

# **ORMAN YANGINLARININ YÖNETİMİNDE BİLGİ TEKNOLOJİLERİNİN KATKILARI**

## **CONTRIBUTIONS OF INFORMATION TECHNOLOGIES TO MANAGEMENT OF FOREST FIRES**

**Prof. Dr. Nebiye Musaoğlu  
Prof. Dr. Mustafa Yanalak  
Doç. Dr. Cumhuri Güngöroğlu  
Doç Dr. Orkan Özcan**

**Prof. Dr. Nebiye MUSAOĞLU / İstanbul Teknik Üniversitesi /  
musaoglune[at]itu.edu.tr / ORCID: 0000-0002-8022-8755**

Nebiye Musaoğlu, 1989 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. Aynı bölümde 1989 yılında araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır. İTÜ'de Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Programı'ndan 1993 yılında yüksek lisans 1999 yılında da doktora derecesi almıştır. 1989-2000 yılları arasında araştırma görevlisi olduğu İTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü'nde 2000-2006 yılları arasında doçent doktor olarak görev yapmıştır. Prof. Dr. Nebiye Musaoğlu 2006 yılından beri İTÜ İnşaat Fakültesi Geomatik Mühendisliği Bölümü'nde profesör olarak görev yapmaktadır. Uzaktan algılama, görüntü işleme, doğal kaynakların uzaktan algılanması, değişim belirleme, zaman serisi analizleri ve arazi örtüsü/kullanımı haritalarının üretilmesi başlıca araştırma alanlarını oluşturmaktadır. Prof. Dr. Nebiye Musaoğlu'nun 200'den fazla bilimsel yayını bulunmaktadır.

**Prof. Dr. Nebiye MUSAOĞLU / Istanbul Technical University /  
musaoglune[at]itu.edu.tr / ORCID: 0000-0002-8022-8755**

Nebiye Musaoğlu graduated Istanbul Technical University (ITU), Department of Geodesy and Photogrammetry Engineering in 1989. She attended ITU Department of Geodesy and Photogrammetry Engineering in 1989 as a research assistant. She received Geodesy and Photogrammetry Engineering M. Sc. degree in 1993, and Ph.D. degree in 1999 at ITU. From 1989 to 2000, she was a research assistant with the Department of Geodesy and Photogrammetry Engineering, ITU, where she was also an associate professor, from 2000 to 2006. Prof. Dr. Nebiye Musaoğlu is currently a full professor with the Geomatics Engineering Department, Civil Engineering Faculty, ITU. Her research interests include remote sensing and image processing, remote sensing of natural resources, change detection, time series analyses and land use/cover mapping. She has authored or co-authored more than 200 scientific publications.

**Prof. Dr. Mustafa YANALAK / İstanbul Teknik Üniversitesi /  
yanalak[at]itu.edu.tr / ORCID: 0000-0001-6805-8768**

Prof. Dr. Mustafa Yanalak, 1988 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Bölümünden mezun olmuştur. 1989 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Programı'nda doktora çalışmasını tamamlamış ve 1997 yılında doktor ünvanı almıştır. 2002'de aynı bölümde yardımcı doçent, 2005'te doçent ve son olarak da 2010 yılında profesör olarak atanmıştır. Uzmanlık alanları arasında, tapu ve kadastro uygulamaları, taşınmaz değerlendirme, taşınmaz hukuku, arazi yönetimi, mühendislik ölçmeleri ve coğrafi bilgi sistemleri yer almaktadır. Prof. Dr. Mustafa Yanalak akademik hayatı boyunca birçok idari görevde yer almıştır. 2008-2009 yıllarında İTÜ Geomatik Mühendisliği Bölümü'nde bölüm başkanlığı yardımcılığı yapmış, 2008-2011 yılları arasında İTÜ Meslek Yüksekokul müdürü olarak görev almıştır. 2010 yılında İTÜ Kuzey Kıbrıs'a rektör olarak atanmış ve bu görevini iki yıl sürdürmüştür. Kendisi 2016 yılından bu yana İTÜ Geomatik Mühendisliği Bölümü'nde bölüm başkanlığı görevini üstlenmektedir. Ayrıca, 2021 yılının başında Uydu Haberleşme ve Uzaktan Algılama (CSCRS) Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne müdür olarak atanmıştır.

**Prof. Dr. Mustafa YANALAK / Istanbul Technical University /  
yanalak[at]itu.edu.tr / ORCID: 0000-0001-6805-8768**

He graduated Geodesy and Photogrammetry Engineering at Istanbul Technical University. He started working as research assistant in Geodesy and Photogrammetry Department at Istanbul Technical University in 1989. He completed his doctoral studies in the Department of Geodesy and Photogrammetry Engineering Program of Istanbul Technical University and received his doctorate in 1997. He was appointed assistant professor in 2002, associate professor in 2005 and finally professor in 2010 in the same department. His professional areas include land registry and cadastre applications, real estate valuation, real estate law, land management, engineering surveying and geographic information systems. Prof. Dr. Mustafa Yanalak has taken various roles in many administrative duties at ITU. He served as the Deputy Head of the Department of Geomatics Engineering at ITU between 2008-2009, and worked as the director of ITU Vocational High School between 2008-2011. He was appointed as the rector of ITU Northern Cyprus in 2010 and continued this duty for two years. He is the head of the department at ITU Geomatics Engineering. In addition, he is still the director of the Satellite Communication and Remote Sensing (CSCRS) Application and Research Center since the beginning of the year 2021.

**Doç. Dr. Cumhuri GÜNGÖROĞLU / Karabük Üniversitesi /  
cumhurgungoroglu[at]karabuk.edu.tr / ORCID: 0000-0003-3932-3205**

Cumhuri Güngöroğlu, İstanbul Üniversitesi Orman Mühendisliği Bölümü'nden 1990 yılında mezun olmuştur. Yüksek lisansını Göttingen Georg-August Üniversitesi'nde 1999 yılında tamamlamıştır. Doktora çalışmasını DAAD doktora burs programı kapsamında Göttingen Georg-August Üniversitesi Orman Ekolojisi ve Ormancılık Bilimleri Fakültesi'nde gerçekleştirmiş ve 2010 yılında doktor unvanı almıştır. Doktora esnası ve sonrası çalışmalarını OGM Batı Akdeniz Ormancılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü'nde 10 yıl yürütmüştür. 2015 yılından itibaren Karabük Üniversitesi Orman Fakültesi'nde öğretim üyesi olarak araştırmalarına devam etmektedir. Cumhuri Güngöroğlu, Jeo-mekânsal tabanlı ekolojik araştırmalar (biyotop ve peyzaj tipleri, ağaç türlerinin mekânsal yayılışları, vb.), doğa koruma (korunan alan planlaması ve yönetimi, yaban hayatı yönetimi, Natura 2000 konsepti) ve orman yangın araştırmaları (yangın risk analizi, yanıcı yükü tespiti, yangın davranışı) konularında araştırma faaliyetlerinde bulunmuştur.

**Assoc. Prof. Cumhuri GÜNGÖROĞLU / Karabük University /  
cumhurgungoroglu[at]karabuk.edu.tr / ORCID: 0000-0003-3932-3205**

Cumhuri Güngöroğlu graduated from Istanbul University, Department of Forestry Engineering in 1990. He completed his master's degree at the Georg-August University of Göttingen in 1999. He completed his doctoral studies at the Faculty of Forest Ecology and Forestry Sciences at the Georg-August University of Göttingen within the scope of the DAAD doctoral scholarship program and received his doctorate in 2010. He carried out his studies during and after his doctorate at OGM West Mediterranean Forestry Research Institute for 10 years. Since 2015, he has been continuing his research as a faculty member at Karabük University, Faculty of Forestry. Cumhuri Güngöroğlu main study areas: Geo-spatial based ecological research (biotope and landscape types, spatial distribution of tree species, etc.), nature conservation (protected area planning and management, wildlife management, Natura 2000 concept) and forest fire research (fire risk) analysis, determination of combustible load, fire behavior).

**Doç. Dr. Orkan ÖZCAN / İstanbul Teknik Üniversitesi /  
ozcanork[at]itu.edu.tr / ORCID: 0000-0002-7485-6157**

Orkan Özcan İstanbul Teknik Üniversitesi Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü'nde doçent doktor olarak görev yapmaktadır. 2004 yılında Hacettepe Üniversitesi Hidrojeoloji Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesi almıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı'ndan sırasıyla 2008 yılında yüksek lisans, 2014 yılında da doktora derecesi almıştır. Uzaktan algılama ve disiplinlerarası uygulamalar, insansız hava araçları ve arazi yüzeyi ile ilgili konular başlıca araştırma alanlarını oluşturmaktadır.

**Assoc. Prof. Orkan ÖZCAN / Istanbul Technical University/  
ozcanork[at]itu.edu.tr / ORCID: 0000-0002-7485-6157**

Orkan Ozcan is an associate professor in Istanbul Technical University, Eurasia Institute of Earth Sciences. He received his BS degree in hydrogeological engineering from Hacettepe University in 2004. He received his MS and PhD degrees from Istanbul Technical University, Satellite Communication, and Remote Sensing Programme in 2008 and 2014, respectively. His research interests include remote sensing and multidisciplinary applications, unmanned aerial systems and land surface processes.

## ORMAN YANGINLARININ YÖNETİMİNDE BİLGİ TEKNOLOJİLERİNİN KATKILARI

### Özet

2021 yılında Akdeniz Bölgesi'nde yaşanan orman yangınları büyük ölçüde can ve mal kaybına neden olmuştur. Ülkemizde 1997-2018 yılları arasında yıllık ortalama 10350 ha orman alanı yangından etkilenmiştir. Orman yangınları bir taraftan doğal ekosistem işleyişini doğrudan etkilerken diğer taraftan ormanlık alanlarla doğrudan ve dolaylı etkileşimde bulunan insan ve onun yaşam çevresini de olumsuz etkilemektedir. Özellikle yerleşim yerlerine yakın bölgelerde meydana gelen yangınlar yerleşim alanlarına, ekosisteme büyük zarar vermekte, insanlar hayatını ve malını kaybetmektedir. Orman yangın yönetiminin temel bileşenlerinden biri olan yangın riskinin belirlenmesinde kullanılacak verilerin mekansal ve zamansal olarak yüksek doğruluğa sahip olması, yangın yönetimine bağlı ortaya çıkan yangın öncesi, yangın esnası ve sonrasındaki tedbirlerin belirlenmesinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Orman yangınlarına hazırlıklı olmada doğru bilgi üretimi ve bilginin güncel tutulması ancak güncel bilgi teknolojileri ile mümkündür. Yangından etkilenebilirliğin belirlenmesinde ve risk analizlerinin yapılması ve güncel tutulması aşamasında da hızlı ve doğru veri akışı ve bu verilerin birlikte analizi önem taşır. Uzaktan algılama verileri bu bağlamda önemli bir veri kaynağıdır. Tüm verilerin bir arada analiz edilmesine olanak sağlayan coğrafi bilgi sistemleri ise önlemlerin öncesinde alınmasında ve süreç yönetiminde vazgeçilmezdir. Bu çalışmada, öncelikle orman yangını çalışmalarında uzaktan algılamadan bahsedilmiş daha sonra da Çakırlar-Antalya'da coğrafi bilgi sistemi ve Bulanık Hiyerarşi Süreci ile gerçekleştirilen risk analizi sonuçları sunulmuştur.

