

Orman Yangınları Sonrası Ekosistem Tabanlı Planlamaya Doğru: Yanma Derinliğinin Sınıflandırılması

Coşkun Okan Güney¹, Ahmet Mert², Serkan Gülsoy³

Öz

Orman yangınları dünya üzerindeki ekosistemleri etkileyen doğal bir sürecin parçasıdır. Yangın, mikro ölçekli fenomenden geniş peyzaj desenleri ve süreçlerine kadar birden fazla zamansal ve mekânsal ölçekte biyofiziksel süreçleri etkiler. Yöneticiler yangın sonrası karar verme süreçlerini gerçekleştirebilmek için yanan alanların karakterizasyonunu iyi yapabilmelidir. Bu ise hem bitki örtüsü hem de toprakta yangının neden olduğu ekolojik değişimin derecesi olarak kabul edilen ve yangın rejiminin en önemli bileşenlerinden olan yanma derinliğinin tespiti ile mümkündür. Yanma derinliği, yanıcı madde tüketimi derecesinin görsel olarak gözlemlenmesi, yangından sonra tüketilmemiş bitki ve toprak yüzeylerindeki kömürleşme miktarı temelinde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar genellikle yanmamış, az yanmış, orta derecede yanmış ve çok yanmış alanlara ayrılarak yapılır. Bazen yangınlar çok büyük alanlarda meydana gelir ve bu alanlarda zarar tespitleri yapmak çok fazla emek, para ve zaman gerektirebilir. Bu yüzden büyük yangınlar sonrası yangının ekosisteme verdiği zararın derecesi belirlenirken uzaktan algılama yöntemleri sıklıkla kullanılır. Yanma derinliği sınıflandırmaları genellikle optik uzaktan algılama verilerinden türetilen spektral indeksler ile ya da SAR ve LiDAR gibi aktif uzaktan algılama yöntemlerinden elde edilen haritalar ile ifade edilir. Yanma derinliğini sınıflandıran haritalar, orman yangınlarının toprak, su, ekosistem florası ve faunası, atmosfer üzerindeki etkilerini tanımlayabilir ve yangınlar sonucu ortaya çıkan farklı derecelerde yanmış/yanmamış alanların sürdürülebilir ekolojik bir yaklaşım ile planlanmasında kullanılabilir. Bu çalışmada yanma derinliği kavramı ve yanma derinliği sınıflandırmalarının aşamaları hakkında bilgiler verilmiş, bu konu hakkında bundan sonra yapılacak çalışmalar için literatür özetlenerek konunun iyi ve eksik yönleri tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Orman Yangını, Yangın Ekolojisi, Yangın Rejimi, Yanma Derinliği, Uzaktan Algılama

Toward Ecosystem-Based Planning After Forest Fires: Classification of Fire/Burn Severity

Abstract

Forest fires are part of natural processes that affect ecosystems all around the world. Fire affects biophysical processes at different spatio-temporal scales, from micro-scale impacts to broad landscape

¹ Y. Mühendis, Ege Ormancılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Orman Yangınları Araştırmaları Başmühendisliği, OGM, İzmir
İlgili yazar e-posta /Corresponding author e-mail: coskunokanguney@ogm.gov.tr ORCID No: 0000-0003-4664-8024

² Doç. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi, Yaban Hayatı Yönetimi Anabilim Dalı, Isparta
e-posta/e-mail: ahmetmert@isparta.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6859-0308

³ Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi, Toprak İlimi ve Ekolojisi Anabilim Dalı, Isparta
e-posta/ e-mail: serkangulsoy@isparta.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2011-8324

Bu makaleye atıf yapmak için / To cite this article

Güney, C.O., Mert, A., ve Gülsoy, S. (2023). Orman Yangınları Sonrası Ekosistem Tabanlı Planlamaya Doğru: Yanma Derinliğinin Sınıflandırılması. *Afet ve Risk Dergisi*, 6(1), 206-225.

patterns and processes. In order to implement post-fire decision-making processes, managers should be able to adequately characterize burned areas. This is possible by determining fire severity, which is considered as the degree of fire-induced ecological change in both vegetation and soil and is one of the most important components of the fire regime. Fire severity can be classified based on visual observation of the degree of fuels consumed and the amount of char on plant and soil surfaces that remained unconsumed after the fire. Fire severity is generally classified as unburned, low, moderate, and high. Assessing post-fire damage of large areas can take a lot of effort, money, and time. Therefore, after large fires, remote sensing methods are often used to determine the extent of fire damage to the ecosystems. Fire severity classifications are usually expressed in terms of spectral indices derived from optical remote sensing data or by using maps derived from active remote sensing methods such as SAR and LiDAR. Fire severity classification maps allow to determine the impact of forest fires on soil, water, ecosystem flora and fauna, and the atmosphere. They can therefore promote a more sustainable ecosystem-based planning of burned/unburned areas. In this review, information about the concept of fire severity and fire severity classification is given. For future studies on this topic, the literature was reviewed and summarized and its advantages and disadvantages were discussed.

Keywords: Forest Fire, Fire Ecology, Fire Regime, Fire/Burn Severity, Remote Sensing

1. GİRİŞ

Dünya üzerindeki ekosistemleri etkileyen doğal süreçler içerisinde orman yangınları önemli bir yer teşkil etmektedir (Bowman vd., 2009). Yangın, tek bir bitkiyi etkileyebildiği gibi geniş peyzaj desenlerini ve süreçlerini birden fazla zamansal ve mekânsal ölçekte etkiler (Cochrane ve Ryan, 2009). Özellikle doğal ekosistemlerde yangınlar bitki/hayvan dağılımını ve bitki yapısını şekillendiren önemli bir etki unsurudur (Bond ve Keeley, 2005). Bu yeni bakış açısı, bitki ve hayvan dağılımlarının yalnızca iklim ve toprakla açıklanabileceğine dair klasik görüşten farklıdır. Buna göre, bitki özelliklerinin ortaya çıkışında yangın önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin, yangından sonra vejetatif yolla yeniden filizlenme, yangına meyilli tüm ortamlarda ve tüm çift çenekli bitki soylarında yaygın bir özelliktir. Yangın sıklığının fazla olması durumunda yangından sonra tohumdan gelen türler uzun vadede sahada varlığını devam ettiremezken, sürgünden gelen türle ise yangın sıklığına en iyi uyumu sağlayarak alanda varlığını devam ettirebilirler (Pausas ve Keeley, 2009).

Benzer şekilde, ağaç kabuğu geleneksel olarak sıcak, soğuk ve yangın olmak üzere birçok çevresel faktöre yanıt olarak gelişen bir özellik olarak değerlendirilmektedir (Keeley ve Zedler, 1998). Diğer yandan bazı durumlarda ısı şoku, dumandaki kimyasallar ve kömürleşme, yangına meyilli ortamlarda tohumlarda çimlenmeyi tetikleyen sinyaller olarak görülebilir (Keeley ve Fotheringham, 2000). Yangının zaman içerisinde bitki yapısını değişikliğe uğratan etkilerinin yanı sıra başka etkileri de vardır. Örneğin fauna türlerini doğrudan yakarak zarar verebildiği gibi habitatlarına zarar vererek türlerin popülasyonlarını etkileyebilir (Smith vd., 2000).

Yangınlar nedeniyle hava kalitesi bozulabilir ve bu bozulan hava kalitesi yangın ile mücadele çalışanlarının mesleki olarak sürekli dumana maruz kalması nedeniyle sağlık problemleri yaşamalarına, halk sağlığı ve refahı üzerinde ekonomik ve sosyal etkilere sebep olabilir (Sandberg, 2009). Diğer yandan yangın, su kalite özelliklerini hidrolojik döngü ve erozyon rejimlerinde yapmış olduğu değişiklikler nedeniyle etkileyebilir (Neary vd., 2005).

Yangın doğal yollarla veya insan kaynaklı olarak ihmal, dikkatsizlik ve kasıt gibi çeşitli nedenler ile çıkabilmektedir. Ancak insanlar yangını Paleolitik ve Mezolitik çağlardan beri "fire-stick farming" olarak adlandırılan kaynak yönetimi için de yaygın olarak kullanılmıştır (Bird vd., 2008). Bu terim, insan habitatları için yer açmak, seyahati kolaylaştırmak, haşereleri öldürmek, avlanmak hem insanlar hem de hayvanlar için bitkisel besin kaynaklarını yenilemek ve hatta kabileler arası savaş amacıyla yangının çeşitli nedenlerle kullanılmasını içermektedir. Bu arazi yönetimi uygulamalarının yalnızca yangın rejimleri üzerinde değil, aynı zamanda peyzaj bitki

örtüsü modeli ve biyolojik çeşitlilik üzerinde de derin etkileri olmuştur (Pausas ve Keeley, 2009). Bu anlamda bakıldığında yangın tekrarlanan bir süreç olarak kabul edilmekte ve doğrudan ekolojik etkilere sahip olan ve tüm türlerin tarihleri boyunca özelliklerini şekillendirebilecek bir güç olarak hareket eden yangın rejimleri ile ifade edilmektedir.

Yangın rejimi, iklim, topoğrafya ve yanıcı madde özelliklerine bağlı olarak herhangi bir alanda meydana gelen yangınların sıklığı, büyüklüğü, şiddeti, derinliği ve mevsimi gibi özelliklerin tümünü birden ifade eden bir kavramdır (Küçük, 2009). Yangın rejimlerinin zamansal ve mekânsal heterojenliği yangının ekolojik etkilerinin de farklı şekillerde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu yüzden yangın rejimlerinde meydana gelen farklılıkların sebepleri ve bunların ekolojik etkileri hakkında birtakım sorular hala devam etmektedir. Yangının ekosistem üzerindeki etkilerini anlayabilmek için yangın rejimi bileşenlerinin ortaya koyulmasına ve anlaşılmasına ihtiyaç vardır (Liu ve Wimberly, 2015). Yangın sıklığı (ing: fire frequency), belirli bir alanda ve belirli bir zaman aralığında yangının meydana gelme sayısı olarak tanımlanır ve doğal yangınların önemli bir belirleyicisidir (Whelan, 1995). Yangın şiddeti (ing: fire intensity), yangının ön cephesi tarafından açığa çıkan sıcaklık ve ısı ile ölçülen yangın davranışının bir tarifidir. Bir başka deyişle; bir yangında birim zamanda açığa çıkan enerji miktarıdır (Morgan vd., 2001). Yangın mevsimi ise (ing: fire season); yanıcı madde durumu ile tutuşmanın bir fonksiyonudur. Yangın çıkan veya çıkabilecek iklim koşullarını ifade eder (Keeley, 2009). Yangın büyüklüğü (ing: fire size), çok küçük yangınlardan çok büyük yangınlara kadar çok farklı büyüklükte gerçekleşebilen yangının alansal olarak büyüklüğünü ifade eder. Yangın rejiminin en önemli bileşenlerinden biri de yanma derinliğidir. Büyük bir orman yangını meydana geldikten sonra restorasyon ve toprağın toparlanması için stratejiler belirlenmelidir. Yangın sonrası yöneticiler bu karar verme sürecini gerçekleştirebilmek için yanan alanların karakterizasyonunu iyi yapabilmelidir. Bu ise hem bitki örtüsü hem de toprakta yangının neden olduğu ekolojik değişimin derecesi olarak kabul edilen ve yangın rejiminin en önemli bileşenlerinden olan yanma derinliğinin (ingilizce: *fire/burn severity*) tespiti ile mümkündür (Conard vd., 2002).

