Turkish Journal of Forest Science
Available online at dergipark.gov.tr/turkjforsci

Topoğrafik faktörlerin yangın şiddetine etkisi: dNBR tabanlı mekânsal bir analiz (Kahramanmaraş, Türkiye örneği)

Hüsna KAZI[1, *], Murat KARABULUT[1], Muhammet TOPUZ[2]

[1]Coğrafya Bölümü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş
[2] Coğrafya Bölümü, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay

*Sorumlu Yazar: husnakazi35@gmail.com

Hüsna KAZI: https://orcid.org/0000-0002-3742-7329
Murat KARABULUT: https://orcid.org/0000-0002-1456-6908
Muhammet TOPUZ: https://orcid.org/0000-0001-5526-3797

ESER BİLGİSİ / ARTICLE INFO
Araştırma Makalesi / Research Article
Geliş 19 Aralık 2025 / Received 19 December 2025
Düzeltmelerin gelişi 6 Ocak 2026 / Received in revised form 6 January 2026
Kabul 28 Mart 2026 / Accepted 28 March 2026
Yayımlanma 31 Mart 2026 / Published online 31 March 2026

ÖZET: Orman yangınları, iklim değişikliği ile birlikte her geçen yıl daha büyük kayıplara neden olmaktadır. Özellikle Türkiye'nin bulunduğu Akdeniz Havzası, iklim değişikliğine karşı hassas bir zonda yer almaktadır. Bu durum, kırılganlığı artırmakta ve müdahaleyi güçleştirmektedir. Özellikle son 5 yılda bölgede çok ciddi orman yangınları yaşanmış ve büyük ekonomik kayıplara neden olmuştur. Orman yangınlarının birçok bileşeni olmakla birlikte topoğrafik faktörlerin yangınların şiddetine etkisi, tahmini en zorlu süreçlerdendir. Özellikle güncel teknolojilerin kullanımı bu bağlamda çok önemlidir. Uydu görüntüleri üzerinde mekânsal analiz yeteneği yüksek programların kullanımı, yangınların analizinin daha iyi yapılmasına sağlayacak ve böylece bir sonraki olası yangınlarda kayıp azaltım yollarına giden çözümler üretilebilecektir. Bu çalışmada, yangın şiddetinin mekânsal dağılımını belirlemek amacıyla Difference Normalized Burn Ratio (dNBR) (Fark Normalize Yanma Oran) indeksi temel alınmış ve analiz süreci, yangın sonrası etkilerin yapısal örüntülerini ortaya koymak üzere ısı yoğunluk haritaları (heatmap) ile mekânsal otokorelasyon yöntemi entegre bir biçimde uygulanmıştır. Çalışmanın bulguları, yangın şiddetinin artışında düşük eğim değerleri, kuru topoğrafik koşullar ve düşük yükselti basamaklarının belirleyici bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır. Bakı faktörünün etkisi ise görece diğer değişkenlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yapılan değerlendirmeler, yangın şiddeti ile topoğrafik faktörler arasındaki ilişkinin oldukça karmaşık bir yapıya sahip olduğunu ve yangın davranışının tek bir değişkenin etkisiyle değil, birden fazla topoğrafik parametrenin (eğim, bakı, yükselti, TWI) birlikte oluşturduğu koşulların etkileşimiyle şekillendiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, topoğrafik faktörlerin yangın sonrası ekosistem tepkilerini anlamada kritik bir rol oynadığını ortaya koymakta ve yangın şiddetinin mekânsal belirleyicilerine yönelik literatüre, özellikle çoklu topoğrafik etkileşimlerin ekolojik iyileşme süreçlerini nasıl şekillendirdiğine dair yeni ve bütüncül bir perspektif kazandırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yangın şiddeti, topoğrafik faktör, dNBR, mekansal otokorelasyon, Kahramanmaraş.

Effect of topographic factors on fire severity: A dNBR-based spatial analysis (example of Kahramanmaraş, Türkiye)

ABSTRACT: Forest fires have been causing increasingly greater losses each year, particularly in conjunction with climate change. The Mediterranean Basin, where Türkiye is located, lies within a zone highly sensitive to climate change. This situation increases vulnerability and makes intervention more difficult. Especially in the last five years, very severe forest fires have occurred in the region, leading to significant economic losses. Although forest fires have multiple components, the influence of topographic factors on fire severity remains one of the most challenging processes to estimate. In this context, the use of advanced technologies is of great importance. The use of software with high spatial analysis capabilities on satellite imagery enables a more effective analysis of fires and thus facilitates the development of solutions aimed at reducing losses in future potential fire events. In this study, the Difference Normalized Burn Ratio (dNBR) index was employed to determine the spatial distribution of fire severity, and the analysis process was conducted through an integrated application of heat maps and spatial autocorrelation methods to reveal the structural patterns of post-fire effects. The findings of the study indicate that low slope values, dry topographic conditions, and low elevation levels play a decisive role in the increase of fire severity. The effect of the aspect factor, on the other hand, varies depending on other variables. The evaluations demonstrate that the relationship between fire severity and topographic factors has a highly complex structure, and that fire behavior is shaped not by a single variable but by the interaction of multiple topographic parameters (slope, aspect, elevation, TWI). These findings highlight the critical role of topographic factors in understanding post-fire ecosystem responses and contribute to the literature on the spatial determinants of fire severity by providing a new and holistic perspective, particularly on how multiple topographic interactions shape ecological recovery processes.

Keywords: Fire severity, topographic factors, dNBR, spatial autocorrelation, Kahramanmaraş

GİRİŞ

Küresel iklim sistemindeki hızlı değişim süreci, orman yangınlarının oluşum, yayılım ve etki dinamiklerini yeniden şekillendirmekte; bu durum, özellikle Akdeniz Havzası gibi ekolojik açıdan hassas bölgelerde yangınların daha yıkıcı sonuçlar üretmesine zemin hazırlamaktadır (Peña-Molina vd., 2024). Sıcaklıkların yükselmesi, yağış rejimindeki düzensizlikler ve ekstrem iklim olaylarının sıklaşması, yangınların yayılımını ve şiddetini artırırken; rejenerasyon süreçleri tamamlanmadan gerçekleşen tekrarlayan yangınlar ekosistem direncini ciddi biçimde zayıflatmaktadır. Bu durum, orman ekosistemlerinin fenolojik gelişim süreçlerinde öngörülemezliğe yol açarak yangınlara karşı duyarlılığı en üst düzeye çıkarmaktadır. Literatür, Akdeniz ekosistemlerinin orman yangınları başta olmak üzere çoklu çevresel baskılara karşı kırılganlığının önemli nedenlerinden birinin tür çeşitliliği ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır (Neyişçi, 1987). Davis'in (1960) *Flora of Turkey* adlı eserinde tanımlanan karelaj sistemine göre, çalışmanın içerisinde yer aldığı bölge yaklaşık 600 bitki türü ile temsil edilmektedir ve bu durum biyolojik çeşitlilik ile endemizm açısından önemli bir zenginliğe işaret etmektedir. Bununla birlikte, tür çeşitliliğinin fazla olması, belirli çevresel stres faktörleri altında ekosistemin duyarlılığını artırabilecek bir unsur

olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle bölgedeki baskın ağaç türleri ve bunların yangın ekolojileri, orman yangınları konusundaki bilimsel ve yönetsel tartışmaları çeşitlendirmekte; bazı yaklaşımlar, yangın sonrası alanların orman vasfından çıkarılarak tarımsal kullanıma açılmasına kadar uzanan önerileri gündeme getirmektedir. Buna karşın denkronolojik ve diğer bulgular Akdeniz ekosisteminin direkt içerisinde yangınların yerini ve önemini tayin etmektedir. Özellikle yenilenme ve daha geniş alanlara türün yayılması bağlamında pozitif bir etkiye sahiptir. Bu bağlamda, bölgenin en karakteristik türlerinden biri olan ve literatürde "yangın ağacı" olarak da tanımlanan kızılçam (*Pinus brutia*), yangına uyum sağlamış özgün bir ekolojik stratejiye sahiptir ve yangın sonrası rejenerasyon süreçlerinde kilit bir rol oynamaktadır (Neyişçi, 1987).

Son yıllarda literatürde, orman yangınlarının değişen özelliklerinin altında yatan süreçler ve bu süreçlerin işleyiş mekanizmaları incelenerek, olası yangınlara yönelik erken müdahale ve risk azaltma politikalarının geliştirilmesi hedeflenmektedir (Peña-Molina vd., 2024). Çalışmaların büyük ölçüde yangın söndürme süreçlerine odaklandığı; buna karşılık arazi kullanımındaki değişimlerin ve artan yangın şiddetinin yeterince ele alınmadığı, dolayısıyla sorunun ekolojik temelli çözümlerinin aranması gerekliliği bulunmaktadır (Fernandes, 2012). Bu durum, iklim değişikliği ile orman yangınları arasındaki ilişkinin net biçimde ortaya konmasını zorlaştırmakta ve değişen arazi kullanımının yangın dinamikleri üzerindeki belirleyici rolüne dikkat çekmektedir. Yangına dayanıklı türlerin tercih edilmesi, bu bağlamda öne çıkan temel önerilerden biri olarak değerlendirilmektedir (Fernandes, 2012).

Topografya, yangın davranışını doğrudan ve dolaylı olarak etkileyen temel çevresel faktörlerden biridir. Bakı, eğim ve yükselti gibi topoğrafik değişkenler; mikroklimatik koşulları, yakıt nem içeriğini, rüzgâr rejimini ve yangının yayılma yönünü belirleyerek yangın şiddetinin mekânsal desenini şekillendirmektedir. Bu nedenle, yangın şiddetinin mekânsal heterojenliğini anlamada topoğrafik faktörlerin rolü, özellikle son yıllarda yapılan ampirik çalışmalarla daha görünür hale gelmiş; Batı ABD'nin iki bölgesinde 1984–2006 yılları arasında orman ve odunsu alanlardaki yanma şiddetinin hem topoğrafya hem de iklim tarafından etkilendiği ampirik olarak ortaya konulmuştur (Dillon vd., 2021). Topoğrafik faktörler, iklimsel etkenlerle birlikte değerlendirildiğinde, yangın şiddetinin ortaya çıkışında belirleyici bir rol oynamaktadır. Aynı çalışmada, topoğrafyanın bazı koşullar altında iklimsel değişkenlerden daha baskın bir etkiye hal aldığı; ancak ekstrem hava olaylarının hâkim olduğu dönemlerde topoğrafyanın belirleyiciliğinin azalabileceği vurgulanmıştır. Benzer şekilde Estes vd. (2017), Kuzey Kaliforniya'daki Klamath Dağları'nda 2006 yılı yangınında topoğrafyanın önemli bir etkisinin olduğunu ortaya koymuştur. Harris vd. (2019), topoğrafik etkilerin yangın şiddeti üzerindeki rolünün, yangın geçmişi ve yakıt özellikleri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini belirtirken; Mitsopoulos vd. (2019), topoğrafik değişkenleri yakıt özellikleri ile entegre ederek bütünleşik yangın yönetimi planlamasının zorunluluğuna dikkat çekmiştir. Türkiye'de gerçekleştirilen çalışmalar da topoğrafya–yangın ilişkisine dair önemli bulgular sunmaktadır. Mersin (Duran, 2014), Hatay (Geçen ve Topuz, 2021; Yılmaz vd., 2021), Muğla (Alkayış vd., 2022), Kahramanmaraş (Karabulut vd., 2013) ve Burdur (Bingöl, 2017) illerinde yürütülen araştırmalar, topoğrafik faktörlerin yangın şiddeti ve yayılımı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Ancak literatür genel olarak değerlendirildiğinde, Akdeniz Bölgesi'nde yangın karakterinin son yıllarda geçirdiği dönüşümü, güncel yöntem ve veri setleriyle ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Açık kodlu yazılımlar, yapay zekâ uygulamaları, orman yangınlarında proaktif yöntemlerin daha fazla kullanılması, bu alandaki araştırmalar için önemli bir fırsat sunmaktadır (Liu vd., 2025). Ekolojik açıdan zengin bir yapıya sahip olan bölgede artan