### Anahtar Kelimeler:

Uzaktan algılama, Orman yangını, Risk analizi, Coğrafi bilgi sistemi, Bulanık Hiyerarşi Süreci (FAHP)

## CONTRIBUTIONS OF INFORMATION TECHNOLOGIES TO MANAGEMENT OF FOREST FIRES

### Abstract

In 2021, the forest fires in the Mediterranean Region led to substantial loss of life and property. In our country, average annual forest area of 10350 ha was affected by fire between years 1997-2018. The fires that occurred particularly close to the residential regions damage residential areas, ecosystem and cause civilian injuries and deaths. Generation of accurate information and keeping information up-to-date in being prepared for the forest fires is only possible with up-to-date information technologies. Fast and accurate data flow and simultaneous analysis of this data is crucial in determining the fire vulnerability, conducting risk analyses and keeping them up-to-date, as well. Herein, remote sensing images are important data source. The geographic information systems, which enable the analysis of all information together, are indispensable in taking precautions and process management. In this study, firstly remote sensing was referred in forest fire studies and then the results of the risk analysis that was conducted in Çakırlar-Antalya with geographic information system (GIS) and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) were presented.

### Keywords:

Remote sensing, Forest fire, Risk analysis, Geographic information system (GIS), Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

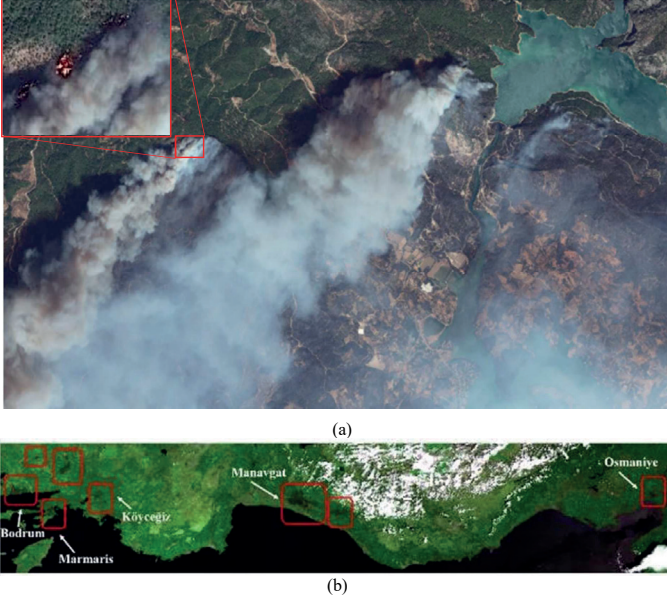
## GİRİŞ

Orman yangını, çevresi açık olması nedeniyle serbest yayılma eğiliminde olan ve ormandaki yanıcı maddeleri örneğin ot, çalı, ince ve kalın kuru dal, dikili kuru, kütük, yaprak ile belirli oranda canlı ağaçları yakan bir yangındır (Çanakçıoğlu, 1985). Bu tanıma göre orman yangınının ana karakteri etrafının açık ve yayılmaya elverişli olmasıdır. Bu haliyle çevresi için açık bir yangın tehlikesi potansiyeline sahiptir. Dünya’da yılda ortalama 350-450 milyon ha orman alanı yanmakta, bunun sonucunda küresel olarak tüm atmosfer ve insan sağlığı olumsuz yönde etkilenmektedir (Leblon vd., 2016). Orman yangınlarının Akdeniz iklim kuşağında ekolojik bozulmanın başlıca nedenlerinden biri olduğu genel olarak kabul edilen bir gerçektir. Ülkemizde çoğunluğu Akdeniz iklim bölgesi çevresinde olmak üzere 1997-2018 yılları arasında yılda ortalama 1500 – 3500 arasında değişen yangın meydana gelmiş ve yıllık ortalama 10.305 ha alan yanmıştır (URL-1, 2021). Ülkemiz güney ve batı kısmını kaplayan Akdeniz iklim bölgesine ait kızılçam ormanlık alanları ile makilik alanlar ve bunlara bitişik yer alan kırsal yerleşim yerleri orman yangınlarından doğrudan etkilenmektedir. Yakın zamanda Dünya’da ve tüm Akdeniz Havzası’nda meydana gelen yangınların sayısında ve etkiledikleri alanlarda büyük artış olmuş, yangınlar çok büyük zararlar ortaya çıkarmıştır. Orman yangınlarının etkileri kısa ve uzun vadede organizmadan geniş ekosistemler düzeyine bakıldığında oldukça geniştir. Geniş alanlarda kısa sürede objektif bilgi üretilmesine olanak sağlayan uzaktan algılama verileri, yangına neden olabilecek parametrelerin belirlenmesi, yangın sırasında yangın davranışı hakkında bilgi üretilmesi ya da sonrasında yangının etkilerinin belirlemesi gibi çalışmalarda önemli katkılar sağlamaktadır. Uydu verilerinden üretilen sonuçların, arazide yapılan çalışmaların ve bölgeye ait diğer verilerin bir arada değerlendirilebilmesi ancak standartlara uygun veri üretimi ve tüm verilerin birlikte değerlendirilebileceği bir coğrafi bilgi sistemi oluşturulması (CBS) ile sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada, öncelikle orman yangınları konusunda yapılacak çalışmalarda kullanılan uzaktan algılama verilerinden bahsedilmiş daha sonra da CBS ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (BAHP) ile orman yangın risk analizi için bir örnek sunulmuştur.

## ORMAN YANGINI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALARDA UZAKTAN ALGILAMA VERİLERİ

Farklı özelliklerdeki uzaktan algılama verileri kullanılarak orman alanlarında yangın öncesi, yangın sırasında ve sonrasında bilgi çıkartmak mümkündür. Orman örtüsü ile kaplı alanlarda meşcere tipleri ve kapalılığı, rüzgar, sıcaklık, nem, yağış gibi meteorolojik koşullar, topografya, ormanın etkileşimde olduğu arazi örtüsü ve arazi kullanımı (AÖ/AK) gibi orman yangını için önemli girdi oluşturabilecek parametreler uydu verilerinin özelliklerine göre farklı ölçeklerde belirlenebilir ve günümüzde geniş uydu görüntüsü arşivlerinden zaman serileri oluşturularak değişim analizleri yapılabilir. Amaca uygun olarak seçilecek uydu görüntüsünün çözünürlük özellikleri çalışmanın başarısı açısından önem taşır. Düşük mekansal çözünürlüğe sahip uydu görüntüleri çok geniş alanlarda aynı anda bilgi çıkarılmasına olanak sağlarken daha yüksek mekansal çözünürlükteki uydu görüntüleri büyük ölçekte yüksek detay sağlar. Şekil 1a’da 2m mekansal çözünürlükte Worldview-2 uydu görüntüsünden detaylı olarak 29.07.2021 tarihinde Manavgat’da yanan orman alanı ve dumanın yönü hatta aktif yangın durumu dahi görülebilirken, Şekil 1b’de, 300 m mekansal çözünürlüğe sahip Sentinel-3 OLCI algılayıcısından 10 Ağustos 2021’de Akdeniz kıyı şeridinde yangından etkilenen alanların tamamı görülebilmektedir.



Şekil 1. a) Manavgat 29.7.2021 Worldview-2 görüntüsü b) 10.8.2021 Akdeniz kıyı şeridinde yangından etkilenen alanlar



Orman yangınlarında bir yangının oluşması için üç temel bileşen bulunmaktadır. Bunlar hava (oksijen), topografya ve yanıcı maddedir. Orman yangınlarının oluşumu ve yayılmasında etkili topografik özellikler ise eğim ve bakıdır. Genel olarak yüksek eğim değerlerinde yangının ilerlemesi daha hızlı gerçekleşirken, özellikle kuzey yarım küre için topografyanın güneye dönük yamaçlarında güneş etkisinin hissedilme oranının daha baskın olduğu bilinmektedir. Stereo yeteneğe sahip uydu görüntülerinden üretilecek yükseklik modeli ile orman alanlarında 3 boyutlu analiz olanağı sağlanarak eğim, bakı gibi analizler yapılabilir ya da araziden veya orman örtüsünden yükseklikle ilgili bilgi çıkartılabilir.

Daha büyük ölçeklerde ise insansız hava aracına (İHA) takılı farklı özellikteki kameralar veya lidar sistemleri ile daha da detaylı bilgi çıkarılabilir. Yangınlar, sıcaklık, hareket, parlaklık, duman ve biyo-ürün gibi farklı unsurlardan oluşabilen özel imzalara sahiptir (Allison vd., 2016). Orman yangınında yüzeydeki sıcaklık 1000 °C'ye kadar yükselebilmekte ve bu da elektromanyetik spektrumun termal kızılötesi bölgesinde yüksek radyasyona yol açmaktadır (Allison vd., 2016; Johnston, Wooster, & Lynham, 2014). Dolayısıyla, yangın nedeniyle yeryüzünde oluşan sıcaklık değişimleri de termal bölgede kaydedilen görüntülerden belirlenebilmektedir. Çeşitli platformlara takılı termal kızılötesi kameralardan elde edilen görüntüler üzerinden anlık olarak gelişmiş kenar belirleme yöntemlerinin uygulanması ile yangın yönü ve doğrultusu belirlenerek yangının ilerleyişi de tahmin edilebilmektedir (De Vivo, Battipede, & Johnson, 2021). Pasif uzaktan algılama sistemlerinin yanı sıra aktif sistemlerden elde edilen veriler de orman yangınları ile ilgili çalışmalarda kullanılmaktadır. Örneğin; yapay açıklıklı radar verileri kullanılarak yangından etkilenen alanların tespiti, toprak ve bitkideki nem içeriğinin, biyokütle nin, topografik yapı ve kanopi yüksekliğinin belirlenmesi gibi çalışmalar yapılabilmektedir (Li vd., 2020; Hendel & Ross, 2021). Ya da yersel veya hava platformlarında yer alan lidar ile yapılan taramalarla elde edilen verilerden yüksek doğrulukta çap, ağaç sayısı gibi parametreler belirlenebilmektedir (Özdemir, 2013; Peng vd., 2020). İHA, uçak ya da uydu platformlarında takılı sistemlerin yanı sıra arazide doğrulama ve özellik tespiti için kullanılan yersel algılayıcılar da bulunmaktadır. Örneğin, spektrometreler ile yapılacak ölçmelerle sağlıklı veya yangından etkilenen türlerin spektral eğrileri belirlenebilmekte (Çetin, 2007) ya da klorofil ölçerler ile yapraktaki klorofil miktarı belirlenebilmektedir.

Yanmış orman alanlarının belirlenmesinde çeşitli algılayıcılar kullanılarak küresel ölçekte çalışmalar gerçekleştirilmek mümkündür (Rote ta vd., 2019). Örneğin, Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi (Medium Resolution Imaging Spectrometer-MERIS), Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer-MODIS) ve Gelişmiş Çok Yüksek Çözünürlüklü Radyometre (Advanced Very High Resolution Radiometer-AVHRR) gibi düşük mekansal, yüksek zamansal çözünürlüğe sahip uydu görüntüleri, küresel ölçekte yangın algılama ve izleme çalışmalarında kullanılmaktadır (Van Der Werf vd., 2017; Gilroy vd., 2014; Alonso-Canas vd., 2015). Ancak, Akdeniz Bölgesi'nde meydana gelen göreceli olarak daha küçük yangınlar ve parçalanmış ekosistemler söz konusu olduğunda, düşük mekansal çözünürlüklü uydu görüntüleri, yangın sonrası hasar tespiti çalışmaları için yetersiz olabilmektedir. Bu nedenle, Landsat, Sentinel-2 ve SPOT 6/7, WorldView, Pleiades gibi orta veya yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri bu gibi alanlarda uygulanacak yanmış alan analizi için daha detaylı bilgi üretilmesine olanak sağlamaktadır (Persson, 2016; Quintano, Fernández-Manso, & Fernández-Manso, 2018; Deur vd., 2020).

