj vd., 2017). Son yıllarda ise tekil dron kullanımının ötesine geçilerek geliştirilen sürü dron sistemleri, çok sayıda dronun koordineli çalışarak geniş alanlarda görev alabilmesine olanak tanımaktadır (Pham vd, 2017). Ayrıca bu drone'lar su, kimyasal maddeler veya yangın söndürme topu gibi çeşitli araçlarla donatılabilir.

2. Yangın Söndürme Dronları

Yangın söndürme dronlarının etkin bir şekilde kullanılabilmesi, gelişmiş teknolojik donanımların entegrasyonunu gerektirmektedir. Bu bağlamda, söz konusu dronların sahip olması gereken temel özelliklerden ilki yüksek irtifa uçuş kabiliyetidir. Yangın alanlarında karşılaşılan yüksek sıcaklık ve yoğun duman koşulları, hava araçlarının operasyonel performansını doğrudan etkilemektedir. Modern yangın söndürme dronları, 2000 metreye kadar irtifada görev icra edebilme kapasitesi ile bu zorlu koşullarda faaliyet gösterebilmektedir. Bir diğer kritik unsur olan termal kameralar, yangının konumunun belirlenmesi ve duman yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerin tespit edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu kameralar, düşük görüş mesafesi ve gece operasyonları gibi elverişsiz koşullarda dahi etkin izleme imkânı sunmaktadır. Ayrıca, gelişmiş GPS ve sensör sistemleri, dronların yangın sahasına yüksek hassasiyetle yönlendirilmesine olanak tanımakta; böylece hedef odaklı ve güvenilir bir müdahale gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Yangın söndürme operasyonlarının uzun süreli doğası göz önünde bulundurulduğunda, uzun pil ömrü de kritik bir gereksinimdir. Bu nedenle yangın dronları, uzun uçuş sürelerini destekleyen özel batarya sistemleriyle donatılmaktadır. Son olarak, yük taşıma kapasitesi, yangın söndürme malzemelerinin (su, kimyasal maddeler, söndürme topları vb.) taşınabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Günümüzde kullanılan birçok yangın söndürme dronu, güçlü motor sistemleri sayesinde 5–10 kilogram arasında yük taşıma kapasitesine sahiptir.



Şekil 1: Yangın Söndürme dronu (https://gwdbi.com/collections/rescue-drone)

3. Yangın Söndürme için Sürü Koordinasyonu Yaklaşımı

Yangın söndürme amacıyla sürü dron koordinasyonu, dronların kolektif hareket kabiliyetlerinden yararlanarak afet yönetiminde etkinliği artırmayı hedefleyen yenilikçi bir yaklaşımdır. Geleneksel yöntemlerde insan gücüne dayalı müdahale, yüksek riskli alanlara erişimde ciddi can güvenliği tehlikeleri barındırmakta ve operasyonel verimliliği sınırlamaktadır. Buna karşılık, sürü dron sistemleri hızlı konuşlanabilme, geniş alanlarda eşzamanlı görev icra edebilme ve tehlikeli bölgelere doğrudan erişebilme avantajlarıyla yangın söndürme operasyonlarında kritik bir alternatif oluşturmaktadır.

Sürü koordinasyonunun temelinde, dronların otonom biçimde bilgi paylaşarak ortak bir hedef doğrultusunda uyumlu hareket etmesi yer almaktadır. Bu süreçte görev paylaşımı, optimizasyon algoritmaları aracılığıyla gerçekleştirilmekte; her bir dronun konumu, hızı, kalan enerji kapasitesi, faydalı yük durumu ve çevresel faktörler (örneğin rüzgâr yönü ve şiddeti) dikkate alınarak dinamik şekilde belirlenmektedir. Böylece, görev dağılımında çakışmalar önlenmekte ve operasyonun toplam etkinliği artırılmaktadır.