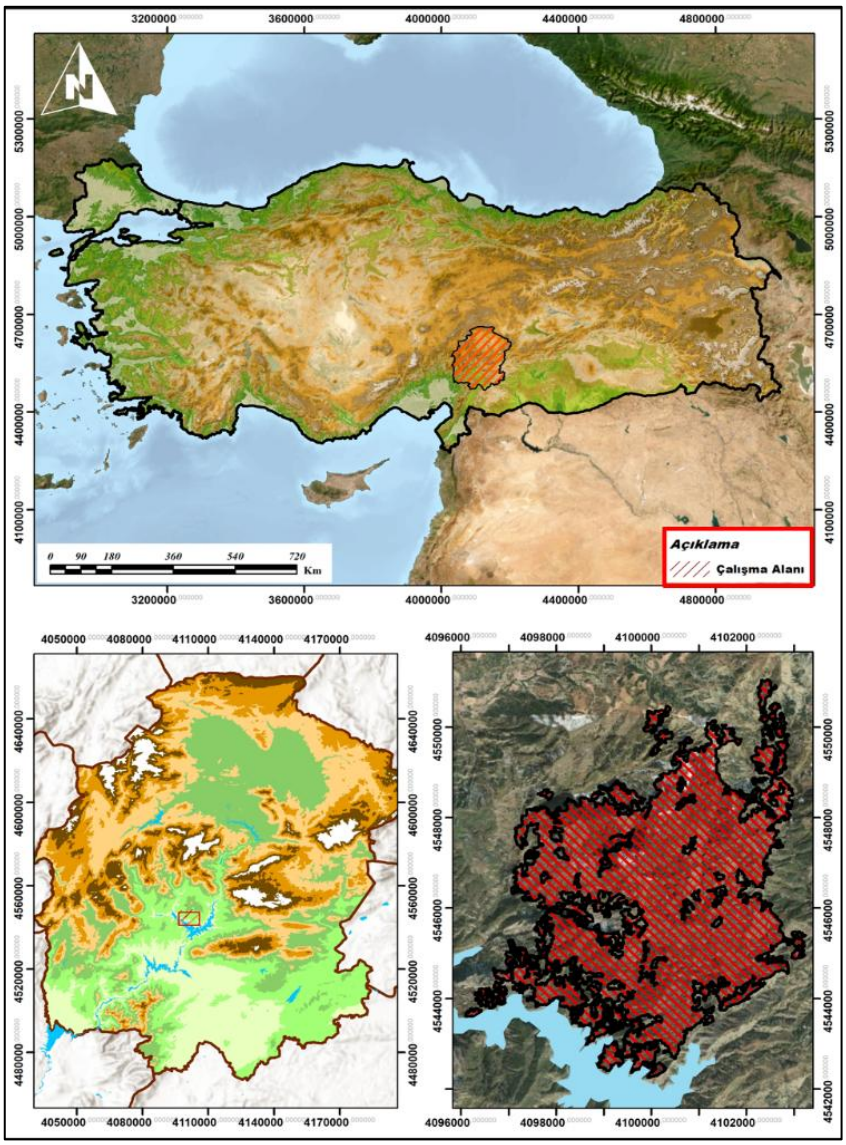
yangın riskleri göz önünde bulundurulduğunda, orman yangınlarının güncel yöntemlerle bölgesel düzeyde analiz edilmesi ve yangına etki eden bileşenlerin modellenmesi önemli bir gereklilik olarak görülmektedir. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojilerinin orman yangınları çalışmalarındaki avantajları daha önceki araştırmalarda vurgulanmış olmakla birlikte (Sabuncu ve Ozaner, 2019; Bıçakçı ve Yıldız, 2024; Ocak vd., 2024; Yaman ve Görmüş, 2025), atmosferik etkilerin veri kalitesi üzerindeki sınırlayıcı rolüne de dikkat çekilmektedir (Kaynak, 2025). Sentinel-2 görüntülerinin yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip olması nedeniyle yangın alanlarını belirlemede daha doğru sonuçlar vermektedir (Kaynak, 2025). Rejenarason süreçleri için de yine CBS ve UA teknolojilerinden faydalanılmaktadır (Karadaş ve Altınkaya, 2025). Tonbul (2015), MODIS uydu görüntülerinin mekânsal çözünürlüğü nedeni ile küçük alan yangınlarının tespitinde başarısız olduğu, Landsat uydu görüntüleri üzerinden ise Orman Genel Müdürlüğü (OGM) hesapları ile daha uyumlu yanan alan hesabı yapılabildiğini belirtmiştir. Çetin (2025), yangın yüküne dikkat çekmiş ve özellikle Google Earth Engine (GEE)'nin bulut problemine rağmen oldukça kullanışlı olduğu ve doğru sonuçlar üretebildiğini vurgulamıştır. Gelişen teknolojiler kapsamında Radar, LiDAR ve İnsansız Hava Aracı (İHA) verilerinin yangın yükü ve yakıt özelliklerinin daha hassas biçimde ölçülerek modellere entegre edilmesi, gelecekteki çalışmalar için önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Bu çalışma, uluslararası literatürde son yıllarda yaygınlaşan ileri uzaktan algılama ve mekânsal analiz yaklaşımlarını kullanarak, biyolojik çeşitliliğin yüksek olduğu bir sahada orman yangınlarının mekânsal dinamiklerini incelemeyi amaçlamaktadır. Özellikle topoğrafik faktörlerin yangın şiddeti üzerindeki etkisi, dNBR tabanlı yüksek çözünürlüklü mekânsal analizler aracılığıyla değerlendirilerek, yangın davranışını kontrol eden çevresel bileşenlerin göreli katkıları ortaya konulmaktadır. Elde edilen bulguların, yangın riski yüksek Akdeniz ekosistemlerinde proaktif yangın yönetimi ve ekosistem temelli planlama yaklaşımlarının geliştirilmesine bilimsel bir zemin oluşturması; aynı zamanda bölgesel ölçekte yangın şiddeti modellemelerine yönelik güncel ve uygulanabilir bir metodolojik çerçeve sunması beklenmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma Alanı

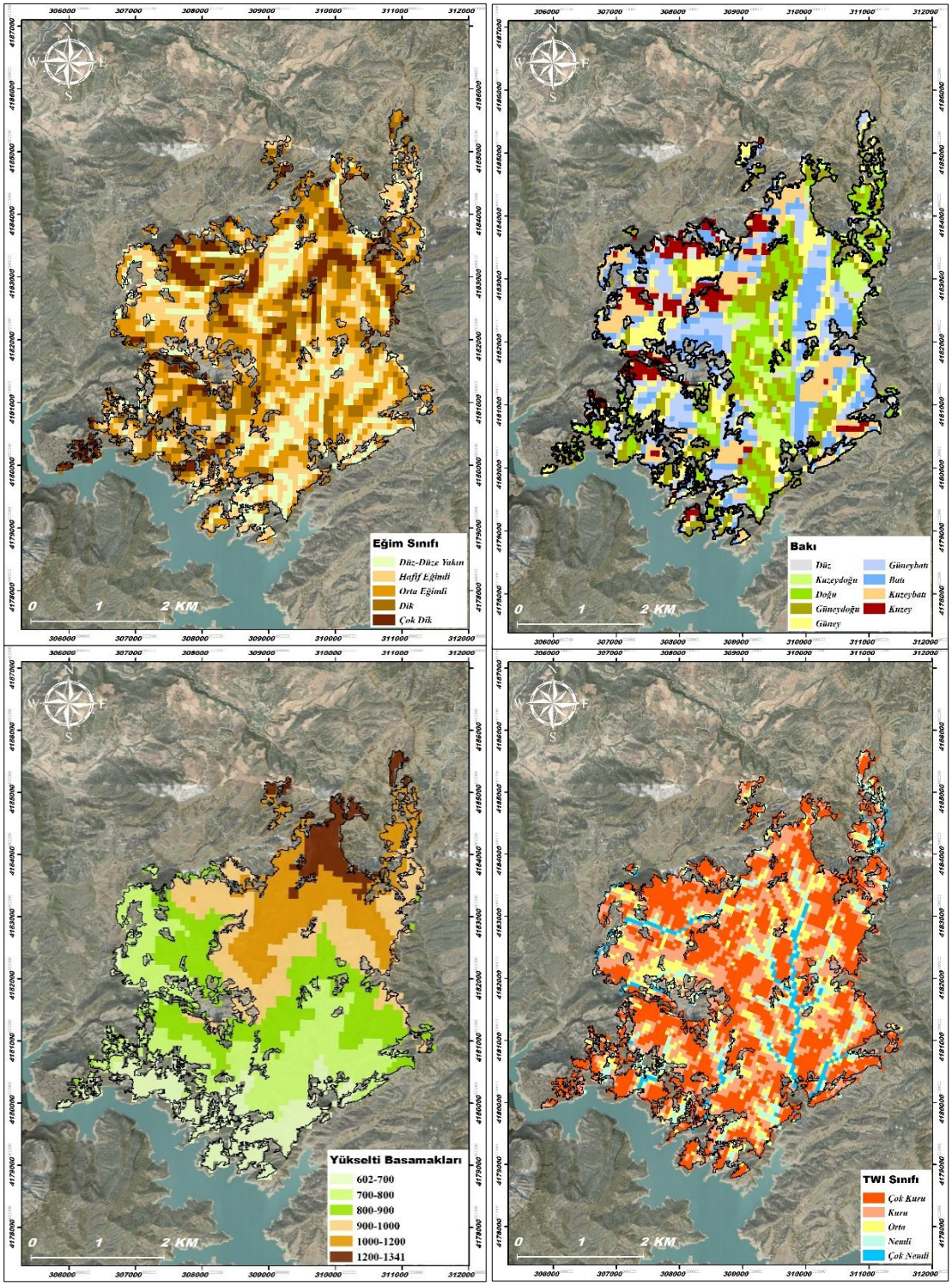
Çalışma sahası, Akdeniz Bölgesi'nin Adana Bölümü'nde, yer almaktadır (Şekil 1). Bölgede farklı iklim rejimlerinin özellikleri bir arada görülse de çalışma alanı esas olarak orman yangınları açısından yüksek risk taşıyan Akdeniz ikliminin etkisi altındadır (Eker ve Abdurrahmanoğlu, 2018). Yıllık ortalama sıcaklık 17, 1 ºC; yıllık toplam yağış 705,22 mm'dir (Cosun ve Karabulut, 2009; Sarıgül ve Turoğlu, 2020). Bölge jeolojik ve fitocoğrafik açıdan da bir kesişim zonu oluşturduğundan farklı litolojik birimlere ve bitki türlerine sahiptir (Avcu ve Karabulut, 2019; Esen ve Avcı, 2020; Sarıgül ve Turoğlu, 2020). Floristik kompozisyonun temel bileşeni olan Türk Çamı (*Pinus brutia*) ormanları, yangına uyumlu yapısına rağmen, iklim değişikliği kaynaklı termal stres ve uzayan kuraklık periyotları altında daha yüksek yangın şiddeti ve artan ekolojik etkilere maruz kalmaktadır. Çalışma alanında doğal orman ekosistemlerine ek olarak, 1950 sonrası dönemde yürütülen planlı ağaçlandırma faaliyetleri sonucunda gelişmiş orman alanları bulunmaktadır. Bu duruma Ahır Dağı'nda olduğu gibi 2000'ler sonrası inşa edilen baraj çevrelerinde de erozyonu azaltma amacıyla rastlanır (Gündoğan vd., 2008; Doygun vd., 2014).



Şekil 1. Çalışma Sahası

Materyal

Bu çalışmada yangın sonrası vejetasyon kaybının belirlenmesi ve topoğrafyayla ilişkisinin kurulması amacıyla Sentinel-2 uydusuna ait görüntüler kullanılmıştır. Veriler, Google Earth Engine platformundan temin edilmiştir. Sentinel-2A ve Sentinel-2B uydularından oluşan bu çift platform, 13 spektral banda sahip multispektral görüntüleme sensörleri ile özellikle vejetasyon, arazi örtüsü ve ekosistem değişimlerinin izlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Yücer, E., 2023; Yüksel, K., 2022; Gruia vd., 2024; Gibson vd., 2020). Bu kapsamda, yangın etkilerinin belirlenmesinde kritik öneme sahip olan Yakın Kızılötesi (Near Infrared, NIR) ve Kısa Dalga Kızılötesi (Shortwave Infrared, SWIR) bantları kullanılmıştır. NIR bantları (10 m mekânsal çözünürlük), sağlıklı vejetasyon tarafından yüksek yansıtım gösterirken, SWIR bantları (20 m mekânsal çözünürlük) bitki su içeriğine ve yanmış alanlara duyarlı olup yangın sonrası değişimlerin belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Gerekli geometrik ve diğer düzeltmeler yapılarak yanan alanlar belirlenmiştir. Yangın şiddetinde topoğrafyanın rolünün belirlenmesi adına dört farklı topoğrafik değişken kullanılmıştır. DEM verisinden üretilen bu topoğrafik faktörler eğim, bakı, yükselti ve Topografik Nemlilik İndeksi (Topographic Wetness Index, TWI) olarak belirlenmiştir (Şekil 2).