Ayrıca, yenilikçi teknolojilerin gelişmesiyle pasif ve aktif uzaktan algılama veri setlerinin füzyon süreçleri aracılığıyla entegre bir şekilde birleştirilebilmesi sayesinde LİDAR verileri ile birlikte saha verileriyle kalibre edilmiş çok zamanlı optik uydu görüntüleri birleştirilerek orman yapısındaki değişiklikler araştırılabilmekte ve yangın sonrası yaban hayatı habitatlarının haritaları üretilmektedir (Bolton, Coops, & Wulder, 2015; Meng vd., 2018; Vogeler, Yang, & Cohen, 2016; Pérez-Cabello, Montorio, & Alves, 2021). Çeşitli algılayıcılarla elde edilen verilere görüntü işleme yöntemleri uygulanarak orman yangınlarının yönetimi için kısa sürede bilgi üretilmektedir. Bu amaçla görüntü yorumlama, orman örtüsü veya yanmış örtünün belirlenmesine yönelik farklı görüntü indeksleri ya da sınıflandırma algoritmaları kullanılarak bilgi üretilmektedir (Lu vd., 2017). Örneğin, yakın kızılötesi (Near Infrared- NIR) ve kısa dalga kızılötesi (Shortwave-Infrared - SWIR) bantlar kullanılarak üretilen Normalize Edilmiş Yanma Oranı İndeksi (Normalized Burn Ratio - NBR) ya da yangın öncesi ve sonrası oluşturulan indekslerin farkı alınarak oluşturulan Fark Normalize Edilmiş Yanma Şiddeti (Difference Normalized Burned Ratio-dNBR) ile yanmış orman alanları ve yangından etkilenme durumu, kısa sürede belirlenebilir (Roy, Boschetti, & Trigg, 2006; Escuin, Navarro, & Fernández, 2008; URL-2, 2021; URL-3, 2021).

$$NBR = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR} \quad (1)$$

$$dNBR = \text{Yangın öncesi } NBR - \text{Yangın sonrası } NBR \quad (2)$$

Günümüzde ücretsiz erişilebilen uydu görüntü arşivleri ve görüntü işleme platformları ile uzaktan algılama verilerinden bilgi üretmek daha da erişilebilir hale gelmiştir (Dervisoglu vd., 2019; Jahromi vd., 2021).

Yanıcı maddeler; toprakta, toprak üstünde ve daha yüksekte bulunabilen ve tutuşup yanabilen, yanmaya veya tutuşmaya eğilimli herhangi bir madde ya da karışım olarak tanımlanmıştır (Robertson, 1971). Orman yangınlarında bu bileşenlerden sadece yanıcı maddeye müdahale edilebilmektedir. Yanıcı madde özellikleri mekânsal olarak çok değişkenlik göstererek, yangın riski ve yangın davranışını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yerleşim yeri civarında yer alan orman yanıcı maddeleri özellikleri ve yanıcı madde yüklerinin belirlenmesinde uydu görüntüleri önemli katkılar sağlar. Uydu görüntülerinin spektral çözünürlüğündeki artış ve hiperspektral veriler ve derin öğrenme gibi görüntü işleme yöntemleri ile farklı türlerin ayırt edilebilirlikleri artmakta ve bu bilgiler yanıcı madde yükünün hesaplanmasında önemli bir girdi oluşturmaktadır. Yangın sırasında ise yanan orman alanı, yangının ve dumanın dağılışı, yönü gibi yangın davranışını temsil eden özelliklerin belirlenerek müdahalelerin zamanında yapılmasında yüksek zamansal çözünürlük en önemli parametredir. Günümüzde afete hassas bölgelerde sürekli aynı bölgeyi izleyen uydular olduğu gibi yörüngeleri birbirini takip eden takım uydular ya da küp uydularla yüksek zamansal çözünürlük sağlanarak orman yangınları ve etkileri izlenebilmektedir (Barmpoutis vd., 2020).

### **CBS VE BULANIK ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ (BAHP) İLE ORMAN YANGIN RİSK ANALİZİ: ÇAKIRLAR ORMAN İŞLETME ŞEFLİĞİ, ANTALYA ÖRNEĞİ**

Yangın öncesi risk analizlerinin gerçekleştirilmesinde, yangın sırasında müdahalelerin yönlendirilmesinde ve yangın sonrasındaki değerlendirmelerde, planlamalarda, kararların zamanında alınmasında ve sistemin sürdürülebilirliğinin sağlanmasında CBS büyük katkı sağlar. Bu amaçla literatürde yayınlanmış farklı çalışmalar bulunmaktadır. Muşoğlu, Cetin & Kaya (2001), Gelibolu Yarımadası'nda meydana gelen

orman yangınının etkilerini uydu verilerinden belirlemişler. Kurgun, Erten ve Musaoglu (2004) ve Erten, Kurgun ve Musaoğlu (2005)'te Gelibolu Yarımadası'nda uzaktan algılama ve CBS kullanılarak yangın riski belirleme ve yangın bilgi sistemi oluşturulması üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bununla birlikte uzaktan algılama teknikleri ve CBS ile özellikle kapalılık ve meşcere ortalama boyu parametreleri kullanılarak yanıcı madde miktarı tahminleri yapılmakta ve yanıcı madde haritaları oluşturulabilmektedir (Clark, 2009). Zamansal Landsat uydu görüntüleri ile Antalya'da yapılan bir başka çalışmada orman alanlarında ve farklı türlerde orman alanlarında meydana gelen değişimler ve değişimlere etki eden parametreler belirlenerek gelecek tahminleri gerçekleştirilmiştir (Musaoğlu vd., 2014; Türkeş & Musaoğlu, 2016).

Yangınların etkilerinden başlıcaları, toprak mikrobiyal süreçlerinin uyarılması, toprak ısınması, ağaç ölümleri, biyomas tüketimi yoluyla karbon salınımı, duman üretimi ve duman yayılımı, erozyon ve bitki örtüsünün birbirini takip etmesi sonucu hava kalitesine ve atmosfer kimyasına verilen zarar vb. olarak sıralanmıştır (Lentile vd., 2006; DeBell, Talbot, & Dibb, 2004). Bu zararların azaltılması için orman risk analizi değerlendirmelerinin gerçekleştirilmesinin önemi artmaktadır. Bir risk değerlendirmesinin önemi, riske dayalı olasılıkların ve bunların yönetimine ilişkin bilgilerin (Miller & Ager, 2013) taktik ve operasyona yönelik sentezi yoluyla karar destek sistemleriyle bütünleştirilmesine dayanmaktadır (Thompson & Calkin, 2011). Günümüzde artık orman yangın riskine ait yangın çıkma olasılığı, yoğunluğu ve etkileri şeklindeki bileşenlerini ölçme ve yangın yönetimine entegre etme konusunda gerekli mekansal veri (Miller & Ager, 2013)'nin bitki örtüsü indeksinin zaman serilerinden türetilen makine öğrenmesi yöntemleri ve dinamik bilgilerle yangın riskini tahmin etme (Michael vd., 2021), makine öğrenmesi ve yapay zeka kullanımına dayalı (Jain vd., 2020) bilgi teknoloji kullanımı giderek artmaktadır. Orman yangını risk analizlerinin önemli bir özelliği, yanıcı maddenin tutuşması, yangın davranışı ve yangın yönetimine ait çok değişkenli belirsiz faktörlere sahip olmasıdır (Martinez, Vega-Garcia & Chuvieco, 2009; Rodrigues & Riva, 2014; Thompson & Calkin, 2011). Bunlardan örneğin, tutuşma olasılığına ait belirsizlikler sayılacak olursa, ince yakıt nem içeriği, yanıcılık, hava sıcaklığı, topografik güneşlenme miktarı, orman tabanında yer alan yanıcı maddenin gölgelenme süresi ve miktarı ile tutuşma kaynağının oluşumuna ait sebeplerdir (Rodrigues & Riva, 2014; Rothermel, 1983; Vasconcelos

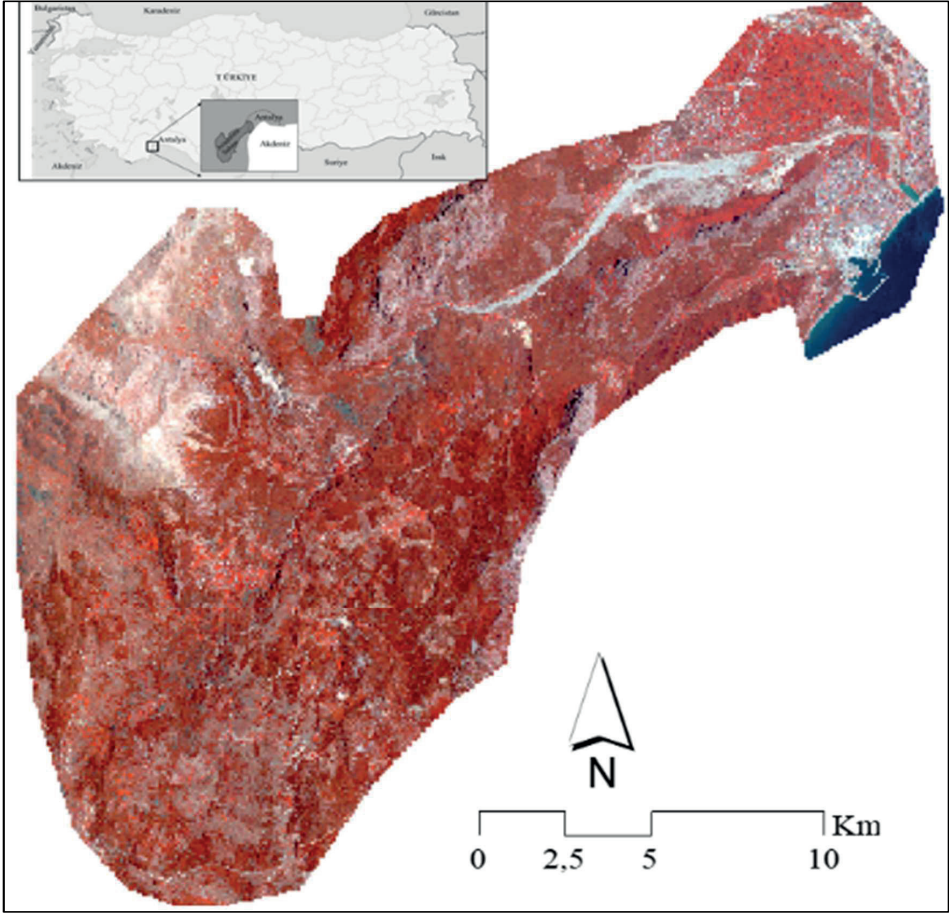
vd., 2001). Yangın davranışı açısından riskler ise genellikle bir orman yangınının belirli bir süre boyunca belirli bir alanı yakma olasılığı, bir yangının birim alanda birim zamanda açığa çıkardığı ısı enerjisini ifade eden yangın hattı şiddeti ve yangın etkilerinin karakterize edilmesi ile değerlendirilir (Ager, Vaillant & Finney, 2011; Thompson & Calkin, 2011). Etkili bir yangın karar desteği sağlamak için belirsizlikler yüksek doğrulukla açıklanabilir olmalıdır. Bunu sağlamak için öncelikle mekansal örüntülerin belirsizliklerini ortaya çıkarmak, nedenlerini bilmek ve yangın önleme ve tutuşma olasılığı açısından yüksek kaliteli alternatif kararlar alabilmek önemlidir (Martinez vd., 2009; Rodrigues & Riva, 2014).

