



**T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM
DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI**
ÇÖLLEŞME VE EROZYONLA MÜCADELE
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

TÜRKİYE ÇÖLLEŞME MODELİ HASSASIYET VE TEHLİKE HARİTALARI

TEKNİK ÖZET







**T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM
DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI**
ÇÖLLEŞME VE EROZYONLA MÜCADELE
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

TÜRKİYE ÇÖLLEŞME MODELİ HASSASİYET VE TEHLİKE HARİTALARI

TEKNİK ÖZET



T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI
ÇÖLLEŞME VE EROZYONLA MÜCADELE GENEL MÜDÜRLÜĞÜ





ÖNSÖZ



Çölleşme, günümüzde yalnızca çevresel bir sorun değil; ekonomik, sosyal ve ekolojik boyutlarıyla ülkemizin sürdürülebilir kalkınmasını doğrudan etkileyen çok boyutlu bir süreçtir. Türkiye, coğrafi konumu, topoğrafik yapısı ve iklim özellikleri nedeniyle çölleşme ve arazi bozulumu açısından hassas ülkeler arasında yer almaktadır. Kurak ve yarı kurak alanların genişliği, aşırı otlatma, yoğun tarımsal faaliyetler, ormansızlaşma, yanlış arazi kullanımı ve iklim değişikliğinin giderek artan etkileri bu süreci daha da hızlandırmaktadır. Bu nedenle, doğal kaynaklarımızın korunması, tarımsal üretim kapasitesinin sürdürülebilmesi ve ekosistem hizmetlerinin devamlılığı açısından çölleşme hassasiyetinin ve tehlikesinin bilimsel yöntemlerle analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu kapsamda yürütülen “Türkiye Çölleşme Modeli: Hassasiyet ve Tehlike Haritaları” çalışması, ülkemizin çölleşme ile mücadelesine yön verecek bilimsel temelli ve yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmada iklim, toprak, bitki örtüsü ve arazi kullanım özelliklerinden türetilen 11 kriter kullanılarak tamamen veriye dayalı, objektif ve tekrarlanabilir bir model geliştirilmiştir. Analizlerin ülke genelinde 30 metre mekânsal çözünürlükte yürütülmesi, yerel ölçekte daha ayrıntılı değerlendirmeler yapılmasına olanak tanımıştır. Ayrıca, İklim Değişikliği Başkanlığı tarafından ilk kez 3 kilometre çözünürlükte üretilen iklim projeksiyonlarının kullanılması, geleceğe yönelik çölleşme tehlikesi analizlerinde yeni bir dönem başlatmıştır.

Bu çalışma, yalnızca mevcut durumu ortaya koyan bir analiz olmanın ötesinde, Türkiye’nin çölleşme ile mücadelesine stratejik bir vizyon kazandırmaktadır. Elde edilen bulgular, iklim değişikliğinin giderek belirginleşen etkileri karşısında doğal kaynaklarımızın korunması, arazi yönetiminin sürdürülebilir bir zemine oturtulması ve iklim direncinin artırılması hedeflerimize güçlü bir bilimsel dayanak oluşturmaktadır. Yüksek çözünürlüklü mekânsal verilerle desteklenen bu modelin, karar vericiler, araştırmacılar ve uygulayıcı kurumlar için yol gösterici bir referans olacağına inanıyorum.

Türkiye’nin çölleşmeyle mücadelesini güçlendirmek, iklim direncini artırmak ve gelecek nesillere daha yaşanabilir bir çevre bırakmak yönündeki kararlılığımızı bu çalışma bir kez daha pekiştirmektedir. Bu kapsamlı çalışmaya katkı sunan tüm kurum, uzman ve araştırmacılara teşekkür eder; elde edilen bu bilimsel çıktının ülkemizin sürdürülebilir arazi yönetimi politikalarına ışık tutmasını temenni ederim.

Prof. Dr. Kasım YENİGÜN
Genel Müdür



KISALTMALAR

AHS	Analitik Hiyerarşi Süreci
AB	Avrupa Birliği (European Union)
ALOS PALSAR	Advanced Land Observing Satellite Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (Gelişmiş Arazi Gözlem Uydusu Faz Dizimli L-Bant Sentetik Açıklıklı Radar)
BAHS	Biyo-fiziksel Arazi Hassasiyet Sınıfı
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi (Geographic Information System – GIS)
ÇHİ	Çölleşme Hassasiyet İndeksi
CI	Climate Index (İklim İndeksi)
CMIP 6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
ÇTİ	Çölleşme Tehlike İndeksi
EC-Earth3-Veg (ECV)	EC-Earth3-Veg İklim Modeli (Bitki Örtüsü Etkileşimli EC-Earth3 Versiyonu)
MEDALUS	Mediterranean Desertification and Land Use (Akdeniz Çölleşme ve Arazi Kullanımı Projesi)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi)
MPI-ESM1-2-HR (MPI)	Max Planck Institute Earth System Model, High Resolution
MRI-ESM2-0 (MRI)	Meteorological Research Institute Earth System Model, Version 2.0
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi)
PET	Potential Evapotranspiration (Potansiyel Buharlaşma + Terleme)
SI	Soil Index (Toprak İndeksi)
SSP	Shared Socioeconomic Pathways (Ortak Sosyoekonomik Yollar/Senaryolar)
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
TI	Terrain Index (Arazi İndeksi)
TOK	Toprak Organik Karbonu
UASİS	Ulusal Arazi Örtüsü Sınıflandırma ve İzleme Sistemi
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification (Birleşmiş Milletler Çölleşme ile Mücadele Sözleşmesi)
UNDP	United Nations Development Programme (Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı)
VI	Vegetation Index (Bitki Örtüsü İndeksi)
WRF	Weather Research and Forecasting Model (Hava Araştırma ve Tahmin Modeli)



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	3
KISALTMALAR	4
ŞEKİLLER	6
TABLolar	7
YÖNETİCİ ÖZETİ	9
1. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI	11
2. TÜRKİYE ÇÖLLEŞME MODELİ	13
2.1. Modelin Teorik Alt Yapısı	16
2.2. Literatür Taraması ve Yöntem Seçimi Gerekçesi	17
2.3. Verilerin Temini	20
3. TÜRKİYE ÇÖLLEŞME HASSASİYET HARİTASI	23
3.1. Hassasiyet Sınıflarının Mekânsal Dağılımı	24
3.1.1. Havza Bazında Dağılım Analizleri	24
3.1.2. Bölge Bazında Dağılım Analizleri	25
3.1.3. İl Bazında Dağılım Analizleri	26
3.1.4. Arazi Türü Bazında Dağılım Analizleri	28
3.2. Doğrulama	29
4. TÜRKİYE ÇÖLLEŞME TEHLİKE MODELİ VE HARİTASI	31
4.1. Çölleşme Tehlike Haritaları (Yakın Gelecek 2025-2050)	32
4.2. Çölleşme Tehlike Haritaları (Orta Gelecek 2050-2075)	34
4.3. Çölleşme Tehlike Haritaları (Uzak Gelecek 2075-2100)	36
5. SONUÇ	39
REFERANSLAR	40



ŞEKİLLER

Şekil 1 İş Akış Diyagramı	14
Şekil 2 Türkiye Çölleşme Hassasiyet Haritası	23
Şekil 3 Kırğıbayır alanlarının çölleşme haritası doğruluk analizi sonuçları	29
Şekil 4 Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası(SSP 2-4.5 2025-2050)	32
Şekil 5 Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası (SSP 5-8.5 2025-2050)	33
Şekil 6 Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası (SSP 2-4.5 2050-2075)	34
Şekil 7 Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası (SSP 2-4.5 2050-2075)	35
Şekil 8 Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası (SSP 2-4.5 2075-2100)	36
Şekil 9 Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası (SSP 5-8.5 2075-2100)	37





TABLULAR

Tablo 1 Göstergeler için uygulanan normalizasyon kuralları	19
Tablo 2 Çölleşme tehlike modellenmesinde kullanılan veri setleri	20
Tablo 3 Havza bazında çölleşme hassasiyet sınıflarının yüzdeler dağılımı	24
Tablo 4 Bölge bazında çölleşme hassasiyet sınıflarının yüzdeler dağılımı	25
Tablo 5 İl bazında çölleşme hassasiyet sınıflarının yüzdeler dağılımı	26
Tablo 6 Ana arazi türlerine göre çölleşme hassasiyet sınıflarının yüzdeler dağılımı	28
Tablo 7 Model bazlı çölleşme tehlikesi sonuçları (SSP 2-4.5 iyimser senaryo)	31
Tablo 8 Model bazlı çölleşme tehlikesi sonuçları (SSP 5-8.5 kötümser senaryo)	32





T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI
ÇÖLLEŞME VE EROZYONLA MÜCADELE GENEL MÜDÜRLÜĞÜ





YÖNETİCİ ÖZETİ

Bu teknik özet, Türkiye'nin çölleşme hassasiyeti ve geleceğe yönelik çölleşme tehlikesini değerlendirmek amacıyla geliştirilen Türkiye Çölleşme Modeli Hassasiyet ve Tehlike Haritaları'nın metodolojik çerçevesini ve temel bulgularını sunmaktadır. Bu çalışma, önceki modellere kıyasla çölleşme hassasiyetini analiz etmede, bilimsel ve teknolojik olarak üç temel özgünlük sunmaktadır:

- Tamamen veriye dayalı ve tekrarlanabilir bir yöntem olan öklid mesafesi yaklaşımı kullanılmıştır. Analizler, iklim, toprak, bitki örtüsü ve arazi özelliklerini yansıtan toplam 11 kriter üzerinden gerçekleştirilmiştir.
- Analizler, tüm Türkiye için 30 metre çözünürlükte gerçekleştirilmiştir. Bu yüksek detay çölleşme hassasiyetinin yerel ve bölgesel ölçekte çok daha detaylı bir şekilde tespit edilmesine olanak tanımıştır.
- Bu çalışmada, yalnızca mevcut durumun statik bir fotoğrafı sunulmamış; aynı zamanda Türkiye'de ilk kez 3 km çözünürlükte üretilmiş iklim projeksiyon verileri kullanılmıştır. MRI-ESM2-0 (MRI), EC-Earth3-Veg (ECV) ve MPI-ESM1-2-HR (MPI) küresel iklim modellerine ait veriler, WRF modeli kullanılarak dinamik şekilde 3 km çözünürlüğe indirgenmiş olup; bu veriler, UNDP Türkiye'nin yürüttüğü ve İklim Değişikliği Başkanlığı'nın faydalanıcısı olduğu bir proje kapsamında üretilmiş ve bu çalışmada doğrudan kullanılmıştır.

Bu çalışmada iki ana çıktı üretilmiştir:

- **Türkiye Çölleşme Hassasiyet Haritası:** Türkiye kara alanlarının yaklaşık %16,92'si çok yüksek hassasiyet sınıfında yer almaktadır.
- **Gelecek Projeksiyonları (Tehlike):** Çölleşme tehlikesi, iklim senaryoları doğrultusunda üç dönem (2025–2050: yakın gelecek, 2050–2075: orta gelecek ve 2075–2100: uzak gelecek) için değerlendirilmiş; bu kapsamda hem iyimser (SSP 2-4.5) hem de kötümser (SSP 5-8.5) senaryolar altında 2100 yılına kadar 30 m mekânsal çözünürlükte projeksiyonlar üretilmiştir.

Çalışmanın en çarpıcı ve özgün bulgusu, Türkiye'de gelecekteki çölleşme tehlikesinin ana itici gücünün yağış azlığından çok, istikrarlı ve şiddetli sıcaklık artışı olduğudur. Artan sıcaklıklar, buharlaşmayı ve toprağın nem kaybını tetikleyerek ülkemizi sistematik bir kuraklaşma baskısı altına sokmaktadır.

Gelecek projeksiyonları, bu etkinin ne kadar kritik olduğunu sayısal olarak ortaya koymaktadır:

- İyimser senaryoya göre (SSP 2-4.5); çölleşmeye hassas alanların oranının yüzyıl sonunda %51,5'e yükseleceği öngörülmektedir. Bu durum, mevcut yüksek düzeyli hassasiyetin korunarak hafif bir artış göstereceğine işaret etmektedir.
- Kötümser senaryoya (SSP 5-8.5) göre; çölleşmeye hassas alanların oranının %60'ı aşarak kritik bir eşiğe ulaşması beklenmektedir. En dikkat çekici bulgu, "çok yüksek" tehlike sınıfındaki alanların payının mevcutta %17 düzeyindeyken, yüzyıl sonunda %24,5'e yükselmesidir.

