



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ŞANLIURFA KOŞULLARINDA MERA ALANLARINDA BAZI TOPRAK
ÖZELLİKLERİNİN MEKANSAL DEĞİŞKENLİĞİNİN JEOİSTATİSTİK VE
COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ VE HARİTALANMASI**

**İshak YETİM
TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI**

**ŞANLIURFA
2026**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ŞANLIURFA KOŞULLARINDA MERA ALANLARINDA BAZI TOPRAK
ÖZELLİKLERİNİN MEKANSAL DEĞİŞKENLİĞİNİN JEOİSTATİSTİK VE
COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ VE HARİTALANMASI**

**İshak YETİM
TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI**

DANIŞMAN: Prof. Dr. Recep GÜNDOĞAN

**ŞANLIURFA
2026**

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca bana her konuda destek olan ve motivasyonu ile ıfık tutan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Recep GÜNDÖĞAN'a, arazi ve teknoloji konusundaki bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Sayın hocam Prof. Dr. Hikmet GÜNAL'a çok teşekkür eder, saygılarımı sunarım. İstatistik analizlerin değerlendirilmesindeki destekleri için Sayın Hocam Dr. Öğretim Üyesi Miraç KILIÇ'a teşekkür ederim. Değerli Hocam Prof. Dr. Abdulkadir SÜRÜCÜ' ye teşekkür ederim. Saygıdeğer Hocam Prof. Dr. İzzet AÇAR'a teşekkür ederim. Sayın Hocam Prof. Dr. Mehmet ŞENBAYRAM'a teşekkür ederim. Birikimlerini bizimle paylaşan Yüksek Lisans eğitim ve öğretim süresi boyunca engin bilgi ve tecrübelerini bize aktaran tüm Sayın Hocalarıma teşekkür ederim. Destekleri için başta Eşim Hacire YETİM'e ve Kardeşim Mehmet Selim AÇAR'a teşekkür eder, aileme olan sevgi ve şükranlarımı sunmak isterim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
KISALTMALAR	v
SİMGELER.....	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı, Önemi ve Problemin Tanımı.....	1
1.2. Araştırma Soruları	3
1.3. Araştırma Hipotezleri	4
1.4. Varsayımlar.....	4
1.5. Sınırlılıklar.....	4
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	6
2.1. Mera Ekosistemleri ve İşlevleri.....	6
2.2. Toprak Özelliklerinin Mekânsal Değişkenliği	6
2.3. Uzaktan Algılama ve NDVI Kavramı	7
2.4. Jeostatistiksel Yaklaşım ve Mekânsal Bağımlılık	8
2.5. NDVI–Toprak İlişkisi: Bütüncül Model.....	9
3. GEREÇ ve YÖNTEM	11
3.1. Araştırma Alanın Özellikleri.....	11
3.2. Yöntemler	14
3.2.1. Arazi Çalışmaları ve Örneklem Tasarımı	14
3.2.2. Laboratuvar Analizleri	15
3.2.3. Arazi Örtüsü Değişiminin Belirlenmesi.....	15
3.2.3.1. Uydu Verilerinin Veri Setinin Hazırlanması	15
3.2.3.2. Görüntü Ön İşleme Süreci.....	17
3.2.3.3. Spektral İndeks Hesaplamaları.....	17
3.2.3.4. Tanımlayıcı İstatistikler	18
3.2.4. Jeostatistiksel Analizler.....	18
3.2.4.1. Yarıvaryogram Analizi	18
3.2.4.2. Kriging Enterpolasyonu	19
3.2.5. NDVI–Toprak İlişkilerinin Analizi	19
3.2.6. CBS ve Haritalama Çalışmaları	20
4. BULGULAR	21
4.1. Tanımlayıcı İstatistikler	21
4.2. Toprak Özellikleri Arasındaki İlişkiler.....	22
4.3. Arazi Örtüsü ve NDVI Analizi	23
4.4. Jeostatistiksel Modelleme ve Mekânsal Süreklilik.....	24
4.5. Mekânsal Dağılım Haritaları	25
5. TARTIŞMA.....	29
5.1. Toprak Fiziksel Özellikleri ve Yarı Kurak Alan Dinamikleri	30
5.2. Organik Maddenin Merkezi Rolü ve Besin Elementi Dinamikleri	30
5.3. Toprak pH'sı, Kireç ve Kimyasal Denge Mekanizmaları.....	31
5.4. Mekânsal Bağımlılık ve Jeostatistiksel Yorum	31

5.5. NDVI Bulgularının Ekolojik Değerlendirmesi.....	32
5.6. Sürdürülebilir Arazi Yönetimi Açısından Çıkarımlar	32
6. SONUÇLAR	34
7. ÖNERİLER	35
KAYNAKLAR.....	37
ÖZ GEÇMİŞ	40

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞANLIURFA KOŞULLARINDA MERA ALANLARINDA BAZI TOPRAK ÖZELLİKLERİNİN MEKANSAL DEĞİŞKENLİĞİNİN JEOİSTATİSTİK VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ VE HARİTALANMASI

İshak YETİM

HARRAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı Prof. Dr. Recep GÜNDOĞAN

Yıl: 2026, Sayfa: 40

Bu çalışma, yarı kurak koşullarda yer alan bir mera alanında toprak özelliklerinin mekânsal değişkenliğini nicel olarak belirlemek ve bu değişkenliğin vejetasyon dinamikleriyle ilişkisini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırma alanından alınan toprak örneklerinde tekstürel fraksiyonlar (kum, kil, silt), organik madde (OM), CaCO_3 , pH, elektriksel iletkenlik (EC), yarayıslı fosfor (P) ve değişebilir potasyum (K) analiz edilmiştir. Tanımlayıcı istatistikler, korelasyon analizi ve jeostatistiksel modelleme uygulanmıştır. Yarıvaryogram analizlerinde en uygun model küresel model olarak belirlenmiş; nugget/sill oranının $\approx 0,10$ olması güçlü mekânsal bağımlılığa işaret etmiştir. Ortalama menzil değeri 226,7 m olarak hesaplanmıştır.

Toprakların ortalama kum, kil ve silt oranları sırasıyla %49,63, %32,11 ve %18,26 olarak belirlenmiştir. OM ortalaması %3,68; CaCO_3 %11,5; pH 7,9–8,22; EC 0,24–0,48 dS m^{-1} aralığında saptanmıştır. Değişebilir K (191–671 mg kg^{-1}) ve yarayıslı P (4–15 mg kg^{-1}) orta-yüksek değişkenlik göstermiştir (CV %27,6–36,7). OM ile P ve K arasında güçlü pozitif ilişkiler belirlenmiştir. Ordinary Kriging ile üretilen haritalar belirgin alansal heterojenliği ortaya koymuştur.

Üç dönem NDVI verisi (2020 Nisan, 2020 Ağustos, 2025 Nisan) karşılaştırıldığında ortalama değerin 0,27'den 0,09–0,28 aralığına gerilediği belirlenmiş ve vejetasyon yoğunluğunda azalma eğilimi saptanmıştır. Bulgular, mera sisteminde pedolojik özelliklerin yapısal faktörlerce kontrol edildiğini ve organik maddenin verimlilik açısından kritik rol oynadığını göstermektedir. Sonuçlar, yarı kurak mera alanlarında alan-spesifik yönetim stratejilerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: NDVI, Jeostatistik, Kriging, Mekânsal Bağımlılık, Organik Madde, Yarı Kurak Mera

ABSTRACT

MASTER’S THESIS

DETERMINATION AND MAPPING OF SPATIAL VARIABILITY OF SOME SOIL PROPERTIES IN PASTURE AREAS IN ŞANLIURFA CONDITIONS WITH GEOSTATISTICS AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

İshak YETİM

HARRAN UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

DEPARTMENT OF SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION

Thesis Advisor: Prof. Recep GÜNDOĞAN

Year: 2026, Page: 40

This study aimed to quantify the spatial variability of soil properties in a semi-arid rangeland ecosystem and to evaluate their relationship with vegetation dynamics using geostatistical and remote sensing approaches. Soil samples were analyzed for texture fractions (sand, clay, silt), soil organic matter (SOM), CaCO_3 , pH, electrical conductivity (EC), available phosphorus (P), and exchangeable potassium (K). Descriptive statistics, correlation analysis, and geostatistical modeling were applied. Semivariogram analysis indicated that the spherical model best fitted all variables, with a nugget/sill ratio of approximately 0.10, demonstrating strong spatial dependence. The mean spatial range was calculated as 226.7 m. Mean sand, clay, and silt contents were 49.63%, 32.11%, and 18.26%, respectively, indicating a sandy-clay texture dominance. SOM averaged 3.68%, CaCO_3 11.5%, pH ranged between 7.9 and 8.22 (slightly alkaline), and EC varied from 0.24 to 0.48 dS m^{-1} . Exchangeable K (191–671 mg kg^{-1}) and available P (4–15 mg kg^{-1}) exhibited moderate to high variability (CV 27.6–36.7%). Strong positive correlations were detected between SOM and both P and K, highlighting the regulatory role of organic matter in nutrient dynamics. Ordinary Kriging interpolation maps revealed pronounced spatial heterogeneity across the study area.

NDVI values from three periods (April 2020, August 2020, April 2025) showed a decline from a mean of 0.27 to a range of 0.09–0.28, indicating reduced vegetation density over time. Results demonstrate that soil variability is largely controlled by structural pedogenetic factors and that SOM plays a critical role in rangeland productivity. The findings emphasize the necessity of site-specific management strategies for sustainable semi-arid rangeland systems.

KEYWORDS: NDVI, Geostatistics, Kriging, Spatial Dependence, Organic Matter, Semi-Arid Rangeland

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Araştırmanın teorik çerçevesi	10
Çizelge 3.1.	Şanlıurfa iline ait 1991-2020 yıllarını içeren mevsim normalleri (MGM, 2024)	12
Çizelge 3.2.	Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) Şanlıurfa Meteoroloji İstasyonu (2019-2020 ve 2024-2025). Aylık ortalama yağış ve ortalama sıcaklık verileri (MGM, 2025)	13
Çizelge 3.3.	Sentinel-2 Bant Özellikleri Tablosu	16
Çizelge 4.1.	Toprak Özelliklerine Ait Tanımlayıcı İstatistikler	22
Çizelge 4.2.	Toprak Özelliklerine ait Arazideki Korelasyon Sonuçları	23
Çizelge 4.3.	Araştırma alanının üç dönme ait NDVI değerlerine ait tanımlayıcı istatistikler	24
Çizelge 4.4.	Optimal Kriging Parametreleri	25

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Çalışma alanının konumu	11
Şekil 3.2.	Araştırma alanındaki Toprak örnekleme noktaları	14
Şekil 4.1.	Araştırma alanının üç döneme ait NDVI görüntüleri	24
Şekil 4.2.	Araştırma alanı mera kalitesi	24
Şekil 4.3.	Toprak Özelliklerine Ait Variogram Grafikleri-(1/2)	26
Şekil 4.4.	Toprak Özelliklerine Ait Variogram Grafikleri-(2/2)	27
Şekil 4.5.	Toprak Özelliklerinin Mekânsal Dağılım Haritaları(1/2)	28
Şekil 4.6.	Toprak Özelliklerinin Mekânsal Dağılım Haritaları(2/2)	29

KISALTMALAR

dS/m	desi siemens / metre
c.	Cilt
EH	Ekosistem Hizmetleri
GPS	Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
mg	Miligram
mg/kg	Miligram/Kilogram
mm	Milimetre
NDVI	Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi
OK	Ordinary Kriging
OM	Organik madde
vb.	ve benzeri

SİMGELER

%	Yüzde
AO	Range
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat (kireç)
CO	Nugget
CO+C	Sill
CO ₂	Karbondioksit
EC	Elektriksel iletkenlik
HCl	Hidroklorik asit
K	Potasyum
P	Fosfor
° C	Santigrad Derece

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı, Önemi ve Problemin Tanımı

Bu çalışmanın temel amacı, yarı kurak bir mera alanında NDVI verileri ile temel toprak özelliklerini birlikte değerlendirerek mekânsal örüntüleri ortaya koymak ve sürdürülebilir mera yönetimine yönelik bilimsel bir zemin oluşturmaktır.

Bu kapsamda:

- Mera durumunun NDVI verileri ile nicel olarak belirlenmesi,
- Kil, kum, silt, organik madde, kireç, pH, EC, P ve K gibi temel toprak parametrelerinin mekânsal dağılımının jeostatistiksel yöntemlerle ortaya konulması,
- Yarıvaryogram modellerinin geliştirilmesi ve Ordinary Kriging yöntemi ile tematik haritaların oluşturulması,
- NDVI değerleri ile toprak özellikleri arasındaki ilişkilerin analiz edilmesi amaçlanmıştır.

