

Orman yangınları sonrasında ağaçların canlılık durumlarının tahmin edilmesi

Coşkun Okan Güney^{a,*}, Aylin Güney^b

Özet: Bir orman yangınından sonra, farklı derecelerde yanmış alanlardan oluşan mozaik bir yapı meydana gelmektedir. Kısmen yanmış ve yaşama ihtimali olan ağaçların ölüp ölmeyeceğinin tahmin edilmesi, yangın sonrası odun üretimi ve silvikültürel planlamalar için önemlidir. Yangın sonrası ağaçların canlılık durumlarının doğru şekilde tahmin edilebilmesi ise yangının meydana gelme süreçlerinin ve sonrasında ağaçlara nasıl zarar verdiğinin iyi bilinmesine bağlıdır. Tahminler yapılırken ağacın farklı kısımlarındaki zarar derecesi, morfolojik özellikler, yangın davranışı özellikleri ve ikinci dereceden ölüm etkenleri dikkate alınabilir. Genellikle lojistik regresyon yöntemi kullanılarak modellenmektedir. Bu modeller belirli doğruluk düzeyinde canlılık durumu tahminleri sağlamaktadır ve bireysel ağaçlar için oluşturulabileceği gibi meşcere düzeyinde de değerlendirilebilir. Bu derlemenin amacı, yangın sonrası canlılık durumu modelleme çalışmaları için kılavuz niteliğinde bilgiler sunmaktır. Bu amaçla, orman yangınları sonrasındaki ağaç ölüm mekanizmaları, canlılık durumu modellemelerinde kullanılan değişkenler ve ölçme yöntemleri, modellerin oluşturulması ve oluşturulan modellerin nasıl kullanılabileceği hakkında bilgiler verilmiş, bundan sonra yapılacak çalışmalar için literatür özetlenerek konunun iyi ve eksik yönleri tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yangın ekolojisi, Yangın hasarı, Yangın zararı, Kambiyum zararı, Lojistik regresyon

Predicting post-fire tree mortality

Abstract: After a forest fire, a mosaic structure of areas burned to varying degrees is created. Predicting whether partially burned and potentially viable trees will die is crucial for post-fire timber production and silvicultural planning. A good understanding of the processes of fire occurrence and fire damage to trees is essential for precise prediction of post-fire tree mortality. The degree of damage to different parts of the tree, morphological characteristics, fire behavior characteristics, and secondary mortality factors can be taken into account when making predictions and are usually modeled using logistic regression. These models provide mortality estimates at a certain level of accuracy and can be used for individual trees or stand level. The aim of this review is to provide guidelines for post-fire mortality modeling research. To this end, our review provides information on the mechanisms of post-fire tree mortality, variables and measurements used in mortality modeling, model construction and application, summarizes the literature for future studies, and discusses the strengths and weaknesses of the topic.

Keywords: Fire ecology, Fire damage, Fire injury, Cambium damage, Logistic regression

1. Giriş

Yangın, Akdeniz havzasındaki ağaç ölümlerinin en yaygın nedenidir (Quevedo vd., 2007). Orman yangınları, ağaçların ölmesine sebebiyet vererek ekosistemlerin üretkenliğini sınırlamak, kaynak kullanılabilirliğini, bitki örtüsünün yapısını ve bileşimini değiştirmek başta olmak üzere birçok şekilde ekosistemleri etkilemektedir (Bond ve Keeley, 2005). Bu etkilerin karbon depolama, biyoçeşitliliğin korunması, hidrolojik süreçler ve ekonomik/sosyal hizmetler üzerinde hem olumlu hem de olumsuz sonuçları olabilir (Bowman vd., 2009). Yangına adapte olmuş ve yangına bağımlı ekosistemlerde, yangın; ağaç yoğunluğunu ve tür hakimiyetini kontrol ederek, yangın olmadığında uzun süreli yaşam döngüsünde devamlılık sağlayamayacak çeşitli bitki ve hayvan türlerini destekleyen bir yaşam alanı yaratmaktadır (Hood ve Varner, 2019). Diğer yandan, yangına adapte olmuş ekosistemler son yıllarda iklim değişikliğiyle ortaya çıkan bir tehdit olarak artan yangın büyüklüğü, yangın sıklığı ve yanma derinliği (ing: fire severity) nedeniyle savunmasız

olabilirler (Flannigan vd., 2009). Yangın sıklığı ve yanma derinliğindeki iklim kaynaklı artışların ormanlık alanlarda meydana gelen kayıplar nedeniyle karbon stoklarında ve biyoçeşitliliğinde büyük düşüşlere sebep olacağı tahmin edilmektedir (Liang vd., 2017). Yangın rejimlerindeki bu değişiklikler orman alanlarını ormansız alanlar haline dönüştürebilirler (Fairman vd., 2016). Yangın etkilerini tahmin etmek için yerel ölçekten küresel ölçeye kadar yangının neden olduğu ağaç ölümlerinin nedenlerinin anlaşılması gereklidir (Hood ve Varner, 2019).

Yangın sonrası ağaçlarda canlılık durumunun tahmin edilmesi planlama ve yangın sahalarındaki kıymetli alanları (ağaçlandırma sahası, doğal yaşam alanı, su ve toprak koruma, erozyonu önleme sahası, vb.) kurtarma seçeneklerini değerlendirme adına önemlidir (Regelbrugge ve Conard, 1993). Bu tahminler, küçük alanlarda gerçekleşen örtü yangınları sonrası bir kesime gerek olup olmadığı, büyük yangınların kenarlarındaki az zarar görmüş ağaçların kesilip kesilmeyeceği konularında ve ekosistemin yeniden yapılanma sürecinde önemli işlevler görebilecek olan yangın

^a Ege Ormanlık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Orman Yangınları Araştırmaları Başmühendisliği, 35430, İzmir, Türkiye

^b İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Botanigi Anabilim Dalı, 35620, İzmir, Türkiye

* **Corresponding author** (İletişim yazarı): coskunokanguney@ogm.gov.tr

✓ **Received** (Geliş tarihi): 05.04.2024, **Accepted** (Kabul tarihi): 21.05.2024



Citation (Atıf): Güney, C.O., Güney, A., 2024. Orman yangınları sonrasında ağaçların canlılık durumlarının tahmin edilmesi. Turkish Journal of Forestry, 25(2): 220-232.

DOI: [10.18182/tjf.1441012](https://doi.org/10.18182/tjf.1441012)

sonrası sahada kalacak ağaçlara karar vermede yardımcı olacaktır (Güney vd., 2021). Ormanların planlanmasına yönelik yöneticiler tarafından kontrol edilebilir değişkenler ile yangın sonrası canlılık durumu modellerinin kullanılması, farklı yönetim alternatiflerinin sonuçlarını tahmin etmeye yardımcı olabilir ve böylece belirsizliği azaltabilmektedir. Ayrıca; bu modeller yangın nedeniyle beklenen kayıpları azaltacak yönetim alternatiflerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Von Gadow, 2000).

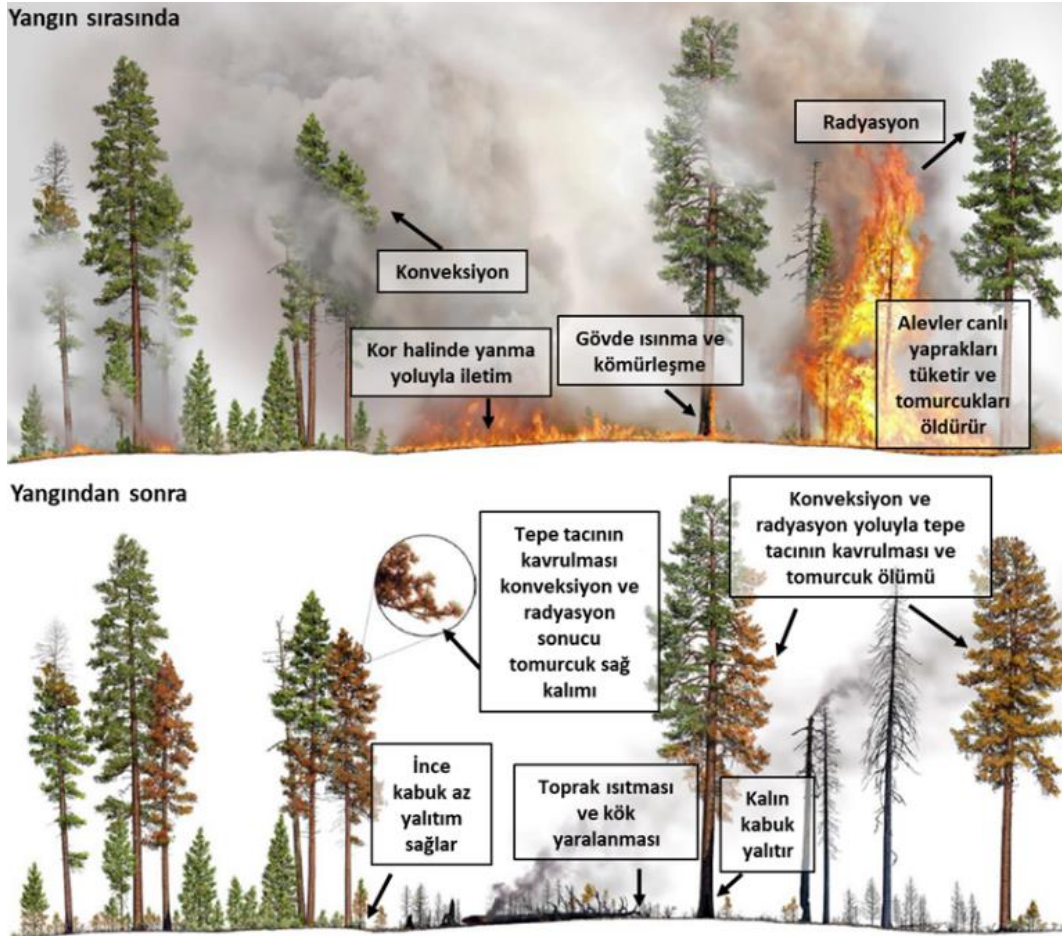
2. Yangın sonrası ağaç ölüm mekanizmaları

Ağaçların yangın sonrasında canlı kalıp kalmayacağını doğru bir şekilde tahmin edebilmek için öncelikle yangının meydana gelme süreçlerinin ve sonrasında ağaçlara nasıl zarar verdiğinin iyi bilinmesine ihtiyaç vardır. Yangın genel olarak üç aşamada gerçekleşir. Bu aşamalar sırasıyla ön ısınma, alevli yanma ve kor halinde yanmadır (Heikkilä vd., 2010). Yanıcı maddeler genellikle 300-400 °C (tutuşma sıcaklığı) arasında alev almaya başlarlar (Güney vd., 2022). Yangın anında sıcaklık 1300 °C'lere kadar çıkabilir (Satio, 2001) ancak genellikle ortalama olarak 500-1000 °C arasında gerçekleşmektedir (Butler vd., 2004). Birbirine izleyen bu üç aşamada gerçekleşen yanma olayında, aynı zamanda ısı iletimi gerçekleşir (radyasyon, konveksiyon ve kondüksiyon) ve yangın geniş alanlara yayılabilir. Yanıcı madde, topoğrafya ve hava halleri yangını etkileyen faktörlerdir. Bu faktörlerin değişkenliği nedeniyle yangın karmaşık bir

yapıdadır ve yangın davranışı sürekli değişebilmektedir. Bu değişkenlik nedeniyle yangın toprak, örtü ve tepe gibi farklı tiplerde gerçekleşebilir ve çoğu zaman bu üç yangın tipi kesin sınırlar ile birbirlerinden ayrılmaz ve birbiri ile geçişkenlik içerebilir. Bunun sonucunda da ağaçlar farklı şekillerde yangından zarar görebilir ve yangında farklı derecelerde zarar görmüş ağaçların bir kombinasyonu şeklinde mozaik bir yapı oluşabilmektedir (Şekil 1).