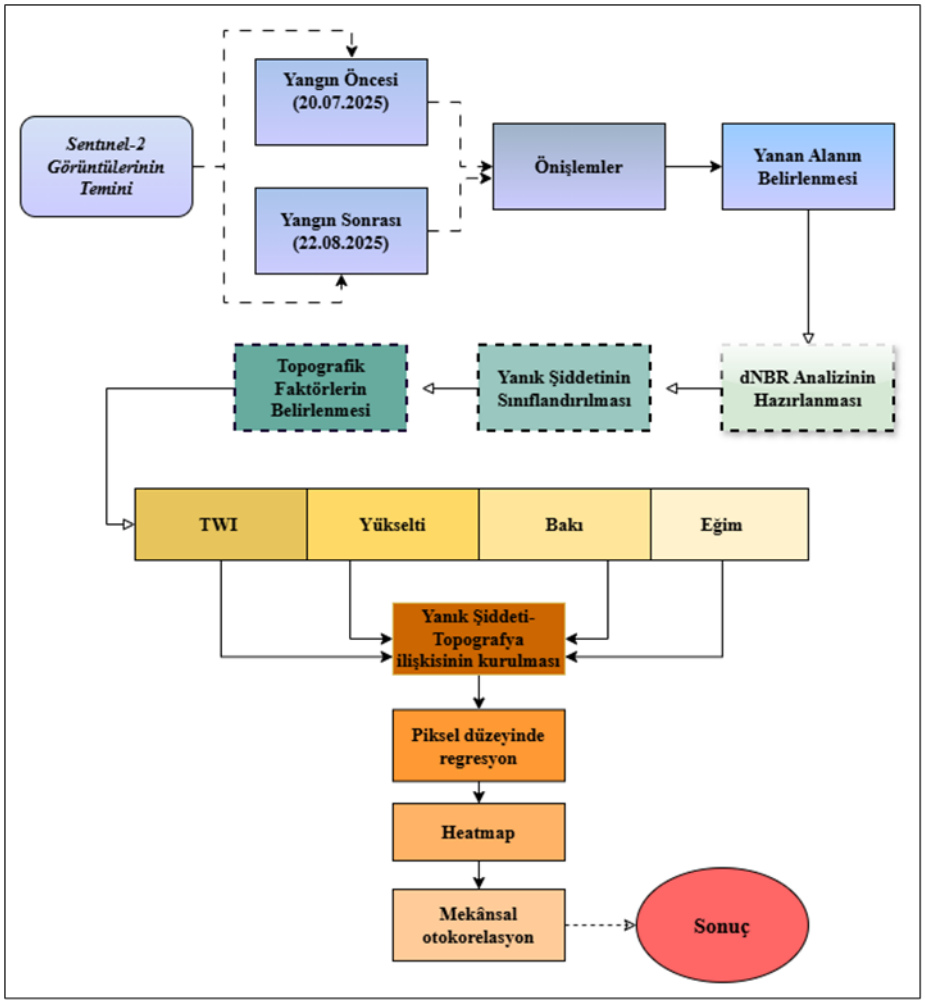


Şekil 2. Eğim, Bakı, Yükselti ve TWI Sınıfları Haritaları

Metot

Yangın sonrası vejetasyonda meydana gelen değişim ve topoğrafik faktörlerin yanma şiddetine olan etkisini ortaya koymak amacıyla çok aşamalı bir uzaktan algılama ve mekânsal analiz süreci uygulanmıştır. Analiz süreci; yanma şiddetini temsil eden uydu temelli indekslerin türetilmesi, topoğrafik parametrelerin elde edilmesi, bu verilerin piksel düzeyinde

istatistiksel analizlerin uygulanması ve ilişkilerin mekânsal otokorelasyon kapsamında değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Çalışmanın İş Akışı

Normalized Burn Ratio (dNBR) Hesaplanması

Yanan alan tespiti ve yanma şiddetinin belirlenmesinde en sık kullanılan indekslerden biri NBR (Normalized burn ratio) analizidir. Hesaplamada yakın kızılötesi (NIR) ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) bantları kullanılmaktadır (Key ve Benson, 2006).

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

dNBR aşağıdaki formülle hesap edilmiştir.

$$\mathrm{dNBR} = \mathrm{NBR}_{\mathrm{pre}} - \mathrm{NBR}_{\mathrm{post}} \quad (2)$$

dNBR, yangın öncesi ve yangın sonrası dönemlere ait NBR değerleri arasındaki spektral farkı temsil ederek yanma şiddetinin nicel değişimini göstermektedir.

Piksel Düzeyinde Regresyon Analizi

dNBR ile belirlenen topoğrafik değişkenler arasındaki ilişkiyi sayısal olarak ortaya koymak için piksel düzeyinde regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Tek değişkenli regresyon yaklaşımı kullanılarak her topoğrafik değişkenle dNBR analizi ayrı ayrı ilişkilendirilmiştir. Modelde, dNBR bağımlı değişken; topoğrafik değişkenlerden biri ise bağımsız parametre olarak ele alınmıştır. Modelin matematiksel yapısı aşağıdaki gibidir:

$$\mathrm{dNBR} = \beta 0 + \beta 1(\mathrm{X}) + \varepsilon \qquad (3)$$

Burada X, her regresyon döngüsünde eğim, bakı, yükselti veya TWI'den birini temsil etmektedir. Analizlerde kullanılan piksel tabanlı yaklaşım, her modelin yüz binlerce pikselden oluşan geniş bir veri setiyle kurulmasına olanak sağlamış ve elde edilen ilişki katsayılarının güvenilirliğini artırmıştır. Analizlerde regresyon sabiti (β0\beta_0β0), eğim katsayısı (β1\beta_1β1), korelasyon katsayısı (r), determinasyon katsayısı (R^2) ve p-değeri hesaplanmış; böylece ilişkinin yönü, gücü ve anlamlılık düzeyi test edilmiştir**.**

Isı Haritası (Heatmap) Tabanlı Veri Matrisi Oluşturulması

Isı haritaları, iki veri katmanı arasındaki ilişkiyi görselleştirmeye yarayan bir raster tabanlı analiz tekniğidir. Bu çalışma, ısı haritası, topoğrafik değişken sınıfları ile dNBR değerlerinin kesişiminden oluşan matris üzerindeki yoğunluk ve ortalama yanma dağılımını renk skalasıyla ifade ederek, ilişki desenlerinin kolay biçimde yorumlanmasını sağlamıştır. Raster formatındaki her veri katmanı aynı mekânsal çözünürlük, projeksiyon ve grid yapısına getirilmiş; böylece her piksel için değişken sınıfı eşzamanlı olarak atanabilir hâle getirilmiştir. Sınıflandırma sonrasında iki değişken eşleştirilerek kesişim kümeleri oluşturulmuş ve her sınıf kombinasyonundaki piksel değerleri grup bazında toplanmıştır. Bu piksel gruplarından elde edilen değerler ortalama alınarak matris yapısına aktarılmış; böylece her sınıf kesişimi için bağımlı değişkeni temsil eden tek bir sayı üretilmiştir. Hesaplama aşağıdaki formül üzerinden yürütülmüştür:

$$\mathrm{H_{i,j}} = \frac{1}{\mathrm{n_{i,j}}} \sum_{\mathrm{k}\in(\mathrm{i,j})} \mathrm{V_k} \qquad (4)$$

Burada $H_{i,j}$ ilgili heatmap hücresini, $n_{i,j}$ aynı sınıf kombinasyonundaki piksel sayısını, V_k ise bağımlı değişken değerini göstermektedir. Üretilen matris daha sonra görselleştirilerek ısı haritası formatına dönüştürülür. Böylece değişkenler arasındaki ilişkinin sınıfsal düzeyde yorumlanmasına olanak tanır. Bu yöntem çok boyutlu veri yapısını sadeleştirmekte, değişken etkileşimlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Bivariate Local Moran's I (Bivariate LISA) Analizi

Yangın şiddetinin topoğrafik faktörlerle mekânsal olarak nasıl etkileşim gösterdiğini değerlendirmek amacıyla, dNBR ile eğim, bakı, yükselti ve TWI arasında Bivariate Local Moran's I (LISA) analizi uygulanmıştır. Bivariate LISA, tek değişkenli Local Moran's I'nın genişletilmiş formu olup, bir pikseldeki değişken değerinin (X), komşu piksellerdeki farklı bir değişken ile (Y) birlikte mekânsal bağımlılık gösterme düzeyini nicel olarak ortaya koymaktadır (Luenam ve Puttanapong; 2020; Moran, 1950). Bu yöntem, yanma şiddetinin belirli topoğrafik koşullar altında mekânsal kümelenme eğilimini belirleme açısından güçlü

bir yaklaşım sunmaktadır. Bivariate LISA değeri, her piksel için aşağıdaki biçimde hesaplanmıştır:

$$I_i^{XY} = z_{X_i} \sum_{j=1}^{n} w_{ij} z_{Y_j} \quad (5)$$

Bu denklemde I_i^{XY} piksel *i* için Bivariate Local Moran's I değerini; Z_{Xi} değişken X'in (dNBR) çalışma alanı ortalamasına göre standartlaştırılmış z-skorunu; z_{Yj} ise komşu piksellerdeki değişken Y'nin (eğim, bakı, yükselti veya TWI) z-skorunu ifade etmektedir. W_{ij} *i* ve *j* pikselleri arasındaki mekânsal ağırlık değeridir. Mekânsal ağırlık matrisi W, satır standartlaştırılmış *queen contiguity* kriterine göre oluşturulmuş ve her pikselin temas ettiği tüm komşu pikseller eşit ağırlıkta değerlendirilmiştir. Standartlaştırma aşağıdaki formülle yapılmıştır:

$$z_{Xi} = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma_X} \quad , \quad z_{Yj} = \frac{Y_j - \bar{Y}}{\sigma_Y} \quad (6)$$

Elde edilen I_i^{XY} değerlerinin istatistiksel anlamlılığı permütasyonlu Monte Carlo testine tabii tutulmuş ve p-değerleri aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmış ve elde edilen p-değerine göre mekânsal kümelenme sınıflarına ayrılmıştır:

$$p_i = (k+1)(R_i+1) \quad (7)$$

Tablo 1. Mekansal Kümelenme Sınıfları

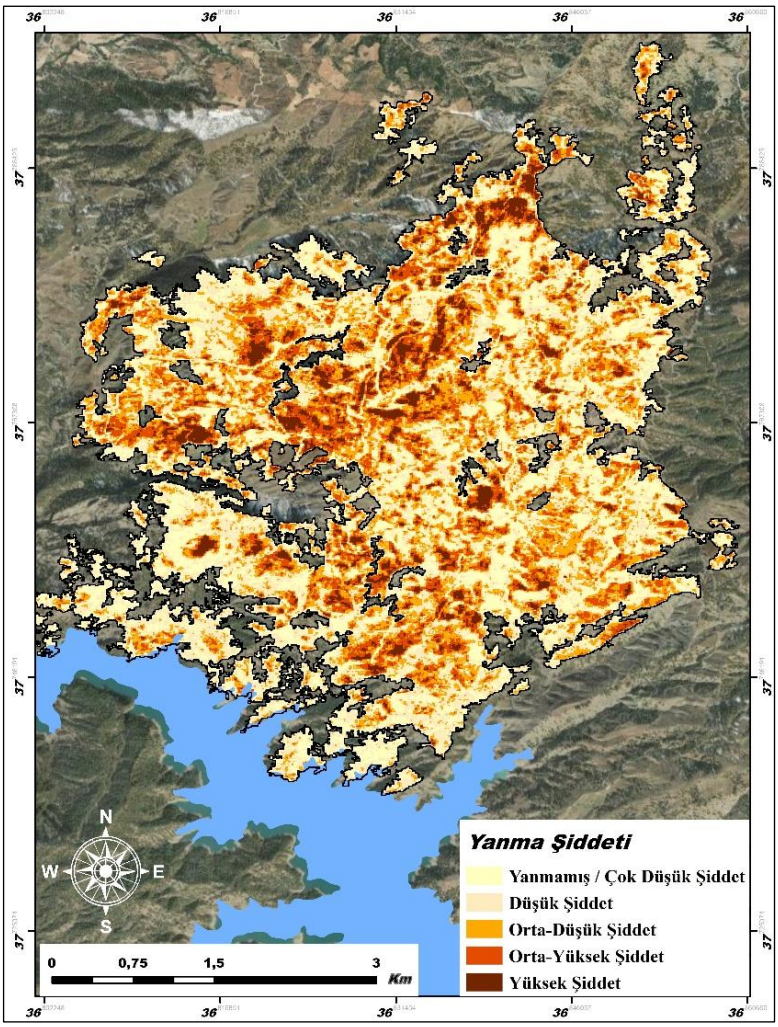
Kategori	***Yorum***
Yüksek dNBR-Yüksek topoğrafik faktör (High–High, HH)	Yangın etkisinin topoğrafya ile birlikte güçlendiği sıcak alanlar
Düşük dNBR- Düşük topoğrafik faktör (Low–Low, LL)	Düşük yanma şiddeti ile stabil kalan sahalar
Yüksek dNBR ancak düşük topoğrafik değer (High–Low ,HL)	Hassas, topoğrafik baskı altında olmayan fakat yüksek yanma gösteren alanlar
Düşük dNBR ve yüksek topoğrafik değer (Low–High, LH)	Yangının hafif seyrettiği ancak topoğrafik olarak baskın sahalar

BULGULAR

Yanan Alanın Belirlenmesi

Sentinel-2 uydu görüntülerinden türetilen dNBR (Farklandırılmış Normalize Yanma Oranı) analizi sonucunda, çalışma alanındaki yanmış bölgeler farklı yanma şiddeti sınıflarına ayrılmıştır. Toplam 1.581,66 hektarlık alan yangından etkilenmiş olup, bu alanın önemli bir bölümünün düşük ile orta düzeyde yanma şiddetinden etkilendiği belirlenmiştir. Alanın %25,60'ı (404.86 ha) yanmamış/çok düşük şiddetli katagoride olup doğal iyileşme potansiyeli yüksektir. En geniş kısmı oluşturan düşük şiddetli sınıf (%31.01; 490.51 ha), vejetasyonda sınırlı düzeyde kayıpları temsil ederken; orta-düşük şiddetli alanlar (%24.20; 382.74 ha) daha belirgin biyokütle azalmasına rağmen tamamen yıkıcı değildir. Orta-yüksek

şiddetli bölgeler (%14.06; 222.40 ha) tepe örtüsünde ciddi kayıplara yol açmış, yüksek şiddetli alanlar ise (%5.13; 81.15 ha) neredeyse tüm biyokütlenin yok olduğu ve restorasyon gereksiniminin en yüksek olduğu sahalardır (Şekil 4).

