DEĞİŞKEN ORANLI FERTİGASYONDA DİNAMİK YÖNETİM BÖLGELERİ İÇİN MODELLEME VE VERİ YÖNETİMİ

Bere Benjamin BANTCHINA

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN ORANLI FERTİGASYONDA DİNAMİK YÖNETİM BÖLGELERİ İÇİN MODELLEME VE VERİ YÖNETİMİ

Bere Benjamin BANTCHINA
0000-0002-2593-426X

Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU
(Danışman)

DOKTORA TEZİ

BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

DEĞİŞKEN ORANLI FERTİGASYONDA DİNAMİK YÖNETİM BÖLGELERİ İÇİN MODELLEME VE VERİ YÖNETİMİ

Bere Benjamin BANTCHINA

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU

Hassas tarım, tarımsal üretim faaliyetlerine ileri teknolojileri entegre etmek, çevresel olumsuz etkiyi azaltmak, su kaynaklarını korumak, ürün verimini ve kalitesini artırmak, ekonomik faydalar sağlamak ve tarımsal sürdürülebilirliğin sağlanmasını temin etmek için veriye dayalı uygulamaları kapsamaktadır. Konuma özgü tarımsal uygulamalar hassas tarımın önemli özelliğidir. Bu çalışmanın amacı Otomatik Tamburlu Değişken Oranlı Fertigasyon Makinesi (HR-VRFM) kullanılarak konuma özel fertigasyon için veri setinin ileri teknolojiler kullanılarak hazırlanması, uygulama haritalarının hazırlanması, azot gübre ve sulama suyunun araziye uygulamasındaki performansın değerlendirilmesidir. Çalışma 2021-2023 yıllarında Bursa, Karacabey ilçesi, Bakırköy Köyü'nde seçilen bir ticari işletme alanında yürütülmüştür. Değişken oranlı fertigasyonun uygulamasında günümüz teknolojilerinden toprak nem sensörleri, görünür ve yakın kızılötesi (Vis-NIR) spektrometre ölçümleri, meteoroloji verileri ve uydu görüntüleri gibi veri kaynakları kullanmıştır. Sözü edilen verilerle ileri modelleme ve kümeleme yöntemleri kullanılarak dinamik yönetim bölgeleri ve uygulama haritaları elde edilmiştir. Uygulama haritaları değişken oranlı sulama (VRI) ve değişken oranlı azot gübrelemesi (VRNF) için hazırlanmıştır. Tarla koşullarında gerçekleştirilen VRI ve VRNF uygulamalarından yüksek uygulama randımanları elde edilmiştir. Uygulama haritasındaki değerler ile uygulanan değerler arasındaki determinasyon katsayı (R^2) değerleri VRI için 0,96 ile 0,99 ve VRNF için 0,85 ile 0,99 arasında elde edilmiştir. Bu durum, yüksek çözünürlüklü VRI ve VRNF uygulamalarının Otomatik Tamburlu Değişken Oranlı Fertigasyon Makinesi ile mümkün olduğunu göstermiştir. Yüksek çözünürlüklü VRI ve VRNF veri setinin doğru ve hızlı bir şekilde hazırlanması önem kazanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hassas tarım, konuma özel fertigasyon, dinamik yönetim bölgeleri, veri yönetimi, su ve gübre uygulama performansı, yakın ve uzaktan algılama

2024, ix + 73 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

MODELLING AND DATA MANAGEMENT OF DYNAMIC MANAGEMENT ZONES FOR SITE-SPECIFIC FERTIGATION

Bere Benjamin BANTCHINA

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

Supervisor: Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU

Precision agriculture offers a sustainable and prosperous future for farming by integrating advanced technologies to reduce environmental impact, conserve water, increase crop yield and quality, realize economic benefits, and promote data-driven decision-making. A key aspect of precision agriculture is site-specific practices. This study aims to prepare a dataset using advanced sensing and control technologies and evaluate the performance of nitrogen fertilizer and irrigation water applications in site-specific fertigation. The evaluation uses an automated Hose Reel Variable Rate Fertigation Machine (HR-VRFM) with four-section control. The study was conducted from 2021 to 2023 on a commercial farm in Bakırköy Village, Karacabey district, Bursa, Turkey. Data sources such as soil moisture sensors, visible and near-infrared (Vis-NIR) spectrometer measurements, meteorological data, and satellite images were used for the variable rate fertigation. With this data, dynamic management zones and application maps were created using advanced modeling and clustering methods. Dynamic management zones were developed for variable rate irrigation (VRI) and variable rate nitrogen fertilization (VRNF). The site-specific fertigation implementation showed promising results under field conditions. The coefficient of determination (R^2) values between the application map values and the actual applied values ranged from 0.96 to 0.99 for VRI and from 0.85 to 0.99 for VRNF. The present study demonstrates that high-resolution VRI and VRNF applications are feasible with the Automatic Hose Reel Variable Rate Fertigation Machine and could significantly improve fertilizer and water use efficiency, potentially revolutionizing smart farming practices.

Key Words: Data management, dynamic management zones, proximal and remote sensing, site-specific fertigation, smart farming, variable rate application, water and fertilizer application performance

2024, ix + 73 pages.

TEŞEKKÜR

Bu tezi başarıyla tamamlamamda destek ve yardımlarını esirgemeyen aşağıdaki kişi ve kuruluşlara en derin şükranlarımı sunarım.

Araştırmayı "Konuma Özgün Gübreleme için Veriye Dayalı Platform (ADDFerti) Projesi" kapsamında yürütmeme olanak sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) verdiği mali destekten ötürü teşekkür etmek isterim. Bu proje, ICT-AGRI-FOOD 862665 numaralı hibe sözleşmesi kapsamında Avrupa Birliği'nin Horizon 2020 araştırma ve yenilik programından fon almıştır.

Doktora yolculuğum boyunca hiç eksilmeyen desteği, paha biçilmez rehberliği ve bitmek bilmeyen sabrı için danışmanım Sayın Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU'ya en içten şükranlarımı sunarım.

Tez komitesi ve jüri üyelerim Prof. Dr. Selçuk ARSLAN, Prof. Selim KÖKSAL, Prof. Dr. Şerife Tülin AKKAYA ASLAN ve Prof. Dr. Gökhan ÇAMOĞLU ile araştırma danışmanlarım Prof. Dr. Yücel TEKİN ve Prof. Dr. Abdul Mounem Mouazen'e bu araştırma yolculuğu boyunca gösterdikleri rehberlik, uzmanlık ve paha biçilmez geri bildirimleri için teşekkürü bir borç bilirim. Görüşleriniz ve akademik mükemmeliyete olan bağlılığınız sürekli bir ilham kaynağı oldu.

Yakın ve değerli arkadaşlarım Louis de Strycker ve Araş. Gör. Gamze Altun'a bu uzun yolculuğun iniş ve çıkışlarında yanımda oldukları için minnettarlığımı ifade etmek isterim. Dostluğunuz bana teselli ve ilham kaynağı oldu.

BUÜ Biyosistem Mühendisliği'nin özverili çalışanlarına, idari destekleri, araştırma kaynakları konusundaki yardımları ve elverişli bir araştırma ortamı yaratmaya yönelik genel katkıları için teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme, yeteneklerime olan sarsılmaz inancınız ve sonsuz teşvikiniz akademik yolculuğumun temel taşı oldu. Fedakârlıkları ve sınırsız sevgileri için aileme sonsuz minnettarım. Bana olan inancınız bu başarının arkasındaki itici güç oldu. Bu başarı sizin sarsılmaz desteğinizin bir kanıtıdır. Siz olmasaydınız bunu başaramazdım.

Bu tez, aldığım kolektif destek ve teşvikin bir sonucudur ve minnettarlığımı ifade etme fırsatından dolayı alçakgönüllüyüm. Bu inanılmaz yolculuğun bir parçası olduğunuz için hepinize teşekkür ederim.

Bere Benjamin BANTCHINA

14/05/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ ix

1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 6
2.1. Hassas Tarım 6
2.2. Konuma Özel Fertigasyon 8
2.3. Fertigasyon Sistemleri 10
3. MATERYAL ve YÖNTEM 13
3.1. Materyal 13
3.1.1. Deneme alanı 13
3.1.2. Tamburlu Değişken Oranlı Fertigasyon Makinesi (HR-VRFM) 14
3.1.3. HR-VRFM'nin tambur tarafındaki kontrol sistemi bileşenleri 15
3.1.4. HR-VRFM'nin kanat arabası tarafındaki kontrol sistemi bileşenleri 16
3.1.5. HR-VRFM için Mobil Uygulama 23
3.1.6. Çalışmada kullanılan programlar 24
3.2. Veri Yönetimi 24
3.3. Toprak verimliliği parametrelerinin belirlenmesi 26
3.3.1. Online toprak Vis-NIR spektral ölçümleri ve toprak örneklemesi 26
3.3.2. Laboratuvar Vis-NIR ölçümleri 27
3.3.3. Toprak örneklerinin fiziksel ve kimyasal analizleri 28
3.3.4. Vis-NIR spektral modellemesi ve online toprak özellikleri tahmini 29
3.3.5. Vis-NIR modelleri doğruluk değerlendirmesi 30
3.3.6. Toprak özelliklerinin dijital haritalaması 31
3.3.7. Toprak verimliği yönetim bölgelerinin belirlenmesi 31
3.4. Toprak su parametrelerinin belirlenmesi 32
3.4.1. Kablosuz toprak nem sensörleri 32
3.4.2. Gateway kurulumu 34
3.4.3. Nem içeriği verilerinin toplanması ve analizi 35
3.4.4. Sulama ihtiyaçlarının belirlenmesi 37
3.4.5. Su tutma kapasitesi yönetim bölgelerinin belirlenmesi 39
3.5. HR-VRFM aracılığıyla değişken oranlı fertigasyon 39
3.5.1. HR-VRFM kullanılarak değişken oranlı azot gübrelemesi 39
3.5.2. HR-VRFM kullanılarak değişken oranlı sulama 39
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 41
4.1. Vis-NIR Spektrum Modelleme Sonuçları 41
4.2. Uygulama Alanı için Belirlenen Toprak Özellikleri Haritaları 42
4.3. Toprak Verimliliği Yönetim Bölgeleri Haritası 43
4.4. Su Tutma Kapasitesi Yönetim Bölgeleri Haritası 44
4.5. Değişken Oranlı Fertigasyon Uygulama Haritaları 46

4.6. Değişken Oranlı Fertigasyon Uygulama Sonuçları.....48
4.6.1. Değişken oranlı fertigasyon Test 1 sonuçları.....49
4.6.2. Değişken oranlı fertigasyon Test 2 sonuçları.....53
5. SONUÇ.....60
KAYNAKLAR.....63
EKLER.....74
Ek 1.....74
ÖZGEÇMİŞ.....77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Ca	Kalsiyum
cm	Santimetre
cmol	Sentimol
dak	Dakika
g	Gram
ha	Hektar
K	Potasyum
kg	Kilogram
km	Kilometre
lt	Litre
m	Metre
m^2	Metre kare
m^3	Metreküp
Mg	Magnezyum
mg	Miligram
MHz	Mega Hertz
mm	Milimetre
mm^3	Milimetreküp
N	Azot
N_2O	Nitrik oksit
nm	Manometre
P	Fosfor
ppm	Milyonda bir
Q_1	Birinci Çeyrek
Q_3	Üçüncü Çeyrek
R^2	Determinasyon katsayısı
sa	Saat
sn	Saniye
µm	Mikrometre

Kısaltmalar	Açıklama
ADDFerti	Konuma Özgün Gübreleme için Veriye Dayalı Platform
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CEC	Katyon Değişim Kapasitesi
CSS	Cıvıltı Yayılma Spektrumu
DGPS	Diferansiyel GPS
DSM	Dijital Toprak Haritalama
DSS	Karar Destek Sistemi
EC	Elektriksel İletkenlik
GNSS	Küresel Navigasyon Uydu Sistemi
GPS	Küresel Konumlama Sistemi
GSM	Mobil İletişim için Küresel Sistem
HR-VRFM	Değişken Oranlı Tamburlu Fertigasyon Makinası

HT	Hassas Tarım
ICT	Bilgi ve İletişim Teknolojisi
IDW	Ters Mesafe Ağırlıklandırması
IoT	Nesnelerin İnterneti
ISM	Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi
İVT	İzin Verilen Tüketimi
LoRaWAN	Uzun Menzilli Geniş Alan Ağı
MAE	Ortalama Hata
MC	Nem İçeriği
NDVI	Normalize Edilmiş Bitki İndeksi
NIR	Yakın Kızılötesi
OK	Ordinary Kriging
PC	Kişisel Bilgisayar
PCA	Temel Bileşen Analizi
PID	Oransal-İntegral-Türev
PLC	Programlanabilir Lojik Denetleyici
PLSR	Kısmi En Küçük Kareler Regresyon
RMSE	Ortalama Karekök Hatası
RPD	Artık Tahmin Sapması
RPIQ	Performansın Çeyrekler Arası Mesafeye Oranı
SN	Solma Noktası
STK	Su Tutma Kapasitesi
TK	Tarla Kapasitesi
TTN	Nesneler Ağı
UA	Uzaktan Algılama
UR	Çiftçi Uygulama Oranı
USB	Evrensel Seri Veri Yolu
Vis-NIRS	Görünür ve Yakın Kızılötesi Spektrometre
VRA	Değişken Oranlı Uygulama
VRFI	Değişken Oranlı Fertigasyon
VRI	Değişken Oranlı Sulama
VRNF	Değişken Oranlı Azot Uygulaması
VRT	Değişken Oranlı Teknoloji
VSD	Değişken Hızlı Sürücü
VW	Hacim Ağırlığı
WSN	Kablosuz Sensör Ağı
YA	Yakın Algılama
YB	Yönetim Bölge

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1.	Deneme alanı yeri ve konumu…….....	14
Şekil 3.2.	Tamburlu Değişken Oranlı Fertigasyon Makine bileşenleri…..	16
Şekil 3.3.	Yazılımın Ana Sayfa fonksiyonları ….……...……....	18
Şekil 3.4.	Yazılımın Ayarlar fonksiyonları ……...…….....	19
Şekil 3.5.	Yazılımın Haritalama fonksiyonları …….……...……..	20
Şekil 3.6.	Yazılımın Uyarı fonksiyonları …….....…….....	20
Şekil 3.7.	Yazılımın GPS Ayarları işlevleri ……...…….……....	21
Şekil 3.8.	Yazılımın Analiz fonksiyonları ……..…….....	22
Şekil 3.9.	Yazılımın Bağlantı fonksiyonları ……...…….…….....	22
Şekil 3.10.	Yazılımın Servis fonksiyonları ……..…….….....	23
Şekil 3.11.	HR-VRFM kontrolü için Mobil Uygulama …….….....	24
Şekil 3.12.	Çalışmada takip edilen metodoloji…….	25
Şekil 3.13.	Gerçek zamanlı toprak sensörü elemanları ve toprak yansıma...	27
Şekil 3.14.	Laboratuvar ortamında spektral yansıma ölçümleri……..	28
Şekil 3.15.	Toprak nemi veri toplama için Dragino LoRaWAN.....	32
Şekil 3.16.	Uygulama alanında toprak nem sensörlerinin konumları.....	33
Şekil 3.17.	Toprak nem sensörleri yerleştirilmesi.....	34
Şekil 3.18.	Gateway kurulum……...	35
Şekil 3.19.	LoRaWAN toprak sensörleri için şematik iletişim platformu…	35
Şekil 3.20.	Grafana Dashboard üzerinde veri görselleştirme……...	36
Şekil 3.21.	Basınçlı Membran Aparatı ile Solma Noktası belirlenmesi…...	37
Şekil 3.22.	Sand/Kaolin Box ile Tarla Kapasitesi belirlenmesi……...	37
Şekil 4.1.	Vis-NIR tahmin edilen toprak özellikleri haritaları……..…..	43
Şekil 4.2.	Toprak verimliliği yönetim bölgelerin haritası…...……	44
Şekil 4.3.	Toprak nem özellikleri haritaları…….....	45
Şekil 4.4.	Su tutma kapasitesi yönetim bölgelerin haritası…….....	46
Şekil 4.5.	Belirli bir tarih için değişken oranlı uygulama haritaları ……...	47
Şekil 4.6.	Konuma özel uygulama haritası……..……...	48
Şekil 4.7.	Değişken Oranlı Fertigasyon Makine kanat bölümleri……...	48
Şekil 4.8.	Değişken oranlı sulama sonuçları (sol bölüm) …….…….….	49
Şekil 4.9.	Değişken oranlı sulama sonuçları (sağ bölüm).....……	50
Şekil 4.10.	Değişken oranlı azot gübreleme sonuçları (sol bölüm) ……..	51
Şekil 4.11.	Değişken oranlı azot gübreleme sonuçları (sağ bölüm).....	51
Şekil 4.12.	Makine hıza bağlı değişken oranlı sulama sonuçları.…….	54
Şekil 4.13.	Makine hıza bağlı değişken oranlı N fertigasyon sonuçları……	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1.	Tamburlu Değişken Oranlı Fertigasyon Makinesinin teknik özellikleri……...	14
Çizelge 3.2.	Toprak özellikleri analizinde kullanılan yöntemler……	28
Çizelge 3.3.	Veri toplama alanı için ölçülen toprak özelliklerinin özeti….	30
Çizelge 4.1.	Kalibrasyon ve Online doğrulamada PLSR analizleri ile elde edilen modellerin tahmin sonuçları .....……..	41

1. GİRİŞ

Tarım sektörü, birçok ülkenin sosyo-ekonomik kalkınmasında önemli bir rol oynamaktadır. Su ve toprak, sürdürülebilir bir tarımın temelini oluşturan en önemli doğal kaynaklardır. Geleneksel tarımda kimyasal gübre ve pestisitlerin aşırı kullanımı yalnızca toprak ve su kirliliğine neden olmakla kalmayıp aynı zamanda insan sağlığı üzerinde riskler oluşturmakta ve ekosistemlerin bozulmasına yol açmaktadır. Örneğin, bitki büyümesi için gerekli azot, fosfor ve potasyum içeren gübrelerin aşırı kullanımları, toprağın tuzlanmasına, asitlenmesine ve aşırı yüzey su akışına neden olarak toprağın besin maddesince fakirleşmesine neden olmaktadır. Bu durumda toprağın kalitesi ve verimliliği düşmekte ve ürün verimliliği olumsuz etkilenmektedir (Tilman vd., 2002). Fazla düzeyde azotlu gübrelerin uygulanmasından sonra bitki tarafından alınamayan azot mikro organizmaların faaliyeti ile azot oksit (N_2O) gazına dönüşmektedir. Bu gaz CO_2 gazı yanında sera etkisi oluşturan gazlardandır. Azot oksidin iklim değişikliği üzerindeki büyük etkisi göz önüne alındığında, tarımın suni gübre kullanımını en aza indirgeyen ve daha sürdürülebilir alternatiflere odaklanan uygulamaları keşfetmesi ve benimsemesi hayati önem taşımaktadır.

Hassas tarım araçları ticari olarak mevcut olmasına rağmen, çiftçilerin çoğunluğu farklı gübre formlarını tarladaki tüm alanlara homojen bir şekilde uygulama eğilimindedir (Castrignanò vd., 2019). Bu durum, arazinin farklı bölümlerine azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) gibi besin maddelerinin aşırı ve/veya yetersiz uygulanmasına yol açmaktadır. Tarlanın bazı alanları gereğinden fazla gübre alabilir. Böylece, aşırı uygulanan azot ve fosfor toprağa ve yüzey sularına sızarak, bu maddelerin sudaki konsantrasyonunu çevresel sorunları artırırken, aynı zamanda gübre kullanım maliyetini de yükseltmektedir. Diğer yandan, tarlanın bazı alanları bitkinin yetişmesi için gerekenden daha düşük oranda gübre uygulamasına maruz kalabilmektedir. Bu durum ürün verim performansının düşmesine, dolayısıyla mümkün olandan daha az verime ve kazanca yol açmaktadır. Bu sebeple, toprak verimliliği için tarla değişkenliğini yönetmek büyük önem taşımaktadır. Bu ise, doğru zamanda, doğru oranda ve doğru yerde N, P ve K kullanımını gerekli kılmaktadır. Çeşitli teknolojilerle konuma bağlı toplanan verileri kullanan modelleme, kontrol ve uygulama teknolojileriyle değişken oranlı gübreleme mümkün olmaktadır (Nawar vd., 2017).

Giderek azalan su kaynakları göz önünde bulundurulduğunda, tarımsal faaliyetlerde su kullanımının optimizasyonu kritik bir öneme sahiptir. Fertigasyon, tarımsal sistemlerde gübre ve su kullanım verimliliğini artırmak için etkili ve verimli bir yöntemdir (Nagegowda vd., 2020). Bu yöntem, su ve besin maddelerinin bitkilere dikkatli ve ölçülü bir şekilde dağıtılmasını sağlayarak, su ve gübre kullanım verimliliğinin artmasına olanak tanıyarak, su ve gübre israfının önlenmesine katkıda bulunmaktadır (Incrocci vd., 2017).

Fertigasyonun gübre tüketimini %25 ile %50 arasında azalttığı ve bitkilerin özel ihtiyaçlarına uygun miktarda su sağlayarak optimum verimlilik düzeylerini koruduğu kanıtlanmıştır (Nagegowda vd., 2020). Konuma özel fertigasyon, tarımsal uygulamalarda hem gübre hem de su kullanımının verimliliğini maksimize etme amacı taşıyan, hedef odaklı bir yaklaşımdır. Bu teknik, tarla içindeki farklı alanların özel gereksinimlerine bağlı olarak farklı oranlarda gübre ve su uygulanmasını içermektedir. Fertigasyon yoluyla uygulanan su ve gübre miktarının, bitkinin verimliliği ve kalitesi üzerine potansiyel negatif etkilerinin engellenmesi için dikkatli bir şekilde yönetilmesi önemlidir. Aşırı sulama ve gübreleme uygulamaları, ürün verimini ve kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir, aynı zamanda sulama suyu ve gübre kullanımının etkinliğinde düşüşlere neden olabilir (Hou vd., 2019). Bu nedenle gübre kullanım verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için bitki gübre ve su ihtiyaçlarını doğru bir şekilde tahmin etmek esastır (Incrocci vd., 2017).

Dünya çapında su kıtlığı, acil önem taşıyan bir konu olarak öne çıkmakta ve hassas tarım uygulamaları, bu sorunun çözümüne yönelik etkili bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Toprak nem düzeylerini ve atmosferik şartları gerçek zamanlı olarak izleyen sensör tabanlı sulama sistemlerinin kullanımı sayesinde çiftçiler su tüketimini en uygun seviyeye indirgeyebilir ve bu değerli kaynağı gerekli miktarlarda kullanarak koruyabilirler (Bantchina vd., 2024). Bu dikkatli yaklaşım, kıymetli kaynakların korunmasını sağlamakta ve çiftçilerin iklimdeki değişimlere adaptasyonunu kolaylaştırmakta, böylelikle tarımsal uygulamaların sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır. Hassas sulama (HS) teknikleri, damla sulama ve toprak nem sensörleri gibi araçları içererek, çiftçilerin suyu israf etmeden kullanmalarını ve bitkilerin gerektiği anda uygun miktarda suyu almasını sağlamaktadır (Cahill & Lund, 2013). Ayrıca, değişken oranlı sulama (VRI), tarımsal sistemlerde su kullanımını optimize etmek için

hassas tarımın önemli bir yönüdür. Hassas sulama, maksimum bitki su verimliliğini sağlamak için sulama sistemlerinin, sulama stratejilerinin ve sulama programlama yöntemlerinin stratejik seçimini içerir (Fernández, 2017). Konumsal değişkenliği dikkate alarak, çiftçiler su kullanımını optimize edebilmekte, bitki su verimliliğini arttırabilmekte ve ekonomik sürdürülebilirliğe ulaşabilmektedir.

Dünya çapında karşılaşılan bir diğer önemli sorun ise, sürekli artan nüfus için artan gıda talebidir. İklim değişikliğinin tarım üzerine etkisinin olmasına rağmen tarımsal üretimin bu artan talebi karşılayabilmek için arttırılması gerekmektedir. İklim değişikliğinin etkilerine yanıt olarak, iklim akıllı tarım (CSA), tarımsal sistemlerde gıda güvenliğini artırma ve dayanıklılık oluşturma konusunda umut verici bir yaklaşım olarak tanımlanmıştır (Mussa vd., 2015). Organik tarım, entegre zararlı yönetimi ve etkili su yönetimi teknikleri gibi sürdürülebilir tarım uygulamaları, bu sorunları ele almak için teşvik edilmelidir. Bu yaklaşımlar, sentetik girdilerin kullanımını en aza indirgemeyi, çevresel etkileri azaltmayı ve tarımsal sistemlerin uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamayı hedeflemektedir (Pretty vd., 2011; FAO, 2018).

Son yıllarda, hassas tarım (HT), tarım sektörü için çok yönlü faydalar sağlayan güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Bu yenilikçi yaklaşım, veriye dayalı stratejiler ve titiz kaynak yönetimi ile geleneksel tarım uygulamalarını devrimleştirme potansiyeline sahiptir. Tarımda teknolojinin uygulanması, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmada kritik bir rol oynamaktadır (Singh vd., 2022). Hassas tarım, coğrafi bilgi sistemleri (CBS), küresel konumlama sistemleri (GPS), yakın algılama (YA), uzaktan algılama (UA), insansız hava araçları (İHA) ve ileri modelleme teknikleri gibi ileri teknolojileri bütünleştirerek girdilerin hassas uygulamasını hedeflemektedir. Tarımsal faaliyetlere yönelik hassas tarım teknolojileri, sera gazı emisyonlarını azaltabilir (Balafoutis vd., 2017). Örneğin, hassas tarımda yakın toprak algılama teknolojisi, bitkinin gereksinimlerini belirlemek ve değişken oranlı uygulamaları kolaylaştırmak için kullanılmaktadır (Lee vd., 2010; Mouazen vd., 2019). Bunun yanında toprak sensörleri, önemli toprak özelliklerinin daha ayrıntılı bir değerlendirmesini sağlayarak, bir alan içindeki mekânsal ve zamansal değişimlerin ölçülmesini sağlamaktadır (Bantchina vd., 2024). Toprak özelliklerinin doğru karakterizasyonu, değişken oranlı teknolojisinin (VRT) başarılı uygulanmasında kritik bir belirleyici olmaktadır. Bu bağlamda, görünür

ve yakın kızılötesi spektrometresi (Vis-NIRS) kullanımının, toprak özelliklerinin modellenmesinde ve haritalanmasında etkili olduğu kanıtlanmıştır (Stenberg vd., 2010; Kuang vd., 2012; Guerrero vd., 2021a). Vis-NIRS, kemometriklerde umut verici bir teknik olarak ortaya çıkmıştır ve birçok çalışma Vis-NIRS'nin dijital toprak haritası hazırlamada kullanışlılığını kanıtlamıştır (Mouazen vd., 2007; Viscarra-Rossel & Chen, 2011; Tekin vd., 2013; Kodaira & Shibusawa, 2013; Guerrero vd., 2021b).

Değişken oranlı uygulama sistemlerinin kullanımı aracılığıyla çiftçiler, gübre, pestisit ve su gibi girdileri hassas bir biçimde yönlendirebilmekte, tüketimlerini minimize edebilmekte ve çevresel kirlilik riskini düşürebilmektedirler (McConnell vd., 2017). Bu hedefe yönelik yaklaşım sadece çevreyi korumaya yardımcı olmakla kalmayıp aynı zamanda kaynakların etkin kullanımını da sağlamaktadır. Hassas tarımda, fertigasyon teknolojisini tamamlamak için konuma özel önerilen gübreleme ve sulama yöntemleri esastır. Özel fertigasyon stratejisinin seçimi, bitki ihtiyaçları, programlama sınırlamaları ve sistem tasarım parametreleri gibi faktörlere bağlıdır. Kablosuz olarak bağlanmış sensörler ve valfler içeren modern sistemler, alanın küçük bölümlerinde sulama ve gübreleme oranlarında çeşitlilik sağlayan çoklu bölgelerin oluşturulmasına olanak tanımaktadır (Coates vd., 2011).

Konuma özel değişken oranlı fertigasyon, tarla içindeki toprak ve bitki özelliklerinin mekânsal değişkenliğine dayanarak, doğru zamanda, doğru yerde ve doğru teknoloji kullanılarak doğru oranda gübre ve su uygulanmasını ifade etmektedir. Bu tez çalışmasının amacı, Otomatik Tamburlu Değişken Oranlı Fertigasyon Makinesi (HR-VRFM) kullanılarak konuma özel fertigasyon için veri setinin ileri teknolojilerle hazırlanması, uygulama haritalarının hazırlanması, azot gübresi ve sulama suyunun araziye uygulamasındaki performansın değerlendirilmesidir.

Bu amaca ulaşmak için belirlenen özel hedefler şunlardır:

- Toprak ve bitki özellikleri gibi sistemi etkileyen faktörler hakkında sensör ve kontrol teknolojileri kullanılarak veri toplamak,
- İleri modelleme, veri füzyonu, jeoistatistik ve karar destek araçlarını kullanarak değişken oranlı azot gübreleme (VRNF) ve değişken oranlı sulama (VRI) için dinamik yönetim bölgesi ve uygulama haritalarını geliştirmek,

- Değişken oranlı fertigasyonu Otomatik Tamburlu Değişken Oranlı Fertigasyon Makinesi aracılığıyla uygulamak,
- Değişken oranlı fertigasyon uygulama performansını değerlendirmek.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tarımsal inovasyon ve sürdürülebilir kaynak yönetiminde karşılaşılan devamlı zorluklardan birisi, olumsuz çevresel etkileri minimuma indirgerken aynı zamanda bitki verimliliğini arttırma ihtiyacıdır. Artan Dünya nüfusunu desteklemek için gerekli olan tarımsal üretimi artırma zorunluluğu, gübre ve su kaynaklarının etkili bir şekilde yönetilmesinin kritik rolünün altını çizmektedir. Bu bölümde, hassas tarım, değişken oranlı uygulamalar, gübreleme, kaynak optimizasyonu ve tarımsal verimlilik arasındaki karmaşık ilişkileri anlamayı amaçlayan araştırma ve bilimsel çabalar derinlemesine incelenerek bu alandaki mevcut literatürün kapsamlı bir incelemesi sunulmuştur.

2.1. Hassas Tarım

Uluslararası Hassas Tarım Topluluğu (ISPA), hassas tarımı (HT), zamansal, mekânsal ve bireysel verileri toplayan, işleyen, analiz eden ve tahmin edilen değişkenliğe göre yönetim kararlarını desteklemek için diğer bilgilerle birleştiren bir yönetim stratejisi olarak tanımlamaktadır. Bu sayede tarımsal üretimde kaynak kullanımı verimliliğini, üretkenliğini, kalitesini, karlılığını ve sürdürülebilirliğini artırmayı amaçlamaktadır (ISPA, 2021). Bu tanım, hassas tarımın kapsamlı doğasını vurgulayarak, kaynak verimliliği, üretkenlik, kalite, karlılık ve sürdürülebilirlik gibi tarımsal yönetimin çeşitli yönlerini iyileştirmek için veri odaklı karar alma sürecine odaklanmaktadır.

