

Dijital Teknolojiler Ekseninde Orman Yangını Yönetimi

Selman Yıldırım¹

Abdulsamet Tüzer²

Özet

Küresel sıcaklık artışları, uzun süreli kuraklık döngüleri ve yerleşim alanlarının orman ekosistemleriyle giderek daha yoğun biçimde kesişmesi, orman yangınlarını klasik sınırlarının ötesine taşımakta ve bu olguyu giderek daha karmaşık bir afet türüne dönüştürmektedir. Yangın mevsimlerinin belirgin biçimde uzaması ve yangın davranışında gözlenen ani, öngörülmesi güç değişimler, salt söndürme faaliyetlerine dayalı geleneksel yaklaşımın günümüz koşullarında yetersiz kaldığını açık şekilde ortaya koymaktadır. Bu çalışma, orman yangını yönetimini çağdaş bütünsel afet yönetimi çerçevesinde ele alarak, risk belirlemeden zarar azaltmaya, hazırlık ve müdahaleden iyileştirme aşamalarına kadar uzanan süreçlerin, gelişen dijital kapasite sayesinde nasıl yeniden biçimlendiğini analiz etmektedir. Çalışma, dijitalleşme ile yönetim dinamikleri arasındaki etkileşimi açıklayan kavramsal bir çerçeve sunmakta; tehlike, maruziyet ve kırılganlık bileşenlerine dayalı risk değerlendirmelerinin gelişmiş dijital veri altyapıları aracılığıyla nasıl güçlendirildiğini karşılaştırmalı örneklerle tartışmaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemleri, yapay zekâ tabanlı analiz teknikleri, insansız hava araçları ve sensör tabanlı izleme ağları, hem yangın çıkma olasılığının öngörülmesinde hem de aktif yangınların davranışının izlenmesinde kritik roller üstlenmektedir. Bununla birlikte, bu teknolojilerin kurumsal yapılara etkin biçimde entegre edilmesi; veri paylaşım standartlarının geliştirilmesini, kurumlar arası koordinasyonun güçlendirilmesini, nitelikli insan kaynağının artırılmasını ve sürdürülebilir finansman modellerinin oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır. Dijitalleşmenin sunduğu fırsatlara rağmen, yanlış alarm üretimi, veri güvenliği sorunları, altyapı kırılganlıkları ve dijital eşitsizlikler gibi sınırlılıklar sürecin dikkatle yönetilmesini gerekli

1 Öğr.Gör. Dr., Bitlis Eren Üniversitesi , syildirim@beu.edu.tr ORCID ID: 0000-0001-9769-2717

2 Öğr.Gör., Bitlis Eren Üniversitesi, atuzer@beu.edu.tr- ORCID ID: 0000-0002-2894-6290

kılmaktadır. Bu çalışma, bütüncül bir kavramsal analiz çerçevesi üzerinden dijital dönüşümün orman yangını yönetimine sağladığı olanakları ve ortaya çıkan yönetişimsel güçlükleri değerlendirerek, hem ekosistemlerin korunmasına hem de toplumların artan yangın riskine karşı daha dirençli hale getirilmesine yönelik politika önerileri geliştirmektedir.

1. Giriş

İklim değişikliği ve insan kaynaklı çevresel baskılar, orman yangınlarını küresel ölçekte giderek daha ciddi bir afet riskine dönüştürmektedir. Son yıllarda, aşırı yangın olaylarının sayısındaki artış ve yangın mevsimlerinin birçok bölgede haftalarca uzaması, yangın tehlikesinin süreklilik kazandığını açık biçimde göstermektedir. Batı Amerika, Akdeniz Havzası ve benzeri iklim kuşaklarında gözlenen bu değişim, orman yangınlarının artık yalnızca dönemsel bir tehlike değil, yılın büyük kısmında yönetilmesi gereken yapısal bir risk alanı olduğunu ortaya koymaktadır. Orman ekosistemlerine verilen zarar, karbon salımlarındaki artış ve geniş çaplı sosyoekonomik kayıplar, yangınların doğal bir sürecin ötesine geçtiğini ve kalkınma hedeflerini olumsuz yönde etkileyen önemli bir afet niteliği taşıdığını göstermektedir (Prichard vd., 2021).

Birçok ülkede olduğu gibi, Türkiye’de de 2025 yangın sezonunun ortaya koyduğu tablo; yangınlarla mücadele, yeniden inşa süreçleri, altyapı onarımları ve sağlık harcamalarını kapsayan ekonomik yükün milyarlarca lirayı bulduğunu göstermektedir. Bu durum, 2021–2024 yılları arasında Orman Genel Müdürlüğü’nün kayıt altına aldığı eğilimlerle de uyumludur. 2021 yılında Türkiye, tarihsel olarak olağanüstü geniş bir yangın alanıyla karşılaşmış; izleyen 2022, 2023 ve 2024 yıllarında yangın sayılarında dönemsel değişimler görülmüştür. Ancak bu dalgalanmalara rağmen, özellikle Ege ve Akdeniz bölgelerinde, iklim değişikliğinin etkisiyle giderek artan yüksek sıcaklık, düşük bağıl nem ve uzun süreli kuraklık gibi yangın davranışını şiddetlendiren koşulların süreklilik kazandığı anlaşılmaktadır (OGM, 2025). Bu meteorolojik baskı 2025 sezonunda da etkisini sürdürmüş, haftalarca devam eden sıcak hava dalgaları ile birlikte yangın sıklığı ve ilerleme hızında dikkat çekici artışlar yaşanmıştır.

Ekolojik açıdan bakıldığında, OGM’nin 2021–2024 kayıtları, özellikle kızılçam ve makilik ekosistemlerinde yüksek yoğunluklu yangınların ardından doğal yenilenme süreçlerinin zayıfladığına işaret etmektedir. 2025 sezonunda gözlenen yüksek sıcaklık ve tekrarlayan yangınlar, bu eğilimin daha da belirginleşmesine yol açmış; bazı bölgelerde toprak yapısının bozulması, organik madde kaybı ve tohum bankasının zarar görmesi nedeniyle ekosistemlerin kendini yenileme kapasitesi daha da kırılgan

hâle gelmiştir. Bu tablo, Türkiye'nin yangın rejiminde son yıllarda ortaya çıkan yapısal değişimin hem ekonomik hem de ekolojik sürdürülebilirlik açısından giderek daha ağır sonuçlar doğurduğunu göstermektedir (Yörük ve Büyükkelik, 2025).

Riskin büyümesinin ardında, iklimsel, çevresel ve toplumsal dinamiklerin iç içe geçtiği karmaşık bir yapı yer almaktadır. Artan sıcaklıklar, düşen nem oranları ve uzun süreli kuraklık, yangına elverişli koşulların daha sık ortaya çıkmasına neden olurken; arazi kullanımındaki değişimler, orman-yerleşim kesişim alanlarının genişlemesi ve insan kaynaklı tutuşma olayları, yangın tehlikesini ağırlaştırmaktadır. Orman yangınları ile iklim değişikliği arasındaki karşılıklı etkileşim ise bu durumu daha da kritik hâle getirmektedir. Yangınlar, sera gazı salarak küresel ısınmayı hızlandırmakta; artan sıcaklık ve kuraklık ise yeni yangınların oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Çok boyutlu bu döngü, orman yangınlarını teknik, çevresel ve sosyal bileşenleri aynı anda içeren karmaşık bir yönetim alanına dönüştürmektedir (Shu vd., 2022).

Geniş ölçekli yangınların giderek artması, geleneksel afet yönetimi yaklaşımlarının birçok durumda yetersiz kaldığını göstermiştir. Kurumların kapasite sınırlarını aşan bu yangın dalgasıyla baş edebilmek için dijital teknolojilere dayalı yeni bir yaklaşım giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Uydu tabanlı izleme sistemleri, coğrafi bilgi sistemleri (CBS), yapay zekâ destekli tahmin modelleri, insansız hava araçları, sensör tabanlı erken uyarı ağları ve gerçek zamanlı iletişim altyapıları, orman yangınlarının yönetiminde önemli bir dönüşüm yaratmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde yangınların erken tespiti, yangın davranışının modellenmesi, tehlike altındaki bölgelerin belirlenmesi ve müdahale ekiplerinin koordinasyonu çok daha etkin hale gelmiştir. Özellikle uydu gözlemleri, geniş alanlarda yangın hareketlerinin neredeyse anlık olarak izlenmesine olanak sağlayarak reaktif müdahale anlayışından proaktif risk yönetimi yaklaşımına geçişi hızlandırmaktadır (Saxena, 2025).

Dijitalleşmenin sunduğu imkânlar, kurumsal kapasitenin güçlendirilmesi, kaynakların etkin kullanımı, saha koordinasyonunun iyileştirilmesi ve karar süreçlerinin hızlandırılması açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Uzaktan algılama, CBS tabanlı analizler, yapay zekâ uygulamaları, drone teknolojileri ve modern erken uyarı sistemleri, orman yangınlarının önlenmesi, hazırlanması, müdahalesi ve iyileştirme süreçlerinin bütününde yeni bir teknik ve operasyonel çerçeve oluşturmaktadır. Uluslararası uygulamalarda ortaya çıkan deneyimler, dijital dönüşümün yangın yönetiminde risk azaltma kapasitesini belirgin biçimde artırdığını göstermektedir.

2. Dijital Dönüşüm ve Entegre Yangın Yönetimi

Orman yangınlarının yönetimi, çağdaş afet risk yönetimi çerçevesinde risk ve zarar azaltma, hazırlık, müdahale ve iyileştirme aşamalarının bütüncül bir etkileşimi olarak değerlendirilmektedir. Geleneksel uygulamalar, uzun yıllar boyunca müdahale ve yangın sonrası toparlanma süreçlerine odaklanan reaktif bir eğilim sergilemiş; bu nedenle yangınların dinamiklerini belirleyen tehlike, maruziyet ve kırılganlık bileşenleri çoğu zaman yeterince dikkate alınmamıştır. Güncel afet yönetimi yaklaşımları ise risk oluşmadan önce alınacak önleyici tedbirlerin, kurumsal kapasite güçlendirmesinin ve hazırlık planlamasının kritik önemine işaret ederek, yangın etkilerinin ortaya çıkmadan sınırlandırılmasına yönelik proaktif bir yönetim anlayışını gerektirmektedir. Afet Risklerinin Azaltılması Sendai Çerçevesi (2015–2030), bu anlayışı destekleyen küresel bir politika belgesi niteliği taşımakta; teknolojinin ve risk bilgisinin daha etkin kullanımıyla tehlikelerin öngörülmesi, izlenmesi ve önlenmesine yönelik kapasitenin geliştirilmesini teşvik etmektedir (UNDRR), 2015). Bu çerçeve, risk bilgisinin sistematik biçimde üretilmesi ve kullanılmasını; teknolojik imkânların karar alma süreçlerine entegre edilmesini ve afetlere karşı önleyici kapasitenin kurumsal düzeyde geliştirilmesini teşvik etmektedir. Dijital dönüşüm, bu ilkelerin uygulanmasında kritik bir araç haline gelmekte; büyük veri analizleri, coğrafi bilgi sistemleri ve modelleme teknikleri aracılığıyla risk değerlendirmelerini daha hassas hâle getirmekte, erken uyarı sistemlerini güçlendirmekte ve acil durum yönetiminde kurumlar arası koordinasyonu hızlandırmaktadır.