BAHP, orman yangını ile ilişkili belirsizlikleri ile ortaya çıkan yüksek olasılıklı risklerin belirlenmesi (Iliadis, 2005), sonuçların küresel ölçekte stratejik bir araç olarak kullanılması ve yerel ölçekte yangın kontrol önlemlerinin uygulanmasına olanak sağlamaktadır (Vadrevu, Anuradha & Badarinath, 2010). CBS kullanarak çok kriterli karar vermede klasik Çok Kriterli Değerlendirme (Multi-Criteria Evaluation, MCE) prosedürleri (ağırlıklı doğrusal kombinasyon ve Boolean bindirme) ile Bulanık Çok Kriterli Değerlendirme (Fuzzy Multi-Criteria Evaluation, FMCE) arasında iki önemli fark vardır. Başlangıçta, kriter ve karar kümesi arasındaki belirli ilişkiler, ağırlıklı doğrusal kombinasyonların aksine FMCE üyelik değerlerinin standardizasyonunda temsil edilebilir. İkinci olarak, bulanık kümeler, [0,1] arasındaki belirsizliği dikkate almayan, ağırlıklı doğrusal kombinasyon gösteriminde Boolean değerlendirmesi ile sürekli ölçekleme arasındaki büyük bir boşluğu kapatmaktadır.

## ARAŞTIRMA SAHASI

Bu çalışma, Akdeniz'in batı kıyısında Antalya il merkezine bitişik Çakırlar havzasındaki ormanlarda yapılmıştır (Şekil 2). Bu havza son yıllarda rekreasyon, yeni yerleşim, taş ocağı vb. insan talepleriyle karşı karşıyadır. Öte yandan buradaki ormanlar, bu taleplerle birlikte artan bir yangın riski ile karşı karşıyadır. Çakırlar havzası 23.746,62 ha'lık bir alana sahiptir ve bunun %61,5'i ormanlık alandır. Orman alanlarının %78,55'i orman yangınlarına duyarlı kızılçam ormanları ve makiliklerden oluşmaktadır. Bu bölge orman yangınları açısından ülkenin en tehlikeli bölgelerinden biridir. Çalışma alanında 1988-2014 yılları arasında meydana gelen yangın sayısı, Antalya ili ortalamasının biraz altında olmakla birlikte, Türkiye ortalama-

sının çok üzerindedir (Tablo 1). Havzanın % 76'sı  $>10^\circ$  eğime sahiptir ve genel topografya derin vadiler ve uzun yamaçlara sahiptir. Alanın yükseltiliği 0 ile 2649 m arasında değişmektedir. Genel topografya, derin vadilerle kaplı dağlık ve tepelik olarak tanımlanabilmektedir. Sahil kesimi düzlük olup, yoğun yerleşim yerleri ve tarım alanlarından oluşmaktadır.



Şekil 2. Araştırma sahasının yer bulduru haritası ve 25.6.2021 tarihli SPOT 6 görüntüsü

Tablo 1. Araştırma sahasının 1988-2014 yılları arası ortalama yangın ve yanmış alan sayısının il ve ülke düzeyi ile karşılaştırılması

Kapsam	Ort. Yangın Sayısı	Ort. Yanan Alan (ha)
Türkiye	39,41	207,93
Antalya	70,97	600,88
Çakırlar	66	186,88

## KRİTERLERİN YANGIN RİSKİNE GÖRE BELİRLENMESİ VE HİYERARŞİK YAPININ OLUŞTURULMASI

Bu çalışmada, yangın riski oluşturan nedenler klasik Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) tekniğine uygun olarak (Saaty, 1977) hiyerarşik bir düzende oluşturulmuştur (Tablo 2). Birinci düzey, yangın riskini belirleyen kriterler olarak sosyo-ekonomik, topografik, iklimsel ve orman meşcere yapılarını içerirken, alt kriterleri ise Düzey 2’de yapılandırılmıştır. Her bir alt kriter için kategorik değişken faktörler Tablo 2’de verilmiştir.

### Sosyo-ekonomik özellikler

Yangın riskinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda insan temelli faaliyetleri tanımlayan sosyo-ekonomik özellikler (arazi örtüsü, nüfus yoğunluğu, yol erişilebilirliği, ormana uzaklık, vb.) genellikle tutuşmaya neden olan bir faktör olarak varsayılmaktadır (Bonora vd., 2013; Catry vd., 2009; Cardille, Ventura & Turner, 2001). Yanıcı maddenin yapısal özelliklerinin arazi kullanımıyla bağlantısı, yangının gelişimi ve yayılması üzerindeki etkisi olarak değerlendirilmiştir (Cardille vd., 2001). Bu çalışmadaki yangınların yoğunluğu, esas olarak yerel halkın işsizlik oranının yüksek olması, eğitim ve gelir düzeylerinin düşük olması ve yetersiz tarım mekanizasyonu (Coşgun vd., 2010) ile ilişkilendirilmiştir. Çalışma alanındaki tüm arazi kullanımları farklı etkileri için risk analizine tabi tutulmuştur. Aynı sahada arazi kullanım tiplerinin belirlenmesi amacıyla yapılan bir çalışmada (Güngöroğlu vd., 2018) 29 adet arazi örtüsü tipi belirlenmiş ve bu çalışma için yeniden sınıflandırılarak 5’e düşürülmüştür (Tablo 3).

Tablo 2. Kriterlerin, alt kriterlerin ve faktörlerin hiyerarşik yapısı, ağırlıkları ve Tutarlılık Oran (TO)'ları

TO	Kriter	Ağırlık	TO	Alt Kriter	Ağırlık	TO	Faktör	Ağırlık				
0,058	Sosyo-ekonomik	0,35	0,058	Yollara olan mesafe (m)	0,25	0,010	Karayollarından 100 m	0,46				
							Köy yollarından 50 m	0,33				
				Enerji hatlarına olan mesafe (m)	0,23	0,085	Orman Yollarından 25 m	0,21				
							Alçak enerji hatlarından 20 m	0,39				
				Yerleşimlere olan mesafe	0,20	0,059	Yüksek enerji hatlarından 40 m	0,61				
							Dağlık süreksiz yerleşim yerlerinden 100 m	0,12				
							Süreksiz yerleşim yeri çevresinden 200 m	0,19				
							Süreksiz yerleşim yerinden 300 m	0,27				
				0,058	Sosyo-ekonomik	0,35	0,058	Nüfus yoğunluğu (km <sup>2</sup> /kişi)	0,18	0,031	Süreksiz yerleşim yerinden 400 m	0,42
											I>	0,03
1-10	0,06											
10-50	0,19											
Arazi örtüsü tipi	0,14	0,006	50-100					0,29				
			100<					0,43				
0,046	Topografik	0,25	0,046					Eğim derece sınıfları	0,32	0,001	Yüksek derecede yanıcı ormanlar ve çalılıklar	0,26
											Yüksek enerji hatları	0,23
											Düşük yanıcı ormanlar	0,20
											Rekreasyonel alanlar	0,14
				Düşük vejetasyonlu alanlar	0,10							
				Yerleşim yeri ve çevresi	0,07							
				>30°	0,29							
				10°- 30°	0,26							
5°- 10°	0,21											
0,046	Topografik	0,25	0,046	Yükselti sınıfları (m)	0,23	0,073	2°-5°	0,15				
							0°- 2°	0,08				
							0-250	0,46				
							250-500	0,31				
							500-1000	0,26				
							1000-1500	0,03				
							>1500	0,00				
							S	0,30				
							W	0,25				
							Düzlük	0,23				
E	0,13											
N	0,09											



				276.382-611.782	0,11
Yıllık güneşlenme radyasyonu (WH/m <sup>2</sup> /yıl)	0,16	0,015		611.782-947.182	0,14
				947182-1.282.582	0,20
				1.282.582-1.617.982	0,26
				1.617.982-1.953.353	0,30
				476-7,57	0,43
Topografik ıslaklık endeksi	0,11	0,026		7,57-8,3	0,29
				8,3-9,2	0,19
				9,2-10,1	0,08
				10,1-32,37	0,01
				16°-18°	0,37
				14°-16°	0,26
				12°-14°	0,22
				8°-12°	0,11
				4°-8°	0,05
İklim	0,23	0,003		900-1000	0,38
				1000-1100	0,32
				1100-1200	0,30
				100-70	0,39
				70-40	0,27
				10-40	0,21
				<10	0,13
Meşcere yapısı	0,17	0,062		0-7,99 cm	0,29
				8-19,99 cm	0,25
				20-35,99 cm	0,20
				>36 cm	0,15
				boşluklu	0,11
				≥3	0,42
Ağaç türü karışımı (tür sayısı)	0,24	0,083		2	0,33
				1	0,25

**Tablo 3.** Sınıflandırılmış arazi örtüsü türleri

Yüksek derecede yanıcı ormanlar ve çalılıklar	Kızılçam ormanları ve makilikler, yüksek gerilim elektrik hatları
Düşük yanıcı ormanlar	Karaçam, sedir ve ardıç ormanları, dağ çalılıkları, nehir kıyısı ormanları
Rekreasyonel alanlar	Piknik alanları
Düşük yoğunluklu bitkili alanlar	Kayalıklar, seyrek bitki örtüsü olan alanlar, sulanmayan ekilebilir araziler, otlak alanlar, doğal bitki örtüsüne sahip tarıma dayalı araziler vb.
Yerleşim yeri ve çevresi	Sürekli şehir yapısı, kesikli/süreksiz şehir yapısı, endüstriyel ve ticari birimler, sürekli sulanan alanlar, sürekli ürün bulunan alanlar

Bu arazi örtülerinden kızılçam ormanları ve yol ilişkisi Şekil 3’de, kesikli/süreksiz şehir yapısı örneği ise Şekil 4’de verilmiştir.



**Şekil 3.** Kızılçam alanlarında orman yolu kenarlarında tutuşmadan kısa bir süre sonra tepe yangınına sebep olacak yanıcı madde düzeni



**Şekil 4.** Düşük yükseltide kesikli/süresiz yerleşimler.

## Topografya

Rüzgar hızı, yakıt nem içeriği, hava sıcaklığı, bağıl nem, güneşlenme süresi ve miktarı, toprak nemi ve yağış faktörleri gün boyunca yükseltiyeye bağlı olarak değişime uğramakta ve bunun sonucunda yangın davranışı değişimini etkileyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır (Hayes, 1941).