Yangın söndürme senaryolarında sürü koordinasyonu, gerçek zamanlı görev dağılımı, tehlike skorlaması ve adaptif rota planlaması gibi yöntemlerle desteklenmektedir. Bu yaklaşımlar sayesinde dronlar, yüksek risk içeren bölgeleri önceliklendirerek müdahale süresini kısaltmakta, kaynak kullanımını

optimize etmekte ve yangının yayılımını erken aşamada kontrol altına alma olanağı sunmaktadır. Dolayısıyla, sürü dron sistemleri, yalnızca operasyonel hız ve güvenlik bakımından değil, aynı zamanda sürdürülebilir ve ölçeklenebilir yangınla mücadele stratejileri açısından da önemli bir potansiyele sahiptir.

Tablo-1 de yangın söndürme amaçlı sürü dron kullanımını simule etmek için belirlenen temel algoritmik yaklaşımlar ve kullanım amaçları verilmiştir. Bu yaklaşımda koordinasyon merkezi, dağıtık veya hibrit yöntemlerle gerçekleştirilebilmekte; Voronoi tabanlı bölgeleme, tehlike skoru hesaplama ve optimizasyon algoritmaları gibi yöntemler de görev paylaşımında kullanılmaktadır. Özellikle yangının yayılım dinamiklerini etkileyen rüzgâr yönü, alev yoğunluğu ve alanın topografik yapısı gibi faktörler dikkate alınarak, dronların gerçek zamanlı olarak karar vermesi sağlanmaktadır. Bununla birlikte, haberleşme kısıtları, batarya ömrü ve değişken çevresel koşullar bu sistemin karşılaştığı temel zorluklar arasında yer almaktadır. Yine de sürü dron koordinasyonu, yangın söndürme operasyonlarında hızlı tepki, ölçeklenebilirlik ve operasyonel verimlilik sağlayarak gelecekte afet yönetimi ve orman yangınlarıyla mücadelede kritik bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 1: Yangın söndürme amaçlı sürü dron kullanımındaki Algoritmik yaklaşımlar

Yöntem	Açıklama
Cellular Automata	Hücrelerin durumuna göre yangın yayılımını göstermek
Monte Carlo / Stokastik	Rastgele yangın yayılımını sağlamak
Greedy Assignment	Dron hedef seçiminde en düşük maliyetli hücreyi seçmek
Voronoi Bölgeleme	Her Dron kendi bölgesindeki yangına anlık müdahale
Collision Avoidance	Dron hareketlerinde çarpışmayı önlemek
Local Patch Cooling	Dron müdahalesi esnasında çevresel ek soğutma
Weighted Assignment	Dronların hedef seçiminde Yangın önceliğine göre ağırlık belirleme

Tabloda belirtilen algoritmik yaklaşımlar kullanılarak Greedy Drone Müdahale Stratejisi (Hammouti vd., 2000) ile Voronoi tabanlı görev dağılımı stratejisi (Sabetghadam ve. 2022) ele alınarak yangına müdahale işlemi iki farklı bakış açısı ile simülasyon yapılabilir.

Greedy Drone Müdahale Stratejisi

1. Başlangıç
2. Yangın ve tehlike hücrelerini listele

3. Her drone için hedef seç:
   a. Su yok → en yakın su istasyonuna git
   b. Su var → en düşük maliyetli hücreyi seç (cost=distance/weight)
4. Hedefe hareket et (çarpışma önleme)
5. Hedefe ulaştığında:
   a. Hücreyi söndür
   b. Çevrede rastgele soğut
6. Güncelle → bir sonraki adım

Greedy Drone Müdahale Stratejisi, dört drondan oluşan sürünün yangınla mücadelede en hızlı şekilde karar vermesini sağlayan basit bir yaklaşım olarak tanımlanabilir. Bu stratejide her drone, bulunduğu konuma göre en yakın ve aynı zamanda en tehlikeli yangın hücresini seçerek doğrudan o noktaya yönelir. Tehlike, alevin yoğunluğu, rüzgârın etkisi ve yangının yayılma ihtimali gibi kriterlere göre belirlenir. Drone'lar her adımda yangının güncel durumunu analiz ederek yeni hedeflerini yeniden seçer ve böylece değişen koşullara hızla uyum sağlar. Strateji, basitliği sayesinde hızlı tepki üretir ve yangının kontrolsüz yayılmasını engellemeye çalışır. Ancak her drone yalnızca anlık en iyi görünen hedefe yöneldiği için bazen küresel olarak en verimli çözümü sağlamayabilir ve koordinasyon eksikliğinde aynı noktaya yönelme riski ortaya çıkabilir. Buna rağmen, Greedy strateji özellikle acil durumlarda yangının kritik alanlara ulaşmasını engellemek için etkili bir yöntemdir