Bu gelişmeler, özellikle iklim değişikliğinin etkisiyle daha sık ve daha yıkıcı hâle gelen orman yangını riskinin yönetiminde belirgin bir önem kazanmaktadır. Dijital kapasitenin artması, yangın olasılığının önceden tahmin edilmesini, yayılım dinamiklerinin daha doğru modellenmesini ve sahadaki müdahale süreçlerinin zaman açısından kritik kararlarla desteklenmesini mümkün kılmakta; böylece Sendai Çerçevesi'nin öngördüğü proaktif risk azaltma yaklaşımı, orman yangınları bağlamında somut bir uygulama alanı bulmaktadır.

Orman yangını riski, kuramsal olarak tehlike, maruziyet ve kırılganlık bileşenlerinin etkileşimi üzerinden tanımlanan çok boyutlu bir olgudur. Gelişen dijital ve analitik teknolojiler, bu bileşenlerin her birinin daha doğru değerlendirilmesine yönelik önemli imkânlar sunmaktadır. Yangın tehlikesinin anlaşılması, özellikle yangın havası tahmin modelleri, yakıt nemi ölçümleri ve bitki örtüsü dinamiklerini izleyen sensör tabanlı sistemler aracılığıyla güçlenmekte; böylece tehlikeye ilişkin belirsizlikler önemli ölçüde azaltılmaktadır. Maruziyetin belirlenmesi, yerleşim alanları, ekonomik

değerler ve kritik altyapıların mekânsal dağılımını gerektiren bir süreç olup, bu aşamada CBStemel bir analitik çerçeve sağlamaktadır. Kırılganlığın azaltılması ise güncel risk bilgilerinin planlama süreçlerine entegre edilmesini, karar vericilerin güvenilir erken uyarılarla desteklenmesini ve toplumun afetlere karşı hazırlık kapasitesinin güçlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Bununla birlikte, teknolojik kapasitenin bu alanlara aktarılabilmesi, uygun yönetim mekanizmaları ve kurumsal düzenlemelerle mümkün olabilmektedir. Kirschner ve çalışma arkadaşları (2023) tarafından sunulan çerçeve, etkin bir yangın yönetişiminin dört temel ilke doğrultusunda şekillenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu ilkeler; karar alma süreçlerine geniş bir aktör yelpazesinin dâhil edilmesi, farklı yönetim ölçekleri arasında iş birliği ve ortak üretim mekanizmalarının oluşturulması, uygulamaların yerel bağlam ve tarihsel kurumsal bağımlılıkları dikkate alan bir perspektifle yürütülmesi ve ortaya çıkan yeni tehlikelere karşı uyarlanabilir bir yaklaşımın benimsenmesi gerekliliklerine işaret etmektedir. Böylelikle, teknolojik yeniliklerin sunduğu olanaklar, yalnızca operasyonel süreçlerde değil, aynı zamanda kurumsal kapasite ve stratejik planlama alanlarında da bütüncül bir dönüşümü mümkün kılmaktadır (Kirschner vd., 2023).

Dijital teknolojiler, afet ve risk yönetişiminin gerektirdiği kurumsal kapasitenin inşa edilmesinde önemli bir potansiyel sunmaktadır. Kurumlar arası bilgi paylaşımını hızlandıran dijital platformlar, gelişmiş risk tahmin modelleri üzerine kurulan erken uyarı sistemleri ve kamuya açık veri tabanları, hem karar alma süreçlerinin şeffaflığını artırmakta hem de risk yönetiminin daha bilimsel temellere oturtulmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojik araçların gerçek anlamda işlevsel olabilmesi, kurumsal düzeyde belirli uyum ve dönüşüm süreçlerinin tamamlanmasını gerekli kılmaktadır. Çok kaynaklı ve karmaşık verilerin işlenebilmesi, gerçek zamanlı koordinasyonu mümkün kılacak teknik ve örgütsel kapasitenin oluşturulması ve bilimsel modellemelerden elde edilen çıktının yönetim süreçlerine etkin biçimde entegre edilebilmesi, söz konusu uyumun temel bileşenlerini oluşturmaktadır.

Bu çerçeve, özellikle artan iklim belirsizlikleri ve büyüyen ekosistem hassasiyetleri karşısında daha karmaşık bir nitelik kazanan orman yangını yönetimi alanında belirgin bir önem taşımaktadır. Bu alanda yaygın olarak kullanılan ve yangın riskinin bütüncül biçimde ele alınmasını amaçlayan Entegre Yangın Yönetimi (Integrated Fire Management – IFM) yaklaşımı, dijital teknolojilerle desteklenen bu yönetim gereksinimlerinin somut bir uygulama alanı olarak değerlendirilmektedir. IFM, tehlike, maruziyet ve kırılganlık bileşenlerini birlikte ele alarak riskin kaynağında azaltılmasını;

hazırlık, müdahale ve iyileştirme süreçlerinin ise karşılıklı etkileşim içinde bütünleştirilmesini amaçlayan bir çerçeve sunmaktadır (Martí Rosell vd., 2024).

Sekil 1. Entegre Yangın Yönetimi-IFM



Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur

European Commission, DG Research and Innovation. (2018). Forest fires: Sparking firesmart policies in the EU. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2777/181450>

Şekil 1’de merkezi konumda yer alan Entegre Yangın Yönetimi, ekosistem temelli tehlike bileşenlerinin yanı sıra insan davranışı, arazi kullanım biçimleri, kurumsal kapasite ve bilimsel yenilik gibi birbirinden farklı sosyo-teknik süreçleri bütüncül bir yönetim çerçevesi içinde bir araya getiren bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Bu yapı, orman yangınlarının oluşumunda yalnızca meteorolojik koşulların veya yakıt yükünün değil; yerleşim dokusu, karar alma süreçlerinin niteliği, teknolojik olanakların düzeyi ve toplumsal risk algısı gibi çok yönlü faktörlerin de belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Risk azaltma aşaması, IFM döngüsünde özellikle biyokütle yönetimi ile kentsel ve kırsal arazi planlaması arasındaki etkileşim üzerinden somutlaşmaktadır. Bu kapsamda yakıt yükünün düşürülmesi, orman-yerleşim arayüzünde tampon bölgelerin oluşturulması ve yapılaşma kurallarının topoğrafik ve iklimsel özellikleri dikkate alacak biçimde düzenlenmesi gibi uygulamalar aracılığıyla yangınların hem ortaya çıkma hem de hızla yayılma olasılığının azaltılması hedeflenmektedir. Böylece risk azaltma, ormancılık

temelli teknik müdahalelerin ötesine geçerek çevresel düzenlemeleri, mekânsal planlama politikalarını ve toplum temelli önleyici stratejileri kapsayan çok boyutlu bir süreç hâline gelmektedir.

Hazırlık aşaması ise insan davranışı, bilgi üretimi ve araştırma, inovasyon odaklarının belirgin biçimde öne çıktığı bir evreyi temsil etmektedir. Toplumun risk farkındalığının artırılması, tahliye davranışlarının geliştirilmesi, gönüllü katılımının teşvik edilmesi ve yangın bilinci oluşturulması hazırlığın sosyal boyutunu oluşturmaktadır. Buna paralel olarak uzaktan algılama sistemleri, yapay zekâ destekli erken uyarı mekanizmaları, sensör tabanlı izleme ağları ve dijital haritalama araçları gibi teknolojiler aracılığıyla meteorolojik anomaliler, duman oluşumları ve ani tutuşma potansiyelleri erken aşamalarda tespit edilebilmektedir. Bu durum, hazırlık aşamasını yalnızca ekipman ve personel yeterliliğine indirgemeyen; bilgi üretimi, davranış bilimleri ve dijital inovasyonla desteklenen bütüncül bir çerçeveye dönüştürmektedir.

Müdahale aşaması, Şekil 1'de acil durum yönetimi bileşeni üzerinden temsil edilmekte olup, yangın anında yürütülen operasyonların başarısı büyük ölçüde koordinasyonun etkinliğine, komuta-kontrol mekanizmalarının açıklığına, kurumlar arası veri paylaşımının sürekliliğine ve sahadaki taktiksel karar süreçlerinin işleyişine bağlı bulunmaktadır. Orman teşkilatları, belediye itfaiyeleri, güvenlik birimleri, yerel yönetimler ve gönüllü yapılar gibi çok sayıda aktörün birlikte hareket edebilme kapasitesi ile standart operasyonel prosedürlerin uygulanabilirliği, müdahale performansının temel belirleyicileri arasında yer almaktadır.

Döngünün son aşaması olan iyileştirme/rehabilitasyon, yangın sonrası ekosistemlerin yeniden dengelenmesi ve uzun vadeli direnç kapasitesinin artırılması açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Bu aşamada ekosistemlerin doğal yenilenme süreçlerinin desteklenmesi, sosyoekonomik kayıpların giderilmesi ve iklim kaynaklı yangın risklerine uyum sağlayabilecek stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Böylece iyileştirme, yalnızca zararların onarılmasına yönelik bir faaliyet olmaktan çıkarak, daha dirençli sosyal ve ekolojik sistemlerin oluşturulmasına yönelik dönüşümsel bir süreç olarak ele alınmaktadır. IFM yaklaşımıyla yüksek düzeyde uyum göstermekte; zira her bir stratejinin zamanlaması, kapsamı ve etkisi büyük ölçüde doğru veri akışına ve zamanında alınan karar süreçlerine bağlıdır. Uydu tabanlı kuraklık indeksleri ve meteorolojik yangın modelleri, önleyici yakma faaliyetlerinin uygun dönemlerinin belirlenmesinde yol gösterici bir araç olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yangın dinamiklerini modelleyen simülasyon yazılımları, müdahale ekiplerinin eğitimi, operasyonel hazırlığın

artırılması ve kaynakların etkili biçimde dağıtılması açısından güçlü karar destek mekanizmaları sağlamaktadır.