Yanıcı maddelerin su içeriği, düzeni ve birikimi, yangın davranışını güçlü bir şekilde etkilemektedir (Bond ve Keeley, 2005). Yüksek şiddetli tepe yangınları, canlı ve ölü tepe yanıcı maddelerini tüketir ve ağaç tepesindeki tüm yaprakların ve meristemlerin yanması nedeniyle (ağaç ısıya dayanıklı organlardan yeniden filizlenmediği sürece) ani ölümlere neden olabilir (Pausas ve Keeley, 2017). Buna karşılık, düşük ila orta şiddetdeki yangınlar genellikle olgun ağaçlar için doğrudan ölümcül bir tehdit oluşturmaz, bunun yerine daha sonra tüm ağacın işleyişini etkileyen çeşitli yaralanmalara neden olabilir (Bär vd., 2019).

Ağaçlar üzerindeki yangın etkileri birinci ve ikinci dereceden etkiler olarak sınıflandırılabilir (Bär vd., 2019). Birinci dereceden etkiler, ısı transferinin bitkinin kök, gövde ve tepe tacı dokuları üzerindeki ani etkilerini içermektedir. Ölümcül olmayan birinci dereceden yangın zararları, ağaç fizyolojisindeki sınırlamalar veya böcek gibi biyotik etmenlerinin saldırılarına karşı artan duyarlılık gibi ikinci dereceden etkileri tetikleyebilmektedir (Michaletz ve Johnson, 2007; Michaletz ve Johnson, 2008).



Şekil 1. Ağaçların ısı transferleri sonucu aldığı zararlar (Hood ve Varner, 2019)

Yangın, ısı transferi nedeniyle bitkilerde birinci dereceden yangın zararı olan doku nekrozuna sebebiyet vermektedir (Şekil 2). Bitkilerde dokuların zarar görebilmesi için 60 °C sıcaklık yeterlidir (Michaletz ve Johnson, 2006). Fakat dokunun bu sıcaklığa ne kadar süre ile maruz kaldığına göre etki derecesi değişkenlik göstermektedir. Örneğin, doku 60 °C sıcaklığın altında uzun süre kalırsa ölebilirken, 60 °C'nin üstündeki sıcaklıklara kısa süre maruz kaldıklarında canlılığını koruyabilmektedir (Dickinson ve Johnson, 2004). Bir yangın anında ısı transferi nedeniyle ağaçların kökleri, gövdeleri ve dal, yaprak ve tomurcuklardan oluşan tepeleri zarar görebilmektedir.

Tepe tacına ısı transferi radyasyon ve ağırlıklı olarak konveksiyon yoluyla gerçekleşmektedir (Şekil 1) (Cruz vd., 2006). Tepe tacının ısı transferine maruz kalmasıyla yaprak ve tomurcuk nekrozunun yanı sıra dallarda da kambiyum ve floem hasarına sebep olabilir (Şekil 2, b11). Tepe tacındaki zararların derecesi tepe tacının termofiziksel özellikleri, yangın şiddeti (ing: fire intensity), yangının kalış süresi ve tepe altı yüksekliği ile ilgilidir (Wagner, 1973; Michaletz ve Johnson, 2007). Yaprakların morfolojik özellikleri ısı akışlarını kontrol ederken, kütle, su içeriği ve özgül ısı kapasitesi gibi diğer özellikler ne kadar enerji gerektiğini, dolayısıyla hangi sıcaklıklardan zarar görebileceklerini belirlemektedir (Michaletz ve Johnson, 2006). Büyük tomurcuklara sahip türler, nispeten küçük tomurcuklara sahip türlere göre tomurcuk nekrozuna çok daha az duyarlıdır (Michaletz ve Johnson, 2006). Birçok kozalak ve meyvye, tohumdaki embriyo dokularını ısı nekrozuna karşı yalıtabilir. Bu tohumlarını tepe tacındaki tohum bankalarında depolayan serotin türlerde yaygın olarak kabul edilmiştir (Pounden vd., 2014).

Ağaçların gövdelerine radyasyon ve konveksiyon nedeniyle gerçekleşen ısı transferi, ağaçların gövdelerini kaplayan kabuktan itibaren içeriye doğru etki ederek kambiyuma zarar verebilmektedir. Kambiyumun aldığı zarar derecesi; sıcaklığın derecesine, ısıtma süresine ve kabuk özelliklerine bağlıdır (Dickinson ve Johnson, 2001). Esas olarak kabuğun kalınlığı, yoğunluğu ve nem içeriği gibi özellikleri kabuğun ısı iletkenliğini belirler (Van Mantgem ve Schwartz, 2003). Yeterli kabuk yalıtımı olmazsa kritik sıcaklıklar aşılarak floem, kambiyum ve ksilemde nekrozlar oluşabilir (Şekil 2, a1) (Chatziefstratiou vd., 2013).

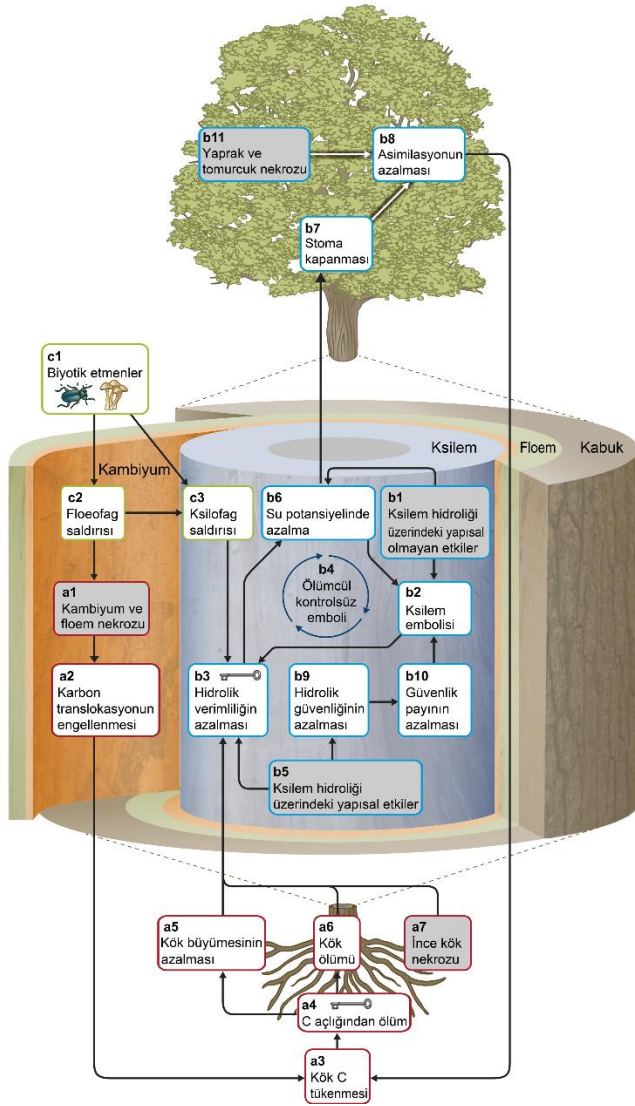
Yüzeyde veya toprak yüzeyine yakın konumda bulunan kökler de kondüksiyon şeklinde gerçekleşen ısı transfer süreçlerinden etkilenebilir ve ince kök nekrozuna ve biyokütlesinin önemli ölçüde azalmasına sebep olabilir (Şekil 2, a7). Bir ağacın kökleri, gövdesi ve tepe tacı aynı yangından farklı şekillerde zarar görebilir ve hayatta kalması veya ölmesi bu zararların bileşkesi olabilir (Michaletz ve Johnson, 2006). Ayrıca, gerçekleşen bu ısı transfer mekanizmalarından farklı ağaç türleri ve aynı ağaç türü bile olsa ağaç boyları ve yaşları arasındaki farklardan dolayı farklı şekillerde etkilenebilirler.

İkinci dereceden yangın etkileri daha karmaşıktır ve mekanizmaları birinci dereceden yangın etkileri kadar iyi anlaşılmamıştır. İkinci dereceden yangın etkileri genellikle dolaylı ölümlere sebep olmaktadır. Örneğin, yüksek derecede yaprak nekrozu (Şekil 2, b11) sonucu fotosentez oranlarındaki azalmayla birlikte, kalan yapraklar tüm ağacın karbonhidrat ihtiyacını karşılayamayabilir ve bu da büyümenin azalmasına veya karbonhidrata bağlı savunma mekanizmalarında ve böcek istilasına karşı direncin azalmasına neden olabilir (McHugh vd., 2003; Wallin vd., 2003; Reed ve Hood, 2024). Yangın zararlarının tetiklediği ikinci dereceden etkilerin ölüm oranını nasıl etkileyebileceğine dair iki ana hipotez vardır (Michaletz, 2018). Kambiyum nekrozu hipotezi, yangına bağlı kambiyum ve floem nekrozunun karbonhidrat iletiminde sınırlamalara ve böylece karbon açlığını (karbon yetersizliğinden kaynaklanan ölüm) başlattığını varsaymaktadır. Hidrolik işlev bozukluğu hipotezi ise orman yangınlarının ısısının ağaçların ksilem dokularında hidrolik işlev bozukluğuna neden olabileceğini varsaymaktadır. Örneğin, ince kök nekrozları su alımını azalttığından kökteki yangın zararları potansiyel olarak hidrolik sınırlama yoluyla ağaç ölümlerine aracılık edebilir (Bär vd., 2019). Karbon açlığı (Şekil 2, a4) ve hidrolik işlev bozukluğu (Şekil 2, b3) tüm bitki işlevini etkileyen fizyolojik kaskadları tetikleyebilir ve bağımsız olarak veya birlikte ağaç ölümlerine neden olabildiği düşünülmektedir (Bär vd., 2019).