İki ana çıktı olan Türkiye Çölleşme Hassasiyeti ve Gelecek Projeksiyonları'nın (Tehlike) bütünleşmiş analizi, ülkenin karşı karşıya olduğu tehdidin boyutlarını ve dinamiklerini net bir şekilde gözler önüne sermektedir. Elde edilen bulgular, acil ve çok katmanlı eylem gerektiren kritik bir tablo sunmaktadır.



T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI
ÇÖLLEŞME VE EROZYONLA MÜCADELE GENEL MÜDÜRLÜĞÜ





ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI



T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen **“Türkiye Çölleşme Modeli Hassasiyet ve Tehlike Haritalarının Hazırlanması”** projesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmanın temel amacı; Türkiye’nin mevcut çölleşme hassasiyetini ve gelecekte karşı karşıya kalabileceği çölleşme tehlikesini, güncel bilimsel yöntemlerle ve yüksek çözünürlüklü çevresel veri setleri kullanarak değerlendirmektir.

Türkiye, coğrafi konumu, topografik yapısı ve iklim özellikleri nedeniyle çölleşme açısından hassas ülkeler arasında yer almaktadır. Kurak ve yarı kurak alanların geniş yer kaplaması, tarım ve mera alanlarının yoğun kullanımı, arazi kullanım baskıları ve iklim değişikliğinin şiddetlenen etkileri, çölleşme hassasiyetinin farklı mekânsal ölçeklerde izlenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen Türkiye Çölleşme Modeli, ülke genelinde çölleşme süreçlerinin nesnel, veri temelli ve yüksek mekânsal çözünürlükte analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu kapsamda, ulusal ve uluslararası literatürde yer alan çölleşme süreçleri, değerlendirme modelleri, izleme yöntemleri ve göstergeler analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, Türkiye ölçeğinde uygulanacak modelleme çalışmalarına kavramsal ve metodolojik bir temel oluşturmayı hedeflemektedir.





T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI
ÇÖLLEŞME VE EROZYONLA MÜCADELE GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

2





TÜRKİYE ÇÖLLEŞME MODELİ



U NCCD'ye göre çölleşme, kurak, yarı kurak ve yarı nemli alanlarda toprak verimliliğinin azalması süreci olarak tanımlanır ve hem insan faaliyetleri (aşırı otlatma, yanlış tarım uygulamaları, ormansızlaşma) hem de iklim değişikliği etkileri (kuraklık, sıcaklık artışı) ile tetiklenir. Bu süreç; arazi bozulumu, erozyon, tuzlanma, biyolojik çeşitlilik kaybı ve su kaynaklarının azalması gibi sonuçlarla kendini gösterir. Çölleşme, iklim değişikliği, arazi kullanımı, hidrolojik döngüler ve sosyoekonomik dinamikler arasındaki karmaşık etkileşimlerle şekillenen çok boyutlu bir süreçtir (Zhao ve ark., 2023). Bu nedenle, sürecin bileşenlerinin bilimsel temelde analiz edilmesi, ulusal ölçekte izleme ve değerlendirme sistemlerinin geliştirilmesi ve uygun müdahale stratejilerinin tanımlanması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, çölleşme hassasiyet haritaları, arazi bozulmasına yatkın bölgelerin belirlenmesi, çölleşme eğiliminin ortaya konulması ve sürdürülebilir arazi yönetimi politikalarının planlanması açısından kritik bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada, önceki modellerde kullanılan ve büyük ölçüde uzman görüşlerine dayalı olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve MEDALUS yaklaşımlarının yerine, veriye dayalı ve nesnel bir yöntem olan öklid mesafesi tabanlı çok kriterli değerlendirme modeli uygulanmıştır.

Bu yöntem, bir alanın çölleşmeye karşı hassasiyetini; iklim, toprak, bitki örtüsü ve arazi gibi temel faktörlerin “ideal” durumdan ne ölçüde saptığını sayısal olarak hesaplayarak belirlemektedir.

Yöntemin öne çıkan avantajları şunlardır: uzman görüşüne veya öznel ağırlıklandırmalara ihtiyaç duymadan tamamen verilerin kendi istatistiksel dağılımlarına dayanmaktadır. Aynı veri setleri kullanıldığında her defasında aynı sonuçların elde edilmesi, yöntemin bilimsel güvenilirliğini ve şeffaflığını güçlendirmektedir. Her bir kriterin çölleşme hassasiyetine katkısı, ideal koşullardan sapma miktarı üzerinden matematiksel olarak hesaplanmaktadır. Bu da yöntemi daha dengeli, nesnel ve savunulabilir kılmaktadır. Bu bilimsel, şeffaf ve evrensel yapısı nedeniyle öklid mesafesi yöntemi, bu çalışmanın hedeflerine ulaşmak için en uygun metodolojik çerçeve olarak benimsenmiştir.

Çölleşme hassasiyet çalışması sürecine uygun metodolojinin belirlenmesine yönelik takip edilen iş akış şeması Şekil 1’de verilmiştir.

Şekil 1 İş Akış Diyagramı

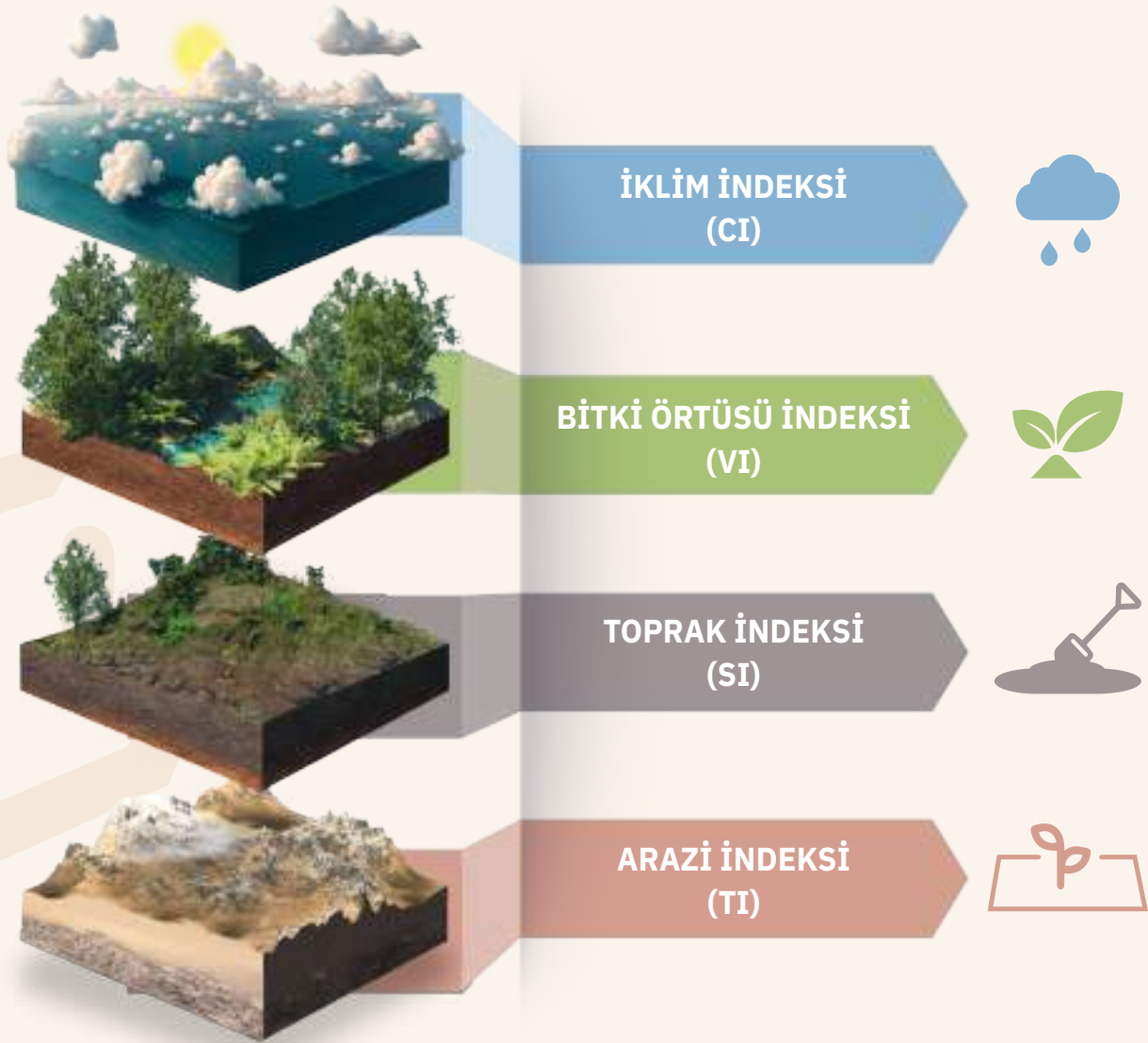




Modelin temel bileşenleri, dört ana indeksten oluşmaktadır:

- **İklim İndeksi (CI):** Sıcaklık, yağış, aridite ve rüzgâr hızı parametrelerini içerir.
- **Bitki Örtüsü İndeksi (VI):** NDVI verileri aracılığıyla bitki yoğunluğu ve sağlığını değerlendirir.
- **Toprak İndeksi (SI):** Organik karbon oranı, kum/kil dengesi ve toprak nemi verilerini kapsar.
- **Arazi İndeksi (TI):** Eğim ve bakı (güneşlenme yönelimi) değişkenlerinden oluşur.

Bu dört indeks, bütüncül bir yapıda birleştirilerek Çölleşme Hassasiyet/Tehlike İndeksi (ÇHİ/ÇTİ) oluşturulmuştur. Tehlike analizinde ise, modele CMIP 6 küresel iklim projeksiyonlarından elde edilen veriler entegre edilmiştir. Bu aşamada, SSP 2-4.5 (iyimser) ve SSP 5-8.5 (kötümser) senaryoları kullanılarak geleceğe yönelik iki farklı iklimsel koşul altında olası çölleşme tehlikesi değerlendirilmiştir.



2.1. Modelin Teorik Alt Yapısı

Bu çalışmada kullanılan çölleşme hassasiyet ve tehlike modeli, çok boyutlu veri setleri arasındaki farklılıkları veya uzaklıkları ölçmek amacıyla matematik, istatistik ve çeşitli bilim alanlarında yaygın olarak kullanılan öklid mesafesi prensibine dayanmaktadır (Zhao ve ark., 2023). Modelin temel yaklaşımı, bir alanın çölleşmeye karşı hassasiyetini; mevcut toprak, bitki örtüsü, iklim ve arazi (topoğrafya) -indekslerinin, çölleşmeye karşı en az hassas kabul edilen referans durumdan (ideal ya da düşük hassasiyet düzeyi) ne kadar uzaklaştığını hesaplayarak belirlemeye yöneliktir. Böylece, hassasiyet tek bir faktöre değil, tüm ilgili göstergelerin (toprak, iklim, bitki örtüsü ve arazi koşulları) ortak etkisine dayalı olarak değerlendirilmiştir.

Hesaplamalarda, göstergelerin farklı ölçüm birimleri ve değer aralıklarının neden olduğu ölçek farklarını ortadan kaldırmak için veriler önce normalize edilmiştir. Bu işlem sırasında, her göstergenin çölleşme hassasiyetiyle olan ilişki yönü (pozitif veya negatif) dikkate alınmıştır. Örneğin; hassasiyet arttıkça değeri azalan göstergeler (toprak nemi, NDVI, yağış miktarı, toprak organik karbonu, kil içeriği, aridite indeksi) “negatif ilişkili”, hassasiyet arttıkça değeri artan göstergeler (toprak kum içeriği, eğim, sıcaklık, rüzgâr hızı) ise “pozitif ilişkili” olarak değerlendirilmiş ve her biri için uygun standartlaştırma formülleri uygulanmıştır (Zhao ve ark., 2023). Böylece, tüm göstergeler 0–1 aralığında karşılaştırılabilir hale getirilmiştir.

$$X'_i = \frac{X_i - \min\{X_i\}}{\max\{X_i\} - \min\{X_i\}} \quad (1)$$

$$X'_i = \frac{\max\{X_i\} - X_i}{\max\{X_i\} - \min\{X_i\}} \quad (2)$$

Zaman serisi içeren göstergelerde (örneğin NDVI), 2003–2022 dönemine ait ülke genelindeki tüm hücre değerleri kullanılarak Türkiye ölçeğinde minimum ve maksimum değerler belirlenmiş, normalizasyon işlemleri bu ortak aralığa göre yürütülmüştür.





