SAYISAL TOPRAK KÜTÜPHANESİ DESTEKLİ VIS-NIR TEKNOLOJİSİ VE MEKÂNSAL ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE YÖNETİM BÖLGELERİNİN VE DEĞİŞKEN ORANLI GÜBRELEME HARİTALARININ OLUŞTURULMASI

Nihal SALI

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAYISAL TOPRAK KÜTÜPHANESİ DESTEKLİ VIS-NIR TEKNOLOJİSİ VE MEKÂNSAL ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE YÖNETİM BÖLGELERİNİN VE DEĞİŞKEN ORANLI GÜBRELEME HARİTALARININ OLUŞTURULMASI

Nihal SALI
0009-0006-7192-1677

Prof. Dr. Selçuk ARSLAN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SAYISAL TOPRAK KÜTÜPHANESİ DESTEKLİ VIS-NIR TEKNOLOJİSİ VE MEKÂNSAL ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE YÖNETİM BÖLGELERİNİN VE DEĞİŞKEN ORANLI GÜBRELEME HARİTALARININ OLUŞTURULMASI

Nihal SALI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selçuk ARSLAN

Değişken oranlı gübre uygulamaları için bir tarladan çok sayıda örnek alınması, analiz maliyetlerini artırmaktadır. Az sayıda toprak örneği kullanarak tarladaki besin elementlerinin değişkenliğini yüksek bir doğrulukla belirlemek ise mümkün değildir. Bu çalışmanın amacı; az sayıda toprak örneği, toprak spektrometresi ve dijital toprak kütüphanesi kullanarak bazı bitki besin elementlerinin tarla içi değişkenliğini yüksek belirleme katsayıları ile belirlemek ve değişken oranlı gübreleme haritalarını oluşturmaktadır. Bunun için yaklaşık 6.3 ha'lık bir tarlada ızgara yöntemine göre 18 noktadan 30 cm derinlikten toprak örnekleri alınmış ve pH, P, K, Organik Karbon, kireç ve tekstür analizleri yapılmıştır. Toprak örnekleri ikiye bölünerek yarısı toprak analiz laboratuvarına gönderilmiş, yarısı ise spektrometrik analizlerde kullanılmıştır. Toprak analiz sonuçları, ele alınan toprak özelliklerinin Ters Mesafe Ağırlıklandırılması (IDW) yöntemiyle haritalanması için kullanılmıştır. Spektrometrik analiz için RStudio kullanılmıştır. Toprak özellikleri için PLSR modelleri, bir defalık çapraz doğrulama (LOOCV) yoluyla geliştirilmiştir. Alınan 18 toprak örneğinin spektrasına ek olarak bir dijital kütüphaneden de 18 spektra alınarak kullanılmış ve belirleme katsayıları yükseltilmeye çalışılmıştır. Buna göre, dijital kütüphaneden eklenen veriler P, K ve OC için daha yüksek bir R^2 (0.74, 0.84, 0.75) ve RPD (2.03, 2.66, 2.13) değeri elde edilmesini sağlamıştır. pH ve kireç için kayda değer bir yükselme gözlemlenmemiştir (R^2=0.63, 0.92; RPD=1.8, 4.39). Modelin iyi bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Spektral analiz, bitki besin elementleri, modelleme, değişken oranlı uygulama, hassas tarım
2025, viii + 60 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

DETERMINATION OF MANAGEMENT ZONES AND GENERATING VARIABLE RATE FERTILIZATION MAPS WITH DIGITAL SOIL LIBRARY SUPPORTED VIS-NIR TECHNOLOGY AND SPATIAL ANALYSIS METHODS

Nihal SALI

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Biosystems Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selçuk ARSLAN

Taking many samples from a field for a variable rate fertilizer application increases the analysis costs. It is not possible to determine the within field variability of nutrient elements accurately using a small number of soil samples. The aim of this study is to determine the variability of some plant nutrients with a high coefficient of determination using a small number of soil samples, soil spectrometry and digital soil library data, and to create maps for variable rate applications. For this purpose, soil samples were taken from 18 points at a depth of 30 cm using grid method in a field of approximately 6.3 ha and pH, P, K, Organic Carbon, lime, texture analyses were performed. Soil samples were divided into two and one half were sent to the soil analysis laboratory and the other half was used in spectrometric analyses. Soil analysis results were used for mapping the considered soil properties using the Inverse Distance Weighting (IDW) method. RStudio was used for spectrometric analysis. PLSR models for soil properties were developed using leave-one-out cross-validation (LOOCV). In addition to the spectra of the 18 collected soil samples, 18 spectra were also obtained from a digital library to improve the determination coefficients. Accordingly, the data added from the digital library led to higher R^2 (0.74, 0.84, 0.75) and RPD (RPD=2.03, 2.66, 2.13) values for P, K, and OC. No significant increase was observed for pH and lime (R^2=0.63, 0.92; RPD=1.8, 4.39). It was concluded that the model performs well.

Key words: Spectral analysis, plant nutrients, modeling, variable rate application, precision agriculture
2025, viii + 60 pages.

TEŞEKKÜR

Lisans eğitimimden bu yana bilgi birikimi, tecrübesi ve değerli yönlendirmeleriyle akademik ve kişisel gelişimime sürekli katkı sağlayan kıymetli danışmanım Prof. Dr. Selçuk ARSLAN'a; bilimsel bakış açımı geliştirmemde sunduğu katkılar, gösterdiği emek, sabır ve güven için teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, sevgileri ve destekleriyle güç veren aileme ve bu süreçte sabrı, anlayışı ve sevgisiyle en büyük destekçim olan sevgili eşime teşekkürlerimi sunarım.

Bana her zaman bilgi, tecrübe ve öğütleriyle yol gösteren Sayın Prof. Dr. Yücel TEKİN'e, bu süreçte yanımda olup destek olan sevgili arkadaşlarım Araş. Gör. Rojin GÜLER, Kutlu Melik TAŞDELEN, Bere Benjamin BANTCHINA'ya ve bölümümüz teknikerleri Muhammet KIR'a gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Nihal SALI
…/…/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....vi
ABSTRACT.....iii
TEŞEKKÜR..... iiiiii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....vi
ÇİZELGELER DİZİNİ viii
1. GİRİŞ…...……..1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI……...7
2.1. Spektral yansımaların toprak özelliklerinin belirlenmesinde kullanılması……7
2.2. Değişken Düzeyli Gübre Uygulamaları……..……...13
3. MATERYAL ve YÖNTEM…….....19
3.1. Deneme alanı…….……...19
3.2. Toprak örnekleme……19
3.3. Toprak analizleri……...20
3.3.1. Toprak özelliklerinin fiziksel ve kimyasal analizleri……..…..……20
3.3.2. Laboratuvar spektral analizleri……..……21
3.4. Modelleme……..……22
3.5. Haritalama……..…24
3.6. Yönetim bölgelerinin belirlenmesi……..…..27
3.7. Gübreleme önerileri……..28
4. BULGULAR ve TARTIŞMA……..29
4.1. Kimyasal toprak analiz sonuçları……..…29
4.2. Spektral analizler……..36
4.2.1. Spektral ön işlemler……..…..36
4.2.2. Spektral modelleme……...38
4.3. Tahminlenen özellikler için hazırlanan toprak özellikleri haritaları…….....42
4.4. Yönetim bölgelerinin haritalanması……..….43
4.5. Değişken oranlı uygulama haritaları……48
5. SONUÇ….. 53
KAYNAKLAR 55
ÖZGEÇMİŞ……61

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
Cmol	Santimol
Da	Dekar
EC	Elektriksel iletkenlik
Ha	Hektar
K	Alınabilir potasyum
Kg	Kilogram
nm	Nanometre
OC	Organik karbon
P	Alınabilir fosfor
R^2	Determinasyon katsayısı
Sat	Saturasyon
TN	Toplam Azot
Q_1	Birinci Çeyrek
Q_3	Üçüncü Çeyrek

Kısaltmalar	**Açıklama**
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CEC	Katyon Değişim Kapasitesi
DGPS	Diferansiyel GPS
DOG	Değişken Oranlı Gübre
DSM	Dijital Toprak Haritalama
GPS	Küresel Konumlama Sistemi
HT	Hassas Tarım
IDW	Ters Mesafe Ağırlıklandırması
LOOCV	Bir Defalık Çapraz Doğrulama (Leave-one-out cross-validation)
LV	Gizli Değişken
LS-SVM	En Küçük Kareler Destek Vektör Makineleri
MAE	Ortalama Mutlak Hata
NDVI	Normalize Edilmiş Bitki Endeksi
NIR	Yakın Kızılötesi
PCA	Temel Bileşen Analizi
PCR	Temel Bileşen Regresyonu
PLSR	Kısmi En Küçük Kareler Regresyonu
RMSE	Ortalama Karekök Hatası
RPD	Artık Tahmin Sapması
RPIQ	Performansın Çeyrekler Arası Mesafeye Oranı
RS	Uzaktan algılama
RSS	Artık Kareler Toplamı
SD	Standart Sapma
SSM	Sahaya Özel Yönetim
SO	Sabit Oranlı
SOG	Sabit Oranlı Gübreleme
STN	Toplam Azot Stoğu

TSS	Toplam Kareler Toplamı
UA	Uzaktan Algılama
Vis	Görünür spektrum
Vis-NIRS	Görünür ve Yakın Kızılötesi Spektrometre
VRA	Değişken Oranlı Uygulama
VRF	Değişken Oranlı Fertigasyon
VRT	Değişken Oranlı Teknoloji
YB	Yönetim Bölgesi
YA	Yakın Algılama

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 3.1.	Deneme alanı ve toprak örnekleme noktaları……..	19
Şekil 3.2.	Toprak burgusu ile örnek noktasını açma ve DPGS ile koordinatları kaydetme……	20
Şekil 3.3.	a) Etüv'de örneklerin kurutulması b) Numunelerin 2 mm'lik elekten elenmesi c) Numunelerin petri kabına yerleştirilmesi……	21
Şekil 3.4.	a) Spektrometre parçaları b) Işık kaynağı ve spektrometre c) Işık kaynağının kalibre edilmesi……..…..	22
Şekil 3.5.	Akış şeması……...……..	26
Şekil 4.1	IDW yöntemi ile hazırlanmış pH haritası……...……	30
Şekil 4.2.	IDW yöntemi ile hazırlanmış P haritası……..	31
Şekil 4.3.	IDW yöntemi ile hazırlanmış K haritası…….	32
Şekil 4.4.	IDW yöntemi ile hazırlanmış OC haritası……...	33
Şekil 4.5.	IDW yöntemi ile hazırlanmış kireç haritası…….....	34
Şekil 4.6.	IDW yöntemi ile hazırlanmış kum haritası…….	34
Şekil 4.7.	IDW yöntemi ile hazırlanmış silt haritası……...…	35
Şekil 4.8.	IDW yöntemi ile hazırlanmış kil haritası……	35
Şekil 4.9.	Toprak örneklerine ait yansıma grafikleri……...	37
Şekil 4.10.	Ön işlem adımları uygulandıktan sonra yansıma grafikleri…...….	37
Şekil 4.11.	Kalibrasyon veri seti, (b) Doğrulama veri seti……	39
Şekil 4.12.	Dijital kütüphaneden alınan veriler sonucunda; (a) Kalibrasyon veri seti, (b) Doğrulama veri seti……	40
Şekil 4.13.	Tahmin edilen toprak özellikleri haritaları a) pH, b) P, c) K, d) OC, e) Kireç……	42
Şekil 4.14.	PCA grafiği……..……...	44
Şekil 4.15.	Elbow yöntemi ile optimum küme sayısının belirlenmesi……..	45
Şekil 4.16.	PCA düzleminde oluşturulan kümeler…….……...	46
Şekil 4.17.	Kümelerin harita üzerinde gösterimi……...	47
Şekil 4.18.	Yönetim bölgelerinin harita üzerinde gösterimi……...…..	48
Şekil 4.19.	Değişken oranlı azotlu gübre uygulama haritası…….	49
Şekil 4.20.	Değişken oranlı fosforlu gübre uygulama haritası……..	50
Şekil 4.21.	Pratikte uygulanabilir yönetim bölgeleri haritası……	51
Şekil 4.22.	Pratik uygulamada atılacak olan azotlu gübre haritası……	51
Şekil 4.23.	Pratik uygulamada atılacak olan fosforlu gübre haritası…….	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 3.1.	Toprak özellikleri analizinde kullanılan metotlar……..….....	21
Çizelge 4.1.	Ölçülen toprak özelliklerine ait değerler……	29
Çizelge 4.2.	Ölçülen toprak özelliklerinin istatiksel özeti…….	30
Çizelge 4.3.	Laboratuvar gübre önerileri…….....…….	36
Çizelge 4.4	PLSR analizleri ile elde edilen modellerin kalibrasyon ve doğrulama model sonuçları……	39
Çizelge 4.5.	Spektral kütüphaneden veri ekleyerek yapılan PLSR analizleri ile elde edilen modellerin kalibrasyon ve doğrulama tahmin sonuçları…….	40
Çizelge 4.6.	Laboratuvar ve tahmin sonuçlarının istatistiksel karşılaştırması…..	43
Çizelge 4.7.	6.3 ha'lık arazinin tamamına sabit ve değişken oranlı gübrelemede verilecek azotlu ve fosforlu gübre miktarları…….	49
Çizelge 4.8.	6.3 ha'lık arazinin tamamına pratikte uygulanacak gübre miktarları…….……...	50

1. GİRİŞ

Toprak, insanların yiyecek, lif ve enerji üretimi için güvendiği temel bir doğal kaynaktır. Toprak, arazilerdeki su hareketinin düzenleyicisi, çevreye nüfuz edebilecek metaller, besinler ve diğer kirleticiler için bir çevre filtresi, biyolojik bir yaşam alanı ve gen rezervi, binalar ve diğer yapılar için bir temel işlevi görür. Dahası, toprak küresel ısınmayı azaltmak için potansiyel bir karbon emici olarak kabul edilir. Bir toprağın bu işlevlerden herhangi birini destekleme kapasitesi, hem mekânsal hem de zamansal değişkenlik gösteren yapısına, bileşimine ve kimyasal, biyolojik ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. (Stenberg vd., 2010).

Tarımsal topraklarda nem içeriği (MC), besinler gibi toprak özellikleri zamansal olarak değişiklik gösterirken, tekstür gibi bazı özellikler mekâna bağlı değişiklik gösterebilmektedir. Hem mekâna hem de zamana göre değişiklik göstermesi de mümkündür. Zaman ve mekan boyunca meydana gelen tarım topraklarındaki bu heterojenlik, ürün büyümesini ve hasat verimini etkilemektedir (Spomer ve Piest, 1982; Stone vd., 1985; Jones vd., 1989; Kravchenko ve Bullock, 2000; Munnaf vd., 2020).

Toprak verimliliği, toprağın sağlıklı mahsul büyümesi ve gelişimi için yeterli temel besin maddelerini sağlama kapasitesinin bir ölçüsüdür. Büyüme mevsimi boyunca bu besin maddelerinin tutarlı bir şekilde tedarik edilmesi, mahsul veriminin en üst düzeye çıkarılmasında kilit bir faktördür (Naumann vd., 2020). Toprak verimliliğinin yönetimi, tarım arazilerinin zaman ve mekân içinde çeşitlilik ve farklılık göstermesi nedeniyle son derece karmaşıktır (Spomer ve Piest, 1982). Sonuç olarak, toprak verimliliğinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, bitkisel üretimi optimize etmek, toprak kalitesini korumak ve çevreyi korumak amacıyla tarlaya özgü toprak varyasyonlarını ele almak için çok önemlidir (Munnaf vd., 2020).

Toprak, yiyecek sağlama, sağlıklı ekosistemleri destekleme, yaşam alanı sunma ve iklimi düzenleme gibi işlevleri yerine getirdiğinden, toprak özelliklerini izlemek için etkili yöntemler geliştirmemiz gerekir. Toprak özelliklerinin iyi anlaşılması, yetiştiricilere çiftçilik kararlarında yardımcı olabilir ve daha genel olarak, toprak

yönetiminde operasyonların, uygulamaların ve tedavilerin uygulanmasını iyileştirebilir. Bu sebeple toprak durumunun izlenmesi, toprak işleme, gübreleme ve sulama gibi uygulamaları ayarlamak için önem arz etmektedir (Ahmadi vd., 2021). Geleneksel toprak izleme, fiziksel ve kimyasal özellikleri değerlendirmek için birden fazla saha örneği toplamaya ve laboratuvar kimyasal analizlerine dayanır. Ancak toprak mekânsal ve zamansal değişkenlik gösteren heterojen bir yapı olduğundan bu geleneksel yöntemler maliyetli, zaman alıcı ve yıkıcıdır. Küresel bir gözlem teknolojisi olan uzaktan algılama, büyük ölçekli kapsama, zamanında veri toplama ve yüksek verimlilik sunan değerli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu avantajlar, tarımda hassas gübreleme ve akıllı yönetim için çok önemlidir (Viscarra Rossel vd., 2016).

Üretimin makine çağından bilgi çağına doğru ilerlemesiyle kârlılık ve çevre yönetiminde genel kazanımlar için girdilerin küçük ölçekli bilgi tabanlı optimizasyonunu ifade eden, Coğrafi bilgi sistemleri (CBS), küresel konumlandırma sistemi (GPS), yakın algılama (YA) ve uzaktan algılama (UA) dâhil olmak üzere coğrafi mekânsal teknolojileri içeren hassas tarım (HT) teriminin kullanımında artış görülmektedir. Hassas tarım (HT), doğru zamanda, doğru miktarda, doğru yönetim uygulamasına odaklanarak verimi artırmayı, girdileri optimize etmeyi, israfı ve çevresel atıkları azaltmayı amaçlayan bölgeye özgü bir yaklaşımdır. Günümüzde HT, tarımsal üretimin neredeyse her alanında kullanılmaktadır. Bilgi ve hesaplama yoğun bir teknoloji olan HT'ın başarısı, sahaya özgü bilgilerin toplanması ve işlenmesi için son derece verimli ve güvenilir yöntemlere bağlıdır (Yufeng GE vd., 2011). Toprağı daha verimli bir şekilde kullanabilmek ve aynı zamanda gelecek nesiller için koruyabilmek analitik tekniklerimizi geliştirmemiz gerekmektedir. Artan popülasyon göz önüne alındığında temel kaynaklarımızdan toprağı akıllıca, hızlı ve doğru biçimde yönetmek oldukça önemlidir. Bu nedenle toprak verilerinin elde edilmesi ve saklanması elzemdir (Viscarra Rossel ve McBratney, 1998). Önemli toprak değişkenlerine ait tarla içi değişkenleriyle, ürün verimlerinin haritalanması ve saklanması alan değişimlerinin yönetilmesi ve arazi yöneticilerini bilgilendirmek için önem arz etmektedir. Bu tür bilgiler hassas tarım yaklaşımının temelini oluşturmaktadır. (Gebbers ve Adamchuk, 2010).

Bu yaklaşım, bir alanın çeşitli üretim potansiyellerini belirler ve yönetim eylemlerinin optimum verimi elde etmek için nerede değiştirilebileceğini vurgular. Bir alandaki değişkenlik hakkında daha kapsamlı bir anlayış kazanarak, sulama suyu, gübreler ve biyositler gibi kaynak kullanımlarının verimliliği artırılabilir (Viscarra Rossel vd., 2006). Temel besin maddelerinin yetersiz tedariki ürün verimini önemli ölçüde azaltabilirken, aşırı besin temini üretim karlarını azaltabilir ve besin sızması ve yüzey akışı yoluyla çevreyi olumsuz etkileyebilir (Bongiovanni ve Lowenberg Deboer, 2004).

Çevre ile ilgili ekoloji, klimatoloji, jeoloji, tarım gibi bir çok disiplinde yaygın kullanıma sahip olan uzaktan algılama (UA) terimi nesnelerin özelliklerinin belirlenmesi için elektromanyetik enerjinin kullanılmasını ifade etmektedir. Geniş kapsamlılık, inzaviv olmama, esneklik avantajlarına sahiptir. UA'nın hem uzak (örneğin uydu ve hava görüntüleri) hem de yakın (örneğin spektroskopik yansıma) teknikleri içerdiği belirtilmelidir, çünkü her ikisi de hedef nesneden uzakta yapılmaktadır. “Uzak” kavramı nesnelere temas etmediğini anlatmaktadır (Yufeng GE vd., 2011).

Araştırmacılar, hem uzaktan hem de yakından algılama tekniklerini kullanarak toprak bileşimi, nem seviyeleri ve besin kullanılabilirliği hakkında veri toplayabilir. Bu bilgiler, ürün yönetimi ve arazi kullanım planlaması için gelişmiş karar verme sürecini kolaylaştırır. Bu non-invaziv yaklaşım, çevreyi rahatsız etmeden toprak özelliklerinin değerlendirilmesini sağlayarak sürdürülebilir tarımda özellikle değerli olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca, teknolojideki ilerlemeler bu yöntemlerin doğruluğunu ve verimliliğini artırmaya devam ederek daha hassas tarımsal uygulamaların ve gelişmiş çevresel izlemenin önünü açmaktadır.

Bu yaklaşımın, yaygın arazi örtüsü bileşimlerinin çoğuyla korelasyon gösteren çoklu spektral bilgileri kullanarak, zamansal bir temelde ve uygun maliyetli bir şekilde geniş alanlara aynı anda genel bir bakış sunması tarım alanında toprak özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmasının önünü açmıştır (Ben-Dor, 2002). Görünür ve yakın kızılötesi (Vis-NIR) spektroskopisi, toprak bilimi alanında değerli bir araç haline gelmiş olup, toprak özelliklerinin analizi için tahribatsız ve hızlı bir yöntem sunmaktadır (Brown vd., 2006, Viscarra Rossel vd., 2006). Bu spektroskopik yaklaşım,

spektrumun görünür ve yakın kızılötesi bölgelerindeki elektromanyetik radyasyon ile toprak örneklerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri arasındaki etkileşimi kullanır (Sur ve Chaugan, 2019). Bu yöntem, toprak yönetimi uygulamalarını optimize etmek ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Böylece, sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Vis-NIR'a olan artarak devam eden ilginin birçok nedeni vardır. Örneğin, numune hazırlığı sadece kurutma ve ezmeyi içerir, numune analizden etkilenmez, (tehlikeli) kimyasallar gerekmez, ölçüm sadece birkaç saniye sürer, tek bir taramadan çeşitli toprak özellikleri tahmin edilebilir ve teknik hem laboratuvarda hem de yerinde kullanılabilir (Viscarra Rossel vd., 2006). Ancak, ıslak kimya gibi standart analitik prosedürler özel ekipman gerektirir ve özellikle yüksek mekansal örnekleme yoğunluğu ile uğraşırken son derece zaman alıcı ve pahalı olabilir (Cozzolino, D. ve Morón, A, 2006). Standart ıslak kimyaya bir alternatif olarak, toprak Görünür ve Yakın Kızılötesi (Vis-NIR) yansıma spektroskopisi hızlı, uygun maliyetli, tahribatsız, çevre dostu, tekrarlanabilir ve yeniden üretilebilir bir analitik teknik olduğu kanıtlanmıştır (Stenberg vd., 2010).