Voronoi tabanlı görev dağılımı stratejisi

Başlangıç

1. Yangın ve tehlike hücrelerini listele
2. Dronlar için Voronoi bölgesi oluştur:
   a. Her drone çevresindeki hücrelerden sorumlu
   b. Bölge sınırlarını belirle (centroid veya konum bazlı)
3. Her drone kendi bölgesindeki hedefi seç:
   a. En tehlikeli hücre → yüksek ağırlık (Score=risk + α max(0,dot(windDir, directionToCell)) burada α rüzgar öncelik katsayısı.
   b. Mesafe / ağırlık ile öncelik belirle (cost=distance/weight)
4. Hedefe hareket et (çarpışma olasılığı azalır)
5. Hedefe ulaştığında:
   a. Hücreyi söndür
   b. Çevresel soğutf
   6. Güncelle → bir sonraki adım

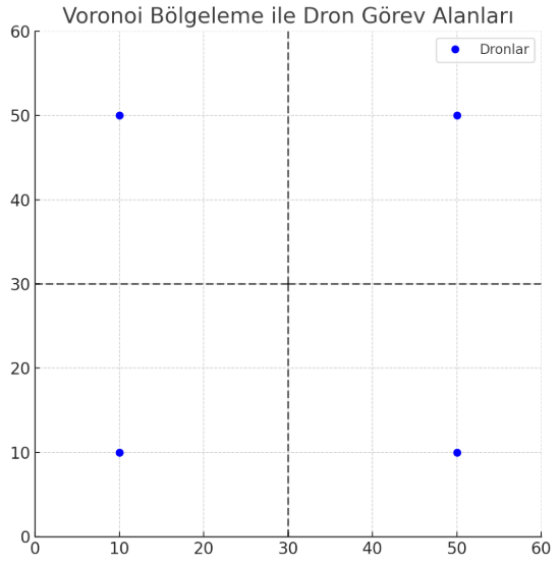
Voronoi tabanlı görev dağılımı stratejisinde, yangın alanını coğrafi bölgelere ayırarak müdahaleyi organize eder. Bu yaklaşımda, yangın bölgesi bir düzlem olarak kabul edilir ve her drone bulunduğu konuma göre alanı kendi "bölgesine" böler. Voronoi diyagramı sayesinde her hücre, en yakın drona atanır. Böylece yangın sahası parçalara ayrılır ve her drone yalnızca kendi bölgesinde çıkan yangınlardan sorumlu olur. Bu yöntem, çakışmaları önler ve sürünün dengeli bir şekilde tüm alanı kapsamasını sağlar.

Her adımda yangının yayılımı güncellenirken, Voronoi bölgeleri de drone'ların hareketine bağlı olarak yeniden hesaplanır. Böylece drone'lar dinamik olarak kendi bölgelerindeki en tehlikeli hücreye yönelir ve müdahale eder. Bu sayede yangının farklı noktalarında aynı anda etkin kontrol sağlanırken, drone'lar arasında görev çakışması yaşanmaz. Stratejinin avantajı, koordinasyonun doğal olarak sağlanması ve alanın bütünsel şekilde kapsanmasıdır. Dezavantajı ise, bazen bir bölgede çok yoğun yangın olurken diğer bölgelerde daha az tehlike bulunabilmesi, bu durumda yük dengesizliği yaşanabilmesidir. Yine de Voronoi tabanlı görev dağılımı, sürü koordinasyonu ve alanın eşit paylaşımı açısından greedy stratejiye göre daha planlı ve dengeli bir müdahale sağlar.