Buna ek olarak, biyotik ölüm etkenleri ve kuraklık gibi zorlayıcı çevre koşulları her iki mekanizma için de güçlendirici olarak hareket edebilir ve tam tersi, karbon açlığı ve hidrolik yetersizlik, bitki savunma sistemini zayıflatarak böcek saldırılarını veya patojenik enfeksiyonları kolaylaştırabilir (McDowell vd., 2011; Anderegg vd., 2015).

Böcekler ve patojenler, büyümeyi yapısal olmayan karbonhidrat rezervlerini azaltarak ve hidrolik iletkenliği bozarak yangın öncesi stresi artırabilir ve ayrıca yangından yaralanmış ancak kurtulabilecek ağaçlarda ek ölümlere neden olabilir. Kabuk böcekleri üremek için sağlıklı floem içeren canlı ağaçlara ihtiyaç duyduğundan genel olarak orta ve yüksek düzeyde hem tepe zararı hem de kambiyum hasarı olan ağaçlara saldırır ve onları öldürebilir. Yangından sonra kabuk böceği faaliyeti ölümlerde kısa süreli bir artışa neden olabilir ancak genellikle salgınlara yol açmaz veya böcek kaynaklı ağaç ölümleri süreklilik arz etmez. Bir yandan yangından kurtulan ağaçlar, fizyolojik işlevselliklerinden ödün verebilir, büyümeleri yavaşlayabilir ve gecikmiş ölüme yenik düşme olasılıkları daha yüksektir (Lambert ve Stohlgren, 1988; Thompson vd., 2017). Öte yandan, zarar görmüş ağaçların da azalan rekabetten kısa ve orta vadede fayda sağlayabileceği bilinmektedir (Valor vd., 2018).

Sonunda, ağaç fizyolojisindeki değişimler ve biyotik etmenlere karşı zayıflamış bir savunma mekanizması, uzun vadede tüm bitki işlevinin yerine getirilememesine yol açabilir ve nihayetinde yangın sonrası gizli ağaç ölümlerine neden olabilir (Bär vd., 2019).



Şekil 2. Yangın sonrası zararlardan kaynaklanan olası fizyolojik tepkilerin kademeleri. Gri renkteki kutular ısı transferinden kaynaklanan birinci dereceden yangın etkilerini göstermekte, beyaz kutular ise ikinci dereceden yangın etkilerini göstermektedir. Kırmızı çerçeveli kutular (a) kambiyum ve floem dokularındaki yaralanmalardan etkilenen süreçleri, mavi çerçeveli kutular (b) ksilem hidroliti üzerindeki yangın etkileriyle ilgili süreçleri ve yeşil çerçeveli kutular (c) doku nekrozlarından ve hidrolik işlev bozukluğundan etkilenen süreçler üzerinde güçlendirici bir etkiye sahip olabilecek yangın sonrası biyotik etmenleri göstermektedir. C= karbon. (Bär vd., 2019).

3. Kullanılan değişkenler

Yangın sonrası canlılık durumu çalışmalarında kullanılan kolayca gözlemlenebilir iki olgu vardır. Bunlar ağacın tepe tacında oluşan hasar durumu ve kambiyumun ölümüne sebep olabilecek gövde hasarıdır ve bunlar ağaçta yangın hasar tanımlayıcıları olarak kullanılmaktadır (Ryan, 1982b; Peterson, 1985; Stephens ve Finney, 2002). Daha önce yapılan araştırma çalışmalarında tepe ve gövde zararını ölçmek için farklı isimlerde çok sayıda değişken kullanılmıştır. Bunların bir kısmı aynı değişken olmakla birlikte farklı şekillerde isimlendirilmişlerdir. Bu durum, çalışmaların anlaşılmasını, değerlendirilmesini ve karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Yangından sonra genellikle tepede en çok zarar gören kısım yapraklardır. Ryan (1982a) ise, tomurcukların ölmesinin yaprakların ölmesinden daha kritik bir konu olduğunu ve genellikle yangın sonrası takip eden bahar aylarında tomurcukların ölü olup olmadığını belirlenene kadar ağaçların ölüp ölmediğine karar verilmemesinin önemini vurgulamaktadır.

Tepe zararı, hem radyasyondan etkilenmiş yaprakları (kahve renginde kavrulmuş yapraklar) hem de alev ile temas edip tüketilmiş yaprakları içerir. Tepe zararı canlı tepe oranı tahmini değildir. Daha ziyade, yangın öncesi yaşayan tepenin ne kadarının yangın tarafından öldürüldüğüne dair bir tahmindir. Daha önce yapılan araştırma çalışmalarında tepe zararını ölçmek için farklı isimlerde çok sayıda değişken kullanılmıştır (Çizelge 1.) Tepe zararını ölçen bu değişkenler 3 isim altında toplanabilir. İlk ikisi görsel olarak ya yangın öncesi tepe hacminin bir yüzdesini ya da yangından etkilenen tepe uzunluğunun yüzdesini tahmin etmektedir. Hem hacim hem de uzunluk tahminleri yapılabilir ancak birbirinin yerine geçemez ve kullanılan değişken yangın sonrası canlılık durumu çalışmalarında toplanan verilere bağlıdır. Tepe zararını ölçen 3. değişken ise tepe kavrulma yüksekliğidir ve tepe zararının meydana geldiği noktanın yerden yüksekliğini ifade eder. Tepe zararı ölçülürken sadece yaprak zararına bakılarak zarar tespiti yapılması özellikle büyük tomurcuklu ağaçlarda hatalı tespitlere sebep olabilir. Örneğin, sadece yaprak zararına göre tepe zararı %100 olan (sadece kavrulmuş, tüketilmiş değil) bir ağaç eğer tomurcukları zarar görmediyse sonraki vejetasyon döneminde tekrar sürgün vererek hayatını devam ettirebilir (Güney vd., 2021). Bu yüzden özellikle sadece kavrulmuş ama tüketilmeyen tepe zararlarında tomurcukların zarar görüp görmemesi önemlidir. Eğer yapraklar tüketildiyse tomurcuklarında zarar gördüğü varsayılabilir.

Ağaç gövde zararı; floem, kambiyum ve diri odun zararından oluşmaktadır. Bu zararlara neden olabilecek gövde hasarının değerlendirilmesinin yolu yangın şiddetinin etkisi olarak kömürleşme yüksekliği veya gövdedeki kömürleşmiş çevrenin ölçülmesini değerlendirmektir (Çizelge 2). Ancak, bunlar gövdenin ısınma süresinin etkisini tam olarak ifade etmediklerinden kambiyum zararının zayıf göstergeleridir. Yangın şiddetinin etkisini belirleyebilmenin daha iyi bir yolu kambiyum zararının direkt ölçülmesi veya gövdedeki kömürleşme derinliğinin gözleme dayalı ölçümlerle değerlendirilmesidir (Ryan, 1982b).

Çizelge 1. Ağaçların tepe zararını belirlemede kullanılan değişkenler

Değişken adı	Kaynak
Tepe kavrulma hacmi	Crown scorch volume (McHugh ve Kolb, 2003a; Rigolot, 2004; Hull Sieg vd., 2006)
Tepe kavrulma uzunluğu	Crown scorch length (Harrington, 1993; Schwilk vd., 2006)
Tepe kavrulma yüksekliği	Crown scorch height (Stephens ve Finney, 2002; Raymond ve Peterson, 2005)
Yaprak kavrulma yüksekliği	Foliage scorch height (Ryan ve Reinhardt, 1988)
Tepe tüketimi	Crown consumption (McHugh ve Kolb, 2003a)
Tepe ölüm yüzdesi	Percent crown death (Outcalt ve Wade, 2004)
Tepe kavrulma sınıfı	Crown scorch class (Mantgem ve Schwartz, 2004)
Kavru lan tepe hacmi yüzdesi	Percent crown volume scorched (Raymond ve Peterson, 2005; Hood vd., 2007b)
Kavru lan tepe uzunluğu yüzdesi	Percent crown length scorched (Keyser vd., 2006)
Toplam tepe zararı	Total crown damage (Kobziar vd., 2006)
Tüketilen tepe hacmi	Crown consumed volume (Hull Sieg vd., 2006; Catry vd., 2010b)
Ölü tomurcuk oranı	Bud kill proportion (Thies vd., 2006)
Canlı tepe oranı	Live crown proportion (Thies vd., 2006)
Ölmüş tepe uzunluğu yüzdesi	Percent crown length killed (Hood ve Bentz, 2007)

Çizelge 2. Ağaçların gövde zararını belirlemede kullanılan değişkenler

Değişken Adı	Kaynak
Kambiyum ölüm oranı	Cambium kill rating (Hood ve Bentz, 2007)
Kambiyum durumu	Cambium condition (Ryan ve Reinhardt, 1988; Peterson ve Arbaugh, 1989)
Ölü kambiyum örneklerinin sayısı	Number of dead cambium samples (Raymond ve Peterson, 2005)
Kabuk kömürleşme derinliği	Bark char depth (Peterson ve Arbaugh, 1989; Rigolot, 2004)
Kabuk kömürleşme yüksekliği	Bark char height (Brown ve Debyle, 1987; Regelbrugge ve Conard, 1993; Hély vd., 2003)
Gövde kömürleşme yüksekliği	Bole char height (Schwilk vd., 2006)
Gövde kavrulma yüksekliği	Bole scorch height (Catry vd., 2010a)
Gövde kararma yüksekliği	Stem scorch height (Mantgem ve Schwartz, 2004)
Kabuk kömürleşme kodu	Height of stem blackening (Beverly ve Martell, 2003)
Gövde kömürleşme derinliği puanı	Bark char code (Hood vd., 2008)
Kabuk kömürleşme çevresi	Bole char severity rating (McHugh ve Kolb, 2003b; Kobziar vd., 2006)
Gövde kömürleşme yüzdesi	Bark char circumference (Brown ve Debyle, 1987)
Gövde kavrulma oranı	Percent bole char (Outcalt ve Wade, 2004)
Ağaç taban çevresinin kavrulma yüzdesi	Bole scorch proportion (Thies vd., 2006)
Kömürleşmiş gövde oranı	Percent basal circumference scorched (Hull Sieg vd., 2006)
Gövde kömürleşme yüksekliği yüzdesi	Charred stem ratio (Sidoroff vd., 2007)
	Percent of bole char height (Catry vd., 2010a)

Ağaçların yangına karşı gösterdikleri tepkiler türlere göre farklılık göstermektedir. Bunun en önemli sebebi türlerin birbirleri arasındaki morfolojik farklılıklardır. Örneğin kabuğu daha kalın olan ağaç ısıyı gövdedeki hayati dokulara daha az iletceğinden kabuk kalınlığı önemli hale gelmektedir (Ryan ve Reinhardt, 1988; Mantgem ve Schwartz, 2004; Keyser vd., 2006;). Birçok türde çap ile kabuk kalınlığı arasındaki ilişkiler belli olduğundan kabuk kalınlığı yerine uygulamalarda sıklıkla ölçülen çapta kabuk kalınlığı yerine kullanılabilir (Cansler vd., 2020). Ölçülmesi kolay ve zaten ormancılık uygulamalarında sıklıkla ölçüldüğünden çalışmalarda en çok kullanılan değişken çap olmuştur (Kobziar vd., 2006; Thies vd., 2006; Hood ve Bentz, 2007). Diğer yandan organik madde ve diri örtü gibi yanıcı maddeler örtüde çıkan yangını tepeye taşıyabilirler. Bu yüzden ağacın boyu ve tepe altı yüksekliği ne kadar yüksekse tepe tacı bundan daha az zarar alabilir. O yüzden bazı araştırmacılar ağaç boyunu da bir değişken olarak kullanmıştır (Kobziar vd., 2006; Thies vd., 2006).

