

HASSAS TARIMDA DEĞİŞKEN ORANLI UYGULAMA TEKNOLOJİLERİ

Editör: DOÇ. DR. İLKER ÜNAL



BİDGE Yayınları

Hassas Tarımda Değişken Oranlı Uygulama Teknolojileri

Editör: Doç.Dr. İlker Ünal

ISBN: 978-625-8995-08-4

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 22.03.2026

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

HASSAS TARIMDA YÖNETİM BÖLGELERİ.....	4
İlker ÜNAL	4
Mesut ÇOŞLU.....	4
HASSAS TARIMDA DEĞİŞKEN ORANLI SULAMA SİSTEMLERİ.....	46
Mesut ÇOŞLU.....	46
Tahsin UYGUN.....	46
HASSAS TARIMDA DEĞİŞKEN ORANLI GÜBRELEME SİSTEMLERİ.....	83
Osman ECEOĞLU	83
İlker ÜNAL	83

HASSAS TARIMDA YÖNETİM BÖLGELERİ

İlker ÜNAL¹
Mesut ÇOŞLU²

Giriş

Tarım sektörü, küresel ölçekte artan nüfus, iklim değişikliği, doğal kaynakların sınırlılığı ve sürdürülebilir üretim zorunluluğu gibi çok boyutlu baskılar altında dönüşüm süreci yaşamaktadır. Geleneksel tarımsal üretim sistemleri, homojen tarla varsayımına dayalı yönetim yaklaşımları üzerine kurulmuş olup, bu durum mekânsal değişkenliğin göz ardı edilmesine neden olmuştur. Oysa tarım arazileri, toprak özellikleri, topografya, nem dağılımı, organik madde içeriği ve bitki gelişimi açısından önemli düzeyde heterojenlik göstermektedir. Bu heterojen yapı, girdilerin tekdüze uygulanmasının hem ekonomik hem de çevresel açıdan verimsiz sonuçlar doğurmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda hassas tarım, üretim alanındaki mekânsal ve zamansal değişkenliği yönetilebilir hale getirerek karar destek süreçlerini optimize etmeyi amaçlayan bir paradigma olarak ortaya çıkmıştır.

¹ Doç.Dr, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Hassas Tarım ve Tarımsal Robotlar Bölümü, Orcid: 0000-0002-5188-4438

² Dr.Öğr.Üyesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Hassas Tarım ve Tarımsal Robotlar Bölümü, Orcid: 0000-0003-3952-6563

Hassas tarım kavramı ilk olarak 1980’li yılların sonlarında veri temelli tarımsal yönetim yaklaşımlarının gelişmesiyle birlikte önem kazanmaya başlamıştır. Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS), coğrafi bilgi sistemleri (GIS), uzaktan algılama teknolojileri ve sensör tabanlı veri toplama sistemlerinin gelişimiyle birlikte tarla içi değişkenliğin ölçülmesi ve analiz edilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu teknolojik ilerlemeler, tarım alanlarının homojen bir üretim birimi olarak değil, farklı özelliklere sahip alt bölgelere ayrılmış dinamik sistemler olarak değerlendirilmesini sağlamıştır. Bu dönüşümün en önemli çıktılarından biri ise yönetim bölgeleri yaklaşımıdır.

Yönetim bölgeleri, tarla içerisindeki benzer özelliklere sahip alanların belirlenmesi ve bu alanların farklı tarımsal uygulamalarla yönetilmesini ifade eden mekânsal karar birimleridir. Bu yaklaşımın temel amacı, girdilerin mekânsal olarak optimize edilmesi ve üretim performansının artırılmasıdır. Özellikle gübreleme, sulama, ekim ve bitki koruma uygulamalarında değişken oranlı uygulama teknolojilerinin (VRT) kullanılması, yönetim bölgelerinin tanımlanmasına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle yönetim bölgeleri, hassas tarımın operasyonel uygulanabilirliğinin temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilmektedir.

Tarla içi değişkenliğin yönetimi, yalnızca verim optimizasyonu açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik öneme sahiptir. Aşırı gübre uygulamaları, nitrat sızıntısı ve sera gazı emisyonlarına neden olurken, yetersiz uygulamalar ise verim kayıplarına yol açmaktadır. Yönetim bölgeleri yaklaşımı, bu dengenin kurulmasına yardımcı olarak hem ekonomik hem de ekolojik faydalar sağlamaktadır. Özellikle Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı ve sürdürülebilir tarım politikaları çerçevesinde, girdi kullanımının azaltılması hedefleri doğrultusunda bu yaklaşımın önemi giderek artmaktadır.

Yönetim bölgelerinin belirlenmesi süreci, çok değişkenli veri analizine dayanmaktadır. Toprak fiziksel ve kimyasal özellikleri, verim haritaları, elektriksel iletkenlik ölçümleri, topografik veriler ve bitki gelişim indeksleri bu süreçte yaygın olarak kullanılan veri kaynaklarıdır. Bu verilerin entegrasyonu ve analizinde istatistiksel yöntemler ve makine öğrenmesi algoritmaları önemli rol oynamaktadır. Kümeleme analizleri, özellikle k-ortalama ve bulanık kümeleme yöntemleri, yönetim bölgelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda yapay zeka temelli yaklaşımlar, bu süreçte daha dinamik ve adaptif bölgeleme imkânı sunmaktadır.

Uzaktan algılama teknolojilerinin gelişimi, yönetim bölgelerinin belirlenmesinde önemli bir paradigma değişimi yaratmıştır. Uydu görüntüleri ve insansız hava araçları aracılığıyla elde edilen Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) ve benzeri bitki indeksleri, bitki gelişimindeki mekânsal farklılıkların izlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu veriler, verim haritalarıyla birlikte analiz edildiğinde, üretim potansiyeli açısından farklılık gösteren alanların belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle çok zamanlı görüntü analizi, tarla içi stabil bölgelerin belirlenmesinde önemli avantajlar sunmaktadır.

Yönetim bölgeleri yaklaşımının etkinliği, yalnızca doğru bölgeleme ile değil, aynı zamanda bu bölgelerde uygulanacak yönetim stratejilerinin doğruluğu ile de ilişkilidir. Bölgeleme sonucunda elde edilen mekânsal karar birimlerinin, agronomik anlamda anlamlı olması gerekmektedir. Aksi halde, veri temelli ancak agronomik açıdan geçersiz bölgeler, uygulamada beklenen faydayı sağlamayacaktır. Bu nedenle yönetim bölgelerinin belirlenmesi sürecinde agronomik bilgi ile veri biliminin entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Literatürde yönetim bölgeleri üzerine yapılan çalışmalar, bu yaklaşımın verim artışı, girdi kullanımında azalma ve çevresel etkilerin minimize edilmesi açısından önemli faydalar sağladığını ortaya koymuştur. Bununla

birlikte, farklı veri kaynaklarının entegrasyonu, bölgeleme yöntemlerinin standardizasyonu ve ekonomik uygulanabilirlik konuları halen araştırılması gereken alanlar arasında yer almaktadır. Özellikle küçük ölçekli işletmeler için yönetim bölgeleri yaklaşımının uygulanabilirliği, gelişmekte olan ülkelerde önemli bir araştırma boşluğu oluşturmaktadır.

Türkiye gibi tarımsal üretimde önemli potansiyele sahip ülkelerde, tarla içi değişkenliğin yönetimi henüz yaygın olarak uygulanmamaktadır. Bu durum hem verim kayıplarına hem de gereksiz girdi kullanımına yol açmaktadır. Yönetim bölgeleri yaklaşımının yaygınlaştırılması, sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşılması açısından stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Özellikle Akdeniz iklim koşullarında toprak ve su kaynaklarının etkin yönetimi açısından bu yaklaşımın önemi daha da artmaktadır. Sonuç olarak, yönetim bölgeleri, hassas tarımın uygulanabilirliğini artıran ve sürdürülebilir üretim sistemlerine geçişi destekleyen kritik bir araçtır. Bu çalışma, yönetim bölgelerinin belirlenmesine yönelik mevcut yaklaşımları değerlendirmeyi ve bu alandaki metodolojik gelişmeleri ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Literatür Taraması

Hassas tarımın temelini oluşturan mekânsal değişkenlik yönetimi yaklaşımı, son on yıl içerisinde önemli bir kuramsal dönüşüm geçirmiştir. Yönetim bölgeleri kavramı başlangıçta yalnızca statik toprak özelliklerine dayalı olarak tanımlanan homojen alanların belirlenmesini ifade ederken, günümüzde çok katmanlı veri entegrasyonu ve zamansal değişkenlik analizi ile dinamik karar destek sistemlerinin temel bileşeni haline gelmiştir (Şekil 1). Bu dönüşüm, hassas tarımın yalnızca girdilerin mekânsal optimizasyonu ile sınırlı bir uygulama alanı olmaktan çıkıp, sistem düzeyinde veri odaklı üretim yönetimine evrilmesiyle doğrudan ilişkilidir (Karunathilake ve ark., 2023).

Şekil 1. Hassas tarımın bileşenleri



Son yıllarda yapılan çalışmalar, yönetim bölgelerinin artık yalnızca toprak verimliliği veya ürün verim haritalarına dayalı bir sınıflandırma süreci olarak değil, üretim sistemlerinin karmaşık biyofiziksel ve zamansal dinamiklerini temsil eden çok boyutlu yapılar olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, yönetim bölgeleri; toprak özellikleri, bitki gelişim dinamikleri ve çevresel faktörler arasındaki ilişkilerin zamansal ve mekansal analizine dayalı olarak tanımlanan üretim karar birimleri olarak yeniden kavramsallaştırılmıştır (Žáková Kroupová ve ark., 2024).

2016 sonrası literatürde dikkat çeken önemli bir kuramsal gelişim, yönetim bölgelerinin yalnızca mekânsal heterojenliği temsil eden statik sınıflar yerine, üretim sisteminin davranışını modelleyen fonksiyonel birimler olarak ele alınmasıdır. Bu yaklaşım, tarla içi değişkenliğin sadece mevcut durumunun değil, aynı zamanda üretim süreçlerine verdiği tepkinin de dikkate alınması gerektiğini savunmaktadır. Örneğin, bu perspektife göre benzer toprak özelliklerine sahip iki alan, bitki gelişim süreçleri veya su stresi tepkileri açısından farklı davranış gösterebilir ve bu nedenle aynı yönetim bölgesinde yer almamalıdır (Virnodkar ve ark., 2020).

Yeni kuramsal yaklaşımlar aynı zamanda yönetim bölgelerinin veri temelli sistemler içinde adaptif yapılar olarak ele alınmasını önermektedir. Bu bağlamda, Sentinel-2 zaman serileri, fenolojik gelişim aşamaları ve yakın mesafe toprak sensörleri gibi farklı veri kaynaklarının birlikte kullanılmasıyla oluşturulan

yönetim bölgelerinin, üretim sisteminin gerçek davranışını daha iyi temsil ettiği gösterilmiştir (Torney ve ark., 2025). Bu tür çalışmalar, yönetim bölgelerinin sabit sınıflandırmalar yerine değişen çevresel ve biyolojik koşullara yanıt verebilen esnek yapılar olması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kuramsal gelişimin bir diğer önemli yönü, yönetim bölgelerinin sürdürülebilirlik paradigması ile ilişkilendirilmesidir. Son dönem araştırmalar, hassas tarımın yalnızca verim artırma amacıyla değil, aynı zamanda çevresel etkiyi azaltma ve kaynak kullanımını optimize etme hedefleri doğrultusunda yeniden konumlandırıldığını göstermektedir (Mgendi, 2024). Bu bağlamda yönetim bölgeleri, girdi optimizasyonu ve çevresel risk yönetiminin temel araçlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

Ayrıca, dijital tarımın gelişimi ile birlikte yönetim bölgeleri kavramı, Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ ve veri füzyonu teknolojileri ile bütünleşik bir yapı kazanmaya başlamıştır. Bu teknolojik dönüşüm, yönetim bölgelerinin yalnızca mekânsal karar birimleri değil, aynı zamanda gerçek zamanlı üretim yönetimini destekleyen akıllı sistem bileşenleri olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Miller ve ark., 2025).

Bununla birlikte, son on yıl içerisinde yapılan uygulamalı çalışmalar, yönetim bölgelerinin tarımsal üretim sistemlerinde girdilerin hedeflenmiş kullanımını sağlayarak ekonomik ve çevresel faydalar sunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle Avrupa’da yapılan sistematik incelemeler, hassas tarım teknolojilerinin benimsenmesi ile birlikte yönetim bölgelerinin üretim maliyetlerini azaltırken verimlilik artışına katkı sağladığını göstermektedir (Sanyaolu ve Sadowski, 2024).

Kuramsal açıdan değerlendirildiğinde, yönetim bölgeleri kavramının gelişimi üç temel evre üzerinden açıklanabilir: statik mekânsal zonlama yaklaşımı, çok veri katmanlı analitik zonlama

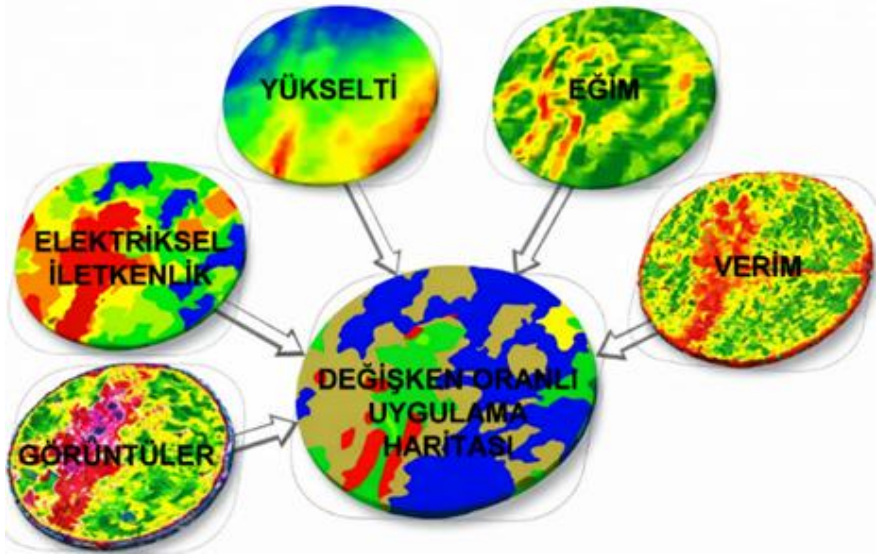
yaklaşımı ve dinamik veri odaklı adaptif zonlama yaklaşımı. Güncel literatür, bu evrimsel sürecin yönetim bölgelerini üretim sistemlerinin merkezinde yer alan karar destek yapıları haline getirdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle çok kaynaklı veri entegrasyonu ve zaman serisi analizlerinin kullanımı, yönetim bölgelerinin üretim süreçlerinin daha doğru temsil edilmesini sağlamaktadır (Javadi ve ark., 2022). Son on yıl içerisinde yönetim bölgeleri kavramı, basit mekânsal sınıflandırma yaklaşımından çıkarak çok boyutlu, dinamik ve veri odaklı bir üretim yönetimi paradigmasına dönüşmüştür. Bu dönüşüm, hassas tarımın sürdürülebilirlik, verimlilik ve karar destek sistemleri ile bütünleşik bir yapıya evrilmesinin önemli göstergelerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Hassas Tarımda Yönetim Bölgeleri

Hassas tarım, girdilerin kullanımını optimize etmek için teknolojiyi kullanan bir tarım yöntemidir. Bu yöntemde elde edilmek istenen amaç, girdileri doğru miktarda, zamanda ve yerde uygulayarak, ürün verimini, kalitesini, karlılığını ve sürdürülebilirliğini artırmaktır (Şekil 2). Hassas tarımın temel kavramlarından biri de yönetim bölgeleridir. Yönetim bölgesi, benzer özelliklere sahip ve girdilere benzer şekilde tepki veren bir tarlanın alt bölgesidir (Melo ve ark., 2025). Bu bölgeler, toprak tipi, dokusu, organik madde içeriği, elektriksel iletkenliği, rakımı, eğimi, bitki sağlığı, verim geçmişi ve daha birçok faktöre dayanabilir. Yönetim bölgeleri, bir tarlayı ihtiyaçlarına ve potansiyellerine göre farklı şekilde yönetilebilen daha küçük birimlere bölmek için kullanılmaktadır (Kitchen ve ark., 2005). Örneğin, bir tarlada kil, tın ve kum gibi farklı toprak dokularına sahip alanlar olabilir. Bu alanların su tutma kapasitesi, besin maddesi bulunabilirliği ve drenajı farklı olabilir. Tarlanın tamamına aynı miktarda su veya gübre uygulamak, bazı alanlarda aşırı sulamaya veya yetersiz gübrelemeye, diğerlerinde ise tam tersine neden olabilir. Bu durum

kaynak israfına, ürün veriminde düşüşe ve çevresel sorunlara yol açabilmektedir. Toprak dokusuna göre yönetim bölgeleri oluşturularak, çiftçi her bölge için sulama ve gübreleme oranlarını toprak koşullarına ve ürün gereksinimlerine uyacak şekilde ayarlayabilir (Filintas ve ark., 2023). Bu, su kullanım verimliliğini, besin kullanım verimliliğini ve ürün verimini artırabilir.