En iyi görünen hedefin seçilip kısa vadeli çözümü sunan Greedy ve her dronun kendi sorumluluk bölgesini yönettiği, uzun vadeli ve dengeli çözümü sunan Voronoi/K-means ile bölge oluşturma stratejilerinin özet karşılaştırması ise Tablo-2 de verilmiştir.

Tablo 2: Greedy ve Voronoi yaklaşımlarının karşılaştırılması

Özellik	**Greedy**	**Voronoi**
Hedef seçimi	En düşük maliyetli hücre	Bölge içinde en uygun hücre
Yük dengesi	Dengesiz	Dengeli
Çarpışma olasılığı	Yüksek (basit önleme)	Daha düşük
Hesaplama basitliği	Çok hızlı	Biraz daha hesaplama gerektirir
Planlama	Anlık karar	Bölge bazlı daha planlı
Drone etkinliği	Bazı dronlar pasif kalabilir	Tüm dronlar aktif



Şekil 2: 4 drondan oluşan bir sürü için Voronoi bölgeleme

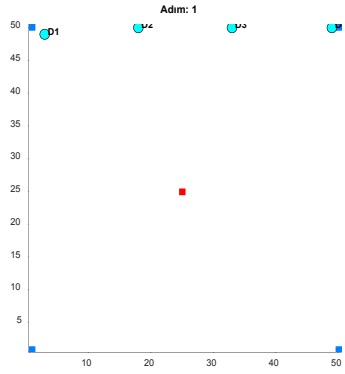
Şekil-2'de 4 drondan oluşan bir sürü için Voronoi bölgeleme uygulanarak her bir dronun belirlenen görev alanları gösterilmektedir. Bu sayede her dron, kendisine en yakın yangın hücrelerine odaklanabilir ve çakışma olmadan koordineli müdahale sağlanabilir.

4. Simülasyon Çalışması

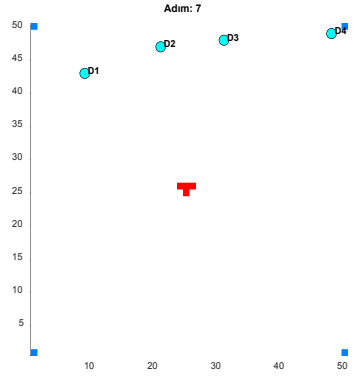
Simülasyonda; yangını temsil eden tüm tehlike noktaları belirli bir skorlama yöntemiyle değerlendirilmekte ve en yüksek skora sahip dört nokta seçilerek dronlara (D1–D4) atanmıştır. Her bir dron, kendisine atanan noktaya yönelmekte ve hedefe ulaştığında yangını söndürme işlemini gerçekleştirmektedir. Bu yöntemle, öncelikli müdahale noktaları rüzgâr yönü dikkate alınarak belirlenmektedir. Dronlar, faydalı yükleri tükenene kadar ya da yangının tamamen kontrol altına alınmasına kadar aktif şekilde hareket etmeyi sürdürmektedir. Faydalı yükün tükenmesi durumunda ise en yakın istasyona yönelerek yeniden ikmal yapmakta ve ardından yangına müdahaleye devam etmektedir. Ayrıca, dronlar sürekli olarak güncellenen tehlike hücrelerine yönlendirildiğinden, yangının tamamının etkili bir şekilde söndürülmesi mümkün hale gelmektedir.