Bazı araştırmacılar yangın sonrasında ölmemiş ama zayıflamış ağaçlara kabuk böceğinin gelebileceğini ve epidemiyeye sebep olabileceğini düşünerek kabuk böceği varlığını da bir değişken olarak belirlemiştir (Hood ve Bentz, 2007). Diğer yandan yangının hangi mevsimde meydana geldiği de ağaçların yangın sonrasında kuraklıktan etkilenebileceği düşüncesiyle bazı çalışmalarda dikkate alınmıştır. Bu anlamda bazı yağışsız geçen gün sayısı, sıcaklık ve nem gibi iklim değişkenleri de önem kazanabilmektedir.

Yangından sonra ağaçta meydana gelen zararlar genellikle yangın anında yangın davranışının nasıl gerçekleştiği ve ortaya çıkan enerji miktarı ile ilişkilidir. Bu

yüzden bazı araştırmacılar alev uzunluğu, yayılma oranı, yanıcı madde tüketimi ve yangın şiddeti gibi yangın davranışı parametreleri ile ağaçların canlılık durumlarını ilişkilendirmişlerdir (Finney ve Martin, 1993; Higgins vd., 2000; Stephens ve Finney, 2002; Rodriguez-Trejo vd., 2007). Bu parametrelerin kontrolsüz bir yangında ölçümü zor olduğundan daha çok kontrollü olarak gerçekleşen yangınlarda bu ölçümleri yapmışlardır. Birbirine benzeyen kontrollü yangınlar ile kontrolsüz yangınlardan kaynaklanan benzer seviyelerdeki ağaç zararının birbirine yakın ağaç ölümleriyle sonuçlanması muhtemel görülmektedir (Rodríguez-Trejo vd., 2007).

4. Değişkenleri ölçme yöntemleri

Ağaç ölümlerinin en önemli faktörlerinden olan tepe zararını tespit edebilmek için en çok kullanılan değişkenler kavru lan tepe hacmi yüzdesi, kavru lan tepe uzunluğu yüzdesi ve tepe kavrulma yüksekliğidir (Çizelge 1).

Kavru lan tepe hacmi yüzdesi, yangında zarar gören tepe hacminin yüzdesinin görsel olarak tahmin edilmesidir. Tepenin yangından önceki haline göre ne kadar zarar gördüğü yüzde olarak belirlenmektedir (Şekil 3) ve denklem (1) ile hesaplanır (Hood vd., 2020):

$$\text{Kavru lan tepe hacmi yüzdesi} = \frac{\text{Canlı tepenin yangından zarar görme yüzdesi}}{\text{Yangın öncesi tepe hacmi}} \quad (1)$$

(her zaman %100)

Kavru lan tepe uzunluğu yüzdesi, yangından zarar gören tepe uzunluğunun yangın öncesi canlı tepenin uzunluğuna

oranlanması ile hesaplanmaktadır (Şekil 3). Görsel olarak tahmin edilebildiği gibi bir boy ölçer yardımıyla da ölçülebilir. Kavrulmuş tepenin uzunluğu yüzdesi denklem (2) ile hesaplanır (Hood vd., 2020):

$$\text{Kavrulmuş tepenin uzunluğu yüzdesi} = \frac{\text{Yangından zarar görmüş tepenin uzunluğu}}{\text{Yangın öncesi tepenin uzunluğu}} \times 100(2)$$

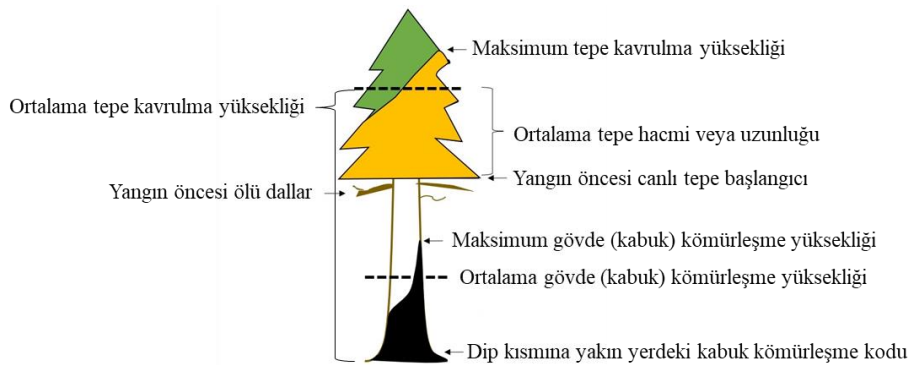
Tepe kavrulma yüksekliği bir örtü yangınından üretilen ısının bir sonucu olarak bir ağacın tepesindeki yaprakların ölümcül şekilde kavrulmasının meydana geldiği yerden dikey mesafeyi temsil eder (Alexander vd., 2020). Tepe kavrulma yüksekliği, kontrollü bir yangının planlanmasında önemli bir husustur ve aynı zamanda birçok orman ağacı türünde yangından sonra canlılık durumunu belirlemek için bir kriterdir (Peterson ve Ryan, 1986; Hood, 2007) (Şekil 3).

Kambiyum zararının belirlenmesinde kabuğun kaldırılmasından sonra kambiyum durumunun görsel olarak belirlenmesi en yaygın yöntemdir (Hood vd., 2020). Bu yöntem, canlı ile ölü kambiyumu ayırt etmek bazen zor olabildiğinden tecrübe gerektirebilir. Canlı kambiyum ve floem dokusu pembemsi ya da ten rengine benzeyen açık renkli, nemli ve esnek (Ryan, 1982b) (Şekil 4). Kambiyum ölü olduğunda bu dokuların rengi daha koyudur, dokusu kuru, sert veya sakızimsı olabilmektedir. Ayrıca, ölü kambiyum dokusundaki değişimlerden dolayı hücreleri, dış kabuktan ve odundan daha kolay ayrılabilir. Kambiyum zararını net bir şekilde belirlemek için Hare (1965)'in önerdiği orthotolidin çözeltisi ile kambiyum örnekleri üzerinde kimyasal test uygulanabilir. Bu çözelti uygulandığında çok kısa bir süre sonra canlı hücreler mavi rengi alırken, ölü hücrelerde herhangi bir renk değişimi gözlemlenmemektedir (Şekil 4). Kambiyum zararını kabuğu kaldırarak görsel olarak (Hood vd., 2020) ya da kambiyum tabakasına orthotolidin çözeltisi uygulanarak belirlenebilir (Şekil 4A). Ancak, Güney ve Güney (2020) kambiyum zararını belirlerken ağacın çok zarar görmemesi için ağacın gövdesinden mikro artım burgusu yardımıyla kambiyumu da içeren örnekler alınabileceğini göstermiştir. Bu örnekler de orthotolidin çözeltisi uygulanabilir (Şekil 4B). Yeterli görsel tecrübeye erişildiğinde ölü kambiyum ile canlı kambiyum arasındaki renk ve şekil farklılıkları gözle ayırt edilebilir hale geldiğinden sonraki aşamalarda mikro artım burgusuyla

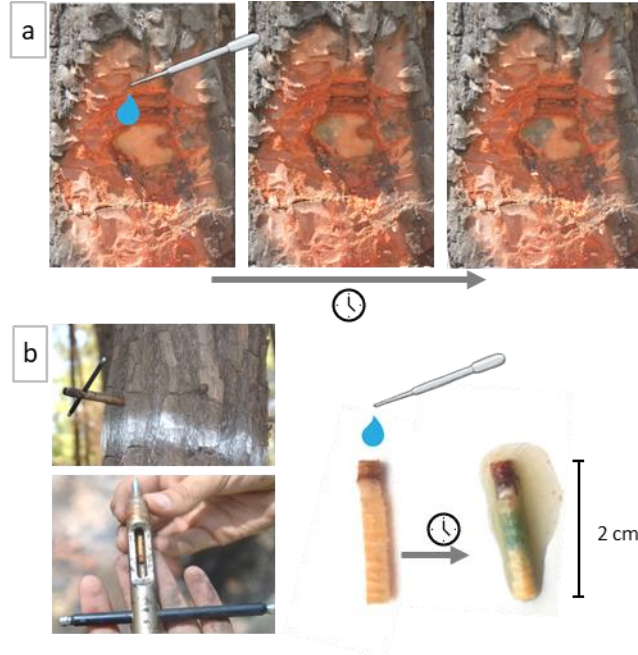
alınan küçük örneklerde bile kimyasal çözelti kullanılmadan gözlem ile karar verilebilir. Kambiyum zararı çoğu çalışmada ağacın dip yani gövdenin zemin ile birleştiği kısımdan alınmaktadır (Hood vd., 2007a). Bunun sebebi zemindeki ölü örtünün yanması ile oluşacak ısının kambiyuma daha çok zarar verebileceği düşüncesidir. Bunun haricinde uygulamacılar tarafından çap ölçülen göğüs yüksekliğinden (1.30 m) de kambiyum zararı ölçümleri yapılabilir (Güney ve Güney, 2020).

Kambiyumun canlılığını daha kolay ve daha hızlı belirleyebilmek için gövde kömürleşme derinliği gibi kabuğun renk ve şekil değiştirmesinin görsel olarak belirlenebildiği yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin; Ryan (1982b)'ın geliştirdiği yangından sonra gövde zararını temsil eden kabuk kömürleşme kodu (ing: bark char code) sıklıkla kullanılmaktadır (Çizelge 3 ve Şekil 5). Özellikle toprağa yakın kısımlarda gövdede meydana gelen kambiyum zararının kolay bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Bazı çalışmalarda her ağaç için yanan gövdenin en dip kısmından ölçülebildiği gibi 1.30 m'de de ölçülebilmektedir (Güney vd., 2021). Ağaç gövdesinde 4 yönlü olarak tespit edilir ve ortalaması alınarak kullanılmaktadır. En çok kullanılan gövde zararı değişkenlerinden birisi de gövde (kabuk) kömürleşme yüksekliğidir (Şekil 3). Ağacın 4 yönünde ayrı ayrı ölçülür ve daha sonra ortalaması alınarak kullanılmaktadır.