Şekil 2. Yönetim bölgesi için gerekli olan bazı temel bileşenler



Hassas Tarımda Yönetim Bölgelerinin Belirlenmesi

Yönetim bölgelerinin belirlenmesi, bir alandaki benzerliklere dayanarak o alanda farklı bölgeler oluşturma sürecidir. Bu bölgeler, çiftçilerin su, gübre ve zararlı ilaçları gibi şeyleri daha etkili bir şekilde nasıl kullanacaklarına karar vermelerine yardımcı olmaktadır (Ferguson ve ark., 2003). Bunu yapmak için toprak, arazinin şekli veya farklı noktalarda mahsullerin ne kadar iyi yetiştiği hakkında veri toplanması gerekmektedir. Daha sonra, benzer alanları gruplandırmak için bilgisayar programları kullanılmaktadır.

Örneğin, benzer toprağa sahip yerler veya mahsullerin her zaman iyi yetiştiği yerler ana bölgeler olarak değerlendirilmektedir. Bu bölgeler belirlendikten sonra, üretim süreci içerisinde kaynakların nasıl kullanacağı konusunda daha profesyonel kararlar verilebilmektedir. Bu sayede, ihtiyaç duyulan bölgelere daha fazla su verilmesi veya daha az kimyasal maddeye ihtiyaç duyulan yerlerde daha az kimyasal madde uygulaması gerçekleştirilebilir. Bu yaklaşım, para tasarrufu sağlamaya, çevreyi korumaya ve daha iyi ürünler yetiştirmeye yardımcı olmaktadır.

Hassas tarımda yönetim bölgelerini belirlemek için farklı yöntemler ve araçlar mevcuttur, ancak en yaygın ve önerilenlerden biri kümeleme analizidir (Yari ve ark., 2017). Kümeleme analizi, veri noktalarını benzerliklerine veya farklılıklarına göre kümelere ayıran bir veri madenciliği tekniğidir. Kümeleme analizi, bir tarladaki homojen alanları belirlemek için toprak örnekleri, verim haritaları veya uydu görüntüleri gibi mekansal verilere uygulanabilmektedir (Melo ve ark., 2025). Gerçekleştirilen süreç aşağıdaki temel adımları içermektedir:

- **Veri Toplama:** Toprak bilgileri, verim kayıtları ve daha fazlası gibi tarlayla ilgili veriler toplanır.
- **Veri Analizi:** Sahadaki kalıpları ve farklılıkları bulmak için teknolojiyi (GIS gibi) kullanarak veriler incelenir.
- **Kümeleme:** Verilere dayanarak benzer alanlar gruplandırılır. Örneğin, benzer toprak tiplerine sahip alanlar bölgeler haline gelir.
- **Sınır Tanımı:** Kaynakların karışmasını önlemek için bu bölgeler arasında net sınırlar belirlenir.
- **Bölge Karakterizasyonu:** Her bölge, toprak tipi veya besin seviyeleri gibi kendine özgü özellikleriyle tanımlanır.

- Veri Entegrasyonu: Bölgelerin doğruluğunu daha da artırmak için toprak etütleri ve uydu görüntüleri gibi farklı kaynaklardan gelen veriler birleştirilir.

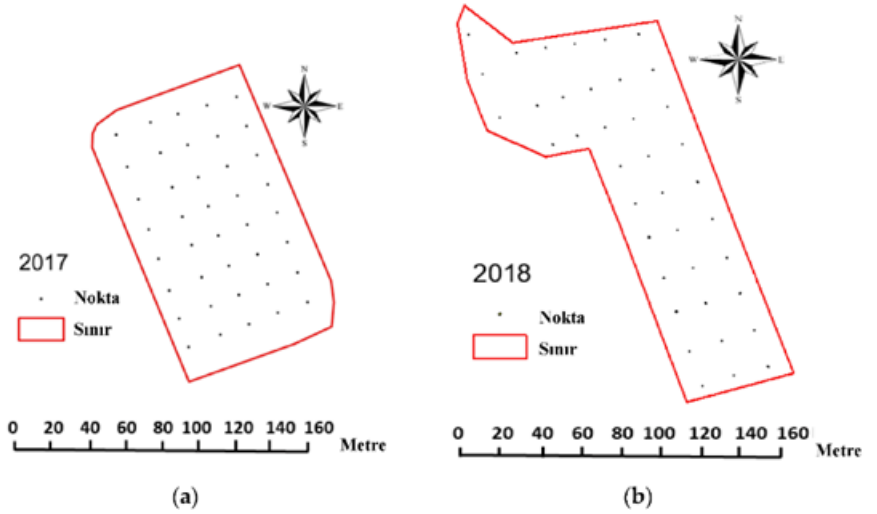
Hassas tarımda yönetim bölgeleri oluşturmak için farklı yöntemler mevcuttur (Ali ve ark., 2022). Yaygın yöntemlerden bazıları şunlardır:

- Toprak özelliklerine ve sınırlarına ilişkin bilgi sağlayan mevcut toprak haritalarını veya araştırmalarını kullanmak.
- Toprak parametrelerini (elektrik iletkenliği (EC), nem, pH ve daha fazlası gibi) ölçen toprak sensörleri veya problemleri kullanmak.
- Bitki sağlığı göstergelerini (bitki örtüsü indeksleri, biyokütle, klorofil içeriği ve daha fazlası gibi) yakalayan uzaktan algılama veya hava görüntüleri kullanmak.
- Ürün verimi ve kalitesine ilişkin verileri birden fazla yıl boyunca kaydeden verim izleme sistemleri veya haritaları kullanmak.
- Çoklu veri kaynaklarını entegre eden ve istatistiksel veya mekansal teknikler uygulayan veri analizi veya modelleme araçlarını kullanarak kalıpları ve kümeleri belirlemek.

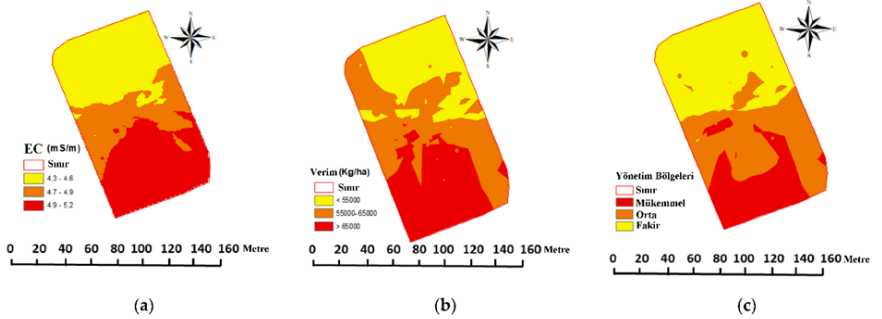
VRT'nin temel yapı taşlarından biri olan yönetim bölgeleri oluşturma işlemi veri toplama süreci ile başlamaktadır. Bu süreçte, toprak örnekleme (analiz) ve örnekleme sonuçlarına göre hazırlanan haritalar yönetim bölgelerinin oluşturulmasında temel karar noktalarını oluşturmaktadır. Geleneksel toprak örneklemesinde tek bir bileşik örnek tüm tarlayı temsil ederken, hassas toprak örnekleme, tarlayı aynı büyüklükte veya benzer toprak ve ürün özelliklerine sahip daha küçük alanlara bölmeyi içermektedir (Kazemi ve Samavati, 2023). Şekil 3'te Kanada'nın Prince Edward

Adası'nda bulunan 2017 ve 2018 üretim sezonlarında patates üretimi yapılan iki tarlanın ızgaralara bölünmüş görseli verilmiştir (Khan ve ark., 2020). Şekil 4'te birinci tarla için oluşturulmuş olan EC, verim haritaları ile bu haritalara göre oluşturulmuş yönetim bölgeleri gösterilmiştir. Şekil 5'te ise ikinci tarlaya ait benzer haritalar gösterilmiştir.

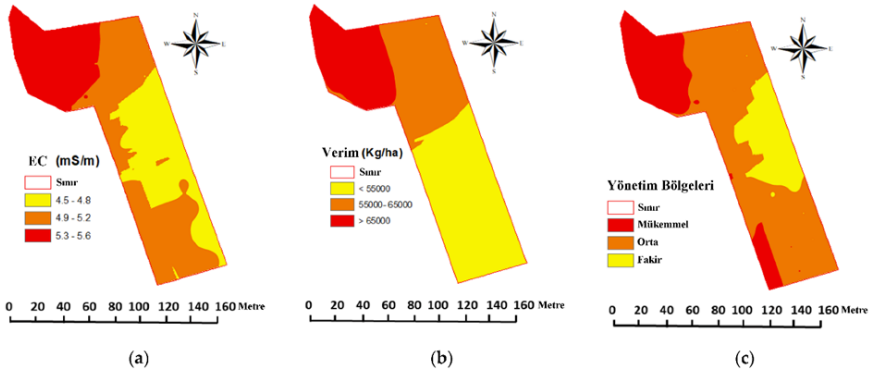
Şekil 3. Tarlaların yerleşim düzeni: (a) 1. Tarla için $n = 40$; 25×25 m ve (b) 2. Tarla için $n = 39$; 25×25 m (b) örnekleme noktalarına sahip tarlalar içindeki ızgara düğümleri (Khan ve ark., 2020)



Şekil 4. Birinci tarla için belirlenmiş yönetim bölgelerinin karşılaştırılması: (a) EC, (b) yumru verimi ve (c) yönetim bölgeleri (Khan ve ark., 2020)



Şekil 5. İkinci tarla için belirlenmiş yönetim bölgelerinin karşılaştırılması: (a) EC, (b) yumru verimi ve (c) yönetim bölgeleri (Khan ve ark., 2020)



Tarladaki toprak pH'ı, EC ve besin maddesi değişkenliği gibi farklı özellikleri değerlendirmek için her alandan temsili toprak örneklerinin toplanması gerekmektedir. Toprak örnekleme sonuçları daha sonra, alana özgü besin yönetimi için değişken oranlı kireç ve gübre uygulamalarını belirlemek için kullanılmaktadır. Hassas tarımda yaygın olarak kullanılan iki ana hassas toprak örnekleme stratejisi vardır. Bunlar ızgara ve bölge toprak örnekleme yöntemleridir (Mallarino ve ark., 2004).

Izgara Toprak Örnekleme Yöntemi

Izgara toprak örnekleme yöntemi, Şekil 6a'da gösterildiği gibi, tarlayı eşit büyüklükte ızgaralara (kare veya dikdörtgen) bölmeyi ve her ızgaradan tipik olarak sekiz ila on iki toprak çekirdeğinden oluşan birleşik bir toprak örneği toplamayı içermektedir (Virk ve ark., 2025). Izgara haritasına genellikle, Şekil 6b'de gösterildiği gibi, her ızgara için işaretlenmiş merkez noktaları bulunan bir harita eşlik eder; bu, örnekleme sırasında ızgaraların merkezine ulaşmak için sıklıkla kullanılmaktadır. Her ızgara için toprak test değerleri alındıktan sonra, bu noktalar, tarladaki değişkenliği gösteren toprak pH'ı ve besin seviyelerinin mekansal haritalarını oluşturmak için kullanılmaktadır.

Şekil 6. Izgara toprak örnekleme yönteminin gösterimi: (a) 2.5 dekarlık ızgaralara bölünmüş bir alanı (b) toprak örnekleme sırasında bir alan içindeki farklı ızgaralara gitmek için yaygın olarak kullanılan her bir ızgaranın merkezini göstermektedir



Örnekleme ızgaralarının boyutu 1 ile 5 dekar arasında değişebilir, ancak tarlalardaki toprak pH'ı, EC'i ve besin seviyelerindeki değişkenliği doğru bir şekilde yakalamak için 2.5 dekar veya daha küçük bir ızgara boyutu önerilmektedir (Ferguson

ve Hergert, 2009). Nispeten homojen tarlalarda işçilik ve örnekleme maliyetlerini azaltmak için genellikle daha büyük ızgara boyutları (5 dekara kadar) kullanılmaktadır. Izgara boyutu, ızgaralar içinde daha etkili ve homojen bir uygulama için uygulama ekipmanının genişliğine (ızgaranın genişliği, yayma şeridinin katı olarak) bağlı olarak da değişebilmektedir (Karydas ve ark., 2025).

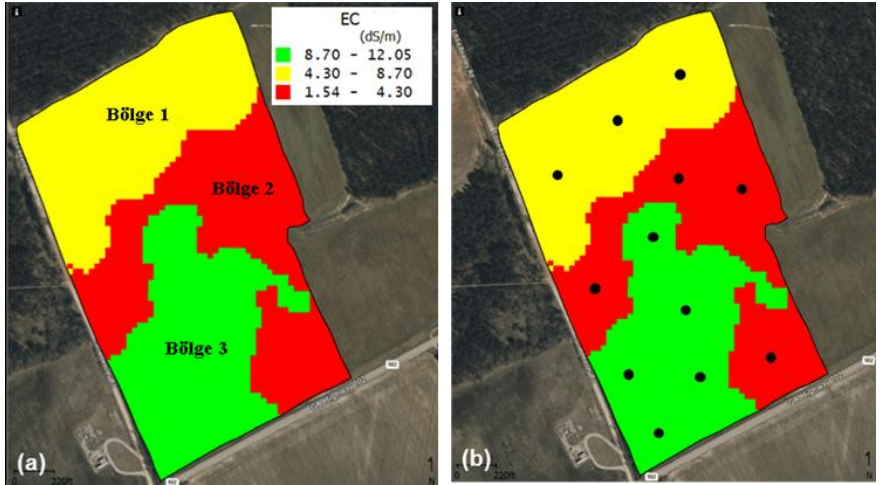
Izgara örnekleme, uygulanması kolay olması ve ek mekansal veri veya geçmiş tarla yönetimi hakkında önceden bilgi gerektirmemesi nedeniyle en yaygın kullanılan toprak örnekleme stratejilerinden biridir. Toprak örneklerinin toplanması için, örnekleme ekipmanının mevcudiyetine, iş gücüne ve diğer faktörlere bağlı olarak, ızgaralar içinde çeşitli yöntemler mevcuttur. Toprak örnekleri elle toplandığında, genellikle tercih edilen yöntem nokta örneklemesidir; bu yöntemde, ızgara içindeki merkez noktasının etrafında dairesel bir düzende (ızgara boyutuna bağlı olarak 10 ile 15 metre yarıçapında) sekiz ila on toprak örneği toplanır (Lawrence ve ark., 2020). Buna karşılık, arazi aracı (ATV) üzerine monte edilmiş otomatik bir toprak örnekleme cihazı kullanılarak toprak örnekleri toplandığında, S (veya Z) deseni daha yaygındır. Bu yöntemde, toprak örnekleri, ızgaranın bir köşesinden başlayarak ve ızgara içinde S şeklinde bir düzende toprak örnekleri toplanarak, düzenli aralıklarla (15 ile 30 metre) toplanır (Wang ve ark., 2024). Örnek toplama için kullanılan teknik ne olursa olsun, her bir ızgara içindeki toprak özelliklerini yeterince temsil eden yeterli sayıda (en az sekiz) toprak örneği toplamak önemlidir.

Bölge Toprak Örnekleme Yöntemi

Bölge örnekleme yöntemi, tarlayı tekdüze bir şekilde yönetilebilen daha küçük alanlara (bölgelere) ayırmayı içermektedir (Şekil 7). Daha sonra her bölgeden toprak örnekleri alınarak ortalama toprak pH'ı, EC'i ve besin seviyeleri belirlenir. Yönetim bölgelerinin sayısı ve çözünürlüğü, bir tarla için mevcut verilerin

türüne ve kalitesine bağlıdır. Çoğu tarlada üç ile beş farklı yönetim bölgesi olması tipiktir. Genel olarak, toprak dokusu, topografya, hava görüntüleri, verim, EC ve diğer geçmişe ait yönetim bilgileri gibi veri katmanları, yönetim bölgelerini belirlemek için tek başına veya birlikte kullanılabilir. Şekil 7a, bölgelerin tarladaki EC değişkenliğine dayalı olduğu bir tarlanın toprak örnekleme haritasını göstermektedir.