Vis-NIR'ın ana odak noktası temel toprak bileşimi, özellikle toprak organik maddesi (SOM), doku ve kil mineralojisi, ancak aynı zamanda besin kullanılabilirliği ve verimlilik, yapı ve mikrobiyal aktivite gibi özelliklerin belirlenmesidir (Bowers ve Hanks, 1965; Sudduth vd., 1989; Ben-Dor ve Banin, 1995; Stenberg vd., 1995; Viscarra Rossel ve McBratney, 1998; Shepherd ve Walsh, 2002; Brown vd., 2006; Wetterlind vd., 2008b). Toprak özelliklerinin belirlenmesiyle arazilerin sahip oldukları özelliklere göre gruplanarak yönetim bölgelerine (YB) ayrılarak sahaya özel uygulama yapılması sağlanmaktadır. YB'leri, verimi sınırlayan faktörlerin nispeten homojen bir kombinasyonuna sahip olan ve çiftlik girdilerinden maksimum verim elde etmek için belirli bir ürün girdisinin tek bir oranının uygun olduğu bir tarlanın alt bölgeleri olarak tanımlanmaktadır (Nawar vd., 2017). Geleneksel arazi yönetiminde toprak, topografya, yerel hava koşulları ve arazi kullanımındaki değişkenlik göz ardı edilerek tüm tarla homojen bir alan olarak ele alınarak çiftlik operasyonları (gübreleme, ilaç, su) tarla içi toprak değişkenliğinin olmadığını varsayarak yapılmaktadır (Shanahan vd., 2008;

Samborski vd., 2016). YB'leri belirlemek için farklı yöntemler vardır; örneğin, tarlaların yakınsal algılanmasıyla toplanan verilerden toprak haritalaması (Gozdowski vd., 2014; Abbas vd., 2020), toprak elektriksel iletkenliği, verim istatistikleri, toprak dokusu, topografya, toprak organik maddesi (SOM) ve farklı toprak besinleri gibi değişkenlerin hepsi YB'leri belirlemek için kullanılmıştır (Khan vd., 2020).

HT çerçevesinde önerilen sahaya özel yönetim (SSM) uygulamaları, çiftçilere verimi artırma, girdileri azaltma ve çevresel etkileri en aza indirme imkanı vermektedir (Robert, 2002, Robertson vd., 2012, Basso vd., 2013). Değişken oranlı teknolojiler (VRT), mahsullerin ihtiyaçlarını karşılamak için doğru zamanda ve yerde doğru miktarda girdi uygulayarak kârın artırılması ve çevresel zararın azaltılmasını hedeflemektedir (Diacono vd., 2013). YB'nin tarımsal araştırmalardaki başarısı, literatürde sabit oranlı (SO) gübrelemeye kıyasla YB-değişken oranlı (VR) gübrelemenin maliyet-fayda analizine odaklanan sınırlı bilgi bulunmasına rağmen teknik olarak gelişmesine sebep olmuştur (Kaivosoja ve ark., 2014). Kazlauskas vd. (2021), yaptıkları araştırmada değişken oranlı gübrelemenin, sabit oranlı gübrelemeye kıyasla toplam azot, fosfor ve potasyum gübre miktarını %24,9, enerji tüketimini 3463,1 kg ha^{-1} ve sera gazı emisyonlarını (GHG) 341,5 kg CO_2eq ha^{-1} azaltabileceğini vurgulamışlardır. Değişken oranlı gübreleme yönteminin, gübreleme maliyetlerini ve aynı zamanda toplam bitkisel üretim maliyetlerini ortalama olarak 168,0 ha^{-1} € azalttığını bildirmişlerdir. Yang vd. (2001), tekdüze ve değişken oranlı uygulamanın verime etkisini araştırmak için kurdukları iki yıllık denemede, değişken oranlı uygulamanın her iki yıl için de tekdüze N ve P uygulamasından önemli ölçüde daha yüksek verimle sonuçlandığını bulmuşlardır. (1997'de 400 kg/ha daha yüksek ve 1998'de 338 kg/ha daha yüksek). Dahası, değişken oranlı uygulama için verim izleme verilerinin değişim katsayıları, iki tekdüze oranlı uygulama için olanlardan daha küçük olduğu, basit bir ekonomik analiz ile değişken oranlı uygulamanın tekdüze N ve P uygulamasına göre pozitif göreli ekonomik getirileri olduğu belirtilmiştir (1997'de 27$/ha ve 1998'de 23$/ha). Mahsullerin miktarını ve kalitesini en üst düzeye çıkarmak için önemli aşama besin uygulamasıdır (Savci, 2012). Gübreler maliyetli bir girdi olduğundan, kullanılırken bilimsel yaklaşım gerektirir. Mahsul besinlerinin mahsulün büyüme aşamasının gerçek ihtiyacına göre kullanılması önem arz etmektedir (Gellings,

2004). Topraklar arazi kullanımı ve yönetimindeki değişikliklere genellikle yavaş tepki verir ve bu nedenle toprak kalitesindeki değişiklikleri geri dönüşü olmayan hasarlar meydana gelmeden önce tespit etmek su ve hava kalitesine göre daha zor olabildiğinden uygulama miktarlarının doğruluğu en önemli etkendir (Nortcliff, 2002).

Bu araştırmanın hipotezi, az sayıda toprak örneğine ait laboratuvar analiz sonuçları, önceden elde edilmiş dijital spektrometrik veri tabanı ve uygun matematiksel modeller kullanılarak çok sayıda toprak örneği analizine gerek kalmadan yeterli doğrulukta değişken oranlı uygulama haritaları oluşturulabileceğidir.

Çalışmanın genel amacı, toprak analizlerini spektrometrik veri analizleriyle entegre ederek bazı bitki besin elementleri için değişken oranlı uygulama haritaları oluşturmaktır. Araştırmanın spesifik amaçları ise şunlardır:

1) Az sayıda toprak örneği kullanarak çalışma parselindeki pH, K, P, OC ve kireç gibi besin elementlerinin değişkenliklerini yüksek doğrulukla belirlenmesi,
2) Dijital toprak kütüphanesinden veri eklenerek R^2 ve RPD değerlerinin yükseltilmeye çalışılması,
3) Çalışma parselini yönetim bölgelerine ayırarak değişken oranlı gübre uygulama haritalarının hazırlanması,
4) DOG ve SOG için gerekli gübre miktarlarının kıyaslanması.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Spektral yansımaların toprak özelliklerinin belirlenmesinde kullanılması

Toprak algılama ve izleme teknolojileri, sürdürülebilir ve verimli tarımsal uygulamalar arayışında kilit unsurlar olarak ortaya çıkmıştır (Yin vd., 2021). Bu teknolojiler, toprak özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde karakterize edilmesine olanak tanıyarak kaynak kullanımını ve mahsul verimini artırabilecek sahaya özgü yönetim kararlarının alınmasını sağlar. En umut verici toprak algılama teknolojileri arasında, toprak bileşimini ve niteliklerini değerlendirmek için hızlı, tahribatsız ve kapsamlı bir yaklaşım sunan spektroskopi kullanımına ait literatürün bir incelemesi sunulmuştur.

Ben-Dor vd. (1995), kurak ve yarı kurak toprakların yakın kızılötesi (NIR) bölgesindeki (1–2,5 μm) yansıma eğrilerinden spektral özellikli toprak özelliklerini tahmin etme çalışması yapmıştır. Alınan 91 toprak örneği için NIR bölgesindeki yüksek çözünürlüklü dağınık yansıma spektrumları kaydedilmiş ve altı toprak özelliği (kil içeriği, spesifik yüzey alanı, katyon değişim kapasitesi, higroskopik nem, karbonat içeriği ve organik madde içeriği) toprak laboratuvarlarında kullanılan rutin yöntemlerle ölçülmüştür. NIR analizi kullanılarak her bir toprak özelliğini spektral imzasından tahmin etmeye yönelik ampirik bir model geliştirilmiştir. Tüm özelliklerin optimum performansının 25 ila 63 spektral nokta arasında olduğu bulunmuştur.

Brown vd. (2006), büyük toprak spektral kütüphanelerinin, yardımcı tahmin edicilerin, tamamlayıcı yerel kalibrasyon örneklerinin ve teorik spektroskopinin kullanılmasıyla tahminlerin doğruluğunun büyük ölçüde artabileceğini ve çalışmaların devam etmesi gerektiği belirtilmiştir.

Brown (2007), tarafından küresel toprak spektral kütüphanelerini yerel kalibrasyon örnekleriyle birleştirmenin sonuçları tartışılmıştır, Bu çalışmada, 4184 örnekten oluşan coğrafi olarak çeşitli bir "küresel" toprak spektral kütüphanesi, 2. dereceden bir Uganda havzasına dağıtılmış 418'e kadar "yerel" kalibrasyon toprak örneğiyle desteklenerek kil boyutundaki malzeme (KİL), toprak organik karbonu (SOC) ve genleşebilir 2:1 killerin

(küresel kütüphanede "montmorillonit" veya MT olarak adlandırılır) oranı tahmin edilmiştir. Model inşası için stokastik gradyan destekli regresyon ağaçları (BRT) kullanılmış ve çeşitli kalibrasyon ve doğrulama şemaları test edilmiştir. KİL ve SOC için sırasıyla yerel profil ile 13 ve 14 katlı çapraz doğrulama ile birlikte küresel kütüphanenin kullanılması, KİL (N = 429/410) için 89/68 g kg^{-1} ve SOC (N = 272/105) için 4.2/2.6 g kg^{-1} dambo/upland (alçak ve suya doygun alanlar/yüksek ve daha kuru araziler) RMSD değerleri vermiştir. Bu sonuçlar, farklı spektroradyometreler ve laboratuvar referans ölçümleri (toplam yanma ve Walkley-Black, hidrometre ve pipet) kullanılarak oluşturulan spektral kütüphanelerin birleştirilmesinin zorluğuna rağmen elde edilmiştir. Sadece küresel kütüphane kullanılarak, MT içeriğinin VNIR'den türetilen indeksi, yerel dambo toprakları için X-ışını kırınımı (XRD) MT tepe yoğunluğunun karekökü ile önemli ölçüde ilişkili olduğu (R^2 = 0.52, N = 59, $p < 0.0001$); referans XRD yönteminin yarı-kantitatif yapısı göz önüne alındığında kabul edilebilir bir sonuç olduğu çıkarımı yapılmıştır. VNIR tahminleri laboratuvar hassasiyetine yaklaşmasa da, toprak-manzara modellemesi için VNIR karakterizasyonu kil mineralojisi için oldukça iyi çalıştığı, dambo "(derinliği %35 kile kadar)" haritalama için yeterli olduğu ve SOC haritalama için yeterince doğru olmadığı bildirilmiştir.

Stenberg vd. (2010), toprağa ait birçok özelliğin belirlenmesini sağladığı için spektrumları daha doğru/akıllıca kullanmak için çeşitli stratejilere gerek olduğunu belirtmektedir. Küresel bir işbirliği ağı geliştirmeyi amaçlayan Global Toprak Spektral Kütüphanesi'nin geliştirilmesi gibi girişimlerin ilerleme sağlayabileceğine değinilmektedir. Bu kütüphane içinde farklı topraklardan veriler alınması gerekmektedir. Literatürde henüz kütüphane için tüm toprakları kapsayıcı veri mevcut olmadığından gelecekte yapılacak araştırma ve çalışmalar dijital toprak kütüphanelerini geliştirecek ve bu teknolojilerin daha fazla uygulanabilir olmasına katkı sağlayacaktır.

Haiqing (2011), tarım arazileri için farklı tarama aralıklarına (400-2100 nm ve 400-2500 nm) sahip iki spektrofotometre kullanılarak geliştirilen kalibrasyon modellerinin performansını toplam nitrojen (TN) ve organik karbon için (OC) karşılaştırmıştır. Spektrumlar bir kalibrasyon setine (%75) ve bağımsız bir doğrulama setine (%25) bölünmüş, iki spektral aralığa dayalı kalibrasyon modelleri oluşturmak için bir tanesini

dışarıda bırakma çapraz doğrulaması ile kısmi en küçük kareler regresyonu (PLSR) uygulanmıştır. Doğrulama sonucu, 400-2500 nm aralığında geliştirilen PLSR modellerinin 400-2100 nm aralığında geliştirilen PLSR modellerinden daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. 400-2500 nm kullanılarak yapılan spektroskopik kalibrasyonun çiftlik ölçeğinde toprak N ve C ölçümü için daha yüksek tahmin doğruluğu üretebileceği sonucuna varılmıştır.

Kuang vd. (2011), bireysel çiftlikler için geliştirilen kalibrasyon modellerinin performansını, üç Avrupa ülkesindeki (Çek Cumhuriyeti, Almanya ve Danimarka) birer çiftlik için geçerli olan genel modellerin performansıyla karşılaştırmıştır. Vis-NIR spektrofotometre ile taranmış toprak örnekleri, kalibrasyon (%70) ve doğrulama (%30) setlerine bölünmüş, kalibrasyon modelleri oluşturmak için bir tanesini dışarıda bırakma çapraz doğrulaması ve kısmi en küçük kareler regresyonuna (PLSR) tabi tutulmuştur. Çekya'daki çiftlik haricinde, bireysel çiftlik modelleri toplam karbon (TC), toplam azot (TN) ve organik karbon (OC) için başarılı kalibrasyon sağlamış ve çapraz doğrulama ile bağımsız doğrulama için sırasıyla 0.85–0.93 ve 0.74–0.96 arasındaki determinasyon katsayıları (R^2) ile 2.61–3.96 ve 2.00–4.95 arasındaki artık tahmin sapma (RPD) değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar, daha büyük standart sapmaların (SD'ler) ve daha geniş varyasyon aralıklarının, daha büyük R^2 ve RPD ile sonuçlandığını, ancak aynı zamanda daha büyük tahmin ortalama kare hatalarına (RMSEP) yol açtığını ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, geniş bir değişim aralığını kapsayacak şekilde Vis-NIR kalibrasyonu için toprak numuneleri seçilirken, aynı zamanda küçük RMSEP değerleri ile sonuçlanan uzlaşmacı bir çözüm bulunması gerektiği belirtilmiştir.

Tekin ve Tümsavaş (2012), toprak haritaları oluşturulmasındaki en büyük yararın önemli girdiler olan gübreleme ve ilaçlama maliyetlerini azaltmak olduğunu belirtmiştir. Bu sebeple Değişken Oranlı Gübre (DOG) uygulamalarının hem ekonomik hem de teknik özellikler açısından araştırılmaya devam etmesi gerektiğine değinmişlerdir. Spektral veriler ile toprak özelliği tahmin edilmesi esnasında yansıma değerlerine etki eden renk, bünye, nem içeriği gibi pek çok etmenin olduğu düşünülürse bunların etki

derecelerinin de değerlendirilebileceği modellerin oluşturulmasına yönelik çalışmaların yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Morellos vd. (2016), VIS-NIR spektroskopisinin, toprakta sahip olduğu doğrudan spektral tepkiler nedeniyle toprağın toplam nitrojenini (TN), organik karbonunu (OC) ve nem içeriğini (MC) tahmin etme potansiyeline sahip olduğunun yaygın olarak bilindiğini ifade ettikten sonra, tahmin doğruluğunun arttırılması ve özellikle taze (ıslak ve işlenmemiş) toprak numuneleri için ileri modelleme tekniklerinin gerekli olduğunu bildirmiştir. Araştırıcılar, iki doğrusal çok değişkenli ve iki makine öğrenme yönteminin TN, OC ve MC için tahmin performansını karşılaştırmıştır. Araştırılan iki çok değişkenli yöntem, temel bileşen regresyonunu (PCR) ve kısmi en küçük kareler regresyonunu (PLSR); makine öğrenme yöntemleri ise en küçük kareler destek vektör makinelerini (LS-SVM) ve Kübist'tir. Almanya'daki bir tarladan toplanan 140 ıslak toprak örneğinden dağınık yansıma modunda toprak spektrumlarını (305-2200 nm) toplamak için mobil, fiber tipi bir VIS-NIR spektrofotometresi kullanılmıştır. Sonuçlar, makine öğrenimi yöntemlerinin veri kümesindeki doğrusal olmayan sorunları çözebildiğini göstermektedir. LS-SVM'ler ve Kübist yöntemi, incelenen her üç toprak özelliğinin tahmini için doğrusal çok değişkenli yöntemlerden daha iyi performans göstermiştir. LS-SVM, MC (kök ortalama kare tahmin hatası (RMSEP) = %0,457 ve artık tahmin sapması (RPD) = 2,24) ve OC (RMSEP = %0,062 ve RPD = 2,20) için en iyi tahmini sağlarken Kübist yöntemi ise en iyi tahmini TN için (RMSEP = 0,071 ve RPD = 1,96) yapmıştır.

Viscarra vd., (2016), toprağın ekosistem hizmetleri sağladığı, insan sağlığını ve yerleşimini desteklediği, karbonu depolayarak ve sera gazı emisyonlarını düzenlediğine değinmiştir. Topraktaki bozulma ve kentleşmeden kaynaklanan benzeri görülmemiş baskılar tarımsal ekolojik dengeyi ve gıda güvenliğini tehdit ettiğinden ve gelecek nesiller için toprağı sürdürülebilir bir şekilde yönetmek ve korumak için toprak hakkında daha fazla şey öğrenmemizin öneminden bahsedilmiştir. Bu amaçla, küresel bir toprak görünür-yakın kızılötesi (vis-NIR) spektral kütüphanesi geliştirip analiz ettikleri bildirilmiştir. Spektrumlarda kodlanan bilginin toprak bileşimini

tanımlayabileceğini ve küresel iklim değişkenliğinin bir vekili olarak hareket eden arazi örtüsü ve küresel coğrafi dağılımıyla ilişkilendirilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca küresel spektrumların toprak organik ve inorganik karbon, kil, silt, kum ve demir içerikleri, katyon değişim kapasitesi ve pH gibi toprak özelliklerini tahmin etmede yararlı olduğunu gösterilmiştir. Farklı spektrometreler ve yöntemler kullanılarak farklı laboratuvarlarda kaydedilen spektrumları işlemek için dalgacıklar kullanmanın, spektroskopik modellemeyi iyileştirmeye yardımcı olduğunu ve çeşitli spektrum kümelerini bir makine öğrenme algoritmasıyla modellemenin, verilerdeki yerel ilişkileri bularak toprak özellikleri ile ilgili doğru tahminleme yapılabileceğini söylemektedir. Elde ettikleri spektroskopik modellerin tutarlı ve güvenilir olduğuna ve küresel ölçekte toprak araştırmalarını kolaylaştırmaya hizmet edebilecek uyumlu bir küresel toprak özellikleri veri seti elde ettiklerine değinilmektedir.

Yueting vd. (2020), Vis-NIR spektroskopisi ile STN içerik tahmin modeli oluşturmanın pratik bir yolunu bulmak için, üç geleneksel makine öğrenimi yöntemi ve bir derin öğrenme yaklaşımı araştırmış ve bunların tahmin performansları, LUCAS Soil (19.019 örnek) adı verilen halka açık bir veri kümesiyle karşılaştırıp analiz etmiştir. STN içeriğini tahmin etmede farklı ön işlemlerin etkinliğini açıklığa kavuşturmak için, üç geleneksel makine öğrenimi yöntemi dört ön işleme yaklaşımıyla (temel düzeltme, yumuşatma, boyut azaltma ve özellik seçimi dahil) birleştirilerek karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. Sonuçlar**,** taban çizgisi düzeltilmiş ve yumuşatılmış ELM modelinin pratik hassasiyete ulaştığını göstermektedir R^2 = 0.89, RMSEP = 1.60 g/kg, RPD = 2.34). Araştırmacılar, üç farklı yapıdaki CNN modellerinden biri, daha fazla 1×1 konvolüsyon içeren (R^2 = 0.93; RMSEP = 0.95 g/kg; ve RPD = 3.85 optimal durum) daha iyi performans gösterdiği ve yeterli veri örneği olduğunda, aynı tür toprak ve benzer tarımsal uygulamalar için yüksek doğrulukta, sağlam bir STN içeriği tahmin modeli oluşturmak amacıyla derin öğrenme yöntemlerinin kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Yufeng vd. (2020), birden fazla toprak özelliğinin eş zamanlı karakterizasyonu için görünür ve yakın kızılötesi yansıma spektroskopisinin (VisNIR) başarılı kullanımını

tartışmıştır. VisNIR cihazlarının markası/modeli, numune ölçüm koşulları ve çeşitli laboratuvarlarda kullanılan farklı spektrometreler gibi faktörlerin model doğruluğunu etkileyebildiği açıklanmıştır. Ayrıca, VisNIR ile toprak analizlerini karşılaştıran literatür sayısının az olduğuna dikkat çekilmiştir. Buna göre, VisNIR ile toprak özelliklerini belirlemede tahmin doğruluğunu artırmak ve farklı toprak özelliklerini ve kirleticileri ölçmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Yu vd. (2023), çoğu çabanın, toprak özelliklerini tahmin etmek için geleneksel analize göre uygun maliyetli, hızlı ve tahribatsız bir alternatif olarak kabul edilen Vis-NIR spektroskopisinde bilgi vermeyen değişkenleri ortadan kaldırmak için karakteristik dalga boylarının seçilerek çözünürlüklerinin toprak özelliklerinin tahmin doğruluğu üzerindeki etkisinin göz ardı edilmesine adandığını belirtmiştir. 'İki adımlı' dalga boyu seçme yöntemini önererek karakteristik dalga boyları için en uygun spektral çözünürlüğü (1nm- 100nm) yapılandırmak için yapay arı kolonisi (ABC) algoritmasını benimsemiştir. Çin'deki Songnen Ovası bölgesinden toplanan 112 toprak örneğinden toprak veri tabanını oluşturulmuştur ve SOM, AP ve AK gibi toprak özellikleri arasındaki ilişkileri kurmak için kısmi en küçük kareler regresyonu (PLSR) kullanılmıştır. Çalışmada bu stratejinin SOM (RMSEp = 2.758, R^2 p = 0.857, RPIQp = 4.579), AP (RMSEp = 0.062, R2 p = 0.790, RPIQp = 3.552) ve AK (RMSEp = 0.366, R^2 p = 0.758, RPIQp = 2.525) için tahmin doğruluğunu PLSR modelleriyle karşılaştırıldığında etkili bir şekilde artırdığı belirtilmiştir.