Akıllı ve hassas tarımın geliştirilmesi, sürdürülebilir tarımsal gelişmenin zorluklarıyla başa çıkmak için önemli araçlar sağlamaktadır (Wang vd., 2021). Sensörlerde, büyük veri analitiğinde ve bulut bilişimdeki hızlı teknolojik gelişmeler, hassas tarıma olan ilgi ve kullanımı artırmıştır (Ramil-Brick vd., 2022). Hassas tarım, ürün girdilerini daha iyi kullanmayı, verim ve kaliteyi artırmayı, üretim risklerini azaltmayı ve ürün tedarik ve son kullanım zincirleri boyunca bilgi akışını sağlamayı amaçlayan bir dizi teknolojiyi kapsamaktadır (Erickson vd., 2018). Tarımda bilgi ve iletişim teknolojilerinin (ICT) kullanımı, modern tarımda üretkenliği ve verimliliği artırma amacı taşıyan hassas tarıma hizmet etmektedir (Hazrati vd., 2022). Ayrıca hassas tarımın, çevreye ekolojik faydalar sağlarken üreticilerin karlılığını da artırdığı gösterilmiştir (McConnell vd., 2017). Hassas tarımın benimsenmesi, üretkenliği artırmak, üretim maliyetlerini azaltmak ve kolaylık sağlamak çiftçiler için hayati önem taşımaktadır (Bolfe vd., 2020).

Hassas çiftçilik veya akıllı çiftçilik olarak da bilinen hassas tarım, tarımsal üretimin çeşitli yönlerini optimize etmek için ileri teknolojiden ve veriye dayalı karar alma sürecinden yararlanan bir paradigma değişikliğini temsil etmektedir. Tarlaları homojen olarak ele alan geleneksel tarım yöntemlerinden farklı olarak hassas tarım, bir tarla içindeki farklı alanların su, gübre ve pestisit gibi girdilere yönelik farklı ihtiyaçlara sahip olabileceğini kabul etmektedir.

Hassas tarımın temel ilkeleri şu görevleri içerir:

- **Veri Toplama:** Hassas tarım, GPS, yakın algılama, uzaktan algılama, dronlar ve yer tabanlı sensörler gibi teknolojiler kullanılarak veri toplamaya büyük önem vermektedir. Bu araçlar toprak özellikleri, bitki sağlığı, hava durumu vb. hakkında bilgi toplamaktadır.
- **Veri Analizi:** Veriler toplandıktan sonra, tarımsal sonuçları etkileyen mekânsal ve zamansal değişiklikleri belirlemek için analiz edilmektedir.
- **Değişken Oranlı Teknoloji (VRT):** VRT, gübreler ve sulama gibi girdilerin tarlanın değişik bölgelerine değişken oranlarda hassas bir şekilde uygulanmasını sağlayan hassas tarımın temel bileşenlerindendir. VRT kaynakların farklı alanların özel ihtiyaçlarına göre uygulanmasını sağlamaktadır.
- **Otomasyon ve Kontrol:** Otomasyon ve kontrol sistemleri, veri ve önceden belirlenmiş parametrelere dayanarak ekipman ve süreçleri yönetmek için kullanılmaktadır.
- **Karar Destek Sistemleri:** Çiftçiler ve tarımla uğraşanlar, ekim, hasat, sulama ve gübre yönetimi ile ilgili bilinçli kararlar almak için karar destek sistemlerini kullanmaktadır. Bu sistemler, çeşitli kaynaklardan gelen verileri entegre ederek çiftlik operasyonlarına rehberlik etmektedir.

İklim akıllı tarım, iklim değişikliğinin tarımsal sistemlere yönelik zorluklarına cevap vermek için kritik bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Gıda güvenliğini artırmayı, iklim değişikliğini hafifletmeyi ve sürdürülebilir tarımsal verimliliği sağlamayı hedeflemektedir (Rani ve Reddy, 2023). Akıllı çiftçilik ve dijital platformlar gibi dijital teknolojilerin tarımdaki rolü, tarımsal uygulamaları optimize etme ve karar alma süreçlerini geliştirme aracı olarak vurgulanmaktadır (Hasan vd., 2023; Vardanyan vd.,

2022). Bu teknolojiler, bitki büyümesini izleme, bilinçli sulama kararları alma ve uygun gübreleme uygulaması seçme potansiyeline sahip olup, iklim akıllı tarımın ilerlemesine katkıda bulunmaktadır (Kolmykova vd., 2021). Kısacası, iklim akıllı tarım, benimsenmenin önündeki engellerin ele alınmasını, yerel bilginin entegre edilmesini, koşulların eleştirel bir şekilde değerlendirilmesini ve iklim değişikliği karşısında başarılı bir şekilde uygulanmasını sağlamak için dijital teknolojilerden yararlanılmasını gerektiren çok yönlü bir yaklaşımı temsil etmektedir.

2.2. Konuma Özel Fertigasyon

Gübrelerin geleneksel uygulama yöntemleri genellikle, gübreyi toprak yüzeyine serpme veya ekimden önce toprağa karıştırma şeklinde olmaktadır. Bu yöntemler gübrenin homojen bir şekilde toprağa dağıtılmasını hedeflemiş olsa da yöntemin doğası gereği bu gerçekleşmeyebilmektedir (Ebrahimian vd., 2011).

Fertigasyon ise su ve besin maddelerinin bir sulama sistemiyle eş zamanlı olarak uygulandığı modern bir tekniktir, bu da bitkiler tarafından hassas gübre alımını sağlamaktadır (Zhang vd., 2015). Fertigasyon su ve gübrenin araziye uygulanmasında etkin bir yöntemdir (Sonali vd., 2023). Bu teknik, entansif tarım ve bahçecilikte yaygın olarak uygulanmaktadır. Uygulamanın faydaları, sürdürülebilir su bütçelemesinde (Afzaal vd., 2020), evsel atık su kullanımında (Silva vd., 2016) ve mısır tarlalarında N_2O emisyonlarının azaltılmasında (Tian vd., 2017) gözlemlenmiştir. Bu yaklaşım, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu yarı kurak bölgelerde sulama ve gübre uygulamalarını optimize etmek için hayati önem taşır (Nikolaou vd., 2021).

Su kıtlığı, dünyanın birçok bölgesinde ciddi bir sorundur. Tarım, su kaynaklarının en büyük tüketicilerinden biridir (Wang vd., 2015). Özellikle su kıtlığı olan bölgelerde tarımda etkin su kullanımı son derece önemlidir. Değişken su uygulamasına dayanan fertigasyon, verimliliği artırma ve sulamalı tarımın çevresel etkilerini azaltma potansiyeli olan bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Monaghan vd., 2013). Çalışmalar, hassas fertigasyonun tarımda su kullanım verimliliğini önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermektedir. Örneğin, Çin'in Zhangye şehrinde statik hesaplanabilir bir genel denge modeli kullanılarak yapılan bir araştırmada, hassas fertigasyonun su kullanım verimliliğinde %10'luk bir artışa yol açabileceği bulunmuştur (Liu vd., 2017).

Fertigasyon, özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı yönetim sistemleriyle, sürdürülebilir hassas tarımın kritik bir yönü olarak vurgulanmaktadır. Konuma özel değişken oranlı fertigasyon, bitkilere su ve besin maddelerini hassas bir şekilde uygulamak için değişken oranlı teknolojileri entegre eden hassas tarımda ileri bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, gübrelerin uygulama oranlarının tarla içi toprak ve ürün özelliklerindeki farklılıklara göre ayarlanmasını içermektedir (Hedley, 2014). Otomatik tarım operasyonları için makine teknolojilerinin kullanılması, gerçek zamanlı değişken oranlı sulama ve gübreleme sistemlerinde teknolojinin modern tarım uygulamalarına entegrasyonunu vurgulamaktadır (McCarthy vd., 2010). Değişken oranlı mısır azot gübrelemesi için konuma özel üretim fonksiyonları üzerine yapılan araştırmalar, optimal bitki üretimi için özelleştirilmiş gübre yönetiminin önemini göstermiştir (Ruffo vd., 2006). Yemlik yonca meralarında toprak özelliklerinin ve verimin mekânsal değişkenliği üzerine yapılan çalışmalar, kireç ve gübre gibi değişken oranlı uygulamaların etkilerini göstermiştir (Bernardi vd., 2016).

Gübre kullanım verimliliği (FUE), gübrelerin bitki büyümesini teşvik etme ve besin alımını en üst düzeye çıkarma, aynı zamanda kayıpları ve olumsuz çevresel etkileri en aza indirmedeki etkinliğini ifade eder. Konuma özel değişken oranlı fertigasyonun uygulanması, tarımsal sistemlerde FUE üzerinde önemli bir etkiye sahip olma potansiyeline sahiptir. Yapılan çalışmalar, entegre toprak verimliliği yönetimi kapsamında mısır bitkisinde azot gübre kullanım optimizasyonunun azot gübrelerinin kullanım verimliliğini iyileştirebileceğini göstermiştir (Vanlauwe vd., 2010). Diğer çalışmalar, iyi yönetilen araştırma çalışmalarındaki üretim alanlarında çiftçi uygulamalarından daha fazla azot gübre verimliliği elde edilmiştir (Cassman vd., 2002). pH ve temel toprak besinlerindeki mekânsal değişkenlik, konuma özel yönetim yoluyla yemlik bitki üretiminde gübre ve kireç kullanım verimliliğini artırma fırsatı sunmaktadır (Trotter vd., 2014). Orta derecede kısıtlı sulama koşulları altında azot gübre girdilerini azaltmanın, bitki veriminden ödün vermeden su ve azot gübre kullanım verimliliğini artırdığı bulunmuştur (Liang vd., 2014). Konuma özel değişken oranlı fertigasyon, tarımsal üretimde gübre yönetimini optimize etme ve gübre-su kullanım verimliliğini iyileştirme konusunda umut vaat eden bir yaklaşım sunmaktadır. Gübre uygulama

oranlarını tarlanın farklı bölgelerinin özel ihtiyaçlarına göre uyarlamak, gübre kayıplarını ve çevresel etkileri en aza indirirken ürün verimliliğini en üst düzeye çıkarabilmektedir.

2.3. Fertigasyon Sistemleri

Değişken oranlı fertigasyon sistemlerinin geliştirilmesi son on yılda önemli araştırmaların konusu olmuştur. Birçok çalışma bu alandaki ilerlemelere katkıda bulunmuştur. Bell vd. (2022), aktif uzaktan algılama teknolojisini kullanarak pamuk için otomatik bir lineer hareketli fertigasyon sistemi geliştirme üzerine odaklanmıştır. Bu araştırma, NDVI bitki indisinin ve bir akış ölçerin Arduino mikrokontrolörleri ile doğrusal hareket eden bir gübreleme sistemi üzerine entegrasyonunu içermektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, özellikle pamuk yetiştiriciliği için fertigasyon uygulamalarını optimize etmek amacıyla tarımsal faaliyetleri ileri teknoloji ile birleştirmektedir. Polat vd. (2022), özellikle tamburlu sulama makineleri (HRIM) için tasarlanmış yeni bir fertigasyon sistemi olan TURPO CLK FS'nin geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu çalışma, HRIM'e entegre edilmiş bu yenilikçi fertigasyon sisteminin çalışma performansını belirlemeyi amaçlamaktadır. Evett ve vd. (2020), değişken oranlı fertigasyon sisteminin bir merkezi pivot sistemi ile entegrasyonunun teknik olarak mümkün olduğunu ve mevcut sulama teknolojisi ilerlemeleri ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Kamienski vd. (2019), tarımda hassas sulama için bir Akıllı Su Yönetimi Platformu geliştirmiş ve Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı çözümlerin su yönetimi uygulamalarını geliştirmedeki rolünü belirtmişlerdir. IoT gibi teknolojiler sulama sistemlerini izleme ve kontrol etmede önemli bir rol oynamaktadır. O'Shaughnessy vd. (2019), merkezi pivot sistemleri gibi mekanik hareketli sulama sistemlerinde VRI yağmurlama başlıklarının ticari olarak mevcut olduğunu belirtmişlerdir. Williams vd. (2018), bir merkezi sulama sistemi kullanarak değişken oranlı azot uygulama sisteminin geliştirilmesi ve test edilmesini tartışmışlardır. Bu çalışma, bu tür sistemler için ihtiyacı ve mevcut eksikliği vurgulayarak, geliştirilecek bir değişken oranlı fertigasyon sistemi için bir pazar boşluğunu işaret etmişlerdir. Ramachandran vd. (2018), IoT, bulut bilişim ve optimizasyon araçlarını birleştirerek tarımda su kullanımını azaltmak için otomatik bir sulama sistemini sunmuşlardır. WEMOS D1 kontrolörü ile kontrol edilen bir solenoid valf kullanarak sistemi tasarlamışlar ve optimal sulama oranlarını hesaplamak için bir optimizasyon modeli kullanılmışlardır. Aleotti vd. (2018), lineer sulama sistemleri için özel olarak tasarlanmış

bir akıllı hassas tarım platformu sunmuşlardır. Bu platform, tarımsal sulama uygulamalarının verimliliğini ve etkinliğini artırmak için ileri teknolojileri entegre etmektedir.

Ayrıca diğer araştırmacılar, hassas sulamayı desteklemek için sensör teknolojileri ve değişken oranlı uygulamalar (VRA) dahil olmak üzere IoT geliştirmeye ve uyarlamaya odaklanmışlardır (King vd., 2002; Perry vd., 2002; Chávez vd., 2009). Bu çalışmalar, hassas sulamanın parselin farklı konumlarındaki ürün gereksinimlerine göre optimal su oranları uygulayarak ekonomik verimliliği artırmakla kalmadığını, aynı zamanda maliyetleri de düşürdüğünü göstermiştir (Li vd., 2019; O'Shaughnessy vd., 2015; Ortuani vd., 2019; Plaščak vd., 2021). Hassas gübre yönetimi stratejilerini ileri sulama sistemleriyle entegre ederek, bu platformlar sürdürülebilir ve verimli tarımsal uygulamalara katkıda bulunabilmektedir. Bu çalışmaların kolektif içgörüleri, tarımda fertigasyon uygulamalarını geliştirmek için IoT, hassas tarım ve akıllı platformlar gibi teknolojilerin kullanımının artan önemini vurgulamaktadır.

Arazinin farklı konumlarındaki uygulamalar için dijital toprak haritalaması (DSM), tarla ve laboratuvar verilerini mekânsal çıkarım sistemleriyle bütünleştirerek toprak tiplerinin ve özelliklerinin dijital temsillerini oluşturmak için değerli bir teknik olarak ortaya çıkmıştır (Grunwald, 2009). Bu yaklaşım, çevresel kovaryantları, uzaktan algılamayı ve CBS'yi dahil etmek için geleneksel toprak sınıflandırması ve haritalama teknolojilerinden yararlanmaktadır. Böylece toprak özelliklerine ilişkin daha kapsamlı ve ayrıntılı bir veri seti sunulabilmektedir (Ma vd., 2019). DSM'ye olan artan ilgi, geleneksel toprak haritalama yöntemlerinin kullanımında bir düşüşe yol açmış ve dijital yaklaşımların toprak araştırmalarındaki önemini arttırmıştır (Lozbenev vd., 2022). DSM teknikleri, hidrolojik modelleme, jeoteknik mühendislik (Smit & Tol, 2022; Arshid & Kamal, 2020) ve değişken oranlı uygulamalar gibi çeşitli uygulamalar için değerli bilgiler sağlayan ayrıntılı toprak haritaları oluşturmada etkili olmaktadır.

Vis-NIRS kullanılarak toprağa yakın algılamanın HT ve değişken oranlı uygulamalar için etkili olduğu kanıtlanmıştır (Viscarra-Rossel & McBratney, 1998; Mouazen vd., 2005). Son birkaç on yılda, Vis-NIRS teknolojisi kullanılarak toprak özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar giderek artmaktadır (Mouazen vd., 2007; Viscarra-

Rossel & Chen, 2011; Kuang vd., 2012; Tekin vd., 2013; Kodaira & Shibusawa, 2013; Guerrero vd., 2021b). Birçok araştırmacı, konuma özel gübreleme önerileri sağlamak için toprak haritaları geliştirmek amacıyla elektrokimyasal ve NIR tekniklerinin daha güvenilir sonuçlar sağladığı konusunda hemfikirdir (Mouazen vd., 2005).

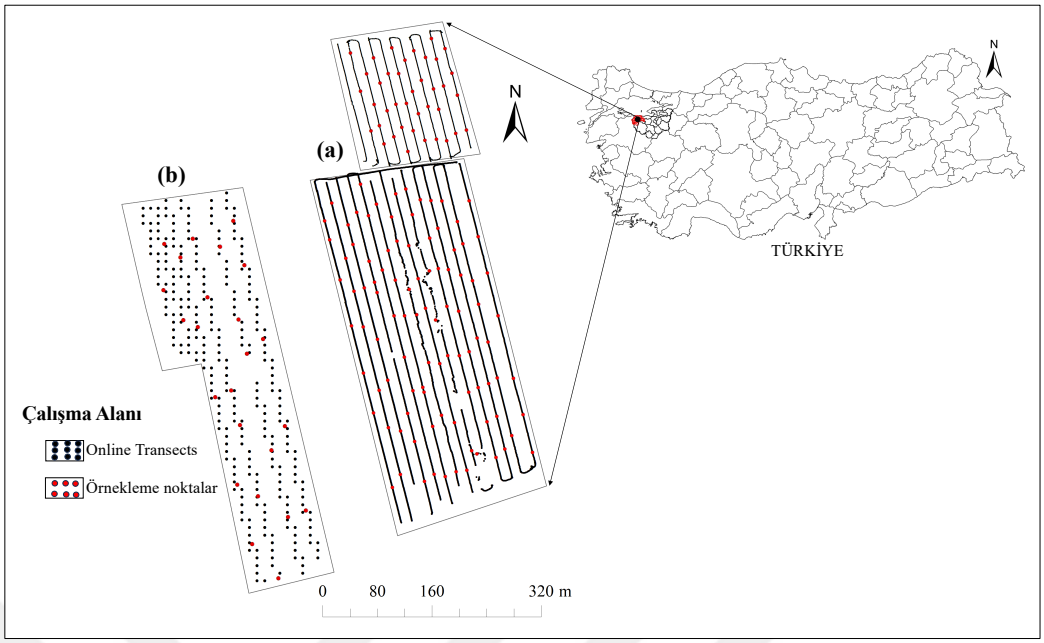
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Deneme alanı

Bu araştırma, Bursa iline bağlı ve il merkezinin 55 km güneybatısında bulunan Karacabey ilçesi, Bakırköy Köyü'ndeki (40°08’22.76’’K, 28°23’02.09’’D) ticari bir çiftlikte gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı iki bölümden oluşmaktadır: Şekil 3.1'de gösterildiği gibi modelleme alanı (parselleri) 10,7 ha ve uygulama alanı ise 8 ha’lık bir alandır. Modelleme alanındaki ölçümler spektral yansımalar için model oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Oluşturulan model benzer özellikli topraklarda toprak analizi yapmadan toprak özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilmektedir. Çalışma 2021, 2022 ve 2023 yıllarında gerçekleştirilmiştir.

Yapılan toprak analizlerine göre bu alandaki toprak bünyesinin %33,95 kil ve %33,8 kumdan oluştuğu belirlenmiştir. Çalışma alanındaki toprak tipi alüvyondur (Bantchina vd., 2017). Bu tarlalar genellikle buğday ve mısır bitkilerinin rotasyonu için kullanılmaktadır. Çalışma alanının iklimi, Akdeniz ikliminin Marmara geçiş tipi özelliklerini taşımaktadır. Yağışlar öncelikle ilkbahar ve kış aylarında görülmektedir. Şubat ayı en soğuk ay olma eğilimindeyken, Temmuz ayı tipik olarak en sıcak aydır. Bölgede yıllık ortalama sıcaklık 14,6ºC ve yıllık ortalama yağış miktarı 700 mm'dir (Anonim, 2023).



Şekil 3.1. Deneme alanı yeri ve konumu. a) Modelleme parselleri b) Uygulama alanı

3.1.2. Tamburlu Değişken Oranlı Fertigasyon Makinesi (HR-VRFM)

Bu çalışmada Horizon 2020 projesi kapsamında geliştirilen Otomatik Tamburlu Değişken Oranlı Fertigasyon Makinesi (HR-VRFM) kullanılmıştır. Makinenin temel teknik özellikleri Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Tamburlu Değişken Oranlı Fertigasyon Makinesinin teknik özellikleri

Teknik Özellikler	**Değerler/Uygulama**
Çalışma genişliği	46 m
Kanat bölüm genişliği	10,7 m
Nozul çapı ve sayısı	10 mm/8 adet
Sulama hortumu çapı / uzunluğu	100 mm/530 m
Değişken oranlı uygulama çözünürlüğü	10,7 × 1 m
Hız aralığı	0 – 80 m/saat
Sulama oranları aralığı	15 – 50 mm
Gübre oranları aralığı	80 – 600 lt/ha
Fertigasyon haritasının yüklenmesi	Bulut portalı/USB/manuel
Jeneratör gücü (Tambur tarafı)	4,0 kW
Jeneratör gücü (Kanat/Bom tarafı)	2,7 kW

3.1.3. HR-VRFM'nin tambur tarafındaki kontrol sistemi bileşenleri

Tambur tarafındaki kontrol sisteminin bileşenleri Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Endüstriyel bir taşınabilir bilgisayar (PC) (OVIS/OVPPC–156C–i572), veri akışını sağlayarak ve görüntüleyerek tüm alt sistemleri kontrol etmek için insan-makine arayüzüne monte edilmiştir. Sensör modüllerini kullanarak veri iletimi sağlayarak tüm kontrolleri etkinleştirmek için bir programlanabilir mantık denetleyicisi (PLC) (Siemens 1200/SM 1231) kullanılmıştır.

Kanat arabası ünitesinin zemin hızı, hortumun tambura sarılmasından bağımsız tasarlanmıştır. Bu nedenle, tambur üzerindeki dişli kutusuna değişken hızlı bir elektrik motoru (VOLT/VM 112–4) entegre edilmiştir. Elektrik motorunun hızını ve dolayısıyla bom arabasının zemin hızını kontrol etmek için ana panelin içine bir frekans invertörü (Siemens/Sinamics V20) yerleştirilmiştir. Değişken hız sürücüsü (VSD), zemin hızının 0,1 ila 1,8 m/s arasında değiştirilebilmesini sağlayarak mevcut makinenin zemin hızı aralığını genişletmiştir. VSD ile zemin hızı ayarlamaları için 0,1 m/s hız artım/azalım aralığı elde edilmiştir.

PLC (Şekil 3.2–17), modüllerini kullanarak sensörlerden veri almanın yanı sıra Endüstriyel PC'den (Şekil 3.2–5) komutlar alarak bileşenleri kontrol eder ve verileri Endüstriyel PC'ye gönderir, böylece veri alışverişini sağlayarak arka planda gerekli kontrolleri gerçekleştirir. GSM hattı yardımı ile tambur tarafındaki pano ile haberleşerek dozaj pompalarını çalıştırmak ve durdurmak için Global System for Mobile Communications (GSM) Modülü (TELTONIKA Networks/RUT240) kullanılmıştır. Bom tarafında kablosuz veri alışverişini sağlamak için bir WiFi modülü (Şekil 3.2–14) (Ruijie|Reyee/RG–EST350 V2) kullanılmıştır. Sulama turunun bittiğini sisteme bildirmek için bir limit anahtarı (Şekil 3.2–12) (EMAS / E251518) kullanılmıştır ve sulama şeridinin sonunda sistemin otomatik olarak durmasını sağlamaktadır.

Bir basınç transmitteri (4–20 mA, Trafag/ECT16.0 A Tip 8472), ana kontrolör tarafından kullanılacak gerçek zamanlı verileri sağlamak için tambura giren ana sulama borusuna monte edilmiştir. Üreticinin uygulamasına göre sulama sırasında tambur bileşenlerindeki su basıncı 7 bar'ı geçmemelidir. Bu çalışmada, yazılımın geliştirilmesi sırasında basınç 6 bar olarak ayarlanmıştır, böylece kontrol sistemi zemin hızı ve vanaların veya dozaj

pompalarının açılma hızı gibi diğer parametreleri ayarlayarak istenen gübreleme oranlarını uygulayabilmektedir. Enkoder (Elektron/ENK-1-1-P) bomun tarladaki anlık konumunun belirlenmesini sağlarken, bom merkez hattının konumunu belirlemek için bir Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS, APM/M8N 8M) alıcısı kullanılmıştır. Bomun konumu sahada mesafe kodlayıcı kullanılarak hassas bir şekilde belirlenmektedir ve sistem çalışmaya başladığında konum verileri sistemde tutulmaktadır. HR-VRFM'nin tamburun üzerindeki tüm bileşenlerin enerji ihtiyacını karşılamak için 7,5 kW'lık bir jeneratör (380 VAC 50 Hz ve 220 VAC 50 Hz, TMG Power / GG9500E–3) kullanılmıştır.



(1) Tam makine; (2), (20), Kanat ve arabası tarafı; (3) Tambur tarafı; (4) Çalışma durumundaki tam makine; (5) Endüstriyel PC; (6) Kontrol paneli; (7) Jeneratör; (8), (9) Elektrik motoru; (10) Basınç transdüseri; (11) Basınç göstergesi; (12) Limit anahtarı; (13) Kodlayıcı; (14) WiFi modülü; (15) Proses kontrol paneli; (16) Proses kontrol cihazları; (17) PLC; (18) WiFi modülü; (19) Gübre tankı; (21) Jeneratör; (22), (23) Değişken oranlı dozaj pompaları; (24) Oransal su vanaları ve debi sensörleri; (25) Debi sensörleri

Şekil 3.2. Tamburlu Değişken Oranlı Fertigasyon Makine bileşenleri

3.1.4. HR-VRFM'nin kanat arabası tarafındaki kontrol sistemi bileşenleri

Değişken oranlı su vanaları (VFA Elektronik, VFModulat, EA200050) kanat arabadaki her bölümün çıkışına monte edilmiş, ardından türbin tipi su akış hızı sensörleri (VF-QTLD-032T) yerleştirilmiştir (Şekil 3.2–25). İki gübre dozaj pompası [60 W 380 V Maks. 60 (60) lt/saat; (Şekil 3.2–22, 23)] sıvı gübrenin doğrudan ilgili su iletim hattına enjekte edilmesini kolaylaştırmak için arabanın her iki tarafına monte edilmiştir. Gübre

oranlarının otomatik kontrolü için, her bir su basınç hattına su akış vanalarının önüne bir gübre akış sensörü (Gübre akış ölçerler 1/4" 4–26VDC Pulse 0,5–100 lt/h 32 Bar) monte edilmiştir (Şekil 3.2–24).

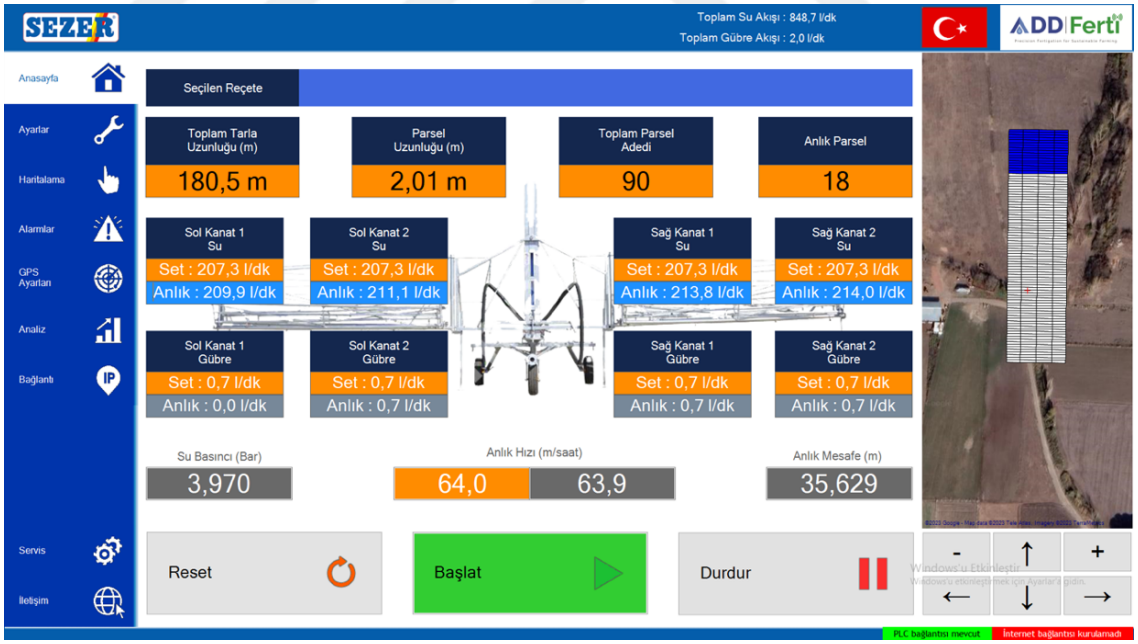
Gübre pompası frekans invertörleri (0,37 kW 220VAC Siemens/Sinamics V20) sıvı gübre dozaj pompalarını kontrol ederek frekans kontrolü yoluyla pompa motorlarının hızını ayarlayarak değişken oranlı gübreleme sağlamaktadır. Gübre kontrol cihazları, gübre debimetrelerini kullanarak anlık sıvı gübre debilerini tespit etmekte ve ana panele anlık ve toplam sıvı gübre miktarı bilgilerini göndermektedir.

Pompa kontrol paneli ve GSM modülü (9–30V DC, TELTONIKA Networks/TRB140), GSM hattını kullanarak ve tambur tarafındaki panel ile iletişim kurarak pompaları durdurmak ve başlatmak için kullanılmaktadır. Bir WiFi Modülü (Ruijie|Reyee/RG–EST350 V2) tambur tarafına kablosuz veri alışverişi sağlamaktadır. Kanat arabasındaki kontrol paneli, ana panelden gelen verileri kullanarak tüm operasyonu kontrol etmektedir. Bu panel gübrelerin dozajlamasını sağlayan pompaların kontrolü için frekans invertörleri ve akış ölçerlerden gelen verileri değerlendiren ve ileten proses kontrol cihazları içermektedir. Verileri işlemek ve mobil araba ünitesindeki aktüatörleri kontrol etmek için proses kontrolörleri ve PLC modülleri (Siemens S7–1200/SM 1234) kullanılmıştır. Bom taşıyıcıdaki elektrikli bileşenlerin enerji ihtiyacı, arabanın arkasına monte edilmiş 15 lt yakıt kapasiteli bir jeneratör (3,5 KVA Omega/OMG–3500) kullanılarak karşılanmıştır, böylece jeneratör hareketli arabanın önündeki püskürtme nozüllerinin görüş alanının dışında kalmıştır. Jeneratör, bir baş üstü koruması kullanılarak püskürtmeye karşı korunmuştur.