Şekil 7. Bölgesel toprak örnekleme yönteminin gösterimi: (a) tarlanın toprak EC'sine göre farklı yönetim bölgelerine ayrıldığını (b) farklı bölgelerdeki her biri birleşik örneği temsil eden çeşitli toprak örnekleme yerlerini göstermektedir



Bölge örneklemesinde, her bölge içinde toplanan toprak örnekleri birleştirilerek kompozit bir örnek oluşturulur; bu nedenle, bir tarlada toplamda yalnızca dört ile sekiz örnek bulunabilir. Bölgelerin oldukça büyük olduğu bazı durumlarda, her bölge içinde iki veya daha fazla kompozit örnek toplamak ve bu örnekleri toprak testi analizi için ayrı ayrı göndermek yaygındır (Serrano ve ark., 2020). Bölgelerin homojen ve tekdüze yönetilebilen alanları temsil ettiği varsayılsa da toprak örneklemesi için daha büyük yönetim bölgelerini daha küçük alanlara (10 dekardan büyük olmamak

kaydıyla) bölmek iyi bir uygulamadır; çünkü bu, tarlalardaki besin maddesi değişkenliğinin daha iyi bir tahminini sağlar. Şekil 7b'deki harita, her bölge içinde üç ile beş farklı konumdan kompozit toprak örneklerinin toplanacağı bir örneği göstermektedir. Her kompozit örneğin, o bölge içindeki temsili bir alandan toplanan sekiz ile on iki toprak çekirdeğinden oluştuğunu belirtmek önemlidir.

Her bölgeden iki veya daha fazla kompozit örnek alınsa bile, bölge örneklemesinde toplam örnek sayısı ızgara örneklemesine göre önemli ölçüde daha azdır. Bu, toprak örnekleme ve analiziyle ilgili genel maliyetleri ve iş gücünü düşürmeye yardımcı olur. Tarla geçmişine dair bilgi gerektirmeyen ızgara örneklemesinin aksine, bölge örnekleme esas olarak EC, verim veya toprak dokusu gibi tarla içi mekansal özellikleri temsil eden verilerin mevcut olduğu ve/veya tarla geçmişinin birden fazla yıl (tercihen 3 ile 5 yıl) için bilindiği durumlarda kullanılır. Bazı tarlalarda, topografyadaki değişiklikler de toprak örnekleme için bölgeler oluşturmak amacıyla kullanılabilir. Hava fotoğrafları veya diğer veri katmanlarının üst üste bindirilmesi de yönetim bölgelerinin iyileştirilmesine ve daha hassas toprak örneklemesinin sağlanmasına yardımcı olabilir. Bölgesel örneklemede toprak örnekleri toplamak için yerleşik yöntemler olmamakla birlikte, en yaygın tekniklerden biri, bölge boyunca zikzak bir hareket düzeni izleyerek, düzenli aralıklarla (bölgenin büyüklüğüne bağlı olarak belirli bir mesafede) rastgele toprak örnekleri toplamaktır. Bu, geniş ve homojen bir tarlada toprak örnekleri toplamaya biraz benzer, ancak tarlanın içindeki daha küçük, önceden tanımlanmış bölgelerde yapılır. Izgara örneklemesine benzer şekilde, bölge örnekleme sırasında önemli bir husus, belirli bir bölgedeki besin seviyelerini doğru bir şekilde temsil eden bir bileşik örnek elde etmek için yeterli sayıda toprak örneği toplamaktır. Referans olarak, 10 dekar veya daha küçük bölgeler için en az on ile on beş toprak örneği toplanmalı ve 10

dekaradan büyük bölgeler için toprak örneği sayısı buna göre artırılmalıdır (Lawrence ve ark., 2020).

Hassas Toprak Örnekleme Stratejisinin Seçimi

Toprak örnekleme stratejisi seçilirken sıkça sorulan soru, hangi yöntemin (ızgara yöntemi mi yoksa bölge yöntemi mi) daha etkili olduğudur. Cevap her zaman tek bir yöntemi seçmek kadar basit değildir. Çünkü her ikisi de çok faydalı olabilir ve mekansal besin değişkenliği hakkında değerli bilgiler sağlayabilir. En iyi örnekleme yöntemi, esas olarak belirli bir alan için mevcut değişkenlik miktarına ve geçmiş verilere bağlıdır. Genel olarak, ızgara örnekleme tüm yeni ekilen tarlalarda, birkaç yıl sonra üretime geri döndürülen tarlalarda, geçmişte yönetim sorunları yaşanan tarlalarda veya besin maddesi değişkenliğinin temel bir değerinin belirlenmesi gereken herhangi bir tarlada kullanılmalıdır. Sonraki yıllarda, bu temel bilgiler, toprak tipi, EC, topografya, hava görüntüleri veya verim gibi diğer verilerle birlikte kullanılarak, çoğu durumda maliyet ve etkinliğin daha iyi bir kombinasyonunu sağladığı için, kademeli olarak bölge toprak örneklemesine geçilmelidir. Genel olarak daha küçük ızgara boyutları (1 ile 2.5 dekar) kullanıldığında besin maddesi değişkenliğini göstermede ızgara örnekleme daha etkili olsa da bu durum daha fazla örnek ve daha yüksek örnekleme maliyetleri anlamına geldiğinden, her yıl bunu yapmak maliyet açısından verimli olmayabilir. Özellikle verim veya mevsim içi hava fotoğraflarına dayalı yönetim bölgeleri kullanmak, rastgele yerleştirilmiş ızgaralara kıyasla, gübre ve kireç yönetiminin zaman içinde tarlanın farklı alanlarını nasıl etkilediğine dair de fikir verebilir. Bu nedenle, en iyi yaklaşım, temel besin seviyelerini belirlemek için başlangıçta daha küçük ızgaralarda (2.5 dekar veya daha az) toprak örnekleme yapmak ve ardından önümüzdeki birkaç yıl içinde yönetim bölgelerine geçmek olabilir. İdeal olarak, tarlalar için yüksek çözünürlüklü besin haritaları oluşturmak ve bölgesel toprak örneklemesinin besin değişkenliğini

göstermede hala etkili olup olmadığını ve tarlalardaki düşük veya yüksek besinli alanları gözden kaçırmadığını değerlendirmek için her 4 ile 5 yılda bir ızgara örnekleme yapılmalıdır. En iyi sonuçlar için hem ızgara hem de bölgesel örnekleme stratejileri, yetiştiricilerin çiftliklerinde alana özgü besin yönetimini iyileştirmeye yönelik uzun vadeli planlarına dahil edilmelidir.

Tarım alanlarındaki mekansal besin maddesi değişkenliğini belirlemek ve alana özgü besin maddesi yönetimi için VRT gerçekleştirmek için hassas toprak örnekleme şarttır. Hem ızgara tabanlı hem de bölge tabanlı toprak örnekleme, yaygın besin maddesi değişkenliğine ve tarlalar için mevcut olan geçmiş verilerin miktarına bağlı olarak uygun şekilde kullanılması gereken etkili yöntemlerdir. Çoğu alanda toprak pH'ı ve besin maddesi değişkenliğinin doğru bir şekilde temsil edilmesi için, örnekleme ızgaraları ızgara örnekleme için 2.5 dekar veya daha az, yönetim bölgeleri ise bölge örnekleme için 10 dekar veya daha az olmalıdır. Her iki durumda da birleşik bir örnek oluşturmak için her ızgara veya bölge içinde yeterli sayıda (sekiz ile on iki) toprak örneği alınmalıdır. İdeal olarak, her tarlada 4 ile 5 yılda bir ızgara örnekleme yapılmalı, besin maddesi uygulamaları ve örnekleme maliyetleri açısından daha etkili olması için ise aralarda bölge örnekleme kullanılmalıdır. Bir çiftlikte hassas toprak örnekleme yöntemini uygulamadan ve benimsemeden önce, mekansal haritalar oluşturmak ve bunlarla çalışmak için gereken bilgi ve teknik uzmanlık gibi faktörlerin yanı sıra uygulama ekipmanının yetenekleri de dikkate alınmalıdır.

Toprak Haritaları

Toprak, tüm bitki gelişiminin temeli ve modern tarımın can damarıdır. Binlerce yıldır doğa, yaşamın gelişmesine ve bol hasat elde edilmesine yardımcı olmak için toprağı şekillendirmiştir. Toprağın sadece yetiştirilen bitkiler için değil, aynı zamanda çeşitli

bakteriler, mantarlar ve mikroorganizmalar topluluğu için de bir yaşam alanı görevi gördüğünü anlamak önemlidir. Son zamanlarda, araştırmalar sağlıklı toprakların çevresel streslere daha iyi dayanabildiğini gösterdiğinden, toprak sağlığının önemi daha fazla dikkat çekmiştir. Çiftçiler yüzyıllardır toprakların, gözlemlenen fiziksel ve görsel özelliklerine dayanarak yönetim stratejilerini uyarlamışlardır. Tarımda büyük önem taşıyan toprak bileşenleri arasında; bitki büyümesini önemli ölçüde etkileyebilen besin seviyeleri (karbon - C, kükürt - S, fosfor - P, potasyum - K, azot - N, kalsiyum - Ca ve magnezyum - Mg), pH gibi fiziko-kimyasal özellikler, doku (kil, silt ve kum) ve su içeriği yer almaktadır. Bu noktada, araştırmacılar, toprağın kimyasal ve fiziksel özelliklerini analiz ederek, besin maddeleri ve verimlilik dengesinin sağlanmasına ve böylece güçlü ve verimli ürünler yetiştirilmesine katkı sağlayacak kıymetli veriler elde etmişlerdir (Topa ve ark., 2025).

Toprak örnekleme, toprak verimliliğinin yönetiminde en önemli aşamadır. Toprak örnekleme, bir tarladan veya alandan küçük toprak örnekleri alıp analiz için laboratuvara göndermek anlamına gelmektedir. Analiz işleminin sonucu, besin maddelerini (azot, fosfor, potasyum gibi), pH değerini, organik maddeyi ve diğer özellikleri ölçerek toprağın sağlığını ve verimliliğini ortaya koymaktadır. Geleneksel toprak örnekleme ve haritalaması, ızgara örnekleme yaygınlaşmadan önce "W" şeklinde bir saha örnekleme modeli kullanılarak gerçekleştirilmekteydi (Şekil 7) (Hayes ve ark., 2023).

Şekil 8. W şeklinde bir yol kullanarak yapılan örnekleme yöntemi

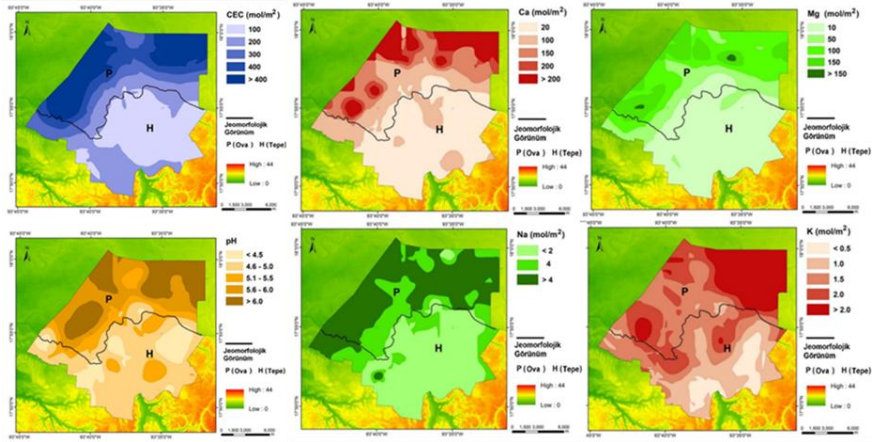


Topraklarla ilgili veriler örnekleme ve laboratuvar analizlerinden elde edilmekte ve toprak haritaları olarak görselleştirilmektedir. Etkili örnekleme, verimsizlikleri ve gereksiz maliyetleri önlemek için tarladaki mekansal varyasyonların dikkatlice değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle, toprak örnekleri toplamak için ızgara örneklemesi yerine bölgesel örnekleme yaklaşımı, çoğu sıra ekimi yapılan ürünler için kabul görmüş bir uygulamadır. Sonuçların geçerli ve doğru olmasını sağlamak için örneklemeden önce yönetim bölgelerinin oluşturulması çok önemlidir. Hassas tarımda yönetim bölgeleri, toprak özelliklerine ve sınırlarına ilişkin temel verileri sağlayan mevcut toprak haritaları veya araştırmalarından yararlanılarak oluşturulur.

Toprak haritalama, belirli bir alandaki toprak tiplerinin ve dağılımlarının sistematik olarak gözlemlenmesini ve kaydedilmesini içeren bir süreçtir. Toprak haritaları çiftçilerin ürün seçimi, gübreleme ve sulama konusunda bilinçli kararlar almalarına yardımcı olmaktadır. Toprak bilgisi, uzun vadeli toprak yönetimi için hayati önem taşımaktadır. Toprak profili ve mekansal dağılımı, miktar, alan ve zaman açısından hassas girdiler gerektiren sürdürülebilir tarımı teşvik etmek için iki kritik bileşendir. Dijital toprak haritaları (DSM), çevresel değişkenler ile toprak nitelikleri arasındaki bağlantının sayısal veya istatistiksel bir modelinin

geliştirilmesi ve ardından bu modelin tahmine dayalı bir harita oluşturmak için coğrafi bir veri kaynağına uygulanmasıyla ilgilidir. Şekil 8’de Meksika’nın Tabasco bölgesine yapılan toprak örneklemesi analizleri sonucunda elde edilen katyon değişim kapasitesi (CEC), pH, Ca, Mg, Na ve K haritaları gösterilmiştir (López-Castañeda ve ark., 2022).

Şekil 8. CEC, pH, Ca, Mg, Na ve K haritaları



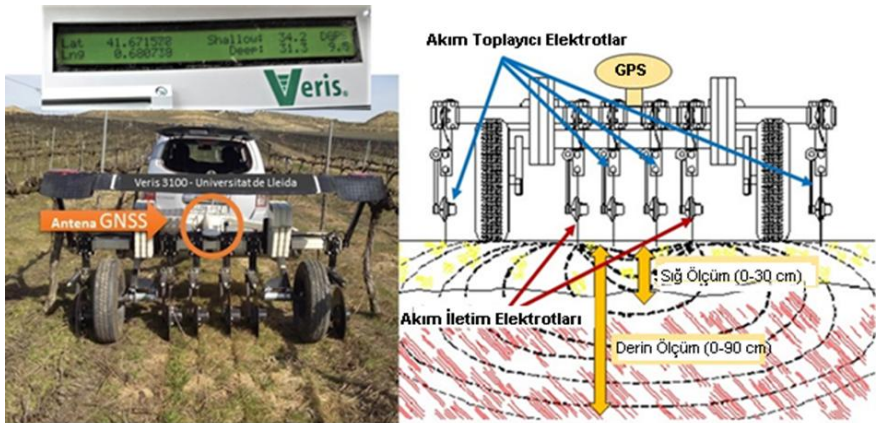
Toprağın Elektriksel İletkenliği

Üretim alanlarındaki toprak özelliklerindeki ve topografyadaki farklılıklar, ürün büyümesini ve yönetim stratejilerini etkilemektedir. Tüm tarlayı kapsayan yönetime kıyasla, bölge yönetimi girdi kullanımını optimize eder, tarımsal verimliliği artırır ve daha küçük ölçekli bir alanda alana özgü yönetime olanak tanır. Bölge yönetimini uygulamaya koymanın ilk adımı, verimi kontrol eden varyasyonları belirlemektir. Toprak özelliklerindeki varyasyon, mahsul verimini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bir tarladaki toprak varyasyonlarını karakterize etmek için çeşitli yöntemler vardır ve bunlar arasında EC ölçümü en hızlı, en güvenilir ve en uygun maliyetli yöntemlerden biridir (Ylagan ve ark.,2022). Statik ve sabit bir parametre olarak, EC ölçümleri toprak dokusu,

CEC, drenaj koşulları, organik madde seviyesi ve tuzluluk hakkında bilgi sağlar. Sahada ticari olarak temin edilebilen iki tür EC haritalama sistemi vardır: temaslı (Veris) ve temassız (EM38) sistemler. Her iki sistem için EC'yi, toprak bilimi tanımındaki EC'den (doymuş toprak macunu özütünün iletkenliğine dayalı) ayırt etmek için ölçüm sonucu görünür ECa olarak adlandırılmaktadır.