Dijital dönüşümün orman yangını yönetimine entegrasyonu, doğru bilginin zamanında erişilebilir olmasının ve kurumlar arası bağlantısallığın güçlendirilmesinin risk yönetişimini önemli ölçüde iyileştireceği varsayımına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, IFM çerçevesinde yangınların yalnızca bastırılması gereken bir tehdit değil, aynı zamanda ekolojik süreçlerin bir parçası olarak yönetilmesi gereken dinamik bir olgu olduğunu vurgulamaktadır. Teknolojinin yönetsel süreçlere entegre edildiği bu yapı, veriye dayalı, öngörü kapasitesi yüksek ve dinamik ağlar üzerinden işleyen akıllı yangın yönetim sistemlerinin gelişimini desteklemekte; ancak bu dönüşümün sürdürülebilirliği yalnızca teknik altyapıya değil, aynı zamanda insan kaynağının yetkinliğine, operasyonel protokollerin güncellenmesine ve kurumlar arası koordinasyonun kurumsal düzeyde güçlendirilmesine bağlı bulunmaktadır.

2.1. Orman Yangını Yönetiminde Teknolojik Bileşenler

Orman yangını yönetimi, günümüzde giderek dijitalleşen ve veri odaklı hale gelen çok boyutlu bir sistem olarak yeniden tanımlanmaktadır. Yangınların sıklığı ve şiddetindeki artış, yalnızca doğal süreçlerin değil, insan faaliyetlerinin ve iklimsel değişkenliğin de etkisiyle şekillenmektedir. Bu karmaşık dinamikler, yangın yönetiminin artık yalnızca müdahale odaklı değil, teknolojik bileşenlerle desteklenen bütüncül bir risk yönetişimi modeli olarak ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Bu dönüşümün merkezinde yer alan teknolojik bileşenler; uzaktan algılama yöntemleri, coğrafi bilgi sistemleri, yapay zekâ (YZ), insansız hava araçları (İHA), sensör ağları, nesnelerin interneti (IoT) ve erken uyarı sistemleri olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, yangın riskinin tahmin edilmesi, erken tespitini sağlanması, müdahale kapasitesinin artırılması ve kaynakların daha etkin yönetilmesi açısından kritik işlevler üstlenmektedir. Literatürde, bu teknolojilerin entegrasyonu sayesinde yangın yönetiminin reaktif bir yapıdan proaktif ve öngörü temelli bir modele dönüştüğü vurgulanmaktadır (Saxena, 2025). YZ ve makine öğrenimi tabanlı modeller, uydu verileri ve sensör ağlarından elde edilen büyük veri setlerini analiz ederek, yangınların olası konumlarını, ilerleme yönünü ve davranış dinamiklerini öngörebilmektedir (Stanley vd., 2024) Bu analizler, karar vericilere risk haritalarının güncel tutulması, kaynak tahsisinin optimize edilmesi ve müdahale planlarının gerçek zamanlı olarak uyarlanması imkânı tanımaktadır. CBS tabanlı sistemler, bu verilerin mekânsal olarak yorumlanmasını sağlayarak yüksek riskli bölgelerin tespitinde ve arazi yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır.

İHA'lar ve uzaktan algılama teknolojileri, geniş alanlarda gerçek zamanlı görüntüleme, termal izleme ve yangın yayılımının dinamik takibini mümkün kılmakta; bu sayede klasik gözlem yöntemlerine göre hem hız hem doğruluk açısından üstünlük sağlamaktadır (Akhloufi vd., 2020). Aynı zamanda, İHA-IoT entegrasyonu ile oluşturulan otonom ağ sistemleri, sensörlerden toplanan sıcaklık, nem ve rüzgâr verilerini eş zamanlı olarak analiz ederek erken uyarı sürelerini azaltmakta ve karar destek sistemlerinin doğruluğunu artırmaktadır (Bushnaq vd., 2020).

Teknolojik bileşenlerin bütünleşik biçimde kullanımı, orman yangını yönetiminin tüm aşamalarında bilgi akışını güçlendirerek kurumlar arasında etkili bir koordinasyon ortamı yaratmaktadır. Uzaktan algılama ve CBS temelli sistemler, planlama sürecinde karar vericilere daha doğru ve güncel veriler sunarken; yapay zekâ uygulamaları ile sensör ağları, operasyonel düzeyde anlık analiz ve hızlı müdahale olanağı sağlamaktadır. Bu sayede yangınlara verilen tepkiler daha kısa sürede gerçekleşmekte, kaynaklar daha verimli kullanılmakta ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu bir yönetim anlayışı geliştirilmektedir. Günümüzde orman yangını yönetimi, teknolojiyi tamamlayıcı bir araçtan çok, karar alma süreçlerinin temel bileşeni olarak konumlandırmaktadır. Dijital dönüşüm, veri temelli düşünme biçimini güçlendirirken, insan ve teknoloji etkileşimini merkeze alan öngörülülük ve uyarlanabilir bir yönetim modelinin oluşmasına katkı sağlamaktadır. CBS, uzaktan algılama, yapay zekâ, insansız hava araçları, IoT sistemleri ve erken uyarı altyapıları gibi teknolojik unsurlar, çağdaş orman yangını yönetiminin yenilikçi çerçevesini oluşturan temel yapı taşları haline gelmiştir.

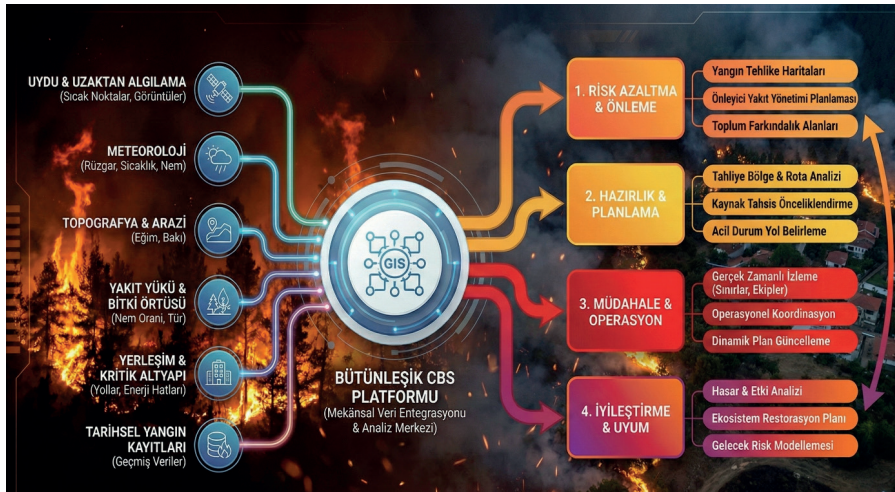
2.1.1. Uzaktan Algılama ve CBS Temelli İzleme ve Haritalama Sistemleri

CBS, orman yangını yönetiminde farklı veri türlerini tek bir mekânsal çatı altında bütünleştirme ve bu verilerden anlamlı haritalar üretme kapasitesiyle vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Uydu görüntüleri, topografya, yakıt yükü, meteorolojik koşullar, yerleşim alanları ve kritik altyapı verileri, CBS ortamında bir araya getirilerek yangın riskinin ve olası etkilerinin çok boyutlu biçimde analiz edilmesine olanak tanımaktadır (Valero vd., 2018). CBS tabanlı sistemler, yangının ilerleyişinin izlenmesi, tahliye bölgelerinin belirlenmesi, müdahale ekiplerinin yönlendirilmesi ve kaynak tahsisinin planlanması gibi kritik süreçlerde aktif olarak kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı karar destek sistemleri, yangın sınırlarını, sıcak noktaları ve sahadaki müdahale birimlerinin konumlarını eş zamanlı olarak göstererek operasyonel koordinasyonu güçlendirmektedir (Seydi, 2025). Bu sayede, müdahale planlarının dinamik biçimde güncellenmesi ve kaynakların

öncelikli alanlara yönlendirilmesi mümkün olmaktadır. CBS, yalnızca yangın sırasında değil, yangın öncesi hazırlık ve planlama aşamalarında da önemli bir işlev görmektedir. Tarihsel yangın kayıtları, bitki örtüsü nemi, topoğrafik değişkenler ve insan etkisine ilişkin göstergeler bir araya getirilerek yangın tehlike haritaları oluşturulmakta; bu haritalar, önleyici yakıt yönetimi projelerinin ve toplum temelli farkındalık çalışmalarının hangi bölgelere odaklanması gerektiğini belirlemektedir (Djabri vd., 2024).

Çinde’de yürütülen bir çalışmada, uzaktan algılama indeksleri ile CBS analizlerinin birleştirilmesiyle iki farklı peyzajda yangın riski modellenmiş ve önleyici müdahalelerin önceliklendirilmesi konusunda somut bulgular elde edilmiştir (Yuan, 2025). Uydu verileri, CBS’nin en temel girdilerinden biri olarak yangın tespit noktalarının coğrafi olarak haritalanmasını sağlamaktadır. Bu haritalar aracılığıyla karar vericiler, tehdit altındaki değerleri yerleşim alanları, ulaşım ağları ve enerji hatları gibi alanları anında görüntüleyebilmekte ve öncelikli koruma bölgelerini belirleyebilmektedir (Szapkowski ve Jensen, 2019). Bu yaklaşım, yalnızca tehlikenin izlenmesini değil, aynı zamanda müdahale sırasında can ve mal kaybının en aza indirilmesini de sağlamaktadır.