Bir yangından sonra ağaçlarda meydana gelen ölüm oranı, yanma derinliğinin bir ölçüsü olarak yoğun olarak kullanılmaktadır. Ryan ve Noste (1985) ve Ryan (2002)'in önerdiği revize edilmiş tanımlama kılavuzu, ekolojik çalışmalarda ağaçların bireysel olarak, örneklenen karelerde veya yangın alanında toplu olarak yanma derinliği düzeyini sınıflandırmak için bir yaklaşım sağlar. Yanma derinliğinin belirlenmesinde birçok araştırmacı birbirine benzer ancak birbirlerinden farklı sınıflandırmalar yapmışlardır. Keeley (2009)'ün yapmış olduğu derleme çalışmasında verilen sınıflar ile Ryan vd. (2012) ve Hood (2010)'un yapmış olduğu detaylı sınıflandırmalara göre genel olarak; yanmamış, az, orta derecede ve çok yanmış olmak üzere 4 yanma derinliği sınıfı kullanılmaktadır. Bu sınıfların neler ifade ettikleri Çizelge 4'de özetlenmiş ve Şekil 6'te gösterilmiştir.



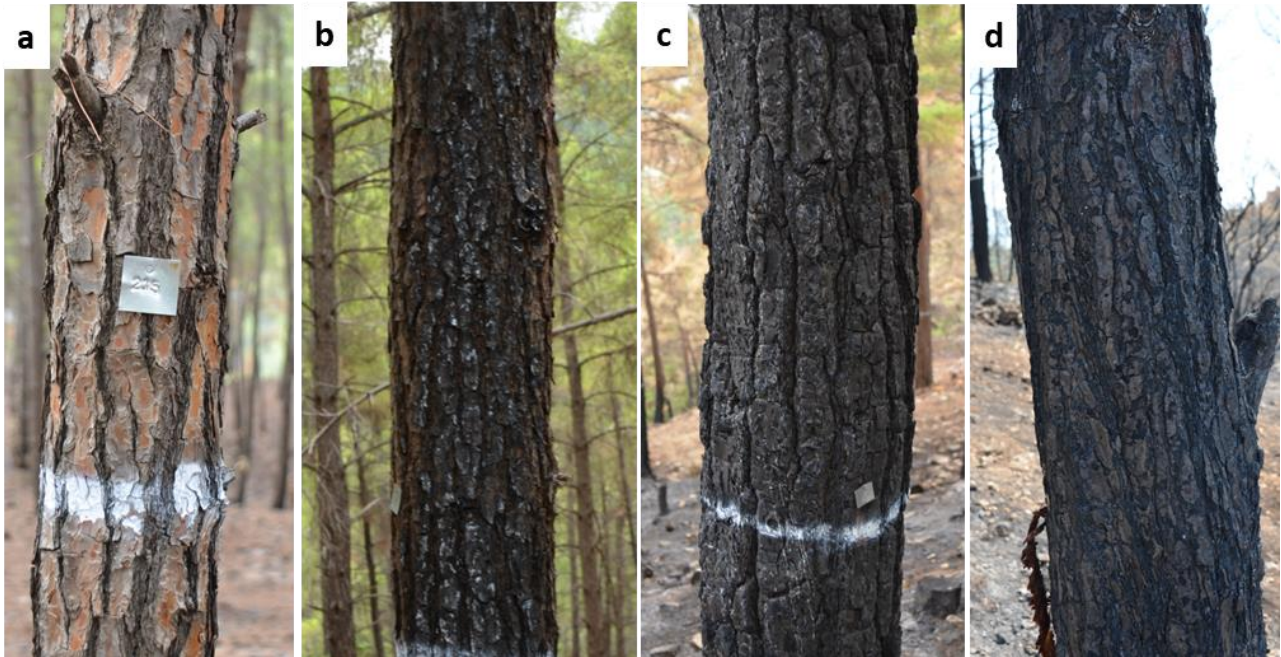
Şekil 3. Tepe ve gövde zarar değişkenlerinin bir ağaç üzerindeki örnek gösterimi (Hood vd., 2020)



Şekil 4. a) Ağaç üzerinde orthotolidin çözeltisi uygulanması. Açıkta olan kambiyumun canlı olan kısmı orthotolidin çözeltisi uygulandıktan kısa bir süre sonra mavi rengi alırken ısı etkisinden ölen kambiyumun rengi değişmemektedir. b) Mikro artım burgusu yardımıyla alınan örnekte ortotolidin çözeltisi uygulanması. Floem, kambiyum ve diri odunundaki canlı hücrelerin rengi maviye dönmüştür (Güney ve Güney, 2020).

Çizelge 3. Kabuk kömürleşme kodları ve kabuk görünümünün tanımlanması Ryan (1982b); Hood vd. (2008)'den uyarlanmıştır.

Kabuk kömürleşme kodu	Kabuk görünümü
0 Yanmamış	Kömürleşme yoktur.
1 Az yanmış	Hafif kömürleşmenin göstergesi olarak türlerin karakteristik kabuk özellikleri hala belirlenebilir ve kabuk plakalarının kenarları kömürleşmiş ancak tamamen kararmamıştır.
2 Orta derecede yanmış	Kabuk, muhtemelen iç çatlaklar dışında tekdüze siyahtır; türün karakteristik kabuk özellikleri hala ayırt edilebilir.
3 Çok yanmış	Kabuk oduna doğru yanmıştır, ancak oduna kadar yanması şart değildir. Türlerin karakteristik dış kabuk özellikleri kaybolur.



Şekil 5. Ağaç gövdesinde kabuk kömürleşme kodlarının tanımlanması (1.30 m yüksekliğinde kızılçam örneği) a) Yanmamış b) Az yanmış c) Orta derecede yanmış d) Çok yanmış

Çizelge 4. Yanma derinliği sınıfları

0	Yanmamış	Bitkinin yaprakları yeşil, hiç değişmeden durmaktadır ve ısıdan doğrudan etkilenmemiştir. Yanmamış fakat yayılan ısıdan dolayı kavrulan yapraklarda kayıplar mevcut olabilir.
1	Az yanmış	Ağaçların tepe tacı yeşil olduğu halde gövdesi kavrulmuştur. Yüzeydeki döküntü, yosun ve otlar kömürleşmiş ve tüketilmiştir. Zemindeki organik tabaka büyük ölçüde bozulmamış ve birkaç mm derinliğe kadar kömürleşmiştir.
2	Orta derecede yanmış	Ağaçların tepe tacının bir kısmı ölmüş ama ibreler tamamen tüketilmemiştir. Ara ve alt tabakadaki bütün bitkiler yanmış ve tüketilmiştir. Yangın öncesi toprakta bulunan organik tabaka büyük ölçüde tüketilmiştir.
3	Çok yanmış	Ağaçlar ölmüş ve ibreler tüketilmiştir. Yüzeyde bulunan tüm ebatlardaki döküntü ve organik madde tabakası büyük oranda tüketilmiştir. Beyaz kül birikimi ve birkaç cm derinlikteki kömürleşmiş organik madde mevcuttur.



Şekil 6. Yanmış alanlarda her ağaç için bireysel yanma derinliğinin tanımlanması (kızılcım örneği) a) Yanmamış b) Hafif yanmış c) Orta derecede yanmış d) Çok yanmış

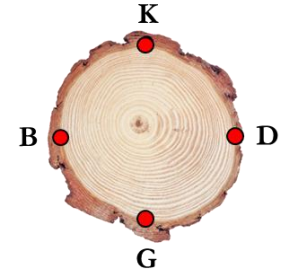
Yangından zarar görmüş ağaçlarda kabuk böceği ve odun delici böcek istilası orman yangını olaylarından sonra yaygın olarak görülebilmektedir (Lowell, 2010). Yangından zarar görmüş ağaçlar genel olarak 2-3 yıl süren böcek kolonizasyonu için uygun bir yaşam alanı kaynağı oluşturmaktadır (Davis vd., 2012). Çok sayıda çalışma, yangından zarar görmüş ağaçlarda kabuk böceği ve odun delici böcekleri varlığının ölüm olasılığını önemli ölçüde artırdığını belirtmiştir (DeNitto vd., 2000; Hood ve Bentz, 2007). Yangından sonra meydana gelen zarar miktarına bakılarak hayatta kalacağı tahmin edilen ağaçlarda kabuk

böceği ve odun delici böceklerin istila miktarı ölüm potansiyelini belirlemektedir (Hood vd., 2020).

Ağaçlardaki yangın sonrası zarar değişkenlere ait veriler toplanırken standart bir şekilde ölçülmesi ve kullanılması hem değişkenin doğru şekilde anlaşılması hem de diğer çalışmaların sonuçları ile kıyaslanabilmesi açısından önemlidir. Gövdede dört yönlü ölçülen kambiyum zararı, kabuk kömürleşme kodu, yanma derinliği sınıfları ve gövdede var-yok şeklinde belirlenen böcek zararının ölçüm standartları örneği Çizelge 5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. Bazı zarar değişkenlerinin ölçüm standartları..

Kambiyum zararı (var:1-yok:0)				
Kuzey	Doğu	Güney	Batı	Toplam
1	0	0	1	2
Kabuk kömürleşme kodu (0,1,2,3)				
Kuzey	Doğu	Güney	Batı	Ortalama
0	2	1	3	1,5
Yanma derinliği (0,1,2,3)				
Kuzey	Doğu	Güney	Batı	Ortalama
0	2	1	3	1,5
Böcek zararı (var:1-yok:0)				



Ağacın gövdesinde dört yönlü olarak belirlenen kambiyum zararının toplamı hesaplanırken, kabuk kömürleşme kodu ve yanma derinliğinde dört yönlü belirlenen sınıflarının ortalamaları hesaplanmaktadır. Ağaçta böcek zararının varlığı ise var (1)-yok (0) şeklinde belirlenmektedir

5. Ağaç canlılık durumu tahmin modellerinin oluşturulması ve kullanılması

Yangın sonrası planlamaların yapılabilmesi ve ormanın gelecekte nasıl bir yapıda olabileceğini tahmin etmek için yangın sonrası ağaçların ölüp ölmeyeceğinin ölçülü bir belirsizlikle doğru olarak tahmin edilmesi gerekmektedir. Yangın sonrası canlılık durumunu tahmin etmek için yaygın kullanılan teknik lojistik regresyon yöntemidir. Kontrolsüz ve kontrollü yangınları takiben birçok türün yangın sonrası canlılık durumlarını tahmin etmek için 100'den fazla lojistik regresyon modeli geliştirilmiştir (Woolley vd., 2012). Model uygulamaları bireysel ağaç ölçeğinden büyük orman alanlarına kadar değişebilmektedir. Meşcere seviyesi canlılık durumu tahminleri kontrollü yangınların planlamalarını geliştirmek ve yangın sonrası orman yapısını tahmin etmek için kullanılırken, peyzaj seviyesindeki tahminler değişen yangın rejimleriyle birlikte bitki örtüsü türü ve karbon stokları hakkında bilgi sağlamaktadır (Hood vd., 2018).