Şekil 1-10'da Yangın söndürme amacıyla sürü dron koordinasyonu simüsyonuna ait görseller verilmiştir. Şekillerde yangının 30. Adımda söndürüldüğü görülmektedir. Yangın her simülasyon başlangıcında alanın orta

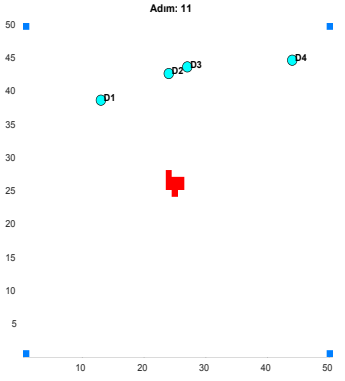
noktasında başlayıp rastgele yayılım göstermektedir. Dronlar D1 ,D2, D3 ve D4 olarak numaralandırılmıştır. Yanan bölgeler kırmızı ile renklendirilmiş ve dronlar tarafından söndürülen ya da soğutulan alanlar ise mavi renkle gösterilmiştir. Yangın yayılımı için rüzgar yönü ve şiddeti katsayı olarak hesaplamalara katılmıştır. Ayrıca dronlar faydalı yükleri (su/söndürme bombası) müdahale sonrasında bitince alanın köşelerine yerleştirilen noktalardan yeniden tedarik edilmesi ve tekrar hesaplama yapılarak yeni müdahale noktasına ulaşması simülasyona eklenmiştir. Algoritmadaki bu durum şekil.10-12'de D2 dronunun sağ üst köşedeki tedarik noktasına yönelmesinden görülmektedir. 100 adım ile sınırlandırılan simülasyon çalışmasında her deneme de farklı adımlarda yangın söndürülebilmiş yada müdahalenin yetersiz kaldığı ve yangının söndürülemediği sonuçlar elde edilmiştir(yüksek hızda yayılım / yüksek değerde rüzgar katsayısı).



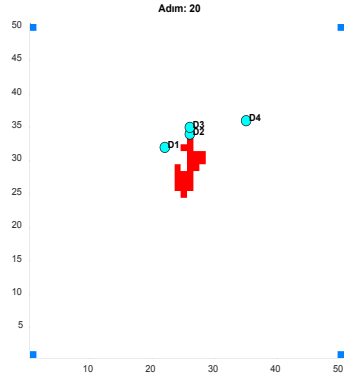
Şekil 3: 1. Adımda yangın ve dronların konumu



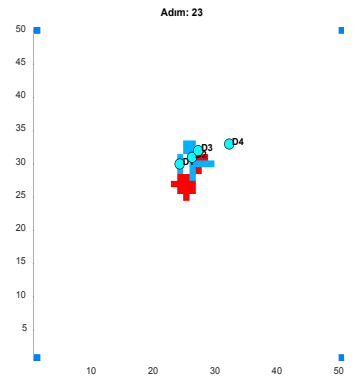
Şekil 4: 7. Adımda yangın ve dronların konumu



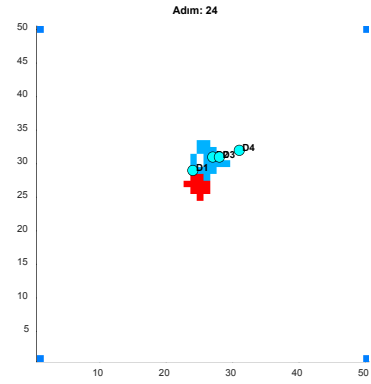
Şekil 5: 11. Adımda yangın ve dronların konumu



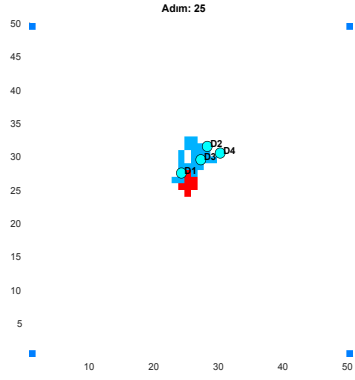
Şekil 6: 20. Adımda yangın ve dronların konumu



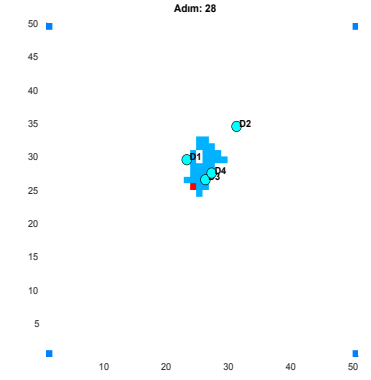
Şekil 7: 23. Adımda yangın ve dronların konumu