Şekil 2. Entegre Yangın Yönetiminde Bütünleşik Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Tabanlı Karar Destek Modeli



Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur

Şekil 2’de görüldüğü üzere, CBS tabanlı bütünleşik platform, afet risk yönetimi yaklaşımı doğrultusunda, uydu görüntüleri, meteorolojik veriler, topografya, bitki örtüsü, yerleşim alanları ve tarihsel yangın kayıtları

gibi çok kaynaklı mekânsal verileri entegre ederek IFM sürecinin tüm aşamalarını desteklemektedir. Bu sistem aracılığıyla, riskin azaltılması ve önlenmesi aşamasında bilimsel temelli tehlike haritaları ve yakıt yönetim stratejileri geliştirilebilmekte; hazırlık ve planlama süreçlerinde ise tahliye yolları, kaynak öncelikleri ve müdahale senaryoları oluşturulabilmektedir. Müdahale aşamasında gerçek zamanlı izleme, kurumsal koordinasyon ve dinamik plan güncellemeleri sağlanırken; iyileştirme ve uyum süreçlerinde hasar analizi, ekosistem restorasyonu ve geleceğe dönük risk modellemeleri yapılabilmektedir. Böylece CBS altyapısı, çok aktörlü karar alma süreçlerini güçlendiren, bilgiye dayalı ve uyarlanabilir bir yönetim aracı olarak afet riskinin azaltılması ve toplumsal-ekolojik sistemlerin dayanıklılığının artırılmasına katkı sunmaktadır. CBS tabanlı modelleme çalışmaları, yangın yayılım olasılığını meteorolojik değişkenler (rüzgâr, sıcaklık, nem) ve yakıt koşullarıyla ilişkilendirerek risk altındaki yerleşim birimlerini önceden belirleyebilmektedir (Xu vd., 2016).

Böylece, tahliye planlarının hazırlanması, acil durum yollarının belirlenmesi ve kaynak tahsisinin önceliklendirilmesi bilimsel temele dayalı biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Uzaktan algılama, geniş alanlarda yangınların tespiti ve izlenmesine olanak tanırken; CBS bu bilgileri anlamlı bir mekânsal çerçeveye yerleştirerek karar vericilere analitik bir zemin sunmaktadır (UNEP, 2022). Bu bütünlüğün, yangının farklı evrelerinde ortaya çıkan karar süreçlerinin hızını ve doğruluğunu artırdığı kabul edilmektedir. CBS temelli yangın yönetimi sistemlerinin kullanılmasıyla, orman yangınlarının yalnızca fiziksel bir olay olarak değil, aynı zamanda sosyo-ekolojik etkileri mekânsal düzlemde yayılan bir afet süreci olarak değerlendirilmesi mümkün hâle gelmektedir. Bu çerçevede sağlanan mekânsal bütünlüklü veri yapısı, afet yönetiminin planlama, hazırlık, müdahale ve iyileştirme aşamalarında ihtiyaç duyulan bilgi temelli karar destek mekanizmalarının daha etkin çalışmasına katkıda bulunmaktadır. Böylelikle orman ekosistemlerinin korunmasına, toplumsal dayanıklılığın güçlendirilmesine, kritik altyapı ve yerleşim alanlarının risklere karşı daha iyi korunmasına ve afet sonrası iyileştirme çalışmalarının daha uygulanabilir bir zemine oturtulmasına olanak sağlandığı görülmektedir. Bu yaklaşımın, sürdürülebilir afet yönetimi anlayışının kurumsal düzeyde yerleşmesine önemli ölçüde katkı sunduğu değerlendirilmektedir.

2.1.2. Yapay Zekâ ve Veri Analitiği

Orman yangınlarıyla ilişkili büyük ve karmaşık veri setlerinin analizinde yapay zekâ (YZ) giderek daha önemli bir araç haline gelmiştir. Özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme gibi YZ teknikleri, yangınların önceden

tahmin edilmesi, erken tespiti, yayılım dinamiklerinin anlaşılması ve karar süreçlerinin desteklenmesi amacıyla geniş biçimde kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, insan gözlemiyle ya da geleneksel modellerle yakalanması güç olan örüntüleri ortaya çıkararak, yangın yönetiminde daha hızlı ve doğru kararlar alınmasına olanak sağlamaktadır. Makine öğrenmesi modelleri, geçmiş yangın kayıtları, hava durumu verileri, topoğrafik koşullar ve bitki örtüsü bilgilerini analiz ederek yangın olasılığını ya da yüksek riskli dönemleri tahmin etmekte kullanılmaktadır. Örneğin, bazı modeller rüzgâr, sıcaklık, nem, eğim ve yerleşim alanlarına uzaklık gibi değişkenleri bir araya getirerek, hangi bölgelerde tutuşma ihtimalinin daha yüksek olduğunu öngörebilmektedir (Iban ve Aksu, 2024). Bu sayede, risk altındaki alanların önceden belirlenmesi ve önleyici müdahalelerin daha etkin planlanması mümkün olmaktadır. Derin öğrenme uygulamaları ise özellikle görüntü tabanlı yangın tespitinde öne çıkmaktadır. Uydu görüntülerinden ya da insansız hava araçlarından elde edilen görseller, YZ modelleri tarafından analiz edilerek duman, ısı ya da yanma noktaları kısa sürede algılanabilmektedir (Wei vd., 2022).

Bu tür sistemler, insan hatasını azaltmakta ve özellikle geniş ya da erişimi zor bölgelerde erken uyarı kapasitesini artırmaktadır. Bazı çalışmalarda, bu modellerin geleneksel yöntemlere kıyasla hem daha hızlı hem de daha doğru tespitler yaptığı görülmüştür (Ghali vd., 2022). YZ'nin bir diğer kullanım alanı ise yangının davranışını ve yayılımını modellemektir. Bu tür modeller, hava durumu, yakıt türü, rüzgâr yönü ve topografya gibi faktörleri bir araya getirerek yangının ne yöne ve hangi hızla ilerleyebileceğini tahmin etmektedir (Radke vd., 2019). Böylece, yangınla mücadelede ekiplerin konuşlanması, tahliye kararları ve kaynak dağıtımı daha veriye dayalı biçimde yapılabilmektedir. Günümüzde bu modellerin, geleneksel fiziksel simülasyonlardan çok daha hızlı sonuç üretebildiği ve sahadaki değişimlere kısa sürede uyum sağlayabildiği görülmektedir (Shadrin vd., 2024).

Şekil 3. Yapay Zekâ Tabanlı Yangın Yönetimi



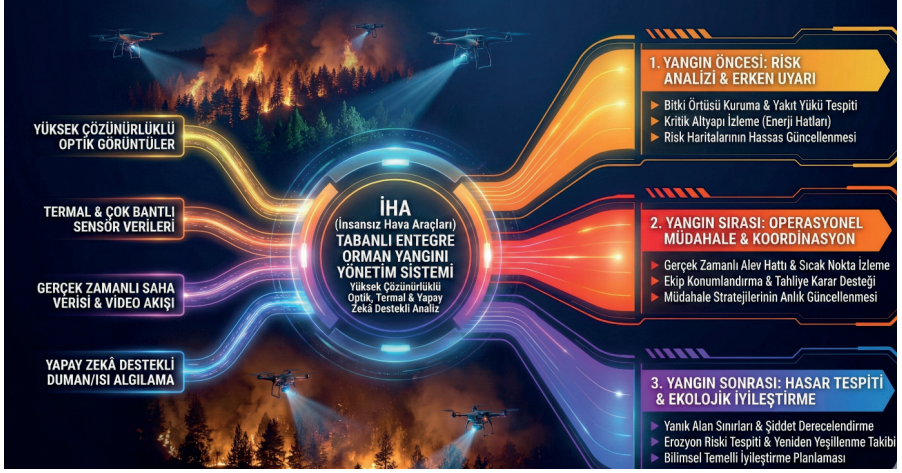
Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur

Son yıllarda geliştirilen yeni yaklaşımlar, yapay zekânın yalnızca tahmin değil, aynı zamanda öğrenme ve uyum sağlama kapasitesine de odaklanmaktadır. Bu sistemler, sürekli olarak yeni uydu veya sensör verilerini analiz etmekte ve anormal değişiklikleri tespit ederek karar vericilere erken uyarılar gönderebilmektedir (Shadrin vd., 2024). Böylece, yangın riski hızla artan bölgelere yönelik önleyici adımların zamanında planlanması ve uygulanması mümkün hâle gelmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, yapay zekânın orman yangını yönetiminde yalnızca destekleyici bir unsur olmaktan çıkarak, giderek karar alma mekanizmalarının merkezine yerleştiğini ortaya koymaktadır. Özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı modeller, büyük hacimli çevresel veriyi işleme, tutuşma olasılıklarını yüksek doğrulukla tahmin etme ve yangının olası yayılımını saatler hatta günler öncesinden öngörme kapasitesi sayesinde geleneksel risk analiz yöntemlerinin ötesine geçmektedir. Bu modeller, meteorolojik parametreler, yakıt yükü, topoğrafya, geçmiş yangın izleri ve uydu görüntüleri gibi birbirinden farklı veri kaynaklarını bütünleştirerek dinamik bir risk değerlendirmesi sunmakta; böylece hem operasyonel birimlerin müdahale hazırlığını güçlendirmekte hem de uzun vadeli yangın yönetim stratejilerinin daha bilimsel temellere oturmasını sağlamaktadır. Yapay zekâ destekli bu yaklaşımlar, karar vericilere yalnızca erken uyarı sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda kaynak tahsisi, personel planlaması ve önleyici tedbirlerin konumlandırılması gibi kritik süreçlerde daha etkili ve kanıta dayalı seçenekler sunmaktadır. Bu nedenle, iklim değişikliğiyle birlikte yangın dinamiklerinin karmaşıklaştığı günümüzde yapay zekâ, orman yangını yönetiminde zorunlu bir bileşen hâline gelmiş; hem risk azaltma politikalarının hem de sahadaki operasyonel etkinliğin ayrılmaz bir unsuru olmuştur.

2.1.3. İnsansız Hava Araçları (İHA)

İHA'lar, günümüzde orman yangını yönetiminin hem stratejik planlama hem de operasyonel karar alma boyutlarında merkezi bir araç hâline gelmiştir. Yüksek çözünürlüklü optik, termal ve çok bantlı görüntüleme sistemleriyle donatılan bu platformlar, geleneksel uydu izleme ve pilotlu hava araçlarıyla yürütülen gözlem süreçlerinin önemli bir tamamlayıcısı olarak değerlendirilmektedir. Özellikle geniş alanların kısa sürede taranabilmesi, erişimi güç bölgelerden gerçek zamanlı veri sağlanabilmesi ve sahadaki değişimlerin anlık olarak takip edilebilmesi, İHA'ların afet risk yönetiminde sunduğu yenilikçi katkıların başında gelmektedir. Yangın öncesi aşamada, bitki örtüsündeki kuruma eğilimlerinin, yakıt yükünün ve potansiyel tutuşma kaynaklarının tespitinde İHA tabanlı gözlemler kritik rol oynamakta; bu sayede risk haritaları daha hassas biçimde güncellenebilmekte ve önleyici müdahaleler daha doğru hedeflere yönlenebilmektedir. Yangın sırasında ise termal kameralar aracılığıyla alev hatlarının ilerleme yönü, sıcaklık dağılımları ve yangının mikro ölçekli davranışı gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte; bu bilgiler sahadaki ekiplerin konumlandırılması, tahliye kararları ve müdahale stratejilerinin belirlenmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Yangın sonrasında ise ekosistemdeki tahribatın derecesinin belirlenmesi, yeniden yeşillenme süreçlerinin takibi ve toprak-bozunma dinamiklerinin değerlendirilmesi gibi ekolojik izleme çalışmaları İHA teknolojileriyle daha sistematik ve detaylı biçimde yürütülebilmektedir (Bushnaq vd., 2020). Yangın öncesi dönemde çok bantlı ve termal kameralarla donatılmış dronelar, bitki örtüsündeki kuruma eğilimlerini, yakıt yükündeki artışları ve arazi kullanımındaki uygunsuz değişimleri ayrıntılı biçimde belirleme imkânı sunmaktadır.