İklim değişkenlerinde ise hem tarihsel (gözlemsel) hem de projeksiyon dönemleri (2003–2100) birlikte değerlendirilmiş; modellerin tarihsel verileri, gözlemler ve gelecek senaryoları birleştirilerek bütüncül bir zaman serisi oluşturulmuştur. Bu yöntem, geçmişten geleceğe uzanan tutarlı ve karşılaştırılabilir bir tehlike ölçeği geliştirilmesine imkân sağlamıştır.

Standartlaştırma işlemleri sonrasında, her göstergenin ideal durumdan sapma düzeyi belirlenmiş ve dört temel gösterge grubu — Toprak (SI), Bitki Örtüsü (VI), İklim (CI) ve Arazi (TI) — için ayrı alt hassasiyet indeksleri öklid mesafesi yöntemiyle hesaplanmıştır. Değer büyüdükçe, ilgili faktör grubunun ideal durumdan uzaklaştığı ve hassasiyet düzeyinin arttığı kabul edilmiştir. Son aşamada, bu dört alt indeks (SI, VI, CI, TI) yine öklid mesafesi yaklaşımıyla birleştirilerek, Nihai Çölleşme Hassasiyet İndeksi (ÇHİ) veya Çölleşme Tehlike İndeksi (ÇTİ) oluşturulmuştur (Zhao vd., 2023; Cheng vd., 2004).

$$SI = \sqrt{(TOK - TOK_{low})^2 + (Kum - Kum_{low})^2 + (Kil - Kil_{low})^2 + (Toprak Nemi - Toprak Nemi_{low})^2} \quad (3)$$

$$VI = \sqrt{(NDVI - NDVI_{low})^2} \quad (4)$$

$$CI = \sqrt{(Yağış - Yağış_{low})^2 + (Sıcaklık - Sıcaklık_{low})^2 + (Aridite - Aridite_{low})^2 + (Rüzgar Hız - Rüzgar Hızı_{low})^2} \quad (5)$$

$$TI = \sqrt{(Eğim - Eğim_{low})^2 + (Bakı - Bakı_{low})^2} \quad (6)$$

$$\text{ÇHİ / ÇTİ} = \sqrt{(SI - SI_{low})^2 + (VI - VI_{low})^2 + (CI - CI_{low})^2 + (TI - TI_{low})^2} \quad (7)$$

Eşitliklerde “low” olarak belirtilen en düşük değerler, standartlaştırma işlemi gereği 0 olarak kabul edildiğinden, 3–7 numaralı eşitliklerdeki low değeri, ilgili göstergenin çölleşmeye karşı en uygun (optimum) durumdan sapma düzeyini temsil etmektedir.

$$SI = \sqrt{TOK^2 + Kum^2 + Kil^2 + Toprak Nemi^2} \quad (8)$$

$$VI = NDVI \quad (9)$$

$$CI = \sqrt{Yağış^2 + Sıcaklık^2 + Aridite^2 + Rüzgar Hız^2} \quad (10)$$

$$TI = \sqrt{Eğim^2 + Bakı^2} \quad (11)$$

$$\text{ÇHİ} = \sqrt{SI^2 + VI^2 + CI^2 + TI^2} \quad (12)$$

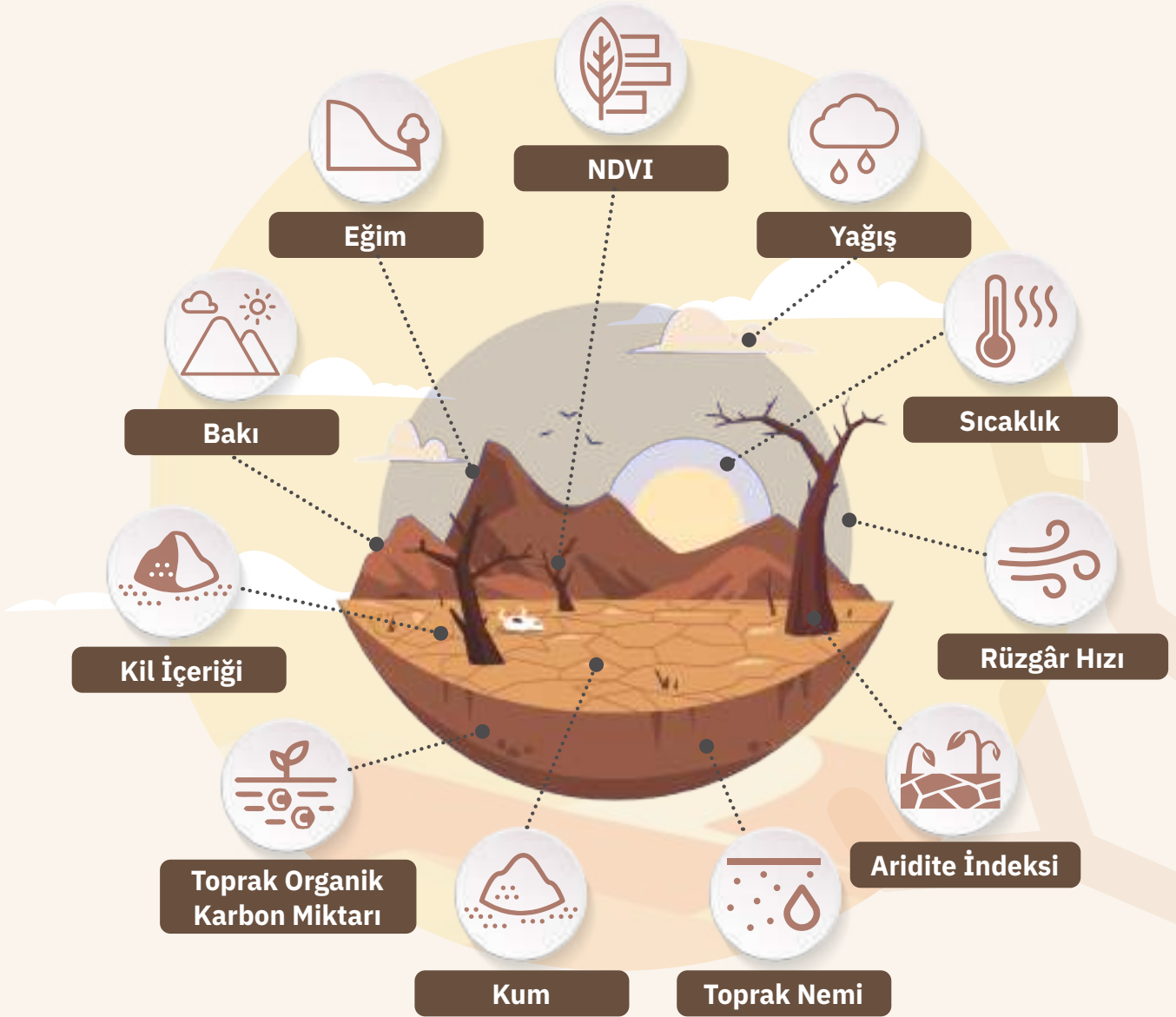
2.2. Literatür Taraması ve Yöntem Seçimi Gerekçesi

Çölleşme hassasiyeti değerlendirmelerinde literatürde MEDALUS, AHS ve BAHS gibi yaygın yöntemlerin yanı sıra son yıllarda Makine Öğrenmesi ve Geodetector tabanlı yaklaşımların da kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerin avantaj ve sınırlılıkları ile veri gereksinimleri değerlendirilmiş; proje danışmanlarının görüşleriyle birlikte yöntem seçimine ilişkin kapsamlı bir analiz yapılmıştır.

Bu değerlendirmeler sonucunda, çölleşme hassasiyetinin belirlenmesinde öklid mesafesi tabanlı çok kriterli karar verme yaklaşımının kullanılması uygun bulunmuştur. Bu yöntemin tercih edilmesinde, kriterlerin modele objektif biçimde entegre edilebilmesi ve AHS gibi öznel ağırlıklandırmaya dayalı yöntemlerin geniş ölçekli ve yüksek çözünürlüklü çalışmalarda tutarsız sonuçlar üretme riskinin bulunması etkili olmuştur. Türkiye genelinde 30 metre çözünürlükle yaklaşık 1,5 milyar hücre üzerinde analiz yapılması, zamana ve mekâna göre değişen ağırlıkların güvenilir şekilde belirlenmesini güçleştirmektedir.

Ayrıca, literatürde aynı göstergeler için farklı çalışmalarda farklı ağırlık setlerinin kullanılması, objektif bir ağırlık standardı bulunmadığını göstermektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında, tüm kriterlere eşit analitik önem verilmiş, göstergeler ise bilinen çölleşme eğilimi ile ilişkilerine göre istatistiksel olarak normalizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Modelde kullanılan temel kriterler NDVI, yağış, sıcaklık, rüzgâr hızı, aridite, toprak nemi, kum ve kil içeriği, toprak organik karbonu, bakı ve eğim olmak üzere toplam 11 göstergeden oluşmaktadır.

Dinamik göstergeler (NDVI, toprak nemi, aridite, yağış, rüzgâr hızı ve sıcaklık) için normalize değerler her yıl kendi gözlemsel veri aralığına göre hesaplanmış; böylece yıllar arasında karşılaştırılabilirlik ve değerlendirme sonuçlarında tutarlılık sağlanmıştır. Normalizasyon işlemi, her bir göstergenin çölleşme hassasiyeti ile olan bilinen ilişkisine (pozitif veya negatif korelasyon) göre, Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılarak yapılmıştır (Zhao vd., 2023). Göstergelerin normalizasyon işlemi ile ilgili özet bilgi Tablo 1’de verilmiştir.



**Tablo 1** Göstergeler için uygulanan normalizasyon kuralları

Gösterge	Normalizasyon Türü	Normalizasyon Eşitliği	Açıklama
Aridite		Eşitlik 1	Aridite değeri azaldığında hassasiyet artmaktadır.
Yağış	-	Eşitlik 1	Yağış değeri azaldığında hassasiyet artmaktadır.
Sıcaklık	+	Eşitlik 2	Sıcaklık değeri arttıkça hassasiyet artmaktadır.
Rüzgâr Hızı	+	Eşitlik 2	Rüzgâr hızı değeri arttıkça hassasiyet artmaktadır.
Toprak Organik Karbon İçeriği	-	Eşitlik 1	Toprak organik karbon içeriği değeri azaldığında hassasiyet artmaktadır.
Kum İçeriği	+	Eşitlik 2	Kum içeriği değeri arttıkça hassasiyet artmaktadır.
Kil İçeriği	-	Eşitlik 1	Kil içeriği değeri azaldığında hassasiyet artmaktadır.
Toprak Nemi	-	Eşitlik 1	Toprak nemi değeri azaldığında hassasiyet artmaktadır.
NDVI	-	Eşitlik 1	NDVI değeri azaldığında hassasiyet artmaktadır.
Bakı			Güney ve güneye yakın cepheleri 1, diğer bölgeler 0 değeri almaktadır.
Eğim	-	Eşitlik 1	Eğim değeri azaldığında hassasiyet artmaktadır.





2.3. Verilerin Temini

Çölleşme tehlike modellemesinde, gelecekteki iklim projeksiyonlarının yanı sıra arazinin mevcut biyofiziksel özelliklerini ve yakın geçmişteki dinamiklerini yansıtan çeşitli çevresel veriler de kritik öneme sahiptir. Tablo 2’de çalışma kapsamında kullanılan veriler ve kaynakları belirtilmiştir.