Yangın, ön ısıtma ve ön kurutma ile mevcut orman tepe çatısında bulunan yanıcı maddenin yanmasını artırarak yüksek eğimlerde daha hızlı yayılmaktadır (Bonora vd., 2013; Bennet vd., 2010). Topografik bakıya bağlı olarak güneş radyasyonu artmakta veya azalmaktadır. Bu, yakıt nem içeriğinin hızlı veya yavaş azalmasında etkilidir (Bonora vd., 2013). Çalışma alanında yükselti deniz seviyesinden 2649 m'ye kadar değişmektedir. Alanın %56'sını güney bakılı yamaçlar oluşturmaktadır. Çalışma alanının %70'i deniz seviyesinden 500 m'nin üzerinde ve sahanın %76'sı >10 eğime sahiptir. Bu çalışmada, yükselti ve yamaç bakılarının tutuşma açısından, eğimin ise esas olarak yangının yayılması açısından bir risk oluşturduğu öngörülmüştür. Güneşlenme miktarı ve Topografik Islaklık Endeksi (To-

pographic Wetness Index TWI), topografya ve hava koşullarının bir fonksiyonu olarak, orman tabanı örtü maddelerinin (organik elementler, altlık ve humus tabakası, canlı bitki örtüsü, vb.) nem içerik miktarları üzerinde bir etkisi olduğu varsayılmıştır. Bu çalışmada, güneşlenme miktarının yangın risk etkisi TWI'ye kıyasla daha olumsuz olarak kabul edildiğinden, ağırlıklı risk oranı artırıldı. Böylece, güneşli ve gölgeli alanlar arasında yangın riski açısından önemli bir farkın ortaya çıkması öngörülmüştür.

## İklim

Havanın, özellikle orman tabanı örtü nemi açısından günlük ve mevsimlik kuruma/soğumaya dayalı kısa ve uzun vadeli etkileri vardır (Ben-net vd., 2010). Yalnızca meteorolojik değişkenlere dayalı günlük yangın tehlikesi derecelendirme sistemleri oluşturulmuştur (Pereira vd., 2005). Yüksek sıcaklık buharlaşmayı artırarak yanıcı türlerinin hızlı kurumasını sağlamakta ve bunun sonucunda tutuşma sıcaklığı için uygun koşullar ortaya çıkmaktadır (Bonora vd., 2013). Yağışlar, yakıt biyokütlesi açısından zengin olan orman ve tarımsal ekosistemlerin su dengesinin düzenlenmesi için önemlidir. Akdeniz bölgesindeki yağışların zamanlaması ve miktarı, bitki örtüsünün fizyolojik gelişiminde önemli bir rol oynar ve yangınların değişkenliğini etkilemektedir (Pereira vd., 2005). Çalışma alanı için Çamalan ve Çamalan (2004) tarafından belirlenen aylık sıcaklık ve yağış ortalamalarının mekansal dağılımı, bulanık dilsel ölçekler doğrultusunda yeniden haritalanmıştır. Bu ölçeğin oluşturulmasında sıcaklığın artması ve yağışların azalması belirleyici olmuştur.

## Meşcere Yapısı

Bir orman yangının üç temel bileşeninden (yanıcı madde, hava durumu ve topografya) her birinin yangın davranışı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu bileşenlerden yanıcı madde esas olarak orman yapısı ile ilişkilidir ve kontrol edilebilen tek bileşendir. Orman meşcere seviyesinde yanıcı madde matrisinin yatay ve dikey bileşenleri yangın ve orman yapısı arasındaki bağlantı olarak ilişkilendirilir (Agee, 1996). Orman meşcerelerinin yanıcı madde matrisi, bir ormanın alt, orta ve üst katlarında, veya örtü, merdivenimsi ve ağaç tepe yanıcıları şeklinde canlı ve ölü bitki örtüsü katmanlarından oluşabilir. Örtü (orman tabanındaki ölü ve canlı yanıcı maddeler) ve tepe yanıcı yapılarına ek olarak, yangına eğilimli

alanlardaki ağaç ve çalı türleri ve yanıcı orman bitki örtüsü türleri, doğal yangın rejimleri risk değerlendirme analizlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma alanındaki çam ve çeşitli maki bitkilerinden oluşan fundalık alanlar Türkiye’de yangına duyarlı olarak nitelendirilmektedir. Çalışma alanı Akdeniz kıyı kuşağında yer alan ve Türkiye koşullarında orman yangınlarına birincil açıdan duyarlı bir bölgede yer almaktadır (OGM, 2013). Çalışma alanı içerisinde kızılçam ve makilikler alçak rakımlarda, karaçam, sedir, ardıç ve meşe türleri ise daha yüksek rakımlarda yayılış göstermektedir. Bu çalışmada, yüksek kapalılıklı meşcere kütle yoğunluğuna sahip orman meşcerelerinin aynı zamanda yüksek yüzey ve tepe biyokütlesine sahip olduğunu varsayılmıştır. Böyle orman meşcerelerinin insan veya yıldırım kaynaklı yangın riskine oldukça yakın olduğu öngörülmektedir (Rothermel, 1983).

## BULANIK ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ

BAHP’de Saaty (1977) tarafından geliştirilen klasik AHP tekniğine uygun olarak yangın riski oluşturan sebepler hiyerarşik bir düzende oluşturulmaktadır. Birinci düzey, yangın risklerini belirleyen kriterler olarak örneğin sosyoekonomik, topografik, iklimsel ve orman meşcere yapılarını içerirken, bunlara ait alt kriterleri ise seviye 2’de yapılandırılmıştır. Bulanık kümeler ilk kez Zadeh (1965) tarafından sürekli üyelik dereceleri olan bir nesne sınıfı şeklinde tanımlanmıştır. Her küme, 0 ile 1 arasında belirlenen nesnelerin üyelik dereceleri ile karakterize edilir. Bulanık küme teorisi, Zimmerman (2010) tarafından şu şekilde tanımlanmıştır:  $X$ , genel olarak  $x$  ile gösterilen bir nesnelere topluluğuyorsa,  $X$ ’teki bir bulanık küme  $\tilde{A}$ , sıralı çiftler kümesidir:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x) | x \in X)\}$$

$\mu_{\tilde{A}}(x)$ ,  $X$ ’i  $\mu$  üyelik arasına eşleyen üyelik fonksiyonu (genelleştirilmiş karakteristik fonksiyon) olarak adlandırılır:

$$\mu_{\tilde{A}}(x): X \rightarrow [0, 1]$$

Burada  $\mu_{\tilde{A}}(x)$ , yalnızca 0 ve 1 olarak temsil edilen bir ikili mantık sistemi tarafından yeterince açıklanamayan durumlarda, nesne sınıflarının üyelik derecelerinin tam olarak tanımlanamadığı bulanık kümelerdeki  $X$ ’in üyeliği olarak Zadeh (1965) tarafından kullanılabilir olarak belirlen-

miştir. Yangın risk analizi çalışmalarında BAHF'den beklenen en önemli katkı, yangın riskini oluşturan kriterlerin önem derecelerinin ve alt kriterlerinin ilgili faktörler açısından ağırlıklarının belirlenmesine olanak sağlamasıdır. Öncelikle yangın risk değerlendirmesinde kullanılacak kriterler, alt kriterler ve bunların faktörleri hiyerarşik olarak AHP tekniğine uygun olarak belirlenmektedir. Daha sonra, Chang (1996)'ın kapsam analizi yönteminin ikili karşılaştırma matrisleri kullanılarak kriterlerin, alt kriterlerin ve faktörlerinin ağırlıkları çeşitli aşamalardan geçirilerek saptanmaktadır. İkili karşılaştırma matrislerinin ve tutarlılık indeksinin tutarlılığını analiz etmek için tutarlılık oranı hesaplanarak aşamalarda belirlenen karşılaştırmaların tutarlılığı kontrol edilmektedir.

## RİSK KRİTERLERİNİN AĞIRLIKLANDIRILMASI

Bu çalışmada, BAHF'den beklenen en önemli katkı, yangın riskini oluşturan kriterlerin önem derecelerinin ve alt kriterlerinin ilgili faktörler açısından ağırlıklarının belirlenmesine olanak sağlamasıdır. Öncelikle yangın risk değerlendirmesinde kullanılacak kriterler, alt kriterler ve faktörleri hiyerarşik olarak belirlenmiştir (Tablo 2). Daha sonra Chang (1996)'ın genişletilmiş analizi yöntemi ve Demirel vd. (2009)'un ikili karşılaştırma matrisleri kullanılarak kriterlerin, alt kriterlerin ve faktörlerinin ağırlıkları aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

1.Adım: Bulanık yapay boyut değeri, i. nesneye göre şu şekilde tanımlanır:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M^j_{gi} \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M^j_{gi} \right]$$

$\sum_{j=1}^m M^j_{gi}$  matrisi, ifadeyi aşağıdaki gibi elde etmek için bulanık sayıların m değerlerinin eklenmesini üretir:

$$\sum_{j=1}^m M^j_{gi} = \left( \sum_{j=1}^m I_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right)$$

$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M^j_{gi} \right]^{-1}$  ifadesini elde etmek için  $M^j_{gi}$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) değerleri ile bulanık toplama yapılır.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left( \sum_{i=1}^n I_j, \sum_{i=1}^n m_j, \sum_{i=1}^n u_j \right)$$

bu adımın son aşaması, üçüncü denklemdaki vektörün tersini hesaplamaktır.

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n I_i} \right)$$

2. adım:  $M_1 = (l_1 m_1 u_1) \leq M_2 = (l_2 m_2 u_2)$  ifadesinin olasılık derecesi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))]$$

$M_1 = (l_1 m_1 u_1) \leq M_2 = (l_2 m_2 u_2)$  konveks bulanık sayılar aşağıdaki gibi eşdeğer olarak ifade edilebilir:

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1 & , m_2 \geq m_1 \\ 0 & , l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \end{cases}$$

3. adım: Bir dışbükey bulanık sayının k dışbükey bulanık sayıdan büyük olma derecesi olasılığı  $M_i (i = 1, 2, \dots, k.)$  ile tanımlanabilir

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ ve } (M \geq M_2) \text{ ve } \dots \text{ ve } (M \geq M_k)] \\ = \min V(M \geq M_i), i = 1, 2, \dots, k.$$

Varsayıldığında,

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$$

4. adım: Normalleştirme yoluyla, normalleştirilmiş ağırlık vektörlerin bulunması;

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T$$

burada  $W$  bulanık olmayan bir sayıdır.

5. adım: Dağdeviren ve Yüksel (2008)'e göre bağlı ağırlıkları ölçmek için göreceli öneme ilişkin bulanık ölççek Şekil 5 ve Tablo 4'te verilmiştir.

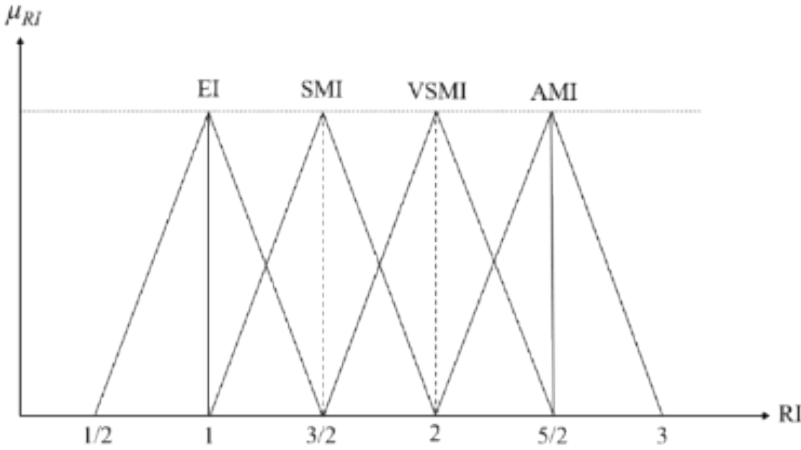
Aşağıda, tanımlanan ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlılığını analiz etmek için tutarlılık oranının (TO) kullanımı verilmiştir;

$$TO = TI/RI$$

Burada TI, aşağıdaki şekilde tanımlanan tutarlılık indeksidir. Tutarlılık oranı (TO), Tutarlılık indeksi ve Rastgele (tesadüfilik) İndeksi (RI) oranının oluşturulmasıyla elde edilir.

$$TI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$$

Burada  $\lambda_{max}$  matrislerin en büyük özdeğeridir ve n matris boyutudur.  $\lambda_{max}$  değeri n değerine ne kadar çok yakınsa bulunan sonuçlar da o kadar tutarlı bulunmaktadır. Kritik değer < 0,1 olarak alınmıştır. Burada RI, karar verici tarafından elde edilen karşılaştırma matrisinin tutarlılığına karar verir ve Saaty (1980)'nin matris boyutuna dayalı ortalama rastgele dizinini içermektedir.