Şekil 4: İHA Tabanlı Entegre Orman Yangını Yönetim Sistemi



Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur

Bu erken gözlemler, yangına hassas bölgelerin henüz tutuşma meydana gelmeden bilimsel temelde saptanmasını sağlayarak risk azaltma çalışmalarının daha sistemli ve doğru hedeflere yönlendirilmesine katkı vermektedir. Bunun yanında enerji nakil hatları, trafo merkezleri ve ulaşılması güç ormanlık alanlar gibi kritik altyapı noktalarının dronelar aracılığıyla düzenli biçimde izlenmesi, potansiyel tutuşma kaynaklarının çok daha erken aşamada tespit edilmesini mümkün kılmaktadır. Böylece hem altyapı güvenliği güçlenmekte hem de orman yangınlarına yönelik hazırlık ve önleme süreçleri daha bütüncül ve etkin bir çerçevede yürütülebilmektedir (Sousa ve Gamboa, 2020).

Yangın sırasında İHA'ların sağladığı gerçek zamanlı görüntü aktarımı, müdahale yönetiminin en kritik unsurlarından biri hâline gelmiştir. Termal ve optik kameralar aracılığıyla alevlerin ilerleme yönü, dumanın hareket biçimi ve sıcak noktaların dağılımı anlık olarak izlenebilmekte; bu bilgiler operasyon merkezleri ile sahadaki ekipler arasında hızlı bir karar döngüsü oluşturmayı mümkün kılmaktadır. Böylece hem ekiplerin güvenli hareket alanları daha doğru belirlenmekte hem de yangın söndürme stratejileri sahadaki duruma uygun biçimde sürekli güncellenebilmektedir. Uluslararası araştırmalar, bu teknolojik desteğin somut etkilerini ortaya koymaktadır. Yeni Zelanda'da yürütülen bir çalışma, termal sensörlerle donatılmış İHA'ların sıcak noktaları tespit etme süresini belirgin biçimde kısalttığını, aynı zamanda hava araçlarının ve yer ekiplerinin daha verimli yönlendirilmesine katkı sağladığını göstermiştir (Christensen vd., 2021).

Yangın sonrasında ise yüksek çözünürlüklü çok bantlı görüntüler, yanık alanların sınırlarının belirlenmesi, hayatta kalan ağaçların tespiti ve ekolojik toparlanma sürecinin izlenmesi için kullanılmaktadır. Bu tür çalışmalar, yer temelli gözlemlere kıyasla çok daha geniş alanlarda hızlı ve maliyet etkin veri elde edilmesini sağlamaktadır. Son dönemde geliştirilen yapay zekâ destekli İHA sistemleri, yangın tespitinde hız ve doğruluk açısından önemli ilerlemeler sağlamıştır. Geliştirilen modeller, termal ve optik görüntüleri birleştirerek duman ve ısı kaynaklarını eşzamanlı olarak algılayabilmekte; bu da özellikle ormanlık ve yoğun dumanlı ortamlarda tespit başarısını artırmaktadır (Chen vd., 2022).

Yangın sonrası dönemde İHA'ların kullanımı, hem hasar tespitinin hızlandırılması hem de ekolojik iyileşme süreçlerinin bilimsel temelde planlanması açısından önemli bir araç hâline gelmiştir. Yüksek çözünürlüklü görüntülerle yanmış alanların ayrıntılı haritaları kısa sürede üretilebilmekte; çok bantlı verilerden elde edilen bitki örtüsü indeksleri aracılığıyla yangının şiddeti ve ekosisteme verdiği zarar derecelendirilebilmektedir. Bu tür analizler, özellikle geniş yangın sahalarında yer temelli incelemelerle elde edilmesi zor olan bilgilerin daha bütüncül ve güvenilir biçimde toplanmasına imkân tanımaktadır. İHA verileri aynı zamanda yangın sonrası arazi yönetiminin kritik aşamalarını desteklemektedir. Erozyon riski taşıyan bölgelerin erken tespiti, önleyici tedbirlerin zamanında uygulanmasını kolaylaştırmakta; yeniden ağaçlandırma ve arazi iyileştirme çalışmalarının mekânsal önceliklerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bazı acil müdahale ekiplerinin, yangının tamamen sönmüş olmadığını doğrulamak amacıyla dronelar üzerinden termal ölçümler yapması, bu teknolojinin sahadaki güvenlik ve izleme kapasitesini daha da güçlendirmektedir (Pádua vd., 2019).

Bu bütünlük kullanım, yangın sonrası ekosistem yönetiminin daha planlı, hızlı ve kanıta dayalı bir şekilde yürütülmesine katkı sağlamaktadır. İHA teknolojileri, günümüzde orman yangını yönetiminde yalnızca gözlem ve veri toplama amacıyla kullanılan araçlar olmanın ötesine geçerek, erken uyarı mekanizmalarının, operasyonel koordinasyonun ve yangın sonrası ekolojik değerlendirmenin bütünlük bir parçası hâline gelmiştir. Gelişmiş görüntüleme sistemleri ve sensör altyapılarının sağladığı yüksek doğruluklu bilgiler sayesinde dronelar, hem riskli bölgelerin önceden belirlenmesinde hem de müdahale sırasında karar süreçlerinin yönlendirilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Bu bütüncül işlev, İHA'ların artık orman yangınlarına ilişkin önleme, müdahale ve iyileştirme stratejilerinin ayrılmaz bir bileşeni olarak görülmesini sağlamaktadır. Sahadaki değişimlerin anlık olarak izlenmesi, müdahale ekiplerinin güvenli bir şekilde yönlendirilmesi ve yangın

sonrası ekosistem dinamiklerinin değerlendirilebilmesi gibi temel süreçlerde sundukları katkı, bu teknolojiyi modern yangın yönetiminin vazgeçilmez unsurlarından biri hâline getirmiştir.

2.1.4. Erken Uyarı Sistemleri ve Sensör Ağları

İklim değişikliğinin etkisiyle artan sıcaklıklar, uzayan kurak dönemler ve atmosferik dengesizlikler, orman yangınlarının hem görülme sıklığını hem de yıkıcılığını belirgin biçimde artırmış; bu durum erken uyarı sistemleri ve sensör ağlarının afet yönetimindeki stratejik önemini daha görünür hâle getirmiştir. Birleşmiş Milletler'in güncel değerlendirmelerinde, yangın yönetimi yatırımlarının yalnızca müdahale kapasitesine odaklanmasının yeterli olmadığı, hazırlık ve önleme aşamalarının güçlendirilmesi gerektiği özellikle vurgulanmaktadır (UNEP, 2022). Bu çerçevede dijital teknolojilere dayalı erken uyarı mekanizmaları, risk bilgisinin üretilmesi, uyarıların zamanında ve anlaşılır biçimde iletilmesi ve toplumun bu bilgilere uygun şekilde harekete geçebilmesi açısından temel bir bileşen olarak değerlendirilmektedir. Sensör tabanlı izleme altyapıları, uydu görüntüleme sistemleri, kamera ağları ve konum tabanlı bildirim kanalları birlikte ele alındığında, yangının yalnızca tespit edilmesini değil, aynı zamanda risk azaltma, hazırlık ve tahliye süreçlerinin desteklenmesini mümkün kılan çok katmanlı bir erken uyarı ekosisteminin şekillendiği görülmektedir.

2.1.4.1. Otomatik Kamera Ağları

Birçok yangına hassas bölgede yüksek noktalara yerleştirilen kamera sistemleri, duman ve alev hareketlerini kesintisiz izleyerek erken tespit kapasitesini belirgin biçimde artırmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bu tür ağlar, yüzlerce kameradan oluşan 360° kapsamlı bir izleme altyapısıyla 7/24 görüntü aktarımı sağlayarak, yangınların henüz başlangıç evresinde fark edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca sabit bir gözlem sağlamaktan öte, itfaiye birimleri ile acil durum yönetim merkezlerinin aynı anda aynı görüntüleri izlemesine ve olayın dinamiklerini anlık olarak değerlendirmesine imkân tanımaktadır. Böylece yangının ilk dakikalarında doğru konumlandırılmış müdahale ekiplerinin sahaya yönlendirilmesi mümkün olmakta, tepki süresindeki birkaç dakikalık kazanım dahi yangının büyümesini engelleyen kritik bir eşik hâline gelmektedir. Son yıllarda bu kamera ağlarının etkinliği, görüntü analizi temelli yapay zekâ algoritmalarının entegrasyonu ile daha da yükselmiştir. Özellikle derin öğrenmeye dayalı nesne tespit modelleri, dumanın renk, yoğunluk, hareket ve şekil özelliklerini saniyeler içinde tarayarak, insan gözü tarafından fark edilmesi güç olan erken duman işaretlerini otomatik olarak tanımlayabilmektedir. Literatürde yer

alan güncel uygulamalarda, yüksek çözünürlüklü panoramik kameralardan elde edilen görüntülerin her 60 saniyede bir yapay zekâ modeli tarafından analiz edildiği; bu modelin duman örüntülerini tespit eder etmez ilgili itfaiye birimine otomatik uyarı iletmediği gösterilmiştir (Remmelzwaal, 2023).

Bu sistemlerde kullanılan nesne tespit modellerinin, geniş bir görüntü veri seti üzerinde eğitildikten sonra yüksek doğruluk oranına ulaşması, yapay zekânın erken tespit kapasitesini ne ölçüde güçlendirdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca bu tür yapay zekâ destekli sistemler, yalnızca dumanı tespit etmekle kalmayıp ardışık görüntülerdeki hareketlilik analizleri sayesinde dumanın yönünü, yayılım hızını ve olası büyüme eğilimini de belirleyebilmektedir. Bazı uygulamalarda, modelin rüzgâr yönü verisiyle entegrasyonu sayesinde yangının muhtemel ilerleyiş hattını tahmin etmesi, karar vericilerin kaynak planlamasını daha etkin biçimde yapmasını sağlamaktadır (Al-Smadi vd., 2023).