Tablo 2 Çölleşme tehlike modellenmesinde kullanılan veri setleri

Veri Setleri	Orijinal Çözünürlük	Veri Kaynağı	Zamansal Ölçek
Toprak Organik Karbon (TOK) İçeriği	250 m	ÇEM	Statik
Kum İçeriği	250 m	ÇEM	Statik
Kil İçeriği	250 m	ÇEM	Statik
NDVI	250 m	MODIS - Aqua	2018-2022
Aridite	~ 3 km (Hesaplandı)	Bu veriler, UNDP Türkiye’nin yürüttüğü ve İklim Değişikliği Başkanlığı’nın faydalanıcı kurum olduğu AB Ortaklığı Projesi kapsamında yapılan çalışmadan sağlanmıştır.	2003-2100
Rüzgâr Hızı	~ 3 km	Bu veriler, UNDP Türkiye’nin yürüttüğü ve İklim Değişikliği Başkanlığı’nın faydalanıcı kurum olduğu AB Ortaklığı Projesi kapsamında yapılan çalışmadan sağlanmıştır.	2003-2100
Sıcaklık	~ 3 km	Bu veriler, UNDP Türkiye’nin yürüttüğü ve İklim Değişikliği Başkanlığı’nın faydalanıcı kurum olduğu AB Ortaklığı Projesi kapsamında yapılan çalışmadan sağlanmıştır.	2003-2100
Yağış	~ 3 km	Bu veriler, UNDP Türkiye’nin yürüttüğü ve İklim Değişikliği Başkanlığı’nın faydalanıcı kurum olduğu AB Ortaklığı Projesi kapsamında yapılan çalışmadan sağlanmıştır.	2003-2100
Toprak Nemi	~ 3 km	Bu veriler, UNDP Türkiye’nin yürüttüğü ve İklim Değişikliği Başkanlığı’nın faydalanıcı kurum olduğu AB Ortaklığı Projesi kapsamında yapılan çalışmadan sağlanmıştır.	2003-2100
PET	~ 3 km	Bu veriler, UNDP Türkiye’nin yürüttüğü ve İklim Değişikliği Başkanlığı’nın faydalanıcı kurum olduğu AB Ortaklığı Projesi kapsamında yapılan çalışmadan sağlanmıştır.	2003-2100
Eğim	30 m	ALOS	Statik
Baki	30 m	ALOS	Statik



İklim İndeksi:

İklimsel koşulları yansıtan Aridite İndeksi, aynı veri setinden türetilen sıcaklık ve yağış verileri kullanılarak hesaplanmış olup, bölgenin kuraklık eğilimini ve iklimsel su dengesini değerlendirmede temel bir gösterge olarak kullanılmıştır. Düşük Aridite İndeksi değerleri yüksek kuraklık koşullarını temsil ederek çölleşme tehlikesinin arttığını, yüksek indeks değerleri ise nemli iklim koşullarını yansıtarak tehlikenin azaldığını göstermektedir (Zhang vd., 2021). Ayrıca, aynı veri setinden elde edilen rüzgâr hızı verileri, buharlaşma oranını ve rüzgâr erozyonu potansiyelini etkileyen kritik bir dinamik faktör olarak modele entegre edilmiştir.



Bitki Örtüsü İndeksi:

Bitki örtüsünün yoğunluğu ve ekolojik sağlığını yansıtan Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), 2018–2022 dönemine ait 250 m çözünürlüklü MODIS-Aqua uydu verileri kullanılarak hesaplanmıştır. NDVI, fotosentetik aktivitenin bir göstergesi olarak, arazi örtüsünün üretkenliğini ve vejetasyonun sürekliliğini değerlendirmede önemli bir parametredir. Yüksek NDVI değerleri, yoğun ve sağlıklı bitki örtüsünü temsil ederek çölleşme hassasiyetinin düşük olduğunu; düşük NDVI değerleri ise seyrek ve stres altındaki bitki örtüsünü yansıtarak artan çölleşme hassasiyetine işaret etmektedir (Zhao vd., 2023).



Toprak İndeksi:

Toprağın yapısal stabilitesi, su tutma kapasitesi ve besin döngüsünün sürdürülebilirliği açısından kritik bir belirleyici olan toprak organik karbonu (TOK), toprak sağlığının ve ekosistem dayanıklılığının temel göstergelerinden biridir. Yüksek TOK düzeyleri, toprağın fiziksel bütünlüğünü koruyarak çölleşme süreçlerine karşı direnci artırırken; düşük TOK düzeyleri, bozulma eğilimini güçlendirmektedir (Zhao vd., 2023). Bununla birlikte, toprağın kum ve kil oranları da tekstürel yapıyı belirleyerek erozyona duyarlılığı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Kum oranının yüksek olması su tutma kapasitesini düşürüp rüzgâr erozyonunu şiddetlendirirken, kil oranının yüksekliği su ve besin tutulumunu artırarak toprağın dayanıklılığını desteklemektedir (Zhao vd., 2023; Reichert vd., 2016).



Arazi (Topografya) İndeksi:

Eğim ve bakı gibi topoğrafik özellikleri temsil eden statik değişkenler, ALOS PALSAR verilerinden türetilen 30 m çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) kullanılarak elde edilmiştir. Bu değişkenler, yüzey şeklinin su birikimi, akış yönü ve toprak nemi üzerindeki etkilerini belirleyerek çölleşme süreçlerinin mekânsal dağılımını ve arazi duyarlılığını değerlendirmede önemli girdiler sağlamaktadır.



T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI
ÇÖLLEŞME VE EROZYONLA MÜCADELE GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

3





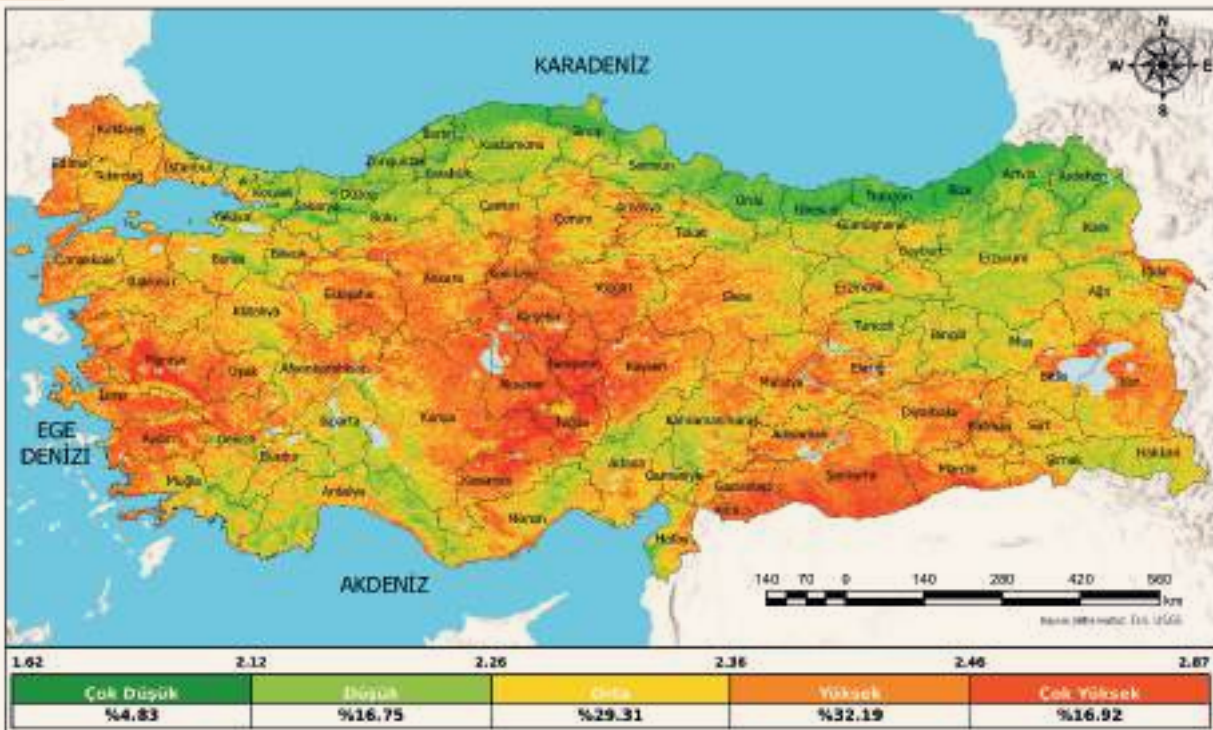
TÜRKİYE ÇÖLLEŞME HASSASİYET HARİTASI



Bu çalışmada geliştirilen model sonucunda üretilen Türkiye Çölleşme Hassasiyet Haritası (Şekil 2), ülke genelinde çölleşme sürecine karşı hassasiyetin belirgin bölgesel farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Harita, farklı iklimsel, topografik ve toprak özelliklerinin etkisiyle, Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde çölleşme hassasiyetinin yoğunluk ve yayılım açısından değiştiğini açıkça göstermektedir.

Elde edilen bulgulara göre, Türkiye kara alanlarının ortalama olarak %16,92'si "çok yüksek", %32,19'u "yüksek", %29,31'i "orta", %16,76'sı "düşük" ve %4,83'ü "çok düşük" hassasiyet sınıflarında yer almaktadır. Bu dağılım, ülke topraklarının yaklaşık yarısının yüksek veya çok yüksek hassasiyet düzeyinde olduğunu göstermektedir.

Şekil 2 Türkiye Çölleşme Hassasiyet Haritası





3.1. Hassasiyet Sınıflarının Mekânsal Dağılımı

Üretilen nihai Türkiye Çölleşme Hassasiyet Haritası (Şekil 2), ülke genelindeki genel örüntüyü ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, hassasiyetin farklı yönetim ve planlama ölçeklerindeki dağılımını anlamak da büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, bu bölümde hassasiyet sınıflarının mekânsal dağılımı sırasıyla Havza, Coğrafi Bölge, İl ve Ana Arazi Türleri bazında daha detaylı olarak analiz edilmektedir.

3.1.1. Havza Bazında Dağılım Analizleri

Çölleşme Hassasiyet Haritası 25 ana havza sınırı ile çakıştırılmış ve her havza için hassasiyet sınıflarının alansal yüzdeleri hesaplanmıştır (Tablo 3).

Tablo 3 Havza Bazında Çölleşme Hassasiyet Sınıflarının Yüzdelik Dağılımı

Havza	Çok Düşük Hassasiyet	Düşük Hassasiyet	Orta Hassasiyet	Yüksek Hassasiyet	Çok Yüksek Hassasiyet
Gediz	0,06	2,64	18,88	38,79	39,64
Konya	0,27	5,3	14,63	42,24	37,56
Küçük Menderes	0,02	1,82	19,38	44,47	34,31
Kuzey Ege	0,04	2,38	23,88	47,4	26,3
Büyük Menderes	0,13	7,28	26,01	40,31	26,27
Van Gölü	0,02	3,91	25,14	44,7	26,23
Kızılırmak	1,28	11,15	21,53	39,87	26,18
Meriç-Ergene	0	0,27	32,83	46,4	20,51
Akarçay	0,14	9,24	29,48	40,74	20,41
Fırat ve Dicle	0,41	13,41	33,66	34,9	17,62
Sakarya	1,4	11,6	29,95	40,2	16,85
Seyhan	1,2	15,69	32,24	34,73	16,15
Asi	2,54	15,79	35,28	32,5	13,89
Susurluk	0,48	8,62	42,5	36,2	12,2
Burdur	0,08	12,55	40,77	34,42	12,18
Ceyhan	0,94	16,39	40,56	30,48	11,64
Doğu Akdeniz	1,91	20,33	37,65	29,7	10,41
Marmara	2,35	20,64	38,41	29,05	9,54
Batı Akdeniz	3,41	27,38	35,77	24,38	9,07
Yeşilirmak	5,06	25,91	36,82	24,4	7,81
Antalya	3,14	28,6	39,51	22,96	5,79
Aras	11,05	38,89	29,61	15,74	4,7
Çoruh	24,77	41,24	24,54	8,46	0,98
Batı Karadeniz	25,26	48,64	20,82	5,08	0,19
Doğu Karadeniz	57,32	30,61	9,27	2,66	0,15

Gediz (39,64), Konya (37,56), Küçük Menderes (34,31), Kuzey Ege (26,3), Büyük Menderes (26,27), Van Gölü (26,23), Kızılırmak (26,18), havzaları çok yüksek hassasiyete sahiptir. Bu havzalar, genellikle kurak ve yarı kurak iklim koşulları ile yoğun insan faaliyetlerinin etkisi altında olup, çölleşme hassasiyetinin en yüksek olduğu bölgelerdir. Öncelikli olarak bu alanlarda çölleşme ile mücadele ve sürdürülebilir arazi yönetimi uygulamalarının geliştirilmesi gerekmektedir.