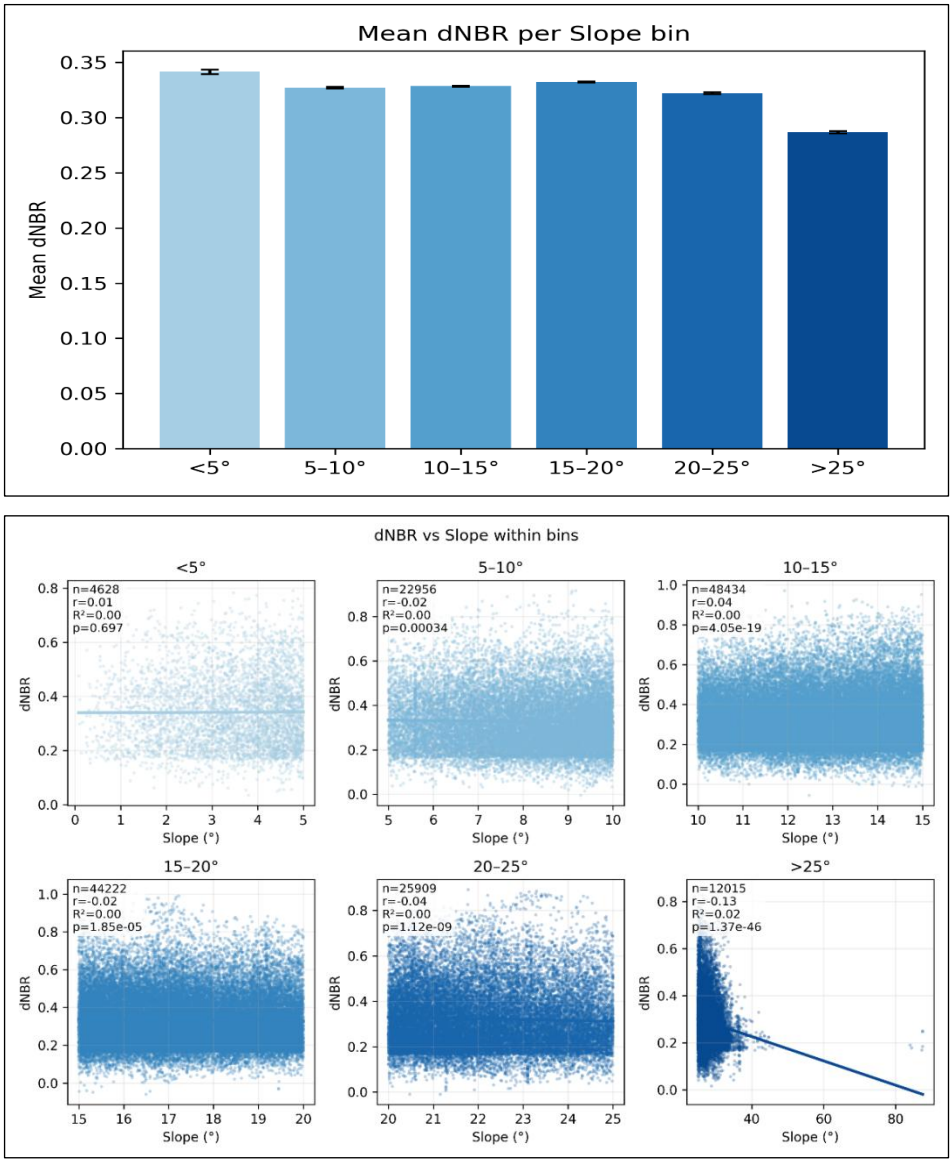


Şekil 4. Çalışma Alanının dNBR Haritası

Eğim ile dNBR İlişkisi

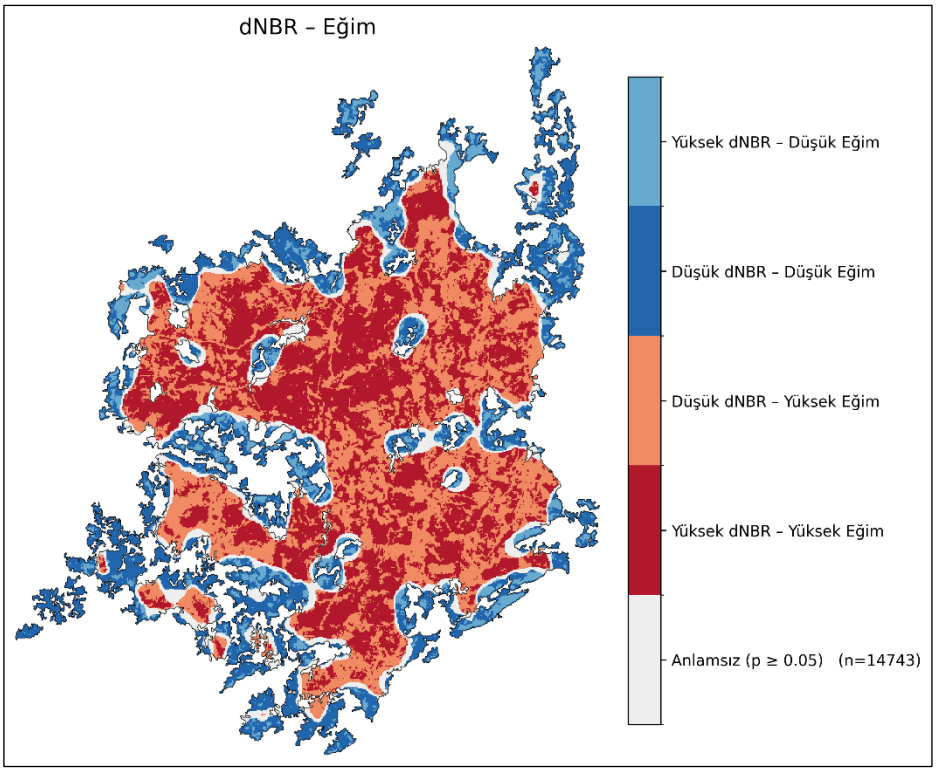
Eğim sınıflarına göre hesaplanan ortalama dNBR değerleri, düşük eğimli alanlarda (<5°) yangın şiddetinin görece yüksek olduğunu (ortalama dNBR= 0.34) ve eğim arttıkça dNBR değerlerinde kademeli bir azalma eğilimi ortaya çıktığını göstermektedir (Şekil 5). Bu azalma, özellikle 25° üzerindeki eğim sınıfında belirginleşmekte ve ortalama dNBR değerinin =0.29 seviyesine düştüğü gözlenmektedir. Bu durum, yangın şiddetinin düşük ve orta eğimlerde benzer düzeylerde seyrederken, yüksek eğimlerde belirgin biçimde azaldığını ortaya koymaktadır. (Şekil 5).

Şekil 5, dNBR ile eğim arasındaki ilişkinin eğim sınıflarına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Düşük ve orta eğim (<20°) ile yangın şiddeti arasında belirgin bir eğilim gözlenmezken, 25° üzerindeki eğimlerde ortalama dNBR değerlerinde bir azalma ortaya çıkmaktadır. Piksel düzeyindeki dağılımlar, bu eğim sınıfında negatif yönlü ilişkinin güçlendiğini ve yangın şiddetinin yüksek eğimli alanlarda sınırlanmaya başladığını göstermektedir.



Şekil 5. Eğim Sınıflarına Göre Ortalama dNBR Değerleri ve Piksel Düzeyinde dNBR–Eğim İlişkisi

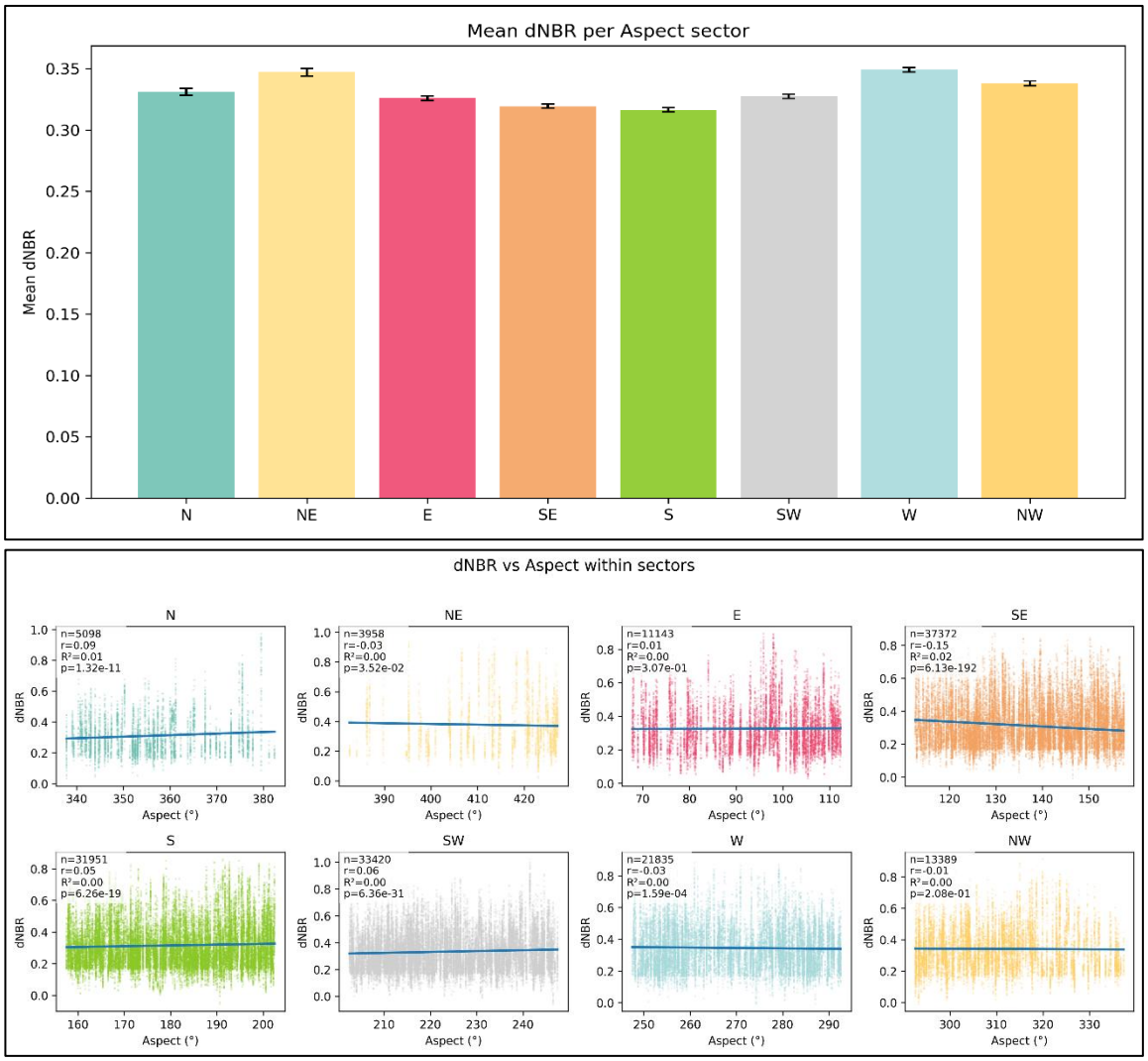
Bivariate LISA analizine dayalı mekânsal sonuçlar, dNBR ile eğim arasındaki ilişkinin alan genelinde homojen olmadığını ve belirgin bir eşik davranışı sergilediğini ortaya koymaktadır (Şekil 6). Özellikle yüksek eğim–yüksek dNBR sınıflarının çalışma alanının merkez kesimlerinde yoğunlaştığı, buna karşılık düşük dNBR değerlerinin büyük ölçüde alanın çevresinde ve daha yüksek eğimli bölgelerde kümelendiği görülmektedir. Bu mekânsal desen, yangın şiddetinin topoğrafya tarafından doğrusal olmayan bir biçimde kontrol edildiğini göstermektedir. Yüksek eğimli alanlarda yakıt sürekliliğinin bozulması, ince toprak gelişimi, daha seyrek ve parçalı bitki örtüsü yapısı ile birlikte, yangının yayılım kapasitesinin ve enerji salımının sınırlandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 6. dNBR İle Eğim Arasındaki Mekânsal İlişkinin Bivariate LISA Sınıflandırması