2. YANMA SÜREÇLERİ VE EKOSİSTEMİN ZARAR GÖRMESİ

Bir orman yangınından sonra yangının ekosisteme verdiği zararın derecesini (yanma derinliği) doğru tespit edebilmek için yanma süreçlerinin ve meydana gelen yangın tiplerinin iyi bilinmesine ihtiyaç vardır. Yanma derinliği büyük ölçüde yanmaya uygun yanıcı maddelerin doğasına ve bu yanıcı maddeler yakıldığında meydana gelen yanma özelliklerine (alevli veya kor halinde yanma) bağlıdır. Yangınlar uzun yıllar boyunca ağaçlarda, topraklarda, fosillerde ve kültürel eserlerde kanıtlar bırakarak, birçok bölgenin peyzajını etkilemiştir (Bowman vd., 2009). Yangınlar, çok az duman üreten kor halinde yanan alevsiz yangınlardan, kısa boylu ve ince alevli sürünen yangınlara, 50 metre veya daha yüksek alev yüksekliğine erişen yüksek şiddetli tepe yangınlarına kadar farklı şiddetlerde meydana gelebilirler. Bir yangının herhangi bir alanda kalma süresi, hızlı hareket eden bir örtü veya tepe yangını durumunda onlarca saniye kadar kısa veya yavaş yavaş yanan toprak yangınında birkaç gün kadar uzun olabilir. Yangınların bu farklı şiddet ve süreler boyunca seyrine bağlı olarak çevre ve ekosistem üzerindeki etkisi büyük ölçüde değişebilmektedir (Neary vd., 2005).

Yangın davranışı yanıcı madde, hava halleri ve arazi yapısı gibi faktörler nedeniyle oldukça değişkendir. Her yangının yayılımı ve davranışı oldukça benzersizdir. Yangının ekosistem üzerindeki etkilerini tahmin etmek veya değerlendirmek için yangının nasıl oluştuğunu ve sönene kadar hangi aşamalardan geçtiğini bilmek gerekir. Bir yangının tutuşması ve yanmaya devam etmesi için oluşması gereken üç temel koşul vardır ve bu üç koşul yangın üçgenini oluşturur. Yakmak için yanıcı madde, yanmayı desteklemek için oksijen kaynağı ve yanıcı madde parçacıklarının art arda tutuşmasını sağlamak için yeterli ısı olmalıdır. Bu üç bileşen olmadan yangın var olamaz (Neary vd., 2005). Diğer yandan; yanma olayı üç aşamaya ayrılır. Bunlar sırasıyla; ön ısınma, alevli yanma ve kor halinde yanmadır (Heikkilä vd., 2010).

Oksijenin genellikle sınırlayıcı olmadığı orman ekosistemlerindeki yanıcı maddeler, yaklaşık 300 °C ila 400 °C (tutuşma sıcaklığı) arasında alev alır (Güney vd., 2022). Alevli yanma aşamasında alevler sürekliliğini devam ettirdikçe yangın büyüyebilir ve 1300 °C'lere kadar sıcaklık artışı olabilir (Satio, 2001). Ancak genellikle ortalama olarak sıcaklıklar 500 °C ile 1000 °C arasında gerçekleşir (Butler vd., 2004).

Yangının tipi ve yanmanın gerçekleşme durumuna göre yangın sonrasında farklı derecelerde yanmış ve yanmamış sahaların bir karışımı olarak bir mozaik oluşur. Bilindiği gibi orman yangınları toprak, örtü ve tepe yangını olarak üç tipe ayrılır (Heikkilä vd., 2010). Toprak yangını turba, ağaç kökleri ve diğer gömülü organik maddeler gibi yanıcı maddelerin tutuşup yandığı, yeraltında meydana gelen bir tür orman yangınıdır. Yangının koşullarına bağlı olarak, toprak yangınları sonunda yerin yüzeyine çıkabilir ve yüzey yangınlarına dönüşebilir. Toprak yangınları yer yüzeyinin altında bulunduğu için genellikle örtü yangınlarına kıyasla kontrol altına alınması daha zordur. Bununla birlikte, bu toprak yangınları yüzey yangınlarından daha yavaş yayılır ve birkaç ay boyunca yanabilir.

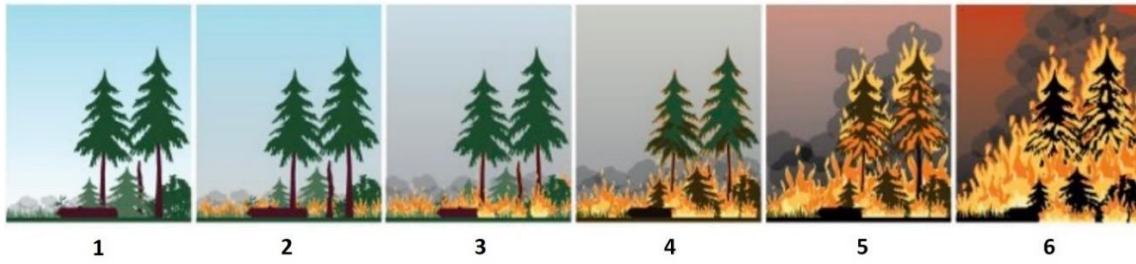
Örtü yangını, koşullara bağlı olarak düşükten yüksek şiddete kadar değişen bir yangını ifade eder. Bu tür yangınlar, toprak zemininin yüzeyinde yanar ve öncelikle dallar veya kuru yapraklar gibi gövdenin alt kısmında bulunan bitki örtüsünde gerçekleşir. Örtü yangınları genellikle yavaş yayılır, ancak dik eğimli bir alanda meydana geldiğinde veya rüzgâra maruz kaldığında hızla yayılmaya başlayabilir. Söndürülmesi en kolay ve ormana en az zarar veren yangınlardır (Heikkilä vd., 2010).

Orman yangınının bir başka farklı türü de tepe yangınlarıdır. Bu yangınlarda ağaçların tepeleri de yanar. Daha yavaş yayılan toprak veya örtü yangınlarından farklı olarak, tepe yangınları hızlı bir şekilde yayılır. Bu nedenle, tepe yangınları genellikle daha düşük seviyeli bir yangından çok daha hızlı ilerler. Yüksek yayılma oranına sahip tepe yangınları, büyük ölçüde, onları rüzgâra maruz bırakan yüksekliklerinden kaynaklanmaktadır. Böyle bir rüzgâr, alevleri ve kıvılcımları yangından potansiyel olarak birbirine bağlı veya sürekli bir ağaç tepesine doğru iter. Tepe yangınlarının yayılabileceği hız nedeniyle, genellikle yüksek şiddette yangınlara dönüşürler. Çoğu zaman bu üç tür yangın birbiriyle kesin sınırlar ile ayrılmaz ve kendi içlerinde bile farklı davranışlar gösterebilir (Heikkilä vd., 2010).

Bu davranışları tanımlayabilmek için Kanada'nın batısında bulunan B.Columbia eyaleti Orman Bakanlığı, bir dizi görsel göstergeye dayalı 1'den 6'ya kadar bir sıralama ölçeği kullanır (Şekil 1) (URL 1, 2022).

Bu ölçeğe göre;

1. Bu yangınlar toprak yangınlarıdır. Yavaş ve çoğunlukla çok duman olmayan yangınlardır.
2. Düşük şiddette örtü yangınlarıdır. Çoğunlukla sürünerek yavaş ilerlerler. Düzensiz ve süresizdirler.
3. Orta şiddette örtü yangınlarıdır. Düzenli ve orta derecede hızlı ilerlerler. İlerlerlerken ara sıra dikey yönde alev parlamaları görülebilir.
4. Yüksek şiddette örtü yangını veya pasif tepe yangınlarıdır. Yayılma oranı yüksektir. Bazı ağaçların tepelerini yakan kısa dikey alev parlamaları görülebilir.
5. Son derece şiddetli örtü yangını veya aktif tepe yangınlarıdır. Organize bir şekilde ilerleyen tepe yangını cephesi oluşur. Yer yer tepeler yanmasa bile son derece şiddetli örtü yangınları tepeleri zorlar. Yakın veya orta menzilli nokta yangınları oluşturma potansiyelleri vardır.
6. Aşırı veya agresif aktif tepe yangınlarıdır. Bütün yanıcı madde toplu bir şekilde yanar. Uzun menzilli nokta yangınları oluşturma eğilimindedirler. Konveksiyon kolonları ve girdap oluşumları görülür. Büyük bir cephede aşırı duman oluşumları görülür.



Şekil 1. Bir orman yangınında yangın davranışı tipleri (URL 1, 2022)

Bir ormanda meydana gelen her yangın farklı şekillerde gerçekleşebilir. Dolayısıyla ekosistem üzerinde oluşturduğu zarar derecesi değişkenlik gösterir. Diğer yandan yangının zarar derecesini anlayabilmek için yangının bitkiler üzerindeki etkilerini de anlamak gerekir. Yangının bitkiler üzerindeki doğrudan etkileri ısı transferi nedeniyle ortaya çıkan doku nekrozları şeklinde görülür. Bitkilerde yanma sonucunda doku zararının meydana gelebilmesi için 60 °C sıcaklık yeterlidir (Michaletz ve Johnson, 2006). Ancak bu sıcaklığın etki derecesi farklı koşullara göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, dokular 60 °C'nin altındaki sıcaklıklara uzun süre maruz kaldıklarında ölebilirlerken, 60 °C'nin üstündeki sıcaklıklara kısa süre maruz kaldıklarında yaşayabilirler (Dickinson ve Johnson, 2004).

Bir orman yangını sırasında ısı transferi ağacın köklerine, gövdesine ve tepelerine zarar verebilir. Ağaç gövdesine ısı transferi radyasyon ve konveksiyon yoluyla gerçekleşir. Isı kabuktan içeriye doğru gövdenin iç kısımlarını etkiler ve kambiyuma zarar verebilir. Kambiyumun zarar görüp görmemesi sıcaklığın yüksekliğine, ısıtma süresine, termal iletkenliğe ve kabuğun kalınlığına bağlıdır (Dickinson ve Johnson, 2001). Ağaçların tepe tacını dal, yaprak ve tomurcuk bileşenleri oluşturur. Yangın hattından ve dumandan ağacın tepe bileşenlerine ısı transferi radyasyon ve konveksiyon süreçleri şeklinde gerçekleşir ancak konveksiyon baskındır (Cruz vd., 2006). Farklı bitki türleri bu ısı transfer sürecinden farklı şekillerde etkilenebilirler. Bu yüzden etkilenme dereceleri ısı transfer süreçlerine ve hava koşullarına göre değişir. Ayrıca yangından ve topraktan ısı transferi nedeniyle köklerin yüzeyi ısınır ve kök yüzeyinden kök içine doğru sıcaklık artışı kökün zarar görmesini sağlar. Bir yangında bitkilerin tomurcukları, yaprakları, dalları, gövdesi ve kökleri farklı derecelerde zarar görebilir (Michaletz ve Johnson, 2006). Bitkilerin ölüm oranı bu kısımların gördüğü zararın bir bileşkesi olabilir.