Mevcut lojistik regresyon modelleri, bazı türler için ölüm oranını doğru bir şekilde tahmin edebilmesine rağmen, yangın sonrasında hemen ve gecikmeli şekilde ölüm neden fizyolojik ve ekolojik süreçleri ifade edemeyebilirler (Hood ve Lutes, 2017). Ampirik modellerden farklı olarak yangın sonrası ağaçların canlılık durumlarını tahmin etmek için süreç tabanlı modellerinin geliştirilmesi aktif bir araştırma alanıdır (Bär vd., 2019). Kambiyum zararının gövde çevresi ve yüksekliğindeki farklı durumları (Chatziefstratiou vd., 2013) ile tepe zararı ve tomurcuk ölümlerinin farklılıklarını (Michaletz ve Johnson, 2006) tahmin etmek için bağımsız, ağacın farklı dokularına özgü modeller mevcuttur. Süreç temelli yaklaşımlar güçlü bir teorik temele sahiptir ve bir ağacın yangın sebebiyle nasıl öldüğünü anlamamıza katkıda bulunurken, bu modellerin karmaşıklığı yöneticilerin yaygın olarak bu modelleri kullanmasını engellemiştir (Woolley vd., 2012). Ayrıca, süreç tabanlı bu modeller yangından sonraki 1-5 yıl içerisinde gecikmiş ölümlere sebep olan biyolojik ve ekolojik süreçleri yakalayamamaktadır (Ryan ve Amman, 1996). Ampirik lojistik regresyon modelleri ise canlılık durumunun ekolojik süreçlerin temsilinden yoksun olsa da bunların basitliği ve yangın sonrasında kısa ve uzun süreli ölüm süreçlerinin örtülü entegrasyonu nedeniyle yangın sonrası canlılık durumlarını modelleyebilmek için hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için en pratik ve en erişilebilir araç haline getirmiştir (Hull Sieg vd., 2006; Grayson vd., 2017).

Canlı bitkinin fizyolojik özelliklerine dayalı olarak fiziksel ısı transferini, bunun sonucunda ortaya çıkan yangın

etkilerini ve dolayısıyla yangın kaynaklı ağaç ölümü ve büyümesinin tahminini yapmak için birleştirilmiş bir fiziksel-fizyolojik model gereklidir. Bununla birlikte böyle bir model hala bir dizi sınırlamaya ve belirsizliğe sahip olacaktır ve henüz mevcut değildir (Adams vd., 2013; Hood ve Varner, 2019). Ampirik yangın sonrası canlılık durumu tahmini ile ilgili kapsamlı uygulamalar genele uyabilecek tek bir yaklaşıma uygun değildir. Model karmaşıklığı ile model uygulamasını dengeleme ihtiyacı nedeniyle ampirik modellerin değiştirilmesi pek olası görünmemektedir. Bunun yerine ampirik modellerin yakın vadede arazi yönetimi uygulamalarında kullanılmak üzere modifiye edilmesi gerekirken aynı zamanda ısı iletimi ve fizyolojik süreç modellerinin de dahil edilerek hibrit tabanlı bir yaklaşım oluşturulması gerekmektedir (Hood vd., 2018).

Canlılık durumu modelleri yangın öncesinde potansiyel yangın etkilerini değerlendirmek ve yangın sonrasında restorasyon faaliyetlerini planlamak için kullanılır. Ancak, bu modellerin yangın öncesinde kullanılmasındaki zorluk yangın sonrası parametrelerin ölçülmesi zorunluluğudur (Furniss vd., 2019). Genellikle bu zamana kadar geliştirilen modeller içerisinde yangın öncesi ağaç özelliklerine dayanan bir model bulunmamaktadır. Bunun nedeni, yangın zararının yangına bağlı ölümlerin en önemli belirleyicisi olmasıdır. Bu yüzden bu modellerin yangın öncesi kullanımları kısıtlanmaktadır. Kabul edilebilir yangın sonrası doğru canlılık durumu modelleri oluşturulabilmesi için yangın zararı değişkenlerinin ölçümü gerekli olduğu düşünülmüştür. Ancak, bu değişkenler çap gibi yangın öncesi ölçülebilen ağaç özellikleri ile ilgilidir. Bu ilişkiler göz önüne alındığında çapa, türe veya yangın öncesi yanıcı madde özelliklerine dayalı bir yangın öncesi kullanılabilir bir model yangın sonrası canlılık durumunu doğru bir şekilde tahmin edebilir ve uygulayıcılar için yararlı olabilir (Furniss vd., 2019).

Yangın sonrası ağaç canlılık durumu lojistik regresyon modellerinde yaygın kullanılan açıklayıcı değişkenler tepe ve gövde zararı ölçümleridir. Yangın sonrası canlılık durumu tahmini tepe ve gövde değişkenleri toplu olarak kullanıldığında daha da iyileşmektedir. Yangın sonrası canlılık durumunu tahmin eden lojistik regresyon modelleri uygulamacıların sahada kullandıkları temel modellerdir ve daha büyük yangın etkisi modellerine katkıda bulunur (Woolley vd., 2012). Bireysel ağaç ve meşcere seviyesinde tahmin modelleri, yangının daha büyük etkilerinin modellenmesinde bir bileşen olarak kullanılmaktadır (Reinhardt vd., 1997; Reinhardt ve Crookston, 2003; Andrews vd., 2008) ve yangın yönetimi senaryoları geliştirilmesinde kullanılmaya devam etmektedir (Hull Sieg

vd., 2006). Modeller, ağaç veya meşcere ölümünü tahmin etmenin yanı sıra yangın sonrası bitki topluluklarının yapısı ve bileşimi (Agee, 1993) ve dolayısıyla ekosistem süreçleri ve işlevi (Regelbrugge ve Conard, 1993) üzerindeki yangın etkilerini anlamamıza katkı sağlamaktadır.

Örtü yangını geçirmiş veya kontrollü yangın gerçekleştirilmiş ormanlarda yangın sonrasında canlı kalan ağaçların sayısının ölen ağaçların sayısından muhtemelen daha fazla olması beklenir. Bu tür durumlarda sınıflar arasında (ölen-canlı kalan ağaç sayılarında) dengesizlikler olabilir. Lojistik regresyon analizi sınıflar var-yok verileri arasında bir dengesizlik varsa sayısı fazla olan taraf adına daha doğru tahminler yapar. Örneğin; bu durumda ölen ağaçların sayısı az olduğundan ölecek ağaçlar ile ilgili yetersiz tahmin yapacak ve canlı ağaçlar adına taraflı olacaktır. Bu sorunun çözümü için Shearman vd. (2019) yaptıkları çalışma sonucunda rastgele orman yöntemini önermişlerdir.

Geliştirilen modeller, 0 (canlı) ile 1 (ölü) arasında sürekli bir ölüm olasılığı olarak değerler verir. Bu nedenle, kullanıcıların hangi ağaçların ölü sayılacağına dair bir kesme seviyesi gerekir. Bu durum modellerin uygulanmasını karmaşıktırabilir, ancak aynı zamanda kullanıcılara yönetim hedefleri için en uygun eşik seçme esnekliği sağlar.

Genellikle ölme olasılığı %50'nin üzerinde olan ağaçlar ölü kabul edilir. Bu eşikleri aşan ağaçlar yeşil yaprakları olsa bile ölü kabul edilir. Çünkü muhtemelen birkaç yıl içinde öleceklerdir. Canlılık durumu olasılığı (P_{CD}) seviyeleri, seçilen bir P_{CD} seviyesini karşılayan veya aşan tüm ağaçların kesilmek üzere işaretlendiği eşik değerlerdir. Bir yanın sahadan ölen ve dolayısıyla kesilecek ağaç sayısı genellikle farklı P_{CD} seviyelerine göre değişir. Daha yüksek P_{CD} seviyelerinde kesilmek için daha az ağaç işaretlenecektir (daha ihtiyatlı bir seçim) ve daha düşük P_{CD} seviyelerinde ise daha çok ağaç işaretlenecektir (daha az ihtiyatlı bir seçim). P_{CD} seviyeleri arasındaki farkın miktarı yanın alanda yangından zarar görmüş ağaçların popülasyonuna bağlıdır. Örneğin, yanın saha çok şiddetli derecede yanmış alanlardan oluşuyorsa, kesilmek üzere seçilen ağaç sayısı farklı P_{CD} seviyeleri ile önemli ölçüde değişmeyecektir (Hood vd., 2020). Yöneticiler yangından zarar gören ormanın koşullarını ve yangın sonrası hedeflerini belirledikten sonra işletme amacına uygun şekilde P_{CD} seviyelerini belirlemelidirler.

6. Sonuç ve öneriler

Çalışmalar sonucunda bir yandan oluşturulan modeller aracılığıyla yangın sonrası canlılık durumu olasılıkları hesaplanırken diğer yandan canlılık ile ilgili en fazla ilişkili olan açıklayıcı değişkenler belirlenmektedir. Bireysel olarak ağaç seviyesinde veya meşcere düzeyinde canlı kalacak veya ölecek ağaçlar mümkün olduğu kadar doğru bir şekilde tahmin edilmektedir. Ağacın hayatta kalmasını tahmin etmek için geliştirilen bu modeller beklenen yangın sonrası hasarın ölçülmesine ve hayatta kalma olasılığı en yüksek ağaçların belirlenmesine olanak tanır.

Yangından hemen sonra ölen ağaçların ticari değeri vardır ve en kısa sürede sahadan çıkarılıp ekonomiye kazandırılmalıdır. Diğer yandan nesli tükenen türlerin korunması, sahaların milli park, su koruma, toprak koruma veya yaban hayatı koruma sahası olması gibi sebeplerle ağaçların sahadan kalmasını gerektiren durumlar ile karşılaşılabılır. Yangın sonrası hangi ağaçların sahadan çıkarılacağı hangilerinin ise çıkarılmayacağı gibi yönetim

kararları yangın sonrasında hızlı bir şekilde alınmalıdır. Yöneticiler hangi ağaçların öldüğünü gözlemek için birkaç yıl bekleyemezler. Bu yüzden yangın sonrasında ağaçların canlılık durumlarının tahmin eden modeller kullanılmalıdır. Bu modellerin kullanımı iki farklı yerde önem kazanmaktadır. Bunlardan biri büyük yangınların içinde blok halde yangının örtü yangını olarak seyrettiği alanlarda veya söndürme müdahaleleri görmüş kenar kısımlarda yanma derinliğinin az olduğu yerlerdir. Diğer ise küçük alanlarda gerçekleşen ve yanma derinliği az olan örtü yangınlarıdır. Bu tür alanlarda zarar görmüş olan ormanın kesilip kesilmeyeceğine yangından sonra en kısa sürede karar verebilmek için bu tahmin modelleri kullanılmalıdır.