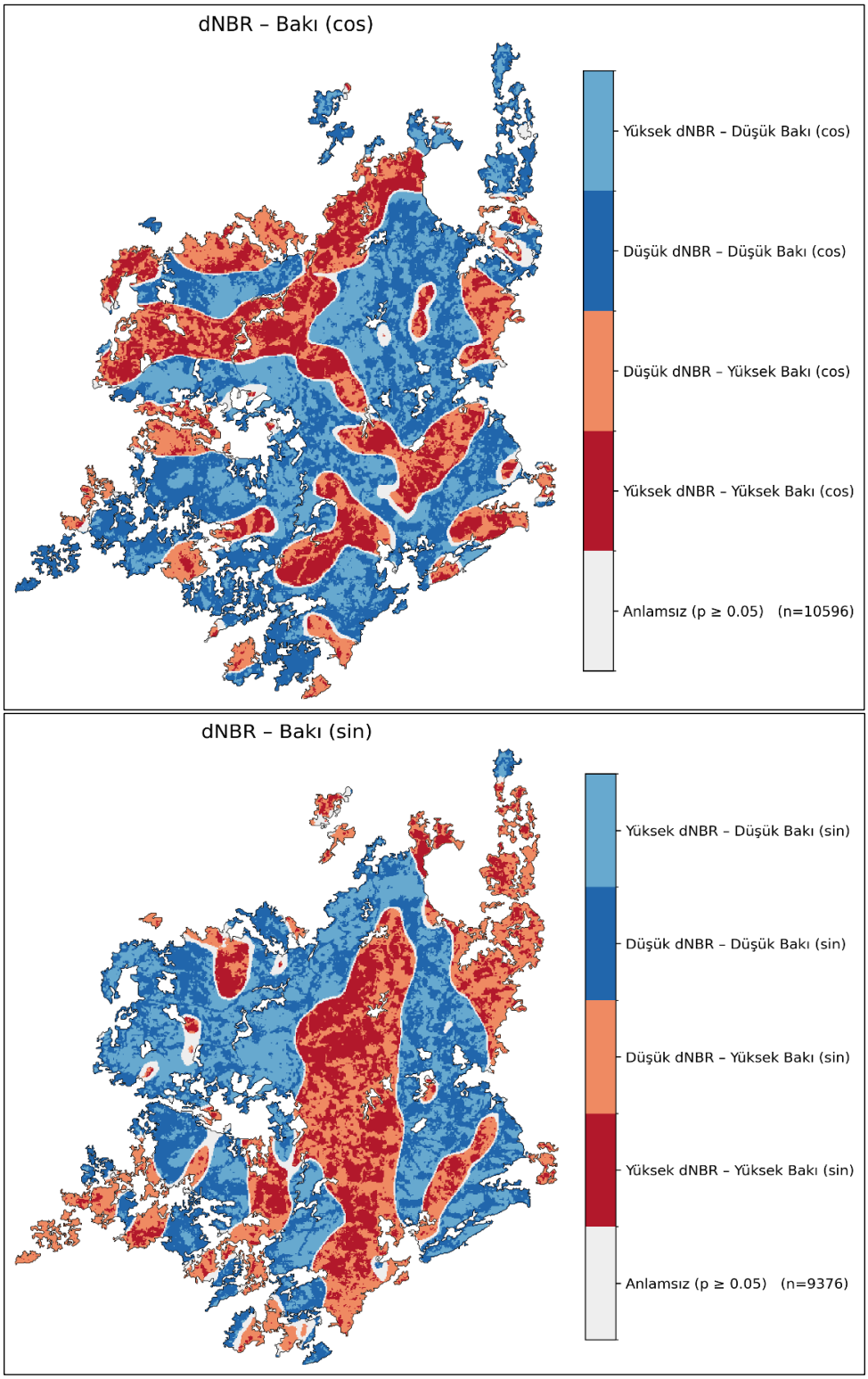
Bakı ile dNBR İlişkisi

Sekiz ana bakı sektörüne göre hesaplanan ortalama dNBR değerleri, yangın şiddetinin bakı yönlerine bağlı olarak belirgin biçimde farklılaştığını ortaya koymaktadır (Şekil 7). En yüksek ortalama dNBR değerleri Batı (W) ve Kuzeydoğu (NE) bakılarda gözlenirken, Güney (S) ve Güneydoğu (SE) bakılar daha düşük yangın şiddeti ile karakterize edilmektedir. Kuzey (N) ve Kuzeybatı (NW) bakılar ise orta–yüksek dNBR değerleri göstermektedir. Piksel tabanlı regresyon analizleri, dNBR ile bakı açısı arasındaki ilişkinin tüm bakı sektörlerinde zayıf olduğunu ortaya koymaktadır. (Şekil 7). Kuzey (N) bakılarda ilişki pozitif yönde ancak oldukça sınırlıdır ($r = 0.09$, $R^2 = 0.01$). Güneydoğu (SE) bakılarda ise negatif yönlü ilişki görece daha belirgin olmakla birlikte ($r = -0.15$, $R^2 = 0.02$), açıklanan varyans düşüktür ve yangın şiddetindeki azalma sınırlı kalmaktadır. Diğer bakı sektörlerinde (NE, E, S, SW, W ve NW) korelasyon katsayılarının sıfıra çok yakın olması, bakı açısının sektörler içinde yangın şiddeti üzerinde belirleyici bir kontrol oluşturmadığını ortaya koymaktadır. Sonuçlar bakı açısının yangın şiddetini tek başına açıklayan güçlü bir değişken olmadığını, gözlenen yönsel farklılaşmaların ise bakının dolaylı etkileri ve diğer çevresel faktörlerle ilişkili olduğunu düşündürmektedir.



Şekil 7. Bakı sınıflarına göre ortalama dNBR değerleri ve piksel düzeyinde dNBR–eğim ilişkisi

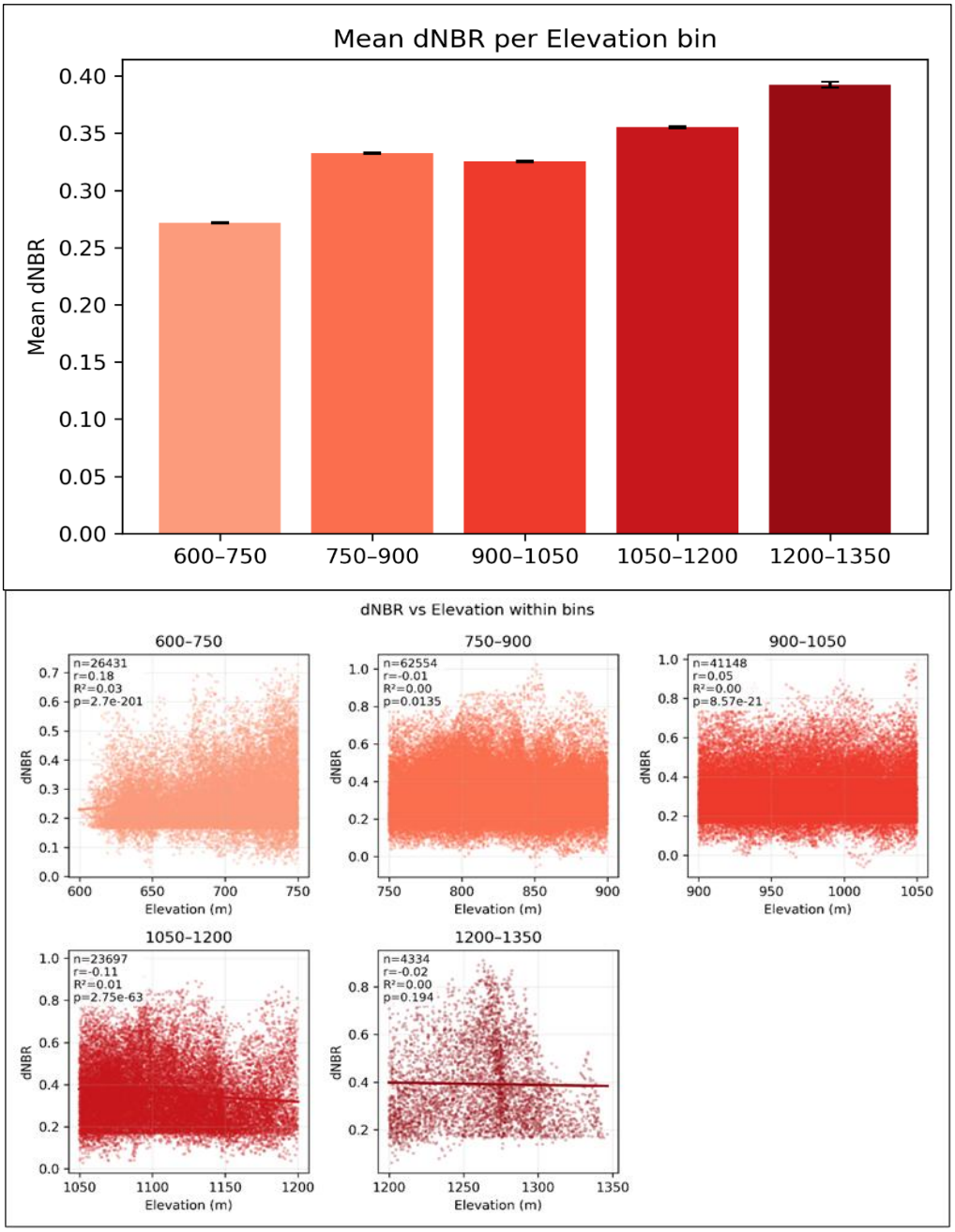
Mekânsal otokorelasyon haritaları, bakı değişkeninin (sin/cos dönüşümleri) dNBR ile ilişkisini yangın alanı içerisinde rastgele değil, belirgin mekânsal kümelenmeler şeklinde ortaya koymuştur (Şekil 8). dNBR–Bakı (cos) analizinde gözlenen geniş kırmızı ve mavi dikey şeritler, Kuzey–Güney yönelimli bakı farklılıklarının dNBR ile ilişkisini mekânsal olarak güçlü bir biçimde kümelendirdiğini göstermektedir. dNBR–Bakı (sin) sonuçlarında korelasyonlar daha düşük olsa da, Doğu–Batı yönlü bakı değişkenliğinin alansal olarak tutarlı bir dağılım sergilediği görülmüştür. Genel olarak, bakı değişkeni yangın şiddetini tek başına güçlü biçimde açıklamamakla birlikte, nem/kuruluk gradyanını (özellikle Kuzey–Güney farklılığı) etkileyerek dNBR üzerinde zayıf fakat anlamlı bir değişime neden olmaktadır. Bununla birlikte bakı, yükselti, eğim ve topoğrafik nemlilik (TWI) ile birlikte değerlendirildiğinde yangın şiddetinin mekânsal örüntülerini belirleyen karmaşık etkileşimlerin bir parçası hâline gelmektedir.