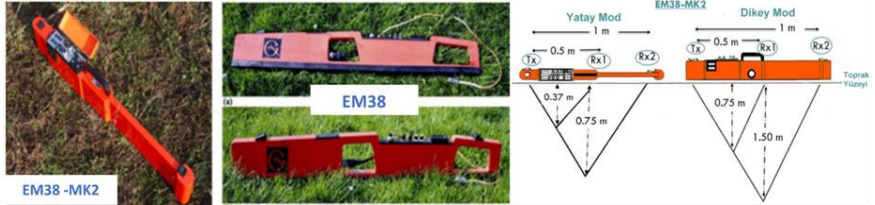
Veris sistemi, toprakla temas etmek için temas elektrotları olarak pulluk uçlarını kullanmaktadır. Bu sistemde, bir veya daha fazla pulluk ucu çifti, toprakla temas etmek ve toprağa elektrik akımı göndermek (iletim elektrotları) için kullanılırken, diğer pulluk uçları (alıcı elektrotlar) voltaj düşüşünü okumaktadır. Toprak ECa verileri, küresel konumlandırma sistemi (GPS) kullanılarak ilgili konum verisi ile birlikte bir kaydediciye kaydedilmektedir (Şekil 9). Veris 3100 sistemi topraktan sıg ve derin ECa değerlerin almaktadır (sığ değer 30 cm, derin EC değeri ise 90 cm'dir). Daha küçük bir model (Veris iScan) ise ekim makinesine veya toprak işleme ekipmanına monte edilebilmektedir. Ölçüm geçişleri arasındaki mesafe, istenen örnekleme yoğunluğuna veya tarladaki toprak değişkenliğine bağlı olarak 6 m ile 18 m arasında değişmektedir.

Şekil 9. Veris 3100 Sistemi ve ölçüm derinlikleri



EM38 ECa sensörü, toprağa doğrudan temas yerine elektromanyetik indüksiyon prensibini kullanmaktadır (Şekil 10) ve bir kaynak ile sensör elektrodu arasındaki voltaj düşüşünü ölçer (metaller performansı etkiler). EM38 (Geonics Limited), DUALEM ve GEM-2 (Geophex) en popüler temassız sensör modelleridir. Temaslı ve temassız makinelerden toplanan veriler benzerdir ve her ikisinden de iki tür okuma veya sinyal elde edilmektedir. Bunlardan biri sığ veya kök bölgesi okumaları, diğeri ise daha derin toprak koşullarıyla ilgili bilgi sağlayan derin ECa okumalarıdır.

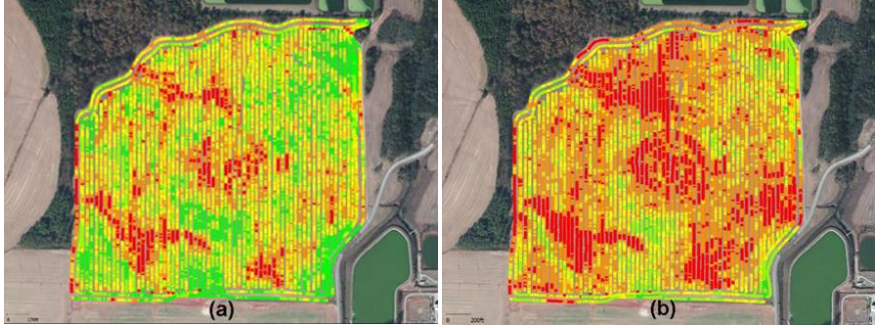
Şekil 10. EM38 Sistemi ve ölçüm derinlikleri



EC ölçüm cihazıyla donatılmış bir araç tarlada dolaşırken, veriler tipik olarak bir saniyelik aralıklarla toplanır. Bu veriler sisteme ait veri depolayıcıya kaydedilir ve bir dijital bellek cihazına (örneğin, USB bellek) depolanır (Ünal ve ark., 2021). Bir EC ölçüm ünitesinden elde edilen toprak EC veri dosyası en az dört sütun veri içerir. Birinci ve ikinci sütunlar, her veri noktası için boylam ve enlem bilgilerini içerir. Üçüncü ve dördüncü sütunlar sırasıyla sığ ve derin derinliklerdeki EC verilerini içerir. Şekil 11, bir tarlada toplanan ham EC verilerinin haritalarını göstermektedir. Haritada, kırmızı, düşük değerleri ($10 \mu\text{S}/\text{cm}'\text{den}$ az) temsil ederken, yeşil alanlar yüksek toprak EC değerlerini ($20 \mu\text{S}/\text{cm}'\text{den}$ fazla) temsil etmektedir. Bunlar, aracın tarlada izlediği yolları ve sığ derinlikler için EC değişimini (yeşil yüksek toprak EC'sini, kırmızı ise düşük toprak EC'sini) göstermektedir. Bu örnek tarlada, veri toplamak için 9 m şeritler kullanılmıştır. Çoğu Çiftlik Yönetim Bilgi Sistemi (FMIS) ve CBS yazılım paketi, daha sonra tarla düzeyinde analizler

veya mekansal modeller içinde diğerk mekansal katmanlarla birleştirilebilen toprak EC haritaları oluşturabilir (Karydas ve ark., 2025).

şekil 11. Toprak EC haritası: (a) sığ ölçüm (b) derin ölçüm

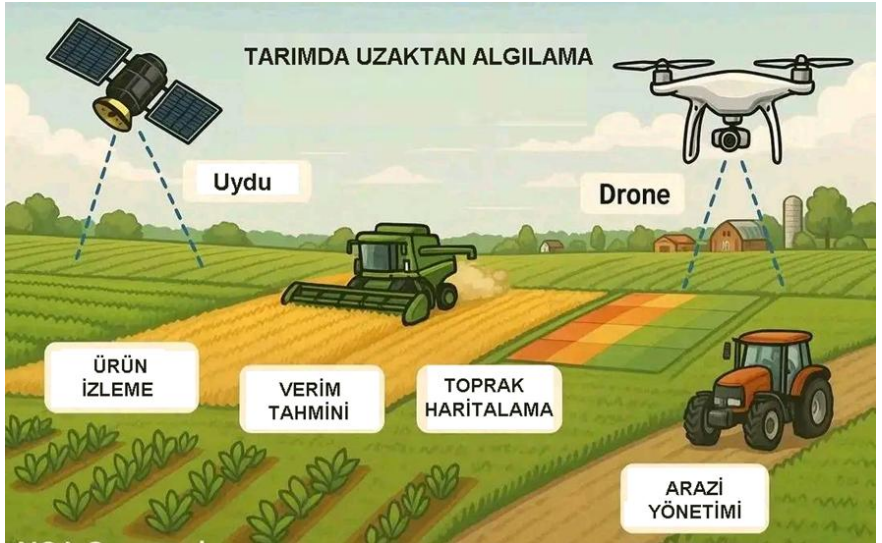


Düşük organik madde içeriğine sahip kumlu topraklar düşük EC değerine, siltli topraklar orta EC değerine ve kil topraklar daha yüksek EC değerine sahiptir (Alghamdi ve ark., 2024). Toprak EC'si, toprak dokusunu, kum, silt ve kili ölçmenin bir yoludur. Kilin daha ince parçacıkları, daha iri silt ve kum parçacıklarına göre daha fazla elektrik iletir. Bu nedenle, daha yüksek kil oranı daha yüksek EC değerine, daha yüksek kum oranı ise daha düşük EC değerine yol açar. ECa verileri, girdi değışken oranının doğruluğunu belirlemek için genellikle toprak örnekleme ve verim verileriyle doğrulanır. Birçok durumda, bu benzerlikler topraktaki farklılıklarla açıklanmaktadır. Toprağın su tutma kapasitesi verimi etkileyen önemli bir faktördür ve verim haritası muhtemelen toprak ECa'sı ile güçlü bir korelasyon gösterecektir. Genel olarak, toprak ECa haritaları daha fazla araştırma yapılması gereken alanları gösterebilir. Toprak ECa haritaları, toprak varyasyonları ve benzerlikleri hakkında değerli bilgiler sağlayarak, tarlayı daha küçük yönetim bölgelerine ayırmayı mümkün kılar. Tutarlı ECa değerlerine sahip bölgeler, benzer toprak özelliklerine sahip alanlardır ve toprak örnekleme ve yönetimi için birlikte gruplandırılabilirler.

Uzaktan Algılama Verileri

Uzaktan algılama, Dünya yüzeyi veya diğer nesneler hakkında uzaktan bilgi toplamayı içeren bir çalışma alanı ve teknolojidir. Hedefle fiziksel temas kurmadan veri toplamak için uydular, uçaklar ve insansız hava araçları (İHA) gibi çeşitli cihazlar ve sensörler kullanır (Şekil 12). Bu işlem, gelişmiş ekipmanlarla uzaktan arazinin kontrol edilmesini içerir. Kontrol, bir arazi parçasının fiziksel özelliklerini kapsar. Bu süreç, araziden yayılan ve yansıyan radyasyonu tahmin ederek çalışır. Bu da arazinin genel yapısını oluşturmaya ve uzmanların arazinin belirli bölümleri hakkında karar vermelerine yardımcı olur. Elektromanyetik dalgalar arasında görünür ışık, kızılötesi ve mikrodalga radyasyonu bulunur. Radyasyonun özelliklerini analiz ederek, bilim insanları Dünya'nın özellikleri ve süreçleri hakkında değerli bilgiler elde edebilirler.

Şekil 12. Uzaktan algılamanın hassas tarımda kullanımı

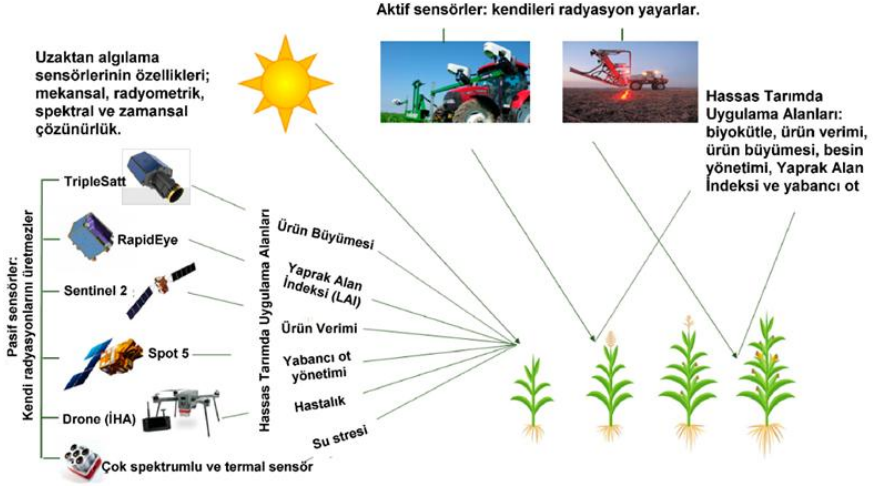


Uydu ve İHA görüntüleri, mahsul sağlığının, büyüme sürecinin sürekli izlenmesini ve hastalık salgınları, zararlı istilaları veya kuraklık stresi gibi sorunların erken tespitini sağlar (Xing ve ark., 2026). Bu, çiftçilerin hızlı bir şekilde müdahale etmelerini ve verimlerini korumalarını sağlar. Gelişmiş sensörler, nem seviyeleri, doku, organik madde içeriği ve besin maddesi bulunabilirliği de dahil olmak üzere toprak özelliklerini haritalandırabilir. Bu ayrıntılı bilgiler, optimum bitki büyümesi için özel olarak tasarlanmış toprak yönetimi stratejilerini destekler. Bitki sağlığı ve biyokütlesini değerlendirerek, uzaktan algılama, hasattan çok önce ürün veriminin güvenilir bir şekilde tahmin edilmesini sağlar. Bu, tedarik zinciri lojistiğini, pazarlama stratejilerini ve kaynak tahsisini iyileştirir. Uzaktan algılama verileri, gübrelerin, zararlı ilaçlarının ve sulamanın hedeflenen şekilde uygulanmasına rehberlik ederek kaynak kullanımını optimize eder, çevresel zararı en aza indirir ve mahsul verimliliğini en üst düzeye çıkarır (Sishodia ve ark., 2020). Uzaktan algılama, kuraklık, sel ve fırtına gibi olayların neden olduğu tarımsal hasarın hızlı ve doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlar. Bu, sigorta taleplerini ve iyileştirme çalışmalarını hızlandırır. Uydu ve hava görüntüleri, geniş bölgelerdeki ürün türlerinin ve arazi kullanım modellerinin verimli bir şekilde sınıflandırılmasını ve haritalanmasını sağlar. Bu bilgiler, etkili tarımsal planlama ve politika geliştirme için kritik öneme sahiptir.

Tarımda uzaktan algılama süreci, farklı cihazlar tarafından belirli bir süre boyunca toplanan bilgiler aracılığıyla işler. Toplanan veriler daha sonra mahsulün ve verimin farklı yönlerini analiz etmek için kullanılabilir. Tarımda uzaktan algılama teknikleri, ürünler ve tarım arazileri hakkında veri toplama ve analiz etme için çeşitli yöntemleri kapsar. Tarımda optik algılama, çok spektrumlu algılama, hiperspektral algılama, termal algılama, radar algılama, LiDAR (Light Detection and Ranging) algılama gibi yaygın uzaktan algılama türleri kullanılmaktadır (Şekil 13) (Khanal ve ark., 2020).

Optik algılama bitki sağlığı, bitki örtüsü indeksleri ve arazi örtüsü hakkında değerli bilgiler sağlar. Optik algılama verileri genellikle uydu görüntüleri veya hava fotoğrafları yoluyla elde edilir. Çok spektrumlu veriler, mahsul koşullarını değerlendirmek için NDVI ve EVI (Geliştirilmiş Bitki rts İndeksi) gibi bitki örtüsü indekslerini hesaplamak için yaygın olarak kullanılır. Hiperspektral veriler, hastalık tespiti, besin değerlendirmesi ve ayrıntılı ürün sınıflandırması için değerlidir. Termal algılama, su stresini değerlendirmek, sulama verimliliğini tespit etmek ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak bitki sağlığını izlemek için kullanışlıdır. Radar verileri, topografyanın haritalanması, toprak neminin izlenmesi ve mahsul büyüme aşamalarının değerlendirilmesi için değerlidir. LiDAR verileri, mahsul yüksekliği, bitki örtüsü yapısı ve arazi yüksekliği hakkında son derece doğru üç boyutlu bilgiler sağlar. Mahsul yüksekliği tahmini, arazi modellemesi ve bitki örtüsü karakterizasyonu dahil olmak üzere hassas tarım uygulamaları için kullanışlıdır. RGB kameralar, çok spektrumlu sensörler veya termal sensörler gibi çeşitli sensörlerle donatılmış İHA'lar, yerel ölçekte yüksek çözünürlüklü ve esnek veri toplama olanağı sağlar. İHA'lar, mahsul izleme, hastalık tespiti ve hassas tarım uygulamaları için ayrıntılı ve zamanında bilgi sağlar.

şekil 13. Uzaktan algılama teknikleri, özellikleri, uygulamaları ve sensörleri (Rodrigues ve ark., 2024)



Hassas tarımda yönetim bölgeleri oluşturmak, bitki örtüsü indeksleri, biyokütle, klorofil içeriği ve daha fazlası gibi önemli mahsul sağlığı göstergelerini yakalamak için uzaktan algılama veya hava görüntüleme yöntemlerinin kullanılmasını içerir. “Bu, yüksek çözünürlüklü görüntüleme teknolojisine sahip uydular, uçaklar veya İHA’lar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu kapsamda elde edilen görüntüler gelişmiş analiz teknikleri ile işlenerek alan içindeki bölgeler belirlenir.

Verim Monitörleri

Verim haritaları, ilk olarak 1990’ların başında tanıtılan, aynı tarlanın farklı bölgelerindeki verim seviyeleri ve nem içeriği gibi özellikler hakkında coğrafi referanslı verilerin toplanması sürecini içeren hassas bir tarım aracıdır. Hasat sırasında, hasat makinesi bu parametreleri çeşitli sensörler kullanarak ölçer ve ölçüm ile ölçümün yapıldığı konum coğrafi uzamsal araçlar kullanılarak kaydedilir. Bu bilgiler, çiftçiler tarafından görselleştirmeyi kolaylaştıran bir harita oluşturmak için kullanılır. Ayrıca, verim özelliklerine ilişkin tekil ölçümler, farklı renkler kullanılarak belirli bölgelere veya aralıklara sınıflandırılır ve böylece bir aralık haritası veya bölge

sınıflandırılmış haritası oluşturulur. Bu tür sınıflandırmaların sayısı, çiftliğin ihtiyaçlarına göre ayarlanabilir. Örneğin, dönüm başına ortalama 250 kilo verim veren bir mısır tarlasının verim haritasını oluşturmak için, haritayı her biri dönüm başına 25 kilo verim veren alanlara ayırmak uygun olabilir. Ancak bu, gereken hassasiyet seviyesine ve mevcut teknolojiye bağlıdır. Standart verim haritaları 5-7 renk bölgesine sahiptir ve hassasiyet gereksinimleri arttıkça bu sayı da artar.