3.1.2. Bölge Bazında Dağılım Analizleri

Havza bazındaki analizlerin yanı sıra, Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesi temelinde çölleşme hassasiyetinin nasıl bir dağılım gösterdiğini anlamak, bölgesel kalkınma planları ve iklim değişikliği stratejileri açısından önemlidir. Bu amaçla, nihai hassasiyet haritası, coğrafi bölge sınırları ile çakıştırılmış ve her bir bölge için beş hassasiyet sınıfının (çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek) alansal yüzdeleri hesaplanmıştır (Tablo 4).

Tablo 4 Bölge Bazında Çölleşme Hassasiyet Sınıflarının Yüzdelerik Dağılımı

Bölge	Çok Düşük Hassasiyet (%)	Düşük Hassasiyet (%)	Orta Hassasiyet (%)	Yüksek Hassasiyet (%)	Çok Yüksek Hassasiyet (%)
Güneydoğu Anadolu	0,11	4,89	24,16	41,72	29,12
İç Anadolu	0,17	5,89	22,02	43,56	28,36
Ege	0,43	7,83	27,56	39	25,19
Marmara	2,02	13,98	36,58	34,33	13,09
Doğu Anadolu	3,8	24,8	35,7	26,51	9,2
Akdeniz	2,33	23,35	39,45	26,43	8,44
Karadeniz	23,03	34,7	25,52	13,35	3,4

Güneydoğu Anadolu, İç Anadolu ve Ege bölgeleri en yüksek hassasiyeti gösterirken; Karadeniz Bölgesi, yoğun yağış ve orman örtüsü sayesinde en düşük hassasiyete sahiptir. Marmara, Akdeniz ve Doğu Anadolu bölgeleri ise genellikle "orta" ve "yüksek" hassasiyetin baskın olduğu daha karmaşık desenler sergilemektedir (Tablo 4).





3.1.3. İl Bazında Dağılım Analizleri

Çölleşme hassasiyetinin il idari sınırları bazında incelenmesi, yerel yönetimlerin ve ilgili kurumların planlama ve müdahale çalışmalarına temel oluşturması açısından önemlidir. Bu kapsamda, Türkiye'deki 81 il için çölleşme hassasiyet sınıflarının (çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek) alansal yüzdeleri hesaplanmıştır. Tüm illere ait detaylı yüzdeler Tablo 5'te sunulmaktadır.

Tablo 5 İl Bazında Çölleşme Hassasiyet Sınıflarının Yüzdeler Dağılımı

İl	Çok Düşük Hassasiyet (%)	Düşük Hassasiyet (%)	Orta Hassasiyet (%)	Yüksek Hassasiyet (%)	Çok Yüksek Hassasiyet (%)
Nevşehir	0	0	0,45	33,38	66,17
Aksaray	0	0,2	1,64	46,4	51,75
Niğde	0,34	4,36	13,13	30,6	51,56
Şanlıurfa	0	0,38	8,44	44,68	46,5
Kilis	0	0,69	10,33	43,7	45,28
Aydın	0,02	2,01	14,14	40,92	42,92
Manisa	0,05	2,14	17,97	37,57	42,27
Kırşehir	0	0,05	6,82	51,97	41,16
Gaziantep	0,02	2,36	17,13	42,6	37,9
Kayseri	0,46	3,79	16,33	45,37	34,06
Kırıkkale	0	0,58	12,45	54,14	32,83
Mardin	0	1,21	25,91	40,73	32,15
İzmir	0	1,55	21,11	45,55	31,78
Karaman	0,25	5,92	20,53	43,18	30,12
Yozgat	0,02	2,5	18,45	49,05	29,98
Edirne	0	0,07	18,19	54,43	27,32
Konya	0,28	7,2	22,52	43,68	26,32
Uşak	0,03	5,22	24,99	43,64	26,12
Ankara	0,2	4,73	22,52	47,69	24,85
Eskişehir	0	3,46	26,32	47,15	23,07
Diyarbakır	0,11	3,52	29,14	44,67	22,56
Adıyaman	0,01	5,21	30,32	43,2	21,26
Çanakkale	0	2,95	32,26	43,98	20,8
Elâzığ	0,07	6,71	32,05	40,46	20,71
Van	0,05	6,37	31,38	42,28	19,93
Batman	0,03	3,99	31,16	45,24	19,58
Afyonkarahisar	0,05	6,45	29,85	44,13	19,52
Bitlis	0,01	8,19	36,64	36,07	19,1
Malatya	0,01	5,73	34,65	41,74	17,88
Denizli	0,88	13,88	30,64	36,84	17,77
Balıkesir	0,03	4,17	37,29	41,57	16,95
Iğdır	0,49	16,08	31,62	35,32	16,49
Kırklareli	0,08	6,05	37,19	40,5	16,18
Muğla	2,14	19,68	33,19	30,49	14,5
Sivas	0,2	10,37	36,61	38,38	14,44
Çorum	0,15	10,57	38,07	36,97	14,24
Amasya	3,31	15,9	35,14	32,53	13,12
Tekirdağ	0	1,28	49,28	36,7	12,74



İl	Çok Düşük Hassasiyet (%)	Düşük Hassasiyet (%)	Orta Hassasiyet (%)	Yüksek Hassasiyet (%)	Çok Yüksek Hassasiyet (%)
Kahramanmaraş	0,92	17,85	36,4	32,22	12,62
Siirt	0,05	9,71	40,88	36,81	12,55
Kütahya	0,08	9,68	43,69	35,24	11,31
Mersin	1,97	19,24	37,6	30,31	10,87
Hatay	3,55	19,58	38,83	28,38	9,66
Çankırı	0,58	22,35	38,04	30,08	8,96
Adana	1,08	19,86	44,42	26,03	8,61
Şırnak	0,77	23,99	39,34	27,83	8,08
Ağrı	0,25	17,06	45,45	29,23	8
Erzincan	1,04	23,1	40,07	27,97	7,82
Tokat	2,43	24,28	40,9	25,09	7,3
Burdur	1,2	23,38	42,16	26,2	7,06
Bursa	2,25	21,79	42,91	26,24	6,81
İstanbul	1,23	25,11	40,89	26,33	6,45
Osmaniye	2,17	24,28	44,15	22,95	6,44
Bilecik	0,24	20,06	46,64	26,71	6,34
Tunceli	3,02	32,28	36,32	22,38	5,99
Isparta	0,78	25,22	43,24	25,29	5,46
Antalya	4,72	31,81	37,34	20,82	5,31
Muş	0,42	21,29	48,89	24,59	4,82
Hakkâri	0,97	29,55	42,6	23,18	3,7
Bingöl	0,95	31,2	41,48	23,02	3,34
Bayburt	1,46	30,17	44,74	20,78	2,85
Kars	8,54	49,17	28,11	11,42	2,75
Bolu	4,75	43,58	34,44	14,82	2,4
Gümüşhane	6,21	38,37	35,6	17,51	2,31
Sakarya	14,35	44,54	28,97	10,71	1,43
Erzurum	7,22	44,27	34,38	12,88	1,25
Kocaeli	12,19	50,42	27,18	9,15	1,06
Kastamonu	21,45	43	25,63	8,96	0,96
Sinop	34,91	37,13	19,94	7,15	0,87
Yalova	3,77	46,75	37,29	11,47	0,72
Giresun	42,22	32,36	17,17	7,62	0,63
Samsun	22,62	52,94	19,66	4,61	0,17
Karabük	9,86	53,15	28,27	8,56	0,16
Artvin	53,89	33,44	10,3	2,21	0,16
Düzce	23,23	55,36	18,28	3,1	0,02
Ordu	46,05	41,93	10,38	1,62	0,02
Zonguldak	16,57	59,29	21,47	2,66	0,01
Bartın	29,15	52,87	16,44	1,54	0
Ardahan	41,92	46,92	10,93	0,23	0
Rize	83,38	14,24	2,19	0,18	0
Trabzon	73,13	23,88	2,8	0,18	0

Nevşehir (% 66,17) ve Aksaray (%51,75) en yüksek hassasiyete sahip illerdir. Bunları Niğde (%51,56), Şanlıurfa (%46,5), Kilis (45,28), Aydın (%42,92), Manisa (%42,27) ve Kırşehir (%41,16) gibi, çoğunlukla İç Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Ege bölgelerinde yer alan iller izlemektedir. Bu iller, kurak/yarı kurak iklim, su stresi, yoğun tarım ve arazi bozulumu gibi faktörlerin şiddetli etkisi altındadır.

3.1.4. Arazi Türü Bazında Dağılım Analizleri

Çölleşme hassasiyetinin farklı arazi kullanım/örtü tipleri üzerindeki dağılımını anlamak, sektörel bazda riskleri belirlemek ve uygun yönetim stratejileri geliştirmek açısından kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, Çölleşme Hassasiyet Haritası, Türkiye'nin Ulusal Arazi Örtüsü Sınıflandırma ve İzleme Sistemi (UASİS) verilerinden elde edilen ana arazi örtüsü tipleri ile karşılaştırılmış ve her bir arazi türü için hassasiyet sınıflarının alansal yüzdeleri hesaplanmıştır. Analiz sonuçları Tablo 6'da özetlenmektedir.

Tablo 6 Ana Arazi Türlerine Göre Çölleşme Hassasiyet Sınıflarının Yüzdelik Dağılımı

Arazi Kullanımı	Çok Düşük (%)	Düşük (%)	Orta (%)	Yüksek (%)	Çok Yüksek (%)
Tarım Arazileri	2,64	6,33	22,81	41,56	26,67
Sulak Alanlar	12,19	7,22	17,21	37,73	25,65
Şehir Alanları	2,26	9,1	27,75	38,15	22,73
Orman ve Yarı Doğal Alanlar	6,28	22,5	32,7	26,98	11,54
Su Yolları ve Su Kütleleri	71,15	1,81	7,56	11,93	7,55

UASİS verileriyle yapılan analiz, çölleşme hassasiyetinin arazi türlerine göre farklılıklar sergilediğini ortaya koymaktadır:



1. Tarım Arazileri :

Tarım arazileri, çölleşme hassasiyeti açısından en kırılgan arazi kullanım tipi olarak öne çıkmaktadır. “yüksek” (%41,56) ve “çok yüksek” (%26,67) hassasiyet sınıflarının toplamı, Türkiye'deki tarım arazilerinin %68,23'ünün doğrudan çölleşme tehdidi altında olduğunu göstermektedir.



2. Sulak Alanlar:

“yüksek” (%37,73) ve “çok yüksek” (%25,65) hassasiyet sınıflarında bulunan sulak alanlar, ikinci en yüksek hassasiyet grubunu oluşturmaktadır.



3. Şehir Alanları:

Şehir alanları ve çevresi “yüksek” (%38,15) ve “çok yüksek” (%22,73) hassasiyet altındadır.



4. Orman ve Yarı Doğal Alanlar:

Bu alanlar, diğerlerine kıyasla daha dirençli bir yapı sergilese de “yüksek” (%26,98) ve “çok yüksek” (%11,54) hassasiyet oranları dikkat çekmektedir.