Mera ekosistemleri, yarı kurak bölgelerde hem ekolojik denge hem de kırsal ekonomik sürdürülebilirlik açısından stratejik öneme sahiptir. Bu alanların doğru yönetilmemesi; toprak erozyonu, organik madde kaybı, biyolojik çeşitlilik azalması ve karbon depolama kapasitesinin düşmesi gibi çok yönlü çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle mera alanlarının bilimsel temelli, mekânsal olarak duyarlı ve alana özgü yönetim stratejileriyle ele alınması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma, uzaktan algılama verileri ile arazi temelli toprak analizlerini birlikte değerlendirerek mera ekosistemlerinin hem vejetatif hem de pedolojik boyutunu bütüncül biçimde incelemektedir. NDVI gibi uydu tabanlı göstergelerin, jeostatistiksel yöntemlerle elde edilen toprak dağılım haritalarıyla ilişkilendirilmesi; mera durumunun yalnızca yüzeysel bitki örtüsü göstergeleriyle değil, aynı zamanda toprak verimliliği ve yapısal özellikler bağlamında da değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır.

Ayrıca bu çalışma, yarı kurak iklim koşullarına sahip Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde mera topraklarının mekânsal değişkenliğini ayrıntılı biçimde ortaya koyarak bölgesel ölçekte

önemli bir bilgi boşluğunu doldurmayı hedeflemektedir. Elde edilecek bulguların;

- Alana özgü otlatma planlarının geliştirilmesine,
- Gübreleme ve toprak iyileştirme stratejilerinin optimize edilmesine,
- Rehabilitasyon çalışmalarının önceliklendirilmesine,
- Mera yönetiminde karar destek mekanizmalarının güçlendirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

Bu yönüyle çalışma, hem akademik literatüre katkı sunmakta hem de uygulamaya dönük sürdürülebilir arazi yönetimi politikalarına bilimsel altyapı oluşturmaktadır.

Yarı kurak ve kurak iklim kuşaklarında geniş alanlara yayılan meralar; yalnızca hayvancılık faaliyetleri için kaba yem kaynağı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda toprak ve su kaynaklarının korunması, biyolojik çeşitliliğin sürdürülebilirliği ve atmosferik karbonun tutulması gibi kritik ekosistem hizmetlerini yerine getiren çok işlevli doğal sistemlerdir (FAO, 2020; Nurroh, 2005). Ancak iklim değişikliğinin etkilerinin artması, aşırı ve düzensiz otlatma, yanlış arazi kullanım uygulamaları ve planlama eksiklikleri, bu alanlarda bozunumu hızlandırmakta ve üretkenliği önemli ölçüde azaltmaktadır. Türkiye’de mera alanlarının son yaklaşık yüz yıl içerisinde 50 milyon hektardan 13,3 milyon hektara gerilemiş olması (TOB, 2024), bu sorunun hem çevresel hem de sosyo-ekonomik boyutunu açıkça ortaya koymaktadır.

Mera bozunumu çoğu zaman organik madde kaybı, toprak yapısının zayıflaması, besin elementleri dengesizliği ve bitki örtüsü kompozisyonunun değişmesi şeklinde kendini göstermektedir (Reynolds vd., 2007; Suh vd., 2024). Bu değişimler ise mekânsal olarak homojen değildir; aksine topoğrafya, ana materyal, iklim, biyolojik faaliyetler ve otlatma baskısının etkileşimi sonucunda kısa mesafelerde dahi önemli farklılıklar ortaya çıkabilmektedir (Goovaerts, 1999; Tesfahunegn vd., 2011).

Geleneksel mera yönetimi yaklaşımlarında çoğu zaman alanın homojen kabul edilmesi, bazı bölgelerde aşırı müdahaleye, bazı bölgelerde ise yetersiz uygulamalara neden olmakta; bu durum hem ekonomik kayıplara hem de ekolojik bozunuma yol açmaktadır. Dolayısıyla mera topraklarının mekânsal değişkenliğinin nicel yöntemlerle ortaya konulması

ve vejetasyon göstergeleriyle birlikte değerlendirilmesi sürdürülebilir yönetim açısından temel bir gereklilik haline gelmiştir.

Uzaktan algılama teknikleri, geniş alanların izlenmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), bitki örtüsü yoğunluğu, biyokütle ve vejetasyon sağlığı hakkında güvenilir göstergeler sağlamaktadır (Balata vd., 2022; Pettorelli, 2013). Ancak NDVI tek başına toprak özelliklerini ve bozunuma yol açan pedolojik süreçleri doğrudan açıklamada yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle NDVI verilerinin arazi temelli toprak analizleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Jeoistatistiksel yöntemler, toprak özelliklerinin mekânsal bağımlılık yapısını tanımlamada ve örneklenmeyen alanlar için güvenilir tahminler üretmede güçlü araçlar sunmaktadır. Yarıvaryogram modelleri ve Kriging enterpolasyon teknikleri sayesinde sürekli dağılım haritaları oluşturulabilmekte ve alana özgü yönetim birimleri belirlenebilmektedir (Isaaks vd., 1988; Oliver vd., 2014).

Yarı kurak iklim özelliklerine sahip Güneydoğu Anadolu Bölgesi; yüksek buharlaşma, yaz kuraklığı, düşük organik madde içeriği ve kireçli ana materyal varlığı nedeniyle belirgin toprak heterojenliği göstermektedir (Gündoğan, 2023). Buna rağmen bölgedeki mera alanlarında NDVI verileri ile toprak özelliklerinin birlikte değerlendirildiği ve mekânsal örüntülerin bütüncül olarak ortaya konulduğu çalışmalar sınırlıdır. Bu durum, sürdürülebilir mera yönetimi açısından önemli bir bilgi boşluğudur.

1.2. Araştırma Soruları

Bu çalışma aşağıdaki temel sorulara yanıt aramaktadır:

1. İncelenen mera alanında toprak özellikleri mekânsal olarak anlamlı bir bağımlılık yapısı göstermekte midir?
2. NDVI değerleri ile temel toprak özellikleri arasında istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler var mıdır?
3. Mekânsal değişkenliğin ortaya konulması, mera yönetiminde alana özgü uygulamaların planlanmasına katkı sağlayabilir mi?

1.3. Araştırma Hipotezleri

Bu çalışma aşağıdaki hipotezler çerçevesinde yürütülmüştür:

H1: İncelenen mera alanındaki toprak özellikleri (kil, kum, silt, organik madde, kireç, pH, EC, P ve K) mekânsal bağımlılık göstermektedir.

H2: NDVI değerleri ile özellikle organik madde, fosfor (P) ve potasyum (K) gibi verimlilik parametreleri arasında pozitif ve anlamlı ilişkiler bulunmaktadır.

H3: Geoistatistiksel yöntemlerle elde edilen mekânsal dağılım haritaları, mera alanının homojen olmadığını ve alana özgü yönetim uygulamalarının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

H4: NDVI ile toprak parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi, mera bozunumunun belirlenmesinde tek başına NDVI kullanımına kıyasla daha bütüncül ve güvenilir sonuçlar sağlamaktadır.

1.4. Varsayımlar

Bu araştırma aşağıdaki varsayımlar çerçevesinde yürütülmüştür:

1. Arazi örnekleme noktalarının çalışma alanını temsil etme yeterliliğine sahip olduğu kabul edilmiştir.

2. Laboratuvar analiz sonuçlarının doğru ve güvenilir ölçümler sunduğu varsayılmıştır.

3. Uydu verilerinden elde edilen NDVI değerlerinin, çalışma dönemindeki bitki örtüsü durumunu doğru şekilde yansıttığı kabul edilmiştir.

4. Geoistatistiksel analizlerde kullanılan yarıvaryogram modellerinin mekânsal bağımlılık yapısını yeterli düzeyde temsil ettiği varsayılmıştır.

5. Çalışma süresince arazi kullanımında ani ve olağanüstü değişimlerin gerçekleşmediği kabul edilmiştir.

1.5. Sınırlılıklar

Bu araştırmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır:

1. Çalışma, Şanlıurfa ilinde seçilen belirli bir mera alanı ile sınırlıdır; dolayısıyla

sonuçların farklı ekolojik ve iklimsel koşullara sahip bölgelere doğrudan genellenmesi sınırlı olabilir.

2. NDVI verileri belirli bir zaman dilimine ait olup, mevsimsel ve yıllık değişkenlikler çalışmanın kapsamı dışında kalmıştır.

3. Çalışmada incelenen toprak parametreleri belirli temel özelliklerle sınırlandırılmış; mikro besin elementleri ve biyolojik toprak özellikleri değerlendirmeye alınmamıştır.

4. Jeostatistiksel modelleme sonuçları, örnekleme yoğunluğuna ve dağılımına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

5. Mera durumunu etkileyen sosyo-ekonomik ve yönetimsel faktörler nicel olarak analiz edilmemiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Mera Ekosistemleri ve İşlevleri

Meralar; doğal veya yarı doğal bitki örtüsüne sahip, çoğunlukla otlatma amacıyla kullanılan ve ekolojik açıdan çok işlevli sistemlerdir. Yarı kurak bölgelerde bu alanlar yalnızca hayvancılık için yem kaynağı sağlamakla kalmayıp; aynı zamanda toprak erozyonunun önlenmesi, su döngüsünün düzenlenmesi, karbon sekestrasyonu ve biyolojik çeşitliliğin korunması gibi temel ekosistem hizmetlerini yerine getirmektedir (FAO, 2020).

Kurak ve yarı kurak ekosistemlerde, hayvansal üretimin büyük ölçüde doğal meralara bağımlı olduğu ve dış girdilerin sınırlı kaldığı kırsal yapılarda, meraların hem biyokütle üretimi hem de yem kalitesi bakımından belirleyici bir işlev üstlendiği görülmektedir. Ancak bu alanlar yalnızca tarımsal amaçlı kullanım çerçevesinde değil, tarım dışı faaliyetlerin yaygınlaşması nedeniyle de sürekli daralma eğilimi göstermektedir. Öte yandan mevcut mera varlığının önemli bir bölümü, kuraklık stresine ek olarak yoğun ve kontrolsüz otlatma baskısı altında kalmakta; bu durum bitki kompozisyonunun bozulmasına, örtü yoğunluğunun azalmasına ve üretkenliğin gerilemesine yol açmaktadır. Buna rağmen, hayvancılıkta değerlendirilen kaba yemin yarıdan fazlasının hâlen meralardan temin edilmesi, bu ekosistemlerin stratejik konumunu ve sürdürülebilir yönetim yaklaşımlarının zorunluluğunu açık biçimde ortaya koymaktadır (Avcıoğlu vd., 2004).

Mera ekosistemlerinin sürdürülebilirliği; bitki örtüsü yapısı, tür kompozisyonu, toprak fiziksel ve kimyasal özellikleri ile iklim faktörleri arasındaki dinamik dengeye bağlıdır. Bu sistemlerde meydana gelen bozunum, genellikle bitki örtüsünün zayıflamasıyla başlamakta; zamanla toprak yapısının bozulması, organik madde kaybı ve besin elementleri dengesizliği ile devam etmektedir. Dolayısıyla mera sağlığı, yalnızca vejetatif göstergelerle değil, toprak özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi gereken bütüncül bir kavramdır.

2.2. Toprak Özelliklerinin Mekânsal Değişkenliği

Toprak; oluşum sürecinde ana materyal, iklim, topoğrafya, organizmalar ve zaman faktörlerinin etkileşimiyle şekillenen dinamik bir doğal varlıktır. Bu faktörlerin heterojen dağılımı nedeniyle toprak özellikleri kısa mesafelerde dahi önemli farklılıklar gösterebil-

mektedir (Goovaerts, 1999).

Türkiye’de ve farklı ülkelerde yürütülen pek çok çalışmada, toprakların tekstür, organik madde miktarı, pH değeri ve besin elementi içerikleri gibi özelliklerinin mekânsal değişimini belirlemede jeostatistiksel yaklaşımların yaygın biçimde kullanıldığı belirtilmektedir (Yasrebi vd., 2008; Budak vd., 2018; Kousar vd., 2025). Bu araştırmalar, toprak niteliklerinin alansal dağılımının doğru biçimde haritalanmasının; gübreleme, sulama ve toprak işleme gibi başlıca tarımsal uygulamaların daha etkin planlanmasına ve üretim performansının artırılmasına önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır. Ancak her üretim alanının kendine özgü pedogenetik süreçler ve çevresel faktörler tarafından şekillenmesi, benzer analizlerin yerel ölçekte tekrarlanması gerektiği kılınmaktadır. Dolayısıyla elde edilen verilerin bölgesel koşullar çerçevesinde yorumlanması ve sahaya özgü sürdürülebilir arazi yönetimi yaklaşımlarına dönüştürülmesi ayrı bir önem arz etmektedir.

Özellikle yarı kurak bölgelerde;

- Düşük organik madde içeriği,
- Kireçli ana materyal varlığı,
- Yüksek buharlaşma,
- Düzensiz yağış rejimi

toprak özelliklerinin daha belirgin mekânsal farklılıklar göstermesine neden olmaktadır.

Toprağın fiziksel özellikleri (kil, kum, silt oranı), kimyasal özellikleri (pH, EC, kireç içeriği) ve besin elementleri (P, K gibi) bitki gelişimi üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle toprak özelliklerinin mekânsal dağılımının belirlenmesi, mera üretkenliğinin anlaşılması açısından temel bir kavramsal bileşendir.