Çiftliğin ölçeğine ve izlenen ürün türüne bağlı olarak bileşenler değişebilmekle birlikte, daha yaygın olan tahıl verim haritalama sisteminin temel bileşenleri şunlardır (Şekil 14) (Ahmad ve Mahdi, 2018):

- Tahıl akış sensörü: Biçerdöverin üzerine takılan tahıl akış sensörü, biçerdöver tarlada hareket ederken hasat edilen tahılın gerçek miktarını gerçek zamanlı olarak belirlemek için kullanılır.
- Tahıl nem sensörü: Tahıl biçerdöverlerinde, tahılın kapasitesini ölçen tahıl nem sensörleri de bulunur. Bu, yağmur, sıcaklık vb. çevresel faktörlerin tahıllarda yarattığı değişimleri dengelemek için yapılır.
- Yer hızı sensörü: Doğru sonuçlar için biçerdöverin hızını ölçmek önemlidir. Bu, GNSS tabanlı bilgiler veya tekerlek dönüşünden hızı ölçen gerçek bir yer hızı sensörü kullanılarak yapılabilir.
- GNSS alıcısı: Diğer sensörler tarafından yapılan ölçümlerin coğrafi kodlaması için, biçerdöverin üzerine sürekli olarak alınan her ölçümün konumunu veren bir GNSS alıcısı takılmıştır.
- Verim izleme ekranı: Bu, hasat makinelerinin operatör/çiftçinin bulunduğu kabinine monte edilen bir

bileşendir. Bu ekran, operatöre/çiftçiye, çeşitli sensörler tarafından sürekli olarak üretilen gerçek zamanlı işlenmiş verileri bir ekranda gösterir.

Bir çiftliğin verim haritasını oluşturmak için verim izleme yönteminin uygulanmasının çeşitli faydaları vardır (Colaço ve ark., 2020). Bunlar:

- Toprak işleme: Hem toprak işlemenin yapılmaması hem de aşırı toprak işleme, bir çiftliğin üretimini azaltabilir ve bu durum, özellikle sistematik bir toprak işleme işlemi yapılmadıysa, büyük çiftliklerin küçük alanlarında bile ortaya çıkabilir. Bu alanların belirlenmesi, bir sonraki döngüde daha iyi bir toprak işleme işlemi sağlamak için kritik öneme sahiptir.
- Gübreleme Önerileri: Değişken Oranlı Gübreleme (VRF) genellikle toprak örnekleri alınarak ve toprak verilerinin analizi yapılarak gerçekleştirilir. Tarla içi değişkenliği hesaba kattığı için verim haritaları da gübreleme önerileri için kullanılabilir. Ancak en iyi sonuçlar, her ikisinin birlikte kullanılmasıyla elde edilir.
- Sulama Gereksinimleri: Verim izlemenin en önemli bileşenlerinden biri nem içeriğidir. Bu nedenle, verim haritaları sulama planları oluşturmak için değerli bir kaynaktır. Örneğin, bir verim haritasındaki düşük üretim alanları, mevcut ürün döngüsündeki yüksek veya düşük sulamadan kaynaklanıyor olabilir. Bu bilgi, optimum sulama seviyesini belirlemek için gereklidir.
- Ürün Rotasyonu: Verim haritalaması, genel olarak uygun ürün rotasyonu hakkında fikir verebilir. Hasat döneminin farklı zamanlarında geçmişte elde edilen verim verilerine

başvurularak, en fazla ürün verimi sağlayan hasat zamanı tam olarak belirlenebilir.

Hassas tarımda, verim izleme cihazları ve haritalar kullanılarak bölgeler oluşturulur. Bu cihazlar ve haritalar, yıllar boyunca hayati önem taşıyan ürün verimi ve kalitesi verilerini toplar. Verim haritalama olarak bilinen bu süreç, hasat makinelerinde gerçek zamanlı izleme yapılmasını ve ürün kütlesi, nem seviyeleri ve işlenen alan hakkında bilgi toplanmasını içerir. Sonrasında, bu veriler kapsamlı verim haritaları oluşturmak ve daha hassas ve verimli tarım uygulamalarını yönlendirmek için kullanılır.

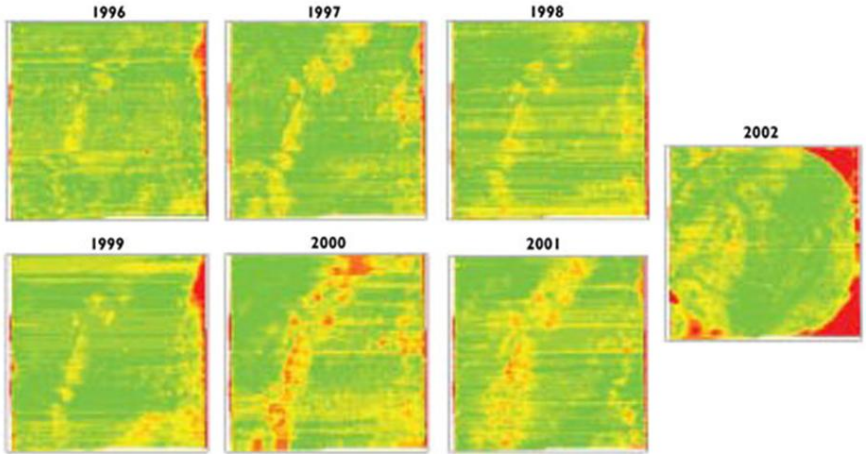
Şekil 14. Veri izleme sistemi: (a) hasat makinesinde kullanılan ekipmanlar, (b) kabin içi izleme ekipmanları



Verim izleme, hasat sırasında bir biçerdöver tarafından ne kadar mısır, soya fasulyesi veya buğday gibi ürünün toplandığını ölçme işlemidir. Tarım makinesi çalışırken hem hasat edilen miktarı hem de diğer önemli özellikleri (örneğin, tahılın nem içeriği) kaydetmek için yerleşik sensörler kullanır. Bu veriler, verim haritalaması için GPS koordinatlarıyla etiketlenir. Bu da tarladaki ürün verimliliğinin nasıl değiştiğini gösteren ayrıntılı bir harita oluşturur (Şekil 15). Verim haritalaması genellikle cevaplardan çok daha fazla soru ortaya çıkarır. Verim haritalaması tamamlandıktan sonra, verim değişkenliğinin nedenini bulmak ve veri kümelerini değerli bilgilere dönüştürmek çiftçinin sorumluluğundadır. Çiftçiler,

verim haritalarını birkaç yıl boyunca takip ederek, her tarladaki farklı ürün ve çeşitlerin performansını izleyebilir ve sonuç olarak çiftlik yönetimlerini iyileştirebilirler. Bu bağlamda, çiftçilerin doğal faktörlerden kaynaklanan değişkenlikleri, uygulanan çiftlik yönetim uygulamalarından kaynaklanan değişkenliklerden ayırt etmeleri son derece önemlidir.

Şekil 15. Hasat makinesi ve verim haritası



Veri Analizi ve Modelleme Araçları

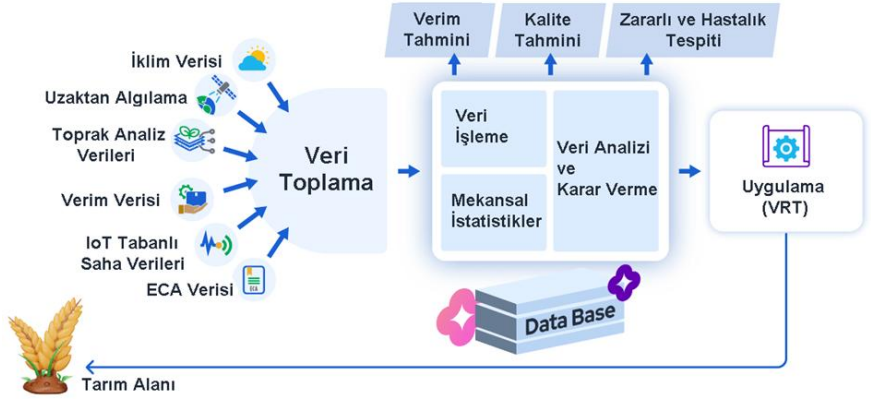
Hassas tarım, verim verileri, uydu görüntüleri ve toprak verimliliği gibi çeşitli biçimlerde çok büyük miktarda veri üretebilme kapasitesine sahiptir. Hassas tarımda, yönetim bölgeleri, toprak tipi, eğim, toprak kimyası, mikro iklim ve/veya ürün verimini etkileyen diğer faktörlere bağlı olarak benzer verim potansiyeline

sahip olan tarla içindeki alanlardır. Üreticinin tarlaya dair bilgisi, sürecin önemli bir parçasıdır. Yönetim bölgeleri, ürün girdilerini ve verim potansiyelini optimize etme mekanizması olarak düşünülmektedir. En büyük zorluk, tarladaki değişkenliği mükemmel bir şekilde yansıtan yönetim bölgeleri oluşturmaktır. Uydu görüntüleri, toprak verimliliği, topografya türevleri ve verim izleme verileri gibi farklı katmanların birleşimi, daha duyarlı yönetim bölgeleri oluşturmaın bir sonraki mantıklı adımıdır (Chen ve ark., 2025).

Hassas tarımda, veri analizi yapan gelişmiş araçlar kullanarak yönetim bölgeleri dikkatlice oluşturulmaktadır. Bu araçlar birçok farklı bilgiyi bir araya getirerek çiftlikteki tüm olası senaryoların gösterilmesine yardımcı olmaktadır (Şekil 16). Bu sayede çiftlik yönetimi için nereye odaklanılması gerektiği matematiksel modeller ve haritalar yardımıyla mümkün olmaktadır. Bu, çiftçilerin su ve gübre gibi kaynakları nerede kullanacakları konusunda akıllıca seçimler yapmalarına yardımcı olmaktadır. Ancak yöntem seçimi, veri mevcudiyetine, değiştirilecek girdi türüne, alanın büyüklüğüne, teknolojinin maliyetine ve çiftçinin tercihine bağlıdır (Lokesh ve ark., 2026). Amaç, anlamlı, tutarlı ve pratik bölgeler oluşturmaktır.

Şekil 16. Hassas tarımda veri odaklı karar verme

Hassas Tarımda Veri Analizi



Modelleme, karmaşık bir sistemin veya olayın basitleştirilmiş bir temsilini veriler, varsayımlar ve matematiksel denklemler temelinde oluşturma sürecidir. Toprak özellikleri, hava koşulları, zararlı ve hastalık dinamikleri, bitki genetiği, yönetim uygulamaları gibi farklı faktörlerin bitki büyümesini ve verimini nasıl etkilediğini anlamamıza yardımcı olabilmektedir (Lyu ve ark., 2026). Ayrıca, iklim değişikliği, piyasa dalgalanmaları, politika müdahaleleri gibi farklı senaryolar altında bu faktörlerin gelecekte nasıl değişeceğini tahmin etmemize de yardımcı olabilmektedir. Ayrıca, modelleme kullanarak, tarımsal sistemin farklı bileşenleri arasındaki etkileşimler ve ödüneşmeler hakkında bilgi edinebilir ve farklı yönetim seçeneklerinin sonuçları değerlendirebilmektedir.

Sonuç

Yönetim bölgeleri, bir tarlada katmanların birleşiminden oluşturulan benzer tarımsal alanlar olarak tanımlanmaktadır. Bu benzer tarımsal alanlar, girdileri ve verileri yönetmek, çiftliğin verimliliğini ve yatırım getirisini analiz etmek için kullanılabilir. Yönetim bölgelerinin nasıl oluşturulması gerektiği bölgenin nasıl kullanılacağını planlanmasına bağlıdır. Birçok değerli veri katmanı bulunmaktadır. Ne kadar çok katman ve

güvene sahip olunursa, bölge o kadar iyi ve kullanışlı olmaktadır. Veri yönetimine yeni başlandıysa ve çok fazla veri katmanı toplanmadıysa, toprak testi özellikleri, bir ile iki yıllık verim verileri ve hatta bir NDVI görüntüsü gibi birkaç basit katman başlangıç noktası sağlayabilmektedir. Verim ve toprak verimliliği gibi veri katmanları oluşturdukça, daha doğru yönetim bölgeleri tanımlanabilmektedir. Ne kadar çok geçmiş veriye sahip olunursa, yönetim bölgesi o kadar rafine olur ve ekim ve gübreleme gibi değişken oranlı reçeteler için kullanıcıya o kadar fazla güven verir. Bölgeler oluşturulduktan sonra, tohum, gübre, su ve zararlı ilaçları gibi girdilerin değişken oranlı uygulamalarını yönlendirmek için kullanılabilirler. VRT, yönetim bölgesi bilgilerine dayanarak bir tarladaki girdi uygulama oranını değiştirmeye olanak tanıyan bir tekniktir. VRT'yi uygulamak için çiftçinin şunlara ihtiyacı vardır.

- Reçete haritasına veya sensör geri bildirimine göre uygulama hızını ayarlayabilen değişken oranlı bir kontrol cihazı.
- İlaçlama yapan kişinin saha içindeki konumunu belirleyebilen küresel konumlandırma sistemi (GNSS).
- Yönetim bölgeleri ve reçete haritaları gibi mekansal verileri depolayabilen, görüntüleyebilen ve analiz edebilen bir coğrafi bilgi sistemi (GIS).

Yönetim bölgelerine dayalı VRT kullanımı çiftçiye şu konularda yardımcı olabilir:

- Girdileri en etkili oldukları yerlerde uygulanması ve aşırı veya yetersiz uygulamadan kaçınılması
- Verimliliği düşük veya su kıtlığı çeken toprakların verimliliğinin artırılması

Ayrıca, girdi uygulama oranlarını özelleştirerek, çiftçiler verimsiz veya düşük verimlilik potansiyeline sahip topraklarda girdi

maliyetlerini azaltabilirler. Bu uygun maliyetli yaklaşımlar, kaynakların akıllıca yatırılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, yönetim bölgeleri ve VRT ile hassas tarımın, besin maddelerinin sızmasını en aza indirerek, kimyasalların su kaynaklarına karışmasını azaltarak ve toprak erozyonunu önleyerek çevreye fayda sağladığını belirtmekte fayda vardır. Hassas tarım, ürün verimliliğini artırmak için teknoloji ve veri odaklı içgörülerden yararlanan, tarıma dönüştürücü bir yaklaşımdır. Toprak sensörlerinden, uzaktan algılamadan, verim izleme cihazlarından veya veri analiz araçlarından elde edilen verileri kullanarak, çiftçilerin tarlalarına uygun yönetim bölgeleri oluşturmalarını sağlar. Bu bölgeler kaynak tahsisini optimize ederek, ürün verimini artırır, maliyetleri düşürür ve sürdürülebilir tarım uygulamalarına yol açar.

Kaynakça

Ahmad, L., & Mahdi, S.S. (2018). Yield Monitoring and Mapping. *In: Satellite Farming. Springer, Cham.*
https://doi.org/10.1007/978-3-030-03448-1_11

Alghamdi, A. G., Majrashi, M. A., & Ibrahim, H. M. (2024). Improving the Physical Properties and Water Retention of Sandy Soils by the Synergistic Utilization of Natural Clay Deposits and Wheat Straw. *Sustainability*, 16(1), 46.
<https://doi.org/10.3390/su16010046>

Ali, A., Rondelli, V., Martelli, R., Falsone, G., Lupia, F., & Barbanti, L. (2022). Management Zones Delineation through Clustering Techniques Based on Soils Traits, NDVI Data, and Multiple Year Crop Yields. *Agriculture*, 12(2), 231.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12020231>

Chen, X., Zhang, H., & Wong, C.U.I. (2025). Dynamic Monitoring and Precision Fertilization Decision System for Agricultural Soil Nutrients Using UAV Remote Sensing and GIS. *Agriculture*, 15(15), 1627.
<https://doi.org/10.3390/agriculture15151627>

Colaço, A.F., Trevisan, R.G., Karp, F.H.S., & Molin, J.P. (2020). Yield Mapping Methods for Manually Harvested Crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177(1), 105693.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105693>

Ferguson, R.B., & Hergert, G.W. (2009). Soil Sampling for Precision Agriculture. *University of Nebraska Extension*. EC154.