5. Su Yolları ve Su Kütleleri:

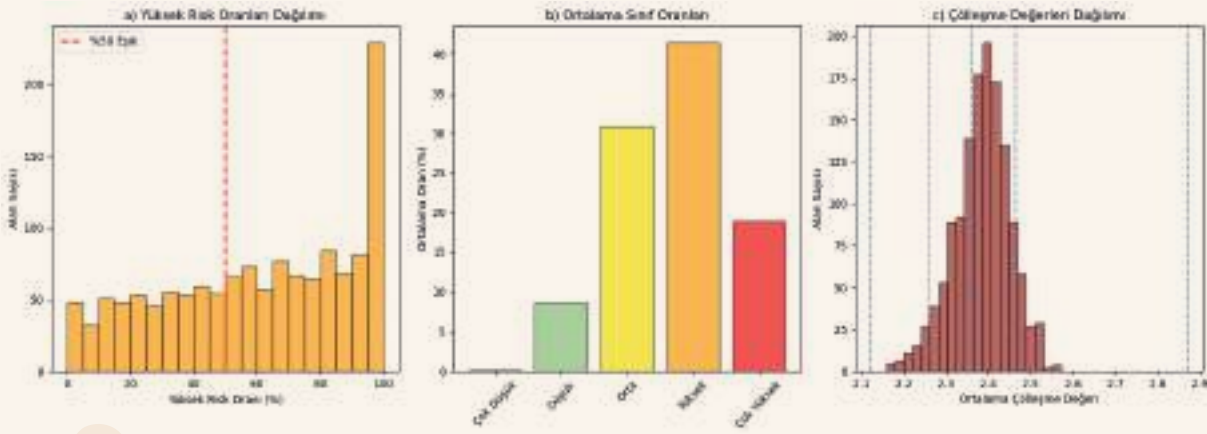
Bu alanların %71,15'i “çok düşük” hassasiyet sınıfındadır. Su varlığının kendisi, çölleşmeye karşı doğal bir tampon oluşturmaktadır.



3.2. Doğrulama

Bu çalışmada, saha verisi yetersizliği nedeniyle modelin doğrulanmasında alternatif bir yöntem uygulanmıştır. Doğal olarak çölleşmeye yüksek eğilim gösteren kırgıbayır (badlands) alanları, referans veri seti olarak kullanılmıştır. Çölleşme hassasiyet haritasında bu alanların büyük ölçüde “yüksek” ve “çok yüksek” sınıflarda yer alması beklenmiş; bu nedenle Türkiye genelinde kırgıbayır alanlarını kapsayan pikseller üzerinde istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Toplam 1366 kırgıbayır alanı için çölleşme değerleri hesaplanmış ve belirlenen eşik değerlere göre sınıflandırılmıştır. Doğruluk değerlendirmesinde %50 eşik değeri esas alınmış; buna göre, bir alanın “doğru sınıflandırılmış” kabul edilebilmesi için en az yarısının “yüksek” veya “çok yüksek” hassasiyet sınıflarında bulunması koşulu aranmıştır.

Şekil 3 Kırgıbayır Alanlarının Çölleşme Haritası Doğruluk Analizi Sonuçları



Analiz sonuçları (Şekil 3), çölleşme hassasiyet haritasının kırgıbayır alanlarını büyük ölçüde doğru biçimde yüksek hassas bölgeler olarak tanımladığını göstermektedir.

- a)** Yüksek risk oranlarının dağılımında %50 eşiklerinin sağında belirgin bir yoğunlaşma (%63,5) ve %80–100 aralığında tepe noktası gözlenmiş, bu durum kırgıbayır alanlarının çoğunun yüksek hassasiyet oranlarına sahip olduğunu ortaya koymuştur.
- b)** Ortalama sınıf oranları incelendiğinde, kırgıbayır alanlarının %41,4’ü “yüksek”, %18,9’u “çok yüksek” sınıfta yer almakta olup toplamda %60,3’lük bir oranla bu alanların doğru biçimde yüksek hassasiyet kategorisinde sınıflandırıldığı belirlenmiştir.
- c)** Çölleşme değerlerinin 2,3–2,5 aralığında yoğunlaşması ve 2,4 değeri civarında toplanması ise, kırgıbayır alanlarının genel olarak “yüksek” sınıf eşiklerinde bulunduğunu doğrulamaktadır.

Bu bulgular, çölleşme haritasının çölleşmeye eğilimli alanları belirlemede yüksek doğruluk düzeyine sahip olduğunu göstermektedir.

* Kırgıbayır, daha yumuşak olan tortul kayaların ve kil bakımından zengin toprakların, rüzgar ve su tarafından büyük ölçüde aşındığı kurak bir arazi türüdür.



T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI
ÇÖLLEŞME VE EROZYONLA MÜCADELE GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

4





TÜRKİYE ÇÖLLEŞME MODELİ VE TEHLİKE HARİTASI



Bu çalışma, Türkiye’de 21. yüzyıl boyunca çölleşme tehlikesinin temel belirleyicisinin, tüm senaryolarda tutarlı biçimde öngörülen sıcaklık artışı olduğunu ortaya koymaktadır. Sürekli ısınma eğilimi, potansiyel evapotranspirasyonu (PET) üssel olarak artırmakta; bu durum ise özellikle SSP 5-8.5 senaryosu altında aridite indeksi ve toprak neminde belirgin ve geri döndürülemez azalışlara yol açmaktadır.

Çölleşme tehlikesi, ECV, MRI ve MPI iklim modelleri kullanılarak yakın (2025–2050), orta (2050–2075) ve uzak (2075–2100) gelecek dönemler için, SSP 2-4.5 (iyimser) ve SSP 5-8.5 (kötümser) senaryoları kapsamında değerlendirilmiştir. Referans dönemde (2003–2022) %16,92 olan “çok yüksek çölleşme hassasiyetine” sahip alan oranının, tüm modellerde gelecekte artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir.

İyimser senaryoda (SSP 2-4.5), yüzyıl sonunda (2075–2100) bu oran MPI modelinde %16,99 ile mevcut seviyelere yakın kalırken, ECV modelinde %19,81’e yükselmektedir. Kötümser senaryoda (SSP 5-8.5) ise tehlike altındaki alan oranı MPI modelinde %22,27’ye, ECV modelinde ise %27,26’ya kadar çıkmaktadır.

Tablo 7 Model Bazlı Çölleşme Tehlikesi Sonuçları (SSP 2-4.5 İyimser Senaryo)

Kategori	ECV			MRI			MPI		
	2025-2050	2050-2075	2075-2100	2025-2050	2050-2075	2075-2100	2025-2050	2050-2075	2075-2100
Çok Düşük (%)	4,104	3,847	3,407	4,563	4,273	4,236	4,261	4,052	4,304
Düşük (%)	16,822	15,702	14,568	17,932	16,591	15,941	17,141	16,315	16,569
Orta (%)	29,792	28,682	27,654	31,447	29,879	29,251	30,606	29,825	29,462
Yüksek (%)	32,697	33,694	34,557	31,282	32,637	33,167	32,283	32,971	32,678
Çok Yüksek (%)	16,584	18,075	19,814	14,776	16,620	17,405	15,709	16,836	16,987

Tablo 8 Model Bazlı Çölleşme Tehlikesi Sonuçları (SSP 5-8.5 Kötümser Senaryo)

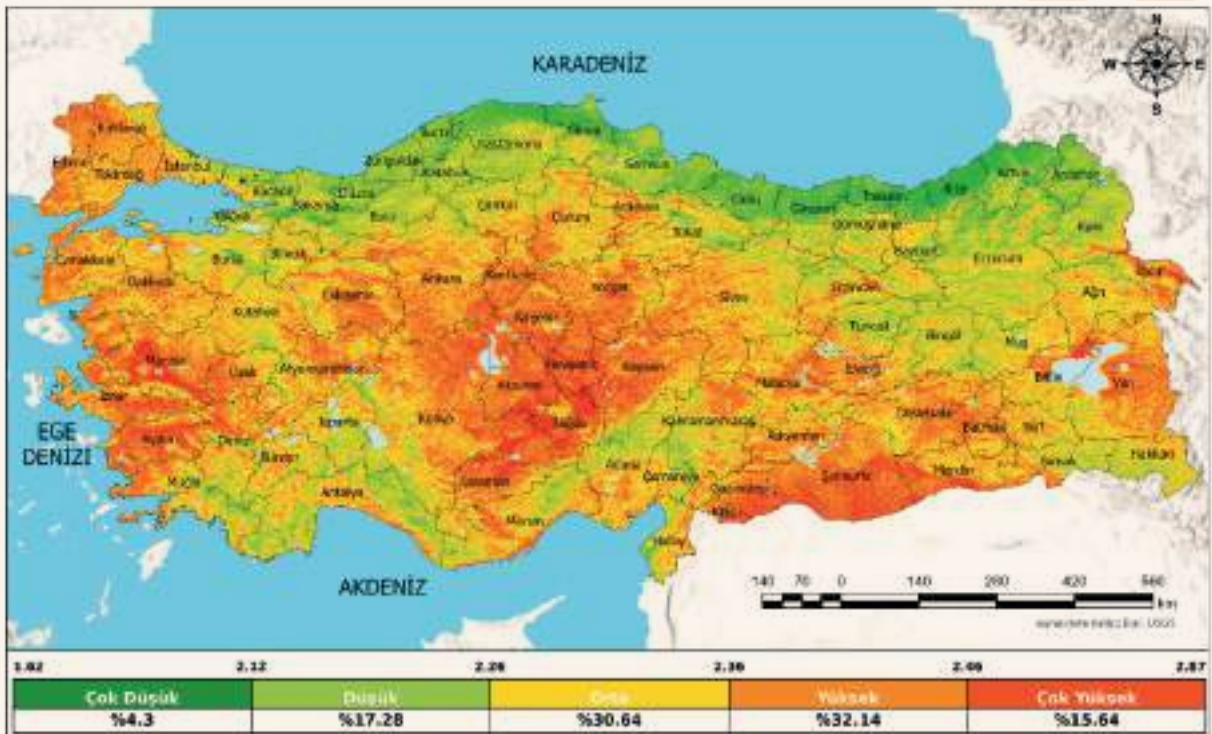
Kategori	ECV			MRI			MPI		
	2025-2050	2050-2075	2075-2100	2025-2050	2050-2075	2075-2100	2025-2050	2050-2075	2075-2100
Çok Düşük (%)	4,193	3,536	2,329	5,004	3,672	3,263	5,057	3,714	3,549
Düşük (%)	17,445	14,363	11,029	19,226	15,652	12,381	18,238	15,408	13,777
Orta (%)	30,359	26,757	23,093	31,619	28,322	24,127	31,260	28,147	25,532
Yüksek (%)	32,160	34,687	36,291	30,304	33,710	35,776	30,942	33,893	34,871
Çok Yüksek (%)	15,844	20,658	27,259	13,846	18,644	24,453	14,503	18,839	22,271

4.1. Çölleşme Tehlike Haritaları (Yakın Gelecek 2025-2050)

Yakın gelecek projeksiyonları, 2003-2022 referans dönemine kıyasla çölleşme tehlikesinde belirgin bir artış öngörmemekle birlikte, senaryolar arasında küçük farklılıklar göstermektedir.

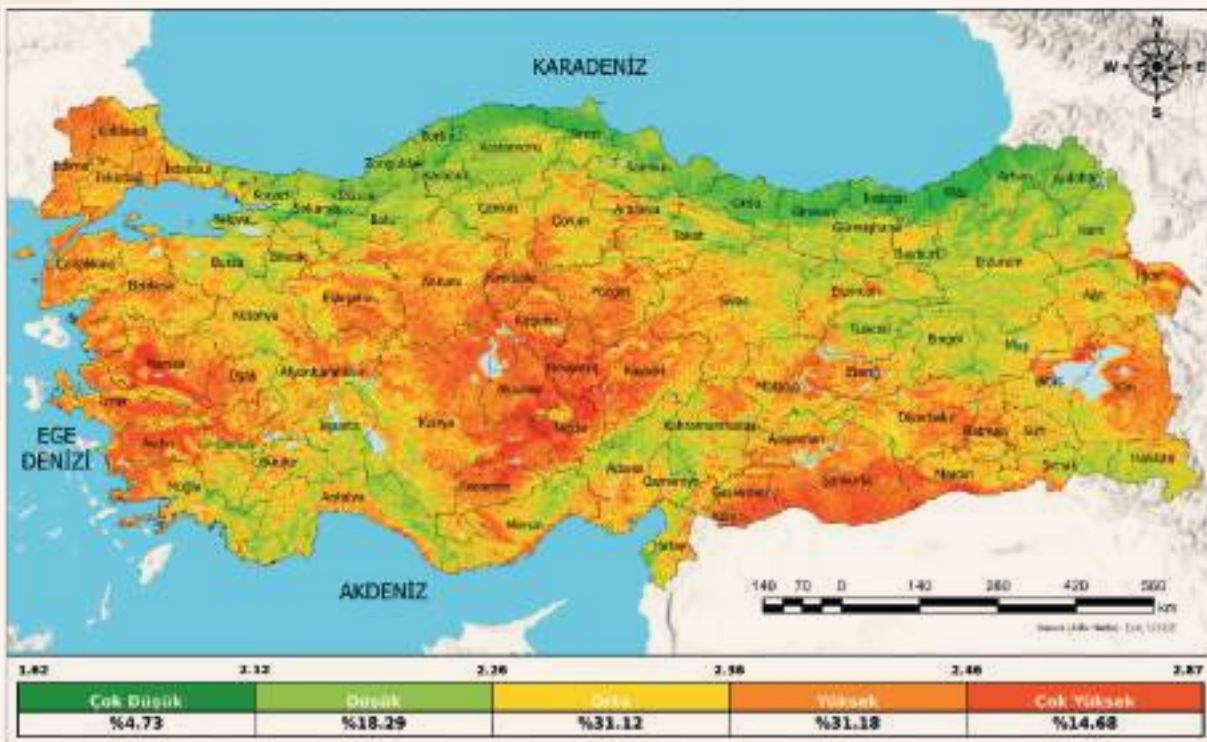
- **SSP 2-4.5 (İyimser Senaryo):** Bu senaryoya göre, çok yüksek tehlike sınıfındaki alanların oranı %15,64'dir. Bu oran, referans döneme (%16,92) göre sınırlı bir azalmaya işaret etmektedir. Orta tehlike sınıfındaki alanların oranı ise %29,31'den %30,65'e yükselmiştir (Şekil 4).
- **SSP 5-8.5 (Kötümser Senaryo):** Kötümser senaryoda ise çok yüksek tehlike sınıfındaki alanlar %14,68 olarak hesaplanmıştır. Bu senaryoda da referans döneme göre bir miktar azalma görülmektedir. Düşük tehlike sınıfındaki alanların oranı %16,75'dan %18,29'a çıkmıştır (Şekil 5).