Bu bütünleşik yapı sayesinde kamera sistemleri, pasif gözlem araçlarından çıkıp sahadaki operasyonel kararları doğrudan destekleyen birer bilgi üretim platformuna dönüşmektedir. Açık erişimli bazı sistemlerde, kamera görüntülerinin kamuya sunulan web panelleri üzerinden paylaşılması, hem toplumun farkındalığını artırmakta hem de yerel toplulukları yangın riskinin izlenmesine doğrudan dâhil etmektedir. Acil durum yönetim merkezleri için geliştirilen özel panellerde ise, yangının tespit anına ilişkin yüksek çözünürlüklü görüntüler, harita tabanlı konum verileri ve meteorolojik göstergeler aynı ekran üzerinde bir araya getirilmektedir. Bu sayede komuta merkezleri hem durumsal farkındalığı yükseltmekte hem de havadan ve karadan müdahale ekiplerini daha isabetli yönlendirebilmektedir. Tüm bu gelişmeler, sabit kamera ağlarının ve yapay zekâ temelli görüntü analizinin modern yangın yönetiminde giderek daha stratejik bir konuma yerleştiğini göstermektedir. Erken tespitle birlikte olayın ilk dakikalarında kazanılan zaman, yangının kontrol dışına çıkma riskini önemli ölçüde azaltmakta; insan kaybı, ekonomik zarar ve ekolojik tahribatı en aza indirmeye yönelik bütüncül müdahale kapasitesini güçlendirmektedir.

2.1.4.2. Kablosuz Sensör Ağları (WSN)

Orman alanlarına yerleştirilen çevresel sensörler aracılığıyla sıcaklık, bağıl nem, gaz bileşimi ve ışık düzeyi gibi mikroklimatik değişkenler düzenli olarak izlenmektedir. Bu sistemlerden elde edilen ölçümler, ani sıcaklık artışları, duman partikül yoğunluğundaki yükselmeler ya da karbonmonoksit ve benzeri yanma ürünlerinde gözlenen artışlar üzerinden potansiyel yangın başlangıçlarının belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Böylelikle tutuşmanın

gerçekleştiği ya da gerçekleşme olasılığının arttığı erken evrelere ilişkin uyarıların, olay henüz görünür hâle gelmeden iletilmesi mümkün hâle getirilmektedir. Söz konusu sensör tabanlı yaklaşımın, topoğrafik engeller veya meteorolojik koşullar nedeniyle görüş alanı sınırlanan bölgelerde, klasik yer tabanlı gözlem yöntemlerinin eksik kaldığı durumlarda erken tespit kapasitesini belirgin biçimde güçlendirdiği görülmektedir. Sürekli ve yüksek duyarlılıkla üretilen veri akışı sayesinde yangın gelişiminin ilk göstergeleri daha güvenilir biçimde saptanabilmekte; bu durum müdahale süreçlerinin hızlandırılmasına ve riskin geniş ölçekli bir yangına dönüşme olasılığının azaltılmasına katkı sunmaktadır (Dampage vd., 2021).

Sensör ağlarının sağladığı kesintisiz veri akışı sayesinde orman yangınlarının gelişim dinamikleri daha yüksek bir duyarlılıkla takip edilebilmekte; böylelikle müdahale süreçlerinin hızlandırılmasına ve riskin büyüme olasılığının azaltılmasına katkı sunulmaktadır. Güncel araştırmalarda, Kablosuz Sensör Ağları (Wireless Sensor Networks – WSN) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı altyapıların geniş ormanlık alanlarda düşük maliyetli ve enerji açısından verimli bir izleme çözümü sunduğu ortaya konulmaktadır.

Bu kapsamda Brito vd. (2020) tarafından tasarlanan LoRaWAN tabanlı sistem, heterojen sensör yapılarının bütüncül bir ağ içerisinde nasıl işleyebileceğine yönelik önemli bir örnek olarak değerlendirilmektedir. Söz konusu sistemde sensör düğümlerinin iki bileşenden oluştuğu; bunlardan birinin geniş alan ölçeğinde sıcaklık, nem ve güneş radyasyonu verilerini topladığı, diğerinin ise alev ve dumanın noktasal tespitine yönelik veri ürettiği belirtilmektedir (Brito vd., 2020). Bu sayede hem genel risk değerlendirmesine yönelik makro ölçekli bilgiler hem de olası tutuşma noktalarını işaret eden mikro düzeydeki göstergeler aynı ağ yapısı içerisinde eş zamanlı olarak derlenebilmektedir. Bu mimarinin, farklı türde sensörlerin birbirini tamamladığı heterojen WSN konfigürasyonlarının pratikte kullanılabilirliğini göstermesi açısından önem taşıdığı vurgulanmaktadır. Son yıllarda gerçekleştirilen araştırmalar, uzun menzilli iletişim imkânı sunan WSN teknolojisinin kablosuz sensör ağlarında giderek daha yaygın biçimde benimsendiğini göstermektedir. Bu kapsamda geliştirilen izleme sistemlerinde sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve karbon dioksit gibi parametrelerin sürekli olarak ölçüldüğü ve verilerin bulut tabanlı sunuculara aktarılmasıyla makine öğrenmesi algoritmaları aracılığıyla anomali tespitinin yapılabildiği görülmektedir. Söz konusu yaklaşımların düşük enerji tüketimiyle yaklaşık bir kilometrelik bir yarıçapta kesintisiz izleme kapasitesi sunduğu rapor edilmiştir (Saida vd., 2023).

Benzer biçimde güneş enerjisi ile çalışan yapılarda sensör düğümlerinin enerji bağımsız bir biçimde faaliyet gösterebildiği, yangın tespit edildiğinde otomatik su püskürtme sistemlerinin devreye alındığı ve eşzamanlı olarak verinin IoT tabanlı ağ üzerinden merkeze iletilebildiği ortaya konulmaktadır. Bu tür akıllı ve otonom mimarilerin, erken uyarı üretme kapasitesini artırdığı ve ilk müdahale süresini kısaltarak insan kaynaklı gecikmeleri önemli ölçüde azalttığı değerlendirilmektedir (Kumar, 2024).

WSN gerçek dünya uygulamalarında, geniş alan kapsamı, düşük enerji tüketimi ve ölçüm duyarlılığı arasında işlevsel bir denge kurulmasına yönelik çabaların belirleyici olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, sensör yoğunluğunun optimizasyonu, batarya ömrünün sürdürülebilirliği, bakım faaliyetlerine erişilebilirlik ve düğümler arası veri iletim sürekliliğinin korunması, WSN mimarilerinde karşılaşılan temel yapısal kısıtlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle, geleceğe yönelik WSN tasarımlarında enerji bağımlılığını azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarıyla bütünleşik çözümlere yönelmesi; kapsama sorunlarının azaltılması için drone destekli veri toplama modelleriyle hibrit mimarilerin benimsenmesi ve ağ içerisinde üretilen verinin yorumlanmasında yapay zekâ temelli karar mekanizmalarından yararlanılması beklenmektedir. Bu eğilimin, hem WSN altyapılarının dayanıklılığını artırması hem de orman yangınlarının erken tespitine yönelik sistem performansını güçlendirmesi öngörülmektedir.

2.1.4.3. Meteorolojik Erken Uyarılar

Meteorolojik erken uyarı sistemleri, özellikle iklim değişikliğinin etkisiyle daha sık ve daha yıkıcı hâle gelen orman yangınlarının önlenmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Artan sıcaklıklar, uzun süren kurak dönemler ve rüzgârın ani yön ve şiddet değişimleri, orman ekosistemlerini her zamankinden daha kırılgan bir hâle getirmekte; bu nedenle hava durumu temelli uyarı mekanizmaları, yangın riskinin yönetilmesinde temel bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda Kırmızı Bayrak Uyarıları, yangın çıkma ihtimalinin yüksek olduğu günleri önceden bildiren en önemli meteorolojik göstergelerden biridir. Düşük nem, yüksek sıcaklık ve kuvvetli rüzgâr gibi koşulların bir araya geldiği durumlarda verilen bu uyarıların, büyük ölçekteki orman yangınlarının ortaya çıkma olasılığını öngörmede oldukça başarılı olduğu ortaya konmuştur (Clark vd., 2020). Ancak bu uyarıların insan kaynaklı ateşlemeleri azaltmada sınırlı etkiye sahip olduğu; yıldırım ya da kuraklık gibi doğal süreçlere bağlı riskleri doğrudan düşürmediği de literatürde belirtilmektedir (Abatzoglou vd., 2024). Bunun yanında, sıcaklık, rüzgâr, yağış ve yakıt nemi gibi temel meteorolojik değişkenlerin değerlendirilmesiyle oluşturulan yangın tehlike indeksleri,

orman yangınlarının erken tahmininde yaygın olarak kullanılan bir diğer araçtır. Avrupa’da uygulanan bazı modellerin günler veya haftalar öncesinden riskli dönemlere işaret edebilmesi, geniş ölçekli yangınlara yönelik hazırlık süreçlerinde önemli bir avantaj yaratmaktadır (Di Giuseppe vd., 2020).

Son yıllarda, farklı bölgelerde yürütülen çalışmalar, özellikle yıldırım kaynaklı orman yangınlarının önceden tahmin edilmesinde yeni yöntemlerin umut verici sonuçlar sunduğunu göstermektedir (Zhang vd., 2025). Bu tür çalışmalar, orman yangınlarının yalnızca mevcut hava koşullarının değil, atmosferdeki ani değişimlerin de yakından izlenmesini gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kısa vadeli hava olaylarını değerlendiren mevsimsel ve haftalık tahmin yaklaşımlarının orman yangınlarının davranışını öngörmede giderek daha fazla kullanıldığı görülmektedir. Bu modeller, yangın riskinin yalnızca sıcak ve kurak dönemlerin değil, atmosferik istikrarsızlığın da bir sonucu olduğunu göstermesi bakımından önem taşımaktadır (Lindley vd., 2023).