3. YANMA DERİNLİĞİ KAVRAMI

Yangından zarar gören alanlar hakkında elde edilen doğru bilgiler yangın yönetimi, bitki örtüsü restorasyonunun planlanması ve izlenmesi için esastır (Brewer vd., 2005). Yangınların neden olduğu ekolojik değişimin derecesi olarak tanımlanan yanma derinliği, bir alanda yangının bir sonucu olarak fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişiklikleri tanımlar (Ryan ve Noste, 1985). Yanıcı maddelerin tüketilme derecesini tanımlamak için yaygın olarak kullanılan terim yanma derinliği (ingilizce: *depth of burn*)'dir. Isının toprağa ve yanıcı maddeye ne kadar nüfus ettiğini tanımlar. Yanma derinliği süreçten ziyade sonucu bakar ve bu nedenle yangının bir ekosistem üzerindeki ekolojik etkilerini anlamak için yararlıdır (Ryan vd., 2012).

Yanma derinliği, yangın şiddeti ile ilişkilidir fakat bu ilişki her zaman doğrusal olmayabilir (Keeley, 2009). Literatürde yangın şiddeti (ingilizce: *fire intensity*) ile yanma derinliği (ingilizce: *fire/burn severity*) terimleri arasında bir karışıklık içermesine rağmen, son yıllarda iki terim arasında oldukça tutarlı bir ayırım ortaya çıkmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'da yangın davranışı tahmin sistemlerinde eğitim almış yangın yöneticileri, salınan enerji oranını tanımlamak için katı termodinamik anlamda yangın şiddeti terimini kullanır (Stocks vd., 1989).

Yangın şiddeti, esas olarak yer üstü yakıt tüketimi oranı ve dolayısıyla enerji salınım oranı ile ilgilidir (Albini, 1976). Belirli bir miktarda yanıcı madde ne kadar hızlı yanarsa, şiddet o kadar yüksek ve süre o kadar kısadır (Byram, 1959). Yangın şiddeti;

$$I = KxCxV \quad (1)$$

eşitliği ile formülize edilmektedir. Burada (1);

I= yangın şiddeti,

K=yanma sırasında açığa çıkan enerji,

C= yanma sırasında tüketilen yanıcı madde miktarı,

V= yayılma hızı'dır (Byram, 1959).

Enerjinin topraktan iletme hızı toprağın termal özellikleri ile sınırlı olduğundan, yanma süresi toprak üzerindeki etkiler açısından kritik öneme sahiptir. Yer üstü yanıcı maddelerin alevli yanması ile açığa çıkan enerjinin çoğu aşağı doğru iletmez (Frandsen ve Ryan, 1986). Örneğin, Packham ve Pompe (1971), bir örtü yangını tarafından salınan ısının sadece %5'inin toprağa iletildiğini bulmuşlardır. Bu nedenle yangın şiddeti, toprağa aşağı doğru iletilen enerji miktarının veya toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin iyi bir ölçüsü değildir. Örneğin, yüksek şiddetli ve yayılma oranına sahip bir tepe yangınının, yanıcı maddelerin yanması sırasında açığa çıkan enerjinin yalnızca küçük bir miktarı yer yüzeyinde aşağı doğru transfer edildiğinden, örtüdeki döküntü yanıcı maddenin çok azını tüketmesi mümkündür (Ryan, 2002). Bu durumda örtüdeki yanıcı madde kararır (kömürleşir) ancak tüketilmez. Bununla birlikte, yangın aynı zamanda önemli miktarda örtü üstündeki yanıcı madde miktarını tüketirse, bir sahada kalma süresi daha uzundur ve toprağa daha fazla enerji iletir. Bu gibi durumlarda, "beyaz kül" tabakası genellikle toprak yüzeyinde kalan tek yangın sonrası malzemedir (Wells vd., 1979).

Bir yangının gerçek enerji salınımı nadiren ölçülebildiğinden, yangın şiddeti terimi, ekosistemin yangına tepkilerini değerlendirirken sınırlı pratik uygulamaya sahip olabilir. Yanma derinliği terimi, yangının farklı ekosistem bileşenleri üzerindeki etkilerini belirtmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır (Agee, 1993). Yanma derinliği, geçmişte doğal ekosistemler üzerindeki olumsuz yangın etkilerinin büyüklüğünü tanımlamak için kullanılmıştır (Simard, 1991), ancak günümüzde terimin tüm yangın etkilerini içerecek şekilde daha geniş bir kullanımı önerilmektedir.

Bilim insanları, bir yangından sonra meydana gelen çevresel değişimin derecesini (yanma derinliği) belirleyebilmek için yaygın olarak fire ve/veya burn severity olarak tanımlanan terimleri kullanır (Keeley, 2009). İki terim, esas olarak ekolojik ve zamansal olarak farklı anlamlar içerir. "Fire severity" genellikle bitki örtüsü yapısı üzerindeki yangın sonrası kısa vadeli etkileri tanımlarken, "burn severity", yangınların ekosistem ve bitki örtüsü üzerindeki uzun vadeli etkilerini tanımlar (French vd., 2008). Fire severity, yangın olayından hemen sonra ve ilk 30-45 gün içinde değerlendirilirken (Key ve Benson, 2006), burn severity ise farklı zaman ve büyüme periyotlarında tahmin edilebilir (Key, 2006).

4. YANMA DERİNLİĞİNİN SINIFLANDIRILMASI

Çok sayıda araştırmacı, yangının topraklar, bitkiler ve erken süksesyon üzerindeki etkilerini yorumlamak ve yanma derinliğini tanımlamak için toprak organik maddesinde ısının ne kadar derine iletildiğini ölçmeyi veya bitki materyallerinin kömürleşme ve tüketim derecesinin görsel gözlemine kullanmışlardır (Ryan ve Noste, 1985). Yanmanın derinliği, odunsu yanıcı maddelerde (Albini ve Reinhardt, 1995) ve organik madde de (Johnson ve Miyanishi, 2001) yanma süresi ile doğrudan ilişkilidir. Heterojen yanıcı maddelerde, yanma derinliği kısa mesafelerde önemli

ölçüde değişebilir (Ryan ve Frandsen, 1991). Bir yangın içindeki belirli bir alanda yanma derinliği, yanıcı madde tüketimi derecesinin görsel olarak gözlemlenmesi, yangından sonra tüketilmemiş bitki ve toprak yüzeylerindeki kömürleşme miktarı temelinde sınıflandırılabilir (Ryan, 2002). Bu sınıflandırmalar genellikle yanmamış (unburned), az yanmış (low), orta derecede yanmış (moderate) ve çok yanmış (high) alanlara ayrılarak yapılır.

Organik madde tüketimi karmaşık bir süreçtir (Johnson ve Miyanishi, 2001). Derinlik, kütle yoğunluğu, ısı miktarı, mineral içeriği, nem içeriği ve rüzgâr hızının tümü, enerji salınım oranını ve toprak ısınmasını etkiler. Bu faktörler bir yangından sonra kolayca belirlenemediğinden, sınıflı tutarlı bir şekilde bölmek için kullanılacak yanma sonrası kriterleri tanımlamak zordur. Yanma derinliğini sınıflandırmak için toprak özelliklerinin, yanıcı madde tüketiminin ve bitki materyallerinin kömürleşme derinliğinin dikkatli yangın sonrası gözlemlerine ihtiyaç vardır.

Yanma derinliğini yalnızca toprak altı süreçlere göre değerlendirmek, zararın derecesinin ekolojik tanımında ima edilen yer üstü boyutunu göz ardı eder (White ve Pickett, 1985). Bu özellikle önemlidir, çünkü toprak üstü yangınları şiddetli olduğunda bile toprak ısınması genellikle sığdır (Ryan, 2002). Ryan ve Noste (1985), yanma derinliğini tanımlamak için iki boyutlu bir matris yaklaşımı geliştirerek, yangın şiddeti sınıflarını yanma derinliği sınıflarıyla birleştirmişlerdir. Bu sınıflandırma sistemi, yanma derinliğinin iki bileşenine dayanmaktadır. Bunlar sırasıyla alevli yanma ile ilişkili radyasyon ve konveksiyondan kaynaklanan bir yer üstü ısı etkisi (1) ve esas olarak organik maddenin mevcut olduğu kor halinde yanmadan iletilen radyasyondan kaynaklanan bir yer altı ısı etkisi (2) şeklindedir. Yangın şiddeti sınıfları, bir yangın için nispi tepe enerji salınım oranını nitelerken, yanma derinliği sınıfları nispi yanma süresini niteler. Derinlik kavramı, ateşin hem yer üstünde hem de yer altında gerçekleştirdiği ekolojik etkiye odaklanır.

Ryan ve Noste (1985) ve Ryan (2002)'nin önerdiği modifiye edilmiş matris, ağaçların bireysel olarak, örneklenen kuadratlarda veya yangın alanında toplu olarak ekolojik çalışmalar için yanma derinliği düzeyini sınıflandırmak için bir yaklaşım sağlar (Şekil 2). Ryan ve Noste (1985) yaklaşımı, bitkilerin hayatta kalması, rejenerasyonundaki farklılıkları yorumlamak (Willard vd., 1995) ve yanmış alanların uydu tabanlı haritalarını sahada doğrulamak için kullanılmıştır (White vd., 1996).