Yangın sonrası canlılık durumu tahmin modellerinin özellikleri yangın riskinin orman yönetimi planlamasına entegrasyonu ile ilgili çok sayıda çalışma ve uygulamada kullanılmasına izin vermektedir. Örneğin; kontrollü yangınların planlanmasında ve yanma derinliğinin tahmin edilmesinde kullanılabilirlerdir. Bu sayede yöneticilerin farklı yönetim politikası alternatiflerini değerlendirmelerini sağlar. Bu modeller yöneticilere daha bilimsel tabanlı yangın sonrası yönetim kararlarını vermede ve ekolojik olarak daha sağlam yangın sonrası yönetim operasyonları tasarlamada yardımcı olacaktır.

Bu tahminlerin en yüksek doğrulukla canlılık durumunu tahmin etme gerekliliğinin önemi kadar uygulamacılar tarafından kolay ölçülebilir değişkenleri içermesi ve basit bir şekilde uygulanabilir olması da önemlidir. Örneğin, tepe zararını ölçmek kambiyum zararını ölçmekten daha kısa zaman alır ve daha kolaydır. Modelin doğruluğunu arttırmak için ek değişken ölçme zorunluluğu olabilir ve modelin uygulanmasını zorlaştırabilir. Çoğu durumda bu ek değişkenleri değerlendirmek için gereken ekstra süre tahmin doğruluğundaki az bir iyileştirme için harcanan çabaya muhtemelen değmez. Bu yüzden kabul edilebilir doğrulukla en az sayıda ve en kolay ölçülebilir değişkenler ile modeller oluşturmak amaçlanmalıdır. Diğer yandan yöneticiler için büyük yangınlardan sonra bireysel ağaç tahminlerinden çok meşcere bazlı tahminler daha kullanışlı olabilir. Özellikle yangınların içerisinde daha az ancak homojen yanma derinliğine sahip blok alanlarda sahada bir kesime gerek olup olmadığına karar verilebilmesi için yapılacak tahminin her ağacın ölçülmesine gerek kalmadan meşcere düzeyinde yapılması işleri daha da kolaylaştırabilir. Bu yüzden özellikle yangın sonrasında homojenlik gösteren farklı yanma derinliğine sahip farklı meşcereler için tahmin modelleri geliştirilebilir veya bu tip alanlar için zarar değişkenlerinin eşikleri belirlenebilir.

Bu çalışmalar her türün morfolojik özelliklerine göre değişkenlik göstereceğinden yangından en çok etkilenen türlerden başlanmak üzere farklı türler için yapılmalıdır. Böylece ağaçların yangından nasıl etkilendikleri ile ilgili bilgi düzeyimiz artabilir hatta bu sayede türlerin yangına adaptasyon yetenekleri ile ilgili değerlendirmeler yapılabilir. Bir veya birden fazla yangın sahasından toplanan veriler ile oluşturulan modeller başka yangın sahaslarında denenerek mutlaka test edilmelidir. Bu husus, modelin uygulanabilirliğini görebilmek için önemlidir.

Kaynakça

- Adams, H.D., Williams, A.P., Xu, C., Rauscher, S.A., Jiang, X., McDowell, N.G., 2013. Empirical and process-based approaches to climate-induced forest mortality models. *Frontiers in Plant Science*, 4: 438. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00438>
- Agee, J. K., 1993. *Fire ecology of Pacific Northwest Forests*. Island press, California, ABD.
- Alexander, M.E., Cruz, M.G., Taylor, S.W., 2020. Crown scorch height. In: *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Ed: Manzello S.L.), Springer, Gaithersburg, USA, pp.197-201. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_72-1
- Anderegg, W.R., Hicke, J.A., Fisher, R.A., Allen, C.D., Aukema, J., Bentz, B., Hood, S., Lichstein, J.W., Macalady, A.K., McDowell, N., Pan, Y., Raffa, K., Sala, A., Shaw, J.D., Stephenson, N.L., Tague, C. Zeppel, M., 2015. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist*, 208 (3): 674-683. <https://doi.org/10.1111/nph.13477>
- Andrews, P., Bevins, C., Seli, R., 2008. *BehavePlus fire modelling system, version 4.0: user's guide*. USDA Forest Service, General Technical Report, RMRS-GTR-106WWW Revised.
- Bär, A., Michaletz, S.T., Mayr, S., 2019. Fire effects on tree physiology, *New Phytologist*. 223: 1728-1741. <https://doi.org/10.1111/nph.15871>
- Beverly, J.L., Martell, D.L., 2003. Modeling *Pinus strobus* mortality following prescribed fire in Quetico Provincial Park, northwestern Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 33 (4): 740-751. <https://doi.org/10.1139/X02-209>
- 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>
- Brown, J.K., Debyle, N.V., 1987. Fire damage, mortality, and suckering in aspen. *Canadian Journal of Forest Research*, 17 (9): 1100-1109. <https://doi.org/10.1139/x87-168>
- 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>
- Cansler, C.A., Hood, S.M., van Mantgem, P.J., Varner, J.M., 2020. A large database supports the use of simple models of post-fire tree mortality for thick-barked conifers, with less support for other species. *Fire Ecology*, 16(1): 1-37. <https://doi.org/10.1186/s42408-020-00082-0>
- Catry, F., Rego, F., Moreira, F., Fernandes, P., Pausas, J., 2010a. Post-fire tree mortality in mixed forests of central Portugal. *Forest Ecology and Management*, 260(7): 1184-1192. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.010>
- Catry, F.X., Rego, F.C., Bação, F.L., Moreira, F., 2010b. Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 18 (8): 921-931.
- Chatziefstratiou, E.K., Bohrer, G., Bova, A.S., Subramanian, R., Frasson, R.P.M., Scherzer, A., Butler, B.W., Dickinson, M. B., 2013. FireStem2D – A Two-Dimensional heat transfer model for simulating tree stem injury in fires. *Plos One*, 8 (7): 1-14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070110>
- 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(1): 46-60. <https://doi.org/10.1071/WF04061>
- Davis, R.S., Hood, S., Bentz, B.J., 2012. Fire-injured ponderosa pine provide a pulsed resource for bark beetles, *Canadian Journal of Forest Research*, 42(12): 2022-2036. <https://doi.org/10.1139/x2012-147>
- DeNitto, G., Cramer, B., Gibson, K., Lockman, B., McConnell, T., Stipe, L., Sturdevant, N., Taylor, J., 2000. *Survivability and deterioration of fire-injured trees in the northern Rocky Mountains: a review of the literature*. USDA Forest Service, General Technical Report, 2000-13.
- Dickinson, M.B., Johnson, E.A., 2001. Fire effects on trees, In: *Forest Fires*, (Ed., Edward A.J. and Miyanishi K.), Elsevier, Canada, pp. 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>
- Fairman, T.A., Nitschke, C.R., Bennett, L.T., 2016. Too much, too soon? A review of the effects of increasing wildfire frequency on tree mortality and regeneration in temperate eucalypt forests. *International Journal of Wildland Fire*, 25 (8):831-848. <https://doi.org/10.1071/wf15010>
- Finney, M.A., Martin, R.E., 1993. Modeling effects of prescribed fire on young-growth coast redwood trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 23(6): 1125-1135. <https://doi.org/10.1139/x93-143>
- Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M., Wotton, M., 2009. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, 15(3): 549-560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
- Furniss, T.J., Larson, A.J., Kane, V.R., Lutz, J.A., 2019. Multi-scale assessment of post-fire tree mortality models. *International Journal of Wildland Fire*, 28(1): 46-61. <https://doi.org/10.1071/wf18031>
- Grayson, L.M., Progar, R.A., Hood, S.M., 2017. Predicting post-fire tree mortality for 14 conifers in the Pacific Northwest, USA: Model evaluation, development, and thresholds. *Forest Ecology and Management*, 399: 213-226. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.038>
- Güney, C.O., Güney, A., 2020. Assessing fire severity, bark char codes, and cambium damage to determine post-fire tree mortality in Turkish Red Pine, 10th International Ecology Symposium, 26-28 November, Bursa, Türkiye, pp. 132.
- Güney, C.O., Güney, A., Sarı, A., Kavgacı, A., 2021. Kızılıçamın yangın sonrası canlılık durumunun modellenmesi. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Orman Genel Müdürlüğü, Batı Akdeniz Ormançılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Proje Sonuç Raporu, Proje Numarası: 19.9401/2018-2021, Antalya.
- 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>
- Hare, R.C., 1965. Notes and observations: Chemical test for fire damage. *Journal of Forestry*, 63(12): 939-939.
- Harrington, M., 1993. Predicting *Pinus ponderosa* mortality from dormant season and growing-season fire injury. *International Journal of Wildland Fire*, 3(2): 65-72.
- Heikkilä, T.V., Grönqvist, R., Jurvelius, M., 2010. *Wildland fire management: handbook for trainers*, Roma, Italy, FAO.
- Hély, C., Flannigan, M., Bergeron, Y., 2003. Modeling tree mortality following wildfire in the southeastern Canadian mixed-wood boreal forest, *Forest Science*, 49 (4): 566-576. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.4.566>
- Higgins, S.I., Bond, W.J., Trollope, W.S., 2000. Fire, resprouting and variability: a recipe for grass-tree coexistence in savanna. *Journal of Ecology*, 88(2): 213-229.
- Hood, S., 2007. Scorch height, http://www.firewords.net/definitions/scorch_height.htm Accessed: 03.04.2024.