Şekil 4 Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası (SSP 2-4.5 2025-2050)





Şekil 5 Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası (SSP 5-8.5 2025-2050)



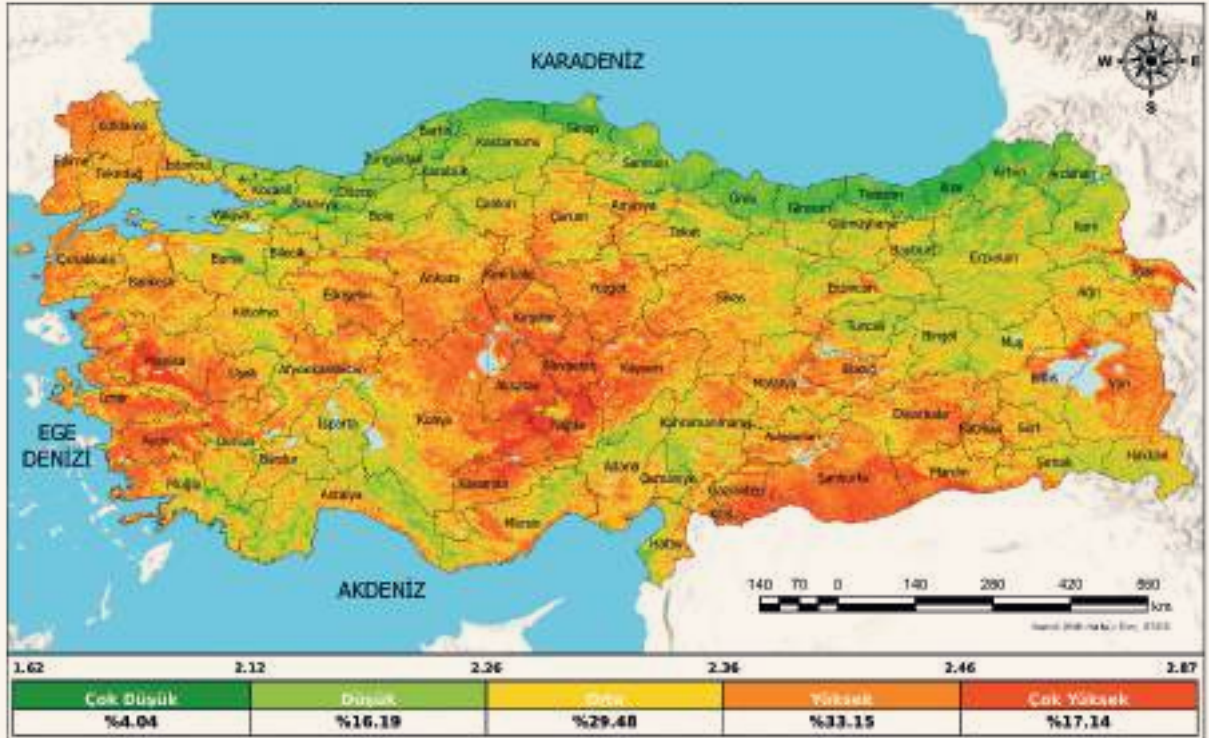
4.2. Çölleşme Tehlike Haritaları (Orta Gelecek 2050-2075)

Orta gelecek dönemi, çölleşme tehlikesinin belirginleşmeye başladığı ve senaryolar arasındaki farkın açıldığı bir periyodu temsil etmektedir.

- **SSP 2-4.5 (İyimser Senaryo):** Bu senaryoda, “çok yüksek tehlike” altındaki alanların oranı %17,14’e yükselmiş olup, bu durum referans döneme kıyasla belirgin bir artışı göstermektedir. Çok yüksek tehlike sınıfındaki alanların yeniden referans dönemi seviyesini aşması, tehlike eğiliminin devam ettiğini ortaya koymaktadır (Şekil 6).
- **SSP 5-8.5 (Kötümser Senaryo):** Kötümser senaryo altında, çölleşme tehlikesinin daha ciddi bir boyuta ulaştığı görülmektedir. “Çok yüksek tehlike” sınıfındaki alanların oranı %19,34’e çıkarken, “çok düşük” ve “düşük” tehlike sınıflarının toplam oranı referans dönemdeki %21,59’dan %18,76’ya gerilemiştir (Şekil 7).

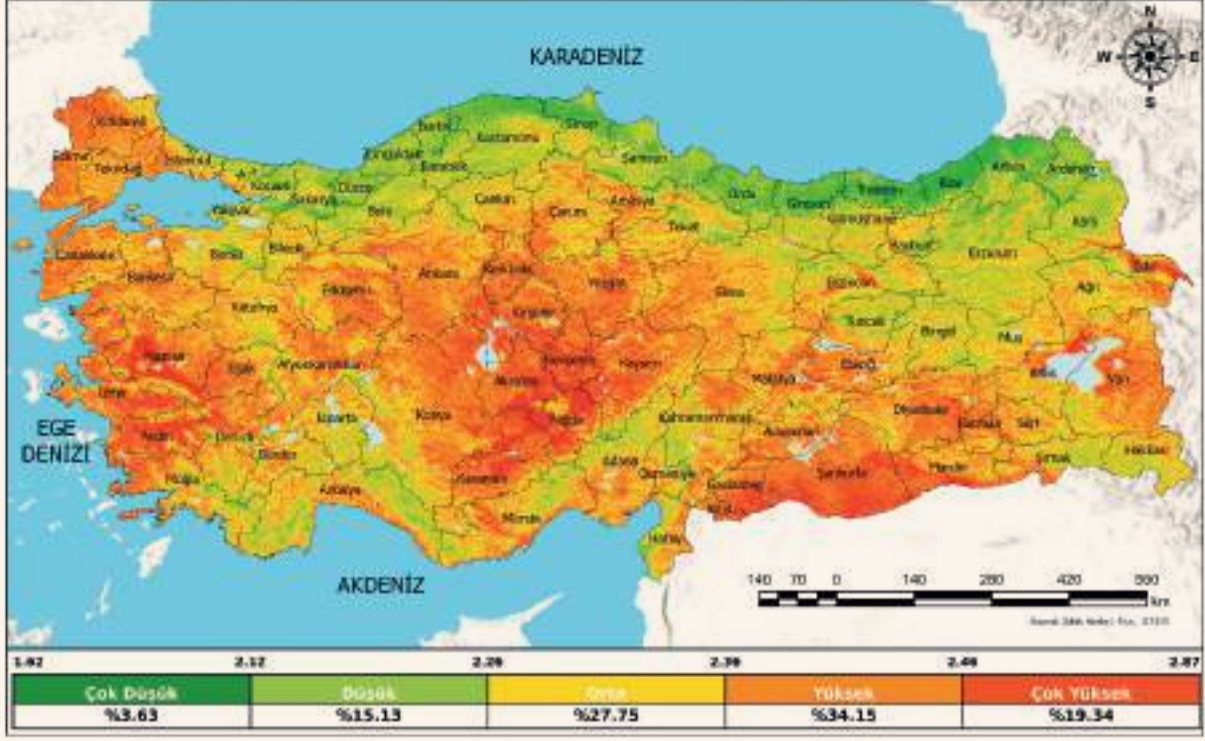
Bu dönemde, özellikle kötümser senaryo koşullarında, İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu’da yüksek hassasiyetli alanların coğrafi olarak genişlediği; Akdeniz ve Ege bölgelerinin iç kesimlerindeki “orta” tehlike düzeyindeki alanların ise “yüksek” tehlike sınıfına doğru kaydığı gözlemlenmektedir.

Şekil 6 Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası (SSP 2-4.5 2050-2075)





Şekil 9 Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası (SSP 5-8.5 2075-2100)



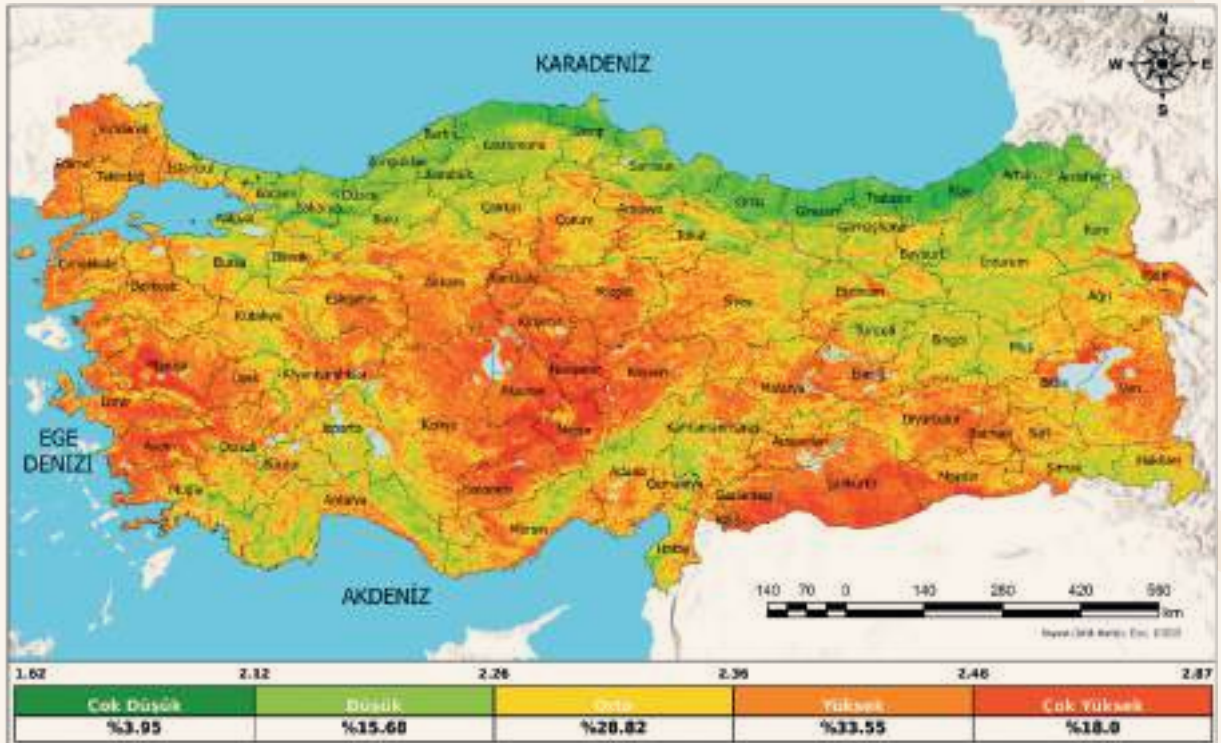
4.3. Çölleşme Tehlike Haritaları (Uzak Gelecek 2075-2100)