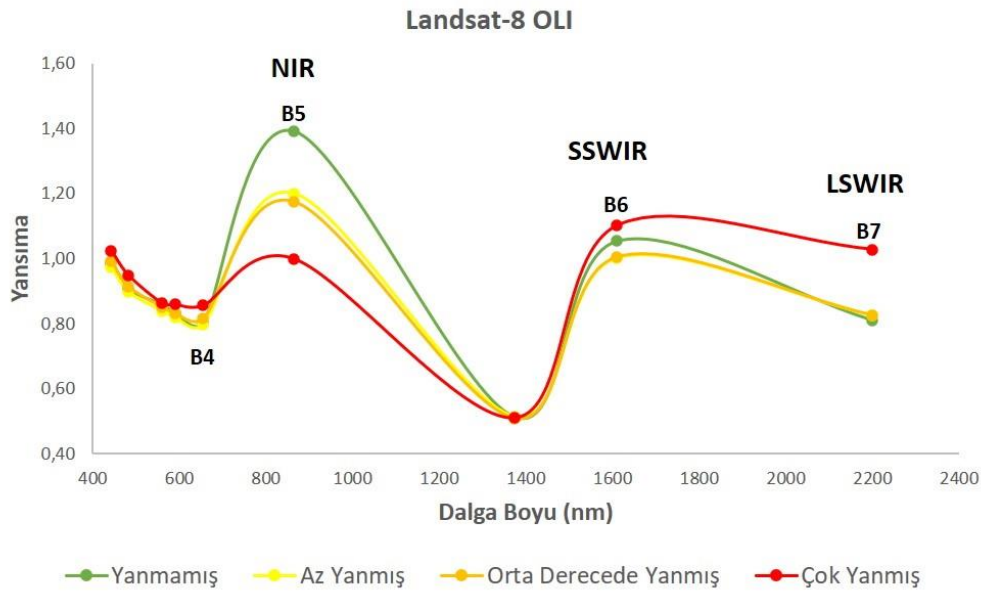


Şekil 2. 2020 yılında Kastamonu-Taşköprü'de meydana gelen orman yangınında farklı yanma derinliğine sahip alanlar

5. YANMA DERİNLİĞİNİN UZAKTAN ALGILANMASI

Bazen yangınlar çok büyük alanlarda meydana gelir ve bu alanlarda zarar tespitleri yapmak çok fazla emek, para ve zaman gerektirebilir. Bu yüzden büyük yangınlar sonrası yangının ekosisteme verdiği zararın derecesi belirlenirken uzaktan algılama yöntemleri sıklıkla kullanılır. Yakın kızılötesi (NIR) ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) spektral bölgeleri yangına karşı oldukça hassastır. Akdeniz ikliminin görüldüğü bölgelerde çalışmalar yapan bilim insanlarının ortak görüşü orman ekosistemlerinde yangın sonrası uydu görüntülerinde spektrumun yakın kızılötesi bölgesinde (NIR) yanmış alanların yansımada değerlerinde güçlü bir düşüş olduğudur (Chuvieco vd., 2019). Bu spektral bölgedeki büyük miktarda düşüşün nedeni güneş ışınımını yansıtan bitki örtüsünün yaprak yapısının tahrip olmasıdır. Buna ek olarak, yangın sonrası uydu görüntüsünde yanmış alanlarda kısa dalga kızılötesi bölgesinde (SWIR) yansımada değerlerinde güçlü bir artış gözlenmektedir (Chuvieco vd., 2019). Bitki örtüsünün kömürleşmesi, bu spektral bölgedeki radyasyonu emen su içeriğini azaltır. Sonuç olarak, yanmış alanların sağlıklı bitki örtüsüne göre daha yüksek yansıtma oranına sahip olması beklenir (Pleniou ve Koutsias, 2013).

Sağlıklı bitki örtüsü (klorofil içeren), diğer dalga boylarına kıyasla yakın kızılötesi (NIR) ve yeşil ışığı daha fazla yansıtır. Ancak kırmızı ve mavi ışığı daha fazla emer. Bu özellikten dolayı yangından sonra bitkide meydana gelen renk değişimi (kömürleşme-siyahlaşma) uydu görüntülerindeki yansımada değerlerinde farklılık oluşturur. Bu spektral farklılıklar yangın öncesi ve sonrası görüntülerden hesaplanarak yanma derinliğini tespit edebilmek amacıyla kullanılmaktadır (Şekil 3.). Yanma derinliğini belirlemek için çoğunlukla kullanılan indeksler spektrumun kırmızı ve yakın kızılötesi bölgelerini birleştirerek kullananlar (NDVI, EVI, SAVI, BAI ve GEMI), yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bölgelerini birleştirerek kullananlar (NBR, RdNBR, RBR, CSI, NDWI, NDMI, BAIML ve BAIMS) ve sadece kısa dalga kızılötesi bölgesini kullananlar (MIRBI) olarak genel olarak üçe ayrılabilir. Yanma derinliğini sınıflandırabilmek için uydu sensörlerindeki gelişmeye bağlı olarak zaman içerisinde uydu görüntülerinden türetilen farklı spektral indeksler kullanılmıştır.



Şekil 3. Landsat-8/OLI uydu verilerine göre farklı yanma derinliğine sahip alanların yansımada farklılıkları (Güney, 2022)

Yanma derinliğini uzaktan algılama yoluyla tespit edebilmek için en çok kullanılan indeksler Normalize edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi (NDVI-Normalized Difference Vegetation Index) , Normalize Edilmiş Yanma Oranı (NBR-Normalized Burn Ratio), Geliştirilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (EVI-Enhanced Vegetation Index), Toprak Uyumlu Vejetasyon İndeksi (SAVI-Soil Adjusted Vegetation Index), Küresel Çevre Gözlemeleme İndeksi (GEMI-Global Environment Monitoring Index), Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi (NDWI-Normalised Difference Water Index), Normalize Edilmiş Fark Nem İndeksi (NDMI-Normalized Difference Moisture Index), Yanan Alan İndeksi (BAI-Burned Area Index), Modifiye Edilmiş Yanan Alan İndeksi-L (BAIML-Burned Area Index Modified-LSWIR), Modifiye Edilmiş Yanan Alan İndeksi-S (BAIMS-Burned Area Index Modified-SSWIR), Orta Kızılötesi Yanma İndeksi (MIRBI-Mid Infrared Burn Index), Kömürleşmiş Toprak İndeksi (CSI-Char Soil Index), Göreceli Fark Normalize Edilmiş Yanma Oranı (RdNBR-Relative differenced Normalized Burn Ratio), Göreceli Yanma Oranı (RBR-Relativized Burn Ratio) olarak sayılabilir.

Birçok çalışma uydu görüntülerinden türetilen spektral indekslerin yanma derinliği yersel ölçümleri ile olan ilişkilerini test etmiş ve birbirine göre kıyaslamıştır. Yanma derinliğini tahmin etmek için farklı spektral indekslerin performansını ölçen çalışmaların çoğunda yangının neden olduğu değişiklikleri tespit etmede NBR indeksine dayalı dNBR ve RdNBR spektral indekslerin etkinliği iyi bilinmektedir (Ariza vd., 2019). Ayrıca, Parks vd. (2014)'ü RBR spektral indeksinin yanma derinliğini dNBR ve RdNBR'den daha iyi sınıflandırdığını bulmuşlar ve RBR'nin kullanımını önermişlerdir. Ariza vd. (2019) ise yaptığı çalışmayla bu öneriyi desteklemişlerdir. Chen vd. (2011)'nin çalışmasında dNDVI en iyi performans gösteren indeks olurken, García-Llamas vd. (2019)'nin çalışmasında ilk üçe girmiştir. Veraverbeke vd. (2011) ve Fernández-García vd. (2018)'nin çalışmalarında ise diğer indekslere göre daha kötü bir performans sergilemiştir. Hudak vd. (2007) ise NDVI'nin performansının NBR'a göre kötü olmadığını ve onunda kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Arnett vd. (2015) düşük şiddette gerçekleşen bir kontrollü yangın için hem Landsat hem de rapideye uydu görüntülerinden türetilen spektral indeksler arasında en iyi performans gösteren indeks olarak dSAVI'yi bulmuşlardır. Bunun sebebinin dSAVI'nin yangının düşük şiddetle yandığı ve yanma derinliğinin az olduğu bölgeleri daha iyi temsil ettiğinden kaynaklandığı belirtilmektedir. Görüldüğü üzere farklı bölgelerde ve farklı vejetasyon tiplerinde yapılan çalışmalarda farklı indeksler ön plana çıkmıştır.

Optik uzaktan algılama verilerinden elde edilen yansıma tabanlı indeksler bitki fenolojisine ve güneş yüksekliğine karşı hassastır, bu nedenle zaman içindeki veya bölgeler arasındaki yanma derinliği eğilimlerinin izlenmesi konusunda hatalı kullanımlara sebebiyet verebilir (Verbyla vd., 2008). Optik uzaktan algılama verilerinden türetilen yanma derinliği sınıflandırmalarında yanmamış veya çok yanmış alanlar için stabildir. Ancak çoklu etkilerin birleştiği orta şiddet seviyeleri için tutarsız hale gelebilir. Bazı çalışmalar optik uzaktan algılamanın orta şiddette yanma derinliğini sınıflandırmada başarısız olduğunu belirtmektedir (Chuvieco vd., 2006).

Son çalışmalar, yersel ölçümler ile ölçülen yanma derinliğinin, SAR (Synthetic Aperture Radar-Sentetik Açıklıklı Radar) veya LiDAR (Light Detection and Ranging- Işık Tespiti ve Uzaklık Tayini) gibi aktif sensörlerden tahmin edilebileceğini göstermiştir (Tanase vd., 2015a). Aktif sensörler, orman yanıcı maddelerinden saçılan dalgaların miktarına duyarlı olduklarından, bitki örtüsü yapısının doğrudan bir ölçüsünü sağlar. Aktif bir sensör olarak SAR, optik sensörlerden farklı olarak gece de çalışır ve hemen hemen her türlü hava koşulunda kullanılabilir.

Lasaponara ve Tucci (2019)'nin İtalya'nın güneyinde halep çamının (*Pinus halepensis* Mill) hâkim olduğu ormanda yaptıkları çalışmada yanmış alan haritalaması için SAR kullanılmış yanma derinliği için 89% civarında doğruluk oranları ile başarı sağlanmışlardır. Bu çalışmadaki yaklaşımın geleneksel yaklaşımlara göre en önemli avantajlarından biri hem yanan alanların hem de farklı yanma derinliği sınıflarının otomatik olarak ve sabit eşik değerleri kullanılmadan tanımlanabilmesi olmuştur. Bu ve buna benzer çalışmalara rağmen, yanmış bitki örtüsüne sahip

alanlarda geri saçılmanın polarizasyona (VV, HH, VH ve HV), frekansa (X, C ve L), toprak nemine ve topografyaya göre değişkenlik göstermesi kullanımını kısıtlamaktadır (Tanase vd., 2015b).

Optik uzaktan algılama ile spektral yansımadan türetilen indeksler, yalnızca yanma derinliğinin iki boyutlu bir anlayışını geliştirmek için faydalıdır ve orman yapısal değişkenlerini üç boyutlu olarak ölçmek için uygun değildir. Bu tahminler yanıcı madde katmanlarındaki değişikliklerin doğrudan bir ölçümü olmadığı için yalnızca yanma derinliğinin bir indeksini sağlar (Morgan vd., 2014). Orman yapısal özellikleri, orman yangın bilimine doğrudan uygulanabilen ve ormanın üç boyutlu ölçümlerini yapan LiDAR sensörleri kullanılarak ölçülebilir (Fernández-Álvarez vd., 2019). LiDAR kullanarak artık orman yapısını Karasal Lazer Tarama (TLS) kullanarak arsa ölçeğinde, Havadan Lazer Tarama (ALS) kullanarak peyzaj ölçeğinde ve uzay kaynaklı lazer sensörleri kullanarak küresel ölçekte temsil etmek mümkündür. ALS verileri, büyük yangın çevrelerini kapsayabilecek bir ölçekte ve çözünürlükte toplanabildiğinden, özellikle yapısal yangın etkileri verilerinin sağlanması için çok uygundur (Skowronski vd., 2020).