Şekil 5. Göreceli önemi bulmak için kullanılan sözel ölçek

Tablo 4. BAHF'de göreceli önem için kullanılan bulanık ölçekler

Önem için dil ölçeği	Üçgen bulanık ölçek	Üçgen bulanık karşılık ölçek
Eşit önemli (EI)	(1,1,1)	(1,1,1)
Biraz daha fazla önemli (SMI)	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
Kuvvetli derecede önemli (VSMI)	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
Çok kuvvetli derecede önemli (AMI)	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Tamamıyla önemli	(2, 5/2, 3)	1/3, 2/5, 1/2)



## CBS İLE RİSKLİ ALANLARIN BELİRLENMESİ İÇİN BAHP AĞIRLIKLARININ HARİTALANMASI

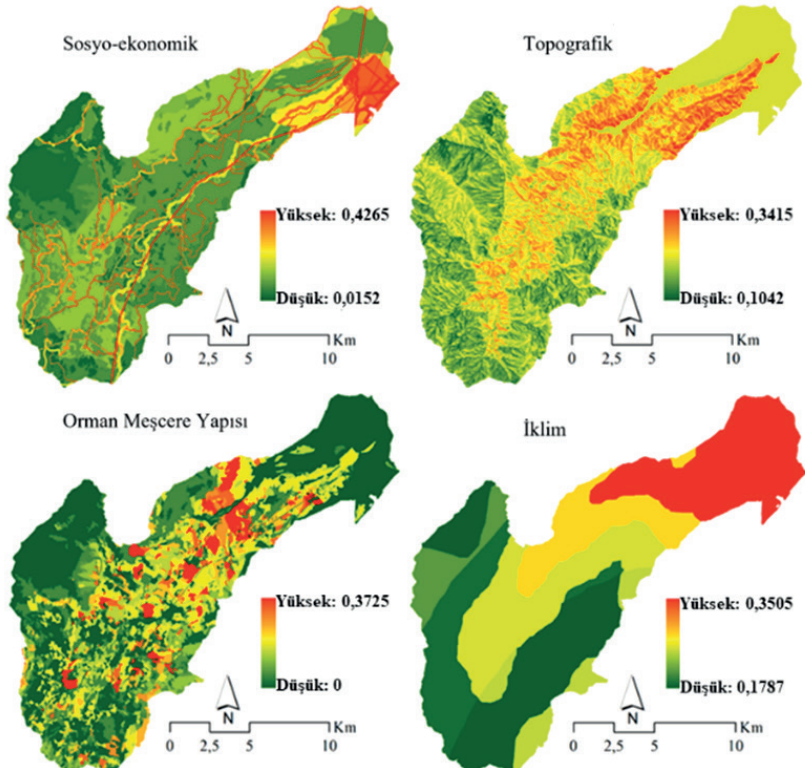
Bu çalışmanın son önemli adımı, CBS ile yangın risk derecelerinin mekansal haritalanmasını sağlamak için (0,1) aralığındaki bulanık ağırlıkların haritalarının üretilmesidir. Alt kriter haritaları, mevcut tematik vektör (orman meşcere haritası, arazi kullanım haritaları) ve raster tabanlı (ortalama yıllık ve sıcaklık ve yağış, sayısal yükseklik modeli) haritalardan oluşturulmuştur. Bu haritalar, CBS bindirme analizinde kullanılmak üzere bulanık ağırlık değerlerinin işlendiği 20 x 20 m raster haritalar olarak yeniden hazırlanmıştır. Faktörlerin ağırlıkları, sürekli raster değerleri olarak ilişkili alt kriterlere işlenmiştir. Ağırlıklı toplam (weighted sum) bindirme işlevi, kriter ve alt kriter haritalarını üst üste bindirmek için kullanılmıştır. Birkaç raster verisi, verilen ağırlıkla her biri ile çarpılarak ve bindirme işleviyle birlikte toplanmıştır.

Çalışma alanı için yangın verileri mevcut olduğundan, risk alanları bu verilere göre doğrulanabilir. Çalışma alanı için geçmiş yangın verileri, o zamanki orman meşcere türleri ile ilişkili olarak haritalanmıştır. Geçmişte yanmış meşcereler, yanan alan saha büyüklüğüne göre sınıflandırıldı (Tablo 5) ve BAHP risk sınıflarının doğruluk derecesini tahmin etmek için kullanılmıştır.

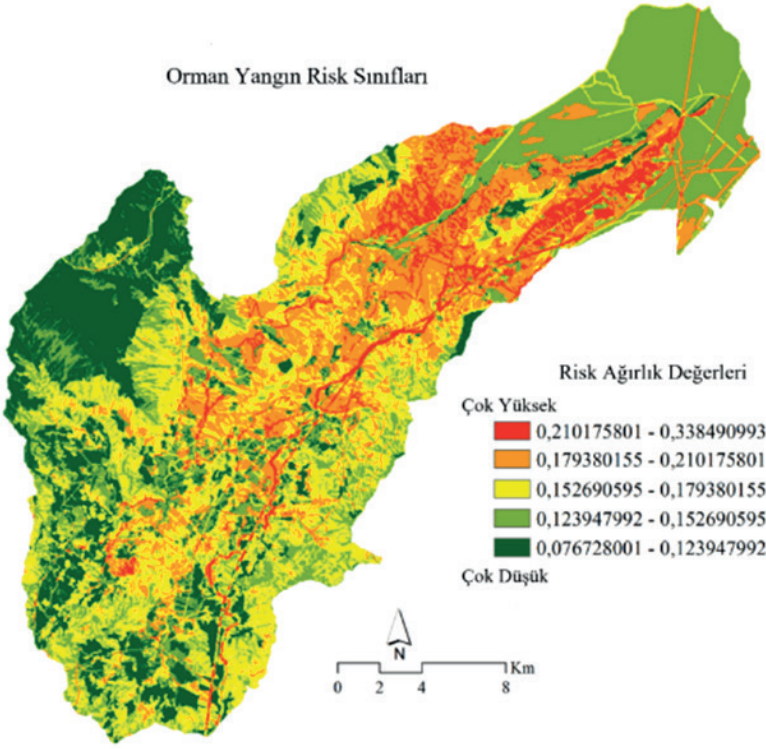
### BULGULAR

Sosyoekonomik kriterler yangın riski üzerinde %35 etkisi olan en önemli bir kriter olarak ortaya çıkmıştır (Tablo 2). Bu kriterin yüksek risk derecesine sahip alanları 0 ile 250 m arasındaki alçak rakımlı alanlarda yoğunlaşmaktadır (Şekil 6). Bu katmanda, özellikle sık rastlanan yollar, kentsel ve kentsel çevreler ve bunların civarındaki güneyli bakıldaki makilikler ve genç kızılçam ormanlarıyla kaplı dik eğimli alanlar yangın riskinin doruğa ulaştığı alanlar olarak ortaya çıkmaktadır. Dağlık alanlarda yüksek yangın riskinin ortaya çıkması, esas olarak yollardan ve elektrik hatlarından mesafeye bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Yangın riskini artıran bir diğer faktör de dağlık alanda süresiz yerleşimler yani köyler ve bunlara ait yerleşim parçalarıdır. Düşük yoğunluklu yollara sahip dağlık ve yüksek dağlık alanlarda ve yüksek yanıcı yükü özelliklerine sahip olmayan insan yerleşimlerinde oldukça düşük bir yangın riski ortaya çıkmıştır. Yüksek dağlık alanlarda, bakı, güneşlenme miktarı ve diğer topografik faktörler asgari düzeyde ve daha sınırlı alanlarda mekânsal risklere sebep olmuştur.

Topografya %25 ile, ikinci ağırlıklı yangın riski kriteri olarak yer almıştır. Topografyanın üstün ağırlığı, sosyoekonomik alt kriterlerin önemsiz olduğu çeşitli büyüklükteki yan havzalarda görülmektedir. Eğimleri  $>30^\circ$  olan, yıllık ortalama sıcaklığı 0 ile 250 m arasında olan alanlarda oldukça yüksek bir yangın riski ortaya çıkmıştır. Yangın riskini etkileyen diğer kriterler arasında %23'lük ağırlık ile iklim üçüncü sırada gelmiştir. Ancak, "yıllık ortalama sıcaklık" alt kriterler içerisinde, %61 ağırlık ile diğer alt kriter arasında en anlamlı faktör olarak çıkmış ve bunlar arasında yangın riskini etkilemede en etkili alt kriter olarak kendini göstermiştir (Tablo 2). Çalışma alanındaki yıllık ortalama sıcaklıkların mekânsal dağılımındaki büyük farklılıklar onun önemini artırmıştır. Sıcaklığın dağılımına bağlı olarak kızılçam ormanları ve Akdeniz tipi çalılıklarının yüksek yangın riskleri sergilemesi şaşırtıcı değildir. En düşük yangın riski, arazi kullanımının oldukça düşük olduğu dağlık alanlarda yayılan sedir, çam ve ardıç ormanlarının doğal yaşlı meşcerelerinde görülmüştür (Şekil 7). Buna karşın en yüksek risk sınıfı farklı arazi kullanım tiplerinin kızılçam ve makilik alanlarla iç içe bulunduğu alçak rakımlı alanlar olup, Şekil 8'de bu tip alanlar gösterilmiştir.



Şekil 6. Kriterlerin bulanık ağırlıklarının aralığını [0,1] gösterir haritalar



Şekil 7. Orman yangın risk sınıfları bulanık aralık değerlerine göre haritası

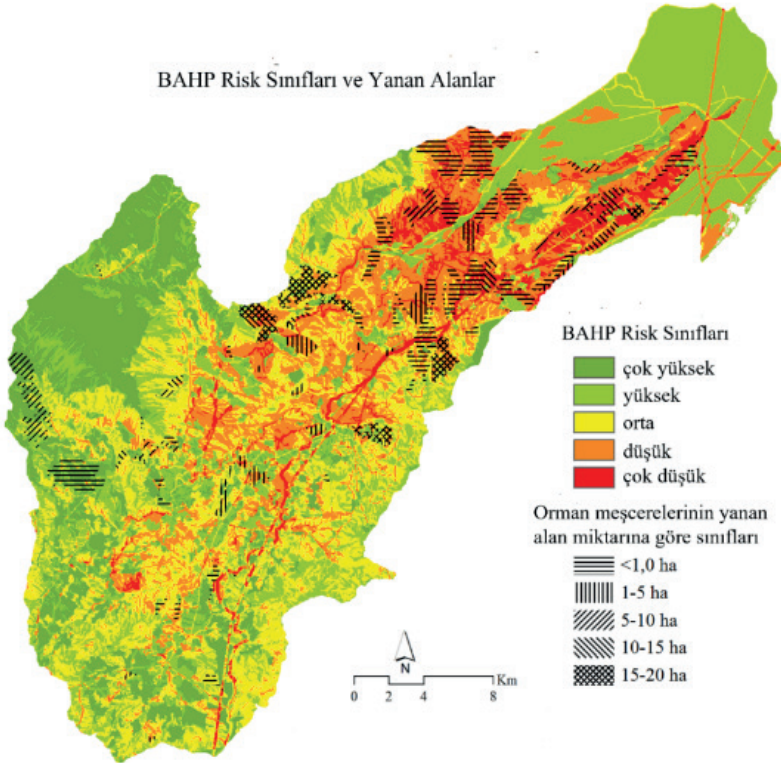


Şekil 8. Orman yangın riskinin çok yüksek çıktığı düşük yükseltideki yerleşim yerlerine bitişik kızılçam ormanları

BAHP risk derecelerini % doğruluğunu test etmek için geçmiş yıllarda yanan alanlar ve yangın risk sınıfları haritası birlikte bindirilmiş (Şekil 9), kullanılan doğruluk değerlendirmesine göre “yüksek” risk derecesi, diğer BAHP risk sınıfları arasında tüm yanmış alan miktarı sınıflarında %50’ye yakın en yüksek doğruluğa sahip çıkmıştır (Tablo 5). “orta” risk sınıfı ikinci en yüksek doğruluğa sahiptir. BAHP’nin düşük risk sınıfları, tüm yanan alan miktarları arasında en düşük doğruluğa sahiptir.