HR-VRFM Kontrol Yazılımı Ana Sayfası

Sistem ana sayfada başlatılmakta ve durdurulmaktadır (Şekil 3.3). Yüklenen haritanın konumları ve sulanacak alanlar uygulama haritalarında gösterilmektedir. Sulanan hücrelerin konumları mavi renkte gösterilmekte ve makine bir sonraki hücreye geçtikçe değişmektedir. Haritada mevcut olan bilgiler, toplam hücre sayısı ve uygulanan hücre sayısı bu ekranda anlık olarak görülebilmektedir. Bomun her bir bölümü için ayarlanan değerler ve uygulanan oranlara ilişkin veriler monitörde görüntülenmektedir. İstenen girdileri (bir hücrede su ve gübre) uygulamak için gerekli zemin hızı önceden

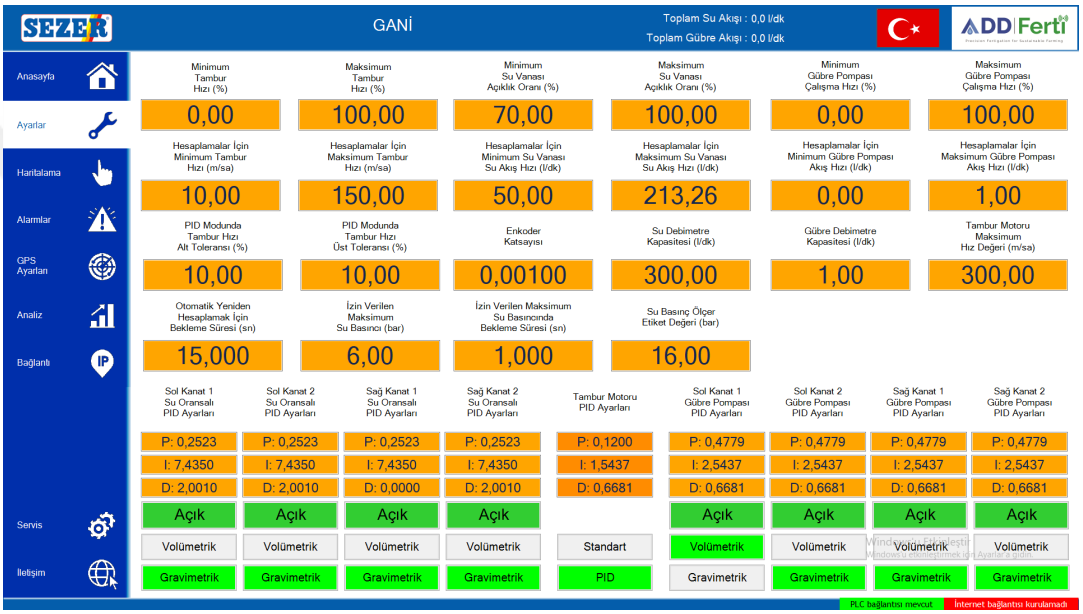
hesaplanmakta ve makinenin tarlanın sonundan ne kadar uzakta olduğu bilgisi ekranda görüntülenmektedir. Tambur girişindeki su basıncı sürekli olarak ölçülmekte ve raporlanmaktadır. Sistem, bölümler arasındaki aşırı debi farklılıkları nedeniyle tambur girişinde yüksek bir basınç (>6 bar) tespit ederse ve bu da tüm bölümlerde istenen oranların sağlanamamasına neden olursa, ekranda bir uyarı görüntülenmektedir. Bunun üzerine su vanaları tamamen açılarak sulama sisteminin hidrolik ve mekanik aksamları korunmaktadır. Sulama uygulaması, bom arabası farklı sulama ihtiyaçları olan bir sonraki hücreye ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Uygulama oranı önceki hücrelerden daha düşükse, su veya gübre oranlarını doğru bir şekilde uygulamak için tambur hızı arttırılmaktadır. Aynı şekilde, sistem ana kaynaktan gelen debi değişikliklerini algılamakta ve tüm parametreleri yeniden hesaplamakta, girişteki basınç artışının hidrolik-mekanik sistem için bir sorun oluşturmaması için vanayı her zaman en açık durumda tutmaya çalışarak tambur hızını değiştirmeyi tercih etmektedir. Kullanıcı, lt/ha cinsinden uygulama oranlarını veya lt/dak cinsinden debi değerlerini ekranda izleyebilmektedir.



Şekil 3.3. Yazılımın Ana Sayfa fonksiyonları

HR-VRFM Kontrol Yazılımı Ayarlar sayfası

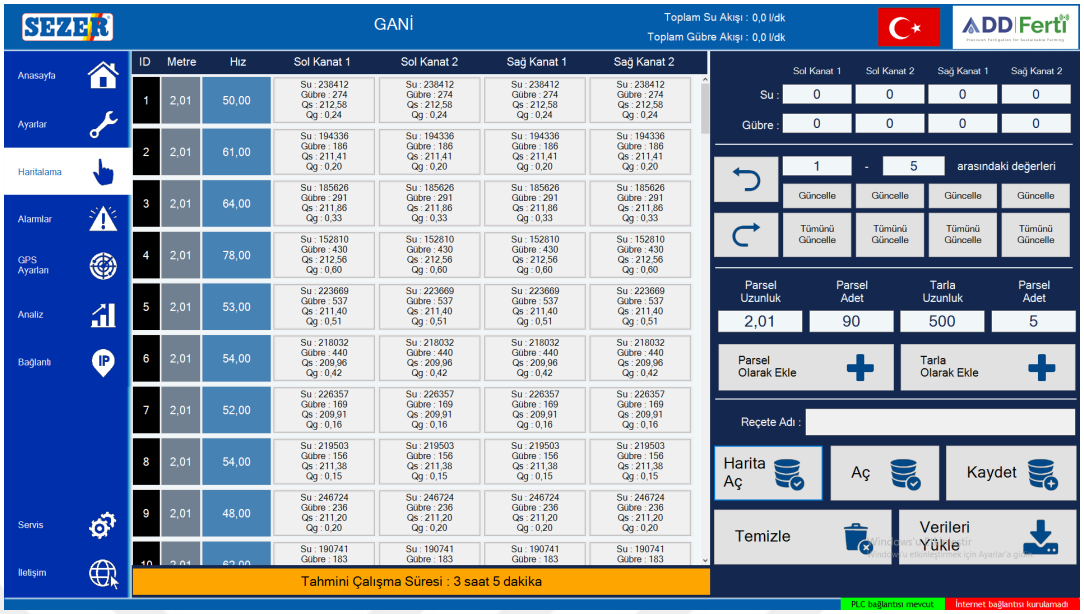
Ayarlar sayfası tüm sistemin çalışması için gerekli parametreleri içermektedir (Şekil 3.4). Belirli bir uygulama oranı için tutarsız debi ölçümleri yapılırsa, su veya gübre uygulama oranı o hücre için sabitlenecektir. Yedek olarak, debi ölçer okumaları kısa bir süre için dikkate alınmayacak ve parametrelerin yeniden hesaplanmasından sonra kontrollü uygulama devam edecektir. Çalıştırılmak istenmeyen bir pompa veya oransal valf varsa Aç yazan butona basılarak açılabilmektedir.



Şekil 3.4. Yazılımın ayarlar fonksiyonları

HR-VRFM Kontrol Yazılımı Haritalama sayfası

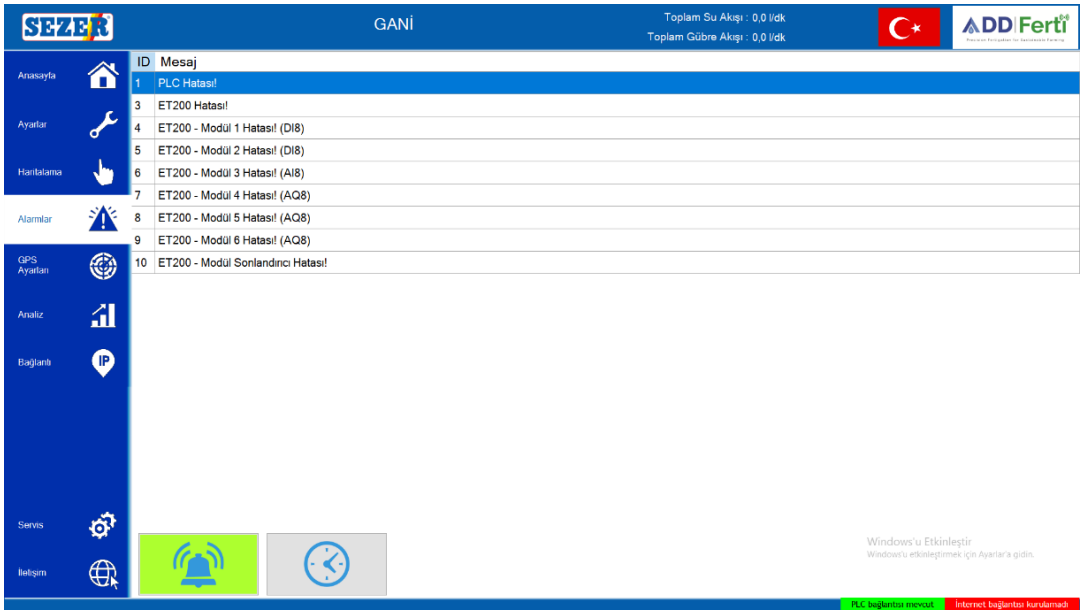
Haritalama sayfasında manuel olarak yeni bir harita oluşturulabilmekte ve açılarak tekrar kullanılabilmektedir (Şekil 3.5). Alternatif olarak, oluşturulan ve bulutta bulunan bir harita, Haritayı Aç düğmesine tıklanarak seçilebilmektedir. Daha sonra vanalar tamamen açılmakta, uygulama oranlarına göre her hücre için gerekli debiler hesaplanmakta ve en uygun zemin hızı sistem tarafından belirlenmektedir. Sistem, zemin hızını bir ayrıcalık olarak değiştirmekte, böylece debi valflerinde ayarlamalar yapılması önlenebilmektedir.



Şekil 3.5. Yazılımın Haritalama fonksiyonları

HR-VRFM Kontrol Yazılımı Uyarılar sayfası

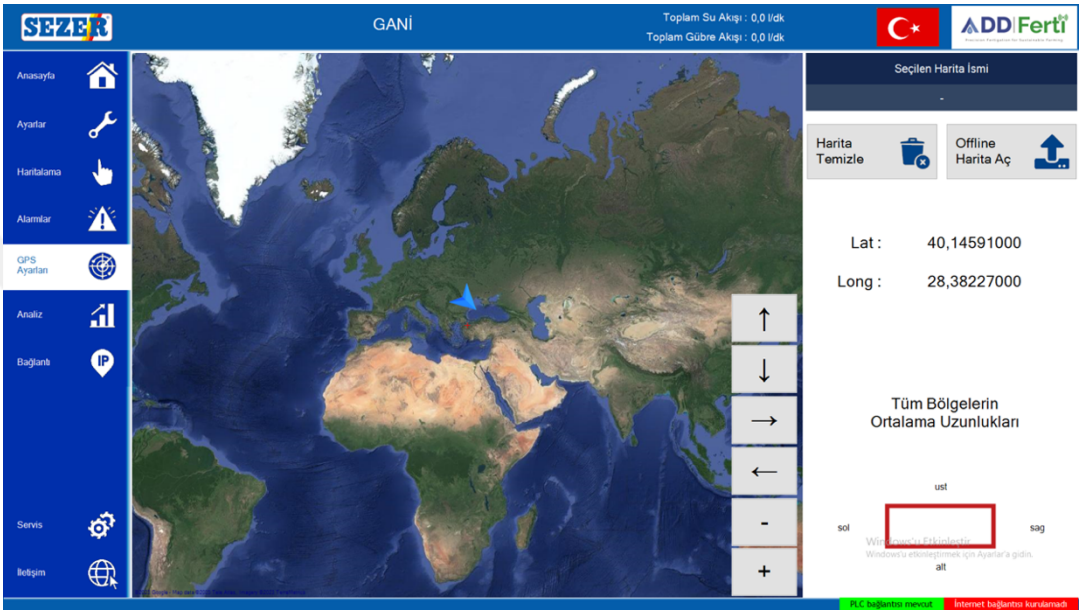
Uyarılar anlık ve geçmiş uyarılar olarak ikiye ayrılmaktadır. Anlık uyarılarda aktif ve çözülmemiş uyarılar gösterilmektedir. Geçmiş uyarılar ise geçmişteki tüm hataların kaydedilmesini ve görüntülenmesini sağlamaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Yazılımın Uyarı fonksiyonları

HR-VRFM Kontrol Yazılımı GPS Ayarları sayfası

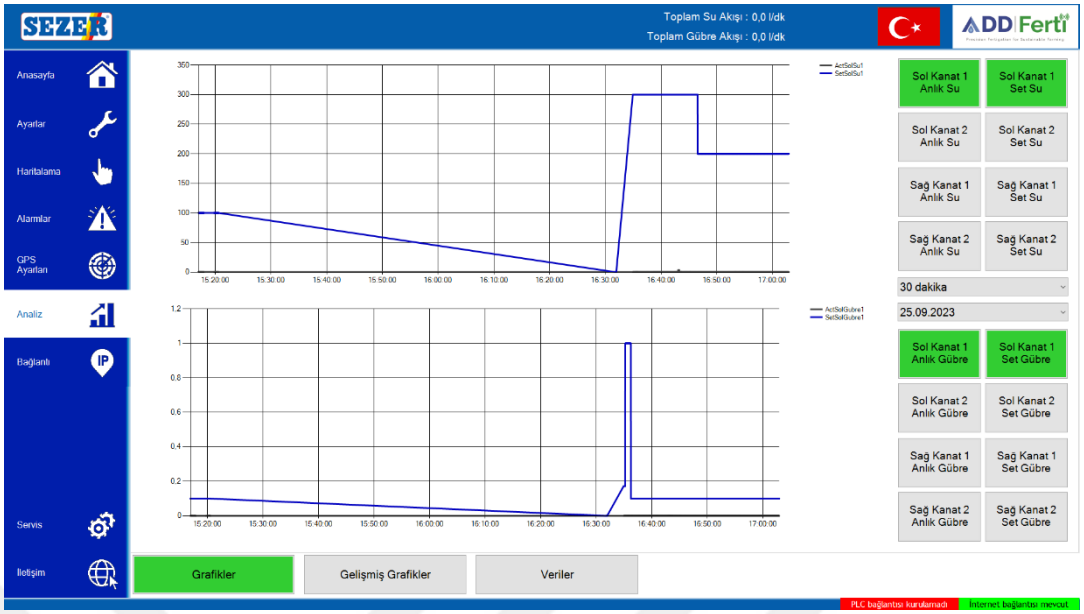
Haritanın sisteme yüklenmeden seçilebileceği ve gözlemlenebileceği bir sayfa olarak tasarlanmıştır. Seçilen haritanın konumu, bomun anlık konumu ve seçilen haritanın boyutu burada gösterilmektedir. Seçilen haritaların paralel genişlikleri burada gösterilmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Yazılımın GPS Ayarları işlevleri

HR-VRFM Kontrol Yazılımı Analiz sayfası

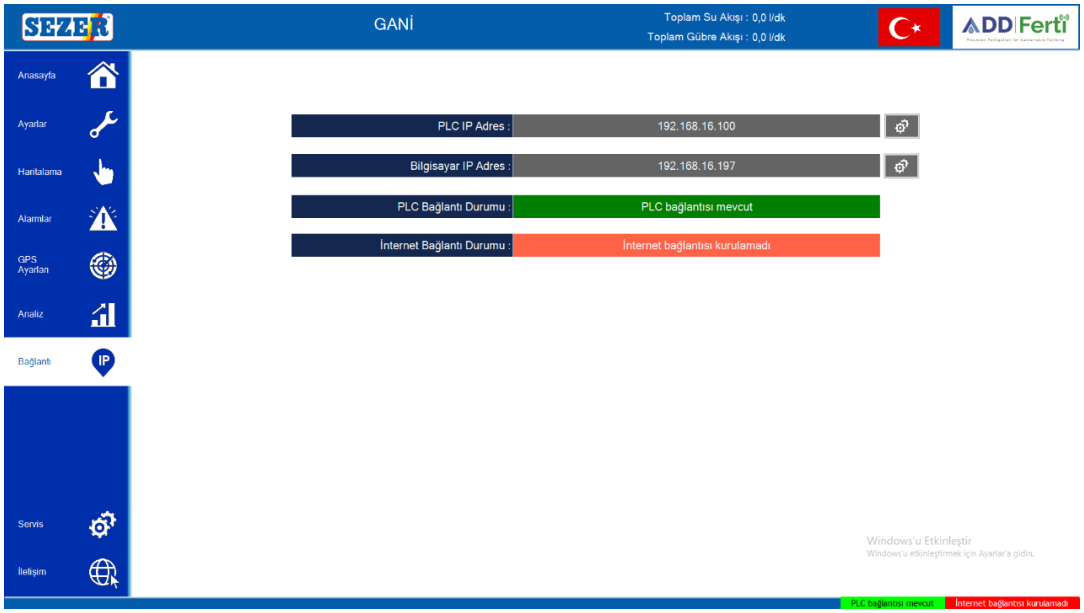
Analiz sayfasında aktif olarak kullanılan sistemin tüm anlık değerleri ve parametreleri kayıt altına alınmaktadır. Bu sayfada veri akışı durdurulabilmekte, sistemin verileri ve geçmiş kayıtları görüntülenebilmektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Yazılımın Analiz fonksiyonları

HR-VRFM Kontrol Yazılımı Bağlantı sayfası

Bağlantı sayfasında PLC'nin IP adresi güncellenerek sistemin bilgisayarın IP adresi ile haberleşmesi sağlanabilmektedir. İnternet ve PLC bağlantısı da anlık olarak izlenmektedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Yazılımın Bağlantı fonksiyonları

HR-VRFM Kontrol Yazılımı Servis sayfası

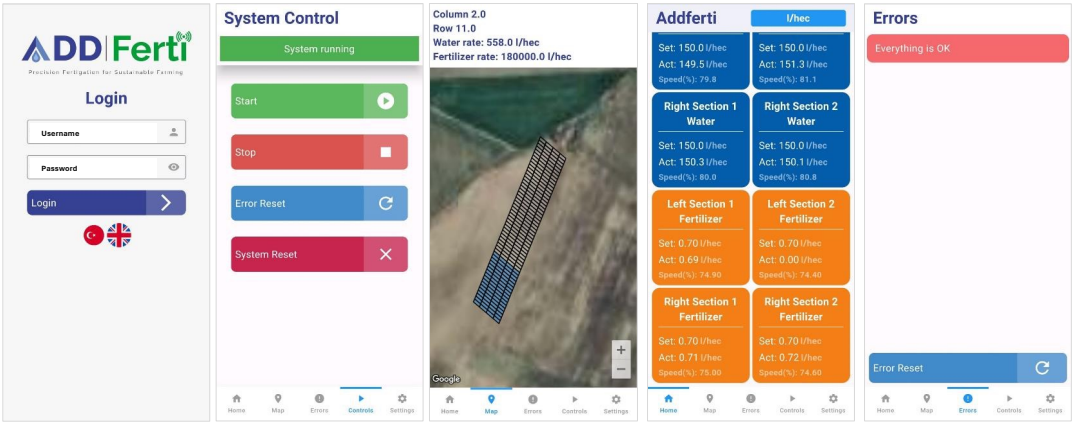
Servis sayfası tüm oransal valflerin ve pompaların manuel kontrolü için tasarlanmıştır (Şekil 3.10). Herhangi bir pompa veya vanada sorun oluşması durumunda çalışma kontrol edilebilmektedir. Tambura bağlı motorun ve bunlara bağlı motor hızının kontrolü de bu sayfada sağlanmaktadır.



Şekil 3.10. Yazılımın Servis fonksiyonları

3.1.5. HR-VRFM için Mobil Uygulama

HR-VRFM için bir mobil uygulama geliştirilmiştir (Şekil 3.11). Bu uygulama, kullanıcıların gübreleme işlemini başlatmasına ve durdurmasına, bir tarladaki ilerlemeyi harita olarak görmesine ve her şeyin yolunda gittiğinden emin olmak için ayarlanan değerleri ve fiilen uygulanan oranları çevrimiçi olarak uzaktan kontrol etmesine olanak tanımaktadır.



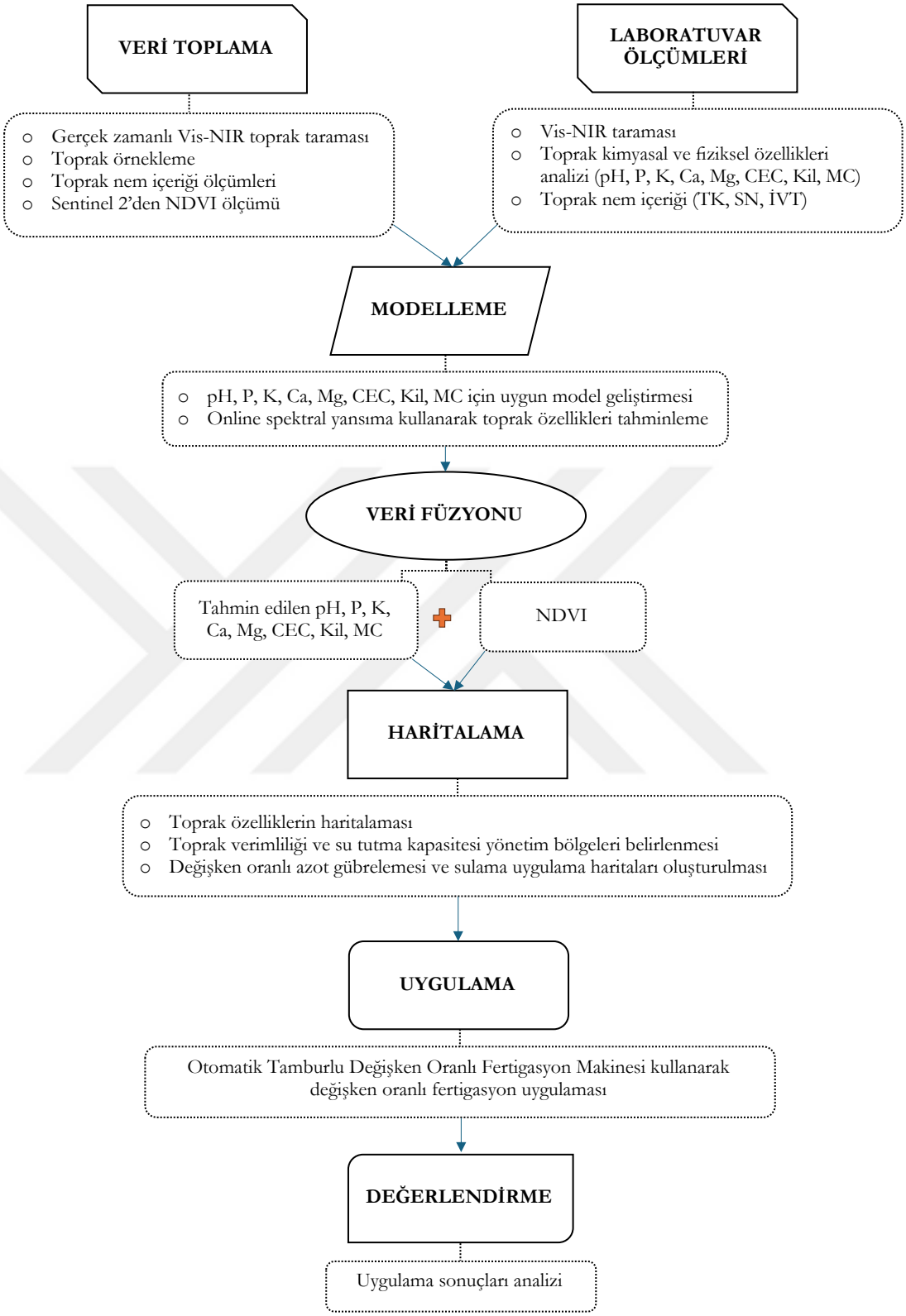
Şekil 3.11. HR-VRFM kontrolü için Mobil Uygulama

3.1.6. Çalışmada kullanılan programlar

Coğrafi bilgi sistemleri (CBS) araçları, önemli toprak parametrelerinin değerlendirilmesini sağlayan dijital toprak haritalaması için kullanılabilmektedir. CBS, toprak besin maddelerinin jeo-istatistik ve tahmin haritaları aracılığıyla sürdürülebilir toprak yönetimi için değerli bir araç sağlayabilmektedir. Bu çalışmada toprak özellikleri haritalamak için ArcGIS ArcMap v10.8 (ESRI, Redlands, California, USA) yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca hem toprak spektral yansımalarının ön işlemi hem de modelin kurulması RStudio (RStudio Inc., Boston, MA, USA) yazılımı ile açık kaynaklı kütüphaneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Stevens & Ramirez Lopez, 2014).

3.2. Veri Yönetimi

Bu çalışmada takip edilen aşamalar Şekil 3.12'de verilmiştir. Çalışmanın ana aşamaları veri toplama, laboratuvar ölçümleri, modelleme, veri füzyonu, haritalama, uygulama ve sonuçların değerlendirmesi olarak sıralanmıştır.



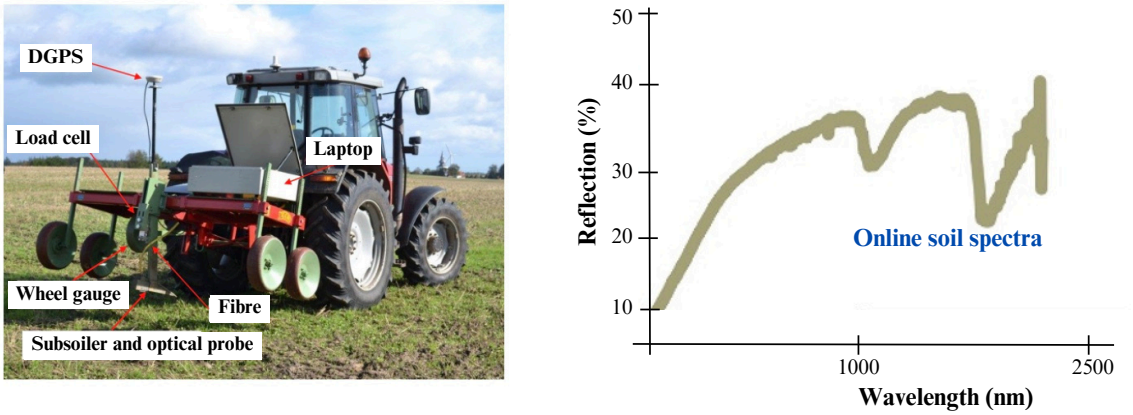
Vis-NIR: görünür ve yakın kızılötesi, NDVI: normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi, K: Potasyum, P: fosfor, Ca: kalsiyum, Mg: magnezyum, CEC: katyon değişim kapasitesi, MC: toprak nem içeriği, TK: tarla kapasitesi, SN: solma noktası, İVT: izin verilen tüketimi

Şekil 3.12. Çalışmada takip edilen metodoloji

3.3. Toprak verimliliği parametrelerinin belirlenmesi

3.3.1. Online toprak Vis-NIR spektral ölçümleri ve toprak örneklemesi

Toprak özelliklerinin farklı bileşenler ile belirlenmesi ve dijital toprak haritalarının çıkarılması günümüzde hassas tarım uygulamalarının en önemli konularından birisi olarak gösterilmektedir. Konuma özel gübrelemenin uygulanması için toprak kimyasal özellikleri, nem içeriği ve bitki uzaktan algılama verileri dahil olmak üzere çeşitli veriler gerekmektedir. Bu çalışmada, dijital toprak özellikleri haritaları hazırlamak için çevrimiçi toprak Vis-NIR spektral ölçümleri yapılmıştır. Vis-NIR spektrometresi, çalışılan alandaki yüksek çözünürlüklü toprak özelliklerinin değişkenliğinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Çalışılan bölgedeki toprak yansımalarının modellenmesi için modelleme parsellerinde çalışılmıştır. Toprak özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 2021'de gerçek zamanlı spektrometrik ölçümler yapılmıştır. Gerçek zamanlı toprak verilerinin elde edilmesi için Mouazen (2006) tarafından tasarlanan ve geliştirilen gerçek zamanlı çoklu sensör platformu kullanılmıştır (Şekil 3.13). Bu platform, toprağa nüfuz eden ve 15 ile 25 cm derinlik aralığında bir hendek oluşturan bir toprak dip kazanından oluşmaktadır. Dip kazan ucun arka kısmında spektrometrik okumalar yapılabilmektedir. Gerçek zamanlı toprak sensöründe kullanılan Spektrometre, tec5 (Technology for Spectroscopy, Oberursel, Germany) marka, AgroSpec modeli olup, fiber kablo bağlantısı ile 305–1700 nm ölçüm aralığında çalışmaktadır. Çalışma sırasında beyaz referans olarak %100 beyaz seramik disk kullanılmış ve ölçüm cihazının beyaz kalibrasyonu her 30 dakikada bir yapılmıştır. Spektrometre tarafından algılanan verilerin konumları, diferansiyel küresel konumlandırma sistemi (DGPS) alıcısı (CFX–750, Trimble, USA) ile belirlenmekte, elde edilen tüm veriler dizüstü bilgisayarda (Toughbook, Panasonic) kaydedilmektedir. Verilerin toplanmasında 1 Hz, MultiSpec pro-II yazılımı kullanılmıştır (tec5, Germany).



Şekil 3.13. Gerçek zamanlı toprak sensörü elemanları ve toprak yansıma (Mouazen, 2006)

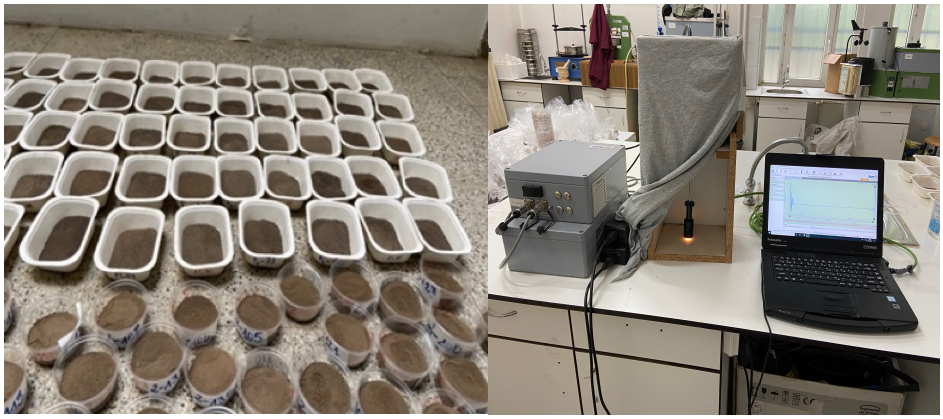
Platform, üç nokta bağlantı düzeni ile traktöre bağlanmıştır. Ölçümler sıra arası 12 m mesafede ve ortalama 2–3 km/saat hızla paralel hatlar boyunca yapılmıştır. Gerçek zamanlı ölçümlere ek olarak, spektrometrenin çizi açıcı ayağının oluşturduğu çizi tabanından yaklaşık 15 cm derinlikte belirli aralıklarla rastgele toprak örnekleri alınmıştır. Modelleme parsellerinden toplam 110 toprak numunesi alınmıştır.