2.3. Uzaktan Algılama ve NDVI Kavramı

Arazi kullanımının planlanması, uygulamaya dönük yönetim kararlarının alınması ve çevresel politika süreçlerinin şekillendirilmesi, meraların daha sağlıklı biçimde değerlendiril-

rilmesi için giderek daha ayrıntılı ve güvenilir toprak verilerine dayanmaktadır (Grealish vd., 2015; Brungard vd., 2015). Toprakların mekânsal dağılım özelliklerinin, uzaktan algılama çıktılarıyla ve özellikle NDVI gibi bitki örtüsü göstergeleriyle birlikte ele alınması; tarımsal peyzajların hem yerel hem de küresel ölçekte ekosistem hizmeti üretme kapasitesinin analiz edilmesine olanak sağlamaktadır (Zurlini vd., 2014). Bu tür entegre veri yaklaşımları, kanıta dayalı peyzaj yönetim modellerinin tasarlanmasında temel bir çerçeve sunmakta (Gogoi vd., 2021; Jones vd., 2013) ve peyzaj sistemlerinin uyum gücünün artırılmasına ve uzun dönemli sürdürülebilirliğin desteklenmesine katkıda bulunmaktadır (Zurlini vd., 2013).

Uzaktan algılama, geniş alanların hızlı, ekonomik ve tekrarlanabilir biçimde izlenmesini sağlayan önemli bir teknolojik araçtır. Bitki örtüsünün değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan göstergelerden biri Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI)'dir.

NDVI, kırmızı (Red) ve yakın kızılötesi (NIR) bantların oranlanmasıyla hesaplanmakta ve bitki örtüsünün fotosentetik aktivitesi ile biyokütle miktarı hakkında dolaylı bilgi sağlamaktadır (Pettorelli, 2013). Yüksek NDVI değerleri genellikle sağlıklı ve yoğun bitki örtüsünü, düşük değerler ise seyrek veya stres altındaki vejetasyonu göstermektedir.

Ancak NDVI, toprak özelliklerini doğrudan ölçmemekte; yalnızca bitki örtüsünün verdiği tepki üzerinden dolaylı bir gösterge sunmaktadır. Bu nedenle NDVI'nın toprak parametreleri ile birlikte değerlendirilmesi, mera sağlığının daha doğru yorumlanmasına katkı sağlamaktadır.

2.4. Jeostatistiksel Yaklaşım ve Mekânsal Bağımlılık

Mekânsal değişkenlik kavramı, belirli bir değişkenin konuma bağlı olarak sistematik farklılık göstermesini ifade etmektedir. Toprak özellikleri genellikle rastgele değil, belirli bir mekânsal bağımlılık yapısı çerçevesinde dağılmaktadır.

Jeostatistiksel analizler, bu mekânsal bağımlılığı yarıvaryogram modelleri aracılığıyla nicel olarak tanımlamakta ve Kriging gibi enterpolasyon teknikleriyle örnekleme yapılmayan noktalara ilişkin tahminler üretmektedir (Isaaks vd., 1988; Oliver vd., 2014).

Bu yaklaşımın temel kavramsal dayanağı şudur:

“Birbirine yakın noktalar, uzak noktalara göre daha benzer özellikler gösterme eğilimindedir.”

Bu ilke, mera alanlarında homojen olmayan toprak yapısının ortaya konulmasında kritik öneme sahiptir. Mekânsal bağımlılığın belirlenmesi, alana özgü yönetim birimlerinin oluşturulmasına imkân tanımaktadır.

2.5. NDVI–Toprak İlişkisi: Bütüncül Model

Arazi yüzeyinde bulunan bitki örtüsünün yoğunluğu ve kaplama derecesi, günümüzde büyük ölçüde uydu verilerine dayalı uzaktan algılama teknikleriyle belirlenmekte; bu amaçla en yaygın kullanılan göstergelerden biri Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI)’dir (Fretwell vd., 2011; Fuller, 1998; Jia vd., 2003; Karnieli vd., 2008; Mermer vd., 2015). NDVI’ya ek olarak, çevresel değişkenlere karşı daha duyarlı sonuçlar verebilen Geliştirilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (EVI) (Zhang vd., 2018) ile zemin yansıtımının etkisini azaltmayı hedefleyen Toprağa Duyarlı Bitki Örtüsü İndeksi (SAVI) (Karnieli vd., 2008; Washington-Allen vd., 2003) de bitki örtüsünün nicel analizinde sıklıkla başvurulan spektral indisler arasında yer almaktadır.

Bu çalışmanın kavramsal temeli, mera sağlığının yalnızca bitki örtüsü göstergeleriyle değil, toprak özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiği varsayımına dayanmaktadır.

Kavramsal model şu ilişki zincirine dayanmaktadır:

Toprak özellikleri → Bitki gelişimi → NDVI değeri → Mera durumu

- Organik madde ve besin elementleri arttıkça bitki gelişimi artar.
- Bitki gelişimi arttıkça fotosentetik aktivite ve biyokütle artar.
- Bu durum NDVI değerlerinin yükselmesine yansır.

Dolayısıyla NDVI ile toprak parametreleri arasındaki ilişki, mera üretkenliğinin anlaşılmasında anahtar rol oynamaktadır.

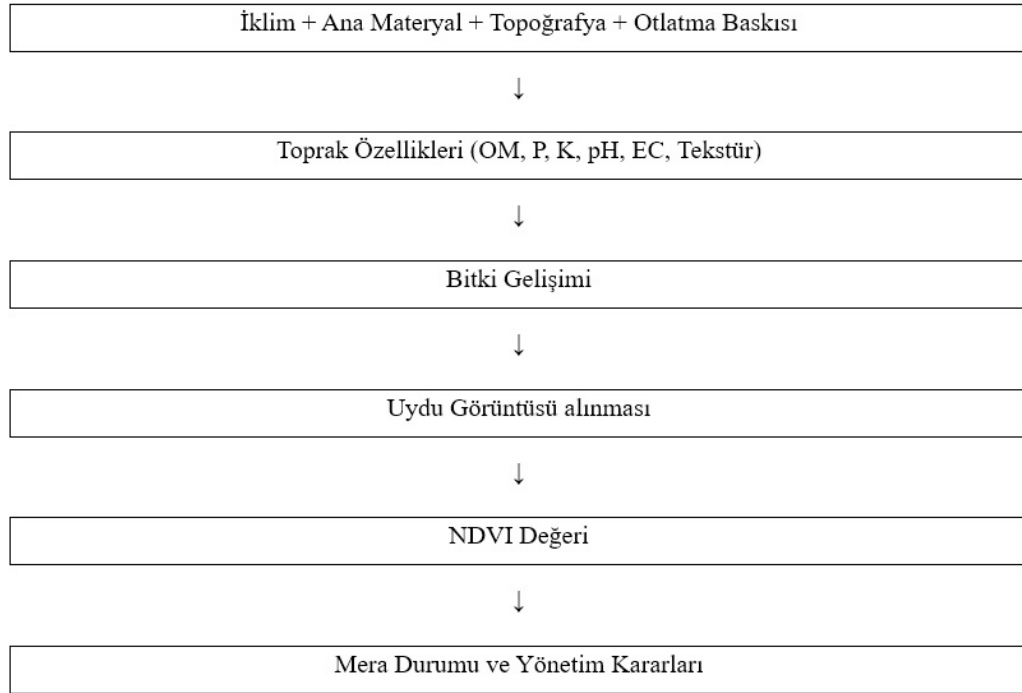
Bu bağlamda çalışma, aşağıdaki bütüncül çerçeveyi benimsemektedir:

1. Toprak özellikleri mekânsal olarak heterojendir.

2. Bu heterojenlik bitki örtüsüne yansır.
3. Bitki örtüsündeki değişim NDVI ile ölçülebilir.
4. Jeostatistiksel analizler bu mekânsal yapıyı nicel olarak ortaya koyabilir.
5. Elde edilen bilgiler, alana özgü sürdürülebilir mera yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine temel oluşturur.

Yukarıda verilen bilgilere dayalı olarak çalışmanın metodolojisini ve hipotezlerini temellendirmek; NDVI ile toprak özelliklerinin birlikte değerlendirilmesinin neden gerekli olduğu aşağıdaki kavramsal çerçeve ile teorik olarak açıklamaktadır.

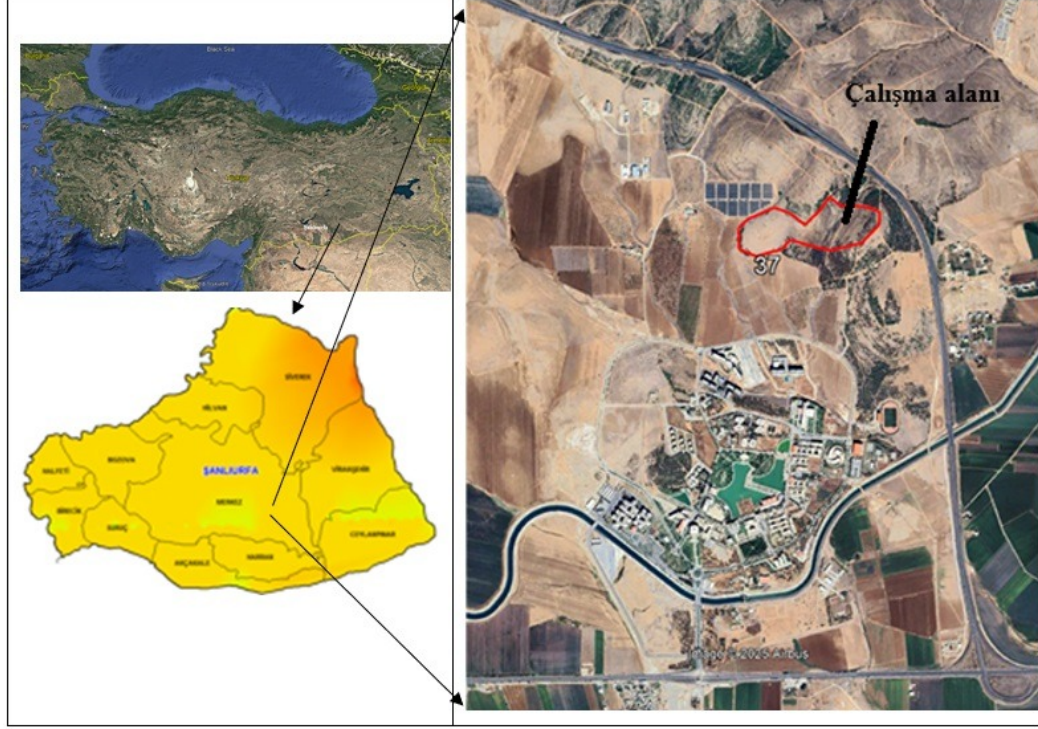
Çizelge 2.1. Araştırmanın teorik çerçevesi



3. GEREÇ ve YÖNTEM

3.1. Araştırma Alanının Özellikleri

Çalışma, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Şanlıurfa il sınırları içerisinde bulunan yarı kurak iklim özelliklerine sahip bir mera alanında yürütülmüştür.



Şekil 3.1. Çalışma alanının konumu

Bölge; yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlı geçen tipik yarı kurak Akdeniz–karasal geçiş iklimine sahiptir. Yıllık ortalama yağış miktarı yaklaşık 400–500 mm arasında değişmekte olup yağışların büyük kısmı kış ve ilkbahar aylarında gerçekleşmektedir. Yaz aylarında yüksek buharlaşma oranı ve uzun süreli kurak dönemler gözlenmektedir.