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

Filintas, A., Gougoulas, N., Kourgialas, N., & Hatzichristou, E. (2023). Management Soil Zones, Irrigation, and Fertigation Effects on Yield and Oil Content of *Coriandrum sativum* L. Using Precision Agriculture with Fuzzy k-Means Clustering. *Sustainability*, 15(18), 13524. <https://doi.org/10.3390/su151813524>

Hayes, E., Higgins, S., Geris, J., Nicholl, G., Mullan, D. (2023). Weighted risk assessment of critical source areas for soil phosphorus losses through surface runoff mechanisms. *Catena*, 225(1), 107027. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107027>

Javadi, S. H., Guerrero, A., & Mouazen, A. M. (2022). Clustering and Smoothing Pipeline for Management Zone Delineation Using Proximal and Remote Sensing. *Sensors*, 22(2), 645. <https://doi.org/10.3390/s22020645>

Karunathilake, E.M.B.M., Le, A. T., Heo, S., Chung, Y.S., & Mansoor, S. (2023). The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. *Agriculture*, 13(8), 1593. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081593>

Karydas, C., Iatrou, M., & Mourelatos, S. (2025). An Innovative Process Chain for Precision Agriculture Services. *Computers*, 14(6), 234. <https://doi.org/10.3390/computers14060234>

Kazemi, M., & Samavati, F. F. (2023). Automatic Soil Sampling Site Selection in Management Zones Using a Multi-Objective Optimization Algorithm. *Agriculture*, 13(10), 1993. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101993>

Khan, H., Farooque, A. A., Acharya, B., Abbas, F., Esau, T. J., & Zaman, Q. U. (2020). Delineation of Management Zones for Site-Specific Information about Soil Fertility Characteristics through Proximal Sensing of Potato Fields. *Agronomy*, 10(12), 1854. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121854>

Khanal, S., KC, K., Fulton, J.P., Shearer, S., & Ozkan, E. (2020). Remote Sensing in Agriculture—Accomplishments, Limitations, and Opportunities. *Remote Sensing*, 12(22), 3783. <https://doi.org/10.3390/rs12223783>

Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Myers, D.B., Drummond, S.T., & Hong, S.Y. (2005). Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, 285. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.012>

Lawrence, P.G., Roper, W., Morris, T.F., & Guillard, K. (2020). Guiding Soil Sampling Strategies Using Classical and Spatial Statistics: A Review. *Agronomy Journal*, 112(1), 493. <https://doi.org/10.1002/agj2.20048>

Lokesh, C., Gumma, M.K., Susheela, R., Ronanki, S., Shankaraiah, M., & Panjala, P. (2026). Integrating Remote Sensing and Crop Simulation Models for Rice Yield Estimation: A Comprehensive Review. *AgriEngineering*, 8(3), 88. <https://doi.org/10.3390/agriengineering8030088>

López-Castañeda, A., Zavala-Cruz, J., Palma-López, D. J., Rincón-Ramírez, J. A., & Bautista, F. (2022). Digital Mapping of Soil Profile Properties for Precision Agriculture in Developing Countries. *Agronomy*, 12(2), 353. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020353>

Lyu, Y., Cheng, C., Chen, X., Tang, S., Chen, S., Guan, X., Wu, L., Liang, Z., Zhu, Y., & Xia, G. (2026). Growth Simulation Model and Intelligent Management System of Horticultural Crops: Methods, Decisions, and Prospects. *Horticulturae*, 12(2), 139. <https://doi.org/10.3390/horticulturae12020139>

Mallarino, A.P., & Wittry, D.J. (2004). Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of

phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Precision Agriculture*, 5, 131. <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000022358.24102.1b>

Melo, D. D., Cunha, I. A., & Amaral, L. R. (2025). Precision Zones: An Open-Source QGIS Plugin for Management-Zone Segmentation in Precision Agriculture. *AgriEngineering*, 7(12), 420. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7120420>

Mgendi, G. (2024). Unlocking the potential of precision agriculture for sustainable farming. *Discover Agriculture*, 2(1), 87. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00078-3>

Miller, T., Mikiciuk, G., Durlík, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now—A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. *Sensors*, 25(12), 3583. <https://doi.org/10.3390/s25123583>

Rodrigues, D. M., Coradi, P. C., Timm, N. d. S., Fornari, M., Grellmann, P., Amado, T. J. C., Teodoro, P. E., Teodoro, L. P. R., Baio, F. H. R., & Chiomento, J. L. T. (2024). Applying Remote Sensing, Sensors, and Computational Techniques to Sustainable Agriculture: From Grain Production to Post-Harvest. *Agriculture*, 14(1), 161. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010161>

Sanyaolu, M., & Sadowski, A. (2024). The Role of Precision Agriculture Technologies in Enhancing Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 16(15), 6668. <https://doi.org/10.3390/su16156668>

Serrano, J., Shahidian, S., Marques da Silva, J., Paixão, L., Moral, F., Carmona-Cabezas, R., García, S., Palha, J., & Noéme, J. (2020). Mapping Management Zones Based on Soil Apparent Electrical Conductivity and Remote Sensing for Implementation of Variable Rate Irrigation—Case Study of Corn under a Center Pivot. *Water*, 12(12), 3427. <https://doi.org/10.3390/w12123427>

Sishodia, R.P., Ray, R.L., & Singh, S.K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>

Țopa, D.C., Căpșună, S., Calistru, A.E., & Ailincăi, C. (2025). Sustainable Practices for Enhancing Soil Health and Crop Quality in Modern Agriculture: A Review. *Agriculture*, 15(9), 998. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090998>

Torney, L., Weltzien, C., Herold, M., Vogel, S., Voß, S. (2025): Improving agricultural management zoning involving Sentinel-2 timeseries, crop's phenology stages and proximal soil sensing data. *Discover Agriculture*, 3, 113. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00283-8>

Ünal, İ., Topakcı, M., Çanakcı, M., Karayel, D., Yılmaz, E., & Kabaş, Ö. (2021). Development of a mobile robot-based combined sensor platform to determine the correlation between soil penetration resistance and electrical conductivity. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 45(3), 365-379. <https://doi.org/10.3906/tar-2007-43>

Virk, S., Tucker, M., Harris, G., Smith, A., Levi, M., & Lessl, J. (2025). Efficacy and Economics of Different Soil Sampling Grid Sizes for Site-Specific Nutrient Management in Southeastern USA. *Agronomy*, 15(4), 903. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040903>

Virnodkar, S.S., Pachghare, V.K., Patil, V.C., & Jha, S.K. (2020). Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review. *Precision Agriculture*, 21(13), 1121. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09711-9>

Wang, J., Zhai, Z., Xu, G., Zhang, R., Zhang, X., & Hu, R. (2024). Optimizing Sampling Points and Path Planning for Soil

Monitoring in Agricultural Land. *Agronomy*, 14(12), 2947.
<https://doi.org/10.3390/agronomy14122947>

Xing, Y., Liu, X., & Wang, X. (2026). Integrating UAVs, satellite remote sensing, and machine learning in precision agriculture: pathways to sustainable food production, resource efficiency, and scalable innovation. *Frontiers in Agronomy*, 7(1), 1670380. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1670380>

Yari, A., Madramootoo, C.A., Woods, S.A., Adamchuk, V.I., & Huang, H.H. (2017). Assessment of Field Spatial and Temporal Variabilities to Delineate Site-Specific Management Zones for Variable-Rate Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(9), 04017037.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001222](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001222)

Ylagan, S., Brye, K. R., Ashworth, A. J., Owens, P. R., Smith, H., & Poncet, A. M. (2022). Using Apparent Electrical Conductivity to Delineate Field Variation in an Agroforestry System in the Ozark Highlands. *Remote Sensing*, 14(22), 5777.
<https://doi.org/10.3390/rs14225777>

Žáková Kroupová, Z., Kumhálová, J., & Novák, P. (2024). Multi-layered management zone delineation for site-specific crop management. *Precision Agriculture*, 25(4), 1452–1470.
<https://doi.org/10.1007/s11119-024-10213-1>

HASSAS TARIMDA DEĞİŞKEN ORANLI SULAMA SİSTEMLERİ

Mesut ÇOŞLU¹
Tahsin UYGUN²

Giriş

Tarım sektörü, küresel ölçekte su kaynaklarının en yoğun kullanıldığı ekonomik faaliyetlerden biri olarak kabul edilmektedir. Dünya genelinde kullanılabilir tatlı su kaynaklarının yaklaşık %70'i tarımsal sulama faaliyetlerinde tüketilmektedir ve bu oran bazı kurak ve yarı kurak bölgelerde %80'in üzerine çıkabilmektedir (FAO, 2021). Bu durum, özellikle iklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleştiği günümüzde, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini tarım politikalarının merkezine yerleştirmiştir. Küresel sıcaklık artışı, yağış rejimlerindeki düzensizlikler ve kuraklık olaylarının sıklığındaki artış, bitkisel üretimde su yönetimini daha karmaşık hale getirmekte ve mevcut sulama sistemlerinin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Tarımsal üretimde kullanılan suyun önemli bir kısmının yüzey akışı, derin drenaj ve

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Hassas Tarım ve Tarımsal Robotlar Bölümü, Orcid: 0000-0003-3952-6563

² Dr.Öğr.Üyesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Hassas Tarım ve Tarımsal Robotlar Bölümü, Orcid: 0000-0002-9625-9513

buharlaşma gibi süreçler nedeniyle etkin şekilde kullanılamadığı bilinmektedir. Bu nedenle modern sulama stratejileri, yalnızca suyun temin edilmesine değil, aynı zamanda optimum şekilde kullanılmasına odaklanmaktadır (IPCC, 2022).

Tarımda su kullanımının verimliliğini artırmaya yönelik yaklaşımlar incelendiğinde, geleneksel sulama yöntemlerinin çoğunlukla homojen su uygulamasına dayandığı görülmektedir. Bu yöntemlerde tarla genelinde aynı miktarda su uygulanmakta ve alan içi farklılıklar çoğu zaman göz ardı edilmektedir. Ancak toprak özellikleri, topoğrafya, bitki gelişim durumu ve mikroiklim koşulları gibi faktörler tarım alanlarında önemli ölçüde mekânsal değişkenlik göstermektedir. Aynı tarla içerisinde farklı toprak tekstrlerine sahip bölgeler bulunabilir; bazı bölgeler daha hızlı su kaybederken bazı bölgeler suyu daha uzun süre tutabilir. Bu tür heterojenlikler, sabit oranlı sulama uygulamalarının bazı alanlarda aşırı sulamaya, bazı alanlarda ise su stresine neden olmasına yol açmaktadır (Irmak ve ark., 2025). Aşırı sulama, bitki kök bölgesinde oksijen eksikliğine neden olarak kök gelişimini olumsuz etkileyebilir ve aynı zamanda besin elementlerinin yıkanmasına yol açarak hem ekonomik kayıplara hem de çevresel kirliliğe neden olabilir. Buna karşın yetersiz sulama ise bitkilerde su stresine neden olarak fotosentez kapasitesinin düşmesine ve sonuç olarak verim kaybına yol açmaktadır.

Bu bağlamda, tarımsal üretimde kaynak kullanımının optimize edilmesini hedefleyen hassas tarım yaklaşımı son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Hassas tarım, üretim alanlarındaki mekânsal ve zamansal değişkenliği analiz ederek girdilerin doğru yerde, doğru zamanda ve doğru miktarda uygulanmasını amaçlayan bir yönetim stratejisidir (Sanyaolu ve Sadowski, 2024). Bu yaklaşımın temelinde veri odaklı karar verme süreçleri yer almaktadır. Sensör teknolojileri, uydu ve insansız hava aracı (İHA) tabanlı uzaktan algılama sistemleri, küresel konumlandırma

sistemleri (GPS), coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve gelişmiş veri analitiği yöntemleri, hassas tarım uygulamalarının temel teknolojik bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde tarım alanlarının detaylı mekânsal haritaları oluşturulabilmekte ve üretim süreçleri daha hassas şekilde yönetilebilmektedir.

Hassas tarımın en önemli uygulama alanlarından biri değişken oranlı uygulama teknolojileridir. Değişken oranlı uygulama (Variable Rate Application – VRA), gübre, tohum, pestisit ve su gibi girdilerin alan içi farklılıklara göre değişken dozlarda uygulanmasını sağlayan teknolojileri ifade eder. Bu yaklaşım, özellikle su gibi sınırlı kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanımaktadır. Değişken oranlı sulama (Variable Rate Irrigation – VRI) ise sulama suyunun alan içindeki farklı ihtiyaçlara göre farklı miktarlarda uygulanmasını sağlayan bir sistemdir (Flint ve ark., 2023). VRI sistemleri, toprak özellikleri, bitki gelişim durumu ve çevresel faktörleri dikkate alarak sulama yönetimini optimize eder ve böylece hem su tasarrufu hem de üretim verimliliği açısından önemli avantajlar sağlar.

VRI teknolojisinin temel prensibi, tarım alanlarında bulunan heterojenliği belirlemek ve bu heterojenliğe uygun sulama stratejileri geliştirmektir. Bu amaçla genellikle yönetim bölgeleri oluşturulmaktadır. Yönetim bölgeleri, benzer toprak özellikleri, benzer verim potansiyeli veya benzer bitki gelişim özelliklerine sahip alanların gruplandırılması ile elde edilir. Bu bölgelerin belirlenmesinde toprak elektriksel iletkenliği, topoğrafik veriler, verim haritaları ve uzaktan algılama verileri gibi çeşitli veri kaynakları kullanılmaktadır (Ramirez-Gonzalez ve ark., 2025). Yönetim bölgeleri oluşturulduktan sonra her bölge için farklı sulama reçeteleri hazırlanmakta ve sulama sistemi bu reçetelere göre otomatik olarak çalışmaktadır.

Son yıllarda gelişen sensör teknolojileri ve veri analitiği yöntemleri, VRI sistemlerinin uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırmıştır. Toprak nem sensörleri, bitki su stres sensörleri ve meteorolojik sensörler gibi çeşitli veri kaynakları, sulama kararlarının daha hassas şekilde verilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle IoT (Internet of Things) tabanlı sensör ağlarının gelişmesi, tarım alanlarından gerçek zamanlı veri toplanmasını mümkün hale getirmiştir. Bu veriler bulut tabanlı platformlarda işlenmekte ve gelişmiş algoritmalar aracılığıyla sulama planları oluşturulmaktadır (Baseca ve ark, 2025). Böylece sulama yönetimi yalnızca deneyime dayalı bir uygulama olmaktan çıkmakta ve veri temelli bir karar destek sistemi haline gelmektedir.

Uzaktan algılama teknolojileri de VRI sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Uydu görüntüleri ve İHA tabanlı multispektral kameralar, bitki gelişim durumu ve su stresinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) gibi vejetasyon indeksleri, bitki sağlığı ve biyokütle gelişimi hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. NDWI (Normalized Difference Water Index) gibi indeksler ise bitkilerin su durumunun değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (Serrano ve ark., 2019). Bu veriler CBS ortamında analiz edilerek sulama yönetimi için detaylı reçete haritaları oluşturulabilmektedir.

VRI teknolojilerinin uygulanmasında kullanılan sulama sistemleri genellikle merkez pivot ve lineer hareketli sistemlerdir. Bu sistemlerde pivot kolu üzerinde bulunan nozullar bağımsız olarak kontrol edilebilmekte ve her bir alan segmentine farklı miktarda su uygulanabilmektedir. GPS tabanlı konumlandırma sistemleri sayesinde sulama ekipmanının tarladaki konumu sürekli olarak izlenmekte ve reçete haritasına göre otomatik kontrol sağlanmaktadır (Radočaj ve ark., 2023). Son yıllarda damla sulama

sistemlerinde de değişken oranlı uygulamaların geliştirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.

Değişken oranlı sulama sistemlerinin sağladığı avantajlar yalnızca su tasarrufu ile sınırlı değildir. Bu sistemler aynı zamanda enerji tüketiminin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır. Sulama sistemlerinin daha kısa süre çalışması veya gereksiz sulamanın önlenmesi, enerji kullanımının azalmasına neden olur. Bunun yanı sıra, aşırı sulamanın önlenmesi sayesinde bitki kök bölgesinde oksijen eksikliği gibi sorunlar minimize edilmekte ve bitki gelişimi daha sağlıklı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu durum hem verim artışı hem de ürün kalitesinde iyileşme ile sonuçlanabilmektedir (Lakhia ve ark., 2023).

Bununla birlikte VRI sistemlerinin uygulanması bazı teknik ve ekonomik zorluklar da içermektedir. Bu sistemlerin kurulumu için gerekli olan sensörler, otomasyon ekipmanları ve yazılım altyapısı başlangıçta önemli yatırım maliyetleri gerektirebilir. Ayrıca sistemlerin etkin şekilde çalışabilmesi için veri toplama ve analiz süreçlerinin doğru şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte teknolojik gelişmeler ve maliyetlerin zamanla düşmesi, VRI sistemlerinin daha geniş ölçekte uygulanabilir hale gelmesini sağlamaktadır.

Değişken oranlı sulama teknolojileri, modern tarımın sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinin önemli bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Bu sistemler, alan içi değişkenliği dikkate alarak su kullanımını optimize etmekte ve hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli faydalar sağlamaktadır. Gelecekte sensör teknolojileri, yapay zekâ ve veri analitiği alanındaki gelişmelerin VRI sistemlerinin performansını daha da artırması beklenmektedir. Bu nedenle değişken oranlı sulama sistemleri, hassas tarım uygulamalarının gelişiminde merkezi bir rol oynamaya devam edecektir.