Debaene vd. (2023), VIS-NIR spektroskopisinin, çoğunlukla laboratuvar koşullarında, birçok toprak özelliğini tahmin etmek için yaygın olarak kullanıldığını ve sahada ölçüldüğünde genellikle daha iyi spektrumlar elde etmek için zaman alıcı yöntemlere gerek duyduğunu belirtmiştir. El değmemiş çıplak topraklarda fiber optik veya 4◦ lens ile doğrudan yansıma spektrumları ölçülerek bu sorun ele alınmaya çalışılmıştır. C, N içeriği ve toprak dokusu tahmin modelleri, kısmi en küçük kareler ve destek vektör makinesi regresyonu kullanılarak kurulmuştur. Spektral ön işleme ile bazı tatmin edici modeller elde edildiği belirtilmektedir(C içeriği için (R^2 = 0.57; RMSE = 0.09%) ve N içeriği için (R^2 = 0.53; RMSE = 0.02%)). Bu çalışma toprak hakkındaki temel bilgileri

saha ölçeğinde elde etmek için tahmin modellerinin çıplak fiber optik ve/veya 4° lens ile elde edilen VIS-NIR spektrumlarından oluşturulabileceğini göstermektedir.

Xiaolin vd. (2023)'na göre, VNIR spektroskopisi; kil içeriği, pH, OC ve CEC gibi çeşitli toprak özelliklerini dolaylı olarak tahmin etmek için başarıyla kullanılmakta ve toprak verimliliği değerlendirmesinde yüksek doğruluk göstermektedir. Doğruluk değerlendirmesi, tahmin doğruluğunu ve sınıflandırmayı değerlendirmek için RPD, RPIQ ve kappa katsayısı gibi metrikleri içermektedir. Araştırmacılar, mevcut araştırmaların esas olarak genel toprak verimliliğini temsil etmek için belirli toprak özelliklerini kullanmaya odaklandığını, doğrudan spektroskopi teknolojisi kullanılarak toprak verimliliği değerlendirmesinin ise nispeten sınırlı olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, doğrudan tahmin yöntemi, kolaylaştırılmış ve verimli süreci nedeniyle, bölgesel toprak verimliliği değişikliklerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesi için büyük bir potansiyel göstermektedir.

2.2. Değişken düzeyli gübre uygulamaları

Değişken oranlı gübreleme uygulaması, çevresel kaygıları azaltırken mahsul verimliliğini artırabilecek umut verici bir hassas tarım tekniği olarak ortaya çıkmıştır (Loon ve ark., 2018). Geleneksel tek tip gübre uygulaması genellikle toprak verimliliğindeki mekansal değişkenliği hesaba katmamakta, bu da bazı alanlarda aşırı gübrelemeye, bazılarında ise yetersiz gübrelemeye yol açmaktadır. Değişken oranlı gübreleme, kablosuz iletişim, sensör teknolojisi ve hesaplama algoritmalarındaki gelişmelerden yararlanarak, besin girdilerini bir tarla içindeki farklı bölgelerin özel ihtiyaçlarına göre uyarlamayı amaçlayan bir yaklaşımdır (Loon ve ark., 2018).

Yang vd. (2001), değişken oranlı gübre uygulamalarının gübre kullanım verimliliğini artırma, ekonomik getirileri yükseltme ve çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, 1997 ve 1998 büyüme sezonlarında tane sorgumu ekili üç tarlada sabit oranlı azot (N), sabit oranlı azot ve fosfor (N ve P) ile değişken

oranlı azot ve fosfor (N ve P) olmak üzere üç farklı gübreleme stratejisi karşılaştırılmıştır. Denemede, değişken oranlı N ve P uygulaması için, sabit bir verim hedefi ve deneme alanlarındaki yerel toprak N ve P seviyelerine dayalı uygulama haritaları oluşturulmuştur. Hasat verileri, değişken oranlı gübrelemenin her iki yılda da sabit oranlı N ve P uygulamasına kıyasla daha yüksek verim sağladığını (1997'de 400 kg/ha, 1998'de 338 kg/ha) ve verim değişkenliğini azalttığını göstermiştir. Basit bir ekonomik analiz, değişken oranlı uygulamanın sabit oranlı N ve P uygulamasına göre ekonomik getiriyi 1997'de 27 $/ha, 1998'de 23 $/ha artırdığını ortaya koymuştur.

Robertson vd. (2009), Avustralya buğday kuşağındaki altı örnek çiftlikte değişken oranlı gübre uygulamasının benimsenmesinin ekonomik faydalarını nicelleştirmeye çalışmışlardır. Çalışma alanı bir dizi tarımsal iklim bölgesini (Akdeniz, tekdüze ve yaz baskın yağış desenleri), ekim sistemlerini (buğday-lupin, buğday-kanola ve kış ve yaz mahsulleri), çiftlik boyutlarını (1250-5800 hektar), toprak tiplerini (sığ çakıllardan derin çatlayan killere) ve üretim seviyelerini (ortalama buğday verimi 1,8 ila 3,5 t/ha) kapsamaktadır. Çiftçilerin, 2-10 yıldır gübrenin değişken oranlı teknoloji (VRT) yönetiminin bir biçimini uyguladığı belirtilmiştir. VRT'in ölçülen faydaları ile ekipmana yapılan sermaye yatırımının kendini 2-5 yıl içinde geri kazandığına değinilmiştir. Bu çalışma, katılımcı Avustralyalı tahıl yetiştiricilerinin karlı olan ve ilk sermaye harcamasını birkaç yıl içinde geri kazandıran VRT sistemlerini benimsediğini göstermektedir. VRT teknolojisinin kullanımı ve faydalarının, çiftçi tercihlerine ve koşullarına uygun olarak çiftlikten çiftliğe değiştiği de belirtilmiştir.

Peng vd., (2010), Çin'de pirinç (Oryza sativa L.) mahsulüne aşırı azot (N) uygulaması çevre kirliliğine neden olduğunu, pirinç çiftçiliğinin maliyetini artırdığını, tane verimini düşürerek küresel ısınmaya katkıda bulunduğunu belirtmektedir. Uluslararası Pirinç Araştırma Enstitüsü'nden bilim insanları, 1997'den beri Çin'de bölgeye özgü N yönetimi (SSNM) yoluyla pirinç N gübrelemesini iyileştirmek için Çin'deki ortaklarıyla iş birliği yapmakta olduğu, saha deneyleri ve gösteri denemeleri başlangıçta Zhejiang eyaletinde yürütülürken kademeli olarak Guangdong, Hunan, Jiangsu, Hubei ve Heilongjiang eyaletlerine genişletildiği söylenmektedir. Ortalama olarak, SSNM çiftçilerin N

uygulamalarıyla karşılaştırıldığında N gübresini %32 oranında azalttığı ve tane verimini %5 artırdığı belirlenmiştir. Çin ve diğer Asya pirinç yetiştiricisi ülkelerde SSNM üzerine on yıllık araştırmadan sonra, SSNM'nin hem gübre N kullanım verimliliğini hem de pirinç mahsulünün tane verimini iyileştirmek için olgunlaşmış bir teknoloji olduğu belirtilmiştir.

Basso vd. (2016), Tarımsal girdi ve yönetim uygulamalarının, toprak özelliklerinin ve arazi konumunun mekansal değişkenliğinin varlığına rağmen, geleneksel olarak tarımsal alanlarda tekdüze bir şekilde uygulanması hem ekonomik hem de çevresel olarak verimsiz olabildiğini belirtmiştir. Bu çalışma verim ve bölgeye özgü N oranı tepkisinin entegre bir mekansal-zamansal analizini kullanarak optimum N gübre oranlarını belirlemek ve bölgede değişken oranlı N gübresinin çevresel faydaları belirtmek üzerine yapılmıştır. Çalışma dört yıl boyunca (2005-2008) İtalya'da 13,6 hektarlık bir alanda yürütülmüştür. Yerel toprak ve arazi özelliklerine dayalı olarak tarladaki belirli bölgelerde farklı N oranlarına karşı ürün tepkisini değerlendirmek için doğrulanmış bir ürün simülasyon modeli kullanılmıştır. Önceki hasatlardan elde edilen verim haritalarının ve toprak elektrik özdirenci verilerinin analizine dayanarak, üç yönetim bölgesi tanımlanmıştır. Bu bölgelerin her birine, biri simülasyon analizleri tarafından önerilen diğeri üretici tarafından normalde uygulanan düzgün N gübrelemesi olmak üzere iki N oranı uygulanmıştır. Değişken N oranlarının uygulandığı bölgelerde, düzgün N gübrelemesiyle karşılaştırıldığında N sızıntısı daha düşük olduğu ve net gelir daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu, bir tarlada değişken N gübreleme oranlarını belirlemek için mahsul modellerinin kullanılmasının ve daha yüksek kar elde etmek ve nitrat sızıntısını azaltmak için değişken oranlı N gübresinin uygulanmasının etkinliğini göstermektedir.

Nawar vd. (2017), Son on yıldaki yapılan çalışmalara göre, Yönetim bölgesi (YB) çizim teknikleri değişken oranlı besin uygulaması için kullanıldığında, çiftlik verimliliğinin geleneksel tekdüze oranlı uygulama yöntemleriyle karşılaştırıldığında arttığını belirtmiştir. Bu iyileştirilmiş çiftlik üretim verimliliğine çevresel etkilerde bir azalma eşlik ettiğini bu nedenle YB'nin uygulanması genellikle finansal ve çevresel faydalar sağladığından yakın gelecekte hassas tarım tekniklerinin yaygınlaşması ve

uygulanmasıyla birlikte değişken düzeyli uygulamalarda artış öngörüldüğüne değinilmiştir.

Colaço vd., (2017), narenciyede uzun vadeli bir deney sırasında değişken oranlı gübrelemenin girdi tüketimi, toprak verimliliği ve verim üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Brezilya, São Paulo'da 25 hektarlık iki narenciye tarlasında değişken oranlı gübreleme ile sabit oranlı gübrelemeyi karşılaştırmak için bir şerit deneyi kurularak deney 6 yıl boyunca gerçekleştirilmiştir. Değişken oranlı reçeteler toprak ve yaprak ızgara örneklemesine ve verim haritalarına dayanırken sabit uygulamalar geleneksel toprak örneklemesine ve ortalama verim verilerine dayanmaktaydı. Değişken oranlı uygulamanın, girdi tüketiminde önemli bir azalmayla sonuçlandığı, ancak her tarlada değişken oranla farklı toprak verimliliği ve verim tepkileri elde edildiği belirtilmiştir. Tarla 1, toprak ve topografya açısından daha yüksek değişkenlik gösterdiğinden DO bu tarlada daha iyi toprak verimliliği yönetimi ve verim artışıyla sonuçlanırken, toprak ve topografya açısından daha az değişken olan Tarla 2'de DO'nın daha zayıf sonuçlar aldığı belirtilmiştir. Her iki durumda ve iki tarlada da, DO daha yüksek gübre agronomik verimliliğiyle sonuçlandığı belirtilirken, N, P ve K gübreleri, bölgeye özel uygulandığında daha fazla meyve verimi elde edildiği söylenmiştir.

Kazlauskas vd. (2021), sabit ve değişken oranlı gübrelemenin gübre tüketimi, enerji kullanımı ve çevresel etkileri üzerindeki farklılıklarını karşılaştırmak amacıyla dört yıllık bir ekim nöbeti denemesi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada fosfor ve potasyum gübrelemesi, toprak özelliklerine dayalı olarak değişken oranlı uygulanırken, azot gübrelemesi gerçek zamanlı azot alımını ölçen bir N-sensörü ile yapılmıştır. Sonuçlar, değişken oranlı gübrelemenin toplam azot, fosfor ve potasyum tüketimini %24,9 oranında azalttığını, enerji tüketimini 3463,1 kg ha^{-1} ve sera gazı emisyonlarını 341,5 kg CO_{2eq} ha^{-1} düşürdüğünü göstermiştir. Ayrıca, bu yöntemin gübreleme ve toplam bitkisel üretim maliyetlerini hektar başına ortalama 168,0 € azalttığı belirlenmiştir. Bu bulgular, değişken oranlı gübrelemenin sabit oranlı gübrelemeye kıyasla maliyetleri düşürdüğünü, enerji kullanımını azalttığını ve çevresel sürdürülebilirliği artırdığını ortaya koymaktadır.

Späti vd. (2021), uydu görüntülerinden insansız hava araçlarına ve elde taşınan N-sensörlere kadar değişen, değişken oranlı gübrelemede farklı algılama yaklaşımlarının saha düzeyinde çevresel çeşitliliği ölçmek için yararlılığını değerlendirmek üzere bir biyoekonomik modelleme çerçevesi geliştirilmiştir. Vaka çalışması olarak İsviçre'deki buğday üretimini kullanılarak verim, azot girişi ve ilişkili net getiriler üzerindeki etkileri ölçürek bu teknolojilerin yararlılığı değerlendirilmiştir. Toprak koşullarının daha yüksek mekansal heterojenliğini ve farklı toprak tiplerinin daha düşük mekansal otokorelasyonunu gösteren tarlalara yüksek çözünürlüklü bir teknoloji uygulandığında net kârların arttığını gözlemlenmiştir. Sonuçlar, en yüksek çözünürlüğü sağlayan bir drone kullanmanın ek maliyetinin, standart bir N-sensörü veya uydu görüntülerinin kullanımına kıyasla 4,5 CHF/ha'yı geçmemesi gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle, değişken oranlı teknolojilerin benimsenmesi esasen ürettikleri ek ekonomik ve çevresel etkilere bağlı olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, Maliyeti azaltmaya yönelik yeni çalışmaların yapılmasının benimsenme konusunda yarar sağlayacağına değinilmiştir.

Pawase vd. (2023), tüm tarlaya sabit oranda gübre uygulanmasının, besinlerin aşırı veya yetersiz bir şekilde dahil edilmesine neden olabileceğini ve toprak parametrelerinin yanı sıra tarladaki coğrafi değişikliklerden de etkilediği belirtilmiştir. Besin yönetimi, besin seçimine, uygulama oranına ve besin maddesinin mahsulden ve toprak derinliğinden optimum uzaklıkta yerleştirilmesine bağlıdır. Girdilerin belirli bir oranda, zamanda ve yerde, toprak özelliklerine ve tarladaki veya bitkilerdeki mekansal değişikliklere göre uygulanmasına izin veren bir girdi uygulama teknolojisi olan değişken oran teknolojisini (VRT) uygulamak için biri sensör tabanlı, diğeri harita tabanlı iki yaklaşım olduğu belirtilmiştir. Sensör tabanlı yaklaşım; uygun sensörlerle, hareket halindeyken toprak ve mahsul özelliklerini ölçerek birim alan/bitki başına gereken besin maddesi miktarını hesaplar ve gerekli besin maddesi miktarına sahip gübre akışını kontrol etmek için uygun algoritmalar kullanır. Harita tabanlı yaklaşımda; reçeteli bir harita oluşturmak için ızgara örneklemesi ve toprak analizi kullanılır. Toprak ve ürün koşullarına göre, mikrodenetleyici istenen uygulama oranını düzenler. Bu çalışmada, meyve bahçelerinde ve tarla ürünlerinde gübre uygulaması için VRT'nin her iki yaklaşımı da incelenmiş ve bu ileri teknolojinin kullanımı kesinlikle gübre kullanım

verimliliğini artırdığı, azaltılmış çevresel etkilerle ürün verimini ve karlılığını iyileştirdiği belirtilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneme alanı

Bu çalışma Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Döner Sermaye İşletmesine ait 6.3 ha büyüklüğündeki bir tarlada gerçekleştirilmiştir (40°15’04.92’’N, 28°51’04.98’’E). Çalışma alanı ve 18 adet toprak örnekleme noktasına ait görsel Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneme alanı ve toprak örnekleme noktaları

3.2 Toprak örnekleme

Toprak örneklerinin alınmasında en yaygın kullanılan yöntemlerden ızgara yöntemi kullanılmıştır. Bir tarım traktörüne bağlı toprak burgusu kullanılarak 15 cm derinlikten 90 adet bozulmuş toprak numunesi alınmış, bu çalışmada seçilen 18 adedi kullanılmıştır (Şekil 3.2). Örnek alınan noktalara ait koordinat bilgileri RTK-DGPS cihazı (E-Survey E600) kullanılarak kaydedilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Toprak burgusu ile örnek noktasını açma ve DPGS ile koordinatları kaydetme

3.3. Toprak analizleri

Her noktadan alınan toprak örnekleri referans değerlerinin belirlenmesi için geleneksel laboratuvara gönderilmek ve laboratuvarda spektral analizde kullanılmak üzere ikiye ayrılmıştır.

3.3.1. Toprak özelliklerinin fiziksel ve kimyasal analizleri

Numunelerin bir kısmı referans değerleri belirlemek için ticari olarak akredite edilmiş bir laboratuvara gönderilmiştir (Nilüfer Tarımsal Analiz Laboratuvarı). Laboratuvarda pH, Kireç (Lime), alınabilir potasyum (K), alınabilir fosfor (P), organik karbon (OC) ve toprak bünyesine (Kil, Silt, Kum) ait değerler belirlenmiştir. Laboratuvar analizinde kullanılan metotlar Çizelge 3.1'de listelenmiştir.

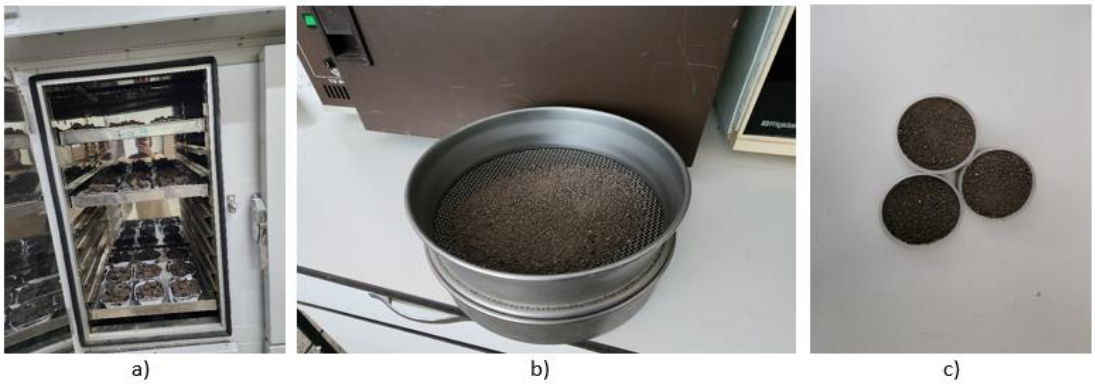
3.3.2. Laboratuvar spektral analizleri

Alınan toprak örneklerinin laboratuvar ortamında spektral ölçümünde görünür (VIS) ve yakın kızılötesi (NIR) fiber optik ölçüm yapan bir spektrometre kullanılmıştır (Wasatch Photonics). Kullanılan spektrometrenin dalga boyu ölçüm aralığı 900-1700 nm'dir.

Çizelge 3.1. Toprak özellikleri analizinde kullanılan metotlar

Toprak özellikleri	Birim	Metot
pH		Yurdakul 2018 (Toprak:Su)
Kireç (LIME)	%	TS EN ISO 10693 (Modifiye)
Organik Karbon (OC)	%	TS 8336
Alınabilir Fosfor P2O5 (P)	kg/ha	Olsen (Konsantrasyon)
Alınabilir Potasyum K2O (K)	kg/ha	TS 8341 (Konsantrasyon)
Bünye Analizi	%	Bouyoucus Hidrometre (Yurdakul 2018)

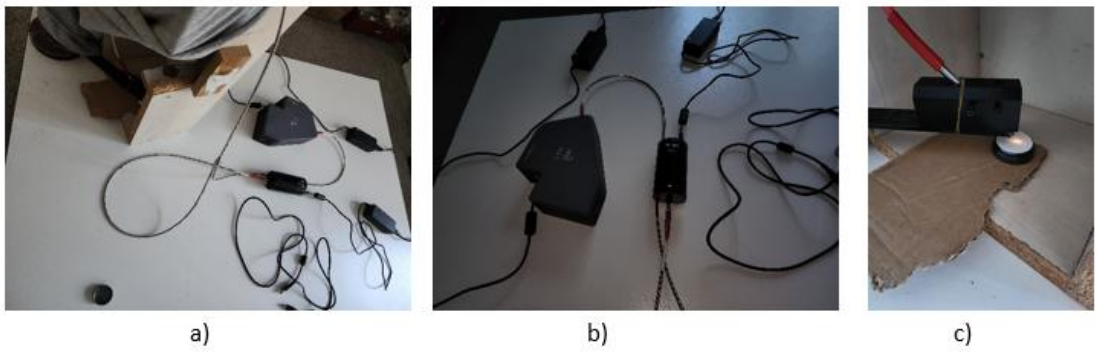
Spektral yansıma değerleri kaydedilmeden önce toprak numuneleri belli işlemlerden geçmektedir. Toprak numunelerinin bir kısmı etüvde 105 °C'de 24 saat kurutulmuştur. Kurutulan numunelerin içinde bulunan taş, bitki artığı gibi kalıntılar temizlenmiş ve parçalanarak 2mm'lik elekten geçirilmiştir (Nduwamungu vd., 2009). Parçalanıp 2mm'lik elekten geçirilen her bir toprak örneği 4 cm çapında ve 1 cm derinliğinde 3 petri kabına eşit yükseklikte olacak şekilde konularak üzeri düzlenmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. a) Etüv'de örneklerin kurutulması b) Numunelerin 2 mm'lik elekten elenmesi c) Numunelerin petri kabına yerleştirilmesi

Örneklerin konulduğu 3 farklı petri kabı a,b,c olarak isimlendirilmiş ve sırayla karanlık odanın içine yerleştirilmiş olan ışığın altına konularak her biri için 2-3 saniye aralarla 10

adet grafik kaydedilmiştir (Şekil 3.4). Kaydedilen grafik, toprağın farklı dalga boylarındaki (899-1740 nm) elektromanyetik radyasyona verdiği tepkiyi göstermektedir. Her numune için toplamda 30 adet (3 petri kabı x 10 tekrar) grafik kaydedilmiştir. Bu yansımaların ortalaması alınarak her bir numune için tek bir spektrum değeri elde edilmiştir.