LiDAR verileri, yangın öncesi ve sonrası bitki örtüsü yapısı ölçümleri sağlayarak yanma derinliğinin temelini oluşturan yanıcı madde tüketim miktarı hakkında bilgi verir (Szapkowski ve Jensen, 2019). Wang ve Glenn (2009), ortalama bitki örtüsü yüksekliği değişimini kullanarak adaçayı bozkır meralarında LiDAR verisinden türetilen yanma derinliği tahminlerinin potansiyelini göstermişlerdir. Bu yöntem genel olarak %84 doğrulukla dNBR'den daha iyi performans göstermiş ve orta ve çok yanmış yanma derinliği sınıfları arasındaki farklara karşı hassas olduğunu kanıtlamıştır. LiDAR, bitki örtüsü yapısını ölçme yeteneği nedeniyle yanma derinliğini değerlendirmek için yararlı bir teknoloji olabilir. Ancak bu teknoloji, maliyeti ve çoğu alan için güncel yangın öncesi verilerinin olmaması nedeniyle sınırlıdır. LiDAR daha ucuz ve daha yaygın olarak kullanılabilir hale geldikçe bu değişebilir, ancak şimdilik bu faktörler yanma derinliği değerlendirmelerinde kullanımını sınırlandırmaktadır (Szapkowski ve Jensen, 2019).

6. YANMA DERİNLİĞİNİN YERSEL ÖLÇÜMLERİ

Araştırmacılar bir yandan orman yangınından sonra spektral bölgelerdeki değişimi tespit etmeye çalışırken, bir yandan da bu veriler ile karşılaştırabilmek amacıyla yanma derinliği tespiti için yersel ölçme protokolleri geliştirmeye çalışmışlardır. Bu protokollerin en çok bilineni Bileşik Yanma İndeksi-BYİ (Composite Burn Index-CBI)'dir. Key ve Benson (1999), ekolojik olarak yanma derinliğini tanımlamak ve Landsat uydusundan algılanan sinyalleri yer ölçümleri ile eşleştirme yoluna gitmişlerdir. Yer ölçümleri Landsat uydu görüntüsünün 30x30 m çözünürlüğüne uyumlu bir şekilde 60x60 m'lik yanma derecesi açısından homojen özellikler gösteren bir örnek alan içerisinde tam merkezde belirlenmek üzere yarıçapı 15 m olan bir daire (707 m²) şeklindeki örnek alanda gözleme dayalı yanma derinliği sınıflandırmasına dayanır. Bileşik yanma indeksi (BYİ) ölçüm tekniği, ormanı 5 tabakaya ayırır ve gözleme dayalı 0-3 arasında bir zarar derecelendirmesi yaparak veri toplar (Şekil 5).

BYİ, tüketilen yanıcı madde miktarı, toprak kömürleşme derecesi ve bitki yenilenme derecesi, ağaçların kavrulması veya kararması gibi görsel olarak değerlendirilmesine dayanır (Key ve Benson, 2006). BYİ, yangın sonrası NBR spektral indeksinin alan bazlı geçerliliğini teyit etmek için tasarlanmıştır (Lentile vd., 2006). Diğer yandan De Santis ve Chuvieco (2009), bileşik yanma indeksinin (BYİ) tutarsız olduğunu ve bazı ekosistemlerde iyi çalıştığını ama bazı ekosistemlerde iyi çalışmadığını öne sürmüşler ve yaptıkları çalışmada BYİ'nin değiştirilmiş bir versiyonu olan GeoBYİ (Geometrically Structured Composite Burn Index-GeoCBI)'i önermişlerdir. GeoBYİ'nin BYİ'den farkı ise gözlem yapılan farklı bitki tabakalarını ağırlıklandırmasıdır. Yani tabaka başına bitki örtüsü kaplama oranını dikkate almasıdır. Bu sayede yansıma değerlerini BYİ'e göre daha tutarlı bir şekilde ifade ettiğini belirtmişlerdir (De Santis ve Chuvieco, 2009). Ayrıca Soverel vd.

(2010) tarafından tepe örtüsünün etkisini arttırarak üst ağaç katmanına ilave ağırlık kazandıran BYİ'nin modifiye edilmiş başka bir versiyonu wBYİ'yi kullanmışlardır.

De Santis ve Chuvieco (2009)'nin BYİ'nin bazı bölgeler ve bazı vejetasyon türlerinde iyi sonuç vermediğini ileri sürerek GeoBYİ'yi önermesinden sonra bazı çalışmalar ya BYİ yerine GeoBYİ kullanmışlar ya da her ikisini kullanarak hangisinin spektral yansıma değerleri ile daha iyi ilişki gösterdiğini anlamaya çalışmışlardır. Örneğin Mallinis vd. (2018)'nin Yunanistan da yaptıkları çalışmada hem Landsat-8/OLI hem de Sentinel-2 uydu görüntülerinden türetilen spektral indeksler ile GeoBYİ, BYİ'e göre daha iyi ilişkiler göstermiştir.

Parker vd. (2015)'nin Avustralya'da yaptığı çalışmada ise Landsat uydu görüntülerinden türetilen dNBR spektral indeksinin GeoBYİ ile olan ilişkisi yüksek seviyede çıkmıştır. Ancak, Cansler ve McKenzie (2012)'nin Amerika'da gerçekleştirdikleri çalışmada BYİ'nin GeoBYİ'e göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Saulino vd. (2020) ise Landsat-8/OLI'den türetilen spektral indeksler ile BYİ'nin, Sentinel-2'den türetilen spektral indeksler ile GeoBYİ'nin daha iyi bir ilişki gösterdiğini belirtmişlerdir. Görüldüğü üzere farklı bölgelerde ve farklı vejetasyon tiplerinde yersel ölçüm tekniklerinin uydu görüntülerinden türetilen spektral indeksler ile ilişkileri de farklı çıkmaktadır.

7. YANMA DERİNLİĞİ SINIFLANDIRMASI İÇİN SPEKTRAL İNDEKS EŞİK DEĞERLERİ

Uzaktan algılama verileri ile elde edilen yanma derinliği indeks değerleri erişilebilir olsalar da yöneticiler tarafından düzgün bir şekilde anlaşılabilmesi için saha verileri ile açıklanması gerekir. Bu amaçla uzaktan algılama ile elde edilen verilerin saha ölçümleri ile karşılaştırılması esastır (Cardil vd., 2019).

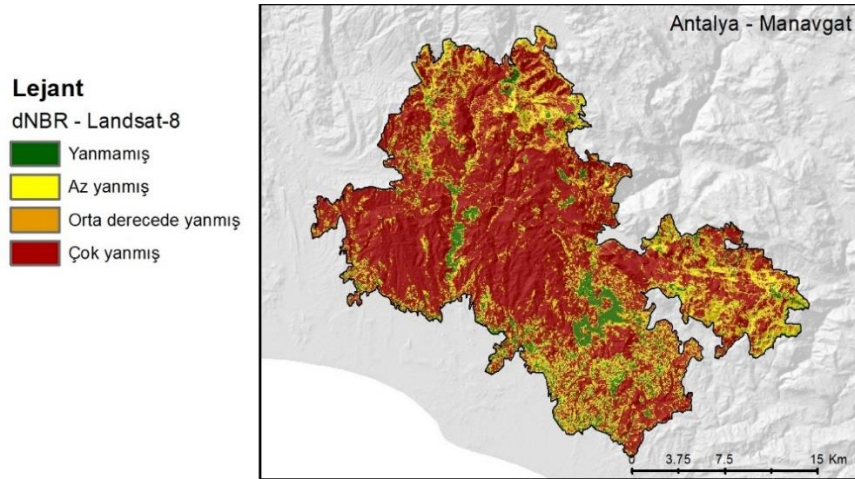
Yangının orman alanları üzerindeki etkisinin yangının şiddetine, kalış süresine ve hassas dokuları korumak adına her ağacın büyüklüğüne ve kapasitesine bağlı olduğu açıktır (Michaletz ve Johnson, 2007). Bu husus özellikle her ağacın büyüklüğüne, türe bağlı fizyolojik özelliklere ve yangın olayından kaynaklanan zaman akışına bağlı olarak aynı yangın şiddetinde farklı tepkiler verdiğinden her vejetasyon türünde farklı yanma derinliği durumları oluşabilir (Valor vd., 2017). Bunlar farklı birer spektral tepki ve dolayısıyla kalibre edilmesi gereken farklı yanma derinliği değerleriyle sonuçlanır (Miller ve Quayle, 2015). Bu yüzden çoğu araştırmacı kendi ülkelerinde farklı vejetasyon tiplerini içeren bölgelerde bu eşik değerlerini test etme ihtiyacı duymuştur (Mallinis vd., 2018). Ayrıca bazı çalışmalar farklı bölgelerde çok kullanılan spektral indeks olan dNBR'ı kullanarak yanma derinliği sınıfları için farklı eşik değer sınıflandırması oluşturulmuşlardır (Tablo 1). Farklı bölgelerde ve farklı vejetasyon tiplerinde oluşturulan bu eşik değerlere göre de yanma derinliği haritaları oluşturulmakta ve yanma derinliği sınıflandırılmaktadır.

Tablo 1. Farklı çalışmalardaki yanma derinliği sınıflandırmasının dNBR spektral indeksi eşik değerlerindeki değişkenliği

Çalışma	Bölge	Yanma Derinliği Sınıfı			
		Yanmamış	Az Yanmış	Orta Derecede Yanmış	Çok Yanmış
Parker vd. (2015)	Avustralya	<77	78-257	258-427	>428
Miller ve Thode (2007)	Kaliforniya, ABD	<41	41-176	177-366	>367
Key ve Benson (2006)	Montana, ABD	<99	100-269	270-659	>660
Hoscilo vd. (2013)	Endonezya	<53	54-213	214-550	>550
Montealegre vd. (2014)	İspanya	<81	82-198	199-545	>545
Mallinis vd. (2018)	Yunanistan	<124	125-279	278-505	>506
Epting vd. (2005)	Alaska, ABD	<90	90-274	275-679	>680
Hall vd. (2008)	Kanada	<40	41-283	284-513	

8. YANGIN SONRASI EKOSİSTEM TABANLI PLANLAMA İÇİN YANMA DERİNLİĞİ SINIFLANDIRMASI

Akdeniz ekosistemlerinde ve aşırı hava koşullarında meydana gelen yangınlarda alanların büyük çoğunluğu yüksek yanma derinliğine sahiptir. Bu tür yangınlar ekosistemler için yıkıcı sonuçlar doğurmaktadır. Bu anlamda düşünüldüğünde Akdeniz bitki örtüsünün yaşadığı karışık şiddetteki bir yangın sonrası oluşan mozaik yapı içerisinde yanmayan veya az yanan alanlarının boyutunun ve desenlerinin belirlenmesi, fauna için ekolojik sığınakların mekânsal kapsamı ve vejetasyon açısından da yangın sonrası rejenerasyon için tohum kaynakları hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır (Saulino vd., 2020). Restorasyon/koruma perspektifinden bakıldığında, bu yanmamış ile az yanmış alanlar biyolojik miras olarak işlev görmektedir (Turner vd., 1998) ve kalıntı türlerin komşu yanmış alanı yeniden canlandırabileceği habitatlar sağlamaktadır. Bu amaçla yangınlar sonucu ortaya çıkan farklı derecelerde yanmış ve yanmamış alanların sürdürülebilir ekolojik bir yaklaşım ile planlanması gerekmektedir (Baysal vd., 2016). Bu planlamayı iyi bir şekilde yapabilmeyen ilk adımı yangının oluşturduğu zararın doğru bir şekilde belirlenmesi ve yanma derinliği haritalarının oluşturulmasıdır (Şekil 4). Özellikle nitelikli yanma derinliği belirlemeleri sadece yangın yöneticileri için çok yararlı olmakla kalmaz, aynı zamanda araştırmacıların yangınlarla orman ekosistemleri arasındaki ilişkiyi daha ayrıntılı kavramaları ve doğru şekilde anlamalarına da yardımcı olacaktır.