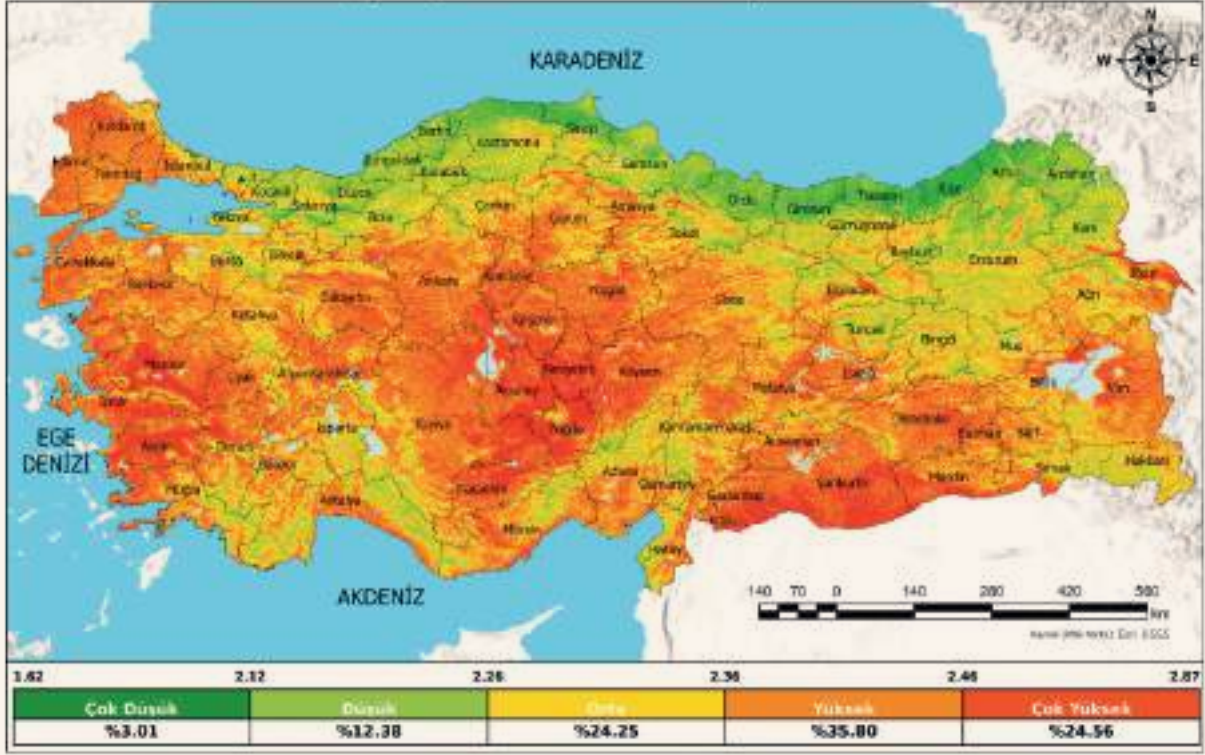
Yüzyılın son çeyreği, iklim senaryolarının Türkiye üzerindeki etkilerinin en belirgin ve dramatik biçimde hissedildiği dönem olarak öne çıkmaktadır. Bu süreçte iki senaryo arasındaki fark açık bir şekilde ortaya konmaktadır.

- **SSP 2-4.5 (İyimser Senaryo)** altında, çölleşme tehlikesindeki artış eğilimi devam etmektedir. “Çok yüksek tehlike” sınıfındaki alanların oranı %18’e ulaşmış olup, bu durum iklim değişikliğiyle mücadelede orta düzeyde başarı sağlansa dahi çölleşme hassasiyetinin artmaya devam edeceğini göstermektedir (Şekil 8).
- **SSP 5-8.5 (Kötümser Senaryo):** Kötümser senaryo, Türkiye için son derece endişe verici bir tablo çizmektedir. Çok yüksek tehlike altındaki alanların toplam oranı %24,56 ‘ya çıkmaktadır. En dikkat çekici değişim, çok yüksek tehlike sınıfındaki alanların oranının referans döneme göre (%16,92) büyük bir artışla %24,56’ya ulaşmasıdır. Buna karşılık, çok düşük ve düşük tehlike sınıfındaki güvenli alanların toplamı %15,39’a kadar gerilemiştir (Şekil 9).

Uzak gelecek projeksiyonlarına göre, kötümser senaryo (SSP 5-8.5) altında Konya Havzası, Güneydoğu Anadolu ve Iğdır gibi halihazırda hassas bölgelerde çölleşme tehlikesinin en yüksek seviyelere ulaştığı; ayrıca Ege, Akdeniz ve Marmara bölgelerinin iç kesimlerine doğru belirgin bir genişleme eğiliminin ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu dönemde, Karadeniz kıyı şeridi dışındaki yeşil alanların da önemli ölçüde azaldığı dikkat çekmektedir.

Şekil 8 Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası (SSP 2-4.5 2075-2100)



**Şekil 9** Türkiye Çölleşme Tehlike Haritası (SSP 5-8.5 2075-2100)

Çölleşme tehlikesi, yüzyılın ikinci yarısından itibaren Konya Kapalı Havzası ve Güneydoğu Anadolu'nun ötesine geçerek, Ege, Akdeniz ve Marmara bölgelerinin iç kesimlerine doğru belirgin biçimde genişlemektedir. Bu durum, Türkiye'de çölleşme hassasiyetinin yalnızca mevcut kurak alanlarla sınırlı kalmadığını, ekolojik ve sosyoekonomik açıdan daha yoğun bölgeleri de etkileme potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Yağış ve rüzgâr projeksiyonlarının net bir eğilim ortaya koymamakla birlikte yüksek değişkenliğini sürdürmesi, kuraklaşan toprakların ani ve şiddetli erozyon olaylarına karşı savunmasızlığını artırmaktadır.

Elde edilen bulgular, tehlike haritalarının yalnızca mevcut durumu değil, gelecekteki dinamik risk alanlarını da ortaya koyan stratejik bir araç olduğunu göstermektedir. Üretilen haritalar, çölleşmeyle mücadele, arazi planlaması ve iklim değişikliğine uyum politikalarında mekânsal önceliklendirme yapılmasına imkân tanıyarak, ulusal ölçekte kaynak yönetimi ve arazi kullanımı planlamasında bilim temelli, öngörülü ve sürdürülebilir bir yaklaşımın uygulanmasına katkı sağlayacaktır.





T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI
ÇÖLLEŞME VE EROZYONLA MÜCADELE GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

5





SONUÇ



Bu çalışma kapsamında, Türkiye'nin çölleşmeye hassasiyeti, 2003-2022 dönemi verileri ve öklid mesafesi tabanlı çok kriterli bir model kullanılarak 30 metre gibi yüksek bir mekânsal çözünürlükte haritalanmış ve detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Türkiye kara alanlarının ortalama olarak %16,92 “çok yüksek”, %32,19'unun “yüksek” hassasiyet sınıflarında yer aldığını ortaya koymaktadır.

En yüksek hassasiyetin, beklendiği gibi, kurak ve yarı kurak iklim koşullarının hâkim olduğu Güneydoğu Anadolu ve İç Anadolu Bölgeleri'nde yoğunlaştığı, buna karşın bol yağışlı ve yoğun orman örtüsüne sahip Karadeniz Bölgesi'nin ise çölleşmeye karşı en dirençli alan olduğu teyit edilmiştir. Hassasiyetin genel mekânsal dağılımında iklim (özellikle aridite ve yağış) ve buna bağlı olarak gelişen bitki örtüsü (NDVI) faktörlerinin birincil derecede etkili olduğu, toprak özellikleri (tekstür, organik karbon içeriği, toprak nem) ve topografik faktörlerin ise bölgesel ve yerel ölçekteki farklılıklarda önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir.

Yıllık hassasiyet analizleri, çölleşme hassasiyetinin statik bir durum olmadığını ve özellikle 2008, 2013, 2020, 2021 ve 2022 gibi ülke genelinde iklimsel stresin arttığı kurak yıllarda “yüksek” ve “çok yüksek” hassasiyetli alanların oranının belirgin bir şekilde artabildiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular ve değerlendirmeler ışığında, üretilen hassasiyet haritası ve analizleri, çölleşmenin göreceli mekânsal dağılımını gösteren, riskli bölgelerin belirlenmesine ve önceliklendirilmesine yardımcı olan stratejik bir araç olarak değerlendirilmelidir.

Bu çalışma aynı zamanda, CMIP 6 küresel iklim modellerinin WRF ile dinamik ölçek küçültülmesiyle elde edilen yüksek çözünürlüklü projeksiyonlarına dayanarak, Türkiye'nin 21. yüzyıldaki çölleşme tehlikesinin temel itici gücünün, tüm senaryolar altında tutarlı bir şekilde öngörülen ve yüzyıl sonunda 4-6°C'yi bulabilen sıcaklık artışı olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu sürekli ısınma, potansiyel evapotranspirasyonu (PET) üssel olarak artırmakta ve bu durum, özellikle SSP 5-8.5 senaryosu altında aridite İndeksi ile toprak neminde sistematik ve geri döndürülemez bir düşüş trendine yol açmaktadır.



Bu durumun kantitatif sonuçları son derece çarpıcıdır: Referans dönemde (2003-2022) %49,1 olan “yüksek” ve “çok yüksek” tehlike sınıflarının toplam oranı, yüzyıl sonunda (2075-2100) iyimser senaryo (SSP 2-4.5) altında %51,55’e çıkarken; mevcut politikaların devamı halindeki kötümser senaryo (SSP 5-8.5) altında ise %60,36’ya ulaşarak kritik bir eşiği aşmaktadır. En endişe verici değişim, “çok yüksek” tehlike sınıfının payının referans dönemdeki %16,92’den, kötümser senaryoda %24,56’ya artmasıdır. Trend analizleri, bu durumun ECV-SSP 5-8.5 gibi en olumsuz projeksiyonlarda yıllık +0,455 puanlık istatistiksel olarak anlamlı bir artışla gerçekleştiğini, yani risk profiline tehlikeli uçlara doğru kutuplaştığını göstermektedir.

Tehlikenin mekânsal dağılımı, Konya Kapalı Havzası ve Güneydoğu Anadolu gibi geleneksel bölgelerle sınırlı kalmamakta; yüzyılın ikinci yarısından itibaren Ege, Akdeniz ve Marmara’nın iç kesimlerine doğru belirgin bir genişleme trendi göstermektedir. Öte yandan, yağış ve rüzgâr projeksiyonlarının net bir trend göstermemesi ancak yüksek değişkenliği koruması, kuraklaşmayla zayıflayan toprakları ani erozyon olaylarına karşı daha savunmasız bırakarak ikincil ama kritik bir risk oluşturmaktadır.

REFERANSLAR

Cheng, S. L., Ouyang, H., Niu, H. S., Wang, L., Zhang, F., Gao, J. Q. ve Tian, Y. Q. (2004) “Spatial and temporal dynamics of soil organic carbon in reserved desertification area - A case study in Yulin City, Shaanxi Province, China”, Chinese Geographical Science, 14(3), 245–250.

Reichert, J. M., Amado, T. J. C., Reinert, D. J., Rodrigues, M. F. ve Suzuki, L. E. A. S. (2016) “Land use effects on subtropical, sandy soil under sandization/desertification processes”, Agriculture, Ecosystems and Environment, 233, 370–380.

Zhang, C., Wang, X., Li, J., Zhang, Z. ve Zheng, Y. (2021) “The impact of climate change on aeolian desertification in northern China: Assessment using aridity index”, Catena, 207(November 2020), 105681.

Zhao, Y., Li, S., Yang, D., Lei, J. ve Fan, J. (2023) “Spatiotemporal Changes and Driving Force Analysis of Land Sensitivity to Desertification in Xinjiang Based on GEE”, Land, 12(4), 1–20.





T.C.

ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI
ÇÖLLEŞME VE EROZYONLA MÜCADELE GENEL MÜDÜRLÜĞÜ



www.cem.csb.gov.tr