3.3.2. Laboratuvar Vis-NIR ölçümleri

Toprak spektrumlarının modellenmesi, çevrimiçi toplanan verilere ek olarak laboratuvar verilerini de gerektirmektedir. Laboratuvar Vis-NIR tarama prosedüründe, iyi toprak spektrumları elde etmek için toprak numuneleri iyi hazırlanmalı ve temizlenmelidir.

Araziden alınan toprak örneklerinin laboratuvar ortamında spektral yansıma değerleri elde edilmiştir (Şekil 3.14). Spektral yansıma ölçümleri alınmadan önce her bir toprak örneği iyice karıştırılmış ve görünür ürün artıkları, kökler ve taşlar çıkarılmıştır. Dörde ayırma yöntemine dayalı olarak (Mukhopadhyay & Maiti, 2018), her numuneden, laboratuvar Vis-NIR taraması, kimyasal analiz ve arşiv için 150 g'lık 4 alt numune oluşturulmuştur. Laboratuvar Vis-NIR taraması sırasında, her numune 4 cm çapında ve 1 cm derinliğinde üç Petri kabına dağıtılmıştır. Daha sonra sinyal-gürültü oranını en üst düzeye çıkarmak için toprak yüzeyi bir spatula ile sıkıştırılmıştır (Mouazen vd, 2005). Spektral ölçümler, çevrimiçi ölçümlerin yapıldığı aynı Vis-NIR spektrometre sensörü kullanılarak karanlık bir ortamda gerçekleştirilmiştir (Tec5 Technology for Spectroscopy,

Germany). Her bir Petri kabı 10 kez taranmış ve toprak numunesi başına tek bir spektrum elde etmek için toplam 30 toprak spektrumunun ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.14. Laboratuvar ortamında spektral yansıma ölçümleri

3.3.3. Toprak örneklerinin fiziksel ve kimyasal analizleri

Vis-NIR spektral modellemesi, referans değerler için laboratuvar verileri gerektirmektedir. Bu çalışmada, tarlalardan toplanan toprak numuneleri (110 numune) fiziksel ve kimyasal özellik analizi için laboratuvara gönderilmiştir. Analizler ticari olarak akredite edilmiş bir laboratuvarda (Laben, Antalya, Türkiye) gerçekleştirilmiştir. Potasyum (K), fosfor (P), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), organik karbon içeriği (OC), katyon değişim kapasitesi (CEC), toplam azot (N), toprak pH ve bünye (Kil, Silt, Kum) belirlenmiştir. Laboratuvarda kullanılan toprak özellikleri ve ilgili analiz yöntemleri Çizelge 3.2'de listelenmiştir.

Çizelge 3.2. Toprak özellikleri analizinde kullanılan yöntemler

Toprak özellikleri	Metotlar	Kaynak
Potasyum (K) Kalsiyum (Ca) Magnezyum (Mg) Fosfor (P)	A. Asetat-ICP	Pratt (1965)
Organik karbon (OC)	Walkley-Black Metodu	Walkley & Black (1934)
Katyon değişim kapasitesi (CEC)	Sodium Saturation Metodu	Chapman (1965)
Toplam Azot (N)	Kjeldahl Metodu	Kjeldahl (1883)
pH	Saturasyon	Thomas (1996)
Kil, Silt, Kum	Bouyoucos hydrometer Metodu	Gee & Bauder (1986)

3.3.4. Vis-NIR spektral modellemesi ve online toprak özellikleri tahmini

Vis-NIR spektral verilerinden toprağın özelliklerinin çıkarılması için algılanan yansıma değerlerinin önceden işlenmesi ve modellenmesi gerekmektedir. Bunu yapmak için, Vis-NIRS kullanılarak laboratuvarda taranan toprak numuneleri modelleme ve doğrulama için kullanılmıştır. Vis-NIR modellerini güçlendirmek için mevcut laboratuvar spektral kütüphanesinden 92 örnek dahil edilerek kısmi en küçük kare regresyon (PLSR) analizlerinde kullanılmak üzere 202 örnekten oluşan kapsamlı bir veri seti elde edilmiştir. Bu ilave örnekler Karacabey'de benzer toprak özelliklerine sahip bir arazide yapılan çalışma sonucunda elde edilen ve arşivlenen veri setidir (Tekin vd, 2013). Toprak özelliklerinin modellenmesi için farklı spektrum ön işleme adımları kullanılmıştır. Vis-NIR spektrumlarının ön işlemesi, tec5 spektrometresinin iki detektörü arasındaki spektral sıçramanın sıralı olarak düzeltilmesi (Mouazen vd., 2009), spektral gürültüyü azaltmak için hareketli ortalama ve spektral verileri 0–1 ölçeğinde standartlaştırmak için maksimum normalleştirme ve böylece veri varyansının eşit dağılımını sağlamak da dahil olmak üzere bir dizi adımı içermektedir. Ek adımlar arasında sinyal-gürültü oranını artırmak için Savitzky-Golay (1964) birinci türevi ve spektral verilerdeki gürültüyü azaltmak için Savitzky-Golay yumuşatma yer almaktadır (Barnes vd., 1989).

Önceden işlenmiş spektrumlar, ölçülen toprak referans değerleri ile bir veri matrisinde birleştirilmiştir. Bu matris, Kennard-Stone algoritması (Kennard & Stone, 1969) kullanılarak kalibrasyon (%80) ve doğrulama (%20) veri kümelerine ayrılmıştır. Toprak özellikleri için Kısmi En Küçük Kareler Regresyonu (PLSR) modelleri, kalibrasyon seti kullanılarak bir defalık çapraz doğrulama yoluyla formüle edilmiştir. PLSR uygulamasından önce, toprak örnekleri arasındaki benzerlikleri veya farklılıkları keşfetmek için temel bileşen analizi (PCA) yapılmıştır. Tatmin edici model performansına ulaşılmasının ardından, toprak özelliklerini tahmin etmek için sahadan elde edilen çevrimiçi Vis-NIR spektrumlarının tamamı kullanılmıştır. Tahmin ilk olarak modelleme parselleri için gerçekleştirilmiştir. Modelleme parselleri modelleri kullanılarak uygulama parseli için tahmin gerçekleştirilmiştir. Toplanan toprak örneklerinin tanımlayıcı istatistikleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Veri toplama alanı için ölçülen toprak özelliklerinin özeti

Toprak özellikleri	Min	Maks	Ort	Median	Std	SC
pH	6,60	7,90	7,28	7,25	0,32	0,031
P (cmol/kg)	5,63	42,37	18,85	18,27	6,89	0,226
K (cmol/kg)	78,8	258,9	161,15	153,15	43,12	0,377
Mg (cmol/kg)	132,3	531,5	310,66	320,95	87,24	0,003
Ca (cmol/kg)	542,9	3366,7	28,29	1488,90	766,47	0,482
CEC (me/100g)	15,70	28,80	20,37	20,10	2,72	0,451
MC (%)	7,74	28,29	17,27	18,73	4,49	-0,395
Clay (%)	24,80	44,80	36,18	37,50	5,27	-0,570

Min, minimum; Maks, maksimum; Ort, ortalama; Std, standart sapma; SC, Skewness katsayı

3.3.5. Vis-NIR modelleri doğruluk değerlendirmesi

Tahmin modeli doğruluğunun değerlendirilmesi, özellikle dijital toprak haritalamasının yaygınlaşmasında, toprak etüt doğruluğunun net bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için gereklidir (Biggs vd., 2021). Bu çalışmada, ortaya çıkan modellerin performansı laboratuvar örnekleri kullanılarak doğrulanmıştır. Model doğruluğu, determinasyon katsayısı (R^2), kök ortalama kare hatası (RMSE), artık tahmin hatası (RPD), ortalama mutlak hata (MAE), performansın çeyrekler arası mesafeye oranı (RPIQ) ve gizli değişken (LV) temelinde değerlendirilmiştir.

Bu göstergeler aşağıdaki denklemler kullanılarak ifade edilebilmektedir:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} \tag{3.1}$$

Burada, RSS artık kareler toplamı ve TSS toplam kareler toplamıdır. R^2 skoru, 0 ile 1 arasında değer alır. 1'e ne kadar yakınsa, modelin o kadar iyi olduğu anlamına gelir. Eğer R^2 skoru sıfıra yakınsa, model sonuçlarının kötü olduğu anlaşılır.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum \frac{(Tahminlenen - \text{Ölçülen})^2}{N}} \tag{3.2}$$

Burada, N örnek sayısıdır. RMSE'nin değeri, sıfıra ne kadar yakınsa, modelin tahminleri o kadar iyidir.

$$\text{RPD} = \frac{SD\ (Laboratuvar\ \text{Ölçümü})}{RMSE} \tag{3.3}$$

Burada, SD standart sapmayı göstermektedir.

$$\text{RPIQ} = \frac{Q_3 - Q_1}{RMSE} \quad (3.4)$$

Burada Q_3 3. çeyrek değeri ve Q_1 1. çeyrek değeridir.

3.3.6. Toprak özelliklerinin dijital haritalaması

Bu çalışmada, ölçülen ve tahmin edilen toprak özellikleri için haritalar ArcGIS ArcMap v10.8 (ESRI, Redlands, California, USA) yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Ölçülen ve tahmin edilen toprak özelliklerinin haritalanması için sırasıyla Inverse Difference Weighting (IDW) ve Ordinary Kriging (OK) enterpolasyon yöntemleri kullanılmıştır. IDW, örneklenmemiş konumlardaki değerleri örneklenmiş konumlardaki bilinen değerlere dayanarak tahmin eden yaygın olarak kullanılan deterministik bir uzamsal enterpolasyon yöntemidir (Li vd., 2014). IDW, örnek noktalarına hedef konumdan uzaklıklarına göre ağırlıklar atamakta ve daha yakın noktalar daha yüksek ağırlıklar almaktadır (Wang vd., 2019). OK, toprak özelliklerine ilişkin doğru mekânsal bilgiler sağladığı için dijital toprak haritalamada yaygın olarak kullanılmaktadır (Tiruneh vd., 2021). Haritalama adımından sonra, tahmin edilen ve ölçülen toprak-özellik haritaları karşılaştırılmıştır.

3.3.7. Toprak verimliği yönetim bölgelerinin belirlenmesi

Geleneksel çiftlik yönetimi uygulamalarında, tüm tarla homojen bir alan olarak ele alınmakta ve toprak, topografya, yerel hava koşulları ve arazi kullanımındaki değişkenlik dikkate alınmamaktadır. Buna göre, sulama suyu ve gübre gibi çiftlik girdileri tarla boyunca homojen bir şekilde uygulanmakta ve bu da bitkisel üretim girdilerinin aşırı veya eksik uygulanmasına neden olmaktadır. Bu verimsiz çiftlik yönetimi, ürün verimliliğini olumsuz etkilemekte ve gübrenin aşırı kullanımı nedeniyle çevresel kirliliği artırmaktadır. Hassas tarım, mekânsal değişkenliğin tanımlanmasına ve tarla içindeki mekânsal değişkenliğe dayalı yönetim bölgelerinin (YB) geliştirilmesine ihtiyaç duymaktadır. YB'ler, mekânsal değişkenliğe göre bitkisel üretim girdileri için önerilerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. YB'ler, bir tarlayı geniş benzerlik alanlarına

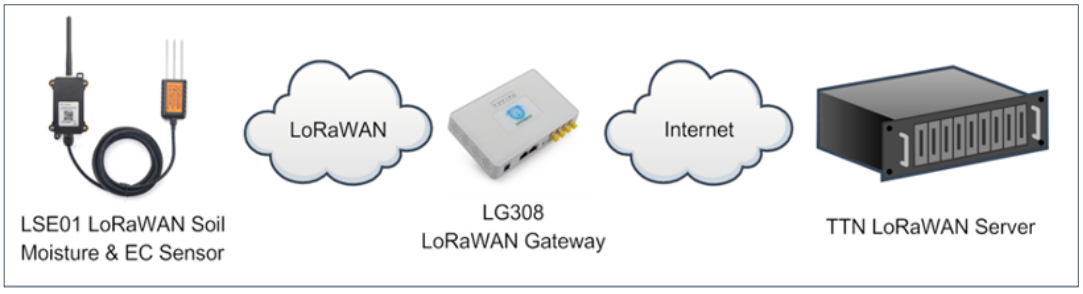
sınıflandırarak toprak değişkenliğini azaltarak geliştirilmektedir. Bu sınıflandırmalar, çiftçilik kararları için bir temel olarak kullanılabilmektedir.

Bu çalışmada, değişken oranlı azot gübrelemesi (VRNF) uygulaması için YB'ler geliştirilmiştir. Bu YB'ler, çevrimiçi toplanan Vis-NIR spektrumlarından tahmin edilen toprak pH, P, K, Mg, Ca, CEC, MC ve kil değerlerine ve Sentinel 2A görüntülerinden elde edilen normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksine (NDVI) dayalı olarak geliştirilmiştir. YB'lerini tanımlamak ve VRNF için uygulama haritaları oluşturmak için, tahmin edilen toprak için çevrimiçi olarak toplanan yüksek çözünürlüklü uzamsal veriler kullanılmıştır. Bu tahminler, çevrimiçi olarak toplanan Vis-NIR spektrumlarından türetilmiştir. Toprak özelliklerine ilişkin yüksek çözünürlüklü veriler normalleştirilmiş ve RStudio yazılımı (RStudio Inc., Boston, MA, USA) ile k-means kümelemesi kullanılarak birleştirilerek tarla, her biri benzer toprak ve ürün özelliklerine sahip sınırlı sayıda kümeye bölünmüştür. Birleştirilmiş veriler daha sonra VRNF uygulamasını kolaylaştırmak için her bir verimlilik haritası dört sınıf için oluşturulmuştur.

3.4. Toprak su parametrelerinin belirlenmesi

3.4.1. Kablosuz toprak nem sensörleri

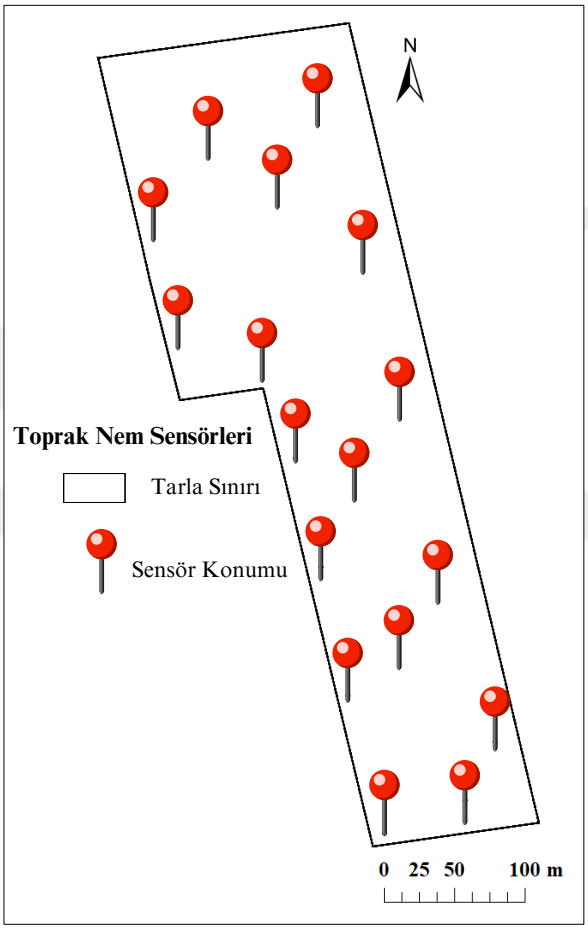
Bu çalışmada toprak nemi verilerini gerçek zamanlı olarak toplamak için Dragino LoRaWAN kablosuz ağlı toprak nem sensörleri kullanılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Toprak nemi veri toplama için Dragino LoRaWAN (Dragino, 2023)

Dragino LSE01 sensörleri, deney alanlarından toprak nemi verilerini toplamak için 300 mm derinliğe yatay olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.17a). Dragino LSE01 sensörlerinin miktarı ve yerleşimi, sulama için geliştirilen ilgili yönetim bölgelerine (MZ'ler) göre belirlenmiştir. Bu MZ'ler, tahmin edilen toprak MC ve kil miktarının konumsal verilerine

dayanarak tanımlanmıştır (Bantchina vd., 2024). Sensör yerleştirme konumları ArcGIS ArcMap v10.8 (ESRI, Redlands, California, USA) yazılımıyla çalışma alanı haritası üzerinde işaretlenmiş ve koordinatları arazi aplikasyonu için kaydedilmiştir. Bu koordinatlar bir GPS cihazına (Garmin) aktarılmıştır. Daha sonra, sensörler GPS'de bulunan arazi planına göre araziye yerleştirilmiştir. Bu çalışmada, Şekil 3.16'da gösterildiği gibi, uygulama alanında 17 sensör yerleştirilmiştir.



Şekil 3.16. Uygulama alanında toprak nem sensörlerinin konumları

Nem sensörleri ((%)VWC), görünür elektrik iletkenliğini (ECa) (µS/cm) ve toprak sıcaklığını (°C) izlemiştir. Sensörler, Elektromanyetik Yansıma Frekansı sensörü (FDR) kullanılarak MC ölçümlerini mümkün kılmaktadır ve MC sensörlerinin doğruluğu üretici tarafından ±%3 olarak bildirilmiştir. Arazi çalışmasında, bazı sensör okumalarındaki hatanın belirtilen sınırda olduğu, bazı sensör okumalarında ise nispeten yüksek hataların olduğu görülmüştür. Bu doğruluk, sensör konumlarında toprak numuneleri toplanarak iki

ürün sezonu boyunca kontrol edilmiş ve toprak nemi ölçümlerinde yaklaşık %3–5 hata ile sonuçlanmıştır (Bantchina vd., 2024).

İlk yerleştirme sırasında sensör antenini sabitlemek için 1 metre uzunluğunda kazıklar (Şekil 3.17b) kullanılmıştır. Ancak mısır yaprakları anteni tamamen kapladığı için daha sonra 2 metrelik kazıklarla değiştirilmiştir (Şekil 3.17c).



(a) (b) (c)

Şekil 3.17. Toprak nem sensörleri yerleştirilmesi. a) 300 mm derinlikte toprak nem sensörü yerleşimi b–c) antenin farklı yüksekliklere yerleştirilmesi

3.4.2. Gateway kurulumu

Gateway'in (Şekil 3.18a) sahada kurulumu, yapılandırma için üretici tarafından önerilen bir dizi adımı içermektedir. Ağ geçidi ve sensörler, toplanan verilerin 868 Hz bant frekansında depolanması ve iletilmesi için Avrupa bulutuna bağlanacak şekilde yapılandırılmıştır. Daha sonra LoRaWAN SMS, her sensöre özgü Dev EUI, APP EUI ve APPSKEY kullanarak cihazları Nesnelerin İnterneti (IoT) ağına kaydedilmiştir. Sistemin çalışması için ağ geçidinin bir güç kaynağına ihtiyacı vardır; bu nedenle, tarladaki çiftlik evinin yanındaki 5 m yüksekliğindeki bir direğe monte edilmiştir (Şekil 3.18b). Gateway, kurulum sırasında çevresel faktörlerden korunması için bir kutu içine alınmıştır. Gateway ile en yakın sensör arasındaki mesafe yaklaşık 800 m, maksimum mesafe ise yaklaşık 1200 m'dir. Gateway ile sensörler arasında, ağ geçidinden 50 m uzaklıkta bulunan birkaç ağacın oluşturduğu küçük bir perde dışında görünür bir engel yoktur. Gateway, her ağ geçidinin tüm topluluk için bir erişim noktası olarak hizmet verdiği açık kaynaklı bir topluluk projesi olan The Things Network'ü (TTN) kullanmaktadır. Diğer ağ geçitleriyle

sabit bir bağlantısı olan sensörler, verilerini kaydedildikleri buluta yüklemek için bu ağ geçitleriyle bir köprü kurmaktadır.

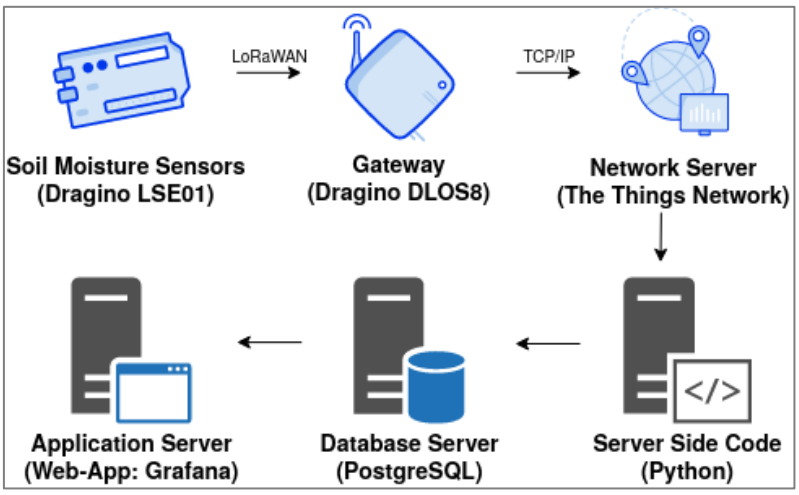


(a) (b)

Şekil 3.18. Gateway kurulum. a) Dragino Gateway b) Dragino Gateway ve Modemin tarlada yerleştirilmesi

3.4.3. Nem içeriği verilerinin toplanması ve analizi

Veri iletimi, düşük güçlü, uzun menzilli bir ağ teknolojisi olan LoRaWAN'ı kullanmaktadır. Chirp Spread Spectrum (CSS) teknolojisinden türetilen bu teknoloji, bir spread spectrum modülasyon tekniği kullanmakta ve Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi (ISM) frekans bandında çalışmaktadır. Uzun menzilli iletişimi ve düşük güç tüketimi nedeniyle LoRaWAN, IoT dayalı büyük ölçekli tarım uygulamaları için özellikle uygundur. Sistemin operasyonel diyagramı Şekil 3.19'da gösterilmektedir.



Şekil 3.19. LoRaWAN toprak sensörleri için şematik iletişim platformu

Sensör verileri, ücretsiz bir arayüz yazılım paketi olan Grafana kullanılarak indirilmiş ve görselleştirilmiştir. Grafana gösterge paneli toplanan, depolanan ve görselleştirilen verilere sürekli erişim sağlamaktadır. Ayrıca Grafana, verilerin kolayca indirilebileceği bir bulut ortamı içermektedir. Grafana panosu kullanılarak toprak nemi (Şekil 3.20a), toprak sıcaklığı, elektrik iletkenliği (Şekil 3.20b) ve hava durumu tahminlerinin (Şekil 3.20c) gerçek zamanlı olarak izlenmesi mümkün olmaktadır. Grafana bulutunda depolanan veriler analiz için virgülle ayrılmış değerler (CSV) dosya formatında indirilerek kullanılmıştır.



Şekil 3.20. Grafana Dashboard üzerinde veri görselleştirme. a) Toprak nem içeriğinin gerçek zamanlı izlenmesi b) Toprak sıcaklığı ve elektriksel iletkenliğinin gerçek zamanlı izlenmesi c) Hava durumu tahmini (yağış, nem ve sıcaklık)

3.4.4. Sulama ihtiyaçlarının belirlenmesi

Değişken sulama ihtiyaçları, toprak nem içeriği (MC) sensör verileri kullanılarak su durumu izlenerek belirlenmiştir. Tarla kapasitesi (TK), solma noktası (SN) ve hacimsel ağırlık (VW), her bir sensör konumundaki her bir toprak numunesi için laboratuvar koşullarında belirlenmiştir. Bu amaçla, sensör konumlarından bozulmamış ve bozulmuş toprak numuneleri toplanmıştır. VW, numunelerin 105°C'de 24 saat boyunca fırında kurutulmasıyla belirlenmiştir. SN, 4,2 pF (15,20 bar) basınçta bir Basınçlı Membran Cihazı (Eijkelkamp, Giesbeek, The Netherlands) kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 3.21). Sand/Kaolin Box cihazı (Eijkelkamp, Giesbeek, The Netherlands) 2,54 pF'de (0,34 bar) TK'sı belirlemek için kullanılmıştır (Şekil 3.22) (Bantchina vd., 2024).



Şekil 3.21. Basınçlı Membran Aparatı ile Solma Noktası belirlenmesi



Şekil 3.22. Sand/Kaolin Box ile Tarla Kapasitesi belirlenmesi

Kullanılabilir su (KS) ve İzin verilen tüketim (İVT), TK, SN ve VW'ye göre belirlenmiştir. Sulama miktarı (SM), tarlada belirli bir konumda TK değerlerine ulaşmak

için toprağın nem içeriğine (MC) dayalı olarak hesaplanmıştır. Söz konusu parametreleri belirlemek için aşağıdaki formüller kullanılmıştır:

$$\text{TK[mm]} = \text{TK[\%]} \times \text{VW [g/cm}^3\text{]} \times \text{derinlik /100} \quad (3.5)$$

$$\text{SN[mm]} = \text{SN[\%]} \times \text{VW [g/cm}^3\text{]} \times \text{derinlik / 100} \quad (3.6)$$

$$\text{AW[mm]} = \text{TK[mm]} - \text{SN[mm]} \quad (3.7)$$

$$\text{İVT [mm]} = \text{SN [mm]} + \text{AW [mm]} \times \text{İzin verilen \%} \quad (3.8)$$

$$\text{MC[mm]} = \text{MC[\%]} \times \text{VW [g/cm}^3\text{]} \times \text{derinlik / 100} \quad (3.9)$$

$$\text{SM [mm]} = \text{TK[mm]} \times \text{maks_sulama_oranı} - \text{MC[mm]} - \text{Yağış[mm]} \quad (3.10)$$

$$\text{SM [lt/ha]} = \text{SM [mm]} \times 10\,000 \quad (3.11)$$

Burada derinlik bitki kök derinliğidir (bu çalışmada 300 mm). Denklem (3.5), (3.6) ve (3.9) kullanılarak mm cinsinden hesaplanan TK, SN ve MC değerleri hacim ağırlığı kullanılarak yüzde cinsinden TK, SN ve MC değerlerine dönüştürülmüştür. Kullanılabilir su (AW), TK ile SN arasındaki farktır (Denklem 3.7). Bitkiler için teorik olarak uygun olan nem aralığını temsil etmektedir, ancak SN'ye yakın nem seviyelerinde bitkiler su stresi yaşamaya başlayacaktır. TK ve SN arasında tüketilmesine izin verilen miktar (İVT) belirlenerek, tüketilen su miktarı bu değeri aştığında sulamaya başlanır. Amaç, sulama sezonu boyunca bu noktanın altına düşmemektir. İVT için standart ayarlar %50 ve %60'tır (Denklem 3.8). Bu çalışmada İVT kullanılabilir suyun (AW) %50'si olarak kabul edilmiştir. Denklem 3.10 kullanılarak, milimetre (mm) cinsinden sulama ihtiyacı, AW'nin %90'ından MC ve gelecek günler için beklenen yağmur çıkarılarak hesaplanmıştır. SM, beklenen yağmur dikkate alındığında, toprağı maksimum_sulama_oranı (%90) × TK'a kadar doldurmak için gereken su miktarı olarak yorumlanabilmektedir. Denklem 3.11 kullanılarak sulama ihtiyacı mm'den lt/ha'ya dönüştürülmüştür. Çünkü HR-VRFM lt/ha cinsinden veri girişine ihtiyaç duymaktadır. Burada mm ve lt/ha arasındaki dönüşüm faktörü 10 000'dir. Bu nedenle, 10 000 m^2 (1 ha) üzerine uygulanan 1 mm su derinliği 10 000 lt/ha veya 10 m^3 /ha'lık bir hacmi temsil etmektedir.

3.4.5. Su tutma kapasitesi yönetim bölgelerinin belirlenmesi

Değişken oranlı sulamanın uygulanması için su tutma kapasitesi (STK) YB'leri geliştirilmiştir. STK-YB'ler, tahmin edilen toprak kil içeriği, ölçülen toprak nemi ve Sentinel 2A görüntülerinden elde edilen bitki NDVI'sının yüksek çözünürlüklü mekânsal verilerine dayanarak geliştirilmiştir. Bu veriler normalize edilmiş ve RStudio yazılımında k-means kümeleme sınıflandırma yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirilmiş veriler, değişken oranlı sulama için STK-YB haritalarında dört sınıf oluşturulmuştur.

3.5. HR-VRFM aracılığıyla değişken oranlı fertigasyon

3.5.1. HR-VRFM kullanılarak değişken oranlı azot gübrelemesi

Bu çalışmada HR-VRFM kullanılarak değişken oranlı azot gübrelemesi uygulaması gerçekleştirilmiştir. VRFI'nin uygulanması için azotlu gübre değişken oranlı uygulama haritaları geliştirilmiştir. Bu uygulama haritaları, VRNF için dört sınıflı YB'lerle (örneğin, düşük (L), orta düşük (ML), orta yüksek (MH) ve yüksek (H) verimlilik bölgeleri) eşleşen dört sınıflı toprak verimliliği YB'lerden türetilmiştir. Verimlilik YB'leri HR-VRFM bom kesitlerine uyacak şekilde 10,70 m genişliğinde paralel şeritlere bölünmüştür. Her bir VRNF şeridi, farklı YB'leri temsil eden 2 m'lik parsellere bölünmüştür. Bu çalışmada, N oranlarındaki dalgalanmanın çiftçinin öngördüğü UR uygulamasının +%62,5'i ile -%62,5'i arasında değiştiği varsayılmıştır. Kullanıcının N uygulama oranı 558 lt/ha olup, çiftçinin deneyimi, geleneksel toprak analizi ve nitrat yönergesi esas alınarak belirlenmiştir. Uygulamada beş farklı N uygulaması dikkate alınmıştır. Bunlardan birisi çiftçi uygulaması (URN) ve diğerleri ise analiz sonucu elde edilen dört değişken oranlı N uygulamasıdır (VRN).

3.5.2. HR-VRFM kullanılarak değişken oranlı sulama

Sulama gereksinimlerinin belirlenmesi, optimum bitki büyümesini ve su kullanım verimliliğini sağlamak tarımsal yönetimin çok önemli bir yönüdür. Sulama gereksinimin belirlenmesi, ürün türü, iklim koşulları, toprak su içeriği ve sulama yöntemleri gibi çeşitli faktörlerin dikkate alınmasını içermektedir. Bu çalışmada, toprak kil içeriği, nem içeriği (MC) sensör verileri ve NDVI kullanılarak değişken oranlı sulama yönetim bölge haritası hazırlanmıştır. HR-VRFM kullanılarak VRFI'nin uygulanması için değişken oranlı sulama uygulama haritaları geliştirilmiştir. Bu uygulama haritaları, VRI için dört sınıflı

STK-YB'lerle (örneğin, düşük (L), orta düşük (ML), orta yüksek (MH) ve yüksek (H) verimlilik bölgeleri) ve çiftçi uygulaması (400 000 lt/ha) olmak üzere toplam beş sınıflı uygulama haritasıdır. STK-YB'leri HR-VRFM bom kesitlerine uyacak şekilde 10,70 m genişliğinde paralel şeritlere bölünmüştür. Her bir VRI şeridi, farklı YB'leri temsil eden 2 m'lik parsellere bölünmüştür.