Çizelge 3.1. Şanlıurfa iline ait 1991-2020 yıllarını içeren mevsim normalleri (MGM, 2024)

ÖLÇÜMLER	AYLAR												
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ortalama Sıcaklık (°C)	6,2	7,5	11,8	16,8	22,8	28,8	32,6	32,0	27,4	21,2	13,1	7,9	19,0
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	10,6	12,5	17,5	23,1	29,6	35,7	39,5	39,0	34,5	27,7	18,9	12,4	25,1
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	3,0	3,6	7,0	11,3	16,6	21,9	25,4	25,0	20,8	15,8	8,9	4,8	13,7
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	3,8	4,8	6,1	7,5	9,3	11,5	11,6	10,5	9,1	7,1	5,3	3,5	7,5
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	11,6	10,7	9,8	9,6	7,3	1,6	0,40	0,30	1,20	5,4	7,1	10,8	75,8
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ort. (mm)	81,0	66,3	57,9	44,7	26,2	5,8	2,0	4,0	8,1	24,6	51,2	78,7	450,5
En Yüksek Sıcaklık (°C)	21,6	25,5	29,5	36,4	40,4	44,1	46,8	46,2	43,9	37,8	30,8	26,0	46,8
En Düşük Sıcaklık (°C)	-10,6	-12,4	-7,3	-3,2	2,5	8,3	15,0	16,0	10,0	1,9	-6,0	-6,4	-12,4

Çizelge 3.2. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) Şanlıurfa Meteoroloji İstasyonu (2019-2020 ve 2024-2025). Aylık ortalama yağış ve ortalama sıcaklık verileri (MGM, 2025)

ÖLÇÜMLER	AYLAR												
	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Yıllık
2019 Eylül- 2020 Ağustos Ortalama Sıcaklık (°C)	26,7	20,5	13,0	7,6	6,2	7,4	11,5	16,4	22,6	28,3	32,0	31,5	18,6
2019 Eylül- 2020 Ağustos Ortalama Yağış (mm)	1	29	54	83	0	61	55	34	20	2	0	0	339
2024 Eylül- 2024 Ağustos Ortalama Sıcaklık (°C)	28,0	22,0	15,2	9,1	7,8	9,0	13,4	18,7	25,4	31,2	34,5	33,8	20,67
2024 Eylül- 2025 Ağustos Ortalama Yağış (mm)	2	18	42	65	58	47	39	22	12	1	0	0	306

WRB (World Reference Base for Soil Resources) sınıflandırma sistemine göre ise bu nitelikteki profiller çoğunlukla Leptosol grubuna karşılık gelmektedir. Leptosoller; genellikle sığ, iskeletli ve ana materyale hızlı geçiş gösteren profillerle karakterize edilmektedir. Araştırma alanındaki toprakların önemli bir bölümünde etkin toprak derinliği 25–30 cm ile sınırlı olup, ana kaya ya da yoğun iskelet materyaline kısa mesafede ulaşılmaktadır. Bu özellikler, Leptosol grubunun temel ayırt edici kriterleriyle büyük ölçüde örtüşmektedir. Saha gözlemleri ve laboratuvar analizleri birlikte değerlendirildiğinde, çalışma alanı topraklarının WRB sistemine göre ağırlıklı olarak Eutric Leptosol (Skeletal) şeklinde tanımlanabileceği söylenebilir (Gündoğan,2023).

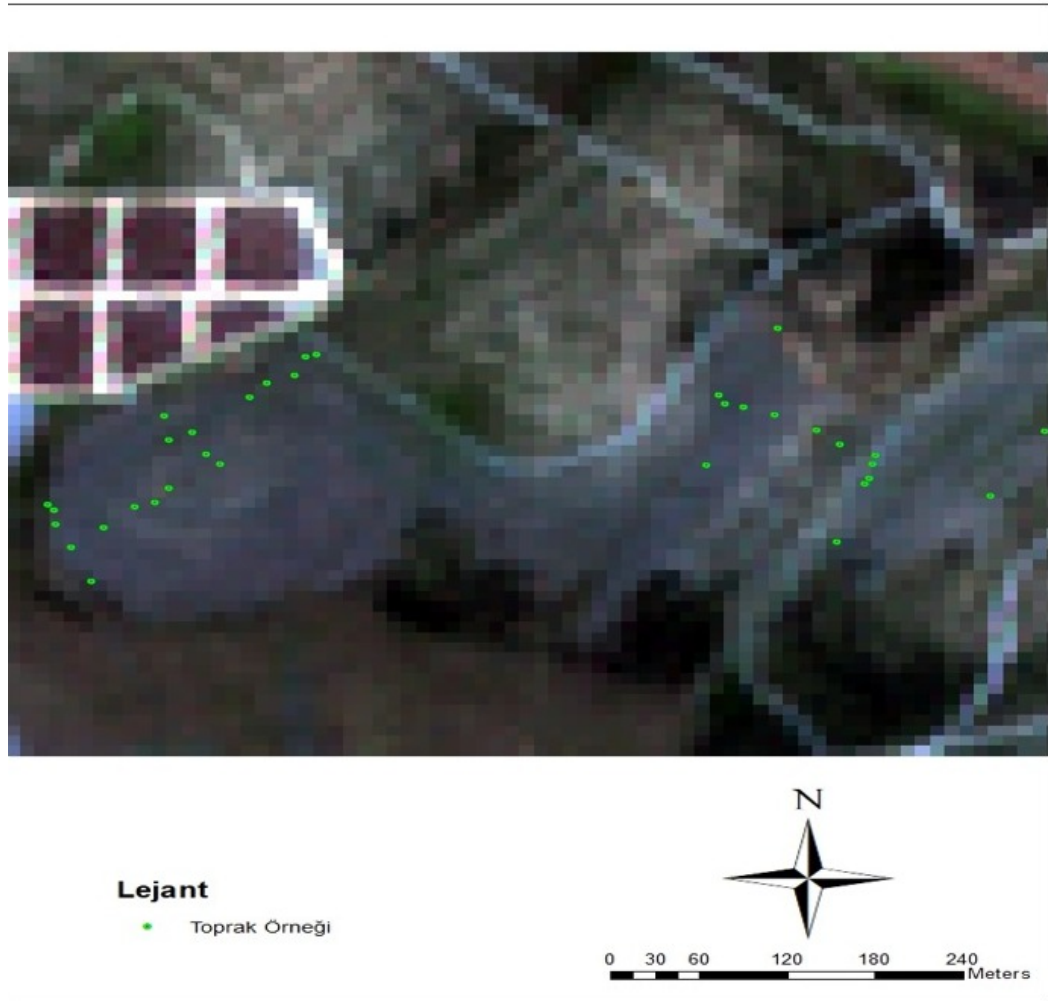
Araştırma alanında ana materyal genellikle kireçli sedimenter kayalardan oluşmakta olup topraklar çoğunlukla kireçli, düşük organik madde içerikli ve orta–ince tekstürlü yapı

göstermektedir. Alan, geleneksel otlatma baskısına maruz kalmakta ve mevsimsel olarak değişen mera kullanım yoğunluğu sergilemektedir.

3.2. Yöntemler

3.2.1. Arazi Çalışmaları ve Örneklem Tasarımı

Toprak örneklem çalışmaları, araştırma alanının mekânsal değişkenliğini temsil edecek şekilde sistematik veya grid esaslı örneklem yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örneklem noktaları GPS cihazı yardımıyla koordinatlandırılmış ve her bir noktanın coğrafi konumu kaydedilmiştir.



Şekil 3.2. Araştırma alanındaki Toprak örneklem noktaları

3.2.2. Laboratuvar Analizleri

Toprak örnekleri 0–20 cm derinlikten, yüzey toprağını temsil edecek şekilde alınmıştır. Bu derinlik, kök yoğunluğunun en fazla olduğu ve vejetasyon-toprak etkileşiminin en belirgin şekilde gözlemlendiği katman olması nedeniyle tercih edilmiştir. Her örnekleme noktasında: Yüzey örtüsü gözlemleri yapılmış, Bitki yoğunluğu ve genel mera durumu kaydedilmiş, Toprak örnekleri laboratuvar analizleri için uygun şekilde etiketlenerek taşınmıştır.

- Toprak örnekleri hava kurusu hale getirildikten sonra 2 mm’lik elekten geçirilmiş ve aşağıdaki analizler gerçekleştirilmiştir:

- Toprak tekstürü (kil, kum, silt): Hidrometre yöntemi ile belirlenmiştir.
- Toprak pH’sı: 1:2.5 toprak-su süspansiyonunda pH metre ile ölçülmüştür.
- Elektriksel İletkenlik (EC): Aynı süspansiyonda EC metre ile ölçülmüştür.
- Kireç (CaCO_3) içeriği: Scheibler kalsimetre yöntemi ile belirlenmiştir.
- Organik madde (OM): Walkley-Black yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.
- Fosfor (P): Olsen yöntemi ile belirlenmiştir.
- Potasyum (K): Amonyum asetat ekstraksiyonu sonrası alev fotometresi ile ölçülmüştür.

Analizler standart laboratuvar prosedürlerine uygun olarak yürütülmüştür.

3.2.3. Arazi Örtüsü Değişiminin Belirlenmesi

3.2.3.1. Uydu Verilerinin Veri Setinin Hazırlanması

Mera alanındaki vejetasyon değişiminin ortaya konulması amacıyla optik uydu görüntülerinden türetilen bitki indeksleri kullanılmıştır. Bu kapsamda, Sentinel-2 platformuna ait çok bantlı görüntüler üzerinden Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) hesaplanmıştır. Analizlerde, 12.04.2020 ve 25.08.2020 tarihli görüntüler ile toprak örneklemesinin gerçekleştirildiği 18.04.2025 tarihli görüntü olmak üzere üç farklı dönem değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.3. Sentinel-2 Bant Özellikleri Tablosu

Bant No	Bant Adı / Spektral Bölge	Merkez Dalga Boyu (nm)	Bant Genişliği (nm)	Uzaysal Çözünürlük	Temel Kullanım Alanı
B1	Coastal Aerosol	443	20	60 m	Atmosferik düzeltme, aerosoller
B2	Blue	490	65	10 m	Su kütleleri, kıyı analizi, true color
B3	Green	560	35	10 m	Bitki sağlığı, true color
B4	Red	665	30	10 m	Bitki analizi, NDVI hesaplaması
B5	Red Edge 1	705	15	20 m	Bitki stres analizi
B6	Red Edge 2	740	15	20 m	Klorofil içeriği
B7	Red Edge 3	783	20	20 m	Bitki biyofiziksel parametreleri
B8	NIR (Near Infrared)	842	115	10 m	NDVI, biyokütle
B8A	Narrow NIR	865	20	20 m	Red-edge uygulamaları
B9	Water Vapor	945	20	60 m	Atmosferik su buharı
B10	SWIR – Cirrus	1375	30	60 m	Bulut tespiti (cirrus)
B11	SWIR 1	1610	90	20 m	Nem, yanık alan analizi
B12	SWIR 2	2190	180	20 m	Toprak nemi, yangın sonrası analiz

Çalışma süreci; veri temini, görüntü ön işleme, bitki örtüsü indekslerinin hesaplanması ve örnekleme noktalarına karşılık gelen piksel değerlerinin çıkarılması aşamalarından oluşmaktadır. Kullanılan uydu verileri, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından işletilen Sentinel Bilimsel Veri Merkezi (SCIHUB) üzerinden ücretsiz olarak temin edilmiştir.

Sentinel-2 misyonu, 2015 yılında fırlatılan Sentinel-2A ve 2016 yılında fırlatılan Sentinel-2B olmak üzere iki uydudan oluşmaktadır. Aynı yörünge düzleminde yaklaşık 180° faz farkıyla hareket eden bu sistem, 13 spektral bantta veri sağlayarak yüksek uzaysal ve zamansal çözünürlük sunmaktadır. Çalışmada özellikle görünür ve yakın kızılötesi bölgeleri temsil eden B2, B3, B4 ve B5 bantları kullanılmıştır. Bu bantlar, bitki-toprak ayrımı ve vejetasyon yoğunluğunun belirlenmesi açısından yüksek duyarlılık sağlamaktadır.

3.2.3.2. Görüntü Ön İşleme Süreci

Uydu verilerinin analiz edilebilir hale getirilmesi amacıyla bir dizi ön işleme adımı uygulanmıştır. Öncelikle görüntüler topoğrafik haritalar yardımıyla koordinat sistemine oturtulmuş ve geometrik düzeltme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada piksel değerlerinin korunması amacıyla En Yakın Komşuluk (Nearest Neighbor) yöntemi tercih edilmiştir.

Atmosfer kaynaklı saçılma ve absorbsiyon etkilerinin azaltılması amacıyla radyometrik düzeltme uygulanmıştır. Bu işlem sayesinde yüzey yansımalarının gerçek arazi koşullarını daha doğru temsil etmesi sağlanmıştır. Ön işleme aşamalarında USGS tarafından önerilen Sentinel veri iş akışları esas alınmıştır.

Daha sonra çalışma alanı sınırları belirlenmiş ve ana görüntüden kırpma (clip) işlemi ile yaklaşık 16 hektarlık araştırma sahası ayrıştırılmıştır. Böylece analizler yalnızca hedef alan üzerinde gerçekleştirilmiştir.

3.2.3.3. Spektral İndeks Hesaplamaları

Otlatmaya uzun süredir kapalı olan mera alanının vejetasyon durumunu değerlendirmek amacıyla üç farklı tarihe ait Sentinel-2 görüntülerinden NDVI değerleri üretilmiştir. NDVI, hem uygulama kolaylığı hem de farklı ekosistem çalışmalarında yaygın kabul görmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Ayrıca veri gereksiniminin sınırlı olması ve hesaplama sürecinin pratikliği, yöntemin seçiminde etkili olmuştur.

NDVI hesaplamaları ArcGIS Pro 10.8 yazılımında raster hesaplayıcı aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sentinel-2 verileri için kırmızı bant (B4) ve yakın kızılötesi bant (B5) kullanılmıştır. Hesaplama aşağıdaki standart eşitliğe dayanmaktadır:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Burada;

NIR, yakın kızılötesi bant yansıtımını,

Red, kırmızı bant yansıtımını ifade etmektedir.

NDVI değerleri teorik olarak -1 ile +1 arasında değişmektedir. Pozitif ve yüksek değerler yoğun ve sağlıklı bitki örtüsünü temsil ederken; sıfıra yakın veya negatif değerler seyrek vejetasyon ya da çıplak toprak yüzeylerini göstermektedir.