Yerel ölçekte ise sürekli çevresel izleme ve sensör tabanlı gözlem ağlarının gelişmesi, ormanlarda ani nem kayıpları, hızlı ısınma veya rüzgâr değişimleri gibi risk artırıcı durumların erkenden fark edilmesine imkân tanımaktadır (Tsipis vd., 2020). Böylece, orman yangınlarına ilişkin küçük ölçekli uyarı işaretleri daha hızlı algılanmakta ve müdahale kapasitesi güçlenmektedir. Genel olarak, meteorolojik erken uyarı sistemlerinin orman yangınlarıyla mücadelede giderek daha merkezi bir konuma yerleştiği söylenebilir. Bu sistemler, yangınların nerede ve ne zaman ortaya çıkabileceğine dair tahminler sunarak yalnızca söndürme müdahalelerine değil, aynı zamanda risk azaltma, hazırlık ve kaynak planlaması süreçlerine de doğrudan katkı sağlamaktadır. Mevcut literatür, gelecekte orman yangınlarına yönelik uyarı mekanizmalarının daha bütüncül, daha erken ve daha duyarlı çalışmasının, meteorolojik gözlemlerin güçlendirilmesine ve çok kaynaklı veri altyapılarının etkili biçimde kullanılmasına bağlı olduğunu göstermektedir.

3. Dijital Dönüşümde Kurumsal Zorluklar ve Uyum Gereksinimleri

Dijitalleşme süreci, orman yangınlarıyla mücadele alanında yalnızca teknolojik bir yenilenme değil, aynı zamanda kurumsal, yönetsel ve etik yapıların yeniden biçimlendirilmesini zorunlu kılan çok boyutlu bir dönüşüm alanı olarak değerlendirilmektedir. Güncel literatür, dijital yangın yönetimi sistemlerinin etkinliğinin yalnızca ileri teknolojik araçların kullanımına değil, bu araçların kurumsal kapasite, veri yönetimi, siber güvenlik ve çok paydaşlı yönetim yapılarıyla desteklenmesine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır

(Copes-Gerbitz vd., 2022). Bu çerçevede dijital dönüşüm süreci, teknolojik yeniliklerin benimsenmesinden daha çok, kurumların karar alma süreçlerinin, iletişim ağlarının ve iş birliği mekanizmalarının yeniden tanımlanmasını gerekli kılmaktadır.

Orman yangınlarının yönetiminde sensör ağları, İHA, uydu tabanlı izleme sistemleri ve yapay zekâ destekli analiz platformları gibi dijital teknolojiler yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu sistemler, yangınların erken tespiti, risk değerlendirmesi ve kaynak yönetimi süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, veri bütünlüğü, kurumsal koordinasyon eksiklikleri ve idari uyumsuzluklar, dijital sistemlerin bütüncül çalışmasını sınırlayan temel faktörler arasında yer almaktadır. Kurumlar arasında ortak dijital altyapı, açık veri standartları ve veri paylaşım protokollerinin eksikliği, erken uyarı sistemlerinin entegrasyonunu zorlaştırmakta ve karar alma süreçlerinde gecikmelere yol açmaktadır. Bu nedenle, dijital yangın yönetimi uygulamalarının sürdürülebilir bir yapıya kavuşturulabilmesi için kurumsal düzeyde veri yönetimi politikalarının standartlaştırılması ve bilgi akışının bütünlük bir biçimde tasarlanması gerekmektedir.

Dijitalleşme süreci aynı zamanda nitelikli insan kaynağı gereksinimini de beraberinde getirmektedir. Dijital orman yönetimi sistemlerinin sürdürülebilir biçimde işletilebilmesi; veri analitiği, coğrafi bilgi sistemleri, makine öğrenimi ve siber güvenlik konularında uzmanlaşmış personelin varlığına bağlıdır. Bu kapsamda kurum içi dijital okuryazarlık düzeyinin artırılması ve sürekli mesleki gelişim programlarının uygulanması, dijital dönüşümün kurumsal düzeyde kalıcı hâle gelmesi için temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. İnsan kaynağı kapasitesinin yetersiz olması durumunda dijital sistemler, yalnızca veri üreten ancak anlamlı bilgiye dönüştüremeyen araçlar olarak kalmaktadır. Dijitalleşme, aynı zamanda siber güvenlik ve veri bütünlüğü açısından da yeni risk alanları yaratmaktadır (Saeed vd., 2023).

Bulut tabanlı veri merkezleri, kablosuz iletişim ağları ve sensör sistemleri dış müdahalelere açık hâle geldiğinde, afet yönetimi süreçleri ciddi operasyonel tehditlerle karşı karşıya kalabilmektedir. Bu nedenle dijital yangın yönetiminde veri güvenliğini sağlamak amacıyla ulusal düzeyde güvenlik protokollerinin oluşturulması, düzenli sızma testlerinin yapılması ve yedekleme mekanizmalarının kurulması önem arz etmektedir. Son dönemde blokzincir ve dağıtık ağ mimarilerinin, veri şeffaflığını ve doğrulanabilirliği artırmak amacıyla afet yönetiminde kullanılabilirliğine yönelik çalışmalar, bu alandaki potansiyel çözümler arasında değerlendirilmektedir. Dijital dönüşüm sürecinin kurumsal boyutunun bir diğer yönü, yönetim kültürü

ve organizasyonel yapıların dijitalleşmenin gerektirdiği hız ve esneklik düzeyine uyum sağlayabilmesidir. Geleneksel hiyerarşik yönetim modelleri, dijital sistemlerin gerektirdiği yatay iletişim, hızlı karar alma ve çok aktörlü koordinasyon süreçlerine genellikle direnç göstermektedir. Bu durum, erken uyarı sistemlerinin entegrasyonunu geciktirmekte ve afet anlarında bilgi akışında kopukluklara neden olmaktadır. Dolayısıyla dijitalleşme süreci yalnızca teknolojik bir değişimi değil, aynı zamanda yönetsel esnekliği ve kurumsal adaptasyon kapasitesini de gerektirmektedir.

4. Sonuç

Orman yangını yönetiminin günümüz koşullarında yalnızca teknik bir söndürme faaliyeti olarak ele alınamayacağı artık açık bir biçimde görülmektedir. İklim sistemindeki düzensizlikler, ekosistemlerin kırılganlığı ve kurumsal yönetim süreçlerindeki ihtiyaçlar, bu alanı çok boyutlu bir afet yönetimi sorununa dönüştürmüştür. Sıcak hava dalgalarının sıklaşması, kurak dönemlerin uzaması, yakıt yükünün kontrolsüz biçimde artması ve arazi kullanımındaki parçalı dönüşüm, yangın riskinin süreklilik kazanan yapısal bir özellik taşımasına yol açmaktadır.

Son yıllarda yaşanan yüksek yoğunluklu yangın sezonları ise müdahale merkezli geleneksel anlayışın artık yeterli olmadığını; yangın yönetiminin risk azaltımı, hazırlık, izleme ve planlama bileşenlerini içeren daha bütüncül bir çerçeveye kavuşturulması gerektiğini göstermektedir. Dijital teknolojilerde yaşanan ilerlemeler, bu dönüşümün en belirgin dinamiklerinden biridir. Uydu görüntüleme sistemleri, insansız hava araçları, kablosuz sensör ağları, mekânsal analiz araçları ve yapay zekâ tabanlı karar destek modelleri, yangın tehlikesinin erken saptanmasını ve davranışının daha doğru çözümlenmesini mümkün kılmaktadır. Bu teknolojik altyapı, tehlike–maruziyet–kırılganlık bileşenlerinin eş zamanlı değerlendirilmesine olanak sağlayarak yangın yönetiminin operasyonel bir müdahale pratiğinden çıkarak, veri odaklı, öngörüye dayalı ve stratejik bir yönetim alanına evrilmesini desteklemektedir. Bununla birlikte, teknolojik kapasitenin etkili biçimde kullanılabilmesi; kurumlar arası işleyişin güçlendirilmesi, veri paylaşımının güvenilir sistemler üzerinde yürütülmesi, teknik personelin nitelikli bir yapıya kavuşturulması ve finansal sürdürülebilirliğin sağlanması gibi yönetsimsel koşullara bağlıdır.

Güncel yaklaşımlar, yangın riskinin yönetimde önleyici zihniyetin merkezî bir rol üstlendiğini göstermektedir. Yakıt yükünün kontrol altına alınması, arazi kullanım kararlarında risk verilerinin gözetilmesi, mikroklimatik koşulların sürekli izlenmesi ve kapsamlı risk haritalarının hazırlanması, etkili bir müdahalenin yalnızca destekleyici unsuru değil, aynı zamanda ön koşulu hâline gelmiştir. Riskin yangın çıkmadan önce

tanımlanması ve azaltılması, afet yönetiminin temel ilkeleriyle uyumlu bir anlayışın yerleşmesini sağlamaktadır.

Dijitalleşmenin getirdiği yeniliklerin başarılı bir biçimde uygulanması ise geniş bir kurumsal ekosistemin uyum içinde çalışmasına bağlıdır. Teknolojik araçların kullanımını aşan bu dönüşüm; karar alma süreçlerinde veri bütünlüğünü, kurumlar arası koordinasyonun güçlendirilmesini ve stratejik planlamanın sürekliliğini gerektiren bütüncül bir yönetim çerçevesi talep etmektedir. Orman yangınlarının karmaşık doğası, farklı ölçeklerde faaliyet gösteren kurumların ortak bir bilgi altyapısı üzerinden eşgüdüm içinde hareket etmesini zorunlu kılmaktadır. İklimsel belirsizliklerin ve yangın davranışındaki hızlı değişimlerin belirginleştiği yeni dönemde, durağan varsayımlar üzerine kurulu sistemler etkisini yavaş yavaş yitirmektedir.

Ortaya çıkan risk profilleri, algılama, değerlendirme ve müdahale süreçlerinde uyarlanabilir ve öğrenen sistemlere duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Yapay zekâ destekli sezgisel modeller, gerçek zamanlı veri akışına dayalı sensör ağları ve durumsal farkındalık kapasitesi yüksek teknolojik çözümler, modern yangın yönetiminde giderek daha kritik bir rol üstlenmektedir. Bütün bu değerlendirmeler bir arada düşünüldüğünde, orman yangını yönetiminin dijitalleşmeyle birlikte yalnızca teknik kapasitesini artıran bir alan değil; bilimsel bilgi üretimi, kurumsal uyum, ekolojik sürdürülebilirlik ve toplum temelli risk azaltımı süreçlerinin birbirini tamamladığı stratejik bir yönetim sahasına dönüştüğü anlaşılmaktadır. Sürdürülebilir bir yaklaşım, teknolojik araçların ötesine geçerek çok disiplinli iş birliklerinin geliştirilmesini, kurumsal kararlılığın pekiştirilmesini ve toplumsal farkındalığın güçlendirilmesini gerektirmektedir. Bu bütüncül çerçevenin benimsenmesi, artan iklimsel baskılara rağmen yangın riskinin yönetilebilirliğini artıracak; aynı zamanda bilimsel temelli politikalar ve dijital teknolojiler aracılığıyla geleceğin ormanlarını korumada daha etkili bir dönüşüm imkânı sunacaktır.