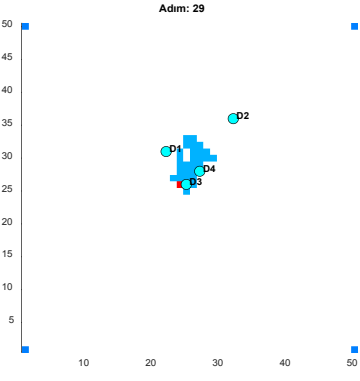
Şekil 8: 24. Adımda yangın ve dronların konumu



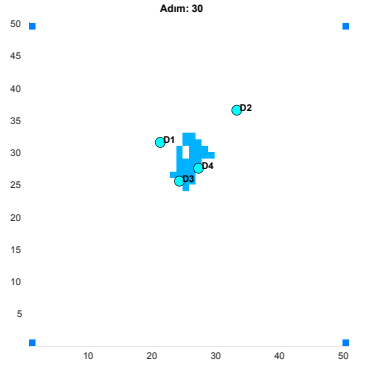
Şekil 9: 25. Adımda yangın ve dronların konumu



Şekil 10: 28. Adımda yangın ve dronların konumu



Şekil 11: 29. Adımda yangın ve dronların konumu



Şekil 12: 30. Adımda yangın ve dronların konumu

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, orman yangınları ile mücadelede yapay zekâ destekli sürü İHA kullanımına yönelik bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Modelde dört adet drone görev almakta ve yangını temsil eden tehlike hücreleri belirli bir skorlama yöntemiyle önceliklendirilerek her bir drone'a atanmıştır. Voronoi tabanlı görev paylaşımı sayesinde sahadaki iş bölümü dengeli biçimde sağlanmış, böylece hem görevlerin çakışması hem de belirli bölgelerin göz ardı edilmesi önlenmiştir. Simülasyon süreci boyunca rüzgâr yönü ve şiddeti yangının yayılım hızına doğrudan etki etmiş, buna bağlı olarak öncelikli müdahale noktaları sürekli güncellenmiş ve drone'ların dinamik bir şekilde yönlendirilmesi mümkün olmuştur. Bu yaklaşım, yangının kontrol altına alınma süresini önemli ölçüde kısaltarak dört drone'un da eş zamanlı ve verimli şekilde çalışmasına olanak tanımıştır.

Sonuçlar göstermiştir ki, faydalı yükün tükenmesi durumunda drone'ların en yakın istasyona yönlendirilerek yeniden ikmal yapabilmesi, sistemin sürekliliği açısından kritik bir avantaj sağlamaktadır. Bu durum, yangın söndürme operasyonlarının kesintisiz bir şekilde yürütülmesine imkân tanımıştır. Ayrıca, her bir drone'un sürekli olarak güncellenen en riskli hücreye yönlendirilmesi, yangının geniş alanlara yayılmasını önleyerek operasyonel etkinliği artırmıştır. Özellikle rüzgâr yönünde bulunan bölgelerin önceliklendirilmesi, yangının en hızlı yayılan bölgelerine zamanında müdahale edilmesini mümkün kılmıştır.

Bu çalışmanın bulguları, yapay zekâ tabanlı görev planlama ve Voronoi bölütleme yaklaşımının, orman yangınlarıyla mücadelede sürü drone kullanımını önemli ölçüde verimli kıldığını ortaya koymaktadır. Ancak, simülasyon ortamında elde edilen bu bulguların gerçek saha koşullarında doğrulanması ve daha karmaşık çevresel değişkenlerle zenginleştirilmesi gerekmektedir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki öneriler sunulabilir:

1. Drone Sayısı ve Çeşitliliğinin Artırılması: Yangının büyüklüğüne ve coğrafi özelliklere bağlı olarak sürüye daha fazla drone eklenmesi, müdahale kapasitesini artıracaktır. Ayrıca farklı görev profillerine sahip (yük taşıyıcı, gözlemci, koordinatör vb.) drone çeşitlerinin kullanılması operasyonel esnekliği güçlendirebilir.