Şekil 3.4. a) Spektrometre parçaları b) Işık kaynağı ve spektrometre c) Işık kaynağının kalibre edilmesi

3.4. Modelleme

Vis-NIR spektral yansımalarından toprak özelliklerinin belirlenebilmesi için tahminleme modelleri oluşturulması gerekmektedir. Kaydedilen spektrumların modellemede kullanılmadan önce çeşitli ön işleme teknikleri uygulanması gerekmektedir. Bu adım spektral ön işleme (veya ön işlem) olarak adlandırılmaktadır (Vasques, Grunwald, & Sickman, 2008). Kalibrasyon modelleri geliştirilirken farklı veri ön işleme seçenekleri kullanılabilmektedir. En iyi sonucu elde etmek için kullanılacak olan ön işlem adımlarına deneme yanılma ile karar verilmektedir. Kullanılacak adımların nihai seçimi, farklı modellerin sonuçlarının karşılaştırılmasına dayanmaktadır (Tekin vd., 2013). Yapılan çalışmada orijinal spektrumlardaki rastgele gürültüyü ortadan kaldırmak için hareketli ortalama (Moving Average), sinyal-gürültü oranını artırmak için Savitzky-Golay (1964) birinci türevi (Savitsky ve Golay, 1964), verilerdeki gürültüyü azaltmak için Savitzky-Golay yumuşatma, daha verimli hesaplama için spektral verilerin boyutluluğunu 0-1 ölçeğinde standartlaştırmak için maksimum normalleştirme (Normalization) gibi ön işlem adımları kullanılmıştır

(Ulusoy vd., 2016). Türevler gürültüyü artırma eğilimindedir ve bu nedenle genellikle türevlerle birlikte bir yumuşatma algoritması kullanılır. Toprak analizi için tüm veri setlerinde işe yarayacak tek bir ön işleme tekniği veya ön işleme tekniklerinin bir kombinasyonu yoktur. Toprak numuneleri için gereken ön işlemenin türü ve miktarı veriye özeldir (Stenberg vd., 2010).

Ön işleme tabi tutulan spektrumlar, ölçülen toprak referans değerleri ile birlikte bir veri matrisine entegre edilmiştir. Bu matris daha sonra Kennard-Stone algoritması kullanılarak kalibrasyon ve doğrulama veri setlerine bölünmüştür (Kennard ve Stone, 1969). Toprak özellikleri için Kısmi En Küçük Kareler Regresyonu (PLSR) modelleri, kalibrasyon seti kullanılarak bir defalık çapraz doğrulama (Leave-one-out cross-validation (LOOCV)) yoluyla geliştirilmiştir (Bantchina vd., 2024). Hem spektrum ön işleme hem de model oluşturma, açık kaynaklı kütüphaneler kullanan RStudio yazılımı (RStudio Inc.) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Stevens ve Ramirez Lopez, 2014). PLSR uygulamasından önce, toprak örnekleri arasındaki benzerlikleri veya farklılıkları araştırmak için temel bileşen analizi (PCA) yapılmıştır. Ortaya çıkan modellerin performansı, laboratuvarda taranan örnekler kullanılarak doğrulanmıştır. Model doğruluğu, belirleme katsayısı (R^2), kök ortalama kare hatası (RMSE), artık tahmin hatasına (RPD) göre değerlendirilmiştir. R^2 değerleri üzerinde etkisini araştırmak için dijital spektral kütüphaneden 18 adet veri alınarak örnek sayısı 36 noktaya çıkarılmış ve R^2 değerlerindeki değişimler gözlemlenmiştir.

Kullanılan istatiksel ölçütler aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

RSS artık kareler toplamı ve TSS toplam kareler toplamını ifade etmektedir. R^2 değeri, 0 ile 1 arasında değer almaktadır. R^2'nin 1'e yakın değerler olması modelin iyi olduğu, sıfıra yakın değerler olması ise model sonuçlarının kötü olduğu anlamına gelmektedir.

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(Tahminlenen - \text{ölçülen})^2}{N}}$$

Burada, N örnek sayısını ifade etmektedir. RMSE'nin değeri, sıfıra yaklaştıkça modelin tahmin doğruluğunun arttığı kabul edilmektedir.

$$RPD = \frac{SD}{RMSE}$$

SD, laboratuvar ölçümlerine ait standart sapmayı ifade etmektedir.

$$\text{RPIQ} = \frac{\text{Q3-Q1}}{\text{RMSE}}$$

Burada Q3 3. çeyrek değerini, Q1 1. çeyrek değerini ifade etmektedir.

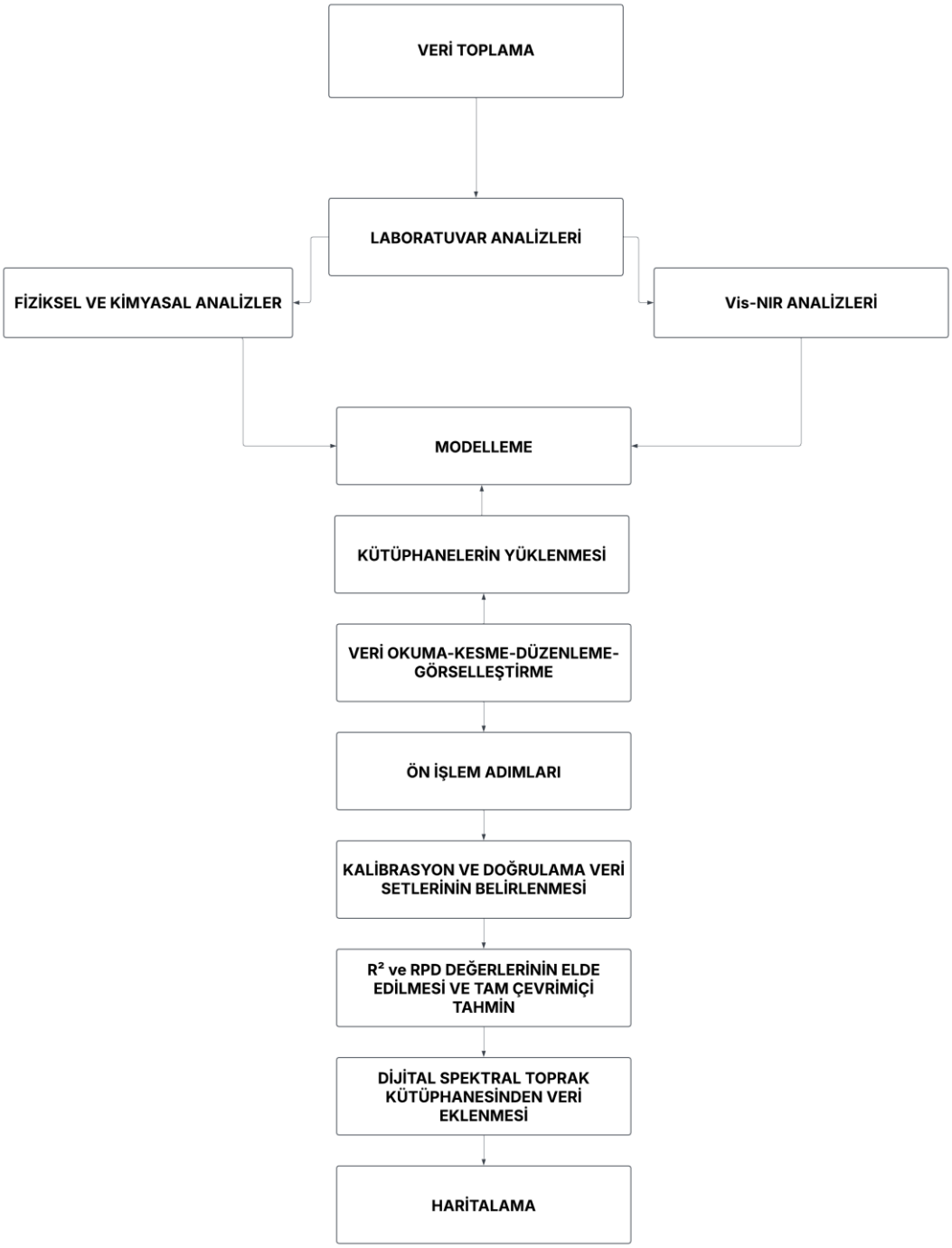
3.5. Haritalama

Dijital toprak haritalama (DSM) [veya tahmini toprak haritalama], Toprak türü veya toprak özelliklerinin bilgisayar destekli dijital temsillerinin üretilmesi sürecidir. Bu süreç, saha ve laboratuvar yöntemlerinin kullanılmasıyla, mekânsal ve mekânsal olmayan toprak çıkarım sistemleriyle birleştirilerek, mekânsal olarak açık bilgi oluşturulmasını ve doldurulmasını içerir (Grunwald, 2009). Laboratuvarda ölçülen toprak özelliklerine ait haritaları hazırlamak için QGIS yazılımı kullanılmıştır. Haritaların hazırlanmasında Ters Mesafe Ağırlıklandırılması (Inverse Difference Weighting, IDW) enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Tahmin edilen özelliklere ait haritalar QGIS ve ArcGis 10 (ESRI, ABD) yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Tam nokta haritalarının hazırlanmasında IDW enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır. IDW, ölçülmemiş konumu enterpole etmek için yalnızca tahmin konumuna olan mesafeye bağlı olan deterministik bir enterpolatördür (Childs, 2004). Tahmin edilen ve ölçülen toprak özelliklerine ait haritalar hazırlandıktan sonra karşılaştırılmıştır.

Yapılan işlemlere ait akış şeması Şekil 3.5'te verilmiştir. Veri toplama adımı, toprak örneği alma, Vis-NIR toprak taraması gibi işlemleri kapsamaktadır. Laboratuvar analizleri, analiz öncesi parçalama, kurutma, temizleme, elekten geçirme gibi işlemlerin yapılmasının ardından ikiye ayrılmaktadır. Fiziksel ve kimyasal analizler laboratuvarda analizlerinin yapılmasını, Vis-NIR analizleri ise, toprak numunelerine ait yansıma grafiklerinin kaydedilmesi ve düzenlenmesini içermektedir. Modelleme, PLSR modeli ile pH, P, K, OC, Kireç gibi toprak özelliklerini spektral yansımalardan yararlanarak tahminlemek için kod aşamasının başladığı adımdır. Readxl, remotes, caret... gibi kütüphaneler yüklenmektedir. Veri okuma, kesme, düzenleme, görselleştirme adımına sabit değerler girilerek başlanmaktadır. Ön işlem adımında model için en iyi sonucu veren hareketli ortalama, normalizasyon, türev alma, Savitzky-Golay gibi filtreleri gibi değişken değerler belirlenerek uygulanmaktadır. Her bir toprak özelliği için en iyi sonuç veren veri setleri oranlarının belirlenmektedir (örn. OC için %75 kalibrasyon, %25 doğrulama). Tahmin modeli çalıştırılarak R^2, RPD, RMSE gibi ölçütler belirlenmektedir. Dijital toprak kütüphanesinden veri eklenerek bu ölçütler artırılmaya çalışmakta ve sonuçlar haritalanmaktadır.

3.6. Yönetim bölgelerinin belirlenmesi

Tarımsal girdi ve yönetim uygulamaları, toprak özelliklerinin ve arazi konumunun mekansal çeşitliliğine rağmen geleneksel olarak tarımsal alanlarda tekdüze bir şekilde uygulanmaktadır. Mekansal değişkenlik hesaba katılmadığında, tekdüze tarımsal yönetim hem ekonomik hem de çevresel olarak verimsiz olabilir (Pierce ve Nowak, 1999). Birçok yazar, verimi sınırlayan faktörler açısından homojen olan bir tarladaki alanlar olarak tanımlanabilecek yönetim bölgelerinin (YB) belirlenmesi için kılavuz çizgiler önermiştir (Mulla, 1991; Chang vd., 2004; Ferguson vd., 2004; Schepers vd., 2004; Basso vd., 2007; Basso vd., 2015). YB'leri hasat edilmiş verim seviyeleri, bu verim seviyelerinin zaman içindeki kararlılık derecesi, ölçülen toprak özellikleri (kum, kil ve organik madde) gibi değerler ele alınarak belirlenebilmektedir. Tahmin edilen toprak özellikleri kümelere ayırmak amacıyla kümeleme (cluster) analiz yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Toprak örneklerinin analizinden haritalanmasına kadar akış şeması

Yönetim bölgeleri oluşturulmadan önce, veri yapısının boyut indirgemeyle sadeleştirilmesi, daha etkili kümeleme analizine olanak sağlamaktadır; bu nedenle Temel Bileşen Analizi (PCA) yapılmıştır.

PCA, çok boyutlu veriyi daha az sayıda bileşene indirgemek ve değişkenler arası korelasyonu dikkate alarak veri yapısını korumak amacıyla yapılmaktadır (Bougiouklis vd., 2025). Kümeleme yönteminde en yaygın kullanılan algoritma K-ortalama (K-means) kümesidir. K-ortalama kümesi, her bir örneği en yakın merkez (centroid) etrafında gruplar ve merkezlerin toplam varyansını minimize etmeye çalışarak örnekleri benzerliklerine göre kümelere ayırır (Umargono vd., 2020).

Optimum küme sayısının belirlenmesi için Dirsek (Elbow) yöntemi kullanılmıştır. Dirsek yöntemi, k-ortalama kümeleme algoritması için optimum küme sayısını belirlemeye yönelik bir tekniktir. Optimum küme sayısı belirlendikten sonra koordinat verileri ile birleştirilerek kümeler harita üzerinde görselleştirilmektedir. Harita üzerinde elde edilen kümeler toprak özelliklerinin farklılıklarının sadece kimyasal ve fiziksel parametrelerle değil aynı zamanda coğrafi konumlada ilişkili olduğunu göstermektedir (Metwally vd., 2019). Bu mekânsal ayrışma, yönetim bölgelerinin tanımlanmasında temel bir girdi işlevi görmektedir. Aynı küme içerisinde yer alan noktaların benzer toprak özelliklerine sahip olduğu varsayımıyla, bu bölgelerde benzer tarımsal uygulamalar önerilebilir. Bu da yerel düzeyde kaynakların daha etkin kullanımını ve girdilerin optimize edilmesini mümkün kılmaktadır.

3.7. Gübreleme önerileri

Geleneksel arazi yönetim uygulamalarında araziye homojen olduğu varsayılarak su, ilaç, gübre vb. gibi uygulamalar yapılmaktadır. Geleneksel tarımın büyük ölçekli ve kapsamlı gübreleme yönetimi yaklaşımını değiştirerek, değişken oranlı teknoloji, talep üzerine ve değişken oranlı gübre girdilerinin temeli olarak gerçek zamanlı ürün büyümesi ve besin maddesi kazanımı-kaybı bilgilerini elde etmek için "3S" teknolojisi (uzaktan algılama [RS], Coğrafi Bilgi Sistemleri [CBS] ve Küresel Konumlandırma Sistemi [GPS]) tarafından desteklenmektedir (Shi vd., 2020). Öncelikle ölçülen toprak özelliklerine göre arazide mısır bitkisi için yapılacak olan geleneksel gübre reçetesi hazırlanmıştır. Daha sonra hassas tarımda göz önünde bulundurulan tarla içi değişkenlikler ile tahminlenen toprak özelliklerine göre oluşturulan yönetim bölgelerine değişken oranlı gübreleme (Variable Rate Fertilization, VRF) uygulaması için VRF

reçeteleri hazırlanmıştır. Hazırlanan geleneksel ve VRF reçeteleri kıyaslanarak yorumlanmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Kimyasal Toprak Analiz Sonuçları

Laboratuvara gönderilen toprak örneklerinin fiziksel ve kimyasal analiz değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'deki her noktaya ait özellikler ve Çizelge 4.2'de verilen istatiksel veriler, Bursa Gübreleme Rehberi kullanılarak ve Toprak ve Bitki Besleme Bölümünden uzman kişilerden yardım alarak yorumlanmıştır.

Çizelge 4.1. Ölçülen toprak özelliklerine ait değerler

	pH	**P (kg/ha)**	**K (kg/ha)**	**OC (%)**	**Kireç (%)**	**Kum (%)**	**Silt (%)**	**Kil (%)**
1	5.49	10.83	542.70	0.76	1.57	27.87	16.93	55.20
2	6.38	13.90	717.60	0.51	1.73	24.38	18.86	56.75
3	6.24	13.00	529.50	0.45	1.57	24.58	19.35	56.07
4	6.80	11.30	358.50	0.62	1.71	26.41	23.08	50.51
5	7.36	11.30	326.10	0.53	1.71	33.99	18.52	47.49
6	7.05	7.50	454.50	0.55	1.73	32.88	18.83	48.29
7	7.78	3.90	354.30	0.34	5.27	20.25	25.13	54.62
8	7.66	1.10	396.90	0.41	4.09	24.50	18.83	56.67
9	7.63	9.60	431.10	0.52	4.65	27.70	19.09	53.20
10	7.62	10.80	366.90	0.38	1.73	28.20	18.42	53.38
11	7.60	7.50	347.70	0.48	1.72	26.36	25.19	48.45
12	7.72	17.80	354.90	0.51	2.04	26.35	25.19	48.46
13	7.64	14.30	481.80	0.53	1.71	32.97	18.80	48.22
14	7.10	22.30	420.60	0.58	1.70	30.52	21.00	48.48
15	7.37	22.80	678.90	0.70	1.58	25.61	20.62	53.77
16	7.50	7.90	357.90	0.56	1.73	28.49	25.18	46.33
17	7.72	5.00	246.00	0.41	1.73	34.43	23.21	42.36
18	8.01	4.10	276.90	0.44	1.87	31.13	24.98	43.89
AVE	**7.26**	**10.83**	**424.60**	**0.52**	**2.21**	**28.15**	**21.18**	**50.67**
STD	**0.65**	**5.96**	**126.43**	**0.11**	**1.15**	**3.86**	**2.96**	**4.42**
CV	**9.00**	**55.05**	**29.78**	**20.79**	**52.11**	**13.70**	**13.97**	**8.72**

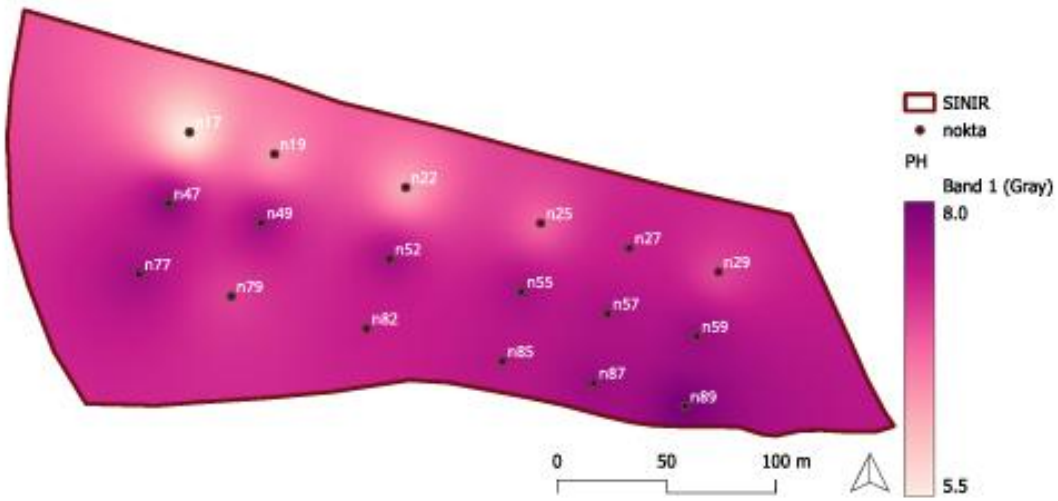
P, alınabilir fosfor; K, alınabilir potasyum; OC, organik karbon

Çizelge 4.2. Ölçülen toprak özelliklerinin istatiksel özeti

Toprak Özellikleri	Min.	Max.	Ort.	Medyan	1.çeyrek	3.çeyrek
pH	5.49	8.01	7.259	7.55	7.062	7.655
P (kg/ha)	1.1	22.8	10.83	10.81	7.5	13.68
K (kg/ha)	246	717.6	424.6	381.9	354.4	475
OC (%)	0.76	0.34	0.52	0.514	0.4433	0.5610
Kireç (%)	1.57	5.27	2.213	1.73	1.71	1.835

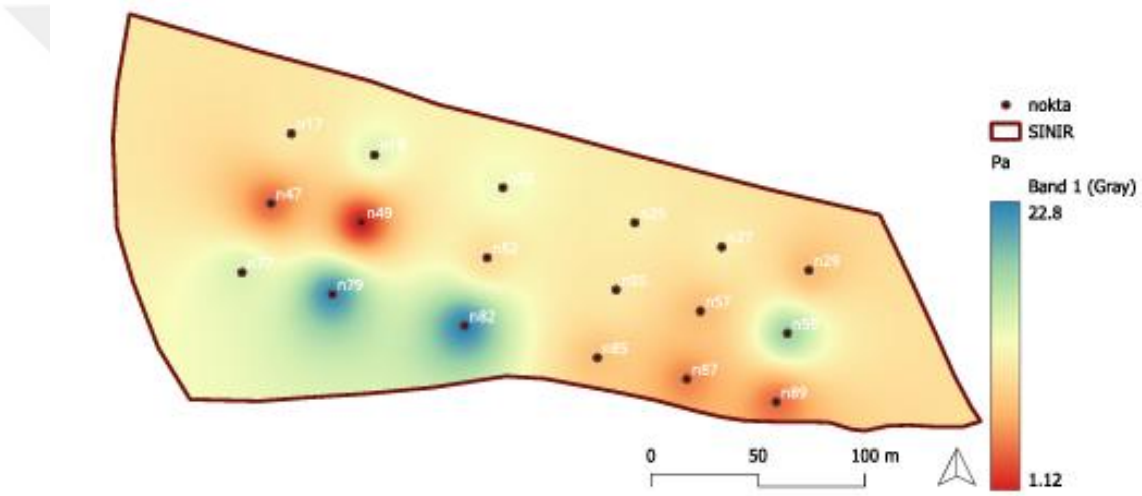
Min, minimum; max, maksimum; ort, ortalama

pH, toprakların asitlik ve alkalilik özelliğini gösteren bir ölçüt olup, bitki besinlerinin alınabilirliğini ve çözünürlülüğünü etkileyen en önemli faktörlerdendir. Çoğu bitkilerin gelişmesi için nötr toprak reaksiyonu en uygun olup, 6,5- 7,5 arasındaki pH, bütün bitki besin elementlerinin yarayışlılığı için yeterli sayılabilecek düzeydir (Gübreleme Rehberi Bursa, 2018). Kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında 17 numaraları örneğin pH sınıfı orta derece asitli, 19, 22 ve 25 numaraları örneklerin sınıfı hafif asitli, 27, 29, 47, 49, 52, 55, 57, 59, 77, 79, 82, 85 ve 87 numaraları örneklerin sınıfı hafif alkali, 89 numaralı örneğin ise kuvvetli alkali sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. Noktaların çoğunun sahip olduğu pH seviyesi bitki gelişimi için optimum değerlerdedir. Şekil 4.1'de IDW yöntemi ile hazırlanmış pH haritası verilmiştir.