Testler, uygulama alanı için uygulama haritası kullanılarak tarla koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçta VRNF ve VRI haritaları tek bir harita dosyası katmanında birleştirilmiştir**.** Bu son katman HR-VRFM ile uyumlu JSON formatına dönüştürülmüştür. Tarlada testler sırasında ayarlanan ve gerçekleşen gübreleme ve sulama değerleri kaydedilmiştir. Günlük Dosyası verileri, dağılım grafikleri kullanılarak analiz ve karşılaştırma için Excel'e aktarılmış ve determinasyon katsayısı (R^2) hesaplanmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Vis-NIR Spektrum Modelleme Sonuçları

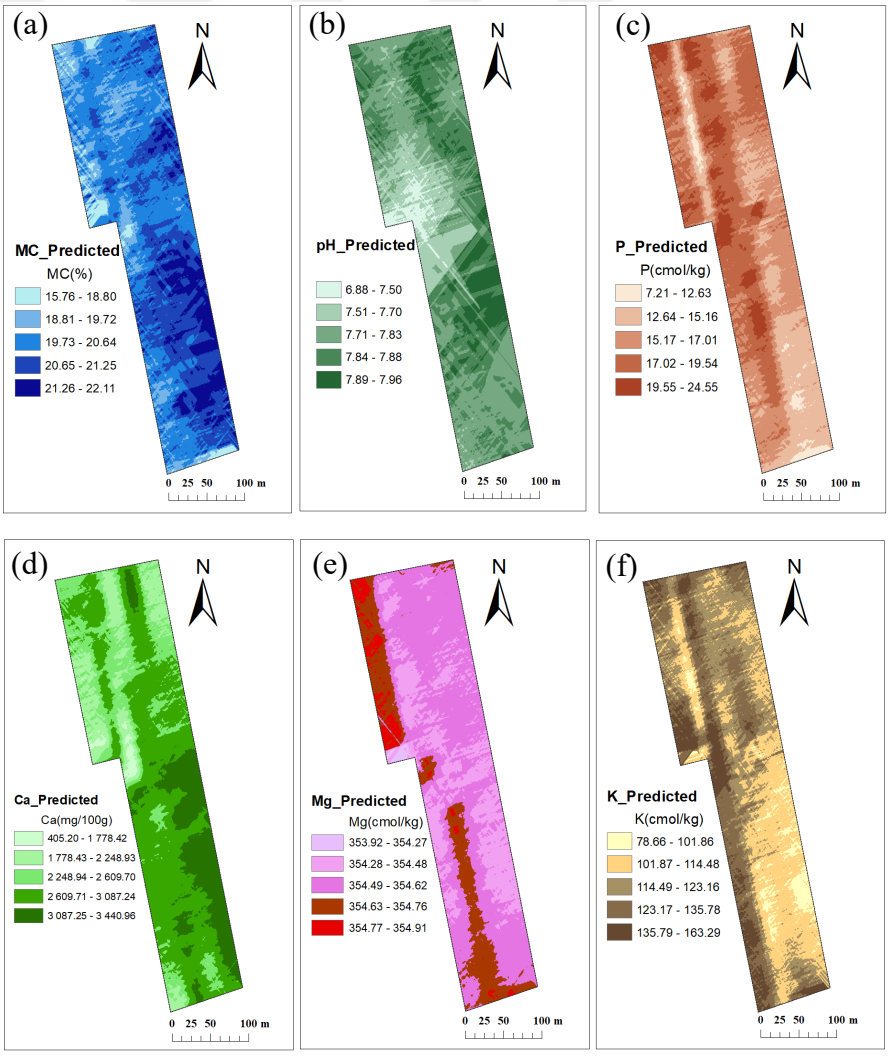
İncelenen toprak özellikleri için PLSR aracılığıyla kurulan toprak Vis-NIR spektrum kalibrasyon ve doğrulama (validasyon) modellerinin sonuçları Çizelge 4.1'de özetlenmiştir. Modeller, çapraz doğrulamada 0,60 ila 0,99 arasında ve çevrimiçi doğrulamada (bağımsız doğrulama) 0,52 ila 0,78 arasında değişen determinasyon katsayısı (R^2) açısından iyi doğruluk değerleri elde etmiştir. Modellerin çevrimiçi doğrulamadaki iyi performansı, sırasıyla 1,47–2,17 ve 1,61–3,74 arasında değişen RPD ve RPIQ parametreleri ile de doğrulanmıştır. Çevrimiçi doğrulamada modellerin doğruluğu, pH, P, Mg ve Kil için model doğruluğuna kıyasla MC, K ve Ca dahil olmak üzere bazı toprak özellikleri için daha yüksektir. Modelin doğruluğunu birkaç faktör etkileyebilir. İlk olarak, MC, NIRS aralığında doğrudan spektral bir tepkiye sahip olduğu için NIRS'in birincil özelliklerinden biri olarak kabul edilir (Kuang vd., 2012; Stenberg vd., 2010). Bazı toprak özelliklerinin yüksek doğruluğunun bir diğer olası nedeni, bu belirli toprak özelliğinin yüksek mekânsal değişkenliği veya tam tersi olabilmektedir. Yüksek modelleme doğruluğu, PLSR doğrusal çok değişkenli bir analiz olduğundan, çevrimiçi spektral ve ölçülen özellikler arasında doğrusal bir ilişki olduğunu da göstermektedir (Kuang vd., 2012). Ayrıca, kalibrasyon için kullanılan farklı ön işleme yöntemleri ve örnek sayısı (Kuang & Mouazen, 2012) da modelleme doğruluğunu etkilemektedir. Model doğrulamada elde edilen ölçülen ve tahmin edilen toprak özelliklerinin dağılım grafikleri Ek 1'te verilmiştir.

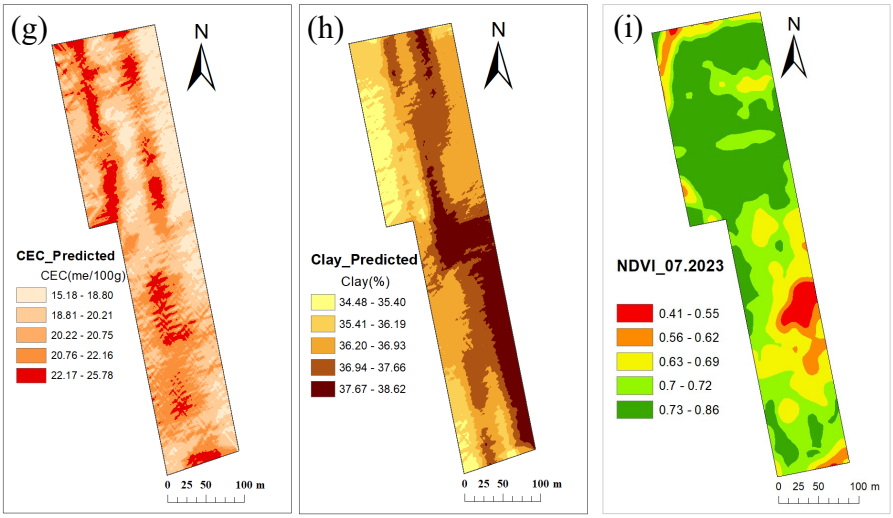
Çizelge 4.1. Kalibrasyon ve Online doğrulamada PLSR analizleri ile elde edilen modellerin tahmin sonuçları

TOPRAK ÖZELLİK	KALİBRASYON					ONLİNE DOĞRULAMA					
	R^2	**RMSE**	**MAE**	**RPD**	**RPIQ**	**R^2**	**RMSE**	**MAE**	**RPD**	**RPIQ**	**LV**
pH	0,60	0,27	0,21	1,59	2,23	0,69	0,25	0,20	1,81	1,83	3
P (cmol/kg)	0,99	0,44	0,35	16,30	23,24	0,66	4,05	3,00	1,74	2,25	10
Ca (cmol/kg)	0,85	383,08	302,97	2,55	4,41	0,73	366,78	277,78	1,95	1,61	5
MC (%)	0,94	0,81	0,64	4,15	4,73	0,78	2,37	1,88	2,17	3,67	8
Mg (cmol/kg)	0,67	45,05	35,41	1,76	2,16	0,66	52,08	40,93	1,73	2,62	7
Clay (%)	0,66	3,03	2,37	1,72	2,54	0,52	3,57	3,03	1,47	2,63	2
CEC	0,87	2,55	2,09	2,78	5,28	0,76	2,85	2,24	2,07	3,26	5
K (cmol/kg)	0,95	1,99	1,39	4,69	9,69	0,88	2,49	1,96	2,94	2,13	4

4.2. Uygulama Alanı için Belirlenen Toprak Özellikleri Haritaları

Toprak özelliklerinin modelleme parselindeki değerler kullanılarak modellenmesinden sonra, uygulama alanından alınan toprak örnekleri üzerinde spektrometre ile spektral yansıma ölçümleri yapılmıştır. Model oluşturma aşamasında, spektrometre ölçümleri ve laboratuvar analizleri kullanılarak model veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri seti kullanılarak uygulama alanı arazisindeki ölçülen spektral yansımalardan toprak özellikleri tahminlenmiştir. Birbirine yakın araziler olması nedeniyle benzer toprak karakteristikleri göstermesi beklenmektedir. Oluşturulan veri seti benzer toprak özelliklerindeki toprakların toprak parametrelerinin tahminlenmesinde kullanılabilir. Burada hedef kimyasal analizlere tekrar tekrar ihtiyaç duymadan sadece spektral yansıma değerleri kullanılarak toprak özelliklerinin doğru bir şekilde tahminlenmesidir. Uygulama alanı için tahmin edilen toprak özellikleri haritaları Şekil 4.1'te verilmiştir.

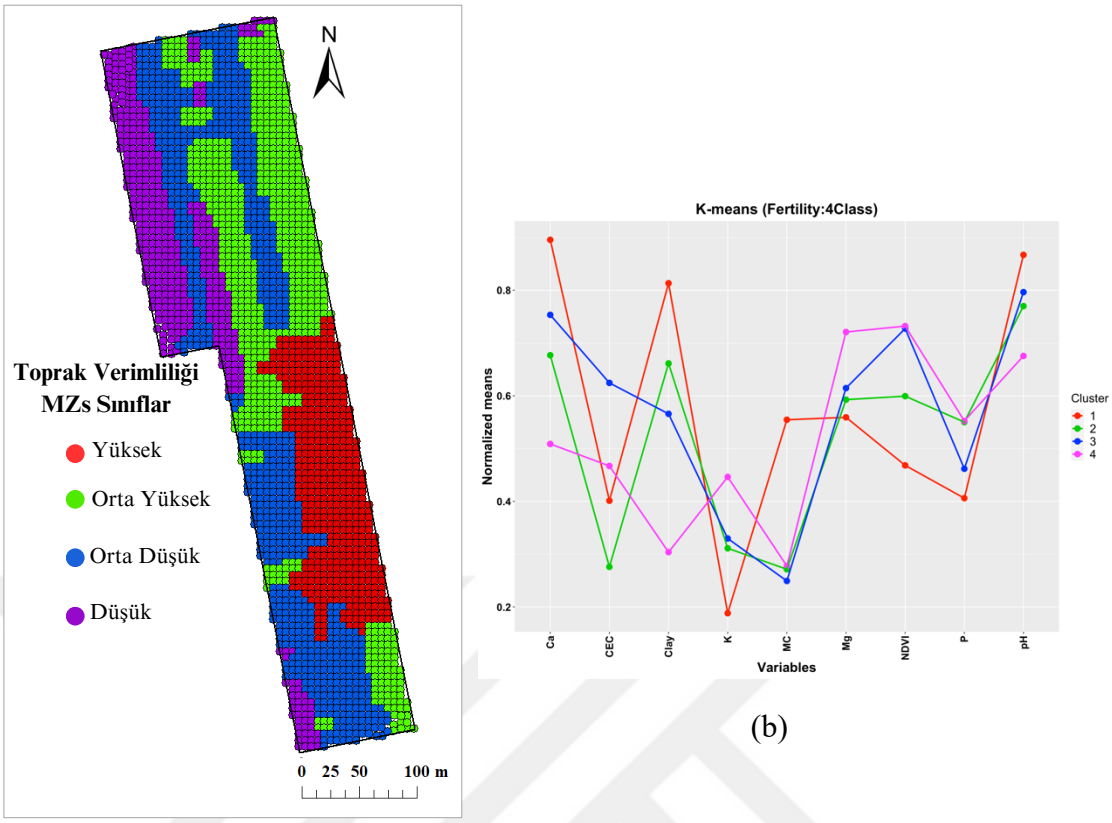




Şekil 4.1. Vis-NIR tahmin edilen toprak özellikleri haritaları. a-h) Tahmin edilen toprak özellikleri haritaları i) Sentinel 2A'dan türetilen NDVI haritası

4.3. Toprak Verimliliği Yönetim Bölgeleri Haritası

YB'ler, Şekil 4.1'te gösterildiği gibi, NDVI ve Online toplanan görünür ve yakın kızılötesi spektrumlar kullanılarak tahmin edilen toprak pH, P, K, Ca, Mg, CEC, MC ve Kil'in yüksek çözünürlüklü mekânsal verilerine dayalı olarak geliştirilmiştir. Yukarıda belirtilen toprak özelliklerine ilişkin yüksek çözünürlüklü veriler normalleştirilmiş, birleştirilmiş ve değişken oranlı gübreleme için verimlilik haritası dört sınıfa (Şekil 4.2a) ayrılmıştır. pH, P, K, Ca, Mg, CEC, MC ve Kil normalize edilmiş ortalamaları, kümeleme analizinden elde edilen verimlilik açısından sınıfları sıralamak için kullanılmıştır. Dört sınıflı verimlilik YB haritası, en yüksek normalleştirilmiş P, K, Mg ve NDVI ortalamalarına sahip olduğu için sınıf 4'ün en verimli sınıf olduğunu ve bunu sırasıyla sınıf 3, 2 ve 1'in izlediğini görülmektedir (Şekil 4.2b).

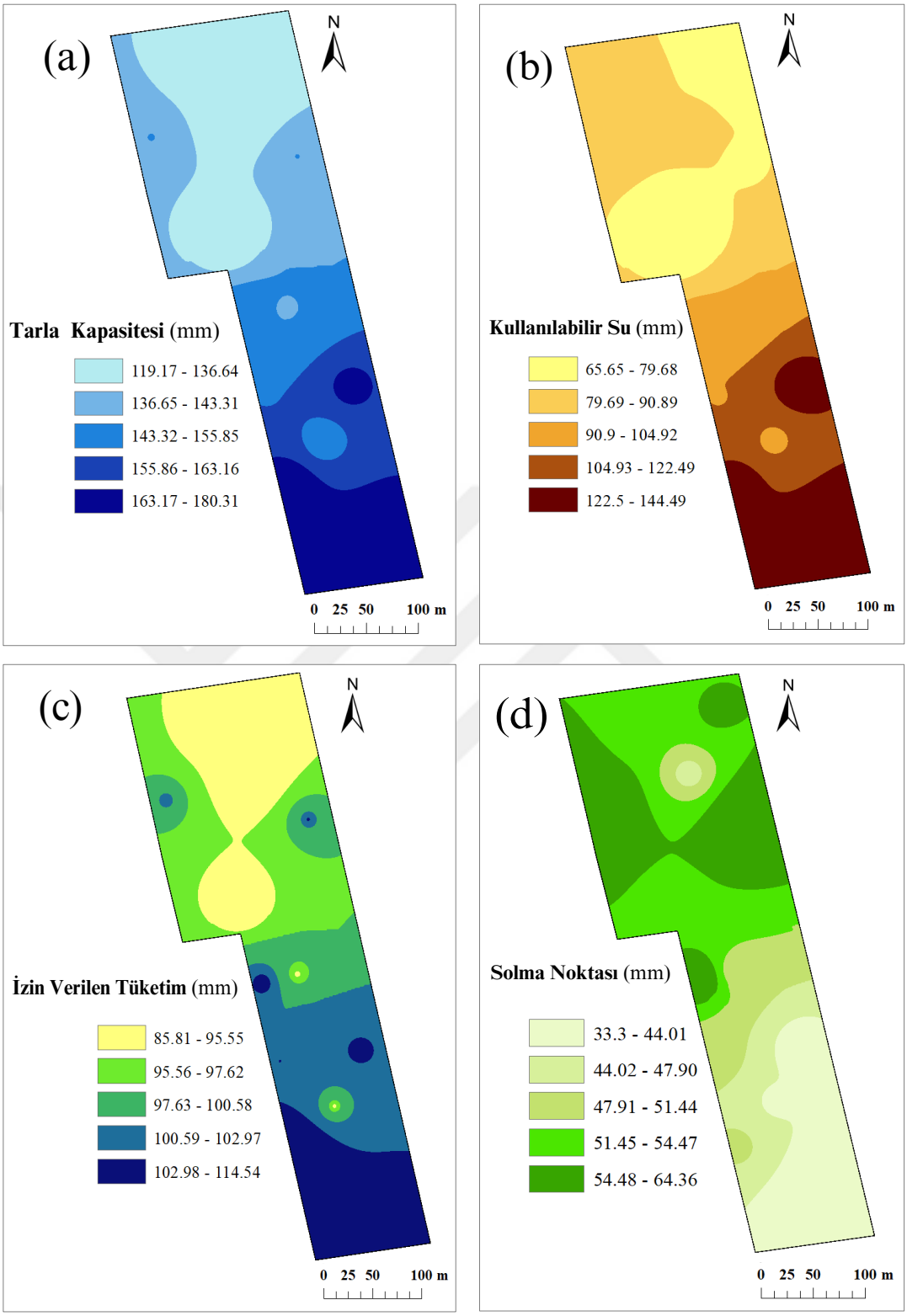


(a) (b)

Şekil 4.2. Toprak verimliliği yönetim bölgelerin haritası. a) Toprak 4 sınıflı verimliliği yönetim bölgeleri b) 4 sınıflı normalleştirilmiş ortalama gösterimi

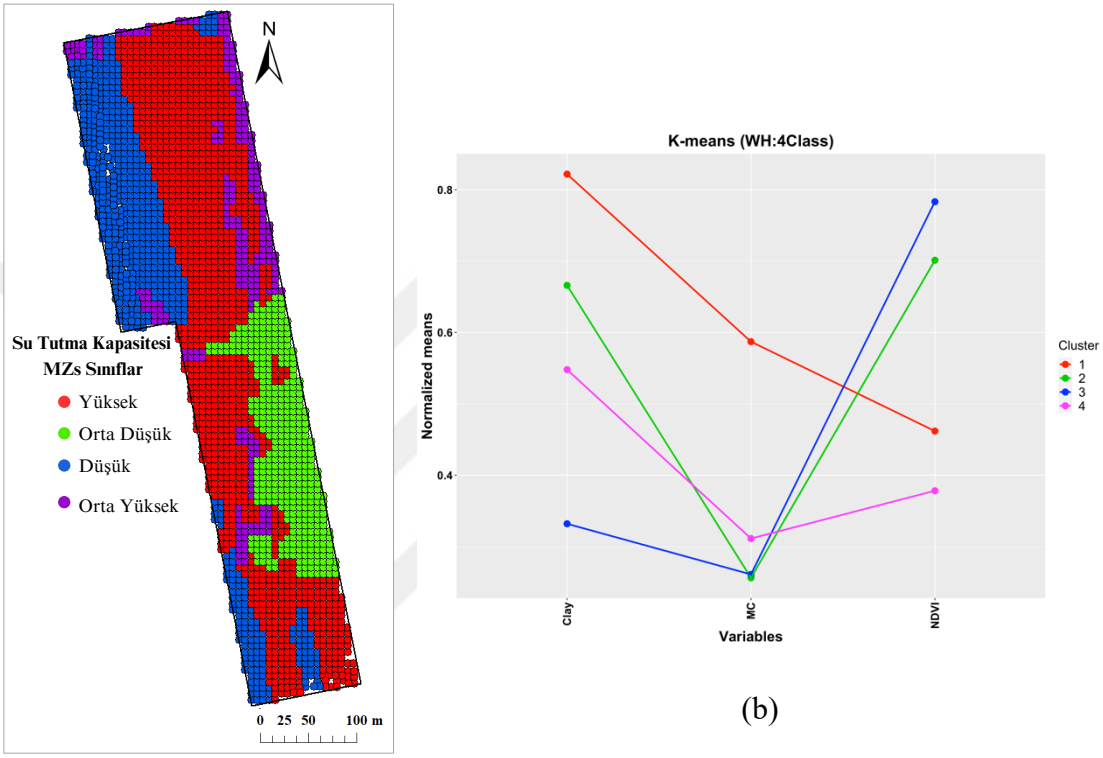
4.4. Su Tutma Kapasitesi Yönetim Bölgeleri Haritası

TK, SN, AW ve İVT dahil olmak üzere uygulama alanı için sulama ihtiyacı parametre haritaları Şekil 4.3'te gösterilmektedir. TK değerleri 119,17 mm ile 180,31 mm arasında değişmekte olup ortalama 148,78 mm'dir. SN 33,30 mm ile 64,36 mm arasında değişirken, AW 65,65 mm ile 144,49 mm arasında değişmektedir. İVT değerleri 85,81 mm ile 114,54 mm arasında değişmekte olup ortalaması 99,22 mm'dir.



Şekil 4.3. Toprak nem özellikleri haritaları

STK-YB'leri için Şekil 4.1'de belirtilen tahmini kil, MC ve NDVI verileri kullanılmıştır. Dört sınıflı STK-YB haritası (Şekil 4.4a), en yüksek nem ve kil içeriğine sahip olan sınıf 1'in en üst STK sınıfı; sınıf 3'ün ise en düşük kil içeriğine sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 4.4b). Bu nedenle, sınıf 1 diğer sınıflara göre daha düşük miktarda sulama suyuna ihtiyaç duymaktadır. Sınıf 3 için ise tam tersi bir sonuca varılabilir.

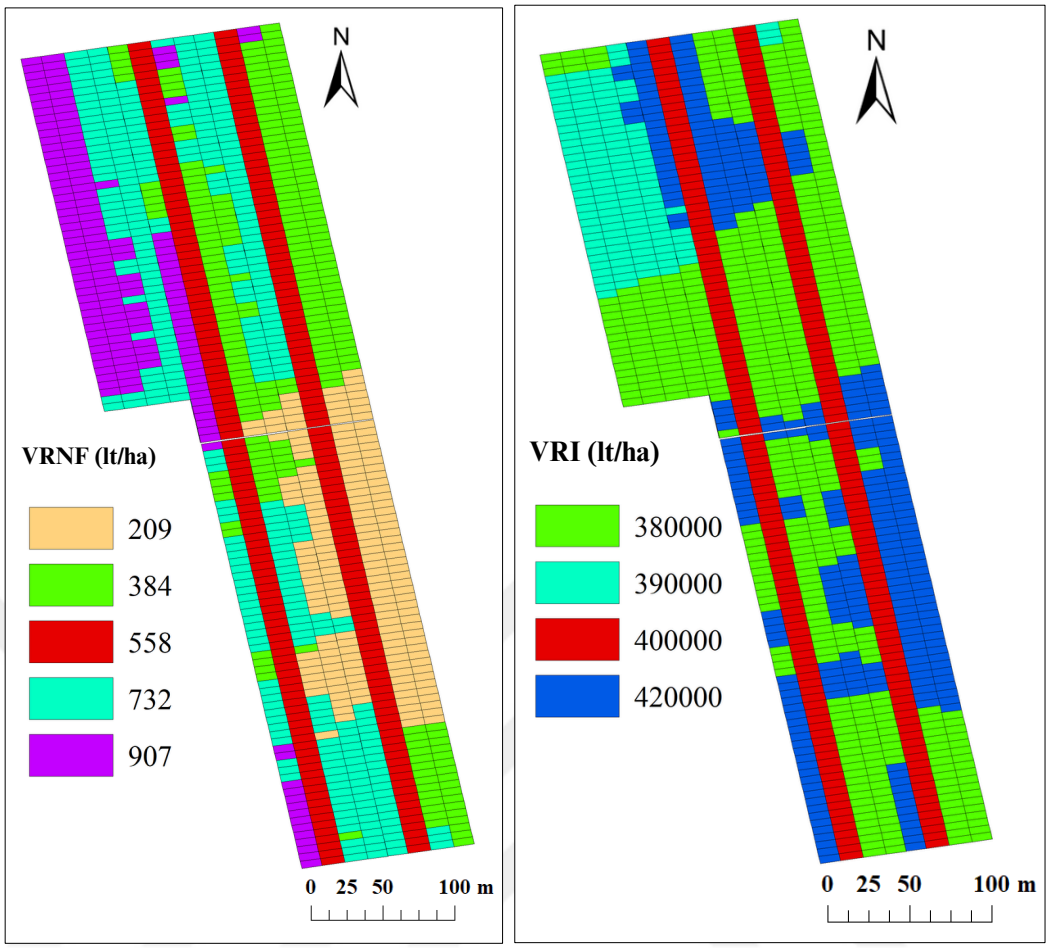


(a) (b)

Şekil 4.4. Su tutma kapasitesi yönetim bölgelerin haritası. a) Su tutma kapasitesi 4 sınıflı yönetim bölgeleri b) 4 sınıflı normalleştirilmiş ortalama gösterimi

4.5. Değişken Oranlı Fertigasyon Uygulama Haritaları

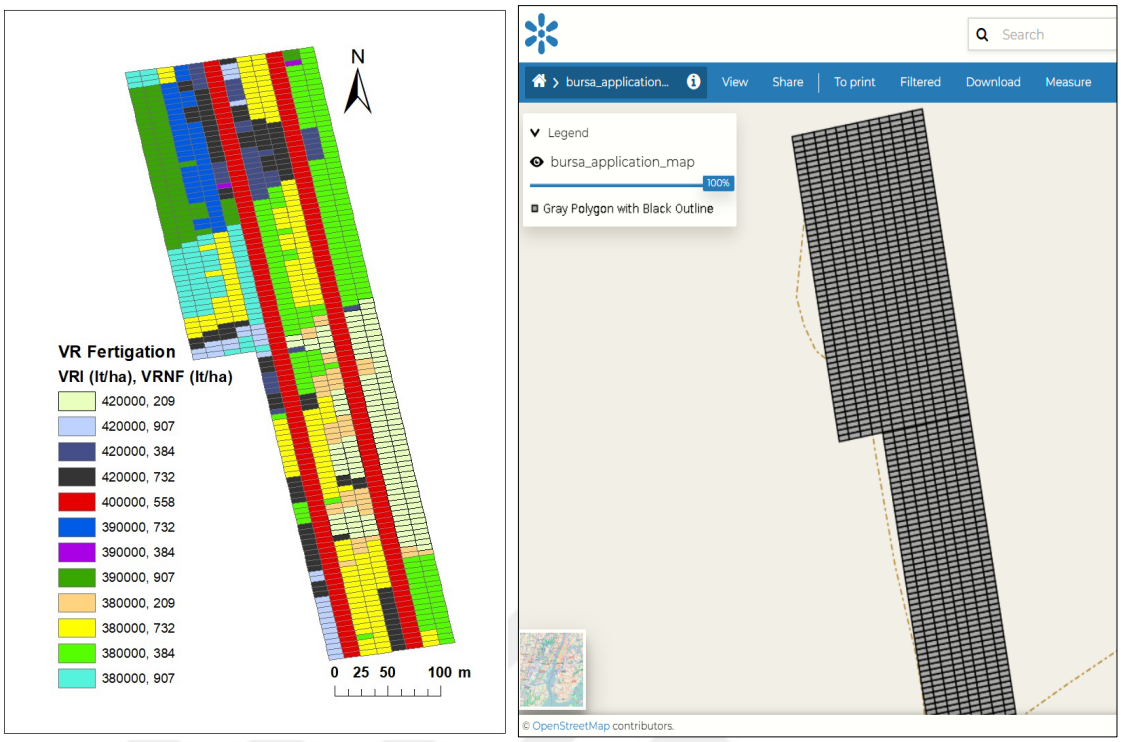
Toprak verimlilik ve su tutma kapasitesi yönetim bölgesinden elde edilen değişken oranlı uygulama haritaları Şekil 4.5a (VRNF) ve Şekil 4.5b'de (VRI) gösterilmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.5. Belirli bir tarih için değişken oranlı uygulama haritaları. a) değişken oranlı azot gübreleme haritası b) değişken oranlı sulama haritası

Uygulanacak fertigasyon haritası için, sulama haritaları gübreleme haritalarıyla birleştirilmiştir (Şekil 4.6a). Elde edilen arazi uygulamasının yapılabilmesi için Şekil 4.6b'da gösterildiği gibi Geoportala yüklenmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.6. Konuma özel uygulama haritası. a) fertigasyon haritası b) Geoportal'da fertigasyon haritası

4.6. Değişken Oranlı Fertigasyon Uygulama Sonuçları

VRFI'nin tarladaki gerçek saha testlerinde uygulanması, Şekil 4.6'da sunulan VRI ve VRNF uygulama haritaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tarla koşullarında makine kanatlarının isimlendirilmesi Şekil 4.7 verildiği şekilde yapılmıştır. Geliştirilen değişken oranlı fertigasyon makinesi ile arazide farklı günlerde 2 defa arazi testi uygulaması yapılmıştır. Bu testler ile sulama ve gübreleme haritalarındaki uygulamaların arazideki uygulama doğruluğu belirlenmeye çalışılmıştır. Araziye uygulanan miktarlar, makine üzerinde bulunan ölçüm sistemleri ile belirlenmiştir.