2. Gelişmiş Algılayıcı Sistemler: Termal kameralar, kızılötesi sensörler ve yapay zekâ tabanlı görüntü işleme algoritmalarının entegrasyonu, yangının sınırlarının daha hassas biçimde tespit edilmesini ve müdahale stratejisinin gerçek zamanlı olarak güncellenmesini sağlayacaktır.

3. Çevresel Parametrelerin Ayrıntılı Modellenmesi: Rüzgâr yönü ve şiddeti, nem oranı, sıcaklık değişimleri ve topoğrafya gibi çevresel faktörler simülasyona daha detaylı biçimde entegre edilmelidir. Böylece yangının yayılım dinamikleri daha gerçekçi bir şekilde modellenebilir.

4. Enerji ve Faydalı Yük Yönetimi: Drone'ların menzil, pil ömrü ve taşıma kapasitesi gibi kısıtları göz önünde bulundurularak daha gelişmiş optimizasyon algoritmaları kullanılmalı, bu sayede ikmal sıklığı azaltılarak operasyonel süreklilik artırılmalıdır.

5. İletişim ve Koordinasyon Altyapısı: Drone'ların sürü halinde koordineli çalışabilmesi için düşük gecikmeli, güvenilir haberleşme protokollerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle geniş alanlarda çalışan drone'lar için uydu destekli iletişim sistemleri veya mesh ağ yapıları değerlendirilebilir.

6. Gerçek Zamanlı Karar Destek Sistemleri: Yangın söndürme ekiplerinin karar alma süreçlerini desteklemek amacıyla, simülasyondan elde edilen verilerin gerçek zamanlı olarak analiz edilip görselleştirildiği bir kullanıcı arayüzü geliştirilebilir.

7. Saha Testleri ve Pilot Uygulamalar: Simülasyon ortamında doğrulanan bu yaklaşımın küçük ölçekli saha testleri ile denenmesi, gerçek operasyonel koşullar altındaki performansın ölçülmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, Voronoi tabanlı görev paylaşımına dayalı yapay zekâ destekli sürü İHA yaklaşımı, orman yangınları ile mücadelede hızlı, koordineli ve etkili bir çözüm sunma potansiyeline sahiptir. Bu yöntem, yangının erken aşamada kontrol altına alınmasına yardımcı olmakla kalmayıp, aynı zamanda insan müdahalesinin risklerini azaltarak güvenliği artırmaktadır. Gelecekte, daha gelişmiş çevresel modelleme, yüksek kapasiteli drone teknolojileri ve saha uygulamaları ile bu yaklaşımın gerçek afet senaryolarında uygulanabilirliği önemli ölçüde artacaktır.

Bu çalışma Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. Proje Numarası: FBA-2024-1003

Kaynaklar

El Hammouti, H., Hamza, D., Shihada, B., Alouini, M. S., & Shamma, J. S. (2021). The optimal and the greedy: Drone association and positioning schemes for internet of UAVs. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(18), 14066-14079.

Erdelj, M., Król, M., & Natalizio, E. (2017). Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management. *Computer Networks*, 124, 72–86.

https://gwdbi.com/collections/rescue-drone

Merino, L., Caballero, F., Martínez-de-Dios, J. R., Maza, I., & Ollero, A. (2012). An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement. *Journal of Intelligent & Robotic Systems, 65*(1), 533–548.

Pham, H. X., La, H. M., Feil-Seifer, D., & Nguyen, L. V. (2017). Autonomous UAV swarm coordination for detecting and fighting forest fires. *IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics* (SSRR).

Sabetghadam, B., Cunha, R., & Pascoal, A. (2022). A distributed algorithm for real-time multi-drone collision-free trajectory replanning. *Sensors*, 22(5), 1855.

Yuan, C., Zhang, Y., & Liu, Z. (2017). A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using UAVs and remote sensing. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(6), 697–707.