- Hood, S., Bentz, B., 2007. Predicting postfire Douglas-fir beetle attacks and tree mortality in the northern Rocky Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(6): 1058-1069. <https://doi.org/10.1139/X06-313>
- Hood, S., Bentz, B., Gibson, K., Ryan, K., DeNitto, G., 2007a. Assessing post-fire Douglas-fir mortality and Douglas-fir beetle attacks in the northern Rocky Mountains. USDA Forest Service, General Technical Report, RMRS-GTR-199
- Hood, S., Lutes, D., 2017. Predicting post-fire tree mortality for 12 Western US conifers using the first order fire effects model (FOFEM). *Fire Ecology*, 13 (2): 66-84. <https://doi.org/10.4996/fireecology.130290243>
- Hood, S.M., McHugh, C.W., Ryan, K.C., Reinhardt, E., Smith, S. L., 2007b. Evaluation of a post-fire tree mortality model for western USA conifers. *International Journal of Wildland Fire*, 16(6): 679-689.
- Hood, S.M., Cluck, D.R., Smith, S.L., Ryan, K.C., 2008. Using bark char codes to predict post-fire cambium mortality. *Fire Ecology*, 4(1): 57-73. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0401057>
- Hood, S.M., 2010. Mitigating old tree mortality in long-unburned, fire-dependent forests: a synthesis, USDA Forest Service, General Technical Report, RMRS-GTR-238.
- Hood, S.M., Varner, J.M., van Mantgem, P., Cansler, C.A., 2018. Fire and tree death: understanding and improving modeling of fire-induced tree mortality. *Environmental Research Letters*, 13 (11): 1-10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae934>
- Hood, S.M., Varner, J.M., 2019. Post-fire tree mortality. In: *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Ed: Manzello S.L.), Springer, Gaithersburg, USA pp. 1-10. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_252-1
- Hood, S.M., Ragenovich, I., Schaupp, W.C., 2020. Post-fire assessment of tree status and marking guidelines for conifers in Oregon and Washington. USDA Forest Service, Pacific Northwest Region. General Technical Report, R6-FHP-RO-2020-02..
- Hull Sieg, C., McMillin, J.D., Fowler, J.F., Allen, K.K., Negron, J.F., Wadleigh, L.L., Anhold, J.A., Gibson, K.E., 2006. Best predictors for postfire mortality of ponderosa pine trees in the Intermountain West. *Forest Science*, 52(6): 718-728. <https://doi.org/10.1093/forestscience/52.6.718>
- 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>
- Keyser, T.L., Smith, F.W., Lentile, L.B., Shepperd, W.D., 2006. Modeling postfire mortality of ponderosa pine following a mixed-severity wildfire in the Black Hills: the role of tree morphology and direct fire effects. *Forest Science*, 52 (5): 530-539. <https://doi.org/10.1093/forestscience/52.5.530>
- Kobziar, L., Moghaddas, J., Stephens, S.L., 2006. Tree mortality patterns following prescribed fires in a mixed conifer forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(12): 3222-3238. <https://doi.org/10.1139/X06-183>
- Lambert, S., Stohlgren, T.J., 1988. Giant sequoia mortality in burned and unburned stands. *Journal of Forestry*, 86(2): 44-46.
- Liang, S., Hurteau, M.D., Westerling, A.L., 2017. Potential decline in carbon carrying capacity under projected climate-wildfire interactions in the Sierra Nevada. *Scientific Reports*, 7 (1): 2420. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02686-0>
- Lowell, E. C., 2010. Effects of fire, insect, and pathogen damage on wood quality of dead and dying western conifers, USDA Forest Service, General Technical Report, PNW-GTR-816.
- Mantgem, P.V., Schwartz, M., 2004. An experimental demonstration of stem damage as a predictor of fire-caused mortality for ponderosa pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(6): 1343-1347. <https://doi.org/10.1139/x04-001>
- McDowell, N.G., Beerling, D.J., Breshears, D.D., Fisher, R.A., Raffa, K.F., Stitt, M., 2011. The interdependence of mechanisms underlying climate-driven vegetation mortality. *Trends in Ecology & Evolution*, 26(10): 523-532. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.06.003>
- McHugh, C.W., Kolb, T.E., 2003a. Ponderosa pine mortality following fire in northern Arizona. *International Journal of Wildland Fire*, 12 (1): 7-22.
- McHugh, C.W., Kolb, T.E., 2003b. Corrigendum to: ponderosa pine mortality following fire in northern Arizona. *International Journal of Wildland Fire*, 12(2): 245-245. <https://doi.org/10.1071/WF02054>
- McHugh, C.W., Kolb, T.E., Wilson, J.L., 2003. Bark beetle attacks on ponderosa pine following fire in northern Arizona. *Environmental Entomology*, 32(3): 510-522.
- Michaletz, S., Johnson, E., 2008. A biophysical process model of tree mortality in surface fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 38 (7): 2013-2029. <https://doi.org/10.1139/X08-024>
- 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>
- Michaletz, S.T., 2018. Xylem dysfunction in fires: towards a hydraulic theory of plant responses to multiple disturbance stressors. *New Phytologist*, 217(4): 1391-1393.
- Outcalt, K.W., Wade, D.D., 2004. Fuels management reduces tree mortality from wildfires in southeastern United States. *Southern Journal of Applied Forestry*, 28(1): 28-34. <https://doi.org/10.1093/sjaf/28.1.28>
- Pausas, J.G., Keeley, J.E., 2017. Epicormic resprouting in fire-prone ecosystems. *Trends in Plant Science*, 22 (12): 1008-1015. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.08.010>
- Peterson, D.L., 1985. Crown scorch volume and scorch height: estimates of postfire tree condition. *Canadian Journal of Forest Research*, 15(3): 596-598.
- Peterson, D.L., Ryan, K.C., 1986. Modeling postfire conifer mortality for long-range planning. *Environmental Management*, 10(6): 797-808.
- Peterson, D.L., Arbaugh, M.J., 1989. Estimating postfire survival of Douglas-fir in the Cascade Range. *Canadian Journal of Forest Research*, 19(4): 530-533.
- Pounden, E., Greene, D.F., Michaletz, S.T., 2014. Non-serotinous woody plants behave as aerial seed bank species when a late-summer wildfire coincides with a mast year. *Ecology and Evolution*, 4 (19): 3830-3840. <https://doi.org/10.1002/ece3.1247>
- Quevedo, L., Rodrigo, A., Espelta, J.M., 2007. Post-fire resprouting ability of 15 non-dominant shrub and tree species in Mediterranean areas of NE Spain. *Annals of Forest Science*, 64 (8): 883-890. <https://doi.org/10.1051/forest:2007053>
- Raymond, C.L., Peterson, D.L., 2005. Fuel treatments alter the effects of wildfire in a mixed-evergreen forest, Oregon, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(12): 2981-2995. <https://doi.org/10.1139/X05-206>
- Reed, C.C., Hood, S.M., 2024. Nonstructural carbohydrates explain post-fire tree mortality and recovery patterns. *Tree Physiol*, 44(2). <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad155>
- Regelbrugge, J.C., Conard, S.G., 1993. Modeling tree mortality following wildfire in *Pinus ponderosa* forests in the central Sierra-Nevada of California. *International Journal of Wildland Fire*, 3(3): 139-148.
- Reinhardt, E.D., Keane, R.E., Brown, J.K., 1997. First order fire effects model: FOFEM 4.0 user's guide. USDA Forest Service, General Technical Report, PB-97-133011/XAB; FSGTR/INT-344.
- Reinhardt, E.D., Crookston, N.L., 2003. The fire and fuels extension to the forest vegetation simulator. USDA Forest Service, General Technical Report, RMRS-GTR-116.
- Rigolot, E., 2004. Predicting postfire mortality of *Pinus halepensis* Mill. and *Pinus pinea* L. *Plant Ecology*, 171(1): 139-151. <https://doi.org/10.1023/B:VEGE.0000029382.59284.71>

- Rodríguez-Trejo, D.A., Castro-Solis, U.B., Zepeda-Bautista, M., Carr, R.J., 2007. First year survival of *Pinus hartwegii* following prescribed burns at different intensities and different seasons in central Mexico. *International Journal of Wildland Fire*, 16(1): 54-62. <https://doi.org/10.1071/WF05061>
- Ryan, K.C., 1982a. Evaluating potential tree mortality from prescribed burning. Site preparation and fuels management on steep terrain: proceedings of a symposium, Washington State University, Spokane, 15-17 February, Washington, pp. 15-17.
- Ryan, K.C., 1982b. Techniques for assessing fire damage to trees. Fire, its Field Effects. Intermountain Fire Council, 19-21 October, Missoula, Montana, USA, pp. 1-11.
- 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., Reinhardt, E.D., 1988. Predicting postfire mortality of seven western conifers. *Canadian Journal of Forest Research*, 18(10): 1291-1297.
- Ryan, K.C., Amman, G.D., 1996. Bark beetle activity and delayed tree mortality in the Greater Yellowstone Area following the 1988 fires. Proceedings of the Second Biennial Conference on the Greater Yellowstone Ecosystem. The Ecological Implications of Fire in the Greater Yellowstone, International Association of Wildland Fire, Fairland, Washington, USA, pp. 151-158.
- 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>
- Satio, K., 2001. Flames. In: Forest Fires Behavior and Ecological Effects, (Ed: Johnson E.A., Miyanishi K.) Academic Press, San Diego, pp. 11-54.
- Schwilk, D.W., Knapp, E.E., Ferrenberg, S.M., Keeley, J.E., Caprio, A.C., 2006. Tree mortality from fire and bark beetles following early and late season prescribed fires in a Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Forest Ecology and Management*, 232(1): 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.036>
- Shearman, T.M., Varner, J.M., Hood, S.M., Cansler, C.A., Hiers, J.K., 2019. Modelling post-fire tree mortality: Can random forest improve discrimination of imbalanced data?. *Ecological Modelling*, 414, 108855. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108855>
- Sidoroff, K., Kuuluvainen, T., Tanskanen, H., Vanha-Majamaa, I., 2007. Tree mortality after low-intensity prescribed fires in managed *Pinus sylvestris* stands in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 22(1): 2-12. <https://doi.org/10.1080/02827580500365935>
- Stephens, S.L., Finney, M.A., 2002. Prescribed fire mortality of Sierra Nevada mixed conifer tree species: effects of crown damage and forest floor combustion. *Forest Ecology and Management*, 162(2): 261-271. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00521-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00521-7)
- Thies, W.G., Westlind, D.J., Loewen, M., Brenner, G., 2006. Prediction of delayed mortality of fire-damaged ponderosa pine following prescribed fires in eastern Oregon, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 15(1): 19-29. <https://doi.org/10.1071/WF05025>
- Thompson, M.T.C., Koyama, A., Kavanagh, K.L., 2017. Wildfire effects on physiological properties in conifers of central Idaho forests, USA. *Trees*, 31(2): 545-555. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1489-z>
- Valor, T., Casals, P., Altieri, S., González-Olabarria, J.R., Piqué, M., Battipaglia, G., 2018. Disentangling the effects of crown scorch and competition release on the physiological and growth response of *Pinus halepensis* Mill. using $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ isotopes. *Forest Ecology and Management*, 424: 276-287. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.056>
- Van Mantgem, P., Schwartz, M., 2003. Bark heat resistance of small trees in Californian mixed conifer forests: testing some model assumptions. *Forest Ecology and Management*, 178(3): 341-352. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00554-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00554-6)
- Von Gadow, K., 2000. Evaluating risk in forest planning models. *Silva Fennica*, 34(2): 181-191. <https://doi.org/10.14214/sf.639>
- Wagner, C.E.V., 1973. Height of crown scorch in forest fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 3(3): 373-378.
- Wallin, K.F., Kolb, T.E., Skov, K.R., Wagner, M.R., 2003. Effects of crown scorch on ponderosa pine resistance to bark beetles in northern Arizona. *Environmental Entomology*, 32(3): 652-661. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-32.3.652>
- Woolley, T., Shaw, D.C., Ganio, L.M., Fitzgerald, S., 2012. A review of logistic regression models used to predict post-fire tree mortality of western North American conifers. *International Journal of Wildland Fire*, 21(1): 1-35. <https://doi.org/10.1071/WF09039>