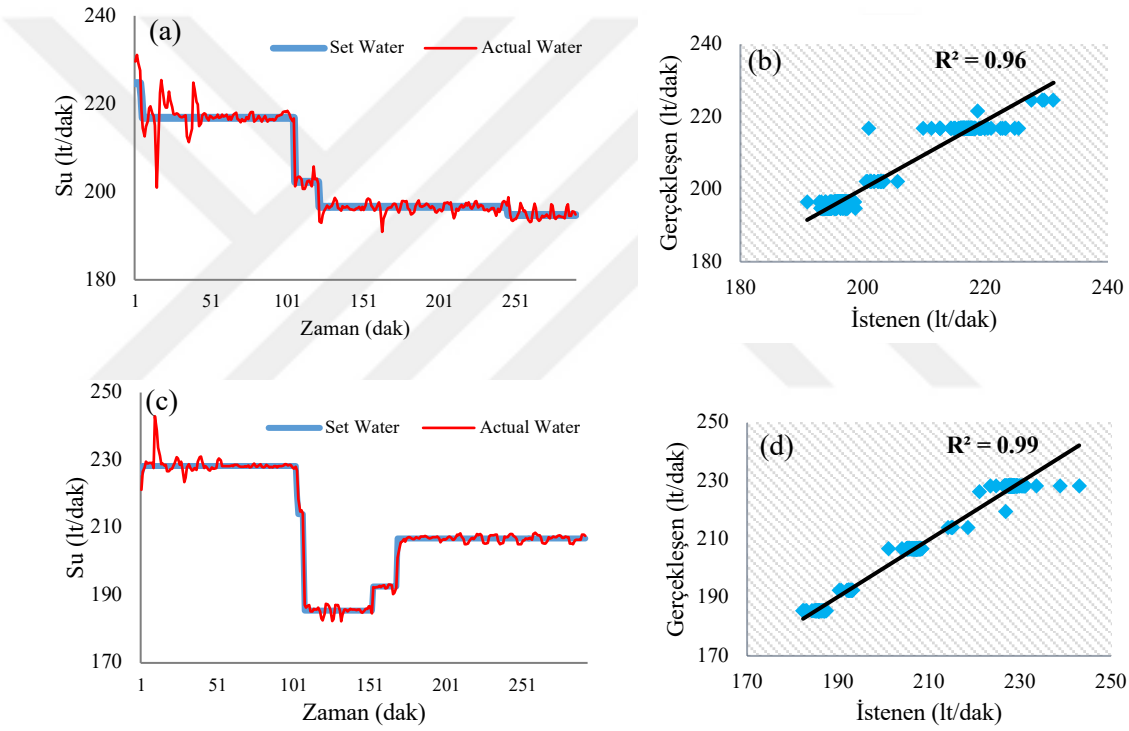


Şekil 4.7. Değişken Oranlı Fertigasyon Makine kanat bölümleri

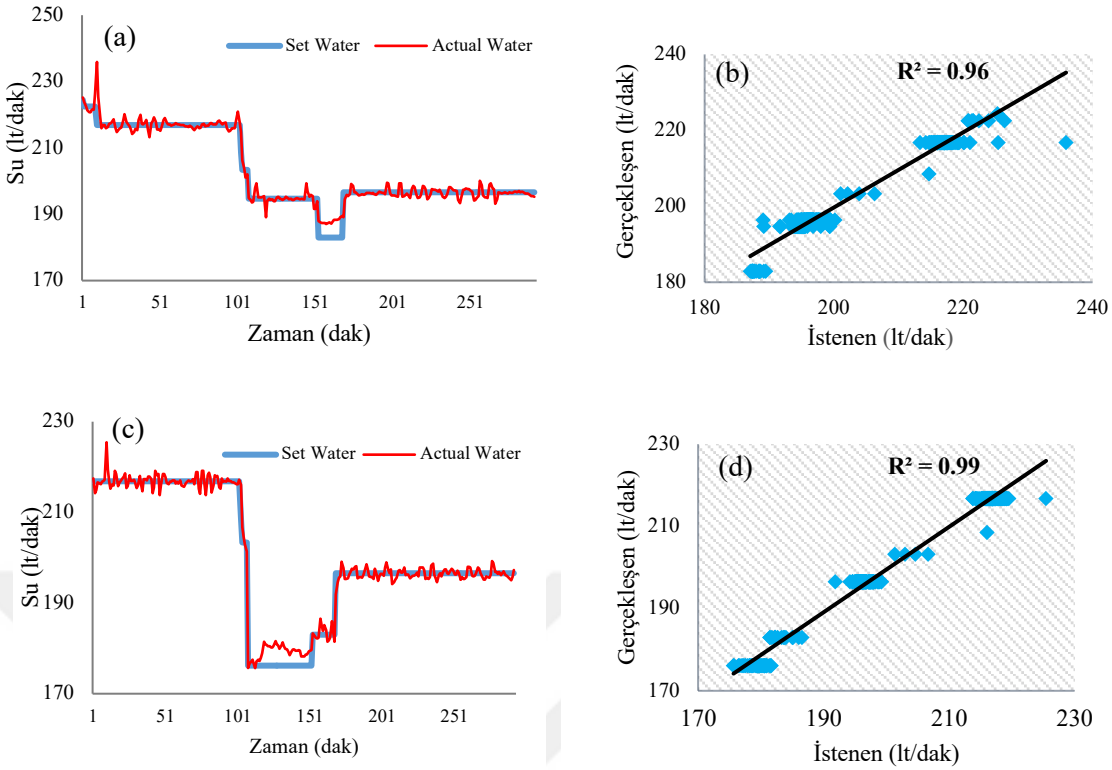
4.6.1. Değişken oranlı fertigasyon Test 1 sonuçları

Uygulanan sulama oranlarındaki değişimler ve bunların belirlenen değerlerle ilişkisi Şekil 4.8 ve Şekil 9'da, her bir bölümde uygulanan gübre oranları ise Şekil 4.10 ve Şekil 11'de gösterilmektedir.

Değişken oranlı sulama, belirlenen ve gerçekleşen sulama miktarı değerlerine göre umut verici sonuçlar göstermektedir. Hedeflenen sulama oranları iyi bir doğrulukla uygulanmış ve R^2 değerleri 0,96 ile 0,99 arasında değişmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen sistem ve yazılım başarılı olmuştur.

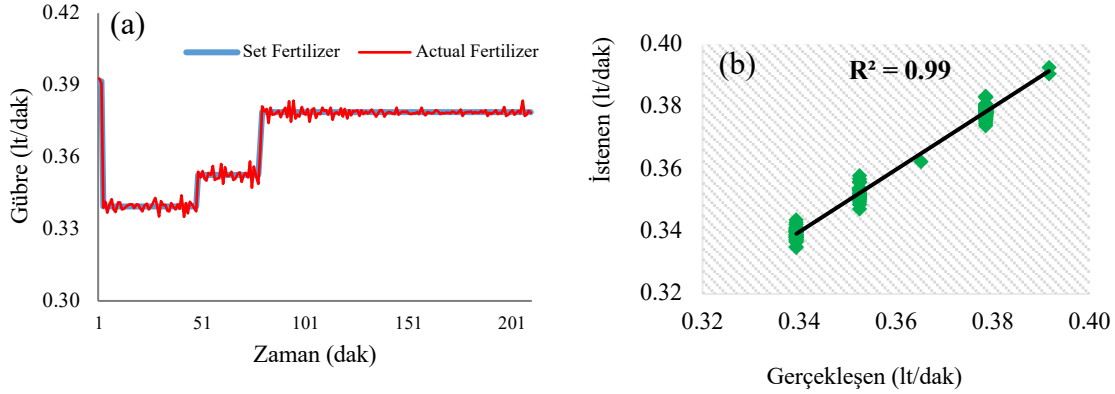


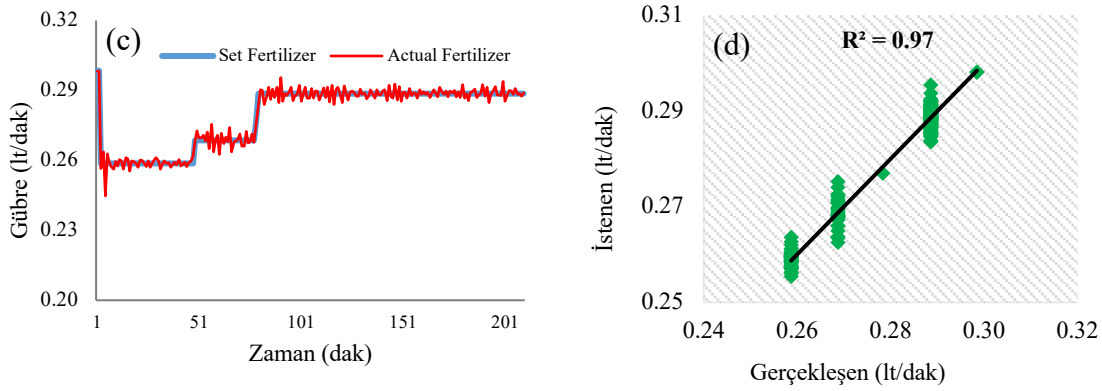
Şekil 4.8. Değişken oranlı sulama sonuçları (sol bölüm). a) ve b) Sol bölüm 1'de hedeflenen ve gerçekleşen sulama c) ve d), Sol bölüm 2'de hedeflenen ve gerçekleşen sulama



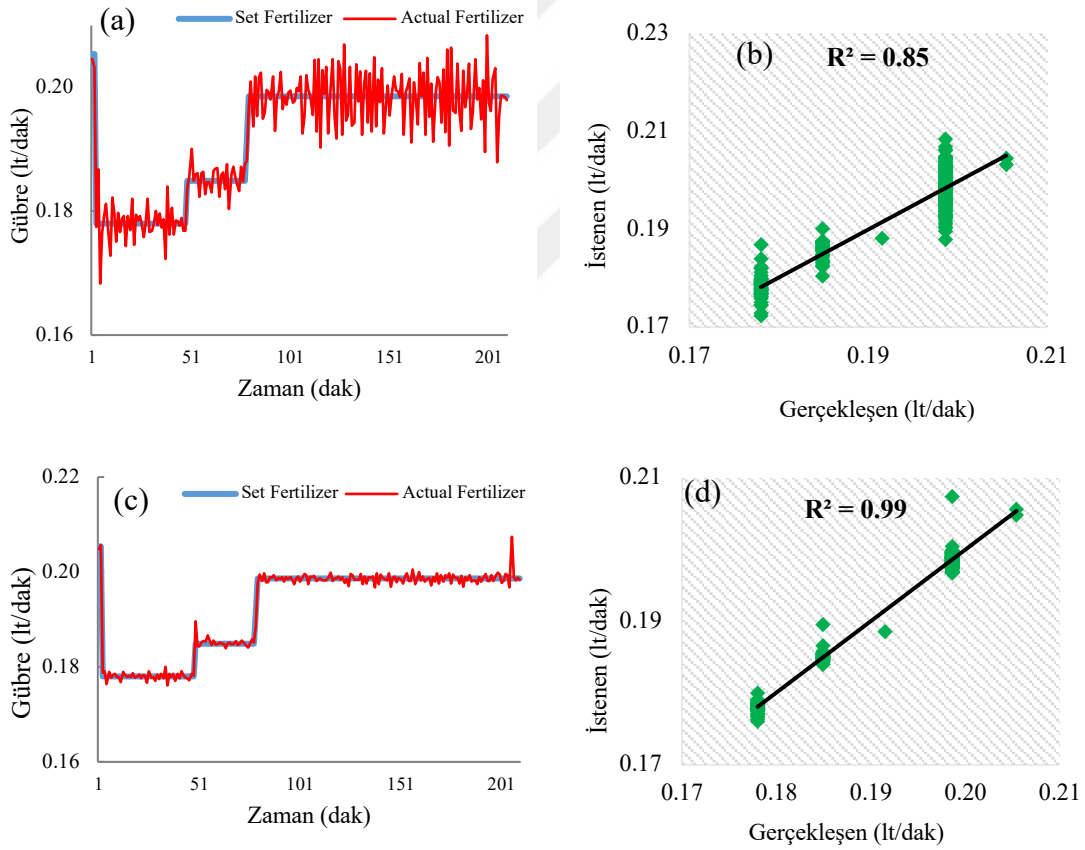
Şekil 4.9. Değişken oranlı sulama sonuçları (sağ bölüm). a) ve b) Sağ bölüm 1'de hedeflenen ve gerçekleşen sulama c) ve d) Sağ bölüm 2'de hedeflenen ve gerçekleşen sulama

Değişken oranlı gübreleme, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'deki grafiklerde de görüldüğü gibi umut verici sonuçlar göstermektedir. Gübre akış hızlarının ayarlanan ve uygulanan değerleri arasındaki R^2 değerleri 0,85 ile 0,99 arasında değişmekte olup yazılımın başarılı sonuçlarını teyit etmektedir.





Şekil 4.10. Değişken oranlı azot gübreleme sonuçları (sol bölüm). a) ve b) Sol bölüm 1'deki hedeflenen ve gerçekleşen gübreleme c) ve d) Sol bölüm 2'de hedeflenen ve gerçekleşen gübreleme



Şekil 4.11. Değişken oranlı azot gübreleme sonuçları (sağ bölüm). a) ve b) Sağ bölüm 1'de hedeflenen ve gerçekleşen gübreleme c) ve d) Sağ bölüm 2'de hedeflenen ve gerçekleşen gübreleme

Su oranı, ilgili bom bölümüne enjekte edilen gübre oranını değiştirmeden oransal su valfini ayarlayarak değiştirilebilmektedir. Su vanasının dinamik aralığı su akış hızında

değişikliğe izin vermiyorsa, zemin hızı değiştirilmeli; bu durumda gübre dozaj pompasının akış hızı, gübre oranını korumak için yeniden hesaplanmalıdır.

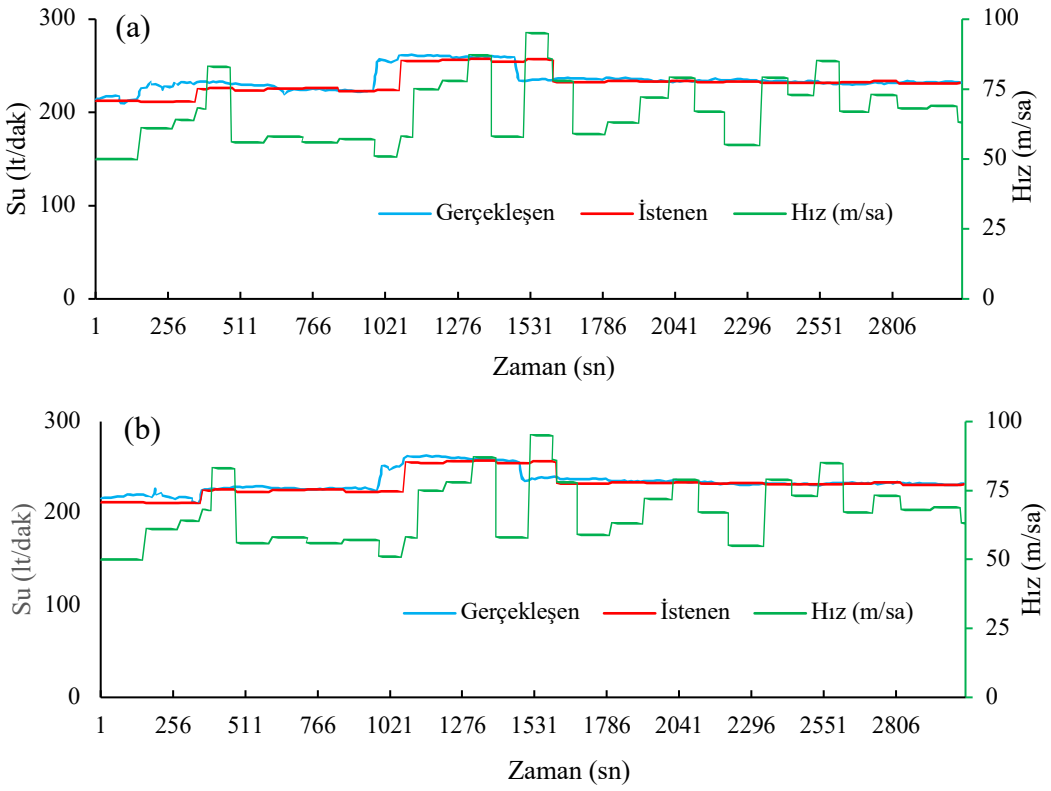
Bir uygulama haritası indirildiğinde, kontrol sistemi otomatik olarak gübreleme makinesinin her bir bölümü için her hücrenin gerektirdiği akış hızlarını hesaplamaktadır. Sistem daha sonra vanaların açılma oranlarını, dozaj pompalarının hızlarını ve hareketli arabanın zemin hızını optimize etmektedir. Kontrol sistemi, su akış hızını değiştirmek yerine öncelikli olarak zemin hızını değiştirmeye çalışmaktadır çünkü akış hızlarının birden fazla vanada geniş bir aralıkta değiştirilmesi ayarlama süresini artırmaktadır. Gübre uygulama oranlarının doğruluğunu artırmak için araştırmacılar granül gübre uygulaması için çeşitli elektronik kontrolörler geliştirmiştir (May & Kocabiyik, 2019; Maleki vd., 2008). Bell vd (2020), doğrusal hareket eden bir gübreleme sistemine monte edilmiş el tipi optik aktif sensörler, bir nitrojen akış ölçer ve sistemin konumunu belirlemek için bir kodlayıcı kullanarak NDVI verileri elde etmek için Arduino mikro denetleyicileri kullanmış ve otomatik bir gübreleme sistemi kurmuştur. Sistemin, elle hesaplanan oranlara kıyasla N uygulama oranlarını doğru bir şekilde belirlemek için NDVI verilerini kullanabildiğini ve ölçülen gübre akış oranları ile elle yapılan hesaplamalar arasında iyi bir uyum ($R^2 = 0,95$) olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte, N uygulaması hesaplaması için ürün verilerine güvenmek ideal değildir ve ürün verimini etkileyen toprak verimliliği, hava durumu ve topografya özellikleri gibi daha fazla girdi değişkeni dikkate alınmalıdır (Guerrero vd., 2021a; Nawar vd., 2017).

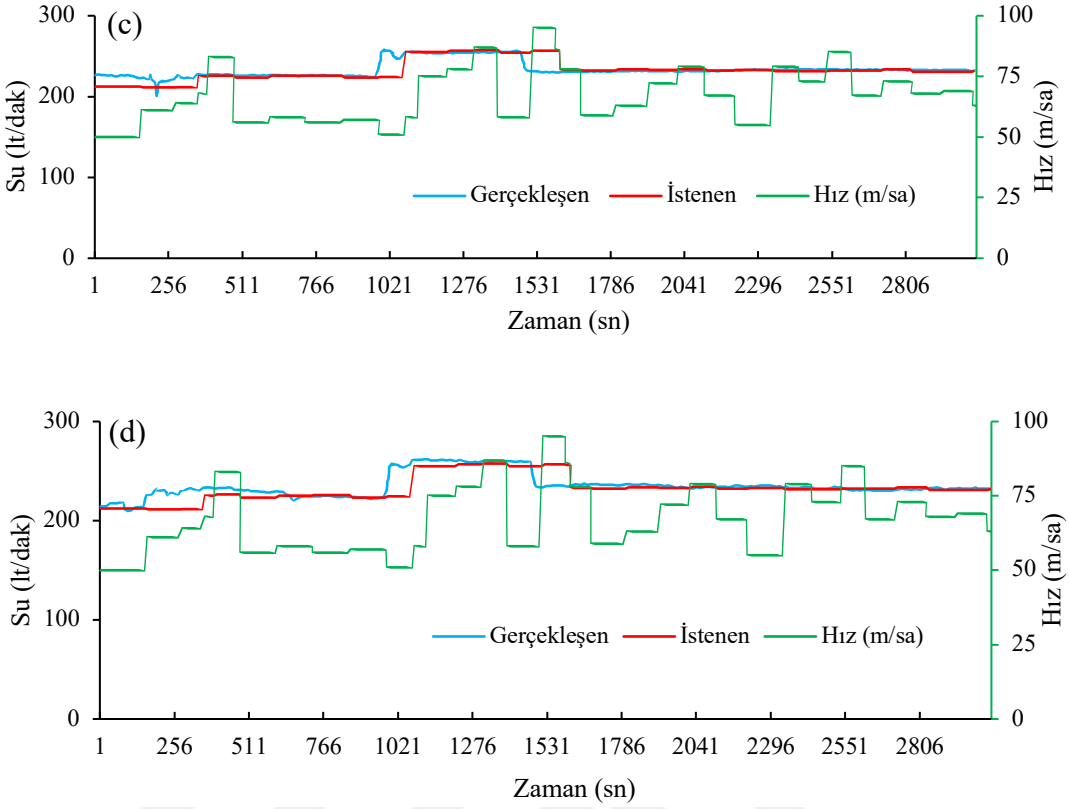
Mevcut çalışmanın bulguları, Şekil 4.8-4.11'de gösterildiği gibi, doğru miktarda su ve gübrenin doğru zamanda uygulanması konusunda umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır. Sulama ve gübre uygulama doğruluğu, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da $R^2 = 0,96 – 0,99$ ve Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de $R^2 = 0,85 – 0,99$ ile sağ taraftaki grafiklerde gösterildiği gibi iyi bir doğrulukla uygulanmıştır. Sonuç olarak, kontrol sistemi saha testleri sırasında belirlenen gübreleme değerlerini uygulamada iyi performans göstermiştir. Bir uygulama haritası indirildiğinde, kontrol sistemi gübreleme makinesindeki her bir hücre için, dolayısıyla makinenin her bir bölümü için gereken akış hızlarını otomatik olarak hesaplamaktadır. Ardından, sistem vanaların açılma oranlarını, dozaj pompalarının hızlarını ve hareketli arabanın zemin hızını optimize etmektedir. Kontrol sistemi su debisini değiştirmek yerine öncelikli olarak zemin hızını değiştirmeye

çalışmaktadır. Çünkü debilerin birden fazla vanada geniş bir aralıkta değiştirilmesi ayarlama süresini uzatmaktadır.

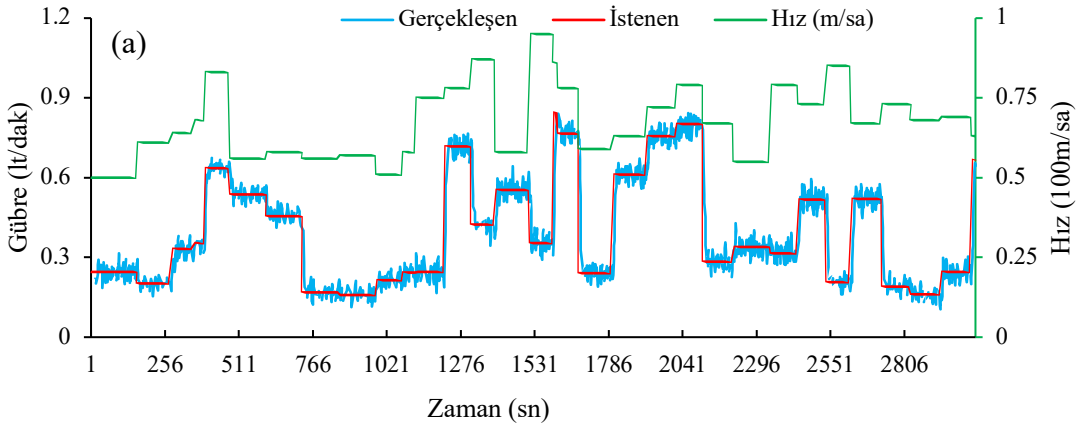
4.6.2. Değişken oranlı fertigasyon Test 2 sonuçları

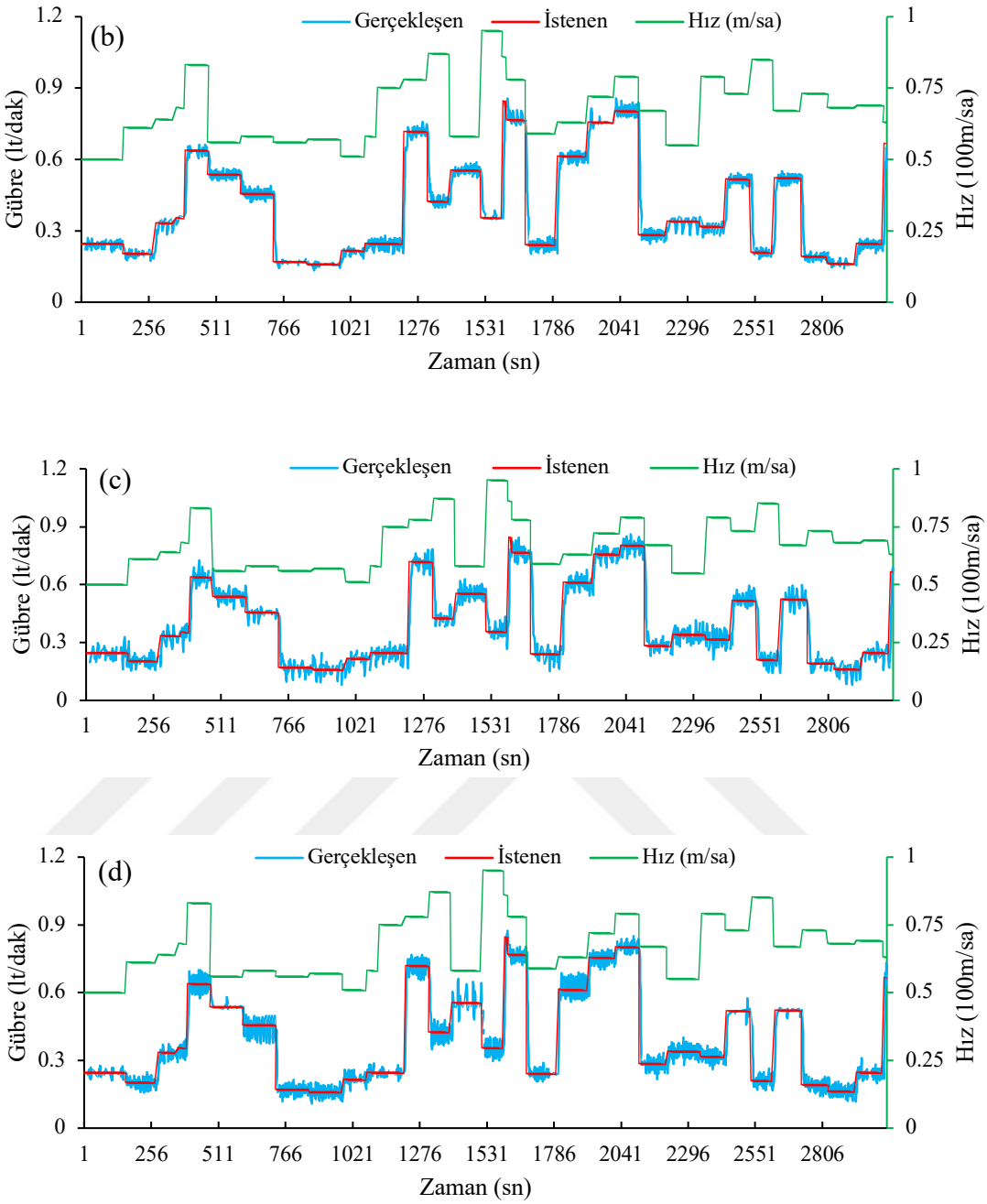
Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 değişken oranlı uygulama sırasında zemin hızının davranışını göstermektedir. Şekil 4.12a–d'deki yeşil çizgiler, su uygulama oranlarının değişen set değerlerine yanıt olarak zemin hızındaki değişiklikleri göstermektedir. Grafiklerin ilk yarısında, sulama oranlarının ayarlanan değerlerini sağlamak için hem oransal su vanası açıklıkları hem de zemin hızı değiştirilmiştir. Grafiklerin ikinci yarısı, zemin hızı ayarının oransal su vanalarında küçük ayarlamalar yapılmadan istenen uygulama oranlarını uygulamak için yeterli olduğunu ortaya koymaktadır. Dört su vanası da aynı davranışı göstererek istenen sulama uygulama oranlarının uygulanmasındaki tutarlılığı doğrulamaktadır. Sıvı gübre ihtiyaçlarındaki hızlı dalgalanmalar, Şekil 4.13a–d'de gösterildiği gibi dozaj pompaları tarafından başarıyla idare edilmiştir.





Şekil 4.12. Makine hıza bağlı değişken oranlı sulama sonuçları. a) Sol bölüm 1 b) Sol bölüm 2 c) Sağ bölüm 1 d) Sağ bölüm 2





Şekil 4.13. Makine hıza bağlı değişken oranlı N fertigasyon sonuçları. a) Sol bölüm 1 b) Sol bölüm 2 c) Sağ bölüm 1 d) Sağ bölüm 2

HR-VRFM'nin test sonuçları, su vanalarının sulama haritalarında istenen miktarlarda su sağlamak için kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak, farklı sulama suyu kaynaklarına yönelik sistem gereksinimlerinin ve tepkilerinin daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Gübre pompaları, bölümlerdeki gübre oranını sağlamak için iyi bir doğrulukla (%0–3 hata) kullanılabilmektedir. PID kontrol sistemi, tarlada kısa bir mesafeye (<0,5 m)

karşılık gelen ve genellikle 30 saniyeden kısa bir sürede ayarlanan değerleri otomatik olarak ayarlayabilmektedir.

Bu araştırmada, mobil aracın yer hızının önemli ölçüde düşük olması ve kontrol sisteminin işlem sırasında hedeflenen uygulama oranlarını ayarlayabilmesine olanak tanıması nedeniyle, yavaş tepki veren su vanalarının kullanılması tercih edilmiştir. Boylamsal uygulama çözünürlüğü 1 m kadar düşük olabilmektedir, ancak kontrol işlemi sırasında kat edilen mesafe nedeniyle uygulamada dikkatli kullanılmalıdır, bu da 1 m uzunluğundaki hücrelerdeki uygulama doğruluğunu azaltabilmektedir. Ayrıca, püskürtülen sıvının geometrik şekli ve farklı rüzgâr hızlarının neden olduğu sürüklenme yönü hücrelerin doğru boyutunu belirlemek için daha iyi anlaşılmalıdır ve bu da daha fazla araştırma gerektirmektedir.

Gübreleme tamamlandıktan sonra bir günlük dosyası hazırlanarak bulut portalına aktarılmakta ve istenirse anında bir USB'ye indirilebilmektedir. Günlük dosyası, zaman, su basıncı, GPS verileri, zemin hızı verileri, bölüm seti ve gerçek sulama ve gübreleme oranları gibi gübreleme işlemi sırasında kullanılan tüm dijital verileri içermektedir. Buluttan veya USB'den bir harita indirmek yerine, hücrelerin uzunluklarını manuel olarak seçerek ve istenen su ve gübre oranlarını manuel olarak girerek dört bölüm için manuel olarak bir uygulama haritası da oluşturulabilmektedir. Kontrol sistemi, mobil arabanın minimum ve maksimum zemin hızları kullanıcı tercihine veya su kaynağının akış hızına göre ayarlanacak şekilde programlanabilmektedir.

Bu çalışmada sulama suyu sağlayan ana pompa üzerinde bir VSD kullanılamamıştır. Gelen debilerin hız ayarlamaları üzerindeki etkisini en aza indirmek için tambur girişinde debi sensörü ile birleştirilmiş değişken debili bir vana kullanılamamıştır. Farklı tarla veya çiftliklerdeki sulama pompa istasyonları veya hidrantlar tarafından sisteme farklı su debileri ve basınçları verilebilmektedir. Ayrıca sistem, farklı ürün ve toprak koşulları altında farklı büyüklükteki tarlalarda kullanılabilmektedir. Tek bir tam otomatik VRFI sistemi, uygulamada karşılaşılabilecek çok çeşitli gereksinimlerle uyumlu olmayabilmektedir. Prototip VRFI sistemi 80 ila 600 lt/ha arasında gübre uygulama oranları sağlayabilmekte, bu da bitkisel üretimdeki çoğu azot uygulama ihtiyacı için

yeterli olmaktadır. Sulama ihtiyaçları da sabit bir çalışma genişliği ile uygulama başına 15–50 mm arasında karşılanabilmektedir.