Şekil 8. dNBR İle Bakı Arasındaki Mekânsal İlişkinin Bivariate LISA Sınıflandırması

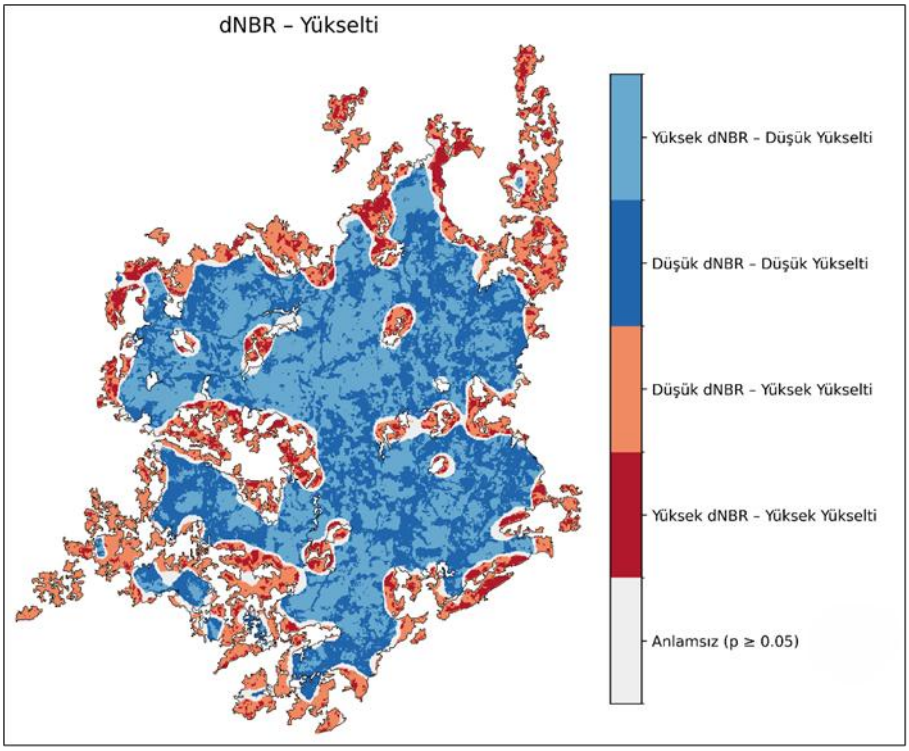
Yükselti ile dNBR İlişkisi

Yükselti sınıflarına göre ortalama dNBR değerlerini gösteren grafik, yükselti arttıkça yangın şiddetinin (dNBR) kademeli ve belirgin bir artış sergilediğini ortaya koymaktadır (Şekil 9). Bu, yükseltinin yangın şiddeti üzerinde pozitif bir kontrol faktörü olduğunu kanıtlamaktadır. Yangın şiddeti en alt yükselti kuşağında minimumdur. 600–750 m'de (0.27) en düşük şiddet görülür. Bu değer, 750–1050 m aralığında 0.33 düzeyine çıkmaktadır. 1050–1200 m'de ise (0.36) yangın şiddetinde belirgin bir artış izlenirken, en yüksek seviyesine 1200–1350 m (0.39) aralığında ulaşmaktadır. Söz konusu sonuçlar ise yükseltinin yangın şiddeti için önemli bir belirleyici olduğunu kanıtlar.



Şekil 9. Yükselti sınıflarına göre ortalama dNBR değerleri ve piksel düzeyinde dNBR–eğim ilişkisi

Şekil 10'deki mekânsal otokorelasyon haritası incelendiğinde, yangın şiddetinin topoğrafik koşullara bağlı olarak belirgin bir mekânsal farklılık sergilediği görülür. Çalışma alanının büyük bölümünde düşük dNBR–düşük yükselti sınıfının hâkim olması, bu sahalarda yangının görece daha düşük şiddette etkili olduğunu vurgulamaktadır. Bu durum vejetasyon örtüsünün önemli ölçüde korunmuş olması, yangın sonrası doğal iyileşme süreçlerinin daha hızlı gerçekleşebileceğine işaret etmektedir. Buna karşılık, yüksek dNBR–yüksek yükselti ile tanımlanan bölgelerin çoğunlukla alanın çevresinde ve daha yüksek topoğrafik konumlarda yoğunlaştığı ortaya çıkmaktadır. Bu desen, yüksek rakımlarda artan kuruluk ve güçlenen hava akımlarının yarattığı mikroklimatik koşulların yangın şiddetini artırabileceğine işaret etmektedir. Düşük dNBR–yüksek yükselti sınıfının özellikle orta-yüksek topoğrafik zonlarda dağınık şekilde görülmesi, yangının bu alanlarda her zaman yüksek şiddetle ilerlemediğini ve yerel topoğrafya–yakıt yükü etkileşiminin yangın davranışını karmaşıklaştırdığını göstermektedir. Benzer biçimde yüksek dNBR–düşük yükselti sınıfının sınırlı bir alanda gözlenmesi, yoğun yakıt birikimi ya da lokal rüzgâr güzergahları gibi faktörlerle açıklanabilir. Genel olarak, mekânsal dağılım, yükseltinin yangın şiddeti üzerinde belirleyici ancak tek başına yeterli bir faktör olmadığını, yangının özellikle yüksek sahalarda daha şiddetli seyrettiğini ve bu alanların restorasyon planlamasında öncelikli değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

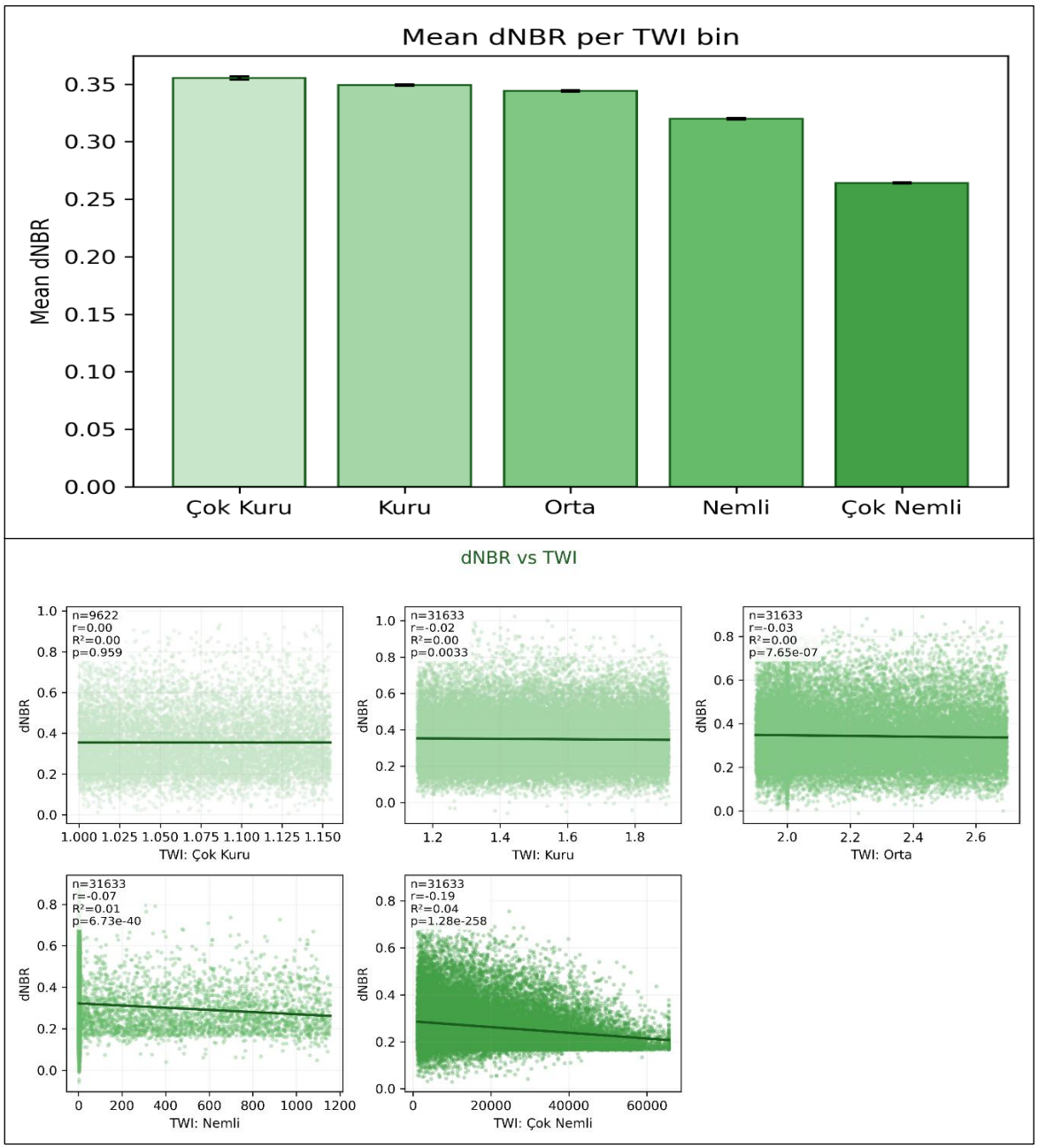


Şekil 10. dNBR İle Yükselti Arasındaki Mekânsal İlişkinin Bivariate LISA Sınıflandırması

TWI ile dNBR İlişkisi

Topoğrafik Nem İndeksi (TWI) ile dNBR arasındaki ilişkileri ve bu ilişkinin diğer topoğrafik faktörlerle (bakı, yükselti ve eğim) birlikte nasıl değiştiğini inceleyen şekiller, yangın şiddetinin yalnızca TWI tarafından belirlenmediğini; bunun yerine topoğrafik özelliklerin tümünün birlikte etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 11'deki grafik, TWI değerleri arttıkça (yani topoğrafik nemliliğin yükselmesiyle) dNBR değerlerinde belirgin bir azalma

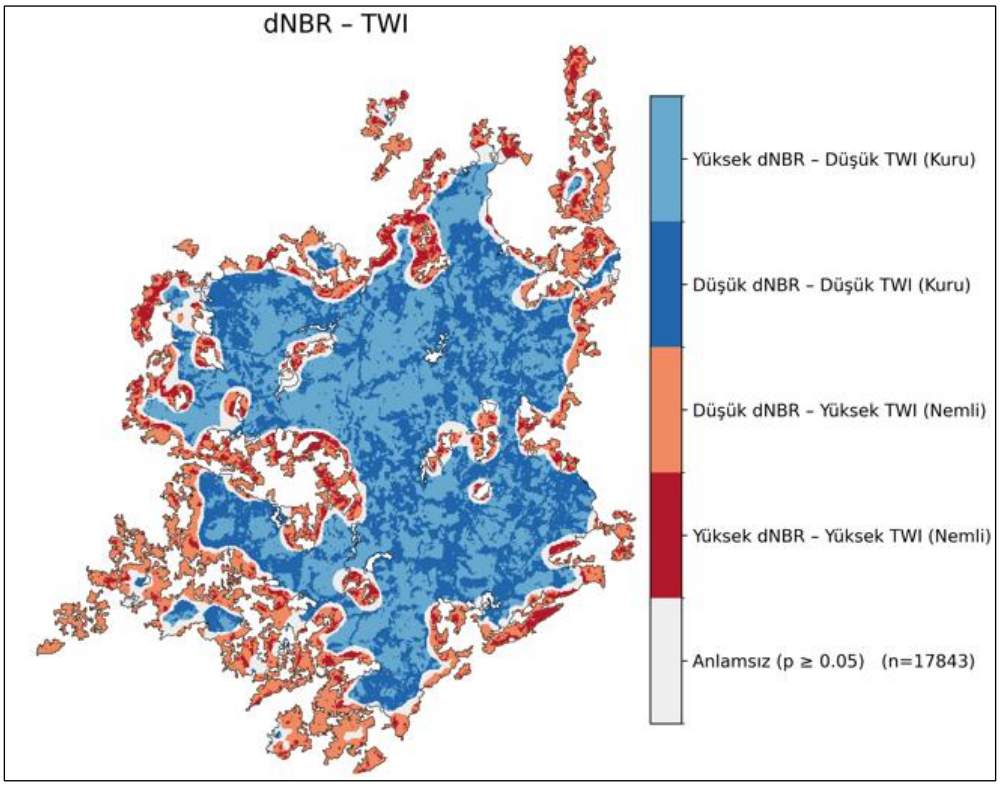
eğilimi olduğunu göstermektedir. Çok kuru bölgeler yüksek dNBR değerinin 0.35'a çıkması, bu bölgelerin yangınlardan daha yüksek şiddetle etkilendiğine işaret etmektedir. Buna karşılık, en nemli TWI sınıflarında ortalama dNBR'nin 0.26'ya kadar düşmesi, yüksek nem içeriğine sahip alanların yanma şiddetine karşı daha dirençli olduğunu veya yangının bu alanlarda daha düşük şiddetle gerçekleştiğini göstermektedir. İlişki grafiklerinde ise TWI'nin dNBR üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Farklı TWI aralıklarında (özellikle 1.00–1.15, 1.20–1.80 ve 2.00–2.60) korelasyon katsayısının sıfıra yakın olması (r =0), TWI'nin piksel düzeyinde dNBR değişimini tek başına açıklamada zayıf kaldığını göstermektedir. TWI'nin çok geniş değer aralıklarında (500–12 000 ve 12 000–60 000) dahi korelasyon katsayısının düşük olması, bu zayıf ilişkinin ölçek genişlediğinde bile anlamlı derecede güçlenmediğini ortaya koymaktadır. (Şekil 11).



Şekil 11. TWI Sınıflarına Göre Ortalama dNBR Değerleri ve Piksel Düzeyinde dNBR–Eğim İlişkisi

Otokorelasyon haritası, dNBR ile TWI arasındaki mekânsal ilişkilerin nasıl kümelendiğini ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Şekilde görüldüğü üzere, özellikle düşük TWI değerlerine sahip kuru alanlarda iki farklı durum görülmektedir. Yüksek dNBR–Düşük TWI kombinasyonunu temsil eden açık mavi tonlar, kuru koşullarda yüksek yanma şiddetinin hâkim olduğunu ve bu durumun ekolojik olarak beklenen bir örüntüyle uyumlu hale geldiğini göstermektedir. Buna karşılık düşük dNBR–düşük TWI ile tanımlanan koyu mavi bölgelerde, kuru olmasına rağmen sınırlı yanma şiddeti gözlenmektedir. Bu alanlarda düşük şiddetin, yakıt miktarının azlığı, topoğrafik olarak korunaklı mikrohabitatlar veya olay sırasında hızlı müdahale gibi ek çevresel ve operasyonel faktörlerle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Haritada en geniş yayılım gösteren sınıfın bu kategori olması, kuru sahaların yangına verdiği yanıtın mekânsal olarak oldukça heterojen olduğunu göstermektedir.