**Tablo 5.** BAHP risk derecelerinin yanan alanlarda doğruluk değerlendirmesi

BAHP risk derecesi	Yanan Alan Sınıfları				
	<1,0 ha	1,0-4,99 ha	5,0-9,9 ha	10,0-14,99 ha	15,0-20,0 ha
Çok Düşük	7,88	3,56	20,53	0,24	1,62
Düşük	8,03	4,73	18,85	4,20	8,81
Orta	17,97	24,27	19,47	17,07	44,91
Yüksek	47,75	53,97	23,83	40,01	40,00
Çok Yüksek	18,37	13,47	17,32	38,48	4,66
	% 100,00	% 100,00	% 100,00	% 100,00	% 100,00



**Şekil 9.** Orman meşcerelerinin yanan alan miktarına göre sınıfları

Bu çalışmanın sonuçları birkaç CBS işlemi ile birlikte kullanılarak, yangın riski yönetimi için kararlar önerebilir durumdadır. Örneğin, yangın risk haritası veritabanı, yangın mevsimlerinde yangının tutuşma olasılığının yüksek olduğu bölgeleri, yerleşim alanları civarındaki yangın riski ve buralardaki yangın önleyici tedbirlerin şiddetini belirlemek, yangın gözetleme kuleleri için öncelikli alanları ve yetersiz su kaynakları nedeniyle yangın suyu havuzlarının gerekli olduğu yerleri ve hassas dönemlerde söndürme ekiplerinin konuşlandırılmasını belirlemek için kullanılabilir. Ayrıca, yüksek yangın yayılım hızını azaltmak amacıyla, eğim ve tepe kapalılığı/yanıcı yükü açısından yüksek riskli alanlar dikkate alınabilir ve bu ormanlar yanıcı maddeyi azaltmak için silvikültürel tedbirlerin uygulanacağı alanlar olarak seçilebilir. Bu şekilde çalışmada kullanılan kriterlere ve faktörlere bağlı olarak risk yönetimi açısından alana özgü mekansal kararlar alınabilir. Nitekim Reinhardt vd. (2008) tarafından en uygun yanıcı madde yönetimine dayalı tedbirin sadece orman tipi veya mekansal özellikler bağlamında tek bir ölçekte tasarlanamayacağı ve meşcere yanıcı madde düzeninin risk yönetimi bakımından tedbirlere bağlı olarak müdahale edilmesinde sahaya özgü sayısız faktörün rolü olduğu belirtilmiştir.

Her bir kriterin diğerlerine göre önemi veya tercihi, risk kararı verme açısından önemli olan ağırlıklandırma ile belirlenmektedir. Ağırlıklandırmanın belirlenmesinde ne kadar uzman görüşü aranır veya istatistiksel yöntemler kullanılırsa kullanılsın öznellikten kaçmak mümkün değildir (Chen, Blong & Jacobson, 2001). Bununla birlikte, bulanık çok kriterli risk değerlendirmesinde, gradyan risk derecelerini elde etmek ve bunları CBS raster değerleri ile uzamsal olarak görüntülemek için gerektiği kadar çok değişken kullanılabilir. Bu risk yönetimi açısından büyük avantajlar sağlar (Malczewski & Rinner 2015; Jiang & Eastman 2000). Bunun önemi, risk faktörlerine bağlı riskleri en aza indirecek önlemlere karar vermek için gerekli nicel veri tabanını bir sistem içerisinde hazır bulundurması ile kendini göstermektedir.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Orman yangınları tüm Dünya’da olduğu gibi ülkemiz için de büyük can ve mal kayıplarına neden olan felaketlerdir. Afetlerin ortaya çıkmadan önce tahmin edilmesi önlemlerin zamanında alınmasına

önemli katkılar sağlamaktadır. Orman yangınlarının önlenmesi temel hedef olmakla birlikte yangın durumunda en az etkilenebilirliğin sağlanması da çok önemlidir. Yangından etkilenebilirliğin belirlenmesinde ve risk analizlerinin yapılması ve güncel tutulması aşamasında da hızlı ve doğru veri akışı ve bu verilerin birlikte analizi önem taşır. Yersel çalışmalarla sürekli veri sağlanmasındaki zorluklar uzaktan algılama verileri kullanılarak minimum arazi çalışması ile yapılacak doğrulamalarla aşılabılır. Ayrıca farklı platformlardan ve farklı algılayıcılardan elde edilen verilerin entegrasyonu ile çalışma alanına ilişkin daha yüksek doğruluk ve detayda bilgi çıkartılabilir. Standartlara göre üretilen tüm sonuçlar bölgeye ait meşcere haritaları, topografik veriler, meteorolojik veriler, ulaşım ağı vb. bilgiler ile birlikte coğrafi bilgi sistemleri ortamında analiz edilerek risk değerlendirmeleri gerçekleştirilerek önlemlerin zamanında alınması sağlanabilir. Çeşitli uzaktan algılama araçları devam eden orman yangınlarının kontrol altına alınmasında, yangın hareket merkezinde karar vericilerin ihtiyaç duyduğu mekansal ve zamansal doğruluğu yüksek anlık verilerin kazanılmasında büyük faydalar sağlamaktadır. Yangınların, tutuşma ve atağa geçme arasında kalan zaman diliminde uzaktan algılama araçlarıyla tespit edilmesiyle yangının yayılışı, şiddeti, yanıcı madde tüketim miktarı vb. yangın davranışı verilerinin tespiti sağlanabilmektedir. Bu verilere ve yangın söndürme tekniğine bağlı olarak yangın söndürme araçlarının etkin olarak konuşlandırılmasına katkı sağlanabilmektedir. Yangın öncesinde ise tutuşma riski yüksek olan ince yanıcıların yoğunlukta bulunduğu alanların ve AÖ/AK verilerinin güncellenmesinde yine kullanışlı veriler sunmaktadır. Bunun yanında orman içi ve orman - yerleşim ara kesitlerinde yanıcı yükü miktarı ve özelliklerinin tespitinde eksiksiz veriler sunmaktadır. Yangın sonrasında ise vejetasyonun yenilenmesi, restorasyon, ağaçlandırma ve yaban hayatı alanlarının rehabilitasyonu çalışmalarına mekan ve zamana bağlı olarak değişken verilerin sağlanmasında uzaktan algılama verilerinin katkısı oldukça büyüktür. Doğru ve hızlı bir şekilde karar vermeyi sağlayan uzaktan algılama verileri ve analizler için bölgeye ait gerekli diğer verilerin CBS ortamına birlikte entegre edilerek kullanılması ülke, bölge ve yerel düzeyde bir orman yangın yönetiminin optimize edilmesi için artık vazgeçilmezdir.

**KAYNAKÇA / REFERENCES**

- Agee, J.K. (1996). The influence of forest structure on fire behavior. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Annual Forest Vegetation Management Conference*, ss. 52–68, January 16–18, Redding, CA.
- Ager, A.A., Vaillant, N.M., & Finney, M.A. (2011). Integrating fire behavior models and geospatial analysis for wildfire risk assessment and fuel management planning. *Journal of Combustion*, Article ID 572452. doi:10.1155/2011/572452
- Allison, R., Johnston, J., Craig, G., & Jennings, S. (2016). Airborne optical and thermal remote sensing for wildfire detection and monitoring. *Sensors*, 16, 1310. doi:10.3390/s16081310
- Alonso-Canas, I., & Chuvieco, E. (2015). Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data. *Remote Sensing of Environment*, 163, 140–152. doi:10.1016/j.rse.2015.03.011
- Barmpoutis, P., Papaioannou, P., Dimitropoulos, K., & Grammalidis, N. (2020). A review on early forest fire detection systems using optical remote sensing. *Sensors*, 20, 6442. doi:10.3390/s20226442.
- Bennett, M., Fitzgerald, S., Parker, B., Main, M., Perleberg, A., Schnepf, C.C., & Mahoney, R. (2010). *Reducing Fire Risk on Your Forest Property*. A Pacific Northwest Extension Publication, PNW 618.
- Bolton, D.K., Coops, N.C., & Wulder, M.A. (2015). Characterizing residual structure and forest recovery following high-severity fire in the western boreal of Canada using Landsat time-series and airborne Lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 163, 48–60. doi:10.1016/j.rse.2015.03.004.
- Bonora, L., Conese, C., Marchi, E., Tesi, E., & Montorsell, N.B. (2013). Wildfire occurrence: Integrated model for risk analysis and operative suppression aspects management. *American Journal of Plant Sciences*, 4(3A), 29480. doi:10.4236/ajps.2013.43A089.
- Clark, R. (2009). Mapping and estimating forest fuel with radar remote sensing. JFSP Briefs. Paper 18. <http://digitalcommons.unl.edu/jfspbriefs/18>
- Cardille, J.A., Ventura, S.J., & Turner, M.G. (2001). Environmental and social factors influencing wildfires in the upper midwest US. *Ecological Applications*, 11(1), 111–127.
- Catry, F.X., Rego, F.C., Baçãõ, F., & Moreira, F. (2009). Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 18(8), 921–931. doi:10.1071/WF07123
- Chang, D.Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649–655. doi:10.1016/0377-2217(95)00300-2.
- Chen, K., Blong, R., & Jacobson, C. (2001). MCE-RISK: Integrating multicriteria evaluation and GIS for risk decision-making in natural hazards. *Environmental Modelling & Software*, 16, 387–397. doi:10.1016/S1364-8152(01)00006-8.
- Coşgun, U., Yolcu, H.I., Tolunay, A., & Orhan, K.H. (2010). Antalya Orman Bölge Müdürlüğü'nde orman yangınlarını etkileyen sosyo-ekonomik faktörlerin belirlenmesi. Batı Akdeniz Ormancılık Araştırma Müdürlüğü, *Teknik Bülten*, No: 40, Antalya.