Son yıllarda, akıllı tarım teknolojileri geliştirilerek gübre uygulama oranlarının doğruluğunu artırmak için araştırma çalışmaları yapılmaktadır. Örneğin, Aloetti vd. (2018) otomatik hassas sulama sisteminin bileşenlerini yöneten akıllı bir platform sunmuştur. Ramachandran vd. (2018) IoT, bulut bilişim ve optimizasyon araçlarını birleştirerek tarımda su kullanımını azaltmak için otomatik bir sulama sistemi sunmuştur. Williams vd. (2018), bir üstten pivot sistemi kullanarak değişken oranlı bir gübreleme sistemi geliştirmiştir. Ayrıca, King vd., 2002; Chávez vd., 2009, hassas sulama desteklemek için sensör teknolojileri ve değişken oranlı uygulamalar da dahil olmak üzere IoT geliştirmeye ve uyarlamaya odaklanmıştır. Bu çalışmalar, hassas sulamanın yalnızca ürün gereksinimlerine göre bir tarlanın her bölümünde optimum su oranlarını uygulayarak ekonomik verimliliği artırmakla kalmayıp aynı zamanda maliyetleri de azaltabileceğini göstermektedir (O'Shaughnessy vd., 2015; O'Shaughnessy vd., 2019; Ortuani vd., 2019; Plaščak vd., 2021; Sharma & Irmak; 2021).

Bu araştırmada test edilen HR-VRFM, toprak özellikleri, nem içeriği ve hava durumu ile ilgili verileri depolayabilen ve bulut içinde gerçek zamanlı olarak erişilebilen değişken oranlı uygulama haritaları oluşturabilen bulut tabanlı bir ICT portalına sahip bir sistemdir. Mevcut literatürde hem sulama hem de sıvı gübre uygulama oranlarını kontrol edebilen bir bom bölümü kontrol sistemine sahip, tam otomatik tamburlu değişken oranlı fertigasyon makinesi (HR-VRFM) bulunmamaktadır. Konuma özel gübreleme ile gelişmiş algılama ve kontrol teknolojilerinin kombinasyonu hassasiyeti artırabilir, çevresel etkileri azaltabilir, su tasarrufu sağlayabilir, verimi ve kaliteyi artırabilir ve ekonomik avantajlar sağlayabilir.

Kaynak yönetimi son yıllarda büyük önem kazanmış ve girdilerin daha sorumlu bir şekilde kullanılması için teknolojiye rehberlik etmiştir. Veri analizi ve tarım girdilerinin doğru uygulanması için en güncel verilerin kullanılması da çok önemlidir ve bu da toprak ve bitki özelliklerinin gerçek zamanlı olarak algılanmasını gerektirmektedir. Bu çalışma, bir tarladaki anlık toprak nem içeriğini toplamak için LoRaWAN teknolojisi kullanılarak konuma özel sulama ihtiyaçlarının haritalanabileceğini, konuma özel gübre ihtiyaçlarının

ise çevrimiçi bir Vis-NIR spektrometresinden elde edilen veriler kullanılarak haritalanabileceğini göstermiştir.

Çağdaş tarımda, su ve gübre kullanımının verimliliğini optimize etmek, bitki verimini ve kalitesini artırmak ve sürdürülebilirlik ve çevre korumasını sağlamak için çok önemlidir. Bu çalışmada son teknoloji ürünü bulut tabanlı otomatik tamburlu değişken oranlı fertigasyon makinesi kullanılmıştır. Tamburlu sulama sistemi yerine damla sulama sistemi kullanılsaydı, bazı sınırlılıklar ile karşılaşılması mümkün olacaktı. Damla sulama sisteminin yapısı gereği sulama lateral ağına bağlı olarak yapılmaktadır. Damla sulama her lateralin hizmet ettiği alan için aynı oranda sulama ve gübreleme yapma imkânı sunmaktadır. Lateral boyunca değişken oranlı sulama ve gübreleme ihtiyaçlarına damla sulama sistemi olanak vermemektedir. Bu durum su ve gübrenin daha az hassas bir şekilde verilmesine yol açabilmektedir. Bu hassasiyetsizlik, alanların hem yetersiz hem de aşırı gübrelenmesine yol açarak bitki sağlığını olumsuz etkileyebilmekte ve kaynakların gereksiz yere tüketilmesine katkıda bulunabilmektedir. Ek olarak, damlama sistemi işletme ve bakım için daha fazla iş gücü gerektirmektedir, bu da genel maliyeti artırmakta ve gübreleme uygulamalarında insan hatalarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Buna karşılık, bulut tabanlı otomatik tamburlu değişken oranlı fertigasyon makinesi, sulama ve gübreleme teknolojisinde önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Bu sistem, su ve gübrenin bitkilere hassas ve özel bir şekilde verilmesini sağlayan yüksek çözünürlüklü uygulama haritalarıyla öne çıkmaktadır. Bu hassasiyet, her bitkinin büyümesi için en uygun miktarda su ve gübreyi almasını sağlayarak israfı önemli ölçüde azaltmakta ve bitki verimini ve kalitesini arttırmaktadır. Ayrıca, otomatik sistem gelişmiş kontrol teknolojilerini, algılama ve modelleme yeteneklerini, toprak nem sensörlerini ve bir Karar Destek Sistemini (DSS) entegre edebilmektedir. Bu bileşenler, toprak ve bitki koşullarını sürekli olarak izleyerek gübreleme oranlarını bitkilerin özel ihtiyaçlarına göre gerçek zamanlı olarak ayarlayabilmektedir. Bu otomasyon seviyesi sadece el emeği ihtiyacını en aza indirmekle kalmayıp, aynı zamanda gübreleme ve sulama süreçlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini de arttırmaktadır.

Otomatik bir sistem ile kaynakların yalnızca ihtiyaç duyulan yerde ve zamanda uygulanması sağlanarak daha yüksek su ve gübre kullanım verimliliği elde edilebilmektedir. Bu durumu, kıt su kaynaklarının korunmasına, gübrenin olumsuz

çevresel etkisinin azaltılmasına ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan genel karbon ayak izinin düşürülmesine yardımcı olduğundan sürdürülebilir tarım için çok önemlidir. Geliştirilen sistem, geleneksel tamburlu sulama veya fertigasyon sistemlerine göre daha karmaşık ve daha maliyetlidir. Bununla birlikte, geliştirilmiş HR-VRFM'nin N ve su girdilerini azaltabileceği ve toprakların verim potansiyelini optimize edebileceği varsayılabilir; bu varsayım, bu çalışmada geliştirilen sistemin ekonomik ve çevresel fizibilitesini değerlendirmek için daha fazla araştırma yapılmasını gerektirmektedir.

5. SONUÇ

Hassas tarım, ileri teknolojileri entegre ederek, çevresel etkileri azaltarak, su kaynaklarını koruyarak, bitki verimini ve kalitesini artırarak, ekonomik faydalar sağlayarak ve veri odaklı karar vermeyi teşvik ederek sürdürülebilir ve daha iyi bir tarımsal gelecek vaat etmektedir. Geleneksel damla sulama sistemleri tarım camiasına iyi hizmet etmiş olsa da bulut tabanlı otomatik tamburlu değişken oranlı fertigasyon makinelerinin ortaya çıkışı hassas tarımda yeni bir döneme işaret edecektir. Uygulama haritalarının artan çözünürlüğü, en son teknoloji ve otomasyonla birleştiğinde, kaynak verimliliği, sürdürülebilirlik ve bitki verim performansı açısından çok daha üstün hale getirmektedir. Bu tür gelişmiş sulama ve gübreleme sistemlerinin benimsenmesi, tarımsal verimliliğin artırılması ve gelecek nesiller için çevrenin korunması gibi zorlukların üstesinden gelinmesine yönelik önemli bir adımdır.

Bu çalışmada, değişken oranlı gübreleme ve sulama için gerekli verilerin üretilmesinde yüksek teknolojilerin kullanımı gerçekleştirilmiştir. Toprak nem düzeyini belirlemek için, toprak sensörleri, topraktaki bitki besin elementlerinin belirlenmesi için yakın algılama teknolojileri kullanılmıştır. Bunun yanında uydu görüntülerinden NDVI indisi değeri çalışmada kullanılmıştır. Tüm elde edilen değerlerin konumsal değişimini belirlemek için CBS teknolojileri kullanılmıştır. Dinamik yönetim bölgelerinin ve uygulama haritalarının oluşturulmasında yukarıda sözü edilen ilgili verileri birleştiren, analiz eden istatistik ve makine öğrenme yöntemleri kullanılmıştır. Tüm yöntemlerin otomatik olarak veri üretimi, dinamik yönetim ve uygulama haritalarının hazırlanmasının mümkün olabileceği belirlenmiştir. Geliştirilen sistem, teknoloji ve değişken oranlı uygulamalar açısından iyi performans göstermiştir. Çiftçiler, değişen gübre ve sulama gereksinimlerine sahip belirli alanları hedefleyerek aşırı gübre ve su uygulamasını önleyebilir, böylece israf ve çevresel etki azaltılabilir. Arazi uygulama çalışmaların yapılmasında kullanılan bulut tabanlı otomatik HR-VRFM tarla bitkileri için son teknoloji akıllı sulama ve gübre uygulama potansiyeline sahiptir. Önerilen entegre çözüm, yeni toprak algılama teknolojileri, tamburlu fertigasyon sistemi, ICT altyapısı, algoritmalar ve karar destek araçları üzerine inşa edilmiştir. Birbiriyle uyumlu donanım ve yazılım altyapısının çiftçiler için pratik sonuçları bulunmaktadır. Hassas tarım, toprak

ve su yönetimi ve çevresel toprak tehditlerinin ele alınmasında gelecekteki araştırma projeleri için değerli bir kaynak görevi görmektedir.

HR-VRFM hassas fertigasyon makinası, su ve gübreyi doğrudan kök bölgesine ileterek su uygulama verimliliğinin artmasına katkıda bulunabilir. Bu teknik, su ve besin kayıplarını en aza indirerek bitkilerin alımını optimize eder ve çevresel etkiyi azaltabilir. Hassas fertigasyon uygulamalarının hayata geçirilmesi, tarımda su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımının sağlanmasına yardımcı olabilir ve su sıkıntısı çeken bölgelerde tarımsal ve ekonomik kalkınmayı teşvik edebilir. Toprak yakın algılama, uzaktan algılama, makine öğrenme ve CBS gibi gelişmiş teknolojilerle kombinasyonu, hassas tarım uygulamalarının doğruluğunu ve verimliliğini önemli ölçüde artırarak sürdürülebilir ve optimize edilmiş bitki üretimi için yeni fırsatlar sunabilir.

Değişken oranlı fertigasyon, tarımda kaynak kullanımını optimize etmek ve bitki verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilen modern bir sulama ve gübreleme yöntemidir. Bu yöntemin başarısı, dinamik yönetim bölgelerinin doğru bir şekilde modellenmesi ve verilerin etkin bir şekilde yönetilmesine bağlıdır. Önemi:

- Kaynak Verimliliği: Değişken oranlı fertigasyon, su ve gübre gibi tarımsal girdilerin verimli kullanılmasını sağlar. Dinamik yönetim bölgeleri sayesinde, her bitki bölgesine ihtiyaç duyduğu kadar su ve gübre verilerek israfın önüne geçilir.
- Verimlilik Artışı: Doğru veri yönetimi ve modelleme ile bitkilerin ihtiyaçları daha hassas bir şekilde karşılanır. Bu da bitki sağlığını ve verimini artırır, sonuç olarak tarımsal üretimde önemli kazanımlar elde edilir.
- Çevresel Sürdürülebilirlik: Kaynakların verimli kullanımı, çevresel etkileri en aza indirir. Değişken oranlı fertigasyon uygulamaları ile su tasarrufu sağlanır ve gübre kullanımından kaynaklanan çevresel kirlilik azaltılır.
- Ekonomik Kazanımlar: Çiftçiler için maliyet tasarrufu ve daha yüksek verim elde etme imkânı sunar. Doğru gübre ve su yönetimi, üretim maliyetlerini düşürürken ürün kalitesini ve miktarını artırır.
- Gelişmiş Veri Yönetimi: Tarımsal verilerin toplanması, analizi ve kullanımı, tarım yönetiminde daha bilinçli kararlar alınmasını sağlar. Bu hem kısa vadeli operasyonel başarıları hem de uzun vadeli stratejik planlamayı destekler.

Dinamik yönetim bölgeleri için yapılan modelleme ve veri yönetimi çalışmaları, değişken oranlı fertigasyon uygulamalarının etkinliğini artırmakta ve bu yenilikçi tarım teknolojisinin yaygınlaştırılmasına önemli katkılarda bulunmaktadır. Değişken oranlı fertigasyon, tarımsal sürdürülebilirliği ve verimliliği artırmada kilit bir rol oynar. Bu alandaki modelleme ve veri yönetimi çalışmaları tarımın geleceğinde daha verimli ve çevre dostu uygulamaların yolunu açmaktadır. Dinamik yönetim bölgelerinin oluşturulmasında karşılaşılabilecek bazı zorluklar söz konusu olabilecektir. Örneğin her çiftçinin yeterli teknolojik bilgiye sahip olmaması uygulamada bazı sorunları da beraberinde getirecektir. Bu tür çalışmaların profesyonel şirketler tarafından uygulanması İngiltere gibi ülkelerde yaygın olarak kullanılırken Türkiye gibi arazi büyüklükleri yeterli olmayan ülkelerde yaygınlaşamamıştır. Oysaki büyük işletmelerin bu sistemleri kullanımının yaygınlaştırılması kaynakların etkin kullanımı için oldukça önemlidir.

KAYNAKLAR

Afzaal, H., Farooque, A. A., Abbas, F., Acharya, B., & Esau, T. (2020). Precision irrigation strategies for sustainable water budgeting of potato crop in Prince Edward Island. *Sustainability*, 12, 2419. https://doi.org/10.3390/su12062419

Ahmad, M., Shah, S., & Abbass, Y. (2020). The role of heuristic-driven biases in entrepreneurial strategic decision-making: evidence from an emerging economy. *Management Decision*, *59*(3), 669691. https://doi.org/10.1108/MD-09-2019-1231

Aleotti, J., Amoretti, M., Nicoli, A., & Caselli, S. (2018). A smart precision-agriculture platform for linear irrigation systems. In 2018 26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), pp. 1–6. IEEE. https://doi.org/10.23919/softcom.2018.8555841

Anonymous, (2023). MGM, Türkiye İklimi, (2023). Meteoroloji Genel Müdürlüğü. 10 Aralık 2023 tarihinde http://www.mgm.gov.tr adresinden erişildi.

Arshid, M., & Kamal, M. (2020). Regional geotechnical mapping employing Kriging on electronic geodatabase. *Applied Sciences*, *10*(21), 7625. https://doi.org/10.3390/app10217625

Badr, M.A., Ali, E., & Salman, S. R. (2023). Effect of nitrogen application and fertigation scheduling on potato yield performance under drip irrigation system. *Gesunde Pflanzen,* 75, 2909–2918. https://doi.org/10.1007/s10343-023-00871-y

Bai, X., Wang, Y., Huo, X., Salim, R., Bloch, H., & Zhang, H. (2019). Assessing fertilizer use efficiency and its determinants for apple production in China. *Ecological Indicators*, 104, 268–278. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.006

Bantchina, B. B., Gündoğdu, K. S., Arslan, S, Ulusoy, Y, Tekin, Y, Pantazi, X. E., Dolaptsis, K., Paraskevas, C., Tziotzios, G., Qaswar, M., & Mouazen, A. M. (2024). Spatiotemporal modeling of soil water dynamics for site-specific variable rate irrigation in maize. *Soil Systems*, *8*(1), 19. https://doi.org/10.3390/soilsystems8010019

Bantchina, B. B., Mucan, U., & Gündoğdu, K. S. (2017). Land availability analysis in Bursa using Geographic Information Systems. In Proceedings Book, Proceedings of the 5th International Participation Soil and Water Resources Congress; Kırklareli, Turkey, 12 – 15 September 2017; Atatürk Soil Water and Agricultural Meteorology Research Institute Kırklareli, Turkey, 2017, Volume 1, pp. 65–74.

Barnes, R. J., Dhanoa, M. S., & Lister, S. J. (1989). Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy, 43*(5), 772–777. https://doi.org/10.1366/0003702894202201

Bell, S., Koc, A. B., Maja, J. M., Payero, J., Khalilian, A., & Marshall, M. (2022). Development of an automated linear move fertigation system for cotton using active remote sensing. *AgriEngineering*, *4*(1), 320–334. https://doi.org/10.3390/agriengineering4010022

Bernardi, A., Bettiol, G., Ferreira, R., Santos, K., Rabello, L., & Inamasu, R. (2016). Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. *Precision Agriculture, 17*(6), 737–752. https://doi.org/10.1007/s11119-016-9446-9

Biggs, A., Crawford, M., Andrews, K., Sugars, M., Smith, D., & Brown, W. (2021). On the accuracy of soil survey in Queensland, Australia. *Soil Research*, *59*(4), 359. https://doi.org/10.1071/sr20143

Bryan, B., King, D., & Zhao, G. (2014). Influence of management and environment on Australian wheat: information for sustainable intensification and closing yield gaps. *Environmental Research Letters*, *9*(4), 044005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044005

Buenemann, M., Coetzee, M., Kutuahupira, J., & Maynard, J. (2023). Errors in soil maps: the need for better on-site estimates and soil map predictions. *Plos One*, *18*(1), e0270176. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270176

Cahill, R. and Lund, J. (2013). Residential water conservation in Australia and California. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *139*(1), 117–121. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000225

Carvalho, C., Nunes, F., Antunes, M., & Nolasco, M. (2015). Soil surveys in Brazil and perspectives in soil digital mapping. *Soil Horizons*, *56*(6), 0. https://doi.org/10.2136/sh14-01-0002

Cassman, K., Dobermann, A., & Walters, D. (2002). Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*, *31*(2), 132–140. https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.132

Castrignanò, A., et al., (2019). agricultural internet of things and decision support for precision smart farming. *ACADEMIC PRESS, Elsevier*, pp. 459.

Chang, F., Liu, L., Wang, Y., Liu, J., & Bai, X. Impact of social networks on fertilizer use efficiency in China: How does green fertilization technology work?, 10 May 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2710431/v1

Chapman, H. D. (1965). Cation-exchange capacity. Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties, 9, 891–901.

Chávez, J. L., Pierce, F. J., Elliott, T. V., & Evans, R. G. (2009). A Remote Irrigation Monitoring and Control System (RIMCS) for continuous move systems. Part A: Description and development. Prec Agric.

Cheng, H., Yu, Q., Abdalhi, M. A. M., Li, F., Qi, Z., Zhu, T., Cai, W., Chen, X., & Feng, S. (2022). RZWQM2 Simulated drip fertigation management to improve water and nitrogen use efficiency of maize in a solar greenhouse. *Agriculture*, *5*(*12)*, 672. https://doi.org/10.3390/agriculture12050672

Coates, R., Sahoo, P., Schwankl, L., & Delwiche, M. (2011). Fertigation techniques for use with multiple hydrozones in simultaneous operation. *Precision Agriculture*, *2*(13), 219–235. https://doi.org/10.1007/s11119-011-9239-0

Coelho, F., Giasson, E., Campos, A., Tiecher, T., Costa, J., & Coblinski, J. (2021). Digital soil class mapping in Brazil: a systematic review. *Scientia Agricola*, *78*(5). https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0227

Costa, E., Samuel-Rosa, A., & Anjos, L. (2018). Digital elevation model quality on digital soil mapping prediction accuracy. *Ciência E Agrotecnologia*, *42*(6), 608–622. https://doi.org/10.1590/1413-70542018426027418

Dragino LSE01-LoRaWAN Soil Moisture & EC Sensor User Manual. 17 Haziran 2023 tarihinde https://www.dragino.com/products/agriculture-weather-station/item/277-se01-lb adresinden erişildi.

Dudley, L., Ben-Gal, A., & Lazarovitch, N. (2008). Drainage water reuse: biological, physical, and technological considerations for system management. *Journal of Environmental Quality*, *37*(S5). https://doi.org/10.2134/jeq2007.0314

Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Playán, E., Abbasi, F., & Navabian, M. (2011). Simulation of 1D surface and 2D subsurface water flow and nitrate transport in alternate and conventional furrow fertigation. *Irrigation Science*, *31*(3), 301–316. https://doi.org/10.1007/s00271-011-0303-3

Evans, R., LaRue, J., Stone, K., & King, B. (2012). Adoption of site-specific variable rate sprinkler irrigation systems. *Irrigation Science*, *31*(4), 871–887. https://doi.org/10.1007/s00271-012-0365-x

Everingham, Y., Sexton, J., Skocaj, D., & Inman-Bamber, N. (2016). Accurate prediction of sugarcane yield using a random forest algorithm. *Agronomy for Sustainable Development*, *36*(2). https://doi.org/10.1007/s13593-016-0364-z

Evett, S., O'Shaughnessy, S., Andrade, M., Colaizzi, P., Schwartz, R., Schomberg, H., … & Sui, R. (2020). Theory and development of a VRI decision support system: the USDA-ARS ISSCADA approach. *Transactions of the ASABE*, *63*(5), 1507–1519. https://doi.org/10.13031/trans.13922

FAO. (2018). The future of food and agriculture: Alternative pathways to 2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Filot, I., Shetty, S., Hensen, E., & Santen, R. (2011). Size and topological effects of rhodium surfaces, clusters and nanoparticles on the dissociation of co. *The Journal of Physical Chemistry C*, *115*(29), 14204–14212. https://doi.org/10.1021/jp201783f

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., & Zaks, D. P. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, *478*(7369), 337–342.

García-Caparrós, P., Contreras, J., Baeza, R., Segura, M., & Lao, M. (2017). Integral management of irrigation water in intensive horticultural systems of Almería. *Sustainability*, *9*(12), 2271. https://doi.org/10.3390/su9122271

Gee, G. W., Bauder, J.W., & Klute, A. (1986). Particle-size analysis, methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods, soil since Society of America. Inc., Madison, WIS, USA.

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

Guerrero, A., De Neve, F., & Mouazen, A. M. (2021a). Data fusion approach for map-based variable-rate nitrogen fertilization in barley and wheat. *Soil Tillage Res*. 205, 104789. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104789

Guerrero, A., De Neve, S., & Mouazen, A. M. (2021b). Current sensor technologies for in-situ and online measurement of soil nitrogen for variable rate fertilisation – A review, *Advances in Agronomy*. ISSN 0065–2113. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.02.001.

Häring, T., Dietz, E., Osenstetter, S., Koschitzki, T., & Schröder, B. (2012). Spatial disaggregation of complex soil map units: A decision-tree based approach in Bavarian Forest soils. *Geoderma*, 185, 37–47. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.04.001

Hartz, T., Johnstone, P., Francis, D., & Miyao, E. (2005). Processing tomato yield and fruit quality improved with potassium fertigation. *Hortscience*, *6*(40), 1862–1867. https://doi.org/10.21273/hortsci.40.6.1862

Hasan, K., Masriadi, M., Aftah, R., & Syakban, M. (2023). Digital skills in the optimization of agricultural technology among milenial 2022 (Description study on agricultural students at Malikussaleh University). Proceedings of International Conference on Social Science Political Science and Humanities (Icospolhum), 3, 00007. https://doi.org/10.29103/icospolhum.v3i.149

Hedley, C. (2014). The role of precision agriculture for improved nutrient management on farms. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *95*(1), 12–19. https://doi.org/10.1002/jsfa.6734

Hou, Y., Wang, Z., Ding, H., Li, W., Wen, Y., Zhang, J., & Dou, Y. (2019). Evaluation of suitable amount of water and fertilizer for mature grapes in drip irrigation in extreme arid regions. *Sustainability*, *7*(11), 2063. https://doi.org/10.3390/su11072063

Huda, S., Jayasena, V., Ahmed, T., & Chen, Z. (2023). Potassium transport and use efficiency for sustainable fertigation in protected cropping. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, *2*(3), 346–356. https://doi.org/10.1002/sae2.12065

Incrocci, L., Massa, D., & Pardossi, A. (2017). New trends in the fertigation management of irrigated vegetable crops. *Horticulturae*, *2*(3), 37. https://doi.org/10.3390/horticulturae3020037

Jia, Y., Liu, H., Mei, Y., Wang, H., Zou, D., Wang, J., & Zhao, H. (2022). Analysis of gaps yield and resource use efficiency of cold-region japonica rice. *International Journal of Plant Production*, *17*(1), 17–33. https://doi.org/10.1007/s42106-022-00225-0

Kamienski, C., Soininen, J., Taumberger, M., Dantas, R., Toscano, A., Cinotti, T., & Neto, A. (2019). Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture. *Sensors*, *2*(19), 276. https://doi.org/10.3390/s19020276

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

King, B. A., Reeder, R. E., Wall, R. W., & Stark, J. C. (2002). Comparison of site-specific and conventional uniform irrigation management for potatoes. Paper No. 022175. ASAE, St. Joseph, Michigan, USA.

Kjeldahl J. Z. (1883). Anal. Chem., 22, 366.

Kodaira, M., & Shibusawa, S. (2013). Using a mobile real-time soil visible-near infrared sensor for high resolution soil property mapping. *Geoderma*, 199, Special Issue (SI), 64–79.

Kolmykova, T., Obukhova, A., Klykova, S., Mashegov, P., Zaitsev, A., & Popova, O. (2021). Features and benefits of digital technologies in agricultural enterprises. *E3S*

Web of Conferences, 247, 01018. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124701018

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.

Kuang, B., Mahmood, H. S., Quraishi, Z., Hoogmoed, W. B., Mouazen, A. M., & van Henten, E.J. (2012). Sensing soil properties in the laboratory, in situ, and on-line: A review. In Donald Sparks, editors: *Advances in Agronomy*, 114, AGRON, UK: Academic Press, 155–224.

Lee, W. S., Alchanatis, V., Yang, C., Hirafuji, M., Moshou, D., & Li, C. (2010). Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74:2–33.

Li, L., Losser, T., Yorke, C., & Piltner, R. (2014). Fast inverse distance weighting-based spatiotemporal interpolation: A web-based application of interpolating daily fine particulate matter PM2. 5 in the contiguous US using parallel programming and kd tree. *International journal of environmental research and public health*, *11*(9), 9101–9141.

Liang, X., Gao, Y., Zhang, X., Tian, Y., Zhang, C., & Gao, L. (2014). Effect of optimal daily fertigation on migration of water and salt in soil, root growth and fruit yield of cucumber (*Cucumis* sativus L.) in solar greenhouse. *Plos One*, *9*(1), e86975. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086975

Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, *42*(3), 421–428.

Liu, Y., Hu, X., Zhang, Q., & Zheng, M. (2017). Improving agricultural water use efficiency: A quantitative study of Zhangye City using the static CGE model with a CES water-land resources account. *Sustainability*, *9*, 308. https://doi.org/10.3390/su9020308

Liu, Y., Wang, N., Jiang, C., Archer, L., & Wang, Y. (2020). Temporal and spatial distribution of soil water and nitrate content affected by surface irrigation and fertilizer rate in silage corn fields. *Scientific Reports*, *1*(10). https://doi.org/10.1038/s41598-020-64876-7

Long, T., Blok, V., & Coninx, I. (2016). Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: evidence from the Netherlands, France, Switzerland, and Italy. *Journal of Cleaner Production*, 112, 9–21. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.044

Lopez, G., Kolem, H., Srivastava, A., Gaiser, T., & Ewert, F. (2019). A model-based estimation of resource use efficiencies in maize production in Nigeria. *Sustainability*, *11*(18), 5114. https://doi.org/10.3390/su11185114

Lozbenev, N., Komissarov, M., Zhidkin, A., Gusarov, A., & Fomicheva, D. (2022). Comparative assessment of digital and conventional soil mapping: A case study of the Southern Cis-Ural region, Russia. *Soil Systems*, *6*(1), 14. https://doi.org/10.3390/soilsystems6010014

Lu, Y., Liu, M., Li, C., Liu, X., Cao, C., Li, X., & Kan, Z. (2022). Precision fertilisation and irrigation: Progress and applications. *AgriEngineering*, *3*(4), 626–656.

https://doi.org/10.3390/agriengineering4030041

Ma, Y., Minasny, B., Malone, B., & McBratney, A. (2019). Pedology and digital soil mapping (DSM). *European Journal of Soil Science*, *70*(2), 216–235. https://doi.org/10.1111/ejss.12790

MasonE., & SulaemanY. (2016). Comparison of three models for predicting the spatial distribution of soil organic carbon in Boalemo Regency, Sulawesi: Comparison of three models for predicting the spatial distribution of soil organic carbon in Boalemo Regency, Sulawesi. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, *18*(1), 42–48. https://doi.org/10.29244/jitl.18.1.42-48

McCarthy, C., Hancock, N., & Raine, S. (2010). Applied machine vision of plants: a review with implications for field deployment in automated farming operations. *Intelligent Service Robotics*, *3*(4), 209–217. https://doi.org/10.1007/s11370-010-0075-2

McConnell, M. D., & Burger Jr, L. W. (2017). Precision conservation to enhance wildlife benefits in agricultural landscapes. *Precision conservation: geospatial techniques for agricultural and natural resources conservation*, *59*, 285–312.

Meier, M., Souza, E., Francelino, M., Filho, E., & Schaefer, C. (2018). Digital soil mapping using machine learning algorithms in a tropical mountainous area. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, *42*(0). https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170421

Monaghan, J., Daccache, A., Vickers, L., Hess, T., Grove, I., & Knox, J. (2013). More 'crop per drop': constraints and opportunities for precision irrigation in European agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *93*(5), 977–980. https://doi.org/10.1002/jsfa.6051

Mouazen, A. M., Saeys, W., Xing, J., De Baerdemaeker, J., & Ramon, H. (2005). Near-infrared spectroscopy for agricultural materials: an instrument comparison. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, *13*(2), 87–97.

Mouazen, A. M. (2006). Soil Survey Device. International publication published under the Patent Cooperation Treaty (PCT). World Intellectual Property Organization, International Bureau. International Publication Number: WO2006/015463; PCT/BE2005/000129; IPC: G01N21/00; G01N21/0.

Mouazen, A. M., Alexandridis, T., Buddenbaum, H., Cohen Y., Moshou, D., Mulla, D., Nawar, S., & Sudduth, K. A. (2019). Chapter 2: MONITORING. In: A. Castrignanò et al. (Eds.), Agricultural Internet of Things and decision support for precision smart farming. *ACADEMIC PRESS, Elsevier*, 36–138.

Mouazen, A. M., Maleki, M.R., Cockx, L., Van Meirvenne, M., Van Holm, L. H. J., Merckx, R., De Baerdemaeker, J., & Ramon, H. (2009). Optimum three-point linkage set up for improving the quality of soil spectra and the accuracy of soil phosphorus measured using an on-line visible and near-infrared sensor. *Soil Tillage Res*. 103, 144–152. https://doi.org/10.1016/J.STILL.2008.10.006

Mukhopadhyay, S., & Maiti, S. K. (2018). Techniques for quantative evaluation of mine site reclamation success: Case study. In *Bio-geotechnologies for mine site rehabilitation* (pp. 415–438). Elsevier.