Tüm görüntüler atmosferik düzeltmeden geçirilmiş ve analiz öncesinde çalışma alanı sınırlarına göre kesilerek standardize edilmiştir. Böylece farklı tarihlere ait veriler arasında karşılaştırılabilirlik sağlanmıştır.

3.2.3.4. Tanımlayıcı İstatistikler

Her bir toprak parametresi için:

- Ortalama
- Minimum–maksimum
- Standart sapma
- Varyasyon katsayısı

hesaplanmıştır. Veri dağılımlarının normalliği Kolmogorov-Smirnov veya Shapiro-Wilk testleri ile kontrol edilmiştir.

3.2.4. Jeostatistiksel Analizler

Toprak özelliklerinin mekânsal değişkenliği jeostatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edilmiştir.

3.2.4.1. Yarıvaryogram Analizi

Mekânsal bağımlılık yapısını belirlemek amacıyla deneysel yarıvaryogramlar oluşt-

bulunmuştur. Yarıvaryogram aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Burada:

$\gamma(h)$: h mesafesindeki yarıvaryans $N(h)$: h mesafesindeki veri çifti sayısı $Z(x_i)$: x_i konumundaki değer

Deneyisel yarıvaryogramlara küresel (spherical), üstel (exponential) ve Gauss (Gaussian) modeller uyarlanmış; en uygun model belirleme sürecinde:

En düşük hata kareler toplamı

En yüksek determinasyon katsayısı (R^2)

Çapraz doğrulama sonuçları dikkate alınmıştır.

3.2.4.2. Kriging Enterpolasyonu

En uygun yarıvaryogram modeline dayalı olarak Ordinary Kriging yöntemi uygulanmış ve her bir toprak parametresi için sürekli mekânsal dağılım haritaları üretilmiştir.

Kriging yöntemi, tahmin edilen noktanın çevresindeki gözlemlere ağırlık vererek aşağıdaki doğrusal tahmin modeline dayanmaktadır:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

Burada:

$Z^*(x_0)$: tahmin edilen değer

λ_i : ağırlık katsayıları

$Z(x_i)$: gözlenen değerler

3.2.5. NDVI–Toprak İlişkilerinin Analizi

NDVI değerleri ile toprak parametreleri arasındaki ilişkiler:

- Pearson korelasyon analizi,

- Regresyon analizi kullanılarak değerlendirilmiştir.

Anlamlılık düzeyi $p < 0,05$ olarak kabul edilmiştir. Gerekli durumlarda veriler normal dağılım varsayımını sağlamak amacıyla dönüşüme tabi tutulmuştur.

3.2.6. CBS ve Haritalama Çalışmaları

Tüm mekânsal analizler Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında gerçekleştirilmiştir. Örnekleme noktaları koordinat bilgileri ile birlikte dijital ortama aktarılmış; jeoistatistiksel analizler sonucunda elde edilen veriler raster formatında haritalandırılmıştır.

Üretilen tematik haritalar:

- Toprak parametreleri dağılım haritaları
- NDVI haritası
- Karşılaştırmalı analiz haritaları

olarak düzenlenmiştir.

4. BULGULAR

4.1. Tanımlayıcı İstatistikler

Araştırma sahasından elde edilen toprak verilerinin özet istatistikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bünye fraksiyonları incelendiğinde kum oranının ortalama %49,63 ile baskın olduğu, kil oranının ortalama %32,11, silt oranının ise %18,26 düzeyinde bulunduğu görülmektedir. Bu dağılım, alanın genel olarak kumlu-killi bir tekstür özelliği gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Toprak organik maddesi %2–6 arasında değişmekte ve ortalama %3,68 değerine sahiptir. Kireç içeriği geniş bir varyasyon sergilemiş ve ortalama %11,5 olarak belirlenmiştir. Reaksiyon (pH) değerleri 7,9–8,22 aralığında ölçülmüş olup toprakların hafif alkali karakter taşıdığını göstermektedir. Elektriksel iletkenlik değerlerinin 0,24–0,48 dS m⁻¹ arasında değişmesi, araştırma alanında tuzluluk sorunu bulunmadığını işaret etmektedir.

Bitki besin elementlerinden değişebilir potasyum 191–671 mg kg⁻¹ aralığında (ortalama 383,21 mg kg⁻¹), yarıyıllı fosfor ise 4–15 mg kg⁻¹ aralığında (ortalama 8,12 mg kg⁻¹) saptanmıştır.

Değişkenlik katsayıları dikkate alındığında CaCO₃ (%49,2), fosfor (%36,7), organik madde (%31,2) ve potasyum (%27,6) değerlerinin orta-yüksek düzeyde değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Buna karşılık pH (%1,1) ve bünye fraksiyonları görece daha homojen bir dağılım sergilemiştir.

Çizelge 4.1. Toprak Özelliklerine Ait Tanımlayıcı İstatistikler

Toprak özelliği	En düşük	En yüksek	Ortalama	Standart sapma	VK (%)	Çarpıklık
Kil (%)	24,66	37,91	32,11	3,7	11,5	-0,002
Kum (%)	43,7	57,21	49,63	3,2	6, 5	0,244
Silt (%)	12,14	24,12	18,26	2,24	12,3	-0,136
Organik madde (%)	2	6	3,68	1,15	31,2	0,177
CaCO ₃ (%)	2	33	11,5	5,66	49,2	1,506
pH	7,9	8,22	8,03	0,09	1,1	0,302
EC (dS m ⁻¹)	0,24	0,48	0,34	0,05	16,1	0,661
K (mg kg ⁻¹)	191	671	383,21	105,72	27,6	0,598
P (mg kg ⁻¹)	4	15	8,12	2,98	36,7	0,782

Toprak özellikleri arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla yapılan korelasyon analizi sonuçları Çizelge 4.2’de verilmektedir. Kil içeriği ile CaCO₃ ($r = -0,611$, $p < 0,01$) ve organik madde içerikleri ($r = -0,541$, $p < 0,01$) arasında istatistiksel olarak anlamlı ve negatif korelasyonlar gözlenmiştir. Bu durum, killi tekstürün hakim olduğu alanlarda kireç ve organik madde birikiminin daha az olduğunu göstermektedir.

Organik madde içeriği, toprağın yarıyışlı P ($r = 0,738$, $p < 0,01$) ve K ($r = 0,541$, $p < 0,01$) içerikleri ile güçlü pozitif bir ilişki sergilemektedir. Bu bulgu, organik maddenin toprak verimliliği ve besin elementi kaynağı olma rolünü teyit etmektedir. Toprak pH’sı ile organik madde ($r = -0,526$, $p < 0,01$) ve EC ($r = -0,484$, $p < 0,01$) arasında negatif yönlü anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Ayrıca, CaCO₃ içeriği ile EC değerleri arasında ($r = -0,530$, $p < 0,01$) da negatif bir korelasyon saptanmıştır (Çizelge 4.2.).

4.2. Toprak Özellikleri Arasındaki İlişkiler

Yapılan korelasyon analizine göre kil oranı ile kireç ve organik madde arasında anlamlı ve ters yönlü ilişkiler belirlenmiştir. Bu durum, daha ağır bünyeli kesimlerde kireç ve organik maddenin görece daha düşük düzeylerde bulunduğunu düşündürmektedir.

Çizelge 4.2. Toprak Özelliklerine ait Arazideki Korelasyon Sonuçları

	Kil	Kum	Silt	pH	EC	K	P	CaCO ₃	Organik madde
Kil	1,000								
Kum	-0,799**	1,000							
Silt	-0,512**	-0,108	1,000						
pH	-0,033	0,203	-0,236	1,000					
EC	0,167	-0,317	0,176	-0,484**	1,000				
K	-0,053	-0,140	0,288	-0,631**	0,484**	1,000			
P	-0,518**	0,290	0,443**	-0,389*	0,095	0,368*	1,000		
CaCO₃	-0,611**	0,621**	0,123	0,425*	-0,530**	-0,317	0,339*	1,000	
Organik madde	-0,541**	0,358*	0,383*	-0,526**	0,113	0,541**	0,738**	0,110	1,000

Organik madde ile fosfor ve potasyum arasında pozitif ve güçlü ilişkiler tespit edilmiştir. Bu bulgu, organik maddenin besin elementi dinamikleri üzerindeki düzenleyici rolünü desteklemektedir.

Toprak reaksiyonu ile organik madde ve EC arasında negatif yönlü ilişkiler belirlenmiştir. Benzer biçimde kireç ile EC arasında da ters yönlü bir korelasyon saptanmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, kimyasal özellikler arasındaki ilişkiler toprak verimliliğinin organik madde düzeyiyle yakından bağlantılı olduğunu göstermektedir.

4.3. Arazi Örtüsü ve NDVI Analizi

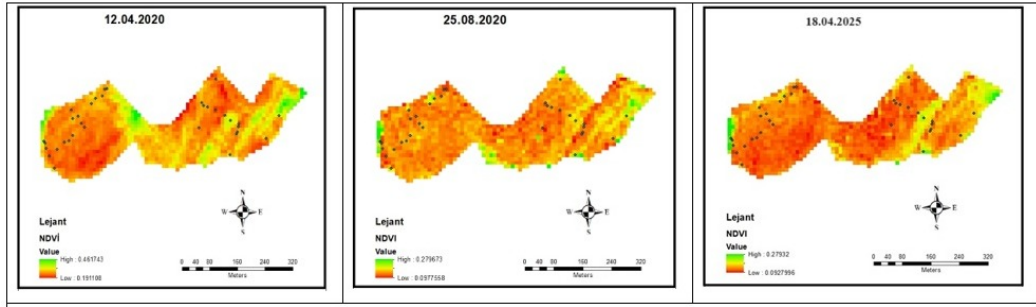
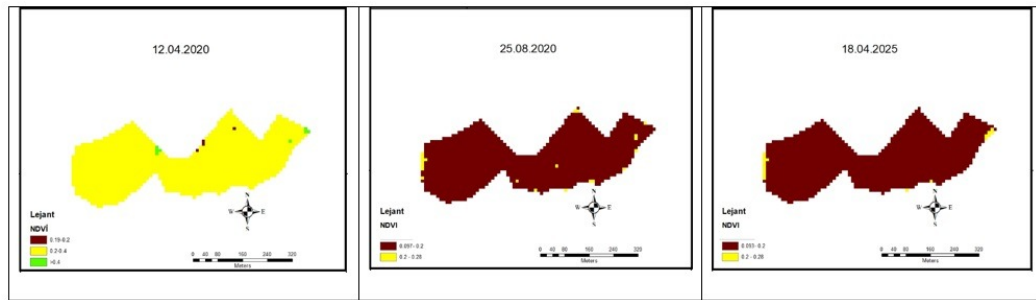
Üç farklı döneme ait NDVI verileri, mera koşullarındaki zamansal değişimi ortaya koymuştur. Nisan 2020 döneminde NDVI değerleri 0,19–0,46 aralığında olup ortalama 0,27 düzeyindedir. Ağustos 2020’de bu aralık 0,09–0,27’ye düşmüş; Nisan 2025 döneminde ise 0,09–0,28 aralığında ölçülmüştür.

Ortalama değerlerdeki azalma, özellikle 2020 ilkbahar döneminden sonra bitki örtüsü yoğunluğunda belirgin bir gerileme olduğunu göstermektedir. Bulgular, meranın 2020 Nisan ayında orta kalitede, sonraki dönemlerde ise zayıf sınıfta değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.3. Araştırma alanının üç dönme ait NDVI değerlerine ait tanımlayıcı istatistikler

Adı	Piksel sayısı	Min	Max	Sum	Mean	Standart Sapma	Tarih	Vasfı
ndvi_2020_12	1284	0,19110 8361	0,4617 42997	346,5463 624	0,2698 95921	0,034089 629	12_04 _2020	Mera
ndvi_2020_22	1284	0,0977 55797	0,2796 72593	180,5957 154	0,1406 50869	0,017310 829	25_08 _2020	Mera
ndvi_2025_32	1284	0,0927 99582	0,2793 19614	169,1829 928	0,1317 62455	0,020509 709	18_04 _2025	Mera

NDVI değerlerinin negatif veya çok düşük olduğu alanlar ciddi vejetasyon kaybına işaret ederken; 0,09–0,46 aralığındaki değerler orta yoğunluklu bitki örtüsünü temsil etmektedir. Bu dağılım, araştırma sahasında hem nispeten sağlıklı hem de bozulmuş alanların birlikte bulunduğunu göstermektedir.

**Şekil 4.1.** Araştırma alanının üç dönme ait NDVI görüntüleri**Şekil 4.2.** Araştırma alanı mera kalitesi

4.4. Jeostatistiksel Modelleme ve Mekânsal Süreklilik

Yapılan yarıvaryogram analizleri sonucunda tüm değişkenler için en uygun modelin

küresel model olduğu belirlenmiştir. Nugget/sill oranlarının 0,25'in altında (0,1) olması, incelenen parametrelerin güçlü mekânsal bağımlılığa sahip olduğunu göstermektedir.