Nemli bölgelerde ise benzer şekilde iki temel örüntü ortaya çıkmaktadır. Düşük dNBR–yüksek TWI kombinasyonunu temsil eden açık kırmızı tonlar, yüksek nemlilik nedeniyle yangın şiddetinin düşük kaldığını göstermektedir. Bu alanlar, nem içeriği yüksek toprak ve bitki örtüsünün yangına karşı doğal direnç oluşturduğu sahaları temsil etmektedir. Öte yandan yüksek dNBR–yüksek TWI ile gösterilen koyu kırmızı bölgeler, nemli koşullara rağmen yüksek yanma şiddetinin gözlendiği sahalardır. Bu durum, yangının nem bariyerini aşacak düzeyde yoğunlaştığını veya geniş ölçekli, yüksek şiddetli yangınlarda nemli mikrohabitatların dahi kuruyarak yanmaya duyarlı hâle geldiğini düşündürmektedir. Söz konusu alanların genellikle yangın sınırlarında veya nemli ve kuru zonların temas noktalarında yoğunlaşması, topoğrafik geçiş bölgelerinin yangın davranışını belirlemede kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır (Şekil 12).



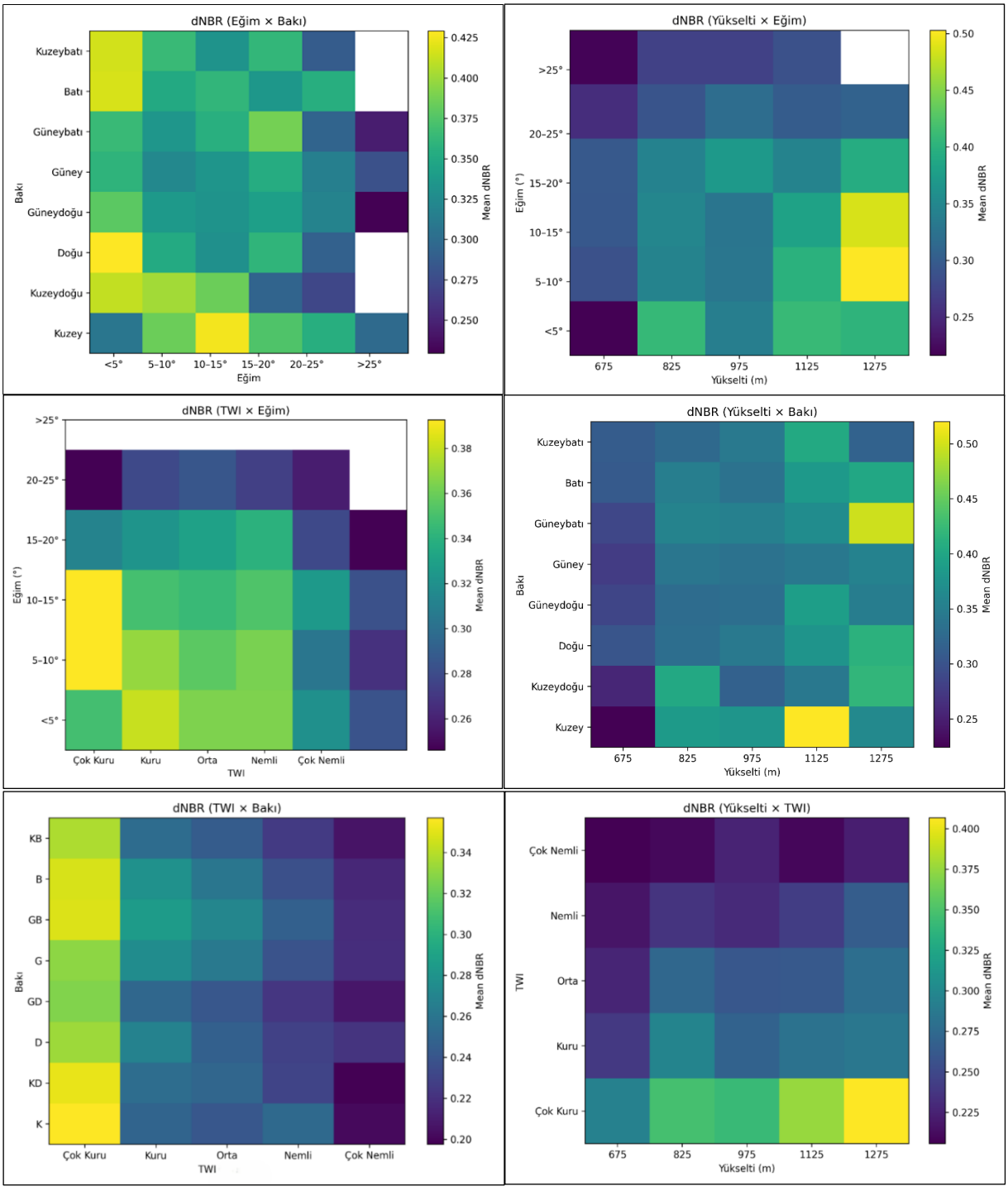
Şekil 12. dNBR İle TWI Arasındaki Mekânsal İlişkinin Bivariate LISA Sınıflandırması

Topoğrafik Değişkenlerin Yangın Şiddeti Üzerindeki Birleşik Etkileri: Isı Haritaları

Yangın şiddetinin topoğrafik koşullarla ilişkisini değerlendirmek amacıyla oluşturulan ısı haritaları, farklı topoğrafik bileşenler arasındaki etkileşimlerin dNBR'nin mekânsal dağılımı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Isı haritalarına dayalı analizler, yangın şiddetinin mekânsal dağılımının farklı topoğrafik gradyanlar boyunca belirgin biçimde farklılaştığını göstermektedir. Oluşturulan ısı haritaları ışığında eğim-yükselti ilişkisine bakıldığında, Orta eğimli (5–15°) ve yüksek rakımlı alanlarda (>1200 m) ortalama dNBR değerlerinin 0.45–0.50 aralığında yoğunlaşması, bu koşullarda yangın şiddetinin arttığını göstermektedir. Buna karşılık, düşük yükselti–yüksek eğim kombinasyonlarında dNBR değerlerinde belirgin bir azalma gözlenmiş; bu durum, eğimin artmasıyla birlikte yangın ilerleyişinin topoğrafik kısıtlar tarafından sınırlandığını düşündürmektedir. Yükselti–bakı matrisi ise, yangın şiddetinin özellikle orta ve yüksek rakımlarda bakı yönüne duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Güney ve güneydoğu yönelimli yamaçlarda yükselti arttıkça dNBR değerlerinin belirgin biçimde yükselmesi, bu alanların daha yüksek radyasyon yükü ve nispeten düşük nemlenme koşulları nedeniyle yangına daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, kuzey sektörlerinde düşük dNBR değerlerinin baskın olması, mikroklimatik nemlilik ve gölgelenmenin yangın şiddetini sınırlayıcı bir rol oynadığını işaret etmektedir. Alçak rakımlı alanlarda ise bakının etkisi zayıflamakta ve genel olarak daha düşük yanma şiddetleri gözlenmektedir.

Eğim–bakı etkileşimi, eğimin yangın şiddetini düzenleyen önemli bir topoğrafik değişken olduğunu doğrulamaktadır. Düşük eğimli alanlarda (<5°), bakıdan bağımsız olarak daha yüksek dNBR değerlerinin ortaya çıkması, bu alanlarda yakıt birikimi ve sürekliliğinin yangın şiddetini artırıcı bir rol oynadığını göstermektedir. Buna karşılık, eğimin arttığı alanlarda (>25°) dNBR değerlerinde genel bir azalma eğilimi gözlenmiş, bu durum dik yamaçlarda yangın davranışının topoğrafik faktörler tarafından baskılandığını düşündürmüştür.

Toprak nemliliğini temsil eden TWI analizlerinde, yangın şiddetinin mekânsal dağılımının nemlilik koşullarına duyarlı olduğu belirlenmiştir. Çok kuru ve kuru TWI sınıflarında, bakı yönünden bağımsız olarak dNBR değerlerinin yüksek olması, düşük nem içeriğinin yangın şiddetini artıran baskın bir faktör olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, nemli ve çok nemli sınıflarda dNBR değerlerinin belirgin biçimde düşmesi, toprak ve vejetasyon neminin yanma süreçlerini sınırlandırdığını ortaya koymaktadır. Orta ve kuru TWI sınıflarında ise bakı etkisinin yeniden belirginleştiği; özellikle güney ve güneydoğu bakılarda daha yüksek dNBR değerlerinin gözlendiği belirlenmiştir. Yükselti–TWI etkileşimi, yangın şiddetinin hidro-topoğrafik koşullarla güçlü biçimde ilişkili olduğunu teyit etmektedir. En yüksek dNBR değerleri, özellikle kuru zemin koşullarında yükselti arttıkça ortaya çıkmaktadır. Buna karşın, yüksek TWI değerlerine sahip nemli alanlarda yangın şiddetinin yükseltiden bağımsız olarak düşük seviyelerde kalması, nemlilik koşullarının yangın davranışını baskılayan temel bir faktör olduğunu göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, elde edilen bulgular yangın şiddetinin tekil bir topoğrafik değişkenle açıklanamayacağını; yükselti, eğim, bakı ve nemlilik koşullarının birlikte değerlendirilmesinin yangın davranışını ve mekânsal şiddet desenlerini anlamada kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 13).



Şekil 13. Yangın Şiddetinin (dNBR) Topoğrafik Değişkenlerle İlişkisini Gösteren Isı Haritaları.

TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, 26 Temmuz 2025 yılında Kahramanmaraş'ta meydana gelen orman yangınının şiddeti nicel olarak belirlenmiş ve yangın şiddeti ile çevresel parametreler arasındaki ilişkiler mekânsal analizler yoluyla incelenmiştir. Elde edilen bulgular, yangın şiddetinin topoğrafik

faktörlerle ilişkili olduğunu ve yangının mekânsal dağılımı ile karakterinin topoğrafik koşullardan etkilendiğini ortaya koymaktadır. Topoğrafik değişkenlerin yangın şiddeti üzerindeki göreli etkileri, benzer ekosistemlerde gerçekleştirilen önceki çalışmalarla büyük ölçüde örtüşmekte olup, sonuçların literatürle tutarlı olduğunu göstermektedir (Karabulut vd., 2013; Duran, 2014; Tavşanoğlu, 2017; Özenen Kavlak vd., 2020; Geçen ve Topuz, 2021).

Yapılan analizler, yangın şiddeti (dNBR) üzerindeki topoğrafik kontrolün çok boyutlu ve etkileşimli olduğunu göstermiştir. dNBR'nin dağılımı, tek bir değişken yerine birden fazla topoğrafik faktörün karmaşık kombinasyonu ile belirlenmektedir. Yangın şiddeti, düşük eğimli alanlarda en yüksek seviyededir. Eğim arttıkça, dNBR belirgin şekilde düşer. Bu durum, düz veya hafif eğimli alanlarda yakıt birikimi ve yangın ilerlemesinin kolaylaştığını, yüksek eğimlerde ise topoğrafik faktörlerin yanmayı sınırlandırdığını göstermektedir. Bu durum daha önce yapılan çalışmalar ile de topografik faktörlerden eğimin, yangın şiddetine etkisinin eğim derecelerine göre kademelenmesi bağlamında tam uyum sağlamaktadır (Karabulut vd., 2013; Geçen ve Topuz, 2021). Söz konusu örüntü, yüksek rakımlı alanlarda gözlenen ağaç türlerinin kompozisyonu ile bu türlerin yangın rejimlerine karşı geliştirdiği ekolojik uyum mekanizmalarının bir sonucudur (Tavşanoğlu, 2017).