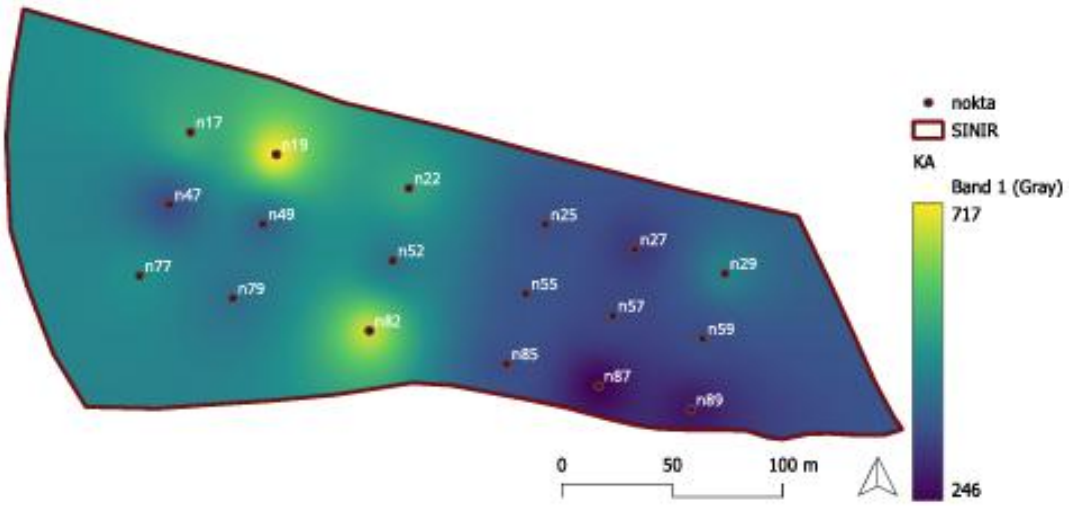
Şekil 4.1. IDW yöntemi ile hazırlanmış pH haritası

P, bitki beslenmesi açısından en önemli makro elementlerdendir. Topraklar çoğu kez alınabilir fosfor bakımından yetersiz durumdadır (Sharpley, 2000). Fosfor toprakta hareketsiz bir elementtir ve gübreleme yapıldığında mutlaka fosfor aktif köklere en yakın kısma, 15- 20 cm kök derinliğine verilmeli ve üzeri kapatılmalıdır (Gübreleme Rehberi Bursa, 2018). Bitki gelişimi için yeterli alınabilir fosfor değeri 6-9 P_2O_5 kg/da aralığındadır. Kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında tüm örnekler "çok az" sınıfındadır. Noktalara ait alınabilir fosfor miktarı değerlendirildiğinde bitki gelişimi için yeterli olmadığı saptanmıştır. Şekil 4.2'de IDW yöntemi ile hazırlanmış P haritası verilmiştir.



Şekil 4.2. IDW yöntemi ile hazırlanmış P haritası

Bitkiler tarafından en çok alınan elementlerden biri olan alınabilir potasyum (K), toprakta nispeten fazla miktarda bulunmaktadır. Bitki gelişimi için yeterli alınabilir potasyum değeri 20-30 K_2O kg/da aralığındadır (Gübreleme Rehberi Bursa, 2018). Kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında 87 ve 89 numaralı örnekler orta, 25, 27, 47, 49, 55, 57, 59 ve 85 numaralı örnekler iyi, 17, 19, 22, 29, 52, 77, 79, ve 82 numaralı örnekler ise yüksek alınabilir potasyum sınıfında yer almaktadır. Çalışma arazisinde alınabilir potasyum miktarları yeterli düzeydedir. Şekil 4.3'te IDW yöntemi ile hazırlanmış K haritası verilmiştir.

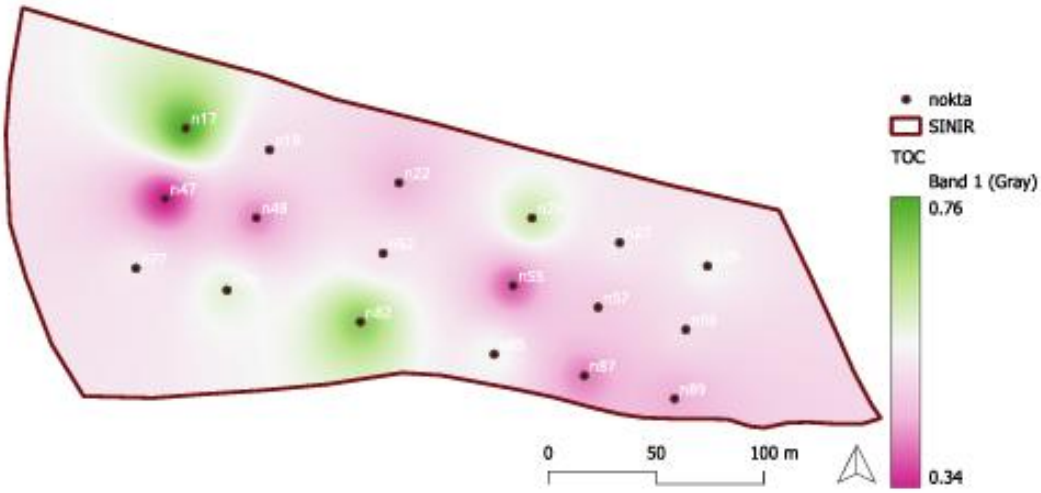


Şekil 4.3. IDW yöntemi ile hazırlanmış K haritası

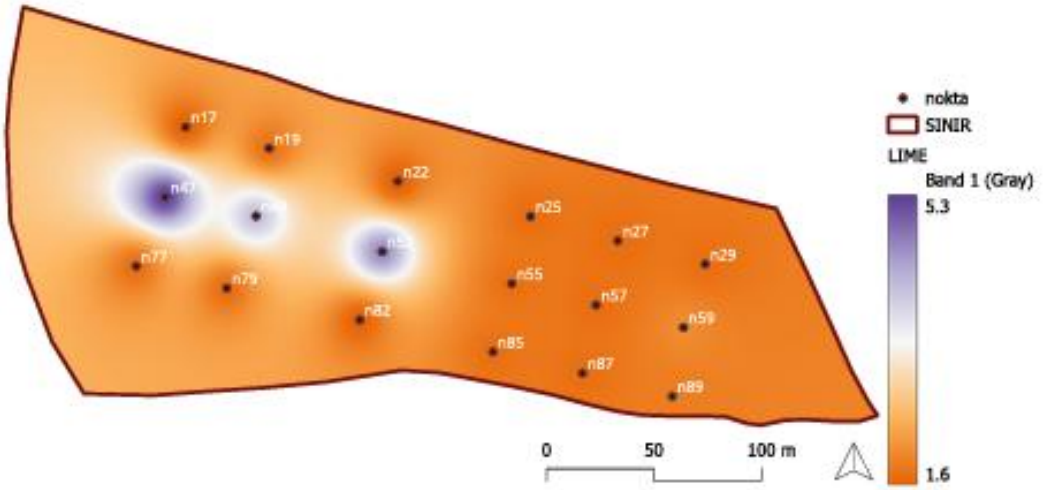
OC, toprakların yapısında ve verimliliğinde kritik bir rol oynayan önemli bir bileşendir. Toprak organik maddesinin ana bileşeni olan organik karbon, bitkilerin büyümesi için gerekli olan besin maddelerinin depolanmasında ve taşınmasında önemli bir işlev görmektedir. Organik karbon, birçok besin maddesinin (azot, fosfor, potasyum vb.) organik maddeler içinde ve yüzeylerinde taşınmasına yardımcı olur. Bu nedenle, organik karbon içeriği yüksek topraklar, tarımsal verimlilik açısından daha avantajlıdır. Kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında 19, 22, 27, 29, 47, 49, 52, 55, 57, 59, 77, 85, 87 ve 89 numaralı noktalar çok az, 17, 25, 79 ve 82 ise az sınıfında yer almaktadır. Çalışma arazisinin organik madde yönünden yetersiz olduğu saptanmıştır. Şekil 4.4'te IDW yöntemi ile hazırlanmış OC haritası verilmiştir.

Kireç, topraklarda granülasyonu sağlayan bir materyaldir. Ayrıca asit karakterli topraklarda daha uygun bir beslenme ortamının oluşması için kireç uygulamaları yapılmaktadır. Kirece tolerans bakımından bitki tür ve çeşitleri arasında önemli farklılıklar olabilmektedir. Ancak toprakta kirecin yüksekliği bazı besinlerin alımını olumsuz etkilemektedir. Fazla ve çok fazla kireç içeren topraklarda, fosfor, demir ve çinko gibi bazı elementlerin alınamaması nedeniyle eksikliği ortaya çıkmaktadır (Gübreleme Rehberi Bursa, 2018). Kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında 17, 19, 22, 25, 27, 29, 49, 52, 55, 57, 59, 77, 79, 82, 85, 87 ve 89 numaralı noktalar az kireçli

sınıfında iken 47 numaralı nokta orta kireçli sınıfında yer almaktadır. Şekil 4.5'de IDW yöntemi ile hazırlanmış kireç haritası verilmiştir.

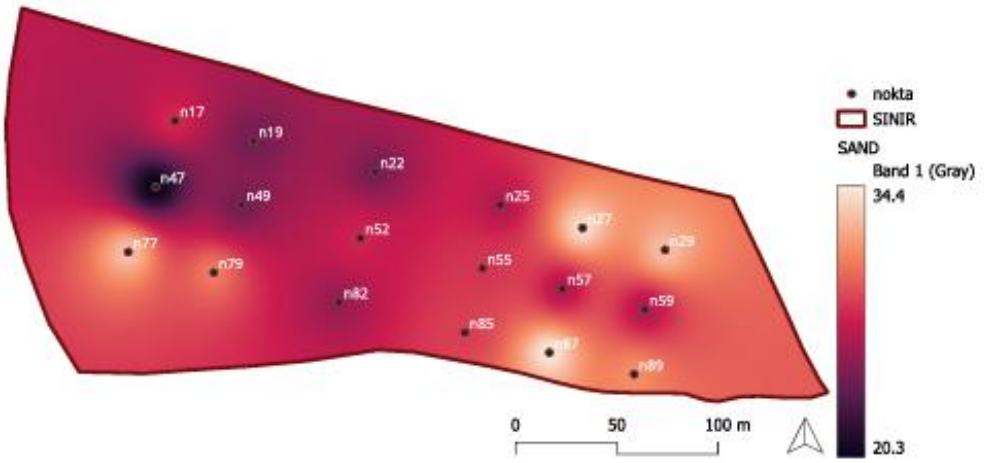


Şekil 4.4. IDW yöntemi ile hazırlanmış OC haritası

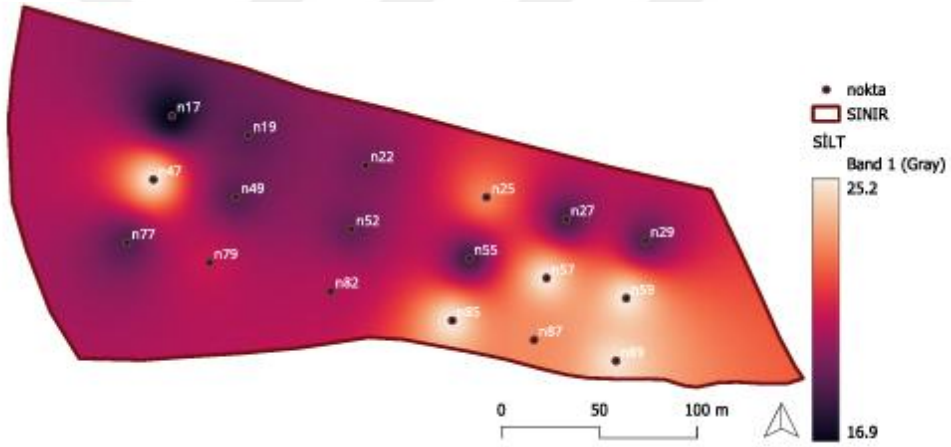


Şekil 4.5. IDW yöntemi ile hazırlanmış kireç haritası

Toprak bünye sınıfı kumlu killi tın olarak belirlenmiştir. Toprak tekstürüne ait haritalar IDW enterpolasyon yöntemi ile hazırlanmıştır. Şekil 4.6'da kum, Şekil 4.7'da silt, Şekil 4.8'da da kil içeriğine ait haritalar verilmiştir.



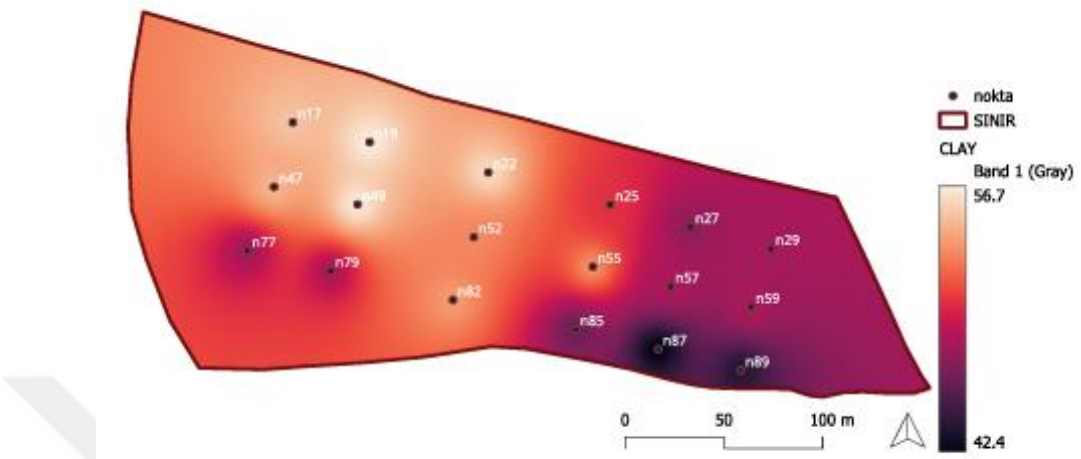
Şekil 4.6. IDW yöntemiyle hazırlanmış kum haritası



Şekil 4.7. IDW yöntemiyle hazırlanmış silt haritası

Sahip olduğu özellikler bakımından toprak genel bir değerlendirmeye tabi tutulduğunda yetersiz organik madde miktarının toprağın kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklerini olumsuz etkilediği, organik madde düzeyini iyileştirmek için kompost, yeşil gübre, hayvan gübresi gibi uygulamalarının fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Laboratuvar sonuçlarına göre çalışma parselinde dekara ortalama verilmesi gereken azot miktarı 18.55, fosfor miktarı 12.5, potasyum miktarı 0.67 kg'dır. Bu verilere göre laboratuvarın önerdiği çalışma parseline uygulanacak gübre miktarları Çizelge 4.3'de verilmiştir. Çizelge 4.3'de yer alan sonraki gübreleme ifadesi kuru koşullarda ilk çapadan önce,

sulu koşullarda ise ilk sulamadan önce sıra aralarına bitkilere yakın ve amonyum nitrat olarak verilmesi gerektiğini ifade etmektedir.



Şekil 4.8. IDW yöntemiyle hazırlanmış kil haritası

Çizelge 4.3. Laboratuvar gübre önerileri

İlk gübre uygulaması		**Sonraki gübre uygulaması**
Uygulanacak Gübre	**Miktarı (kg da^{-1})**	**Miktarı (kg da^{-1})**
Azotlu gübre (ÜRE)	9.72	41.61
Fosforlu Gübre (DAP)	27.5	
Potasyumlu Gübre (P.Nitrat, P.Sülfat)	1.44	
Elementel toz kükürt	36.67	
İyi yanmış ahır gübresi	3140.14	
Sönmüş kireç	16.67	

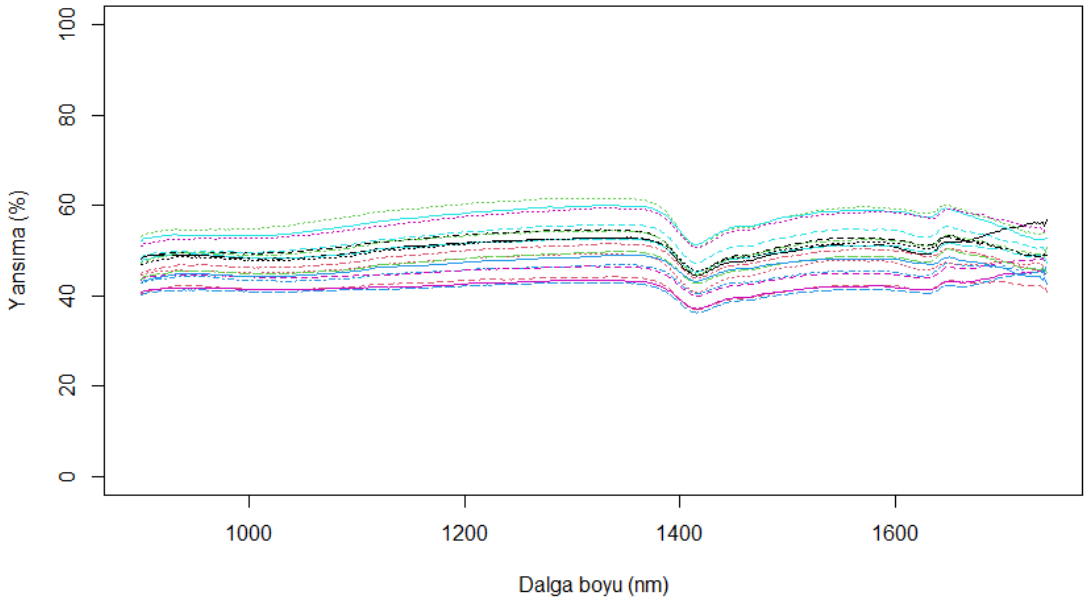
4.2. Spektral Analizler

4.2.1. Spektral Ön İşlemler

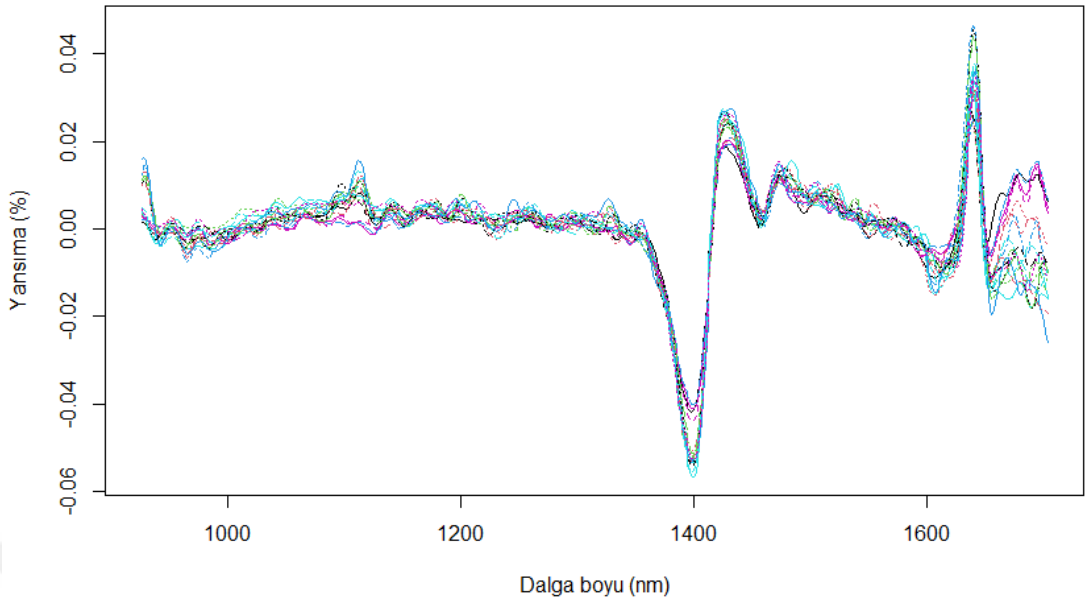
Toprak numunelerine ait kaydedilen yansıma grafikleri Şekil 4.9'te verilmiştir. Tahmin modelini iyileştirmek için bazı ön işlemler yapılmıştır. Ön işleme adımları, spektral

verilerin daha temiz, daha doğru ve daha güvenilir hale getirilmesi için uygulanmaktadır. Ön işleme adımları, spektral verilerin kalitesini artırarak, makine öğrenimi modellerinin daha iyi performans göstermesine olanak tanır. Kullanılan farklı ön işlem adımlarının, örnek sayısının ve farklı veri seti kümelerinin model doğruluğunu etkilediği bilinmektedir (Kuang & Mouazen, 2012).

İlk olarak Hareketli ortalama uygulanmıştır. Spektral veriler genellikle gürültü içerir. Hareketli ortalama uygulamak, bu gürültüyü azaltarak daha net ve güvenilir spektral veriler elde edilmesini sağlar. Daha sonrasında normalizasyon yapılmıştır. Normalizasyon, farklı ölçeklerdeki verilerin karşılaştırılabilir hale gelmesini sağlar. Bu, modelin daha iyi öğrenmesini ve tahmin yapmasını kolaylaştırır. Birinci türev, spektral verilerdeki piklerin ve dip noktaların daha belirgin hale gelmesini sağlamak için yapılmıştır. Bu, belirli bileşenlerin daha iyi tanımlanmasına yardımcı olur. Savitzky-Golay filtresi, verilerin pürüzsüzleştirilmesi ve gürültünün azaltılması için kullanılmıştır. Bu filtreleme ile spektral veriler daha düzgün bir görünüm kazanmış ve böylece modelin daha iyi performans göstermesi sağlanmıştır. Uygulanan ön işlem adımlarından sonra spektral verilere ait yansıma grafikleri Şekil 4.10'te verilmiştir.