- Çanakçıoğlu, H. (1985). *Orman Koruması*. İ.Ü. Orman Fakültesi Yayınları. İ.Ü. Yayın No: 3315, OF Yayın No 376.
- Çamalan, İ., & Çamalan, G. (2004). Antalya ili ve çevresi iklim elemanlarının dağılımı ve meteorolojik risk haritaları. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Antalya.
- Çetin, M. (2007). Sündiken kütesindeki yükselti-iklim kuşaklarının ve orman toplumlarının özelliklerinin uydu görüntüleri ile belirlenmesi. *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dağdeviren, M., & Yüksel, I. (2008). Developing a fuzzy analytic hierarchy process (AHP) model for behavior-based safety management. *Information Sciences*, 178(6), 1717-1733. doi:10.1016/j.ins.2007.10.016.
- DeBell L.J., Talbot, R.W., & Dibb, J.E. (2006). A major regional air pollution event in the northeastern United States caused by extensive forest fires in Quebec, Canada. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109, D19. doi:10.1029/2004JD004840.
- Demirel, T., Muşdal, H., Demirel, N.Ç. & Yücenur, G.N. (2009). Multi-criteria evaluation of land cover policies using fuzzy AHP and fuzzy ANP: The case of Turkey. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 15(4), 746-64. doi:10.1080/10807030903051168.
- Dervisoglu, A., Yagmur, N., Tuzcu, A., & Musaoglu, N. (2019). Burned large forest area mapping based on Google Earth Engine. *XXIX International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields*. 5-6 Kasım, İstanbul, Turkey.
- Deur, M., Gašparovi, M., & Balenovic, I. (2020). Tree species classification in mixed deciduous forests using very high spatial resolution satellite imagery and machine learning methods. *Remote Sensing*, 12, 3926. doi:10.3390/rs12233926
- De Vivo, F., Battipede, M., & Johnson, E. (2021). Infra-red line camera data-driven edge detector in UAV forest fire monitoring. *Aerospace Science and Technology*, 111, 106574, doi:10.1016/j.ast.2021.106574.
- Erten, E., Kurgun, V., & Musaoğlu, N. (2005). Uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri kullanarak orman yangını bilgi sisteminin kurulması. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*. 28 Mart-1 Nisan, Ankara.
- Escuin, S., Navarro, R., & Fernández, P. (2008). Fire severity assessment by using NBR (Normalised Burn ratio) and NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4), 1053-1073, doi:10.1080/01431160701281072
- Gilroy, J.J., Woodcock, P., Edwards, F.A., Wheeler, C., Baptiste, B.L.G., Medina Uribe, C.A., ...& Edwards, D.P. (2014). Cheap carbon and biodiversity co-benefits from forest regeneration in a hotspot of endemism. *Nature Climate Change*, 4, 503-507. doi:10.1038/nclimate2200
- Güngöroğlu, C., Kavgacı, A., Coşgun, U., Çalikoğlu, M. Örtel, E., & Balpınar, N. (2018). Applicability of European landscape typology in Turkey (Çakırlar Watershed case/ Antalya). *Landscape Research*, 43(6), 831-845. doi:10.1080/01426397.2017.1386776
- Hayes, G.L. (1941). Influence of altitude and aspect daily variation in factors of forest fire danger. US Department of Agriculture, Washington, DC, Circular no. 591.



- Hendel, I.G., & Ross, G.M. (2021). Efficacy of remote sensing in early forest fire detection: a thermal sensor comparison. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 46(4), 414-428. doi:10.1080/07038992.2020.1776597
- Iliadis, L.S. (2005). A decision support system applying an integrated fuzzy model for long-term forest fire risk estimation. *Environmental Modelling & Software*, 20(5), 613-21. doi:10.1016/j.envsoft.2004.03.006
- Jain, P., Coogan, S.C.P., Subramanian, S.G., Crowley, M., Taylor, S., & Flannigan, M.D. (2020). A review of machine learning applications in wildfire science and management. *Environmental Reviews*, 28(4), 478-505. doi:10.1139/er-2020-0019.
- Jahromi, M.N., Jahromi, M.N., Zolghadr-Asli, B., Pourghasemi, H.R., & Alavipanah, S.K. (2021). Google Earth Engine and its Application in Forest Sciences. *Spatial Modeling in Forest Resources Management: Environmental Science and Engineering*. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-56542-8\_27
- Jiang, H., & Eastman, J.R. (2000). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 173-184. doi:10.1080/136588100240903
- Johnston, J., Wooster, M., & Lynham, T. (2014). Experimental confirmation of the MWIR and LWIR grey body assumption for vegetation fire flame emissivity. *International Journal of Wildland Fire*, 23, 463-479.
- Kurgun, V., Erten, E., & Musaoglu, N. (2004). Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS: A case study. *XXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*. 12-25 Temmuz, Istanbul, Turkey.
- Leblon, B., San Miguel-Ayanz, J., Bourgeau-Chavez, L., & Kong, M. (2016). Remote sensing of wildfires. *Land surface remote sensing: Environment and risks*, Elsevier.
- Lentile, L.B., Holden, Z.A., Smith, A.M.S., Falkowski, M.J., Hudak, A.T., Morgan, P.,...& Benson, N.C. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3), 319-345. doi:10.1071/WF05097
- Li, W., Niu, Z., Shang, R., Quin, Y., Wang, L., & Chen, H., (2020). High-resolution mapping of forest canopy height using machine learning by coupling ICESat-2 LiDAR with Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102163. doi:10.1016/j.jag.2020.102163
- Lu, M., Chen, B., Liao, X., Yue, T., Yue, H., Ren, S., Li, X., Nie, Z., & Xu, B. (2017). Forest types classification based on multi-source data fusion. *Remote Sensing*, 9(11), 1153. doi:10.3390/rs9111153
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). Multicriteria decision analysis in geographic information science. *Advances in Geographic Information Science*. Springer, New York
- Martinez, J., Vega-Garcia, C., & Chuvieco, E. (2009). Human-caused wildfire risk rating for prevention planning. *Journal of Environmental Management*, 90, 1241-1252. doi:10.1016/j.jenvman.2008.07.005.
- Meng, R., Wua, J., Zhaob, F., Cook, B.D., Hanavand, R.P., & Serbin, S.P. (2018). Measuring short-term post-fire forest recovery across a burn severity gradient in a mixed pine-oak forest using multi-sensor remote sensing techniques. *Remote Sensing of Environment*, 210, 282-296. doi:10.1016/j.rse.2018.03.019

- Michael, Y., Helman, D., Glickman, O., Gabay, D., Brenner, S., & Lenskya, I.M. (2021). Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series. *Science of the Total Environment*, 764, 142844. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142844
- Miller, C., & Ager, A.A. (2013). A review of recent advances in risk analysis for wildfire management. *International Journal of Wildland Fire*, 22, 1-14. doi:10.1071/WF11114
- Musaoglu, N., Cetin, M., & Kaya, S. (2001). Use of satellite Images in researching the impacts of forest fires, A case study Gallipoli National Park. 21. *EARSeL Symposium, Proceedings*. ss.117-121, Paris, France.
- Musaoglu, N., Erten, E., Bozbay Aksu, A., Çetin, M., & Özcan, O. (2014). FFEM, Optimizing the production of goods and services provided by Mediterranean forest ecosystems in the context of global changes, Analysis of the causes and drivers of deforestation and forest degradation at the pilot site of Düzlerçami, Turkey, Component 4, FAO Project.
- OGM (2013). Orman Atlası. Orman Genel Müdürlüğü. Ankara. <http://www.orkoop.org.tr/link/atlas.pdf> (30.08.2021)
- Özdemir, İ. (2013). Havasal LiDAR verileri kullanılarak meşçere parametrelerinin tahmin edilmesi. *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, 14, 31-39.
- Peng, X., Zhao, A., Chen, Y., Chen, Q., Liu, H., Wang, J., & Li, H. (2020). Comparison of modeling algorithms for forest canopy structures based on UAV-LiDAR: A case study in tropical China. *Forests*, 11, 1324, doi:10.3390/f11121324
- Pereira, M.G., Trigo, R.M., Da Camara, C.C., Pereira, M.C.J., & Leite, M.S. (2005). Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, 11-25. doi:10.1016/j.agrformet.2004.12.007.
- Pérez-Cabello, F.P., Montorio, R., & Alves, D.B. (2021). Remote sensing techniques to assess post-fire vegetation recovery. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 21, 100251. doi:10.1016/j.coesh.2021.100251.
- Persson, H. J. (2020). Estimation of boreal forest attributes from very high resolution Pléiades data. *Remote Sensing*, 8, 736, doi:10.3390/rs8090736.
- Quintano, C., Fernández-Manso, A., & Fernández-Manso, O. (2018). Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity. *International Journal Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 221-225. doi:10.1016/j.jag.2017.09.014
- Reinhardt, E.D., Keane R.E., Calkin D.E., & Cohen, J.D. (2008). Objectives and considerations for wildland fuel treatment in forested ecosystems of the interior western United States. *Forest Ecology and Management*, 256, 1997-2006. doi:10.1016/j.foreco.2008.09.016.
- Robertson, F. C. (1971). *Terminalogy of Forest Science, Technology, Praticce and Product*, Society of American Foresters, Washington D.C.
- Rodrigues, M., & Riva, J. (2014). Assessing the effect on fire risk modeling of the uncertainty in the location and cause of forest fires. *Advances in Forest Fire Research*, 1061-1072. doi:10.14195/978-989-26-0884-6\_116
- Roteta, E., Bastarrika, A., Padilla, M., Storm, T., & Chuvieco, E. (2019). Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: Generation of a small fire database for sub-Saharan Africa. *Remote Sensing of Environment*, 222, 1-17.

- Rothermel, R.C. (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires. USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station, *General Technical Report*, INT-143. Ogden, UT.
- Roy, D., Boschetti, L., & Trigg, S.N. (2006). Remote sensing of fire severity: Assessing the performance of the Normalized Burn Ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1), 112-116, doi - 10.1109/LGRS.2005.858485.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, NY.
- Saaty, T.L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 59-62.
- Thompson, M.P., & Calkin, D.E. (2011). Uncertainty and risk in wildland fire management: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(8), 1895-1909. doi:10.1016/j.jenvman.2011.03.015
- Türkeş, M., & Musaoğlu, N. (2016). FFEM, optimizing the production of goods and services provided by Mediterranean forest ecosystems in the context of global changes, vulnerability assessment to climate change and variability of the Mediterranean forest ecosystem in the pilot site of Düzlerçamı, Turkey. Component 1, FAO Project, *Technical Report*, ISBN 978-92-5-109566-9F.
- URL-1: <https://cevresehgostergeler.csb.gov.tr/orman-yanginlari-i-85850> (01.08.2021)
- URL-2: <https://www.un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio> (01.09.2021)
- URL-3: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-normalized-burn-ratio> (01.09.2021)
- Vadrevu, P.K., Anuradha, E., & Badarinath, K.V.S. (2010). Fire risk evaluation using multicriteriaanalysis - A case study. *Environmental Monitoring & Assessment*, 166, 223-239. doi:10.1007/s10661-009-0997-3.
- Van Der Werf, G.R., Randerson, J.T. Giglio, L., Van Leeuwen, T.T., Chen, Y., Rogers, B.M., ..., & Collatz, G.J. (2017). Global fire emissions estimate during 1997-2016. *Earth System Science Data*, 9, 697-720.
- Vasconcelos, M.J., Silva, S., Tome, M, Alvim, M., & Pereira, J.G.C. (2001). Spatial prediction of fire ignition probabilities: Comparing logistic regression and neural networks. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(1), 73-81.
- Vogeler, J.C., Yang, Z., & Cohen, W.B. (2016). Mapping post-fire habitat characteristics through the fusion of remote sensing tools. *Remote Sensing of Environment*, 171, 294-303. doi:10.1016/j.rse.2015.08.011
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8 (3), 338-353.
- Zimmerman, H.J. (2010). Fuzzy set theory. *WIREs Computational Statistics*, 2 (3), 259-386. doi:10.1002/wics.82