Elde edilen menzil (range) değeri 226,7 m olup bu mesafe içinde örnek noktalarının birbirleriyle anlamlı otokorelasyon gösterdiğini ifade etmektedir. Model uyum katsayılarının ($r^2 \approx 0,85$) yüksek olması, kurulan jeostatistiksel modellerin veriyi başarılı şekilde temsil ettiğini ortaya koymaktadır.

Bu sonuçlar, toprak özelliklerinin dağılımının rastlantısal olmadığını ve büyük ölçüde yapısal faktörler tarafından kontrol edildiğini düşündürmektedir.

Çizelge 4.4. Optimal Kriging Parametreleri

Toprak özelliği	Model	C_0	C	$C_0 + C$	Menzil (m)	$C_0/(C_0+C)$	Mekânsal bağımlılık	r^2	RSS
Kil	Küresel	1,37	12,334	13,704	226,7	0,1	Güçlü	0,85	0
Kum	Küresel	1,024	9,212	10,235	226,7	0,1	Güçlü	0,85	0
Silt	Küresel	0,502	4,52	5,022	226,7	0,1	Güçlü	0,85	0
Organik Madde	Küresel	0,132	1,185	1,316	226,7	0,1	Güçlü	0,85	0
CaCO ₃	Küresel	3,202	28,814	32,015	226,7	0,1	Güçlü	0,85	0
pH	Küresel	0,001	0,007	0,008	226,7	0,1	Güçlü	0,85	0
EC	Küresel	0	0,003	0,003	226,7	0,1	Güçlü	0,85	0
Potasyum	Küresel	1117	10058	11176	226,7	0,1	Güçlü	0,85	0
Fosfor	Küresel	0,889	8,005	8,895	226,7	0,1	Güçlü	0,85	0

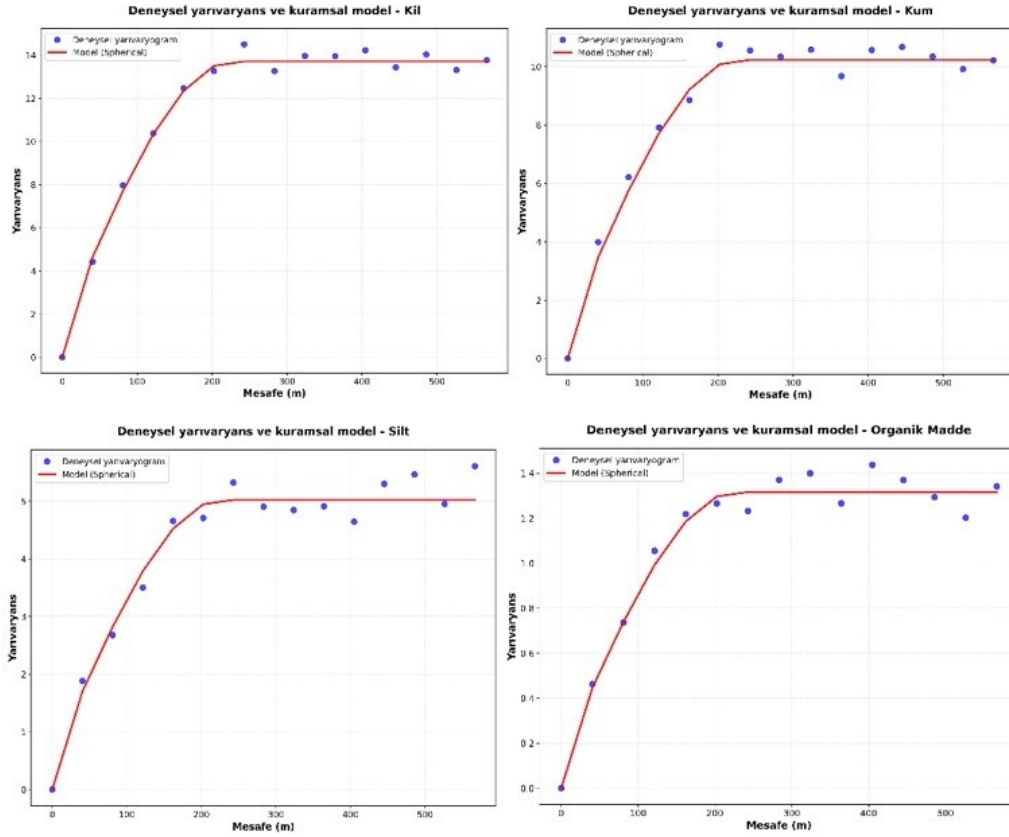
4.5. Mekânsal Dağılım Haritaları

Ordinary Kriging yöntemi ile üretilen dağılım haritaları, alan içindeki heterojen yapıyı açık biçimde ortaya koymuştur. Kil oranı kuzey ve güneybatı kesimlerde yoğunlaşırken; kum içeriği merkez ve doğu bölümlerde daha yüksek değerler göstermiştir. Silt ise genel olarak daha dengeli bir dağılım sergilemiştir.

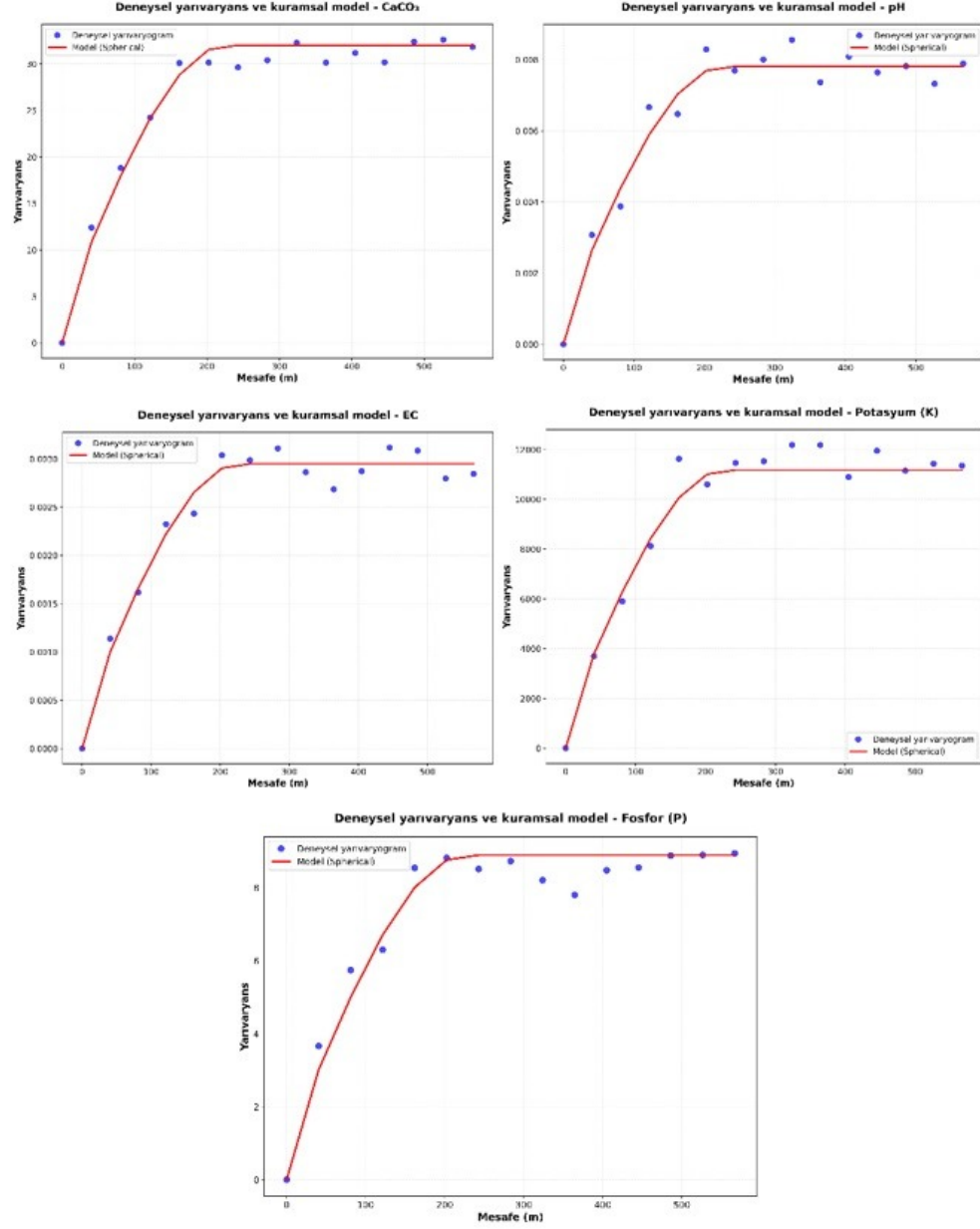
Organik madde ve potasyumun mekânsal desenleri büyük ölçüde örtüşmektedir. Her iki parametrenin de güney ve güneydoğu kesimlerde daha yüksek değerlere sahip olması, aralarındaki pozitif korelasyonu mekânsal açıdan da doğrulamaktadır.

Fosfor özellikle orta ve kuzeydoğu kesimlerde yüksek düzeylerde belirlenmiştir. Kireç dağılımı ise merkez ve güneybatı alanlarda artış göstermektedir. pH değerleri genel olarak hafif alkali karakterini korumuştur. EC dağılımı ise alan genelinde düşük seviyelerde kalmış, yalnızca bazı küçük bölgelerde nispi artış göstermiştir.

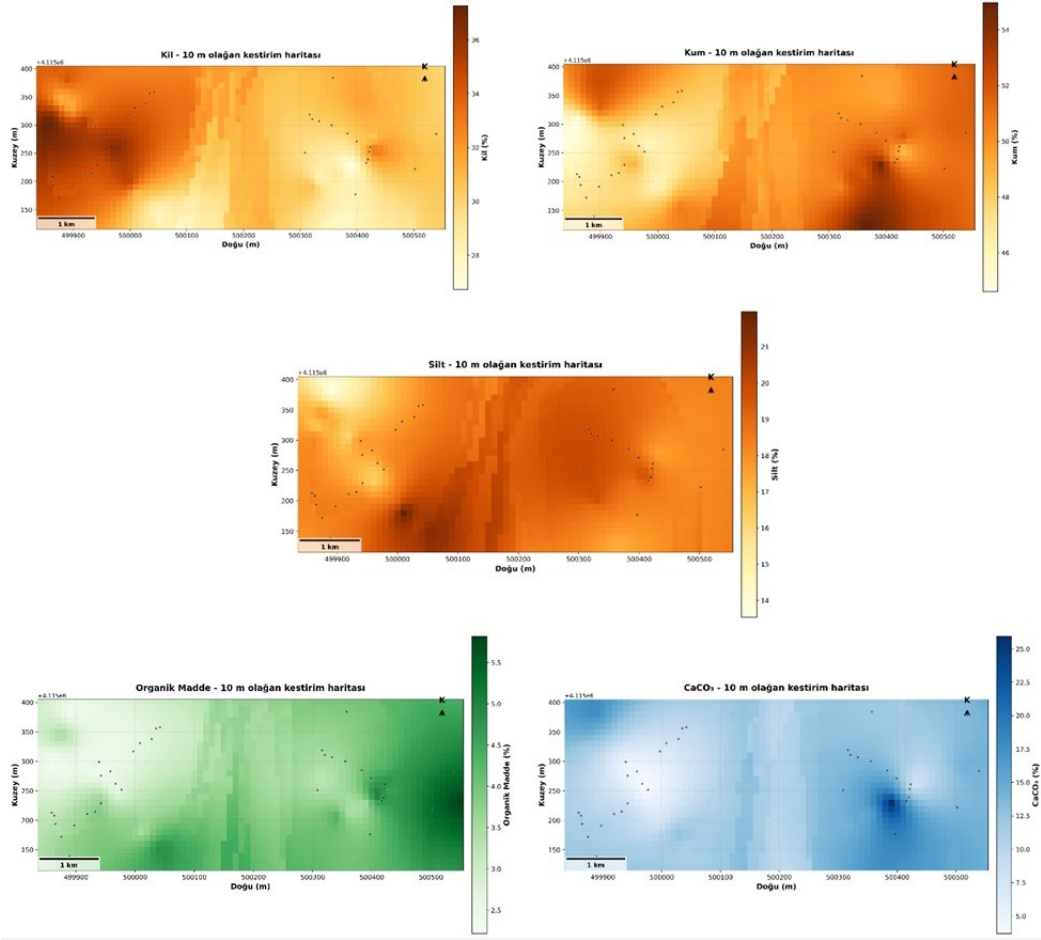
Bu haritalar, alan bazlı yönetim uygulamaları için önemli bir karar destek aracı niteliğindedir.