Şekil 4.9. Toprak örneklerine ait yansıma grafikleri



Şekil 4.10. Ön işlem adımları uygulandıktan sonra yansıma grafikleri

4.2.2. Spektral Modelleme

PLSR analizi ile tahmin modelleri oluşturulmuştur. Çalışılan toprak özelliklerine ait kalibrasyon ve doğrulama modellerinin sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.11'de verilmiştir. Model sonuçları Çizelge 4.4'de özetlenmiştir. Veriler, en yüksek determinasyon katsayısı (R^2) değerlerine ulaşmak amacıyla farklı ön işleme adımlarına tabi tutulmuş ve farklı kalibrasyon ile doğrulama veri setlerine ayrılmıştır. Model performansını iyileştirmek amacıyla dijital toprak kütüphanesinden 18 noktaya ait değerler eklenerek R^2 ve RPD değerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Küresel toprak spektral kütüphanelerini yerel kalibrasyon örnekleriyle birleştirmek, yalnızca küresel veya yerel kalibrasyonlardan herhangi biriyle elde edilenden daha iyi görünür ve yakın kızılötesi (VNIR, 400–2500 nm) dağınık yansıma spektroskopisi toprak karakterizasyon tahminleri sağlama potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir (Brown, D. J., 2007). Eklenen veriler P, K ve OC değerlerinde ciddi bir artışa sebep olurken pH ve Kireç değerinde gözle görülür bir değişim yaratmamıştır. Elde edilen değerlere ait grafikler Şekil 4.12'da verilmiştir. Model sonuçları Çizelge 4.5'de özetlenmiştir.

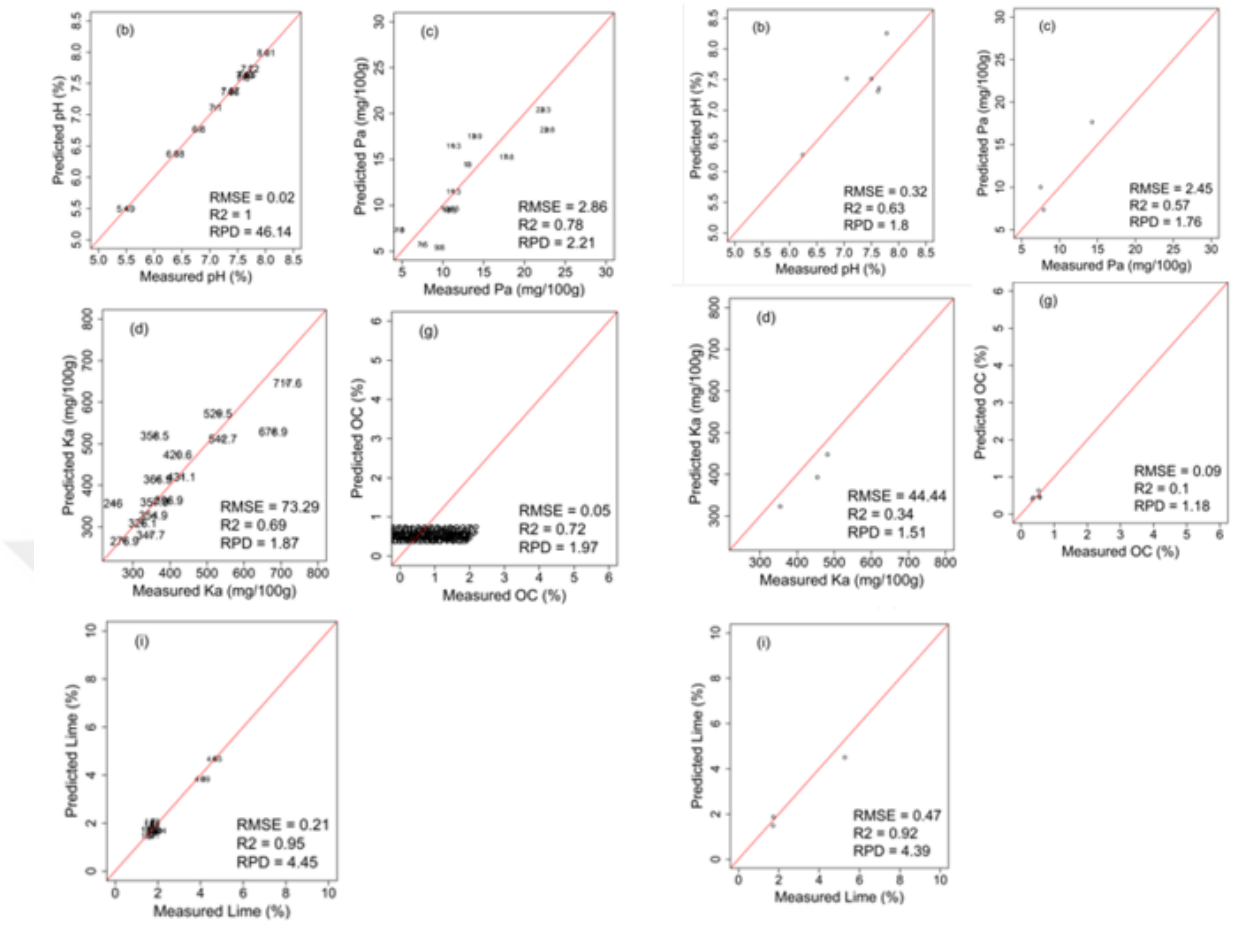
Çizelge 4.4. PLSR analizleri ile elde edilen modellerin kalibrasyon ve doğrulama tahmin sonuçları

	KALİBRASYON			DOĞRULAMA		
Toprak Özellikleri	**R²**	**RMSE**	**RPD**	**R²**	**RMSE**	**RPD**
pH	1	0.02	46.14	0.63	0.32	1.8
P (cmol/kg)	0.78	2.86	2.21	0.57	2.45	1.76
K(cmol/kg)	0.69	73.29	1.87	0.34	44.44	1.51
OC (%)	0.72	0.05	1.97	0.1	0.09	1.18
Kireç (%)	0.95	0.21	4.45	0.92	0.47	4.39

Çizelge 4.5. Spektral kütüphaneden veri ekleyerek yapılan PLSR analizleri ile elde edilen modellerin kalibrasyon ve doğrulama tahmin sonuçları

	KALİBRASYON			DOĞRULAMA		
Toprak Özellikleri	**R²**	**RMSE**	**RPD**	**R²**	**RMSE**	**RPD**
pH	1	0.02	46.14	0.63	0.32	1.8
P (cmol/kg)	0.91	10.39	3.42	0.74	14.52	2.03
K (cmol/kg)	0.88	57.7	2.96	0.84	59.96	2.66
OC (%)	0.7	0.09	1.85	0.75	0.07	2.13
Kireç (%)	0.95	0.21	4.45	0.92	0.47	4.39

Analiz sonucunda, en yüksek R^2 değerinin elde edildiği durum belirlenerek çalışmalar bu doğrultuda sürdürülmüştür. Kalibrasyon için R^2 0.7 ile 1 arasında, doğrulama için 0.63 ile 0.92 arasında değerler bulunmuştur. Elde edilen R^2 değerleri, modelin doğruluğunu değerlendirme açısından iyi doğruluk seviyeleri olarak kabul edilmektedir. Online doğrulamadaki model performansını değerlendirmek için RPD değerlerine bakıldığında 1.8 ile 4.39 arasında değiştiği görülmektedir. Modelin performansı değerlendirilirken RPD değerlerinin; mükemmel (> 2.5), çok iyi (2 - 2.5) , iyi (1.8 – 2), orta (1.4 – 1.8), zayıf (< 1.4) model performansını ifade ettiği bilinmektedir (Viscarra-Rossel vd., 2006). Elde edilen RPD değerlerine bakıldığında, 1.8 ile 4.39 arasında değişen değerler iyi bir model performansını doğrulamaktadır.

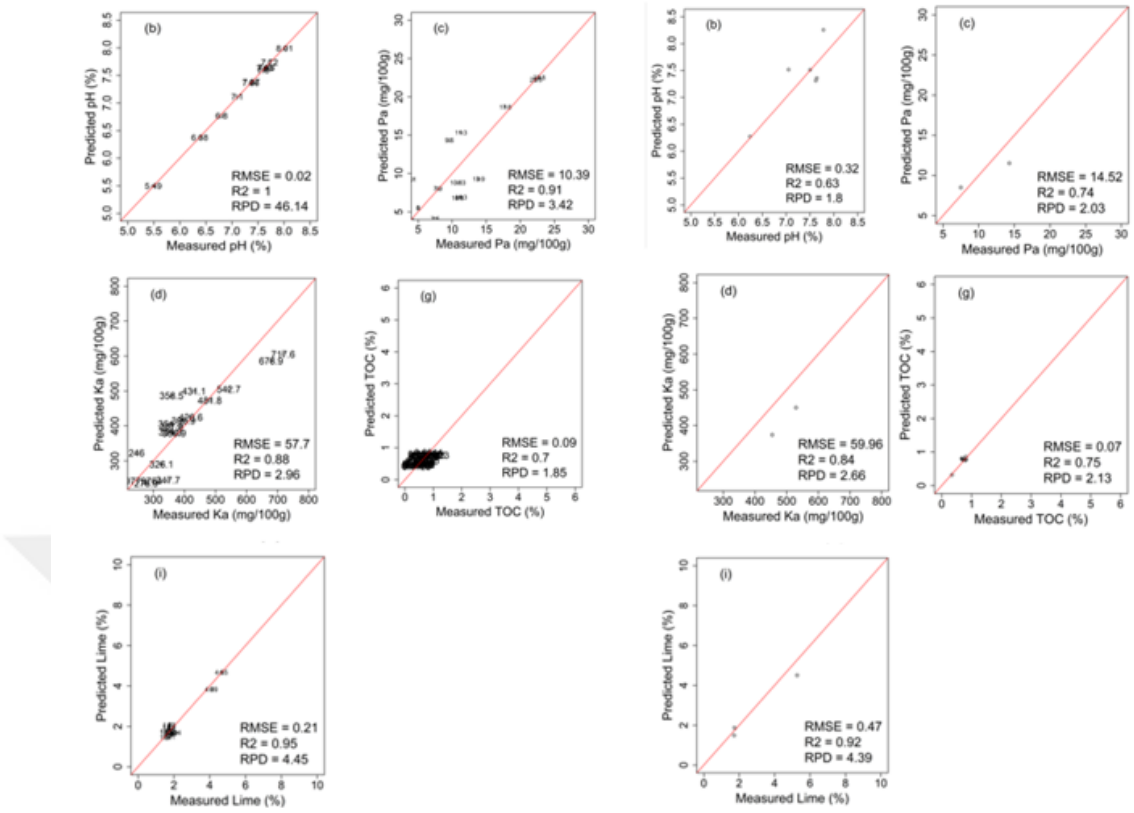


(a) **(b)**

Şekil 4.11. (a) Kalibrasyon veri seti, (b) Doğrulama veri seti

pH değerinin belirlenmesinde spektral kütüphaneden eklenen veriler R^2 değerinde gözle görülür bir artış sağlamamıştır. Vis-NIR spektrofotometre ile taranmış toprak örnekleri, kalibrasyon (%70) ve doğrulama (%30) setlerine bölündüğünde model pH değeri için daha iyi bir performans göstermiştir ($R^2 = 0.63$, RPD = 1.8).

P değerinin belirlenmesinde spektral kütüphaneden eklenen veriler R^2 değerinde artışa yardımcı olmuştur. Vis-NIR spektrofotometre ile taranmış toprak örnekleri, kalibrasyon (%60) ve doğrulama (%40) setlerine bölündüğünde model P değeri için daha iyi bir performans göstermiştir ($R^2 = 0.74$, RPD = 2.03).



(a) **(b)**

Şekil 4.12. Dijital kütüphaneden alınan veriler sonucunda; (a) Kalibrasyon veri seti, (b) Doğrulama veri seti

K değerinin belirlenmesinde spektral kütüphaneden eklenen veriler R^2 değerinde artışa yardımcı olmuştur. Vis-NIR spektrofotometre ile taranmış toprak örnekleri, kalibrasyon (%70) ve doğrulama (%30) setlerine bölündüğünde model K değeri için daha iyi bir performans göstermiştir ($R^2 = 0.84$, RPD = 2.66).

OC değerinin belirlenmesinde spektral kütüphaneden eklenen veriler R^2 değerinde artışa yardımcı olmuştur. Vis-NIR spektrofotometre ile taranmış toprak örnekleri, kalibrasyon (%75) ve doğrulama (%25) setlerine bölündüğünde model OC değeri için daha iyi bir performans göstermiştir ($R^2 = 0.75$, RPD = 2.13).

Kireç değerinin belirlenmesinde spektral kütüphaneden eklenen veriler R^2 değerinde gözle görülür bir artış sağlamamıştır. Vis-NIR spektrofotometre ile taranmış toprak

örnekleri, kalibrasyon (%80) ve doğrulama (%20) setlerine bölündüğünde model kireç değeri için daha iyi bir performans göstermiştir (R^2 = 0.92, RPD = 4.39).

Literatüre göre, Singha vd. (2023), 300 ha alanda 200 örnek ile yapılan Vis-NIR yansıma spektroskopi analizlerine göre pH için R^2= 0.34, RPD= 1.23, OC için R^2= 0.82, RPD= 2.28, P için R^2= 0.71, RPD= 1.83, K için R^2= 0.70, RPD= 1.82 değerlerini bulmuştur. Yürütülen tez çalışmasında ise pH değeri için daha yüksek bir R^2 (0.63) ve RPD (1.80) değeri elde edilmiştir. OC tahmin değeri ise R^2=0.75 ve RPD=2.13 değerleri ile daha düşük bulunmuştur. P ve K değerlerine bakıldığında mevcut çalışmada ikisi içinde elde edilen R^2 (P= 0.74, K= 0.84) ve RPD (P= 2.03, K= 2.66) değerleri daha yüksektir.

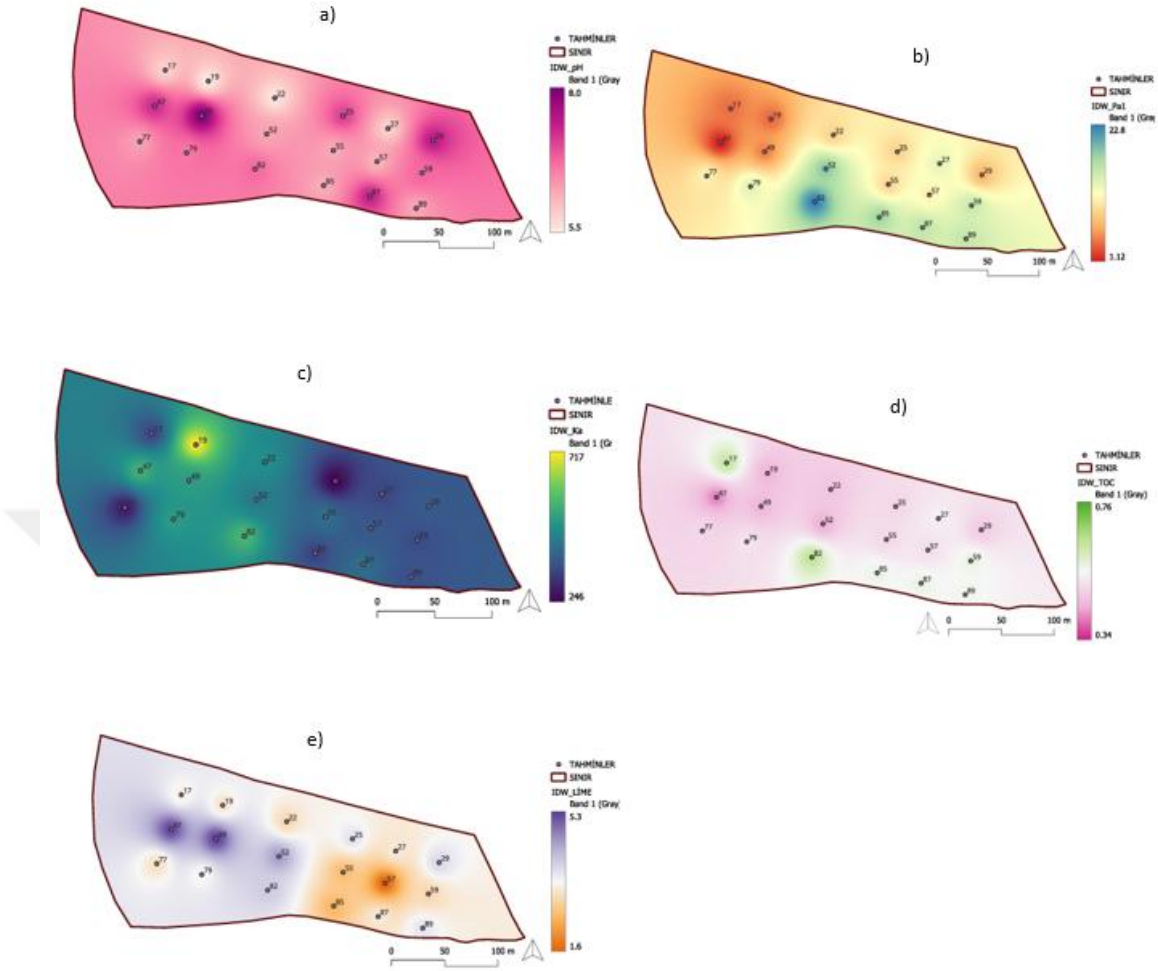
4.3. Tahminlenen Özellikler için Hazırlanan Toprak Özellikleri Haritaları

IDW enterpolasyon yöntemini kullanılarak tahmin edilen toprak özelliklerine ait hazırlanan haritalar Şekil 4.13'da verilmiştir.

İncelenen toprak özelliklerinin laboratuvar analiz değerleri ve bu çalışmada kullanılan modelin tahmin değerlerini basit istatistiklerle karşılaştırmak için her bir toprak özelliğine ait ortalama, standart sapma ve değişim katsayısı (CV) Çizelge 4.6'de verilmiştir. Son sütunda görüldüğü gibi, ortalamaların oranları alınabilir fosfor dışında 0.9 veya 1.00 bulunmuştur. Çizelgede sunulan sonuçlar, tahmin modelinin ele alınan beş toprak özelliğinin dördünde yüksek bir doğrulukla kullanılabileceğini basit istatistiklerle göstermektedir.

4.4. Yönetim Bölgelerinin Haritalanması

YB'lerin belirlenmesi için pH, Alınabilir fosfor, Alınabilir potasyum ve Organik karbon gibi toprak özellikleri için RStudio yazılımı kullanılarak kümeleme analizi yapılmıştır. Yönetim bölgelerinin belirlenmesi için yapılan adımlar aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 4.13. Tahmin edilen toprak özellikleri haritaları a) Ph, b) P, c) K, d) OC, e) Kireç

Çizelge 4.6. Laboratuvar ve tahmin sonuçlarına ait basit istatistikler

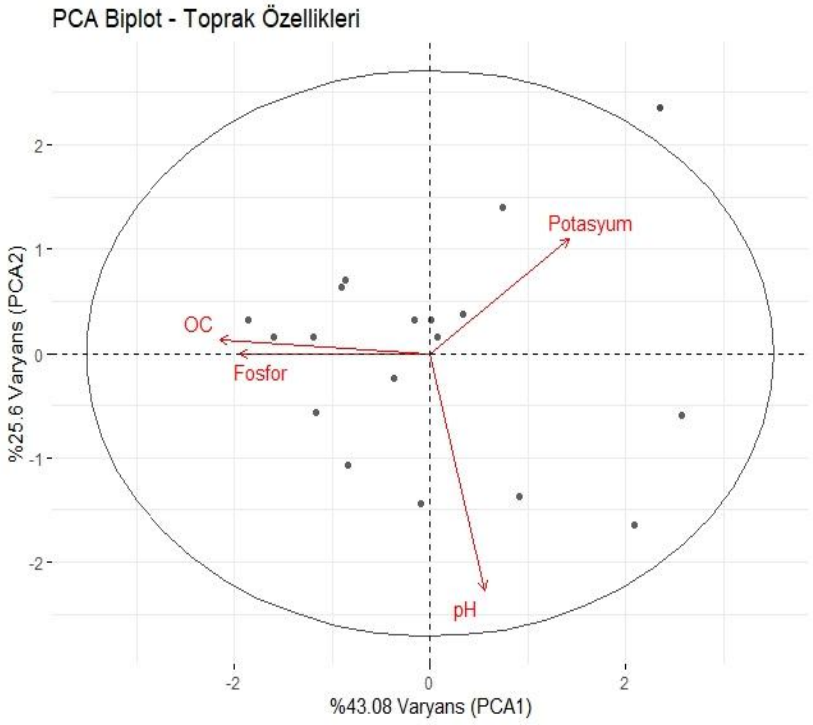
	LABORATUVAR			**TAHMİN**			**ORAN**
	Ort.	**Std. sapma**	**CV**	**Ort.**	**Std. sapma**	**CV**	**Tahmin/lab.**
pH	7.26	0.65	9	6.55	0.31	4.71	0.90
P (cmol/kg)	10.83	5.96	55.05	18.34	11.34	61.82	1.69
K (cmol/kg)	424.6	126.43	29.78	332.84	126.45	37.99	1.00
OC (%)	0.52	0.11	20.79	0.52	0.06	12.37	1.00
Kireç (%)	2.21	1.15	52.11	2.54	1.04	40.99	0.90

Ort, ortalama; Std. Sapma, standart sapma; CV, değişim katsayısı

Şekil 4.14, Temel Bileşen Analizi (PCA) sonucunda elde edilen biplotu göstermektedir. İlk iki temel bileşen (PCA1: %43.08, PCA2: %25.6), birlikte toplam varyansın yaklaşık %68.68'ini açıklamakta olup, çok boyutlu verinin anlamlı bir biçimde iki boyutta temsil edilebildiğini göstermektedir. Grafikte yer alan oklar, orijinal değişkenlerin bu iki bileşen üzerindeki yönelimini ve katkı düzeyini göstermektedir. Okların uzunluğu, ilgili değişkenin, PCA1 ve PCA2 bileşenlerine olan katkısını temsil etmektedir. Ok yönleri, değişkenler arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır:

- Benzer yönde olan oklar arasında pozitif korelasyon,
- Zıt yönde olanlar arasında negatif korelasyon söz konusudur.
- Dik açıyla kesişen değişkenler arasında anlamlı bir ilişki olmadığı belirtilmektedir.