Yükselti ile dNBR arasında belirgin ve pozitif bir ilişki vardır. Ortalama dNBR değerleri en alt kuşakta (600–750 m) minimum iken, en üst kuşakta (1200–1350 m) maksimuma ulaşır. Bu, rakımı yüksek bölgelerde yangının daha büyük tahribata yol açtığını ve bu durumun muhtemelen, zorlu müdahale koşulları ve mikroklimatik etkenlerle ilişkili olduğunu akla getirmektedir. Bakı açısının kendi sektörleri içinde dNBR üzerindeki açıklayıcı gücü çok zayıftır. En anlamlı ilişkiler, nem ve kuruluk koşullarının uçta olduğu Kuzey (negatif korelasyon, daha az şiddet) ve Güney (pozitif korelasyon, daha fazla şiddet) bakılarında gözlemlenmiştir. Ancak, genel ortalamada en düşük şiddetin Güney bakılarında görülmesi, yerel yakıt yükü ve müdahale faktörlerinin bakının kuruluk etkisini gölgelemiş olabileceğini gösteren bir bulgudur. Bu sonuç, kuzey bakılarında daha yüksek nemlilik ve gölgelenme koşullarının yangın şiddetini sınırladığı yönündeki literatür bilgisiyle uyumludur (Karabulut vd., 2013; Yılmaz vd., 2021). Topoğrafik Islaklık İndeksi (TWI), yangın şiddetini kontrol eden en güçlü kısıtlayıcı faktördür. Çok Kuru TWI sınıfları en yüksek ortalama dNBR değerine sahipken, Çok Nemli TWI sınıfları en düşük değere sahiptir. TWI'nin dNBR'yi tek başına piksel düzeyinde açıklama gücü zayıftır ancak kategorik ortalamadaki düşüş, TWI'nın yangın şiddetinin üst sınırını belirlemede kritik olduğunu gösterir.

En yüksek yangın şiddeti, tek bir topoğrafik faktörün uç değerlerinde değil, faktörlerin risk artırıcı kombinasyonlarında ortaya çıkmıştır. Yüksek Rakımlı ve Düşük/Orta Eğimli alanlar, en yüksek şiddet düzeylerini göstermektedir. Çok Nemli TWI koşullarında bile, yüksek eğimin yangın şiddetini dramatik şekilde artırabildiği görülmüştür. Bu, eğimin ilerleme hızını artırıcı etkisinin nem bariyerini aşabildiğini kanıtlar. Zemin çok kuru olduğunda, bakı türünden bağımsız olarak dNBR en yüksek seviyededir. Bu, yakıt neminin (TWI), yangın şiddetini kontrol etmede bakıdan daha baskın olduğunu gösterir.

Elde edilen sonuçlar, orman yangınlarıyla mücadele ve yangın sonrası iyileştirme çalışmalarının daha etkili yürütülebilmesi için topoğrafik faktörlerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Yangın riskinin belirlenmesinde, yükselti, eğim ve TWI gibi parametrelerin tek tek ele alınması yerine, bu faktörlerin etkileşimini temel alan çok değişkenli yaklaşımlar kullanılmalıdır. Bu sayede, yangının yüksek şiddetle gerçekleşme olasılığı bulunan alanlar daha doğru biçimde tanımlanabilir ve önleyici müdahaleler özellikle

yakıt birikiminin fazla olduğu düşük eğimli ve yüksek rakımlı bölgelerde yoğunlaştırılabilir. Ayrıca, eğimin yüksek olduğu ve nemli koşullara sahip alanlarda dahi yangın şiddetinin artabildiği dikkate alınarak, bu alanlarda yangının yayılımını sınırlayıcı önlemler planlanmalıdır. Yangın sonrası restorasyon çalışmalarında ise topoğrafik farklılıklar göz önünde bulundurulmalı; daha şiddetli yanan alanlarda aktif iyileştirme uygulamalarına öncelik verilirken, daha düşük şiddetle etkilenen alanların doğal iyileşme süreci izlenmelidir.

YAZAR KATKILARI

Hüsna Kazı: Çalışmanın tasarımı, verilerin elde edilmesi ve analizi, makale yazımı. **Murat Karabulut:** Makale kontrolleri, verilerin değerlendirilmesi, makale yazımına katkı sağlama. **Muhammet Topuz:** Verilerin değerlendirilmesi, makale yazımı.

FİNANSAL DESTEK BEYANI

Çalışma için herhangi bir maddi destek alınmamıştır.

ÇIKAR ÇATISMASI

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır

ETİK KURUL ONAYI

Bu çalışma için etik kurul onayı gerekmemektedir.

KAYNAKLAR

Alkayış, M. H., Karslıoğlu, A., & Onur, M. İ. (2022). Muğla ili Menteşe yöresi orman yangını risk potansiyeli haritasının coğrafi bilgi sistemleri ile belirlenmesi. Geomatik, 7(1), 10-16.

Avcu, A., & Karabulut, M. (2019). Başkonuş Dağında (Kahramanmaraş) bitki örtüsü dağılışının ekolojik şartlarının CBS kullanılarak incelenmesi. İstanbul Uluslararası Coğrafya Kongresi. İstanbul, Türkiye, 19-31.

Bıçakcı, C., & Yıldız, S. S. (2024). Google Earth Engine ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanarak Orman Yangını Şiddetinin Belirlenmesinde Farklı İndekslerin Karşılaştırılması: 2023 Hatay-Belen Yangını Örneği. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *7*(2), 708-719.

Bingöl, B. (2017). Determination of Forest Fire Risk Areas in Burdur Province Using Geographical Information Systems. Turkish Journal of Forest Science, 1(2), 169-182. https://doi.org/10.32328/turkjforsci.319155

Cosun, F., & Karabulut, M. (2009). Kahramanmaraş'ta ortalama, minimum ve maksimum sıcaklıkların trend analizi. Türk Coğrafya Dergisi, (53), 41-50.

Çetin, M. (2025). Orman yangını yönetiminde Google Earth Engine (GEE) ve Python Engine (PE) ile yakıt yükü analizi: Karşılaşılan güçlükler ve sağlanan avantajlar. *Journal of Anatolian Geography*, *2*(1), 63-81.

Davis, P.H. (ed.), (1970). Flora of Turkey and East the Aegean Islands. In H. Demiriz (Eds.), Vol. 3. Edinburgh, Edinburg University Press, 512-518.

Dillon, G. K., Holden, Z. A., Morgan, P., Crimmins, M. A., Heyerdahl, E. K., & Luce, C. H. (2011). Both topography and climate affected forest and woodland burn severity in two regions of the western US, 1984 to 2006. Ecosphere, 2(12), 1-33.

Doygun, H., Kısakürek, S., Erdoğan, N., & Hatipoğlu, I. H. (2014). Kahramanmaraş–Ahir Dağı bitki örtüsü değişiminin uzaktan algılama yöntemi ile incelenmesi, II. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu, Isparta, Turkey, 22-24.

Duran, C. (2014). Mersin ilindeki orman yangınlarının başlangıç noktalarına göre mekânsal analizi (2001-2013). Ormancılık Araştırma Dergisi, 1(1 A), 38-49.

Eker, Ö., & Abdurrahmanoğlu, D. M. (2018). Orman Yangınlarıyla Mücadele Harcamalarının Analizi: Kahramanmaraş Orman Bölge Müdürlüğü Örneği. *Turkish Journal of Forest Science*, *2*(1), 34-48.

Esen, F., & Avcı, V. (2020). Berit Dağları'nda (Kahramanmaraş) Litolojik ve Jeomorfolojik Faktörlerin Bitki Örtüsünün Dağılışına Etkisi. Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 19(3), 664-685. https://doi.org/10.21547/jss.570568

Estes, B. L., Knapp, E. E., Skinner, C. N., Miller, J. D., & Preisler, H. K. (2017). Factors influencing fire severity under moderate burning conditions in the Klamath Mountains, northern California, USA. Ecosphere, 8(5), e01794.

Fernandes, P. M. (2012). Fire-smart management of forest landscapes in the Mediterranean basin under global change. Landscape and Urban Planning, 110, 175–182. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.10.014.

Geçen, R., & Topuz, M. (2021). Hatay'da 2013-2021 Yılları Arasında Meydana Gelen Orman Yangınlarının Uydu Görüntülerinden Tespiti ve Değerlendirilmesi. Turkish Studies-Social Sciences, 16(6).

Gibson, R., Danaher, T., Hehir, W., & Collins, L. (2020). A remote sensing approach to mapping fire severity in south-eastern Australia using sentinel 2 and random forest. *Remote sensing of environment*, *240*, 111702.

Guria, R., Mishra, M., da Silva, R. M., Mishra, M., & Santos, C. A. G. (2024). Predicting forest fire probability in Similipal Biosphere Reserve (India) using Sentinel-2 MSI data and machine learning. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *36*, 101311.

Gündoğan, R., Yüksel, A., Akay, A. E., Bozali, N., & Doğan, O. (2008). Arazi Kullanım Planlamasının Erozyon Kontrol Çalışmalarındaki Önemi: Kartalkya Baraj Havzası Örneği. Baraj Havzalarında Ormancılık I. Ulusal Sempozyumu, 29-30.

Harris, L., & Taylor, A. H. (2019). Previous burns and topography limit and reinforce fire severity in a large wildfire. Ecosphere 8: e02019.

Karabulut, M., Karakoç, A., Gürbüz, M., & Kızılelma, Y. (2013). Coğrafi bilgi sistemleri kullanarak Başkonuş dağında (Kahramanmaraş) orman yangını risk alanlarının belirlenmesi. Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, 6(24), 171-179.

Karadaş, G., & Altınkaya, F. (2025). Orman yangını sonrası peyzaj bozulmalarının mekânsal analizi ve restorasyon stratejilerinin geliştirilmesi: Bursa Orhaneli-Harmancık örneği. *Turkish Journal of Forest Science*, *9*(2), 490-504.

Kaynak, T. (2025). Uzaktan Algılama ve CBS Kullanılarak Orman Yangınlarının Etkilerinin Analizi: Taşköprü 2020 Orman Yangını Örneği. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi*, *6*(2), 168-180.

Liu, H., Shu, L., Liu, X., Cheng, P., Wang, M., & Huang, Y. (2025). Advancements in Artificial Intelligence Applications for Forest Fire Prediction. Forests, 16(4), 704.

Luenam, A., & Puttanapong, N. (2020). Modelling and analyzing spatial clusters of leptospirosis based on satellite-generated measurements of environmental factors in Thailand during 2013-2015. *Geospatial Health*, *15*(2).

Mitsopoulos, I., Chrysafi, I., Bountis, D., & Mallinis, G. (2019). Assessment of factors driving high fire severity potential and classification in a Mediterranean pine ecosystem. Journal of Environmental Management, 235, 266-275.

Moran PAP, (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. Biometrika 37:17–23.

Neyişçi, T. (1986). Antalya Doyran yöresi kızılçam (Pinus brutia Ten.) ormanlarından yangınların tarihsel etkileri. Ormancılık Araştırma Enstitüsü Yayınları, Teknik Rapor, 29, 67-91.

Ocak, F., Cesur, F., Ismail, A., & Keklik, S. (2024). Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Yangın Hasarının ve Yangına Duyarlı Alanların Belirlenmesi: Aydıncık (Mersin) İlçesi Örneği, Türkiye. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *10*(2), 344-364.

Özenen Kavlak, M., Kurtipek, A., & Çabuk, S. N. (2020). Coğrafi Bilgi Sistemleri İle Orman Yangını Risk Haritası Oluşturulması: Ören Örneği. Resilience, 4(1), 33-54. https://doi.org/10.32569/resilience.597887.

Peña-Molina, E., Moya, D., Marino, E., Tomé, J. L., Fajardo-Cantos, Á., González-Romero, J., Lucas-Borja, M. E., & de las Heras, J. (2024). Fire Vulnerability, Resilience, and Recovery Rates of Mediterranean Pine Forests Using a 33-Year Time Series of Satellite Imagery. Remote Sensing, 16(10), 1718. https://doi.org/10.3390/rs16101718.

Sabuncu, A., & Özener, H. (2019). Uzaktan algılama teknikleri ile yanmış alanların tespiti: İzmir Seferihisar orman yangını örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *5*(2), 317-326.

Sarıgül, O., & Turoğlu, H. (2020). Kahramanmaraş Şehri Sel ve Taşkınlarının Coğrafi Analizi ve Öngörüler. Journal of Geography(40), 275-293. https://doi.org/10.26650/JGEOG2020-0018

Tavşanoğlu, Ç. (2017). Yangın Coğrafyası: Vejetasyon yangınlarının ve ekolojik sonuçlarının alansal dağılımı. Kebikec: İnsan Bilimleri İçin Kaynak Araştırmalı Dergisi, (43), 289-300.

Yaman, Ş., & Görmüş, E. T. (2025). Sentinel-2 ve Landsat-8 ile bulut tabanlı orman yangın analizi. *Geomatik*, *10*(3), 316-330.

Yılmaz, O. S., Oruç, M. S., Ateş, A. M., & Gülgen, F. (2021). Orman yangın şiddetinin Google Earth Engine ve coğrafi bilgi sistemleri kullanarak analizi: Hatay-Belen örneği. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(2), 1519-1532.

Yücer, E. (2023). Sentınel-2 Msı Ve Landsat-9 Olı Uydu Görüntüleriyle Yanmış Alanların Tespiti: 2022 Muğla/Marmaris Orman Yangını. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *26*(4), 866-880.

Yüksel, K. (2022). Yanan Orman Alanı Tespitinde Farklı Uzaktan Algılama İndislerinin Değerlendirilmesi: 2022 Yılı Mersin (Gülnar) Orman Yangını Örneği. *ArtGRID-Journal of Architecture Engineering and Fine Arts*, *4*(2), 160-171.