Mwongera, C., Shikuku, K., Twyman, J., Läderach, P., Ampaire, E., Asten, P., & Winowiecki, L. (2017). Climate-smart agriculture rapid appraisal (CSA-RA): a tool for prioritizing context-specific climate-smart agriculture technologies. *Agricultural Systems*, 151, 192–203. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.009

Nagegowda, N., Hebbar, S., & Shilpashree, V. (2020). Performance of mulching and fertigation on nutrient uptake and nutrient use efficiency in Okra (Abelmoschus Esculentus L. Moench) for seed production. *Current Agriculture Research Journal*, *1*(8), 25–29. https://doi.org/10.12944/carj.8.1.05

Nanni, M. R., Povh, F. P., Demattê, J. A. M., Oliveira, R. B. D., Chicati, M. L., & Cezar, E. (2011). Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. *Scientia Agricola*, *68*, 386–392. https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000300017

Nawar, S., Corstanje, R., Halcro, G., Mulla, D., & Mouazen, A. M. (2017). Delineation of soil management zones for variable-rate fertilisation: A review. *Advances in Agronomy*, 143: 175–245.

Neufeldt, H., Jahn, M., Campbell, B., Beddington, J., DeClerck, F., Pinto, A., & Zougmoré, R. (2013). Beyond climate-smart agriculture: toward safe operating spaces for global food systems. *Agriculture & Food Security*, *2*(1). https://doi.org/10.1186/2048-7010-2-12

Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Polycarpou, P., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2021). Energy and water related parameters in tomato and cucumber greenhouse crops in semiarid Mediterranean regions. a review, Part II: irrigation and fertigation. *Horticulturae*, *7*(12), 548. https://doi.org/10.3390/horticulturae7120548

Nussbaum, M., Walthert, L., Fraefel, M., Greiner, L., & Papritz, A. (2017). Mapping of soil properties at high resolution in Switzerland using boosted geoadditive models. *Soil*, *3*(4), 191–210. https://doi.org/10.5194/soil-3-191-2017

O'Shaughnessy, S. A., Evett, S. R., Andrade, A., Workneh, F., Price, J. A., & Rush, C. M. (2015). Site-specific variable rate irrigation as a means to enhance water use efficiency. In 2015 ASABE/IA Irrigation Symposium: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation-A Tribute to the Career of Terry Howell, Sr. Conference Proceedings (pp. 1–21). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

O'Shaughnessy, S., Evett, S., Colaizzi, P., Andrade, M., Marek, T., Heeren, D., … & LaRue, J. (2019). Identifying advantages and disadvantages of variable rate irrigation: an updated review. *Applied Engineering in Agriculture*, *35*(6), 837–852. https://doi.org/10.13031/aea.13128

Ortuani, B., Facchi, A., Mayer, A., Bianchi, D., Bianchi, A., & Brancadoro, L. (2019). Assessing the effectiveness of variable-rate drip irrigation on water use efficiency in a Vineyard in Northern Italy. *Water*, *11*(10), 1964.

Patil, S. M., S, R. (2017). Internet of things based smart agriculture system using predictive analytics. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, *10*(13), 148. https://doi.org/10.22159/ajpcr.2017.v10s1.19601

Penížek, V., Zádorová, T., Kodešová, R., & Vaněk, A. (2016). Influence of elevation data resolution on spatial prediction of colluvial soils in aluvisol region. *Plos One*,

11(11), e0165699. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165699

Perry, C. D., Pocknee, S., Hansen, O., Kvien, C., Vellidis. G., & Hart, E. (2002). Development and testing of a variable-rate pivot irrigation control system. Paper No. 022290. ASAE, St. Joseph, Michigan, USA.

Plaščak, I., Jurišić, M., Radočaj, D., Vujić, M., & Zimmer, D. (2021). An overview of precision irrigation systems used in agriculture. *Tehnički glasnik*, *15*(4), 546–553.

Polat, T., & Çolak, A. (2023). Development of fertigation system for hose reel irrigation machines. In *International Congress on Agricultural Mechanization and Energy in Agriculture* (pp. 175-185). Cham: Springer Nature Switzerland.

Powers, R., & Reynolds, P. (1999). Ten-year responses of Ponderosa Pine plantations to repeated vegetation and nutrient control along an environmental gradient. *Canadian Journal of Forest Research*, *7*(29), 1027–1038. https://doi.org/10.1139/x99-104

Prasad, N., Patel, N., & Danodia, A. (2020). Crop yield prediction in cotton for regional level using random forest approach. *Spatial Information Research*, *29*(2), 195–206. https://doi.org/10.1007/s41324-020-00346-6

Pratt C.J. (1965). Influence of soil pH on the relative availability of macronutrients and micronutrients in the soil. Chemical fertilizers. *Scientific American*, 212: 62–72

Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *363*(1491), 447–465.

Pretty, J., Toulmin, C., & Williams, S. (2011). Sustainable intensification in African agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, *9*(1), 5–24.

Raeisiyanfard, P., Heidari, A., & Tabatabaei, S. (2020). Statistical analysis of bedslope, shape and fertigation timing to reduce nitrate loss in furrow fertigation. *AgriRxiv*, 2020. https://doi.org/10.31220/osf.io/tzcfj

Ramírez-Rodríguez, G., Sasso, G., Carmona, F., Miguel-Rojas, C., Pérez-de-Luque, A., Masciocchi, N., & Delgado-López, J. (2020). Engineering biomimetic calcium phosphate nanoparticles: A green synthesis of slow-release multinutrient (NPK) nanofertilizers. *ACS Applied Bio Materials*, *3*(3), 1344–1353. https://doi.org/10.1021/acsabm.9b00937

Rani, P., & Reddy, R. (2023). Climate change and its impact on food security. *International Journal of Environment and Climate Change*, *13*(3), 104–108. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i31687

Roy, A., Pyne, S., & Chaturvedi, S. (2022). Effect of enriched biochar-based fertilizers on growth, yield and nitrogen use efficiency in direct-seeded rice (*Oryza sativa*). *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, *91*(3). https://doi.org/10.56093/ijas.v91i3.112534

Ruffo, M., Bollero, G., Bullock, D., & Bullock, D. (2006). Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilisation. *Precision Agriculture*, *7*(5), 327–342. https://doi.org/10.1007/s11119-006-9016-7

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

Šarauskis, E., Kazlauskas, M., Naujokienė, V., Bručienė, I., Steponavičius, D., Romaneckas, K., & Jasinskas, A. (2022). Variable rate seeding in precision agriculture: recent advances and future perspectives. *Agriculture*, *12*(2), 305. https://doi.org/10.3390/agriculture12020305

Scherr, S., Shames, S., & Friedman, R. (2012). From climate-smart agriculture to climate-smart landscapes. *Agriculture & Food Security*, *1*(1). https://doi.org/10.1186/2048-7010-1-12

Sharma, V., & Irmak, S. (2021). Comparative analyses of variable and fixed (uniform) rate irrigation and nitrogen management in different soil types: part I. Impact on maize soil-water dynamics. *Agricultural Water Management*, 245, 106644, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106644.

Silva, J., Carvalho, J., Luz, J., & Silva, J. (2016). Fertigation with domestic wastewater: uses and implications. *African Journal of Biotechnology*, *15*(20), 806–815. https://doi.org/10.5897/ajb2015.15115

Singh, A. K., Kumar, S., Ashraf, S. N., & Jyoti, B. (2022). Implications of farmer's adaptation strategies to climate change in agricultural sector of Gujarat: Experience from farm level data. *Research on World Agricultural Economy*, *3*(1), 42–57. https://doi.org/10.36956/rwae.v3i1.498

Smit, E., & Tol, J. (2022). Impacts of soil information on process-based hydrological modelling in the upper Goukou catchment, South Africa. *Water*, *14*(3), 407. https://doi.org/10.3390/w14030407

Stavi, I., Thevs, N., & Priori, S. (2021). Soil salinity and sodicity in drylands: A review of causes, effects, monitoring, and restoration measures. *Frontiers in Environmental Science*, (9). https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712831

Stenberg, B., Viscarra Rossel, R., Mouazen, A. M., & Wetterlind, J. (2010). Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advances in Agronomy*, 107: 163–215.

Stevens, A., & Ramirez Lopez, L. (2014). An introduction to the prospectr package. https://www.researchgate.net/publication/255941339_An_introduction_to_the_prospectr_package.

Susila, A., & Suketi, K. (2023). Determination of fertilizer rate recommendations for Chili (Capsicum Annuum L.) fertigation through drip irrigation using Ferads (Decision Support System) In Precision Agriculture. Iop Conference Series Earth and Environmental Science, *1*(1133), 012069. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1133/1/012069

Tekin Y., Kuang, B., & Mouazen A. M. (2013). Potential of on-line visible and near-infrared spectroscopy for measurement of pH for deriving variable rate lime recommendations. *Sensors*, 13,10177–10190.

The International Society of Precision Agriculture (ISPA). Available online at https://ispag.org/. Accessed on 30.12.2023.

Theres, B., & Sakthivel, R. (2022). Prediction of soil properties using quantile regression forest machine learning algorithm – A case study of Salem and Rasipuram block, Tamil Nadu, India. *International Journal of Environment and Climate Change*,

2530–2553. https://doi.org/10.9734/ijecc/2022/v12i1131246

Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. Methods of soil analysis. Part, *3*(875), 475–490.

Tian, D., Zhang, Y., Mu, Y., Zhou, Y., Zhang, C., & Liu, J. (2017). The effect of drip irrigation and drip fertigation on N_2O and NO emissions, water saving and grain yields in a maize field in the North China Plain. *The Science of the Total Environment*, 575, 1034–1040. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.166

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, *418*(6898), 671–677.

Tiruneh, G., Alemayehu, T., Allouche, F., & Reichert, J. (2021). Spatial variability modeling of soil fertility for improved nutrient management in northwest Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(24). https://doi.org/10.1007/s12517-021-08814-5

Totin, E., Segnon, A., Schut, M., Affognon, H., Zougmoré, R., Rosenstock, T., & Thornton, P. (2018). Institutional perspectives of climate-smart agriculture: A systematic literature review. *Sustainability*, *10*(6), 1990. https://doi.org/10.3390/su10061990

Trotter, M., Guppy, C., Haling, R., Trotter, T., Edwards, C., & Lamb, D. (2014). Spatial variability in pH and key soil nutrients: is this an opportunity to increase fertiliser and lime-use efficiency in grazing systems?. *Crop and Pasture Science*, *65*(8) : 817–827

Vanlauwe, B., Kihara, J., Chivenge, P., Pypers, P., Coe, R., & Six, J. (2010). Agronomic use efficiency of n fertilizer in maize-based systems in Sub-Saharan Africa within the context of integrated soil fertility management. *Plant and Soil*, *339*(1–2), 35–50. https://doi.org/10.1007/s11104-010-0462-7

Vardanyan, S., Balashova, N., Khoruzhy, V., Gorbacheva, A., & Chekrygina, T. (2022). Modern digital technologies in accounting and internal audit in agricultural enterprises. Iop Conference Series Earth and Environmental Science, *965*(1), 012060. https://doi.org/10.1088/1755-1315/965/1/012060

Viscarra-Rossel, R. A., Chen, C. (2011). Digitally mapping the information content of visible near-infrared spectra of surficial Australian soils. *Remote Sensing of Environment,* 115: 1443–1455

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, *37*(1), 29–38.

Wang, D. W., Li, L. N., Hu, C., Li, Q., Chen, X., & Huang, P. W. (2019). A modified inverse distance weighting method for interpolation in open public places based on Wi-Fi probe data. *Journal of Advanced Transportation*, 2019.

Wang, G., Chen, J., Wu, F., & Li, Z. (2015). An integrated analysis of agricultural water-use efficiency: A case study in the Heihe River Basin in Northwest China. *Physics and Chemistry of the Earth,* Parts A/B/C, 89–90, 3–9. https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.10.009

Wang, M., Li, Q., Zhang, J., Li, C., Yuan, Y., Tan, P., & Liu, H. (2022). Dynamics of

soil properties and bacterial community structure by mulched fertigation system in semi-arid area of northeast China. *PeerJ*, 10, e14044. https://doi.org/10.7717/peerj.14044

Wang, X., & Yingying, X. (2016). Evaluation of the effect of irrigation and fertilisation by drip fertigation on tomato yield and water use efficiency in greenhouse. *International Journal of Agronomy*, 1–10. https://doi.org/10.1155/2016/3961903

Wei, C. (2017). Predictions of surface solar radiation on tilted solar panels using machine learning models: A case study of Tainan city, Taiwan. *Energies*, *10*(10), 1660. https://doi.org/10.3390/en10101660

Williams, P., Khalilian, A., Marshall, M., Maja, J., Liu, H., Park, D., … & Nafchi, A. (2018). Development and testing of a variable rate nitrogen application system through an overhead irrigation system. *Journal of Water Resource and Protection*, *10*(10), 994–1011. https://doi.org/10.4236/jwarp.2018.1010058

Wu, M. (2023). Predicting fertilizer concentration for precision irrigation under mixed variable-rate fertigation using machine learning: A case study of combined fertilisation with dipotassium hydrogen phosphate and potassium chloride. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2996273/v1

Xu, Y., Smith, S., Grunwald, S., Abd-Elrahman, A., Wani, S., & Nair, V. (2017). Spatial downscaling of soil prediction models based on weighted generalized additive models in smallholder farm settings. *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*(10). https://doi.org/10.1007/s10661-017-6212-z

Yang, C. (2001). A variable rate applicator for controlling rates of two liquid fertilizers. *Applied Engineering in Agriculture*, *3*(17). https://doi.org/10.13031/2013.6203

Yang, L., You, J., Fahmy, S., Zhu, A., Sheldon, H., Burt, J., & Feng, Q. (2011). Updating conventional soil maps through digital soil mapping. *Soil Science Society of America Journal*, *75*(3), 1044–1053. https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0002

Ying, H., Xue, Y., Yan, K., Wang, Y., Yin, Y., Liu, Z., & Cui, Z. (2020). Safeguarding food supply and groundwater safety for maize production in China. *Environmental Science & Technology*, *16*(54), 9939–9948. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05642

Zhang, J., Li, J., Bingqiang, Z., & Li, Y. (2015). Simulation of water and nitrogen dynamics as affected by drip fertigation strategies. *Journal of Integrative Agriculture*, *14*(12), 2434–2445. https://doi.org/10.1016/s2095-3119(15)61231-x

Zhang, S., Zhu, A., Li, W., Liu, J., & Yang, L. (2013). Mapping detailed soil property using small scale soil type maps and sparse typical samples. *Chinese Geographical Science*, *23*(6), 680–691. https://doi.org/10.1007/s11769-013-0632-7

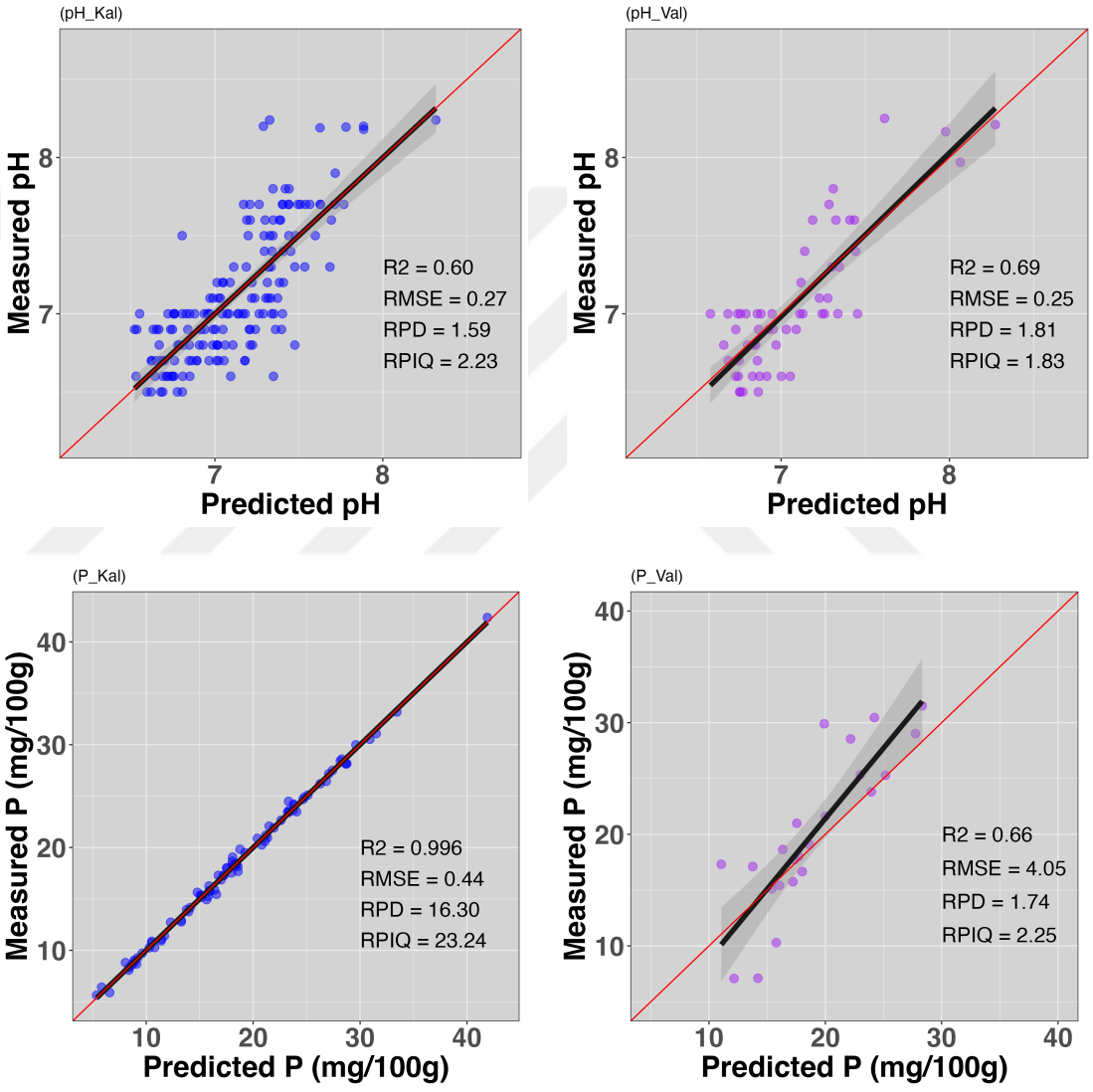
Zhou, B., Sun, X., Ding, Z., Ma, W., & Zhao, M. (2017). Multisplit nitrogen application via drip irrigation improves maize grain yield and nitrogen use efficiency. *Crop Science*, *57*(3), 1687–1703. https://doi.org/10.2135/cropsci2016.07.0623

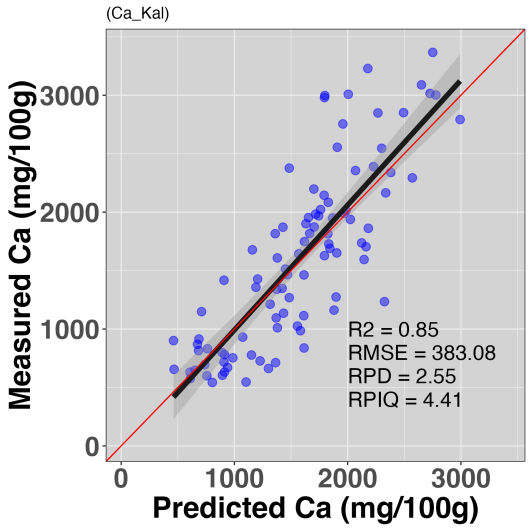
EKLER

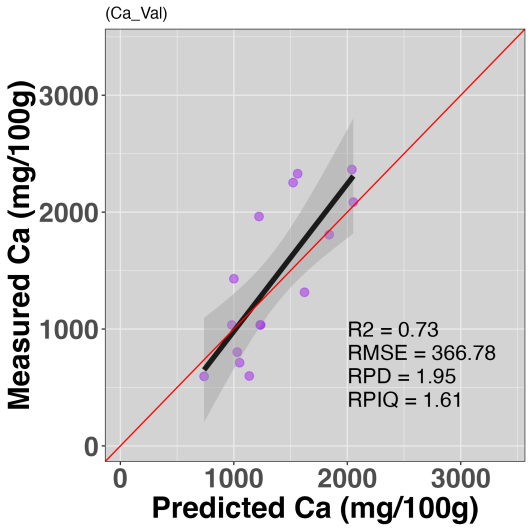
Ek 1

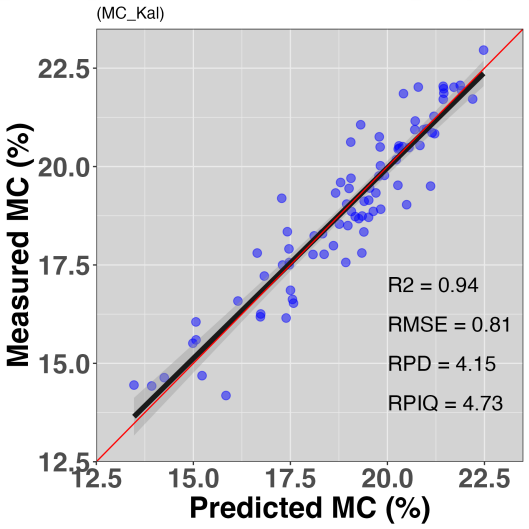
PLSR modelleri kullanılarak çapraz doğrulama ve çevrimiçi doğrulamada elde edilen ölçülen ve tahmin edilen toprak özelliklerinin dağılım grafikleri

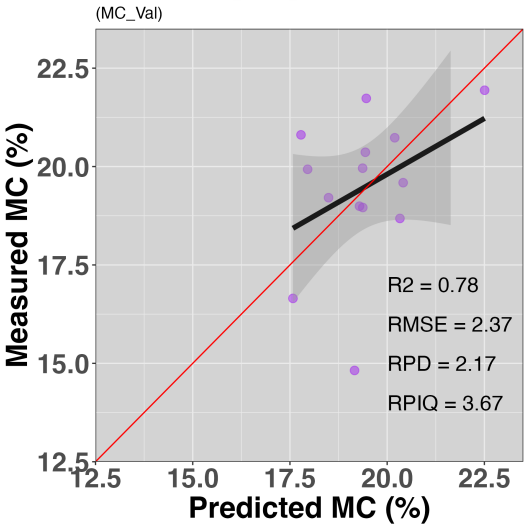
KALİBRASYON **ONLİNE DOĞRULAMA**

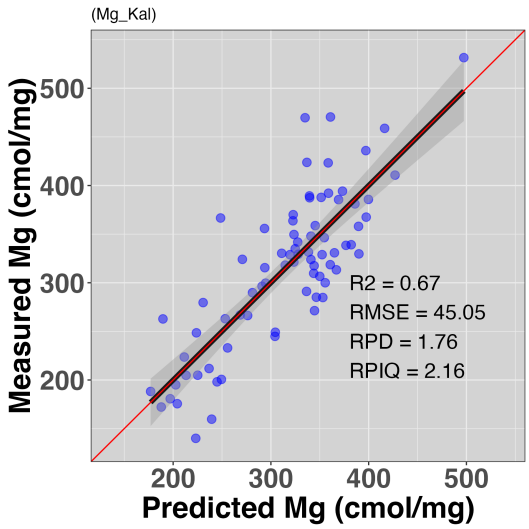


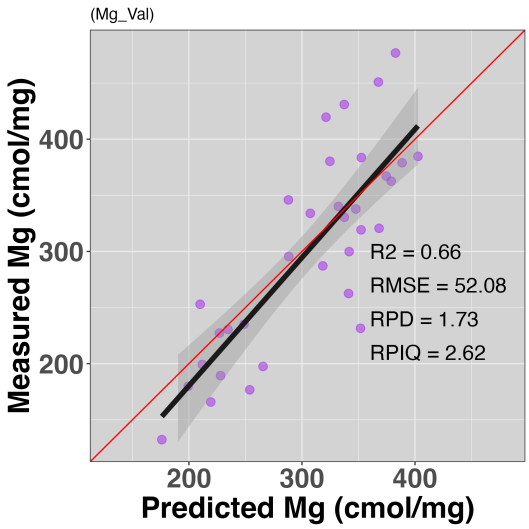

(Ca_Kal)
Measured Ca (mg/100g)
Predicted Ca (mg/100g)
R2 = 0.85
RMSE = 383.08
RPD = 2.55
RPIQ = 4.41

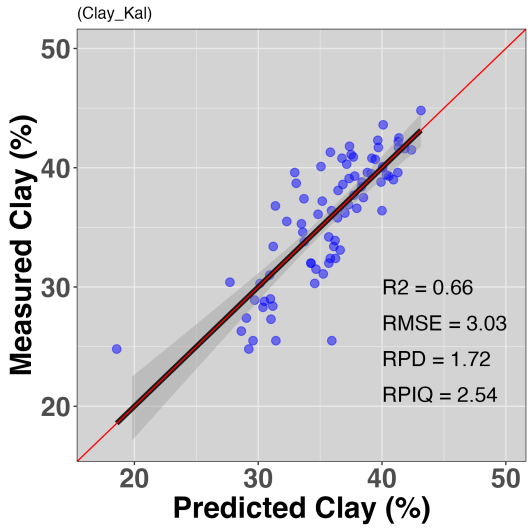

(Ca_Val)
Measured Ca (mg/100g)
Predicted Ca (mg/100g)
R2 = 0.73
RMSE = 366.78
RPD = 1.95
RPIQ = 1.61

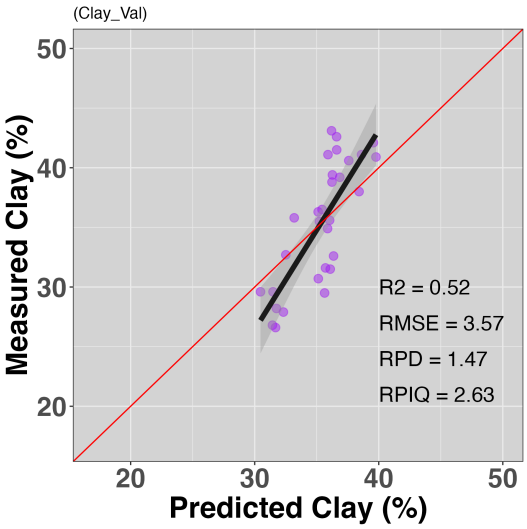

(MC_Kal)
Measured MC (%)
Predicted MC (%)
R2 = 0.94
RMSE = 0.81
RPD = 4.15
RPIQ = 4.73

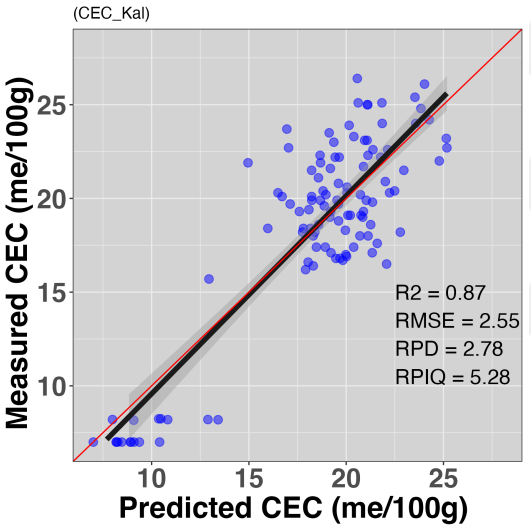

(MC_Val)
Measured MC (%)
Predicted MC (%)
R2 = 0.78
RMSE = 2.37
RPD = 2.17
RPIQ = 3.67

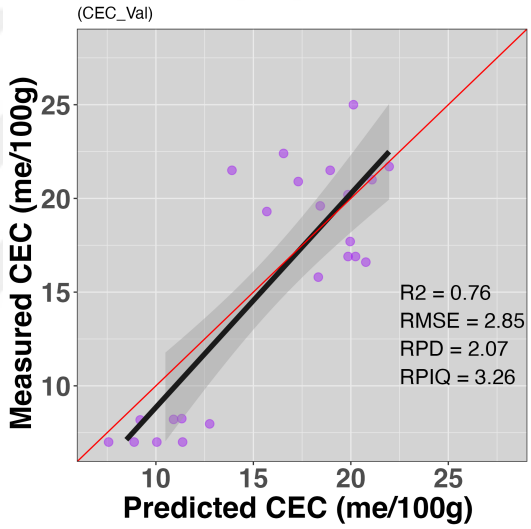

(Mg_Kal)
Measured Mg (cmol/mg)
Predicted Mg (cmol/mg)
R2 = 0.67
RMSE = 45.05
RPD = 1.76
RPIQ = 2.16

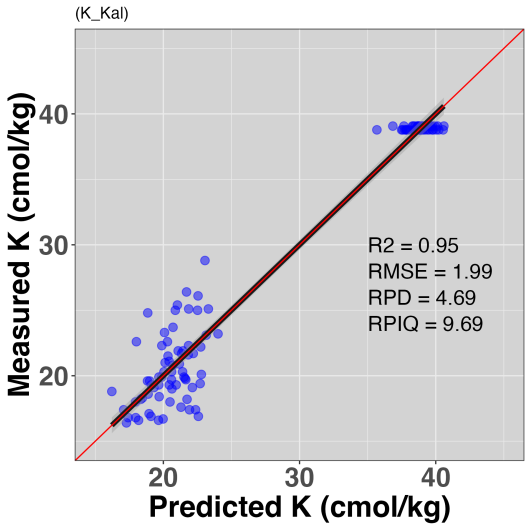

(Mg_Val)
Measured Mg (cmol/mg)
Predicted Mg (cmol/mg)
R2 = 0.66
RMSE = 52.08
RPD = 1.73
RPIQ = 2.62

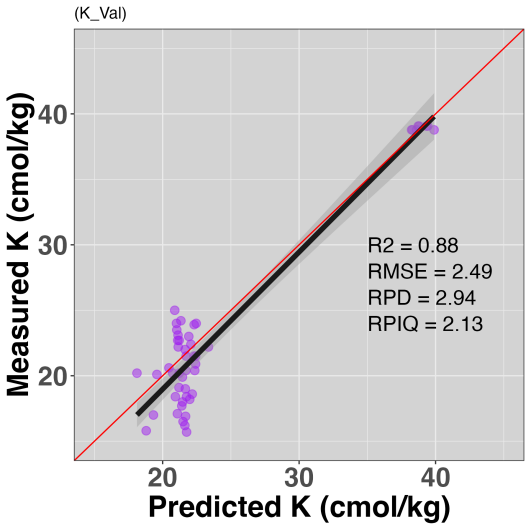

(Clay_Kal)
Measured Clay (%)
Predicted Clay (%)
R2 = 0.66
RMSE = 3.03
RPD = 1.72
RPIQ = 2.54


(Clay_Val)
Measured Clay (%)
Predicted Clay (%)
R2 = 0.52
RMSE = 3.57
RPD = 1.47
RPIQ = 2.63


(CEC_Kal)
Measured CEC (me/100g)
Predicted CEC (me/100g)
R2 = 0.87
RMSE = 2.55
RPD = 2.78
RPIQ = 5.28


(CEC_Val)
Measured CEC (me/100g)
Predicted CEC (me/100g)
R2 = 0.76
RMSE = 2.85
RPD = 2.07
RPIQ = 3.26


(K_Kal)
Measured K (cmol/kg)
Predicted K (cmol/kg)
R2 = 0.95
RMSE = 1.99
RPD = 4.69
RPIQ = 9.69


(K_Val)
Measured K (cmol/kg)
Predicted K (cmol/kg)
R2 = 0.88
RMSE = 2.49
RPD = 2.94
RPIQ = 2.13