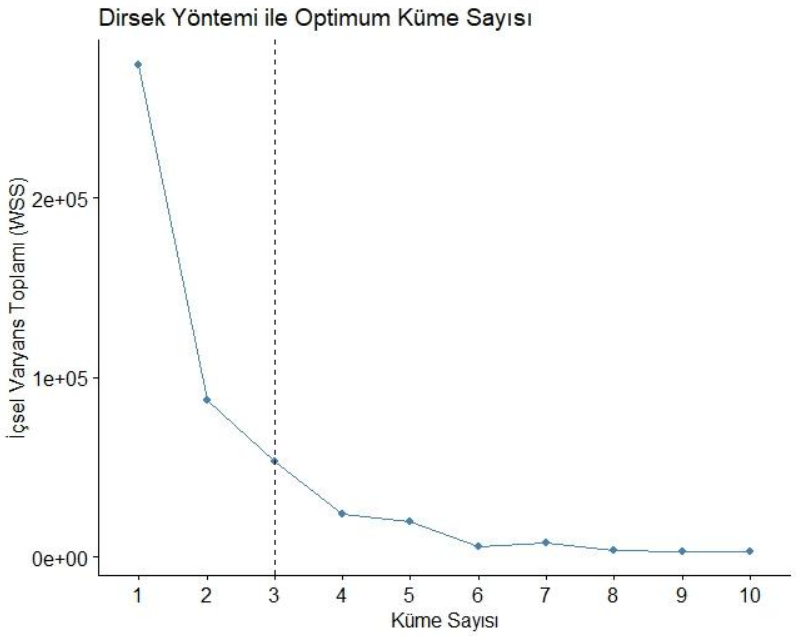
Bu biplot üzerinde kümeler net şekilde ayrışmakta olup, bu durum kümeler arası toprak özelliklerinin anlamlı düzeyde farklılaştığını göstermektedir. Aynı zamanda, değişken oklarının küme yönelimleriyle örtüşmesi, belirli kümelerin belirli toprak özelliklerine göre karakterize edildiğini göstermektedir.



Şekil 4.14. PCA analiz grafiği

Benzer özellikler taşıyan örneklerin bir araya getirilerek anlamlı kümeler oluşturulmasını sağlamak için K-ortalama kümeleme algoritması kullanılmıştır. K-ortalama algoritması için öncelikle optimum küme sayısının (k) belirlenmesini gerekmektedir. Optimum küme sayısının belirlenmesinde Dirsek (Elbow) yöntemi kullanılmıştır. Dirsek yöntemi, farklı küme sayıları için hesaplanan içsel varyans toplamı (WSS) analiz ederek optimum küme sayısını belirlemeye yardımcı olur. Bu değer, küme sayısı arttıkça azalmaya devam eder; ancak belirli bir noktadan sonra azalma hızı yavaşlar ve grafik bir "dirsek" şeklini alır.

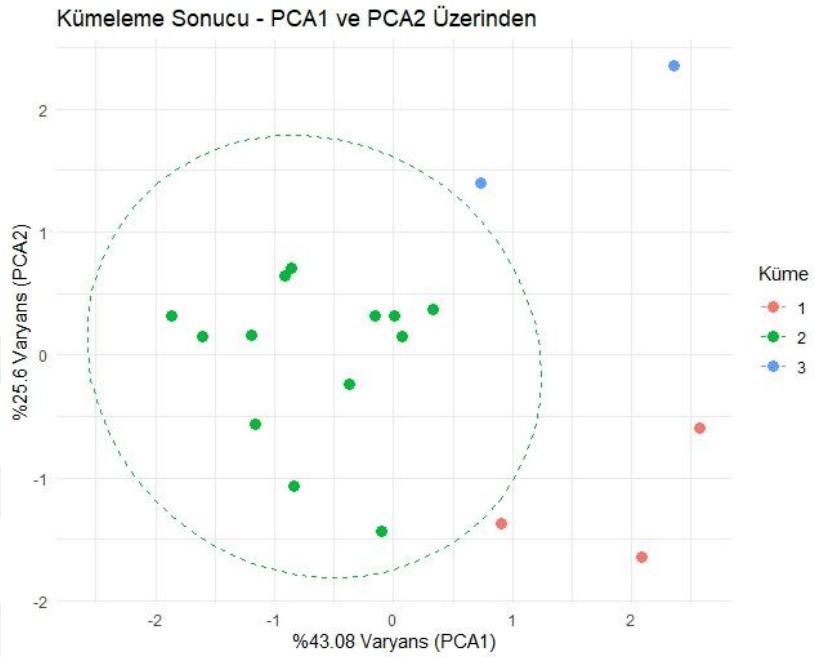
Şekil 4.15'te verilen dirsek grafiğinde, dirsek noktasının k = 3 olduğu görülmektedir. Bu, veri setindeki yapının en iyi şekilde üç küme ile temsil edildiğini göstermektedir. Daha fazla küme sayısı, modelin karmaşıklığını artırırken anlamlı bir varyans açıklaması sağlamamaktadır. Bu nedenle, üç küme ile yapılan K-ortalama analizi hem istatistiksel hem de pratik olarak uygun olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.15. Elbow yöntemi ile optimum küme sayısının belirlenmesi

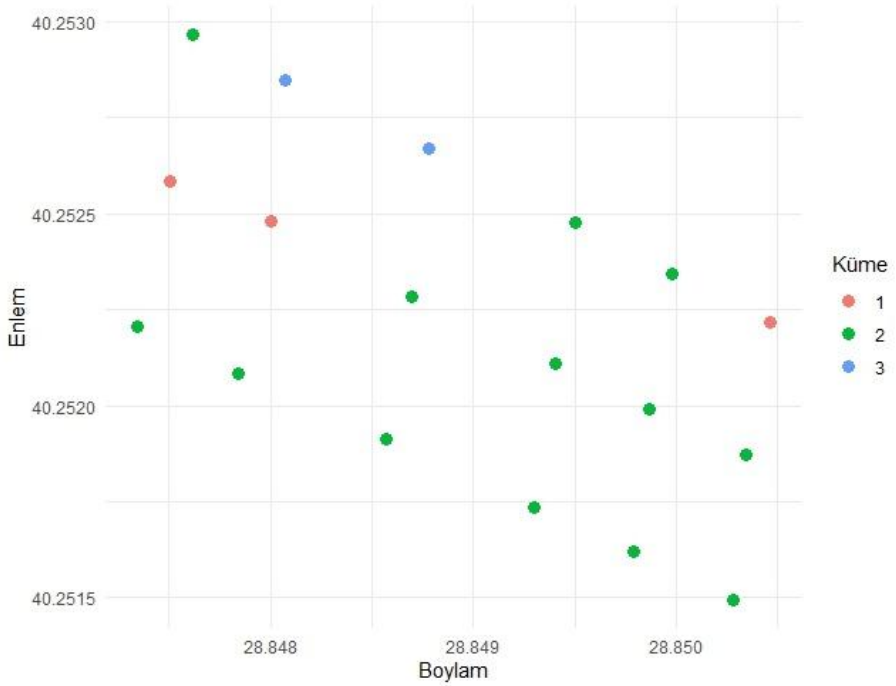
K-ortalama kümeleme sonuçları, PCA düzleminde (biplot) ve harita üzerinde kümelerin ayrışmasıyla tutarlılık göstermekte olup (Şekil 4.16), Dirsek yöntemi ile belirlenen

küme sayısının geçerliliğini desteklemektedir. Böylece, verideki doğal gruplar belirlenerek bu gruplara özgü toprak yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi mümkün hale gelmiştir.



Şekil 4.16. PCA düzleminde oluşturulan kümeler

K-ortalama algoritması ile tanımlanan üç küme, enlem ve boylam koordinatları kullanılarak mekânsal düzlemde haritalanmıştır. Grafik üzerinde her bir veri noktası, ait olduğu küme grubuna göre farklı renklerle gösterilmiştir. Şekil 4.17'de verilen haritada gösterilen kümeler, coğrafi olarak birbirinden ayrışmakta ve kümeler arasında belirgin uzamsal örüntüler gözlemlenmektedir. Bu durum, toprak özelliklerindeki varyasyonun yalnızca kimyasal ve fiziksel parametrelerle değil, aynı zamanda coğrafi konumla da ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, toprak özelliklerine göre farklı yönetim bölgelerinin tanımlanabileceğini ve bu bölgelerde farklı tarımsal uygulamaların planlanabileceğini göstermektedir. K = 3 sonucunun hem PCA biplot hem de harita verileriyle tutarlı olması, analiz bütünlüğünü ve küme yapısının sağlamlığını desteklemektedir.



Şekil 4.17. Kümelerin harita üzerinde gösterimi

Elde edilen kümelerin temsil ettiği değerler şu şekilde bulunmuştur.

Küme 1 - En yoğun gübreleme

- pH: 6.88 (orta derecede asidik)
- Fosfor: 4.66 (düşük fosfor düzeyi)
- OC: 0.45 (düşük organik karbon)
- Potasyum: 425.9 (yüksek potasyum).

Küme 2 - Seçici ve dikkatli gübreleme

- pH**:** 6.37 (orta derecede asidik)
- Fosfor**:** 17.43 (orta seviyede fosfor)
- OC**:** 0.51 (orta düzeyde organik karbon)
- Potasyum**:** 279.35 (orta düzeyde potasyum)

Küme 3 - En az gübreleme

- pH: 6.92 (orta derecede asidik)
- Fosfor: 27.57 (en yüksek fosfor düzeyi)
- OC: 0.57 (en yüksek organik karbon)
- Potasyum: 327.08 (orta seviyede potasyum)

Oluşturulan yönetim bölgeleri Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Yönetim bölgelerinin harita üzerinde gösterimi

4.5. Değişken Oranlı Uygulama Haritaları

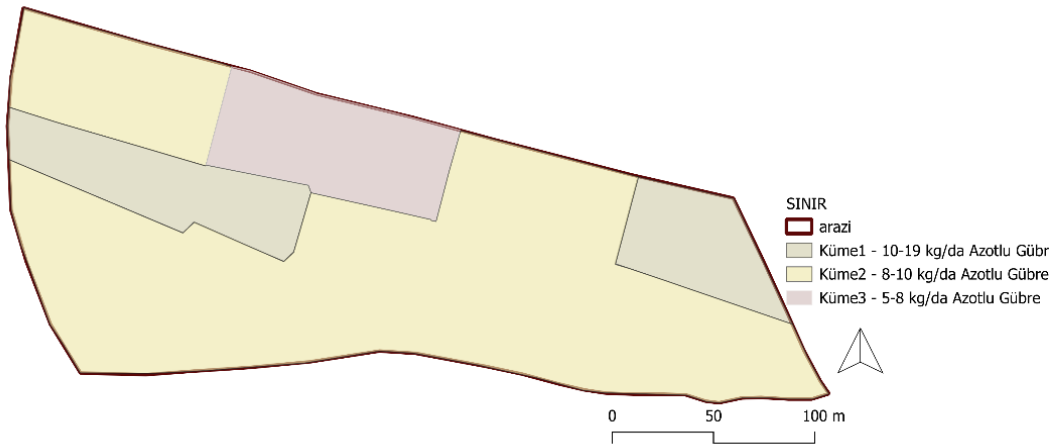
Değişken oranlı uygulama yapmak için belirlenen yönetim bölgeleri ve yönetim bölgelerine atılacak olan gübre miktarları Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilmiştir. Çalışma arazisinin tamamına mısır bitkisi için geleneksel olarak uygulanacak gübre ile değişken oranlı uygulanacak gübre miktarlarında değişim Çizelge 4.7'de verilmiştir. 6.3 ha'lık çalışma arazisine geleneksel reçetede ortalama 9.72 kg da^{-1} azotlu, 27.5 kg da^{-1} fosforlu gübre atılması önerilmiştir. Çizelge 4.7 incelendiğinde arazinin tamamına yapılacak sabit oranlı uygulamaya göre değişken oranlı uygulamada azotlu gübrede 15.26 kg, fosforlu gübrede 54.6 kg azalma olduğu görülmektedir. Potasyumlu gübre

uygulaması yalnızca 2 nokta için önerildiğinden tamamına uygulanması durumunda toprakta birikmeye neden olabileceğinden potasyum uygulaması için öneri yapılmamıştır.

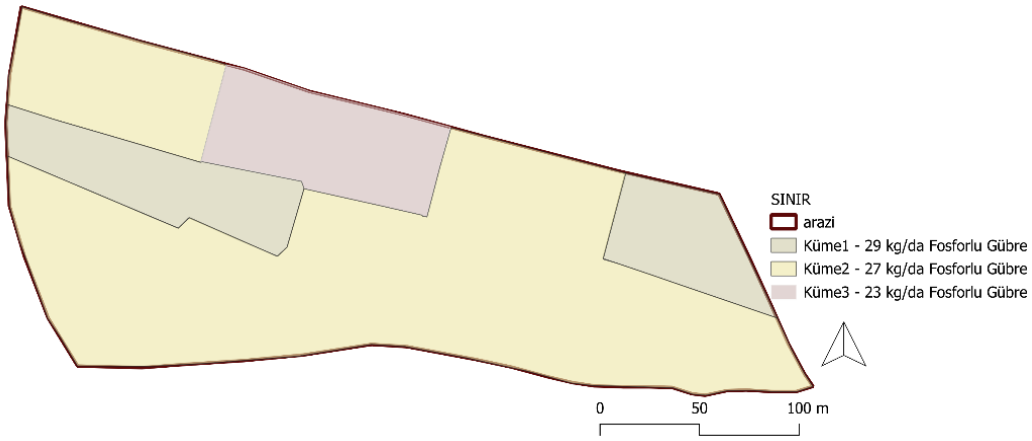
Çizelge 4.7. 6.3 ha'lık arazinin tamamına sabit ve değişken oranlı gübrelemede verilecek azotlu ve fosforlu gübre miktarları

Uygulanacak Gübre	Sabit oranlı Miktarı (kg)	Değişken oranlı (T) Miktarı (kg)	Fark SO-DO
Azotlu gübre (ÜRE)	612.36	597.1	15.26
Fosforlu Gübre (DAP)	1745.1	1690.5	54.6

T, teorik; SO, sabit oranlı; DO, değişken oranlı



Şekil 4.19. Değişken oranlı azotlu gübre uygulama haritası



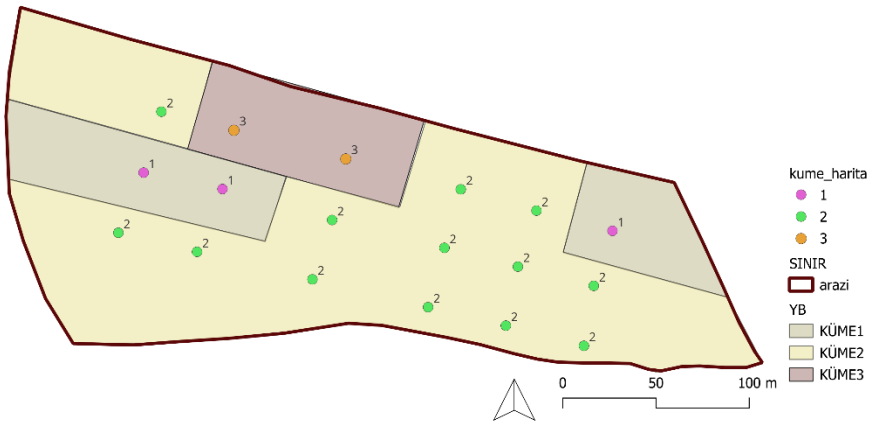
Şekil 4.20. Değişken oranlı fosforlu gübre uygulama haritası

Belirlenen yönetim bölgeleri teorik olarak doğru belirlenmiş olsada arazide uygulanabilir olmadığından, yönetim bölgeleri traktör ve gübreleme makinesi için uygulanabilir olacak şekilde yeniden düzenlenmiştir (Şekil 4.21). Şekil 4.22'de azotlu gübre, Şekil 4.23'de fosforlu gübre için hazırlanan harita verilmiştir. Pratik uygulama için belirlenen yönetim bölgelerine atılacak gübre miktarları Çizelge 4.8'de verilmiştir. Azotlu gübre sabit oranlı uygulamaya göre arazinin tamamına 3.34 kg daha fazla atılırken, fosforlu gübre miktarında 49.7 kg azalma gözlemlenmektedir. Teoride ve pratikte yapılacak olan değişken oranlı uygulamalar kıyaslandığında; Pratik olarak arazinin tamamına atılacak olan azotlu gübre miktarında teorik uygulamaya göre 18.6 kg, fosforlu gübrede 4.9 kg artış gözlemlenmiştir.

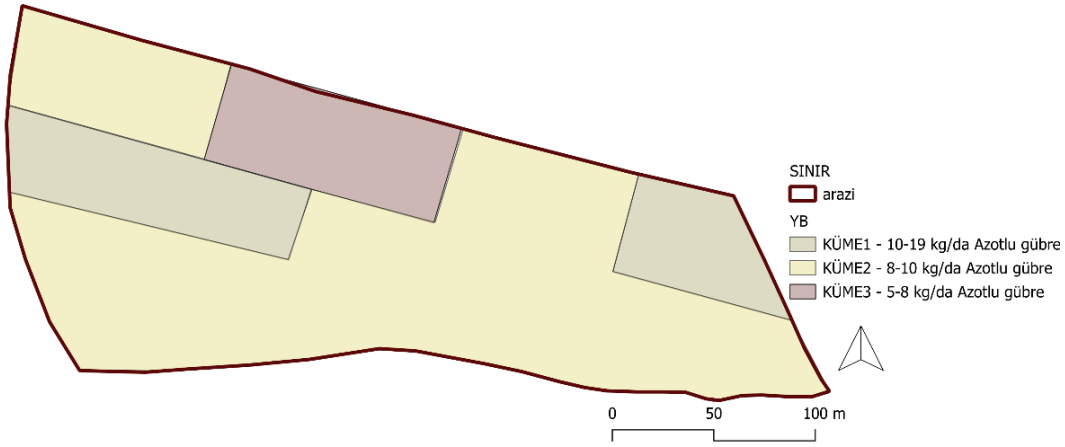
Çizelge 4.8. 6.3 ha'lık arazinin tamamına pratikte uygulanacak gübre miktarları

	Sabit oranlı	**Değişken oranlı (P)**	**Fark**
Uygulanacak Gübre	**Miktarı (kg)**	**Miktarı (kg)**	**SO-DO**
Azotlu gübre (ÜRE)	612.36	615.7	-3.34
Fosforlu Gübre (DAP)	1745.1	1695.4	49.7

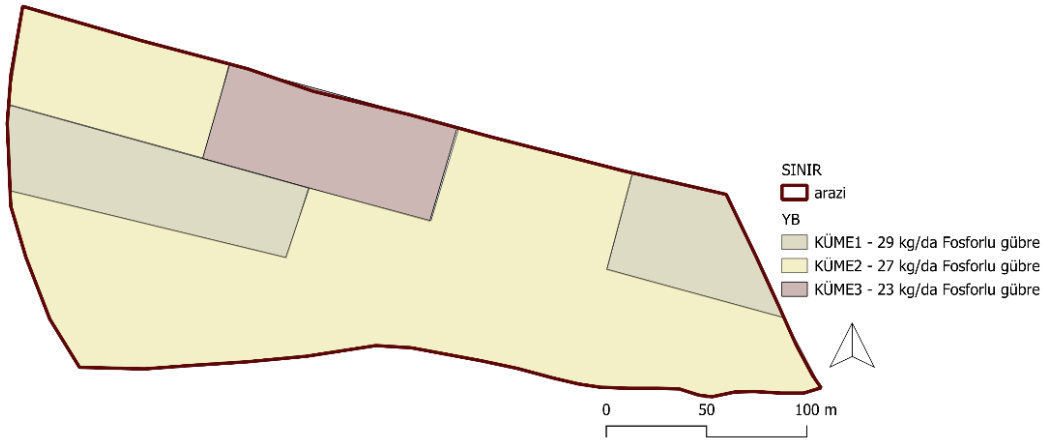
P, pratik; SO, sabit oranlı; DO, değişken oranlı



Şekil 4.21. Pratikte uygulanabilir yönetim bölgeleri haritası



Şekil 4.22. Pratik uygulamada atılacak olan azotlu gübre haritası



Şekil 4.23. Pratik uygulamada atılacak olan fosforlu gübre haritası

Wang vd., (2023), yönetim bölgelerine dayalı değişken oranlı gübreleme üzerine yaptıkları çalışmada, DOG'nin azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) gübre kullanımını sırasıyla %22,90–43,95, %59,11–100 ve %8,21–100 oranlarında azalttığını, ayrıca N, P ve K kullanım verimliliğini sırasıyla 12,27–28,71, 89,64–176,85 ve 5,48–266,89 kg/kg artırdığını, üstelik bu kazanımların verim kaybı olmaksızın elde edildiğini söylemişlerdir. Aynı zamanda, VR-MZ uygulamasında sabit oranlı gübrelemeye kıyasla %23,50–45,81 oranında daha az diazot monoksit salımı, %19,38–51,60 oranında daha az amonyak buharlaşması ve %28,77–53,98 oranında daha az nitrat sızması gözlemlendiği belirtilmiştir.

Benzer şekilde, Basso vd., (2016), çalışmasında, tüm alana ekim öncesi 50 kg/ha taban azot gübresi uygulamış, ve ardından V6 (altıncı yaprak) döneminde yönetim bölgelerine göre farklı üst gübreleme dozları test etmiştir. Bu üst gübreleme dozları 150–350 kg/ha arasında değişmektedir. Sonuçlar, değişken oranlı uygulamanın azot miktarını yönetim bölgesine göre azaltarak verim kaybı olmaksızın çevresel yükü önemli ölçüde düşürdüğünü ortaya koymuştur. Çalışmanın bir diğer önemli bulgusu, nitrat sızmasının %30'a varan oranda azalması ve buna bağlı olarak ekonomik kazancın sabit uygulamalara göre daha yüksek olmasıdır.