Şekil 4. 2021 yılında meydana gelen Antalya-Manavgat yangını için landsat 8/OLI uydu görüntüsünden türetilen dNBR spektral indeksine göre hazırlanan yanma derinliği haritası (Güney, 2022)

Yanma derinliği, bitkilerin yaralanmasını, ölümünü ve yeniden filizlenen türlerin oluşma oranını etkiler (Ryan ve Noste, 1985). Bitki rejenerasyonu, yerinde tohumlardan, saha dışındaki tohum kaynaklarından veya kök ve gövde yapılarından vejetatif olarak meydana gelebilir (Lentile vd., 2007). Çok yanma derinliğine sahip alanlara kıyasla az ve orta derecede yanma derinliğine sahip alanlarda yangından sonra bitki örtüsünün daha hızlı iyileşmesi beklenir. Toprağın az veya daha fazla zarar görmesi gibi yangın sonrası orman zemini koşulları, yangın sonrası bitki örtüsü iyileşmesinin önemli belirleyicilerindedir. Yanma derinliğinin sınıflandırılması ve fazla zarar görmüş ve tekrar rehabilitesi zor alanların belirlenmesi yangın sonrası planlamacılar için faydalı olabilir. Yangından hemen sonra yanan alanda yapılacak yanma derinliği sınıflandırmaları yangın hasarı ve yenilenme potansiyelinin belirlenerek yangın sonrası restorasyon uygulamalarının etkili bir biçimde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır (Mauri ve Pons, 2019).

Erozyon, bitki örtüsünün tüketilmesi dışında kesinlikle yangının en görünür ve dramatik etkisidir. Yangın yönetimi faaliyetleri (orman yangını söndürme, kontrollü yangın ve yangın sonrası su havzası rehabilitasyonu) orman ekosistemlerindeki erozyon süreçlerini etkileyebilir. Orman

yangını, yangınla mücadele hattının yapımı, geçici yollar ve yoğun araç trafiğine maruz kalan yollar erozyonu artıracaktır. Orman yangınlarından sonra artan fırtına ve yağmur akışları da erozyon oranlarını artıracaktır (Neary vd., 2005). Yangın sonrası değişikliklerin büyüklüğü ve etkileri, doğası gereği yanma derinliği ile ilişkilidir. Daha yüksek yanma derinliği, yanan alanda akış ve erozyon oluşumunun yanı sıra, yanmış alandan yanmayan alana doğru yıkıcı sel ve enkaz akışı gibi olayları da artırır (Vieira vd., 2015). Bu nedenle toprak erozyonu tahminleri ve yangın sonrası etki azaltma önlemlerinin planlanması için toprak yanma derinliğinin uygun bir şekilde değerlendirilmesi çok önemlidir (Fernandez ve Vega, 2018).

Bir yangından sonra sediment akışındaki artışlar, akarsular, nehirler ve göllerdeki suyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik kalitesi üzerinde etkilere neden olabilir. Bu etkilerin önemli ölçüde diğer faktörler ile birlikte yanma derinliğine ve yanma anında su kaynaklarının durumuna bağlıdır. Yangın, su kalite özelliklerini hidrolojik döngü ve erozyon rejimlerinde yapmış olduğu değişiklikler nedeniyle etkiler (Neary vd., 2005). Su kalitesi için en önemli fiziksel özellikler arasında tortu konsantrasyonları, bulanıklık ve su sıcaklığı yer alır. Bir yangının su kalitesine olan olumsuz etkisi farklı yanma derinliği ile farklı olacaktır (DeBano vd., 1996).

Yangınların çoğu faunayı yaralama veya öldürme potansiyeline sahiptir ve büyük/şiddetli yangınlar yollarına çıkan hayvanlar için kesinlikle tehlikelidir (Bendell, 1974). Yer üstünde yaşayan sınırlı hareket kabiliyetine sahip hayvanlar, yangının neden olduğu yaralanma ve ölümlere karşı en savunmasız hayvanlardır ancak bazen büyük memeliler bile yangınlarda ölmektedir. Yangınlar öldürmekten ziyade daha çok habitat üzerindeki etkileri yüzünden türlerin popülasyonlarını etkilemektedir. Yangının yaktığı vejetasyon ve bunun sonunca oluşan yiyecek kaybı sebebiyle habitatın zarar görmesi, yangın anındaki etkilerden daha tehlikeli olabilmektedir (Smith vd., 2000). Yangın, türün menzili ve hareketliliği sınırlıysa veya özel üreme alışkanlıklarına sahipse, zaten küçük olan bir popülasyonu tehdit edebilir (Smith, 1997). Orman yangınlarının memeliler ve yaşadıkları habitatlar üzerinde bazı olumlu etkileri de olabilir. Küçük memeliler yüksek üreme oranlarına sahiptir. Bu nedenle, yangın sonrası habitatlar onlar için yiyecek ve barınak sağlarsa popülasyonları hızla iyileşebilir. Yanmış alanlarda hafif yanmış bitki örtüsü parçaları olabilir ve bu tür alanlar küçük memeliler için sığınak sağlayabilir (Akkuzu vd., 2014). Bu açıdan bakıldığında yangın sonrası fauna popülasyonlarının ne kadar değişebileceğinin belirlenebilmesi için yanma derinliğinin sınıflandırılması önem arz etmektedir (Roberts vd., 2008).

Orman yangınları, yerel veya daha büyük ölçekte hava kalitesini etkileyebilecek, atmosfere yayılan çeşitli gazların ve partiküllerin önemli bir kaynağıdır. Orman yangınlarından çıkan duman, önemli miktarlarda karbondioksit (CO₂), karbon monoksit (CO), metan (CH₄), azot oksitler (NO_x), amonyak, partikül madde (PM), metan olmayan hidrokarbon (NMHC) ve diğer kimyasal bileşikler içerir. Bu hava kirleticileri hava kalitesinde ciddi sonuçlara neden olabilir. Bu nedenle, emisyonlar ve hava kalitesi arasındaki ilişkiyi anlamak ve kurmak esastır (Miranda vd., 2014). Küresel olarak, biyokütle yangınları, yanma kaynaklı toplam organik karbon (OK) emisyonlarının 74%'üne katkıda bulunur (fosil yakıt kaynaklarından oluşan emisyonun yaklaşık on katı) (Bond vd., 2004). Bu sebeple yangın sonrasında yanıcı madde tüketim miktarının bir göstergesi olan yanma derinliği haritalamaları yanan organik karbon miktarının hesaplanması ve daha sonrası hava kirliliğinin belirlenmesinde temel atık olarak kullanılmaktadır (Veraverbeke ve Hook, 2013).

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda büyüklüğü ve şiddeti artan aşırı orman yangınlarından sonra ekosistemin planlanabilmesi için yanma derinliği haritaları oluşturulmalıdır. Bunun için de performansları ölçülmüş yersel ölçüm tekniklerine, uydu görüntülerinden türetilmiş spektral indekslere ve yanma derinliğini sınıflandırabilmek için bu spektral indeks yansımalarının eşik değerlerine

ihtiyaç vardır. Çünkü farklı bölgelerde ve farklı vejetasyon tiplerinde bu eşik değerler farklı olmaktadır. Bu yüzden şu ana kadar bu konuda farklı spektral indekslerin performanslarını test eden birçok çalışma olmasına rağmen hala farklı bölgeler ve vejetasyon tipleri için bu eşik değerler kalibre edilmelidir. Yanma derinliği haritalarını oluştururken başka bir bölge ve vejetasyon tipi için oluşturulan eşik değerler kullanılmamalıdır. Çünkü bu hatalı sınıflandırmaya sebep olabilir. Diğer yandan aktif uzaktan algılama yöntemlerinden SAR'ın kullanımı geri saçılmanın polarizasyona, frekansa, toprak nemine ve topografyaya göre değişkenlik göstermesi, değerlendirme ve yorumlamanın daha karmaşık olması nedeniyle yanma derinliği haritalamaları için henüz istenilen düzeyde olmadığı sonucunu doğurmaktadır. Ayrıca LiDAR teknolojisinin, maliyetinin fazla olması ve çoğu alan için güncel yangın öncesi verilerinin olmaması nedeniyle kullanımı ise hala sınırlı kalmaktadır. Bu yüzden günümüzde optik uydu verileri özellikle de ücretsiz erişilebilenleri (Sentinel ve Landsat) büyük yangınlar sonrasında yanma derinliği haritalarını üretebilmek için en iyi seçenek gibi görünmektedir. Diğer yandan BYİ ve GeoBYİ gibi yanma derinliğini ölçen yersel ölçüm teknikleri de her ne kadar bütün vejetasyon tiplerine uygulanabilir genellikle hazırlanmış olmalarına rağmen bölgesel vejetasyon tiplerine ve kullanılacak uzaktan algılama yönteminin özelliklerine göre yeniden modifiye edilerek kullanılabilirler. Ancak bunun için daha çok araştırmaya ihtiyaç vardır.

Yangın ekolojisi konusunda çalışanlar artık yangınları evrimsel sonuçları olan ve temelde insan eylemleri tarafından şekillendiren dinamik ekolojik süreçler olarak görmektedirler. Yangın ekolojileri ekonomik bir sistemin bir parçası olarak yangının değişen doğası hakkında giderek daha ayrıntılı spesifik bir anlayış oluşturmaya başlamışlardır. Yangın artık tekrarlanan bir süreç olarak kabul edilmekte ve doğrudan ekolojik etkilere sahip olan ve tüm türlerin tarihleri boyunca özelliklerini şekillendirebilecek bir güç olarak hareket eden yangın rejimleri ile ifade edilmektedir. Yangın rejimlerinin zamansal ve mekânsal heterojenliği yangının ekolojik etkilerinin de farklı şekillerde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu yüzden yangın rejimlerinde meydana gelen farklılıkların sebepleri ve bunların ekolojik etkileri hakkında birtakım sorular hala devam etmektedir. Yakın tarihli birçok mega/aşırı yangının doğal ekosistemler ve insanlar için olumsuz sonuçları olmuştur. Değişen iklim senaryoları altında gelecekteki yangın faaliyetlerinde artış olacağı göz önüne alındığında ekolojik etkilerinin belirlenmesi konusunun da araştırılmasına ve anlaşılmasına ihtiyaç vardır. Bu sayede yangınların oluşturduğu ekonomik ve ekolojik kayıpların önüne geçilebileceği gibi daha iyi koruma ve planlama uygulamalarının hazırlanmasına fırsat verebilir.