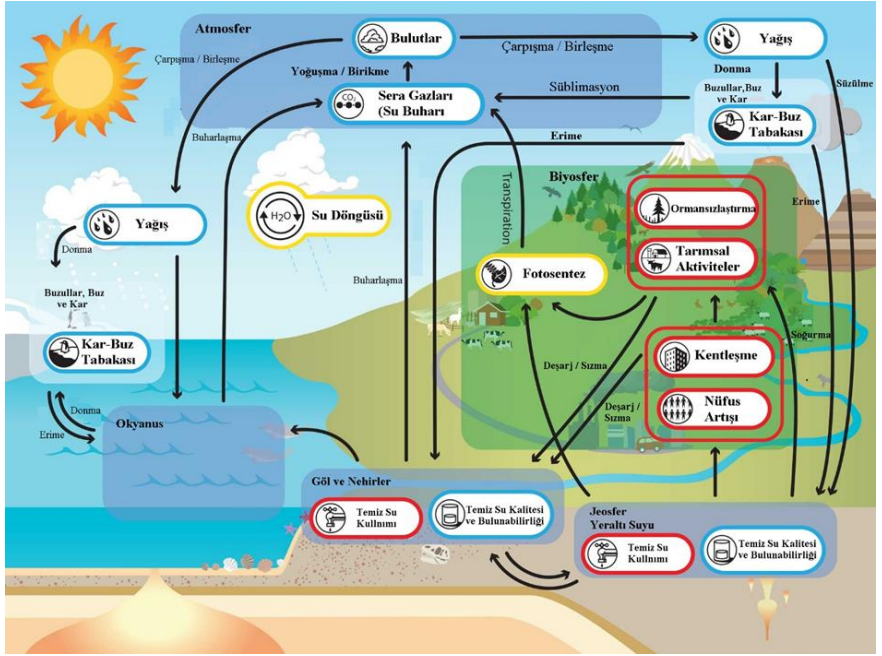
Sulama Suyu Kaynakları

Sulama, belirli bir zaman ve mekânda bitkinin su ihtiyacını karşılamak veya vejetatif döngü dışında toprağı istenen nem seviyesine getirmek için yapılan su uygulamasıdır. Bir tarlanın sulanması, sezonda bir veya daha fazla sulamayı içerir. Sulama suyu kaynakları, kaynaklardan veya sondaj kuyularından çıkarılan yeraltı suyu, sel sularının yayılması, akarsu, göl veya rezervuarlardan çekilen yüzey suyu veya arıtılmış atık su, tuzdan arındırılmış su veya drenaj suyu gibi geleneksel olmayan kaynaklar olabilir (Dashkevych ve Housh, 2025). Sel suları, barajlar, kapılar ve kanallar ağı kullanılarak normalde kuru olan nehir yataklarına yönlendirilir ve geniş alanlara yayılır. Toprakta depolanan nem daha sonra ürün yetiştirmek için kullanılır. Sel suyu hasadı kabul görmüş sulama yöntemlerinden biri iken, yağmur suyu hasadı önemli olmasına rağmen, geleneksel terminolojide genellikle bir sulama biçimi olarak kabul edilmez. Dünya genelinde üretilen atık suların yaklaşık %90'ı arıtılmadan kalmakta ve özellikle düşük gelirli ülkelerde yaygın su kirliliğine neden olmaktadır (Bijekar ve ark., 2022). Tarım sektöründe ise arıtılmamış atık sular giderek artan bir şekilde sulama suyu kaynağı olarak kullanılmaktadır. Sulama için kullanılan suyun kalitesi, ürün verimini ve miktarını, toprak verimliliğinin korunmasını ve çevrenin korunmasını etkiler. Örneğin, toprağın fiziksel ve mekanik özellikleri, örneğin toprak yapısı (agrega stabilitesi) ve geçirgenlik, sulama sularında bulunan değiştirilebilir iyon türüne karşı çok hassastır.

Suyun yeryüzünden atmosfere ve tekrar yeryüzüne dolaşımına “su döngüsü” veya “hidrolojik döngü” denir (Wendland ve ark., 1998). Ekosistemlerimize suyun yeniden yüklenmesi ve insan tüketimi için kullanılabilir hale gelmesi beş aşamayı içerir (Şekil 1): 1) Güneş enerjisi, göllerden, nehirlerden, bitki örtüsünden ve okyanuslardan suyun buharlaşmasına yol açar; buradan 2) atmosfere taşınır ve 3) bulutlarda küçük damlacıklar halinde

yoğunlaşır, 4) bulutlardaki su daha sonra yağış yoluyla yeryüzüne geri döner; bu yağış ya toprağı nemlendirerek bitki örtüsünü besler ve biyokütle üretir ya da yüzey akışı olarak aşağı doğru akarak yeraltı sularını veya nehirler, göller ve okyanuslar gibi yüzey suyu depolama sistemlerini besler, 5) Buradan tekrar buharlaşarak su döngüsünü yeniden başlatır.

Şekil 1. Su döngüsü



Yağıştan gelen su, su döngüsündeki geçiş hızına bağlı olarak iki elemente ayrılabilir. Mavi su ve yeşil su arasındaki ayrım ilk olarak Falkenberg tarafından 1995 yılında yayınlanan çalışmada öne sürülmüştür (Zisopoulou ve Panagoulia, 2021). Yağmur yağdığında, yere ulaşan suyun bir kısmı mavi su olarak bilinen suya (yüzey akışı ve yeraltı suyuna sızma yoluyla) katkıda bulunur. Geri kalanı ise yeşil suyu oluşturur. Mavi su, nehirler, göller ve yer altı sularına hızla karışan sudur; toplam yağış miktarının yaklaşık %40'ını temsil eder. Yeşil su, toprakta ve biyokütlede depolanır, buharlaşır veya bitkiler

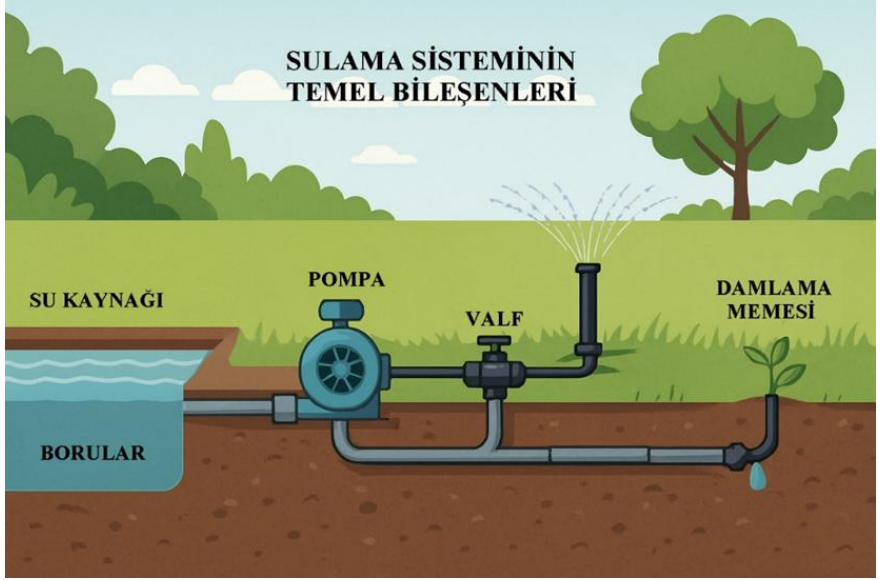
tarafından emilir ve terleme yoluyla atmosfere geri döner; yağış kütlesinin yaklaşık %60'ını oluşturduğu için ikisinden çok daha büyüktür. Sulama sayesinde mavi su yeşil suya dönüşecektir. Mavi su taşınabilir; yeşil su ise bitkiler tarafından doğrudan tüketilir. Yeşil su önemli bir kaynak olmasına rağmen, tarımsal ve ormancılık üretimi için bir kaynak olarak hâlâ yeterince anlaşılmamakta ve değeri yeterince bilinmemektedir; su dengesi modelleri kullanılarak nicel olarak ölçülebilir. Sulama için gerekli su, nehirden, barajdan, gölden veya yer altı suyundan tarlaya taşınmalıdır. Bu işlem iki farklı şekilde yapılabilir:

- Yerçekiminden yararlanılarak: Basit bir yerçekimi sistemi, ancak nehir veya rezervuarın su seviyesi sulama sistemindeki tarlaların seviyesinden daha yüksek olduğunda kullanılabilir (Şekil 2).
- Suyu bir pompa kullanarak yer seviyesinin üzerine çıkarıp, ardından tarlalara akıtarak (Şekil 3).

Şekil 2. Yerçekimiyle sulama sisteminin çalışma prensibi



Şekil 3. Tarımsal sulama sisteminin temel bileşenleri



Tarımda Modern Sulama Sistemleri

Sulama, tarımsal üretimde veya peyzaj bakımında bitkilerin büyüme ve verimlilik için yeterli nemi almasını sağlamak amacıyla toprağa kontrollü bir şekilde su verilmesidir. Günümüz dünyasında, özellikle tarımda, verimli su yönetimi hayati önem taşımaktadır. Modern sulama sistemleri, su tasarrufuna, ürün veriminin artmasına ve sürdürülebilirliğin teşvik edilmesine yardımcı olan en son teknolojiyi bünyesine katmak üzere geleneksel yöntemlerden evrimleşmiştir. Sulama tasarımıdaki bu gelişmeler, çevresel etkileri azaltırken gıda yetiştirme şeklini dönüştürmektedir. Sulama, toprağa veya araziye yapay olarak su verilmesidir. Mahsul yetiştirilmesine, peyzajın korunmasına ve kurak bölgelerde bozulmuş toprakların yeniden bitkilendirilmesine yardımcı olmak için kullanılır. Sulama, özellikle doğal yağışın yetersiz veya güvenilir olmadığı bölgelerde, bitkilerin büyümesi ve hayatta kalması için yeterli suyu almasını sağlamaya yardımcı olur. Sulama yöntemleri arasında yüzey sulama,

damlama sulama, yağmurlama sulama ve toprak altı sulama gibi çeşitli yöntemler bulunmaktadır; her birinin avantajları ve toprak tipi, ürün türü ve su mevcudiyeti gibi faktörlere bağlı olarak uygun uygulamaları vardır (Gunarathna ve ark., 2017).

Geleneksel Sulama Yöntemi

Geleneksel sulama yöntemleri, yüzyıllardır uygulanan, genellikle basit aletlere ve su dağıtımı için yerçekimine dayanan eski teknikleri ifade eder. Örnek olarak, suyun nehirlerden veya derelerden elle yönlendirilerek tarlalara su basıldığı taşkın sulaması verilebilir (Şekil 4). Bu yöntem genellikle emek yoğun olup, modern sulama tekniklerine kıyasla su kullanımında verimsizliğe yol açabilir. Bu sulama yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır ve dünyadaki sulamanın %85'ini oluşturmaktadır (Qian ve ark., 2024). Yüzey sulama, çoğunlukla tarla bitkilerinde ve meyve bahçelerinde uygulanmaktadır. Tarlalara ve ekinlere su, kanallar ve borular gibi kaynaklardan yerçekimi yardımıyla sağlanır. Yüzey sulamasının verimliliği büyük ölçüde ekin çeşidine ve toprağa bağlıdır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı yüksek su kaybıdır, bu nedenle diğer tüm yöntemler arasında en az verimli olanıdır. Ayrıca, bu sulama türleri üç kategoriye ayrılır. Bunlar; oluklu sulama, havza sulaması ve sınır sulamadır.

Şekil 4. Geleneksel sulama yöntemi



Yer Altı Sulama Yöntemi

Yeraltı sulama, suyun doğrudan toprak yüzeyinin altındaki bitki kök bölgesine uygulanması yöntemidir. Bu genellikle, düzenli aralıklarla yerleştirilmiş damlatıcılarla birlikte gömülü borular, tüpler veya damlama hatları aracılığıyla gerçekleştirilir (Şekil 5). Su yavaş ve eşit bir şekilde iletilir, bu da toprağa sızmasını ve bitki köklerine verimli bir şekilde ulaşmasını sağlar. Yeraltı sulama, buharlaşma ve yüzey akışı nedeniyle oluşan su kaybını en aza indirerek su tasarrufunda son derece verimli ve etkili bir yöntemdir. Ayrıca, su doğrudan kök bölgesine iletildiği ve toprak yüzeyinin kuru kaldığı için yabancı ot büyümesini ve toprak erozyonunu azaltır (Gunarathna ve ark., 2017).

Şekil 5. Yer altı sulama yöntemi



Mikro Sulama (Yerel Sulama)

Mikro sulama, su kaybını en aza indirerek ve verimliliği artırarak bitkilerin kök bölgesine doğrudan su sağlama yöntemidir. Suyu küçük ve hassas miktarlarda veren düşük akışlı sulama sistemlerinin kullanımını içerir. Mikro sulama genellikle iki ana alt kategoriye ayrılır (Zhao ve ark., 2025) (Şekil 6):

1. Damla Sulama: Damla sulama, bitkilerin tabanına yakın yerleştirilen küçük plastik damlatıcıların kullanıldığı bir mikro sulama türüdür. Bu damlatıcılar suyu yavaşça ve

doğrudan kök bölgesine bırakarak hedefli sulama sağlar ve su israfını azaltır. Damla sulama, su ve besin maddelerinin korunmasına yardımcı olur. Sebzeler, ticari ürünler (şeker kamışı, pamuk), çiçekler, yağlı tohumlar ve baharatlar için uygundur.

2. Mikro Yağmurlama Sulama: Mikro yağmurlama sulama, suyu dağıtmak için küçük yağmurlama başlıkları kullanan bir başka mikro sulama şeklidir. Bu yağmurlama başlıkları, damlama sulamaya göre daha geniş bir alanı kaplayan ince damlacıklar yayar. Mikro yağmurlama sistemleri, sıra halinde ekilen ürünler (sebzeler, yumuşak meyveler), ağaçlar ve yüksek değerli ürünler (tıbbi bitkiler, şifalı bitkiler, baharatlar) için uygundur.

Şekil 6. Damla ve mikro yağmurlama sistemi



Yağmurlama Sulama Sistemi

Yağmurlama sulama, bir boru ve yağmurlama başlığı ağı aracılığıyla bitkilere su verme yöntemidir (Şekil 7). Bu sulama sistemi, kontrollü bir şekilde bitkilerin üzerine su püskürterek doğal yağmur yağışını taklit eder. Bu sayede, bitki büyümesini ve verimini en üst düzeye çıkarmak için doğru miktarda suyun doğru zamanda verilmesi sağlanır. Tipik bir yağmurlama sulama sisteminde, su bir kuyu veya rezervuar gibi bir su kaynağından pompalanır. Borular boyunca düzenli aralıklarla, su akışını ve desenini kontrol etmek için ayarlanabilen yağmurlama başlıkları yerleştirilir. Sistem

çalıştırıldığında, yaǖmurlama başlıkları, yaǖmur yaǖřını simüle edecek şekilde mahsulün üzerine su daǖtır. Yaǖmurlama sulamasının verimliliǖi büyük ölçüde iklim koşullarına baǖlıdır. Yaǖmurlama sulama teknolojisini, su kaynaklarını daha verimli kullanarak çiftçilerin iklim deǖiřikliǖine uyum saǖlamasına yardımcı olabilir. Bu durum, özellikle tarımsal kullanım için su temininin sınırlı veya düzensiz olduǖu (veya olması beklendiǖi) durumlarda oldukça arzu edilen bir durumdur (Nikolaou ve ark., 2020). Yaǖmurlama sulama, normalden düşük sıcaklıklar nedeniyle ekinlerde oluşabilecek donma riskini azaltabilir. Gece boyunca, yaǖmurlama başlıklarının hareketi ve yaǖmur gibi su damlacıklarının uygulanması, sıcaklıktaki ani düşüşün ekinler üzerindeki stresini azaltabilir.

Yaǖmurlama sulama sistemlerinin avantajları, çeşitli topografyalara iyi uyum saǖlamaları ve aǖır kil topraklar hariç tüm toprak tipleri için uygun olmalarıdır. Yaǖmurlama sistemleri kalıcı veya taşınabilir armatrler olarak kurulabilir. Yaǖmurlama sulama sistemlerinin başlıca dezavantajları iklim koşulları, su kaynakları ve maliyetle ilgilidir (Chauhdary ve ark., 2024). Orta şiddetteki rüzgarlar bile su damlacıklarının daǖılım şeklini deǖiřtirerek yaǖmurlama sistemlerinin etkinliǖini ciddi şekilde azaltabilir. Benzer şekilde, yüksek sıcaklıklarda çalışırken su hızla buharlaşabilir ve bu da sulamanın etkinliǖini azaltır. Yaǖmurlama sulama, çiftçilerin su kaynaklarını daha verimli kullanmalarına yardımcı olsa da bu teknoloji temiz bir su kaynaǖına baǖlıdır. Bu nedenle, yaǖıřların daha az tahmin edilebilir olduǖu bölgeler için uygun olmayabilirler. Uygulama maliyetleri, yerçekimiyle çalışan sulama sistemlerine göre daha yüksektir ve kalıcı olmayan bir sistemde boruları ve fıskiyeleleri taşımak için büyük miktarda iş gücü gereklidir. Bu sulama sistemi, sıra halinde ekilen bitkiler, tarla bitkileri ve aǖalıklı bitkiler için uygundur. Geniş alanları eşit şekilde sulamaya yardımcı olduǖu için birçok tarla türü için idealdir.