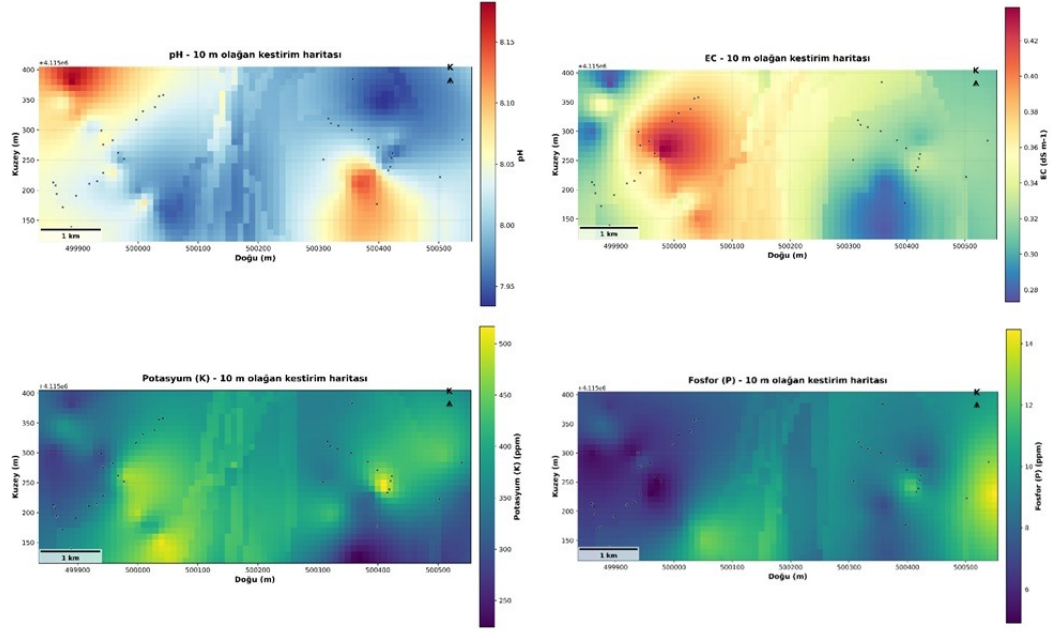
Şekil 4.3. Toprak Özelliklerine Ait Variogram Grafikleri-(1/2)



Şekil 4.4. Toprak Özelliklerine Ait Variogram Grafikleri-(2/2)



Şekil 4.5. Toprak Özelliklerinin Mekânsal Dağılım Haritaları(1/2)



Şekil 4.6. Toprak Özelliklerinin Mekânsal Dağılım Haritaları(2/2)

5. TARTIŞMA

Araştırma sonuçları, yarı kurak koşullarda toprak özelliklerinin belirgin bir mekânsal heterojenlik sergilediğini göstermektedir. Organik madde düzeyinin %3,68 gibi görece olarak yüksek bir ortalamaya sahip olması, uzun süreli otlatma baskısının kaldırılmasının olumlu etkisiyle ilişkilendirilebilir. Bitki örtüsünün gelişmesi, kök biyokütlesi artışı ve yüzey artıklarının toprağa kazandırılması organik madde birikimini desteklemiş olabilir.

Organik madde ile fosfor ve potasyum arasındaki güçlü pozitif ilişkiler, besin elementi döngüsünde organik maddenin merkezi rolünü teyit etmektedir. Organik bileşiklerin ayrışması sırasında açığa çıkan organik asitler ve artan katyon değişim kapasitesi, besin elementlerinin bitki tarafından alınabilir formda tutulmasına katkı sağlamaktadır.

Hafif alkali pH değerleri, kireçli ana materyalin etkisini yansıtmaktadır. Organik madde ile pH arasındaki negatif ilişki, ayrışma süreçlerinin asitleştirici etkisini göstermektedir.

Yüksek kum oranı, yalnızca doğal tekstür özelliği değil; seçici erozyon süreçlerinin sonucu olarak ince fraksiyonların kaybıyla da açıklanabilir. Bu durum, su tutma kapasitesi ve toprak yapısı açısından önemli sonuçlar doğurmaktadır.

Jeoistatistiksel analizlerde belirlenen güçlü mekânsal bağımlılık, toprak özelliklerinin büyük ölçüde doğal oluşum faktörleri tarafından kontrol edildiğini ortaya koymaktadır. 226,7 m'lik menzil değeri, hassas tarım uygulamaları açısından örnekleme aralığının belirlenmesinde önemli bir parametredir.

NDVI sonuçları ise mera kalitesinde zamanla düşüş yaşandığını göstermektedir. Özellikle düşük NDVI değerleri, kuraklık ve arazi bozunumu gibi çevresel stres faktörleriyle ilişkilendirilebilir.

Mera alanlarının Toprak özellikleri ile yarı kurak alan dinamiklerinin ve mera gelişimi üzerine etkileri aşağıda detaylı olarak tartışılmıştır.

5.1. Toprak Fiziksel Özellikleri ve Yarı Kurak Alan Dinamikleri

Araştırma alanında kum fraksiyonunun baskın olması, yarı kurak bölgelerde yaygın olarak gözlenen pedolojik bir özelliktir. Yarı kurak ekosistemlerde düzensiz ve şiddetli yağış olayları, yüzey akışını artırarak ince fraksiyonların taşınmasına neden olmakta ve zamanla yüzey topraklarında kum oranının göreceli olarak artmasına yol açabilmektedir (Lal, 2001). Özellikle seçici erozyon süreçleri, kil ve silt partiküllerinin uzaklaştırılmasını hızlandırmakta ve toprak yapısının bozulmasına neden olmaktadır (Morgan, 2005).

Benzer şekilde, Orta Doğu ve Akdeniz havzasındaki yarı kurak mera alanlarında yapılan çalışmalar, kumlu-killi tekstürün yaygın olduğunu ve bunun hem ana materyal hem de arazi bozunumu süreçleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir (Reynolds vd., 2007). Tekstür dağılımının su tutma kapasitesi ve bitki gelişimi üzerinde doğrudan etkili olduğu bilinmektedir. Özellikle kum oranının yüksek olduğu topraklarda suyun hızla infiltre olması ve düşük su depolama kapasitesi, bitkilerin kuraklık stresine daha duyarlı hale gelmesine yol açmaktadır (Brady vd., 2017). Bu bağlamda çalışma alanında belirlenen tekstürel yapı, bölgenin hem doğal pedojenetik özelliklerini hem de olası erozyon süreçlerini yansıtmaktadır.

5.2. Organik Maddenin Merkezi Rolü ve Besin Elementi Dinamikleri

Toprak organik maddesi (TOM), toprak kalitesinin en önemli göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir (Parkin vd., 1994). Yarı kurak bölgelerde organik madde düzeyleri genellikle düşüktür; çünkü sınırlı biyokütle üretimi ve yüksek sıcaklıklar nedeniyle

mineralizasyon hızı yüksektir (Six vd., 2002). Bu nedenle çalışma alanında ortalama %3,68 olarak belirlenen organik madde içeriği dikkat çekicidir.

Organik madde ile fosfor ve potasyum arasındaki pozitif ilişkiler, literatürde geniş biçimde rapor edilmiştir. Organik maddenin ayrışması sırasında oluşan organik asitler, özellikle kireçli topraklarda fosforun kalsiyumla bağlanmasını azaltarak yararlılığını artırabilmektedir (Hinsinger, 2001). Ayrıca organik maddenin katyon değişim kapasitesini (KDK) artırarak potasyum gibi baz katyonların tutulmasına katkı sağladığı bilinmektedir (Stevenson, 1994).

Toprak organik maddesinin mera ekosistemlerinde artışı, yalnızca besin elementi arzını değil; aynı zamanda agregat stabilitesini, su tutma kapasitesini ve mikrobiyal aktiviteyi de artırmaktadır (Lal, 2004). Bu yönüyle organik madde, hem fiziksel hem kimyasal hem de biyolojik süreçlerin merkezinde yer alan bir düzenleyici unsur olarak değerlendirilebilir.

5.3. Toprak pH'sı, Kireç ve Kimyasal Denge Mekanizmaları

Araştırma alanındaki hafif alkali pH değerleri, karbonatça zengin ana materyalin doğal sonucudur. Kireçli topraklarda karbonat tamponlama sistemi nedeniyle pH genellikle dar bir aralıkta seyretmektedir (Brady vd., 2017). Ancak organik madde ile pH arasındaki negatif ilişki, organik ayrışma süreçlerinin alkali reaksiyonu kısmen dengeleyebildiğini göstermektedir.

Organik asit üretimi ve nitrifikasyon süreçleri sırasında açığa çıkan hidrojen iyonları, karbonat çözünmesini hızlandırarak pH'yı düşürücü etki yapabilmektedir (Haynes, 1982). Bu süreç özellikle fosfor ve mikro besin elementlerinin yararlılığını artırmaktadır. Bu nedenle organik madde artışı, kireçli yarı kurak topraklarda besin elementlerinin erişilebilirliğini artıran doğal bir iyileştirici mekanizma olarak değerlendirilmektedir.

Kireç içeriğinin yüksek varyasyon göstermesi, topoğrafik farklılıklar ve erozyon–birikim süreçleriyle ilişkilendirilebilir. Benzer sonuçlar, Akdeniz iklim kuşağındaki mera topraklarında da rapor edilmiştir (Çelik, 2005).

5.4. Mekânsal Bağımlılık ve Jeostatistiksel Yorum

Jeostatistiksel analizler sonucunda belirlenen güçlü mekânsal bağımlılık (nugget/sill

< 0,25), toprak özelliklerinin büyük ölçüde yapısal faktörler tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Cambardella vd., (1994), nugget/sill oranının %25'in altında olması durumunda değişkenin güçlü mekânsal bağımlılığa sahip olduğunu belirtmiştir. Bu durum genellikle ana materyal, topoğrafya ve iklim gibi doğal oluşum faktörlerinin baskın olduğu alanlarda görülmektedir.

226,7 m'lik menzil değeri, örnekleme stratejisinin yeterli mekânsal çözünürlüğe sahip olduğunu göstermektedir. Webster ve Oliver (2007), menzil değerinin örnekleme aralığının belirlenmesinde kritik bir parametre olduğunu ve hassas tarım uygulamalarında karar destek unsuru olarak kullanılabileceğini vurgulamıştır.

Bu bulgular, araştırma sahasında toprak özelliklerinin rastgele değil, belirli mekânsal desenler doğrultusunda dağıldığını ortaya koymaktadır.

5.5. NDVI Bulgularının Ekolojik Değerlendirmesi

NDVI, bitki örtüsü yoğunluğunu ve fotosentetik aktiviteyi değerlendirmede yaygın olarak kullanılan bir göstergedir (Rouse vd., 1974). Yarı kurak bölgelerde NDVI değerleri yağış rejimine ve toprak nemine son derece duyarlıdır (Nicholson vd., 1990).

Çalışmada belirlenen NDVI düşüşü, kuraklık stresi ve olası arazi bozunumu süreçleriyle ilişkilendirilebilir. Reynolds vd. (2007), yarı kurak ekosistemlerde bitki örtüsü kaybının toprak yüzeyinin çıplak kalmasına ve bunun da erozyon riskini artırmasına neden olduğunu belirtmektedir.

Düşük NDVI değerleri, yalnızca mevcut bitki örtüsünün zayıflığını değil; aynı zamanda uzun vadede karbon döngüsü ve toprak organik maddesi birikimi üzerinde olumsuz etkiler yaratabilecek bir süreci işaret etmektedir (Lal, 2004). Bu durum sürdürülebilir mera yönetimi açısından önemli bir uyarı niteliğindedir.

5.6. Sürdürülebilir Arazi Yönetimi Açısından Çıkarımlar

Araştırma sonuçları, alan içi heterojenliğin belirgin olduğunu ve tek tip yönetim stratejilerinin yeterli olmayacağını göstermektedir. Hassas tarım ve alan bazlı yönetim yaklaşımları, özellikle değişkenlik gösteren fosfor ve kireç içerikleri açısından ekonomik ve çevresel açıdan avantaj sağlayabilir (McBratney vd.,2005).

Organik maddeyi artırmaya yönelik uygulamalar (kontrollü otlatma, bitkisel artıkların korunması, organik gübre kullanımı) hem toprak kalitesini hem de mera verimliliğini artırabilir. Bu yaklaşım, sürdürülebilir arazi yönetimi literatürüyle uyumludur (Lal, 2001).

Literatürle karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, araştırma alanındaki bulgular yarı kurak ekosistemlerin tipik pedolojik ve ekolojik özellikleriyle büyük ölçüde örtüşmektedir. Organik maddenin merkezi rolü, mekânsal bağımlılığın güçlü yapısı ve NDVI'daki düşüş eğilimi birlikte ele alındığında, çalışma alanının hem doğal süreçler hem de iklimsel baskılar altında şekillendiği anlaşılmaktadır. Bu bağlamda çalışma, yarı kurak mera alanlarında toprak–bitki ilişkilerini mekânsal analizle bütünleştiren ve sürdürülebilir yönetim stratejilerine bilimsel temel oluşturan bir katkı niteliğindedir.

6. SONUÇLAR

Bu tez, yarı kurak mera alanlarında NDVI verileri ile toprak özelliklerinin entegrasyonunun bilimsel ve yönetsel açıdan güçlü bir araç olduğunu göstermiştir. Mekânsal değişkenliğin dikkate alınmadığı geleneksel yaklaşımlar yerine, veri temelli ve alana özgü yönetim stratejilerinin uygulanması hem ekolojik sürdürülebilirlik hem de kırsal ekonomik verimlilik açısından kritik önemesahiptir.