Kaynakça

- Abatzoglou, J., Fleishman, E., Williams, E., Rupp, D., Jenkins, J., Sadegh, M. (2024). The Efficacy of Red Flag Warnings in Mitigating Human-Caused Wildfires across the Western United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. doi:10.1175/jamc-d-24-0120.1
- Akhloufi, M., Castro, N., Couturier, A. (2020). Unmanned Aerial Systems for Wildland and Forest Fires: Sensing, Perception, Cooperation and Assistance. *ArXiv*, abs/2004.1. doi:10.1117/12.2304834
- Al-Smadi, Y., Alauthman, M., Al-Qerem, A., Aldweesh, A., Quaddoura, R., Aburub, F., ... Alhmiedat, T. (2023). Early Wildfire Smoke Detection Using Different YOLO Models. *Machines*. doi:10.3390/machines11020246
- Brito, T., Pereira, A., Lima, J., Valente, A. (2020). Wireless Sensor Network for Ignitions Detection: An IoT approach. *Electronics*. doi:10.3390/electronics9060893
- Bushnaq, O., Chaaban, A., Al-Naffouri, T. (2020). The Role of UAV-IoT Networks in Future Wildfire Detection. *IEEE Internet of Things Journal*, 8, 16984–16999. doi:10.1109/jiot.2021.3077593
- Chen, X., Hopkins, B., Wang, H., O'Neill, L., Afghah, F., Razi, A., ... Watts, A. (2022). Wildland Fire Detection and Monitoring using a Drone-collected RGB/IR Image Dataset. *2022 IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR)*, 1–4. doi:10.1109/aipr57179.2022.10092208
- Christensen, B., Herries, D., Hartley, R., Parker, R. (2021). UAS and smartphone integration at wildfire management in Aotearoa New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*. doi:10.33494/nzjfs512021x127x
- Clark, J., Abatzoglou, J., Nauslar, N., Smith, A. (2020). Verification of Red Flag Warnings across the Northwestern U.S. as Forecasts of Large Fire Occurrence. *Fire*. doi:10.3390/fire3040060
- Copes-Gerbitz, K., Hagerman, S., Daniels, L. (2022). Transforming fire governance in British Columbia, Canada: an emerging vision for co-existing with fire. *Regional Environmental Change*, 22. doi:10.1007/s10113-022-01895-2
- Dampage, U., Bandaranayake, L., Wanasinghe, R., Kottahachchi, K., Jayasanka, B. (2021). Forest fire detection system using wireless sensor networks and machine learning. *Scientific Reports*, 12. doi:10.1038/s41598-021-03882-9
- Di Giuseppe, F., Vitolo, C., Krzeminski, B., Barnard, C., Maciel, P., San-Miguel, J. (2020). Fire Weather Index: the skill provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ensemble prediction system. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi:10.5194/nhess-20-2365-2020
- Djabri, A. D., Bouhata, R., Guellouh, S., Bensekhria, A. (2024). Wildfire Vulnerability Assessment and Mapping Using Remote Sensing, GIS and

- Weighted Overlay Method in the Eastern Aures in Khenchela, Algeria. *Geoadria*. doi:10.15291/geoadria.4218
- Ghali, R., Akhloufi, M., Mseddi, W. S. (2022). Deep Learning and Transformer Approaches for UAV-Based Wildfire Detection and Segmentation. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22. doi:10.3390/s22051977
- Iban, M., Aksu, O. (2024). SHAP-Driven Explainable Artificial Intelligence Framework for Wildfire Susceptibility Mapping Using MODIS Active Fire Pixels: An In-Depth Interpretation of Contributing Factors in Izmir, Türkiye. *Remote. Sens.*, 16, 2842. doi:10.3390/rs16152842
- Kirschner, J., Clark, J., Boustras, G. (2023). Governing wildfires: toward a systematic analytical framework. *Ecology and Society*, 28(2), 6.
- Kumar, R. K. D. R. (2024). Zigbee Based Solar Powered Forest Fire Detection And Control System. *Journal of Science and Technology*. doi:10.46243/jst.2024.v9.i01.pp161-169
- Lindley, T., Zwink, A., Barnes, R., Murdoch, G., Ancell, B., Burke, P., Skinner, P. (2023). Preliminary Use of Convection-allowing Models in Fire Weather. *Journal of Operational Meteorology*. doi:10.15191/nwajom.2023.1106
- Martí Rosell, M., Nebot, E., Estivill, L., Valor, T. (2024). *Integrated Fire Management IFM: WPI D1.9 IA 1.4 brief 1—Integrated fire management model: Demonstration, training and piloting activities, including new-fire prone areas. Integrated Fire Management IFM Report* FIRE-RES Project, European Union Horizon 2020 Programme: Brussels. file://ifm_ia1.4_brief1.pdf.
- OGM. (2025). *2021-2024 Faaliyet Raporları*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı: Ankara. <https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane/resmi-istatistikler>.
- Pádua, L., Adão, T., Guimarães, N., Sousa, A., Peres, E., Sousa, J. (2019). Post-Fire Forestry Recovery Monitoring Using High-Resolution Multispectral Imagery From Unmanned Aerial Vehicles. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. doi:10.5194/isprs-archives-xxlii-3-w8-301-2019
- Prichard, S., Hessburg, P., Hagmann, R., Povak, N., Dobrowski, S., Hurteau, M., ... Khatri-Chhetri, P. (2021). Adapting western North American forests to climate change and wildfires: 10 common questions. *Ecological Applications*, 31. doi:10.1002/eap.2433
- Radke, D., Hessler, A., Ellsworth, D. (2019). FireCast: Leveraging Deep Learning to Predict Wildfire Spread., 4575–4581. doi:10.24963/ijcai.2019/636
- Rommelzwaal, L. (2023). An AI-based Early Fire Detection System Utilizing HD Cameras and Real-time Image Analysis. *Artificial Intelligence and Applications*. doi:10.47852/bonviewaia3202975

- Saeed, S., Altamimi, S., Alkayyal, N., Alshehri, E., Alabbad, D. (2023). Digital Transformation and Cybersecurity Challenges for Businesses Resilience: Issues and Recommendations. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23. doi:10.3390/s23156666
- Saida, A., Sreedhar, C., Samreen, Mohammad, A., Jamal, K., Ghalwan, M. (2023). LORA Based Forest Fire Monitoring System. *E3S Web of Conferences*. doi:10.1051/e3sconf/202343001171
- Saxena, V. (2025). AI-Driven Wildfire Management: An Integrated Approach to Detection, Prevention, and Response. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. doi:10.32628/cseit251112178
- Seydi, S. T. (2025). Assessment of the January 2025 Los Angeles County wildfires: A multi-modal analysis of impact, response, and population exposure. *ArXiv preprint arXiv:2501.17880*.
- Shadrin, D., Illarionova, S., Gubanov, F., Evteeva, K., Mironenko, M., Levchunets, I., ... Burnaev, E. (2024). Wildfire spreading prediction using multimodal data and deep neural network approach. *Scientific Reports*, 14. doi:10.1038/s41598-024-52821-x
- Shu, Y., Shi, C., Yi, B., Zhao, P., Guan, L., Zhou, M. (2022). Influence of Climatic Factors on Lightning Fires in the Primeval Forest Region of the Northern Daxing'an Mountains, China. *Sustainability*. doi:10.3390/su14095462
- Sousa, J., Gamboa, P. (2020). Aerial Forest Fire Detection and Monitoring Using a Small UAV, 242. doi:10.18502/keg.v5i6.7038
- Stanley, O., Alexander, L., Austine, U. (2024). Proactive Wildfire Detection and Management using AI, ML, and 5G Technology in the United States. *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*. doi:10.5121/ijdkp.2023.14201
- Szpakowski, D., Jensen, J. (2019). A Review of the Applications of Remote Sensing in Fire Ecology. *Remote. Sens.*, 11, 2638. doi:10.3390/rs11222638
- Tsipis, A., Papamichail, A., Angelis, I., Koufoudakis, G., Tsoumanis, G., Oikonomou, K. (2020). An Alertness-Adjustable Cloud/Fog IoT Solution for Timely Environmental Monitoring Based on Wildfire Risk Forecasting. *Energies*. doi:10.3390/en13143693
- UN. (2022). *Spreading like wildfire: The rising threat of extraordinary landscape fires. A UNEP rapid response assessment* UNEP/GRID-Arendal: Nairobi.
- UNDRR. (2015). *United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. United Nations: Geneva. https://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfor-drren.pdf.

- UNEP. (2022). Wildfire Remote Sensing Applications. *6th International Students Science Congress Proceedings Book*. doi:10.52460/issc.2022.027
- Valero, M., Rios, O., Mata, C., Pastor, E., Planas, E. (2018). GIS-based integration of spatial and remote sensing data for wildfire monitoring., 10790. doi:10.1117/12.2325649
- Wei, C., Xu, J., Li, Q., Jiang, S. (2022). An Intelligent Wildfire Detection Approach through Cameras Based on Deep Learning. *Sustainability*. doi:10.3390/su142315690
- Xu, K., Zhang, X., Chen, Z., Wu, W., Li, T. (2016). Risk assessment for wildfire occurrence in high-voltage power line corridors by using remote-sensing techniques: a case study in Hubei Province, China. *International Journal of Remote Sensing*, 37, 4818–4837. doi:10.1080/01431161.2016.1220032
- Yörük, S., Büyükkelik, A. (2025). Türkiye 2021 Temmuz-Ağustos Orman Yangınlarında Yaşanan Afet Lojistiği Problemlerinin Nitel Olarak Araştırılması. *Tarsus Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5(2), 106–125. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tauubf/issue//1709749>.
- Yuan, Q. (2025). Multi-source remote sensing-based forest fire monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. doi:10.5194/isprs-archives-xxviii-m-5-2024-189-2025
- Zhang, Q., Gao, C., Shi, C. (2025). An improved machine-learning model for lightning-ignited wildfire prediction in Texas. *Environmental Research Letters*, 20. doi:10.1088/1748-9326/add754