Yürütülen tez çalışmasında ise SOG'ye göre DOG yapıldığında fosforlu gübre kullanımından 49.7 kg tasarruf edildiği, azotlu gübre kullanımında ise 3.34 kg artış olduğu belirlenmiştir. Azotlu gübre uygulamasında toplam gübre kullanımı açısından tasarruf sağlanmasa da değişken oranlı uygulama sayesinde tarlada azotlu gübre gereksiniminin az olduğu yerlere az miktarda gübre uygulaması yapılması sağlanacaktır. Böylece, tarlanın bir bölümünde kullanılan agro-kimyasal kullanımı azaltılmış olmaktadır.

5. SONUÇ

Toprak analizleri toprağın bileşimi ve sağlığı hakkında değerli bilgiler sağladığı için tarım ve çevre biliminin önemli bir konusudur. Teknolojinin gelişmesiyle uzun ve maliyetli laboratuvar prosedürleri içeren büyük ölçekli analizler için pratik olmayan geleneksel yöntemler yerine toprak analizini daha verimli ve pratik hale getiren yöntemlere yönelinmektedir. Bu teknolojik gelişmelerden biri, görünür ve yakın kızılötesi spektroskopisi anlamına gelen Vis-NIR spektroskopisinin kullanılmasıdır.

Bu çalışmada 18 adet toprak örneğine ait pH, P, K, OC ve kireç içeriğinin belirlenebilmesi için yakın algılama teknolojilerinden Vis-NIR spektrometrisi kullanılmıştır. Çalışma yapılırken her bir toprak özelliği için en yüksek R^2 değerini elde edebilmek için farklı kalibrasyon ve doğrulama setleri, farklı ön işlem adımları denenmiştir. R^2 değerlerindeki artış miktarını gözlemlemek için spektral kütüphaneden yararlanılmıştır. Dijital toprak kütüphanesinden 18 adet veri daha eklenerek örnek sayısı iki katına çıkarılmış ve R^2, RPD, RMSE gibi değerlerdeki değişimler gözlemlenmiştir.

Kalibrasyon için R^2 0.7 ile 1 arasında, doğrulama için 0.63 ile 0.92 arasında değerler bulunmuştur. Elde edilen R^2 değerleri, modelin doğruluğunu değerlendirme açısından iyi doğruluk seviyeleri olarak kabul edilmektedir. Online doğrulamadaki model performansını değerlendirmek için RPD değerlerine bakıldığında 1.8 ile 4.39 arasında değiştiği görülmektedir.

Toprak özelliklerinin mekânsal dağılımının modellenmesi, yönetim bölgelerinin belirlenmesi ve bu bölgeler doğrultusunda değişken oranlı gübre uygulamalarının değerlendirilmesi hedeflenmiştir. IDW (Ters Mesafe Ağırlıklı) enterpolasyon yöntemiyle oluşturulan toprak özellikleri haritaları; pH, alınabilir potasyum (K), organik karbon (OC) ve kireç parametreleri için yüksek tutarlılık göstermiştir. Alınabilir fosfor (P) için tahmin oranı görece düşük çıkmasına rağmen, diğer dört parametrede elde edilen yüksek doğruluk düzeyi, kullanılan modelin büyük ölçüde güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Yönetim bölgelerinin belirlenmesinde PCA (Temel Bileşen Analizi) ve K-ortalama kümeleme yöntemleri başarıyla kullanılmış; üç küme, hem istatistiksel hem de mekânsal tutarlılık göstererek toprak özelliklerine göre anlamlı şekilde ayrışmıştır. Her bir küme için önerilen farklı gübreleme stratejileri, bölgeye özgü toprak yönetimini mümkün kılmıştır. Bu da, geleneksel homojen gübreleme uygulamalarına kıyasla daha hassas ve çevre dostu tarım yöntemlerinin uygulanabileceğini göstermektedir.

Teorik olarak belirlenen değişken oranlı uygulamalarda, fosforlu gübre kullanımında 54.6 kg'lık, azotlu gübre kullanımında ise 15.26 kg'lık bir tasarruf sağlanmıştır. Bu farklar, hem ekonomik hem de çevresel açıdan dikkate değerdir. Ayrıca pratik uygulamalara göre yeniden düzenlenen yönetim bölgeleriyle araziye uygun gübreleme senaryoları da oluşturulmuştur. Literatür örnekleriyle kıyaslandığında, bu çalışmanın sonuçları doğrultusunda verim artışları ve çevresel faydaların sağlanabileceği öngörülmektedir.

Bu araştırmanın sonucunda gelecekteki çalışmalar için şunlar önerilebilir:

- Dijital toprak kütüphanelerinin zenginleştirilmesi ve daha kolay erişim izinleri sağlanmalıdır. Yüksek doğruluk ve düşük maliyetli analizler yapılabilmesi için tarladan ve dijital kütüphanelerden alınması gereken minimum örnek sayısının ne olması gerektiğinin de araştırılması önerilebilir.
- Model hassasiyetinin artırılması için özellikle alınabilir fosfor (P) gibi parametrelerde tahmin hassasiyetini artırmak için farklı enterpolasyon ve makine öğrenmesi yöntemlerinin (örneğin Kriging, Random Forest, XGBoost) kullanılması önerilebilir.
- Bu çalışmada verim verilerine doğrudan yer verilememiştir. Gelecek çalışmalarda, her bir yönetim bölgesinden elde edilen ürün verimleri analiz edilerek önerilen gübreleme stratejilerinin verim üzerindeki etkisi değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

Abbas, F., Afzaal, H., Farooque, A. A., & Tang, S. (2020). Crop yield prediction through proximal sensing and machine learning algorithms. Agronomy, 10(7), 1046. https://doi.org/10.3390/agronomy10071046

Ahmadi, A., Emami, M., Daccache, A., & He, L. (2021). Soil properties prediction for precision agriculture using visible and near-infrared spectroscopy: A systematic review and meta-analysis. Agronomy, 11(3), 433. https://doi.org/10.3390/agronomy11030433

Bantchina, B. B., Qaswar, M., Arslan, S., Ulusoy, Y., Gündoğdu, K. S., Tekin, Y., & Mouazen, A. M. (2024). Corn yield prediction in site-specific management zones using proximal soil sensing, remote sensing, and machine learning approach. Computers and Electronics in Agriculture, 225, 109329. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109329

Basso, B., Bertocco, M., Sartori, L., & Martin, E. C. (2007). Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in a maize–wheat–soybean rotation. European Journal of Agronomy, 26(2), 82-91. https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.08.008

Basso, B., Cammarano, D., Fiorentino, C., & Ritchie, J. T. (2013). Wheat yield response to spatially variable nitrogen fertilizer in Mediterranean environment. European journal of Agronomy, 51, 65-70. https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.06.007

Basso, B., & Ritchie, J. T. (2015). Simulating crop growth and biogeochemical fluxes in response to land management using the SALUS model (Vol. 2015, pp. 252-274). New York, NY, USA: Oxford University Press.

Basso, B., Dumont, B., Cammarano, D., Pezzuolo, A., Marinello, F., & Sartori, L. (2016). Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. Science of the total environment, 545, 227-235. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.104

Bougiouklis, J. N., Barouchas, P. E., Petropoulos, P., Tsesmelis, D. E., & Moustakas, N. (2025). Precision soil sampling strategy for the delineation of management zones in olive cultivation using unsupervised machine learning methods. *Scientific Reports*, *15*(1), 8253. https://doi.org/10.1038/s41598-025-89395-1

Ben-Dor, E., & Banin, A. (1995). Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. Soil Science Society of America Journal, 59(2), 364-372. https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900020014x

Ben-Dor, E. (2002). Quantitative remote sensing of soil properties. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75005-0

Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. Precision agriculture, 5, 359-387.

Bowers, S. A. (1971). Reflection of radiant energy from soils. Kansas State University

Brown, D. J., Shepherd, K. D., Walsh, M. G., Mays, M. D., & Reinsch, T. G. (2006). Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. Geoderma, 132(3-4), 273-290. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.025

Brown, D. J. (2007). Using a global VNIR soil-spectral library for local soil characterization and landscape modeling in a 2nd-order Uganda watershed. Geoderma, 140(4), 444-453. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.04.021

Chang, J., Clay, D. E., Carlson, C. G., Reese, C. L., Clay, S. A., & Ellsbury, M. M. (2004). Defining yield goals and management zones to minimize yield and nitrogen and phosphorus fertilizer recommendation errors. *Agronomy Journal*, *96*(3), 825-831. https://doi.org/10.2134/agronj2004.0825

Childs, C. (2004). Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst. ArcUser, July-September, 3235(569), 32-35.

Cozzolino, D., & Morón, A. (2006). Potential of near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions. Soil and Tillage Research, 85(1-2), 78-85. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.12.006

Colaço, A. F., & Molin, J. P. (2017). Variable rate fertilization in citrus: A long term study. Precision Agriculture, 18, 169-191. https://doi.org/10.1007/s11119-016-9454-9

Debaene, G., Bartmiński, P., & Siłuch, M. (2023). In Situ VIS-NIR spectroscopy for a basic and rapid soil investigation. Sensors, 23(12), 5495. https://doi.org/10.3390/s23125495

Diacono, M., Rubino, P., & Montemurro, F. (2013). Precision nitrogen management of wheat. A review. Agronomy for Sustainable Development, 33, 219-241.

Ferguson, R. B., Lark, R. M., & Slater, G. P. (2003). Approaches to management zone definition for use of nitrification inhibitors. Soil Science Society of America Journal, 67(3), 937-947. https://doi.org/10.2136/sssaj2003.9370

Ge, Y., Morgan, C. L., Grunwald, S., Brown, D. J., & Sarkhot, D. V. (2011). Comparison of soil reflectance spectra and calibration models obtained using multiple spectrometers. Geoderma, 161(3-4), 202-211. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.020

Ge, Y., Morgan, C. L., & Wijewardane, N. K. (2020). Visible and near-infrared reflectance spectroscopy analysis of soils. Soil Science Society of America Journal, 84(5), 1495-1502. https://doi.org/10.1002/saj2.20158

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. Science, 327(5967), 828-831. https://doi.org/10.1126/science.1183899

Gozdowski, D., Stępień, M., Samborski, S., Dobers, E. S., Szatyłowicz, J., & Chormański, J. (2014). Determination of the most relevant soil properties for the delineation of management zones in production fields. Communications in soil science and plant analysis, 45(17), 2289-2304. https://doi.org/10.1080/00103624.2014.912289

Grunwald, S. (2009). Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. Geoderma, 152(3-4), 195-207. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.003

Jia, X., Fang, Y., Hu, B., Yu, B., & Zhou, Y. (2023). Development of Soil Fertility Index Using Machine Learning and Visible-Near-Infrared Spectroscopy. Land, 12(12), 2155. https://doi.org/10.3390/land12122155

Jones, A. J., Mielke, L. N., Bartles, C. A., & Miller, C. A. (1989). Relationship of landscape position and properties to crop production. Journal of Soil and Water Conservation, 44(4), 328-332.

Kaivosoja, J., Jackenkroll, M., Linkolehto, R., Weis, M., & Gerhards, R. (2014). Automatic control of farming operations based on spatial web services. Computers and electronics in agriculture, 100, 110-115. https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.11.003

Kazlauskas, M., Bručienė, I., Jasinskas, A., & Šarauskis, E. (2021). Comparative analysis of energy and GHG emissions using fixed and variable fertilization rates. Agronomy, 11(1), 138. https://doi.org/10.3390/agronomy11010138

Kennard, R. W., & Stone, L. A. (1969). Computer aided design of experiments. Technometrics, 11(1), 137-148. https://doi.org/10.1080/00401706.1969.10490666

Khan, H., Farooque, A. A., Acharya, B., Abbas, F., Esau, T. J., & Zaman, Q. U. (2020). Delineation of management zones for site-specific information about soil fertility characteristics through proximal sensing of potato fields. Agronomy, 10(12), 1854.

Kravchenko, A. N., & Bullock, D. G. (2000). Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. Agronomy Journal, 92(1), 75-83. https://doi.org/10.2134/agronj2000.92175x

Kuang, B., & Mouazen, A. M. (2011). Calibration of visible and near-infrared spectroscopy for soil analysis at the field scale on three European farms. European Journal of Soil Science, 62(4), 629-636. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01358.x

Kuang, B., & Mouazen, A. M. (2012). Influence of the number of samples on prediction error of visible and near infrared spectroscopy of selected soil properties at the farm scale. European Journal of Soil Science, 63(3), 421-429. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01456.x

Metwally, M. S., Shaddad, S. M., Liu, M., Yao, R. J., Abdo, A. I., Li, P., ... & Chen, X. (2019). Soil properties spatial variability and delineation of site-specific management zones based on soil fertility using fuzzy clustering in a hilly field in Jianyang, Sichuan, China. *Sustainability*, *11*(24), 7084. https://doi.org/10.3390/su11247084

Morellos, A., Pantazi, X. E., Moshou, D., Alexandridis, T., Whetton, R., Tziotzios, G., ... & Mouazen, A. M. (2016). Machine learning based prediction of soil total nitrogen, organic carbon and moisture content by using VIS-NIR spectroscopy. Biosystems Engineering, 152, 104-116. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.04.018

Mulla, D. J. (1991). Using geostatistics and GIS to manage spatial patterns in soil fertility. In Automated agriculture for the 21st century. ASAE.

Munnaf, M. A., Haesaert, G., Van Meirvenne, M., & Mouazen, A. M. (2020). Site-specific seeding using multi-sensor and data fusion techniques: A review. Advances in agronomy, 161, 241-323. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.08.001

Nawar, S., Corstanje, R., Halcro, G., Mulla, D., & Mouazen, A. M. (2017). Delineation of soil management zones for variable-rate fertilization: A review. Advances in agronomy, 143, 175-245. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.003

Nduwamungu, C., Ziadi, N., Parent, L. É., Tremblay, G. F., & Thuriès, L. (2009). Opportunities for, and limitations of, near infrared reflectance spectroscopy applications in soil analysis: A review. Canadian Journal of soil science, 89(5), 531-541.

Nortcliff, S. (2002). Standardisation of soil quality attributes. Agriculture, ecosystems & environment, 88(2), 161-168. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00253-5

Koch, M., Naumann, M., Pawelzik, E., Gransee, A., & Thiel, H. (2020). The importance of nutrient management for potato production Part I: Plant nutrition and yield. Potato Research, 63(1), 97-119. https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431-2

Pawase, P. P., Nalawade, S. M., Bhanage, G. B., Walunj, A. A., Kadam, P. B., Durgude, A. G., & Patil, M. R. (2023). Variable rate fertilizer application technology for nutrient management: A review. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 16(4), 11-19. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231604.7671

Peng, S., Buresh, R. J., Huang, J., Zhong, X., Zou, Y., Yang, J., ... & Dobermann, A. (2010). Improving nitrogen fertilization in rice by sitespecific N management. A review. Agronomy for sustainable development, 30, 649-656. https://doi.org/10.1051/agro/2010002

Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. Advances in agronomy, 67, 1-85. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60513-1

Robert, P. C. (2002). Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. In Progress in Plant Nutrition: Plenary Lectures of the XIV International Plant Nutrition Colloquium: Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research (pp. 143-149). Springer Netherlands

Robertson, M., Carberry, P., & Brennan, L. (2009). Economic benefits of variable rate technology: case studies from Australian grain farms. Crop and Pasture Science, 60(9), 799-807. https://doi.org/10.1071/CP08342

Robertson, M. J., Llewellyn, R. S., Mandel, R., Lawes, R., Bramley, R. G. V., Swift, L., ... & O'callaghan, C. (2012). Adoption of variable rate fertiliser application in the Australian grains industry: status, issues and prospects. Precision agriculture, 13, 181-199.

Rossel, R. V., & McBratney, A. B. (1998). Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of soil clay and water content. Geoderma, 85(1), 19-39. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00023-8

Rossel, R. V., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J., & Skjemstad, J. O. (2006). Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. Geoderma, 131(1-2), 59-75.

Rossel, R. V., Behrens, T., Ben-Dor, E., Brown, D. J., Demattê, J. A. M., Shepherd, K. D., ... & Ji, W. (2016). A global spectral library to characterize the world's soil. Earth-Science Reviews, 155, 198-230. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.012

Samborski, S. M., Gozdowski, D., Stępień, M., Walsh, O. S., & Leszczyńska, E. (2016). On-farm evaluation of an active optical sensor performance for variable nitrogen application in winter wheat. European Journal of Agronomy, 74, 56-67. https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.11.020

Savci, S. (2012). An agricultural pollutant: chemical fertilizer. International Journal of Environmental Science and Development, vol. 3, no. 1, p. 73.

Savitzky, A., & Golay, M. J. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical chemistry, 36(8), 1627-1639.

Schepers, A. R., Shanahan, J. F., Liebig, M. A., Schepers, J. S., Johnson, S. H., & Luchiari Jr, A. (2004). Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. Agronomy Journal, 96(1), 195-203. https://doi.org/10.2134/agronj2004.1950

Shanahan, J. F., Kitchen, N. R., Raun, W. R., & Schepers, J. S. (2008). Responsive in-season nitrogen management for cereals. Computers and electronics in agriculture, 61(1), 51-62. https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.06.006

Sharpley, A. (2000). Phosphorus availability. Handbook of soil science, D18-D30.

Shepherd, K. D., & Walsh, M. G. (2002). Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. Soil science society of America journal, 66(3), 988-998. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.9880

Shi, Y., Zhu, Y., Wang, X., Sun, X., Ding, Y., Cao, W., & Hu, Z. (2020). Progress and development on biological information of crop phenotype research applied to real-time variable-rate fertilization. Plant methods, 16, 1-15. https://doi.org/10.1186/s13007-020-0559-9

Singha, C., Swain, K. C., Sahoo, S., & Govind, A. (2023). Prediction of soil nutrients through PLSR and SVMR models by VIs-NIR reflectance spectroscopy. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 26(4), 901-918. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.10.005

Sudduth, K. A., Hummel, J. W., & Funk, R. C. (1989). NIR soil organic matter sensor.

Stenberg, B. O., Nordkvist, E., & Salomonsson, L. (1995). Use of near infrared reflectance spectra of soils for objective selection of samples. Soil Science, 159(2), 109-114.

Stenberg, B., Rossel, R. A. V., Mouazen, A. M., & Wetterlind, J. (2010). Visible and near infrared spectroscopy in soil science. Advances in agronomy, 107, 163-215. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7

Stevens, A., & Ramirez-Lopez, L. (2014, February). An introduction to the prospectr package.

Späti, K., Huber, R., & Finger, R. (2021). Benefits of increasing information accuracy in variable rate technologies. Ecological Economics, 185, 107047. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107047

Spomer, R. G., & Piest, R. F. (1982). Soil productivity and erosion of Iowa loess soils. Transactions of the ASAE, 25(5), 1295-1299. https://doi.org/10.13031/2013.33716

Stone, J. R., Gilliam, J. W., Cassel, D. K., Daniels, R. B., Nelson, L. A., & Kleiss, H. J. (1985). Effect of erosion and landscape position on the productivity of Piedmont soils. Soil Science Society of America Journal, 49(4), 987-991. https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900040039x

Sur, K., & Chauhan, P. (2019). Imaging spectroscopic approach for land degradation studies: a case study from the arid land of India. Geomatics, Natural Hazards and Risk. https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1552629

Tekin, Y., & Tümsavaş, Z. (2012). Toprak özelliklerinin belirlenmesinde spektrofotometrik yansımalardan yararlanma olanakları. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 26(2), 37-46.

Tekin, Y., Tumsavas, Z., & Mounem Mouazen, A. (2013, April). Measurement of soil organic carbon with Vis-NIR spectroscopy as affected by moisture content and texture. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU2013-13872).

Ulusoy, Y., Tekin, Y., Tümsavaş, Z., & Mouazen, A. M. (2016). Prediction of soil cation exchange capacity using visible and near infrared spectroscopy. Biosystems Engineering, 152, 79-93. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.03.005

Umargono, E., Suseno, J. E., & Gunawan, S. V. (2020, October). K-means clustering optimization using the elbow method and early centroid determination based on mean and median formula. In *The 2nd international seminar on science and technology (ISSTEC 2019)* (pp. 121-129). Atlantis Press. https://doi.org/10.5220/0009908402340240

Van Loon, J., Speratti, A. B., Gabarra, L., & Govaerts, B. (2018). Precision for smallholder farmers: a small-scale-tailored variable rate fertilizer application kit. Agriculture, 8(4), 48. https://doi.org/10.3390/agriculture8040048

Vasques, G. M., Grunwald, S. J. O. S., & Sickman, J. O. (2008). Comparison of multivariate methods for inferential modeling of soil carbon using visible/near-infrared spectra. Geoderma, 146(1-2), 14-25. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.04.007

Yang, C., Everitt, J. H., & Bradford, J. M. (2001). Comparisons of uniform and variable rate nitrogen and phosphorus fertilizer applications for grain sorghum. Transactions of the ASAE, 44(2), 201. https://doi.org/10.13031/2013.4676

Yang, H. (2011). Spectroscopic calibration for soil N and C measurement at a farm scale. Procedia Environmental Sciences, 10, 672-677. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.108

Yin, H., Cao, Y., Marelli, B., Zeng, X., Mason, A. J., & Cao, C. (2021). Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture. Advanced Materials, 33(20), 2007764. https://doi.org/10.1002/adma.202007764

Yu, B., Yan, C., Yuan, J., Ding, N., & Chen, Z. (2023). Prediction of soil properties based on characteristic wavelengths with optimal spectral resolution by using Vis-NIR spectroscopy. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 293, 122452. https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.122452

Wang, Y., Yuan, Y., Yuan, F., Ata-UI-Karim, S. T., Liu, X., Tian, Y., ... & Cao, Q. (2023). Evaluation of variable application rate of fertilizers based on Site-Specific Management Zones for Winter Wheat in Small-Scale Farming. *Agronomy*, *13*(11), 2812. https://doi.org/10.3390/agronomy13112812

Wang, Y., Li, M., Ji, R., Wang, M., & Zheng, L. (2020). Comparison of soil total nitrogen content prediction models based on Vis-NIR spectroscopy. Sensors, 20(24), 7078. https://doi.org/10.3390/s20247078

Wetterlind, J., Stenberg, B., & Söderström, M. (2008b). The use of near infrared (NIR) spectroscopy to improve soil mapping at the farm scale. Precision agriculture, 9, 57-69.