KAYNAKLAR

Agee, J. K., 1993, Fire ecology of Pacific Northwest forests, California, ABD, Island press.

Akkuzu E, Kucuk Ö, Ünal S, Evcin Ö, Uğuş A. (2014). Effects of Forest Fires on Mammal Species: A Brief Review. International Forest Fire Conference in Black Sea Region, Kastamonu.

Albini, F. A., 1976, Estimating wildfire behavior and effects, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Utah, ABD, 92.

Albini, F. A. Reinhardt, E. D., 1995, Modeling ignition and burning rate of large woody natural fuels, International Journal of Wildland Fire, 5 (2): 81-91. <https://doi.org/10.1071/WF9950081>

Ariza, A., Rey, J. S. de Miguel, S. M., 2019, Comparison of maximum likelihood estimators and regression models for burn severity mapping in Mediterranean forests using Landsat TM and ETM+ data, Revista Cartogr. ráfica (98): 145-177. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i98.145>

Arnett, J. T. T. R., Coops, N. C., Daniels, L. D. Falls, R. W., 2015, Detecting forest damage after a low-severity fire using remote sensing at multiple scales, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 35: 239-246. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.013>

Baysal, İ., Bilgili, E. Başkent, E. Z., 2016, Orman Yangınları ve Orman Amenajman Planları, Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 16 (1): 169-180. <https://doi.org/10.17475/kuiff.48428>

Bendell, J. F., 1974, Effects of fire on birds and mammals, In: Fire and ecosystems, Eds: Kozlowski, T. T., Minnesota, ABD: Academic Press, New York, p.

Bird, R. B., Bird, D. W., Codding, B. F., Parker, C. H. Jones, J. H., 2008, The “fire stick farming” hypothesis: Australian Aboriginal foraging strategies, biodiversity, and anthropogenic fire mosaics, PNAS, 105 (39): 1-6. <https://doi.org/10.1073/pnas.08047571>

Bond, T. C., Streets, D. G., Yarber, K. F., Nelson, S. M., Woo, J. H. Klimont, Z., 2004, A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 109 (D14). <https://doi.org/10.1029/2003JD003697>

Bond, W. J. Keeley, J. E., 2005, Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems, Trends in ecology & evolution, 20 (7): 387-394. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>

Bowman, D. M., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D’Antonio, C. M., DeFries, R. S., Doyle, J. C. Harrison, S. P., 2009, Fire in the Earth system, Science, 324 (5926): 481-484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>

Brewer, C. K., J. Chris Winne, Roland L. Redmond, David W. Opitz Mangrich, M. V., 2005, Classifying and mapping wildfire severity: A comparison of methods, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 71: 1311-1320. <https://doi.org/10.14358/PERS.71.11.1311>

Butler, B., Cohen, J., Latham, D., Schuette, R., Sopko, P., Shannon, K., Jimenez, D. Bradshaw, L., 2004, Measurements of radiant emissive power and temperatures in crown fires, Canadian Journal of Forest Research, 34 (8): 1577-1587. <https://doi.org/10.1139/X04-060>

Byram, G., 1959, Combustion of forest fuels. In ‘Forest fire: control and use’.(Ed. KP Davis) pp. 61-89, McGraw-Hill: New York.

Cansler, C. A. McKenzie, D., 2012, How robust are burn severity indices when applied in a new region? Evaluation of alternate field-based and remote-sensing methods, Remote Sensing, 4 (2): 456-483. <https://doi.org/10.3390/rs4020456>

Cardil, A., Mola-Yudego, B., Blazquez-Casado, A. Gonzalez-Olabarria, J. R., 2019, Fire and burn severity assessment: Calibration of Relative Differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) with field data, Journal of Environmental Management, 235: 342-349. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.077>

Chen, X., Vogelmann, J. E., Rollins, M., Ohlen, D., Key, C. H., Yang, L., Huang, C. Shi, H., 2011, Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest, International Journal of Remote Sensing, 32 (23): 7905-7927. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.524678>

Chuvieco, E., Riaño, D., Danson, F. M. Martin, P., 2006, Use of a radiative transfer model to simulate the postfire spectral response to burn severity, Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 111 (G4). <https://doi.org/10.1029/2005JG00014>

Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G. R., San Miguel, J., Tanasse, M., Koutsias, N., García, M., Yebra, M., Padilla, M. Gitas, I., 2019, Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation, Remote sensing of Environment, 225: 45-64. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>

Cochrane, M. A. Ryan, K. C., 2009, Fire and fire ecology: Concepts and principles, In: Tropical Fire Ecology, Eds: Springer, p. 25-62. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77381-8_2

Conard, S. G., Sukhinin, A. I., Stocks, B. J., Cahoon, D. R., Davidenko, E. P. Ivanova, G. A., 2002, Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia, Climatic change, 55 (1-

2): 197-211. <https://doi.org/10.1023/A:1020207710195>

Cruz, M., Butler, B., Alexander, M., Forthofer, J., Wakimoto, R., 2006, Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part I: Model idealization, *International Journal of Wildland Fire*, 15. <https://doi.org/10.1071/WF04061>

De Santis, A., Chuvieco, E., 2009, GeoCBI: a modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data, *Remote sensing of Environment*, 113 (3): 554-562. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.011>

DeBano, L. F., Ffolliott, P. F., Baker, M. B., 1996, Fire severity effects on water resources, US Department of Agriculture, Forest Service, 77-84.

Dickinson, M. B., Johnson, E. A., 2001, Fire effects on trees, In: *Forest fires*, Eds: Elsevier, p. 477-525. <https://doi.org/10.1016/B978-012386660-8/50016-7>

Dickinson, M. B., Johnson, E. A., 2004, Temperature-dependent rate models of vascular cambium cell mortality, *Canadian Journal of Forest Research*, 34 (3): 546-559. <https://doi.org/10.1139/X03-223>

Epting, J., Verbyla, D., Sorbel, B., 2005, Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+, *Remote sensing of Environment*, 96 (3-4): 328-339. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.002>

Fernández-Álvarez, M., Armesto, J., Picos, J., 2019, LiDAR-based wildfire prevention in WUI: The automatic detection, measurement and evaluation of forest fuels, *Forests*, 10 (2): 148. <https://doi.org/10.3390/f10020148>

Fernández-García, V., Santamarta, M., Fernández-Manso, A., Quintano, C., Marcos, E., Calvo, L., 2018, Burn severity metrics in fire-prone pine ecosystems along a climatic gradient using Landsat imagery, *Remote sensing of Environment*, 206: 205-217. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.029>

Fernandez, C., Vega, J. A., 2018, Evaluation of the rusle and disturbed wepp erosion models for predicting soil loss in the first year after wildfire in NW Spain, *Environmental Research*, 165: 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.04.008>

Frandsen, W. H., Ryan, K. C., 1986, Soil moisture reduces belowground heat flux and soil temperatures under a burning fuel pile, *Canadian Journal of Forest Research*, 16 (2): 244-248. <https://doi.org/10.1139/x86-043>

French, N. H., Kasischke, E. S., Hall, R. J., Murphy, K. A., Verbyla, D. L., Hoy, E. E., Allen, J. L., 2008, Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results, *International Journal of Wildland Fire*, 17 (4): 443-462. <https://doi.org/10.1071/WF08007>

García-Llamas, P., Suárez-Seoane, S., Fernández-Guisuruga, J. M., Fernández-García, V., Fernández-Manso, A., Quintano, C., Taboada, A., Marcos, E., Calvo, L., 2019, Evaluation and comparison of Landsat 8, Sentinel-2 and Deimos-1 remote sensing indices for assessing burn severity in Mediterranean fire-prone ecosystems, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80: 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.006>

Güney, C. O., 2022, Uydu görüntülerinden türetilen spektral indeksler kullanılarak orman ekosistemlerinde yanma derinliğinin tahmin edilmesi, Doktora, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.

Güney, C. O., Sarı, A., Cekim, H. O., Küçüksille, E. U., Sentürk, Ö., Gülsoy, S., Özkan, K., 2022, An advanced approach for leaf flammability index estimation, *International Journal of Wildland Fire*, 31 (3): 277-290. <https://doi.org/10.1071/WF21022>

Hall, R. J., Freeburn, J. T., De Groot, W. J., Pritchard, J. M., Lynham, T. J., Landry, R., 2008, Remote sensing of burn severity: experience from western Canada boreal fires, *International Journal of Wildland Fire*, 17 (4): 476-489. <https://doi.org/10.1071/WF08013>

Heikkilä, T. V., Grönqvist, R. Jurvélius, M., 2010, Wildland fire management: handbook for trainers, Roma, Italy, FAO.

Hoscilo, A., Tansey, K. J. Page, S. E., 2013, Post-fire vegetation response as a proxy to quantify the magnitude of burn severity in tropical peatland, *International Journal of Remote Sensing*, 34 (2): 412-433. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.709328>

Hudak, A. T., Morgan, P., Bobbitt, M. J., Smith, A. M. S., Lewis, S. A., Lentile, L. B., Robichaud, P. R., Clark, J. T.

McKinley, R. A., 2007, The relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects, *Fire ecology*, 3 (1): 64-90. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0301064>

Johnson, E. A. Miyanishi, K., 2001, *Forest Fires: Behavior and Ecological Effects*, Canada, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-123-86660-8.X5000-4>

Keeley, J. E. Zedler, P. H., 1998, Evolution of life histories in Pinus, In: *Ecology and biogeography of Pinus*, Eds: Richardson, D. M., Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, p. 219-250.

Keeley, J. E. Fotheringham, C. J., 2000, Role of fire in regeneration from seed, *Seeds: the ecology of regeneration in plant communities*, 2: 311-330.

Keeley, J. E., 2009, Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage, *International Journal of Wildland Fire*, 18 (1): 116-126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>

Key, C. H. Benson, N. C., 1999, Measuring and remote sensing of burn severity. *Proceedings Joint Fire Science Conference and Workshop*. Idaho, USA, University of Idaho and International Association of Wildland Fire Moscow, ID. 2: 284.

Key, C. H., 2006, Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity, *Fire ecology*, 2 (2): 34-59. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0202034>

Key, C. H. Benson, N. C., 2006, Landscape assessment (LA), In: In: Lutes, Duncan C.; Keane, Robert E.; Caratti, John F.; Key, Carl H.; Benson, Nathan C.; Sutherland, Steve; Gangi, Larry J. 2006. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. LA-1-55, Eds, p. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-164>

Küçük, Ö., 2009, Yangın Ekolojisi, I.Orman Yangınları ile Mücadele Sempozyumu, 07-10 Ocak 2009, Antalya.

Lasaponara, R. Tucci, B., 2019, Identification of burned areas and severity using SAR Sentinel-1. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 16: 917-921.

Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., Lewis, S. A., Gessler, P. E. 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. <https://doi.org/10.1071/WF05097>

Lentile, L. B., Morgan, P., Hudak, A. T., Bobbitt, M. J., Lewis, S. A., Smith, A. M. S. Robichaud, P. R., 2007, Post-fire burn severity and vegetation response following eight large wildfires across the Western United States, *Fire ecology*, 3 (1): 91-108. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0301091>

Liu, Z. Wimberly, M. C., 2015, Climatic and landscape influences on fire regimes from 1984 to 2010 in the western United States, *PLoS One*, 10 (10): e0140839. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140839>

Mallinis, G., Mitsopoulos, I. Chrysafi, I., 2018, Evaluating and comparing Sentinel 2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece, *GIScience & Remote Sensing*, 55 (1): 1-18. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1354803>

Mauri, E. Pons, P., 2019, Handbook of good practices in post-wildfire management, 2nd ed., Anifog Project I+D+i CGL2014-54094-R, Spain, Universitat de Girona.

Michaletz, S. T. Johnson, E. A., 2006, A heat transfer model of crown scorch in forest fires, Canadian Journal of Forest Research, 36 (11): 2839-2851. <https://doi.org/10.1139/X06-158>

Michaletz, S. T. Johnson, E. A., 2007, How forest fires kill trees: a review of the fundamental biophysical processes, Scandinavian Journal of Forest Research, 22 (6): 500-515. <https://doi.org/10.1080/02827580701803544>

Miller, J. D. Thode, A. E., 2007, Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR), Remote sensing of Environment, 109 (1): 66-80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>

Miller, J. D. Quayle, B., 2015, Calibration and validation of immediate post-fire satellite-derived data to three severity metrics, Fire ecology, 11 (2). <https://doi.org/10.4996/fireecology.1102012>

Miranda, A., Amorim, J. H., Valente, J., Monteiro, A., Ferreira, J. Borrego, C., 2014, Forest fires effects on the atmosphere: 20 years of research in Portugal, In: Advances in forest fire research, Eds: viegas, D. X.: Imprensa da Universidade de Coimbra, p. 283-297. https://doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6_30

Montealegre, A. L., Lamelas, M. T., Tanase, M. A. de la Riva, J., 2014, Forest fire severity assessment using ALS data in a Mediterranean environment, Remote Sensing, 6 (5): 4240-4265. <https://doi.org/10.3390/rs6054240>

Morgan, P., Hardy, C. C., Swetnam, T. W., Rollins, M. G. ve Long, D. G., 2001, Mapping fire regimes across time and space: understanding coarse and fine-scale fire patterns, International Journal of Wildland Fire, 10 (4), 329-342.

Morgan, P., Keane, R. E., Dillon, G. K., Jain, T. B., Hudak, A. T., Karau, E. C., Sikkink, P. G., Holden, Z. A. Strand, E. K., 2014, Challenges of assessing fire and burn severity using field measures, remote sensing and modelling, International Journal of Wildland Fire, 23 (8): 1045-1060. <https://doi.org/10.1071/WF13058>

Neary, D. G., Ryan, K. C. DeBano, L. F., 2005, Wildland Fire in Ecosystems: Effects of Fire on Soils and Water, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 4. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-42-V4>

Packham, D. R. Pompe, A., 1971, Radiation temperatures of forest fires, Australian Forest Research, 5 (3): 1-8.

Parker, B. M., Lewis, T. Srivastava, S. K., 2015, Estimation and evaluation of multi-decadal fire severity patterns using Landsat sensors, Remote sensing of Environment, 170: 340-349. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.014>

Parks, S. A., Dillon, G. K. Miller, C., 2014, A new metric for quantifying burn severity: the relativized burn ratio, Remote Sensing, 6 (3): 1827-1844. <https://doi.org/10.3390/rs6031827>

Pausas, J. G. Keeley, J. E., 2009, A burning story: the role of fire in the history of life, BioScience, 59 (7): 593-601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>

Pleniou, M. Koutsias, N., 2013, Sensitivity of spectral reflectance values to different burn and vegetation ratios: A multi-scale approach applied in a fire affected area, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79: 199-210. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.016>

Roberts, S. L., van Wagendonk, J. W., Miles, A. K., Kelt, D. A. Lutz, J. A., 2008, Modeling the effects of fire severity and spatial complexity on small mammals in Yosemite National Park, California, Fire ecology, 4 (2): 83-104. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0402083>

Ryan, K. C. Noste, N. V., 1985, Evaluating prescribed fires, in: JE Lotan et al.(tech. coord), Proceedings – Symposium and Workshop on Wilderness Fire, USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-182. Utah State University, 230-238.

Ryan, K. C. Frandsen, W. H., 1991, Basal injury from smoldering fires in mature *Pinus ponderosa* Laws, *International Journal of Wildland Fire*, 1 (2): 107-118. <https://doi.org/10.1071/WF9910107>

Ryan, K. C., 2002, Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems, *Silva Fennica*, 36 (1): 13-39. <https://doi.org/10.14214/sf.548>

Ryan, K. C., Jones, A. T., Koerner, C. L. Lee, K. M., 2012, *Wildland Fire in Ecosystems: Effects of Fire on Cultural Resources and Archaeology*, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 3. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 224 p. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-42>

Sandberg, D. V., 2009, *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on air*, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 5. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-42-V5>

Satio, K., 2001, *Flames*, In: *Forest Fires Behavior and Ecological Effects*, Eds: Johnson, E. A. M., K., eds. San Diego: Academic Press, p. 11-54.

Saulino, L., Rita, A., Migliozi, A., Maffei, C., Allevato, E., Garonna, A. P. Saracino, A., 2020, Detecting burn severity across Mediterranean forest types by coupling medium-spatial resolution satellite imagery and field data, *Remote Sensing*, 12 (4). <https://doi.org/10.3390/rs12040741>

Simard, S. J., 1991, Fire severity, changing scales, and how things hang together, *International Journal of Wildland Fire*, 1 (1): 23-34. <https://doi.org/10.1071/WF9910023>

Skowronski, N. S., Gallagher, M. R. Warner, T. A., 2020, Decomposing the interactions between fire severity and canopy fuel structure using multi-temporal, active, and passive remote sensing approaches, *Fire*, 3 (1). <https://doi.org/10.3390/fire3010007>

Smith, J. K., 1997, *Fire Ecology of The Forest Habitat Types of Northern Idaho*, General Technical Report INT-GTR-363, vol.363, US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-363>

Smith, J. K., Lyon, L. J., Huff, M., Hooper, R., Telfer, E. Schreiner, D., 2000, *Wildland Fire in Ecosystems. Effects of Fire on Fauna*, General Technical Report, RMRS-GTR-42. Rocky Mountain Research Station, USDA Forest Service.

Soverel, N. O., Perrakis, D. D. B. Coops, N. C., 2010, Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada, *Remote sensing of Environment*, 114 (9): 1896-1909. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.013>

Stocks, B. J., Lynham, T., Lawson, B., Alexander, M., Wagner, C. V., McAlpine, R. Dube, D., 1989, Canadian forest fire danger rating system: an overview, *The Forestry Chronicle*, 65 (4): 258-265.

Szpakowski, D. Jensen, J., 2019, A review of the applications of remote sensing in fire ecology, *Remote Sensing*, 11 (22). <https://doi.org/10.3390/rs11222638>

Tanase, M., Kennedy, R. Aponte, C., 2015a, Radar Burn Ratio for fire severity estimation at canopy level: An example for temperate forests, *Remote sensing of Environment*, 170: 14-31.

Tanase, M. A., Kennedy, R. Aponte, C., 2015b, Fire severity estimation from space: a comparison of active and passive sensors and their synergy for different forest types, *International Journal of Wildland Fire*, 24 (8). <https://doi.org/10.1071/wf15059>

Turner, M. G., Baker, W. L., Peterson, C. J. Peet, R. K., 1998, Factors influencing succession: Lessons from large, infrequent natural disturbances, *Ecosystems*, 1 (6): 511-523. <https://doi.org/10.1007/s100219900047>

Valor, T., González-Olabarria, J. R., Piqué, M. Casals, P., 2017, The effects of burning season and severity on the mortality over time of *Pinus nigra* spp. *salzmannii* (Dunal) Franco and *P. sylvestris* L, *Forest Ecology and Management*, 406: 172-183. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.027>

Veraverbeke, S., Lhermitte, S., Verstraeten, W. W. Goossens, R., 2011, Evaluation of pre/post-fire differenced spectral indices for assessing burn severity in a Mediterranean environment with Landsat Thematic Mapper, *International Journal of Remote Sensing*, 32 (12): 3521-3537. <https://doi.org/10.1080/01431161003752430>

Veraverbeke, S. Hook, S. J., 2013, Evaluating spectral indices and spectral mixture analysis for assessing fire severity, combustion completeness and carbon emissions, *International Journal of Wildland Fire*, 22 (5). <https://doi.org/10.1071/wf12168>

Verbyla, D. L., Kasischke, E. S. Hoy, E. E., 2008, Seasonal and topographic effects on estimating fire severity from Landsat TM/ETM+ data, *International Journal of Wildland Fire*, 17 (4): 527-534. <https://doi.org/10.1071/WF08038>

Vieira, D. C. S., Fernández, C., Vega, J. A. Keizer, J. J., 2015, Does soil burn severity affect the post-fire runoff and interrill erosion response? A review based on meta-analysis of field rainfall simulation data, *Journal of Hydrology*, 523: 452-464. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.071>

Wang, C. Glenn, N. F., 2009, Estimation of fire severity using pre- and post-fire LiDAR data in sagebrush steppe rangelands, *International Journal of Wildland Fire*, 18 (7). <https://doi.org/10.1071/wf08173>

Wells, C. G., Campbell, R. E., DeBano, L. F., Lewis, C. E., Fredriksen, R. L., Franklin, E. C., Froelich, R. C. Dunn, P. H., 1979, *Effects of Fire On Soil: A State-of-Knowledge Review*, Denver, Colorado, US Department of Agriculture, Forest Service.

Whelan, R. J., 1995, *The ecology of fire*, Cambridge university press, p.

White, J. D., Ryan, K. C., Key, C. C. Running, S. W., 1996, Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery, *International Journal of Wildland Fire*, 6 (3): 125-136. <https://doi.org/10.1071/WF9960125>

White, P. S. Pickett, S. T. A., 1985, *Natural Disturbance and Patch Dynamics: An Introduction*, In: Pickett, S.T.A., White, Peter S., *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*, Eds: Academic Press, p. 313. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-02952-3>

Willard, E. E., Wakimoto, R. H. Ryan, K. C., 1995, *Vegetation Recovery in Sedge Meadow Communities Within the Red Bench Fire, Glacier National Park, Fire in wetlands: a management perspective*. Proceedings of the Tall Timbers Fire Ecology Conference, No. 19., Tall Timbers Research Station, Tallahassee, FL., 102-110.

URL 1, 2022, *Wildfire Rank-Province of British Columbia*, <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/safety/wildfire-status/wildfire-response/about-wildfire/wildfire-rank>: Son Erişim Tarihi: 26.10.2022.