Bu çalışma, yarı kurak bir mera ekosisteminde toprak özellikleri ile NDVI verilerinin birlikte değerlendirilmesinin, mera sağlığının ve üretkenliğinin anlaşılmasında güçlü ve bütüncül bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymuştur.

Araştırma bulgularına göre:

Yarıvaryogram analizlerinde tüm değişkenler için küresel modelin en uygun model olduğu belirlenmiş, nugget/sill oranlarının 0,25'in altında olması güçlü mekânsal bağımlılığı ortaya koymuştur. Yaklaşık 226,7 m'lik menzil değeri, toprak parametrelerinin bu mesafe içerisinde benzerlik gösterdiğini ve dağılımın rastlantısal olmadığını göstermektedir. Bu sonuç H1 hipotezini desteklemektedir.

Kriging haritaları, özellikle organik madde, fosfor, potasyum ve kireç içeriklerinde belirgin zonlaşma olduğunu göstermiştir. Bu durum mera alanının tek tip kabul edilerek yönetilmesinin bilimsel açıdan uygun olmadığını ortaya koymaktadır. H3 hipotezidoğrulanmıştır.

Organik madde ile P ($r = 0,738$) ve K ($r = 0,541$) arasında güçlü pozitif ilişkiler belirlenmiştir. Bu bulgu, organik maddenin besin elementi döngüsü ve toprak kalite parametreleri üzerindeki düzenleyici rolünü açık biçimde ortaya koymaktadır.

7. ÖNERİLER

Mera alanlarında yönetim uygulamaları, mekânsal farklılıkları dikkate alacak şekilde zon bazlı olarak planlanmalıdır. Kriging haritaları kullanılarak yüksek ve düşük verimlilik gösteren alanlar belirlenmeli, otlatma yoğunluğu bu farklılıklara göre düzenlenmelidir. Organik maddenin toprak verimliliği ve besin elementi dinamikleri üzerindeki belirleyici rolü göz önünde bulundurularak organik madde artırıcı uygulamalara öncelik verilmelidir. Bu kapsamda kontrollü otlatma sistemleri uygulanmalı, bitki artıklarının toprak yüzeyinde korunması sağlanmalı ve uygun koşullarda organik gübre uygulamaları teşvik edilmelidir.

Fosfor ve potasyum yönetimi alanın tamamına tek tip uygulanmamalı; özellikle düşük P ve K içeren zonlarda hedefe yönelik ve doz ayarlı gübreleme programları geliştirilmelidir. Ayrıca mera alanlarının izlenmesi amacıyla uzaktan algılama tabanlı bir takip sistemi oluşturulmalı, NDVI verileri düzenli aralıklarla analiz edilerek erken bozunum belirtileri tespit edilmeli ve zamanında müdahale edilmelidir. Gelecekte yapılacak toprak örnekleme çalışmalarında ise belirlenen yaklaşık 226,7 m'lik mekânsal bağımlılık mesafesi dikkate alınmalı ve örnekleme grid aralığı bu menzile göre planlanmalıdır.

Bu çalışma ile elde edilen toprak özelliği haritaları, hassas tarım uygulamaları için temel bir altlık niteliğindedir. Bu haritalar, özellikle fosfor ve potasyum gibi besin elementlerinin alana özgü değişken oranlı gübreleme (VRT) stratejilerinin geliştirilmesinde doğrudan kullanılabilir. Böylece, sadece ihtiyaç duyulan alanlara yeterli miktarda gübre uygulanarak hem girdi maliyetlerinden tasarruf sağlanabilir hem de aşırı gübrelemeden kaynaklanan çevresel riskler (örneğin yeraltı suyu kirliliği) en aza indirilebilir. Bu çalışmanın sonuçlarının, Şanlıurfa ve benzer ekolojik koşullara sahip diğer bölgelerde sürdürülebilir tarım ve kaynak yönetimi için pratik bir rehber sunması beklenmektedir. Gelecekteki çalışmalarda, bu mekansal verilerin bitki gelişim ve verim haritaları ile entegre edilerek daha kapsamlı yönetim bölgelerinin oluşturulması önerilmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, tek dönemli değerlendirmeler yerine mevsimsel ve çok yıllık NDVI analizlerine yer verilmesi önerilmektedir. Uzun yıllara yayılan zaman serilerinin kullanılması, iklimsel değişkenliğin ve çevresel stres faktörlerinin mera

vejetasyonu üzerindeki etkilerinin daha net ortaya konulmasına olanak sağlayacaktır. Ayrıca toprak biyolojik göstergelerinin araştırmalara dahil edilmesi, mera sağlığının daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu kapsamda mikrobiyal biyokütle, enzim aktiviteleri ve toprak solunumu gibi parametrelerin incelenmesi, toprak ekosisteminin işleyişine dair daha derinlemesine bilgiler sunacaktır.

Bitki-toprak ilişkilerinin daha hassas analiz edilebilmesi için NDVI'nın yanı sıra EVI, SAVI ve red-edge tabanlı spektral indekslerin de kullanılması önerilmektedir. Bununla birlikte, mekânsal tahmin doğruluğunu artırmak amacıyla makine öğrenmesi temelli modelleme yaklaşımlarından yararlanılabilir; özellikle Random Forest ve regresyon kriging gibi yöntemler daha güçlü tahmin performansı sağlayabilir. Mera bozunumunun yalnızca biyofiziksel değil, aynı zamanda yönetsel ve ekonomik boyutları da bulunduğundan, otlatma yoğunluğu, hayvan varlığı ve arazi kullanım pratikleri gibi sosyo-ekonomik değişkenlerin modellere entegre edilmesi önem taşımaktadır. Son olarak, farklı iklim ve ekolojik bölgelerde gerçekleştirilecek karşılaştırmalı çalışmalar, elde edilen bulguların genellenebilirliğini test edecek ve yöntemin farklı koşullardaki uygulanabilirliğini ortaya koyacaktır.

KAYNAKLAR

- Avcıoğlu, R., Demiroğlu, G., & Geren, H. (2004). *Bazı yeni yem bitkisi cins tür ve çeşitlerinin Ege Bölgesi koşullarında verim ve yem kalite özellikleri üzerinde araştırmalar* (tek. rap. No. TOGTAG-2847). Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu.
- Balata, D., Gama, I., Domingos, T., & Proença, V. (2022). Using Satellite NDVI Time-Series to Monitor Grazing Effects on Vegetation Productivity and Phenology in Heterogeneous Mediterranean Forests. *Remote Sensing*, 14(10), 2322. <https://doi.org/10.3390/rs14102322>
- Brungard, C., Boettinger, J., Duniway, M., Wills, S., & Thomas, J. (2015). Machine Learning for Predicting Soil Classes in Three Semi-Arid Landscapes. *Geoderma*, 239-240, 68–83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.019>
- Budak, M. (2018). Importance of Spatial Soil Variability for Land Use Planning of a Farmland in a Semi-Arid Region. *International Journal of Agriculture and Natural Sciences*, 11(1), 1–9.
- Budak, M., Sürücü, A., & Çelik, İ. (2018). Toprak Özelliklerinin Mekansal Değişkenliğinin Jeostatistiksel Yöntemlerle Belirlenmesi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 5(2), 103–115.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501–1511.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Scaling Up Agroecology Initiative: Business Models and Co-Creation of Knowledge for Sustainable Development*. FAO.
- Fretwell, P. T., Convey, P., Fleming, A. H., Peat, H. J., & Hughes, K. A. (2011). Detecting and Mapping Vegetation Distribution on the Antarctic Peninsula from Remote Sensing Data. *Polar Biology*, 34, 273–281. <https://doi.org/10.1007/s00300-010-0880-2>
- Fuller, D. O. (1998). Trends in NDVI Time Series and Their Relation to Rangeland and Crop Production in Senegal, 1987–1993. *International Journal of Remote Sensing*, 19(10), 2013–2018. <https://doi.org/10.1080/014311698215135>
- Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in Soil Science: State-of-the-Art and Perspectives. *Geoderma*, 89(1-2), 1–45.
- Grealish, G., Fitzpatrick, R., & Hutson, J. L. (2015). Soil Survey Data Rescued by Means of User Friendly Soil Identification Keys and Toposequence Models to Deliver Soil Information for Improved Land Management. *GeoResJ*, 6, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.006>
- Gündoğan, R. (2023). Şanlıurfa Topraklarının Özellikleri ve Kullanımı. İçinde E. K. Altop (Ed.), *Tarımsal Teknoloji ve Ekosistemlerde İleri Uygulamalar: Verimlilik, Çevresel Etkiler ve Yenilikçi Yaklaşımlar* (ss. 61–102). İksad Publication.

- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1988). Spatial Continuity Measures for Probabilistic and Deterministic Geostatistics. *Mathematical Geology*, 20(4), 313–341.
- Jia, G. J., Epstein, H. E., & Walker, D. A. (2003). Greening of Arctic Alaska, 1981–2001. *Geophysical Research Letters*, 30(7). <https://doi.org/10.1029/2002GL016397>
- Jones, K. B., Zurlini, G., Kienast, F., Petrosillo, I., Edwards, T., Wade, T. G., Li, B.-L., & Zaccarelli, N. (2013). Informing Landscape Planning and Design for Sustaining Ecosystem Services from Existing Spatial Patterns and Knowledge. *Landscape Ecology*, 28, 1175–1192. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9794-4>
- Karnieli, A., Gilad, U., Ponzet, M., Svoray, T., Mirzadinov, R., & Fedorina, O. (2008). Assessing Land-Cover Change and Degradation in the Central Asian Deserts Using Satellite Image Processing and Geostatistical Methods. *Journal of Arid Environments*, 72(12), 2093–2105. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.07.009>
- Kousar, R., Lone, A. H., Shah, Z. A., vd. (2025). Farm-Scale Soil Spatial Variability at a Mountain Research Centre in Northwestern Himalayas. *Scientific Reports*, 15, 19705. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03695-0>
- Mermer, A., Yıldız, H., Ünal, E., Aydoğdu, M., Ozaydın, A., Dedeoğlu, F., Urla, O., Aydoğmuş, O., Torunlar, H., & Tuğaç, M. (2015). Monitoring Rangeland Vegetation Through Time Series Satellite Images (NDVI) in Central Anatolia Region. *International Conference on Agro-Geoinformatics*.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024). Şanlıurfa Meteoroloji İstasyonu Aylık Sıcaklık ve Yağış Verileri.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2025). Şanlıurfa Meteoroloji İstasyonu Aylık Sıcaklık ve Yağış Verileri.
- Oliver, M., & Webster, R. (2014). A Tutorial Guide to Geostatistics: Computing and Modelling Variograms and Kriging. *Catena*, 113, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press.
- Piccini, C., Francaviglia, R., & Marchetti, A. (2020). Predicted Maps for Soil Organic Matter Evaluation: The Case of Abruzzo Region (Italy). *Land*, 9(10), 349. <https://doi.org/10.3390/land9100349>
- Reynolds, J. F., Smith, D. M. S., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P. J., Downing, T. E., Dowlatabadi, H., Fernández, R. J., Herrick, J. E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F. T., Ayarza, M., & Walker, B. (2007). Global Desertification: Building a Science for Dryland Development. *Science*, 316(5826), 847–851. <https://doi.org/10.1126/science.1131634>

- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS* (tek. rap.). NASA Scientific ve Technical Information Office.
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions* (2. bs.). Wiley.
- Suh, C. N., & Tsheko, R. (2024). Spatial and Temporal Variation of Soil Properties and Soil Organic Carbon in Semi-Arid Areas of Sub-Sahara Africa. *Geoderma Regional*, 36, e00758.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2024). Mera Alanlarının Yıllara Göre Değişimi.
- Tesfahunegn, G. B., Tamene, L., & Vlek, P. L. (2011). Catchment-Scale Spatial Variability of Soil Properties and Implications on Site-Specific Soil Management in Northern Ethiopia. *Soil and Tillage Research*, 117, 124–139.
- Washington-Allen, R. A., West, N. E., & Ramsey, R. D. (2003). Remote Sensing-Based Dynamical Systems Analysis of Sagebrush Steppe Vegetation in Rangelands. İçinde N. Allsopp, A. R. Palmer, S. J. Milton, K. P. Kirkman, G. I. H. Kerley, C. R. Hurt & C. J. Brown (Ed.), *Proceedings of the VII International Rangelands Congress* (ss. 416–418).
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15. bs.). Pearson.
- Yasrebi, J., Saffari, M., Fathi, H., Karimian, N., Emadi, M., & Baghernejad, M. (2008). Spatial Variability of Soil Fertility Properties for Precision Agriculture in Southern Iran. *Journal of Applied Sciences*, 8(9), 1642–1650.
- Zurlini, G., Petrosillo, I., Jones, K. B., vd. (2013). Highlighting Order and Disorder in Social–Ecological Landscapes to Foster Adaptive Capacity and Sustainability. *Landscape Ecology*, 28, 1161–1173. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9763-y>