Şekil 7. Yağmurlama sulama sistemi



Merkezden Dönen (Center Pivot) Sulama Sistemi

Merkezden dönen sulama sistemi, mekanize edilmiş, basınçlı su ile sulama yöntemidir (Şekil 8). Orijinal ve en yaygın kullanılan pivot sulama yöntemi, suyu tarlanın ortasındaki merkezi bir nokta etrafında dönerek dairesel bir şekilde uygular (Rashid ve ark., 2023). Bir pivot sistemi, boruyu destekleyen bitişik, hareketli kafes yapılar üzerine monte edilmiş yanıl, paslanmaz çelik bir boru hattından oluşur. Her kafes, motorlu tekerlekler üzerine monte edilmiştir ve bu da borunun tüm uzunluğunun tarlada hareket etmesine olanak tanır. Sulama başlıkları boru hattı boyunca monte edilir veya daha küçük borular veya kablolar üzerinde yanıl borudan aşağı sarkar. Merkezi pivot sisteminde akış hızları ve dakikadaki galon (GPM) miktarı kolayca ayarlanabilir ve su kullanım ihtiyaçlarına bağlı olarak yüksek akışlı veya düşük akışlı bir sistem oluşturmak için basınç regülatörleri kullanılabilir. Sulamanın yanı sıra, merkezden dönen sulama sistemleri genellikle gübre, böcek ilacı ve yabancı ot ilacı uygulamak için de kullanılır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, makineler daha karmaşık hale gelmekte ve yetenekleri sürekli olarak geliştirilerek otonom dev makineler haline gelmektedir. Merkezi döner sulama sisteminin bileşenleri:

- Pivot noktası – Tüm sistemin etrafında döndüğü merkezi bir kule. Sabit bir su kaynağına bağlıdır. Merkezi kule sabit veya hareketli (tekerlekli) olabilir.

- Sulama boru hattı – Bir dizi yanal borudan oluşan uzun bir sulama hattı. Boru, tahrik kuleleri tarafından desteklenir.
- Tahrik kuleleri – Üzerine damlatıcıların monte edildiği ana boru, tekerlekli kuleler vasıtasıyla yerden desteklenir.
- Bağlantı noktası – Tahrik kuleleri arasındaki su borusu.
- Sulama başlıkları – Sulama homojenliğini yüksek oranda sağlayacak aralıklarla boru hattına monte edilen fıskiye, püskürtücüler veya damlatıcılar. Bunlar, boru hattı boyunca tür, boyut ve aralık bakımından farklılık gösterebilir.
- Kule kutusu – Her bir tahrik kulesine monte edilir ve hareketini kontrol eder.
- Kontrol paneli – Ana çalışma noktasında bulunur ve ana işletim noktası olarak kullanılır. Sulama reçeteleri kontrol paneline girilir veya yüklenir. Panel genellikle bir uygulama aracılığıyla uzaktan kontrol edilebilir.
- Uç püskürtme başlığı – Makineye uç püskürtme başlığı eklenebilir. Bu, pivot sulama sisteminin dairesel sulama düzeniyle kapsamayan tarla köşelerine su verebilen büyük bir püskürtme başlığıdır.

Şekil 8. Merkezden dönen sulama yöntemi



Geleneksel merkezden dönen sulama sistemine yönelik çok sayıda iyileştirme ve uyarlama bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi de yanal hareketli sulama sistemidir (Şekil 9). Yanal hareketli sulama sistemi, bazen doğrusal hareketli sistem olarak da bilinir ve bir tarlanın üzerinde yanal olarak hareket eden tekerlekli kulelere monte edilmiş bir dizi fiskiyeden oluşur. Merkezi bir nokta etrafında dönen merkez pivot sistemlerinin aksine, yanal hareketli sistemler düz çizgiler halinde hareket ederek dikdörtgen parselleri daha verimli bir şekilde sulamalarına olanak tanır (Zhang ve ark., 2019). Bu tasarım, düzgün su dağıtımının çok önemli olduğu büyük ölçekli tarımsal işletmeler için yanal hareketli sulama sistemini ideal hale getirir.

Şekil 9. Yanal hareketli sulama yöntemi



Alan İçi Değişkenlik ve Kuramsal Temel

Değişken oranlı sulamanın bilimsel temeli, alan içi heterojenliğin doğru şekilde tanımlanmasına dayanmaktadır. Tarımsal üretim alanları homojen değildir; toprak tekstürü, yapısı, organik madde içeriği, infiltrasyon kapasitesi ve su tutma özellikleri aynı tarla içinde önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin kumlu topraklar düşük su tutma kapasitesine sahipken, killi topraklar suyu daha uzun süre bünyesinde tutabilmektedir. Bu farklılıklar, bitki kök bölgesindeki su mevcudiyetini doğrudan etkiler ve dolayısıyla sulama gereksiniminin mekânsal olarak değişmesine

neden olur (Ali ve ark., 2024). Toprak ve bitki örtüsü koşullarının oldukça değişken olduğu alanlarda, değişken oranlı teknoloji öne çıkmaktadır (Şekil 10).

Şekil 10. Tarla değişkenliğine bağlı farklı sulama oranlarına sahip bir VRI haritası

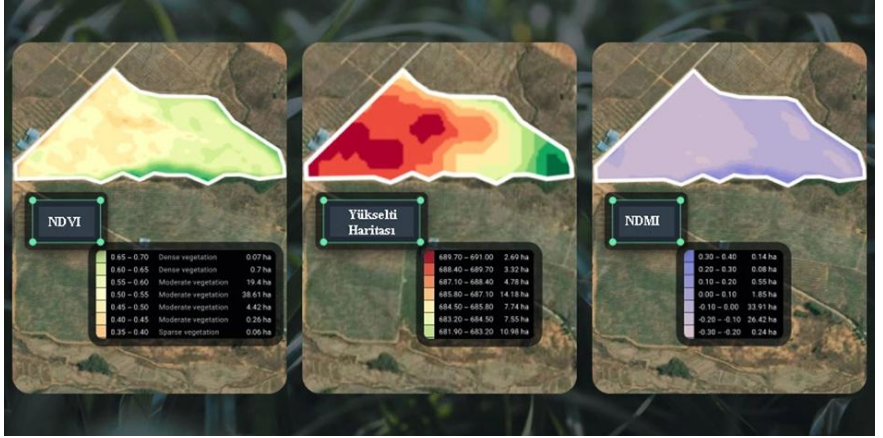


Toprak–bitki–atmosfer sürekliliği (SPAC) kavramı, suyun topraktan bitkiye ve atmosfer ortamına geçişini açıklayan temel teorik çerçeveyi oluşturur. Bitki su tüketimi, evapotranspirasyon (ET) süreçleri ile belirlenir (Verstraeten ve ark., 2008). Referans evapotranspirasyon (ET_0) genellikle FAO Penman-Monteith yöntemi ile hesaplanmakta ve bitki katsayısı (K_c) ile çarpılarak gerçek bitki su tüketimi tahmin edilmektedir (Delgado-Ramírez ve ark., 2023). Ancak bu hesaplamalar genellikle bölgesel meteorolojik verilere dayalıdır ve alan içi farklılıkları tam olarak yansıtmayabilir. VRI sistemleri, bu eksikliği gidermek amacıyla yüksek çözünürlüklü mekânsal veri katmanlarını entegre etmektedir.

Yönetim bölgeleri yaklaşımı, benzer özelliklere sahip alanların gruplandırılması prensibine dayanır. Bu bölgeler; toprak elektriksel iletkenliği (EC), topografik eğim, verim haritaları ve uzaktan algılama verileri gibi çoklu veri katmanlarının analizi ile

belirlenmektedir (Ali ve ark., 2022). Yönetim bölgelerinin oluşturulması, sulama reçetelerinin mekânsal olarak farklılaştırılmasına olanak tanır ve VRI sistemlerinin etkinliğini artırır. VRI planlaması için farklı harita katmanları kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan katmanlar yükselti katmanı, Normalleştirilmiş Fark Nem İndeksi (NDMI) ve Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI)'dir. Yükselti katmanı, tarlanın alçak, düz ve yüksek bölgelerini göstermektedir. Su, engebeli arazide farklı şekilde akmaktadır. Bu bilgiyle, değişken uygulamalar planlanabilir ve yüksek bölgelerdeki kuru noktaları ve alçak bölgelerdeki aşırı su birikintileri önlenabilir. NDMI katmanı, bitkilerdeki mevcut nem seviyelerini görselleştirmektedir. Arazinin hangi kısımlarının ıslak, hangilerinin kuru olduğunu göstererek gerekli olan yerlerde belirli değişken oranlarda sulama yapılmasına imkan tanımaktadır. NDVI katmanı, tarladaki bitki sağlığı ve canlılığındaki değişimleri göstermektedir. Daha yüksek NDVI değerlerine sahip daha sağlıklı ve canlı alanlar daha az suya ihtiyaç duyarken, daha düşük değerlere sahip stresli alanlar daha fazla suya ihtiyaç duyabilir (Nitu ve ark., 2025). Yükselti ve NDVI katmanlarını birleştirerek, VRI komut dosyalarının daha da iyi çalışması sağlanabilmektedir (Şekil 11).

Şekil 11. Farklı harita katmanları (yüksekti, NDVI ve NDMI), bölgenin nem ihtiyacının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır

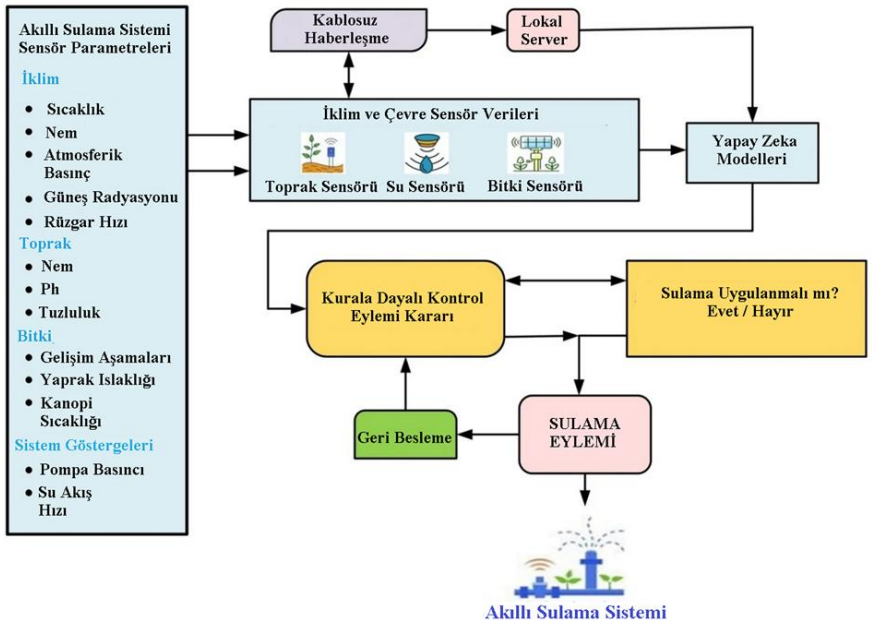


Sensör Teknolojileri ve Veri Entegrasyonu

Modern değişken oranlı sulama sistemleri, geniş bir sensör ve veri altyapısına dayanmaktadır. Toprak nem sensörleri, hacimsel su içeriğini gerçek zamanlı olarak ölçerek sulama kararlarının verilmesinde temel girdi sağlar. TDR (Time Domain Reflectometry), FDR (Frequency Domain Reflectometry) ve kapasitif sensörler, günümüzde yaygın olarak kullanılan teknolojilerdir (Loconsole ve ark., 2025). Bu sensörler, farklı derinliklerde yerleştirilerek kök bölgesindeki su dağılımını izleyebilir. Bitki tabanlı sensörler de sulama yönetiminde önemli rol oynamaktadır. Yaprak sıcaklığı ölçümleri, bitki su stresinin doğrudan göstergesi olarak kabul edilir. Bitki Su Stres İndeksi (Crop Water Stress Index, CWSI), termal görüntüleme verilerinden hesaplanarak bitkinin su durumunu nicel olarak ifade eder (Mohamed ve ark., 2024). Termal kameralar ve multispektral sensörler, özellikle insansız hava araçları (İHA) platformları ile entegre edilerek yüksek mekânsal çözünürlükte veri sağlar. Uydu tabanlı uzaktan algılama sistemleri de VRI uygulamalarında önemli bir veri kaynağıdır. Sentinel-2 ve Landsat 8

gibi uydular, NDVI ve NDWI (Normalized Difference Water Index) gibi vejetasyon indekslerinin hesaplanmasına olanak tanır. Bu indeksler, bitki gelişim durumu ve su stresi hakkında bilgi sağlar. Uzaktan algılama verileri, CBS ortamında işlenerek reçete haritalarının oluşturulmasında kullanılmaktadır. Meteorolojik veri entegrasyonu, sulama zamanlamasının belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Otomatik hava istasyonları, sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı ve güneşlenme süresi gibi parametreleri ölçerek evapotranspirasyon hesaplamalarında kullanılmaktadır. Son yıllarda yapay zekâ tabanlı modeller, meteorolojik tahminleri sulama planlamasına entegre ederek daha proaktif karar mekanizmaları geliştirmiştir (Şekil 12).

Şekil 12. Akıllı sulama sistemi (Singh ve ark., 2025)



Toprak nem içeriğinin izlenmesi, etkili sulama planlamasının kritik bir yönüdür. Optimal toprak nem seviyelerinin korunması, bitki büyümesi ve ürün verimi için şarttır. Toprak nemi izleme, hacimsel su içeriği değerlendirmeleri için dielektrik özellikleri ölçen

kapasitans sensörlerinin kullanımı da dahil olmak üzere çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler, sulama yönetimi için değerli bilgiler sağlayarak, yetiştiricilerin su kullanımını optimize etmelerine ve ürün verimliliğini artırmalarına yardımcı olur (Gu vd., 2020). Piyasada karşılaşılan yaygın toprak sensör teknolojilerinin listesi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Piyasadaki mevcut toprak sensör ve teknolojileri

Sensör	Teknoloji	Derinlik Seçenekleri
HOBOnet Teros 12	Kapasitans	Tek derinlik (12 cm uzunluk)
Decent Lab DL-SMTP-001	Kapasitans	çoklu derinlik (60 cm derinlik)
Dragino LSE01	FDR	Tek derinlik (20 cm derinlik)
GroPoint 2625-ST	TDT	Çoklu derinlik (15 – 120 cm 8 derinlik)
Sensoterra single depth	Empedans	Tek derinlik (15 cm, 30 cm, 60 cm, 90 cm)
AquaSpy® Legacy	Radyo Frekansı (RF)	Çoklu derinlik (10 - 120 12 derinlik)
HOBOnet HS10	Kapasitans	Tek derinlik (16 cm)
Pycno Terra Series	Kapasitans	Çoklu derinlik (90 cm’ye kadar 3 derinlik, her derinlikte 2 sensör)
Sensoterra multi depth	Empedans	Çoklu derinlik (10 cm’ye kadar 6 derinlik)

Toprak nem sensörleri, sensör teknolojisine, derinlik seçeneklerine ve/veya amaçlanan ölçüm türlerine göre sınıflandırılabilir (Tablo 2). Toprak nem ölçümünde kapasitans, TDT ve FDR gibi farklı yöntemlerle piyasada karşılaşılmaktadır. RF geçirgenliği ve direnç-kapasitans gibi diğer teknolojiler de mevcuttur. Toprak neminin yanı sıra, birçok sensör toprak sıcaklığını, tuzluluğunu ve elektriksel iletkenliği (EC) de ölçmektedir (Ünal ve ark., 2020). Ayrıca, toprak sensörleri aynı anda

tek veya birden fazla toprak derinliğini kapsayabilir. Toprak nem sensörleri, tarım arazisinin çeşitli bölgelerine yerleştirilebilir. Bu sayede farklı bölgelerdeki toprak nemi izlenerek topraktaki nem dağılımı belirlenebilir ve mahsulün ihtiyaçlarına ve toprağın nem içeriğine bağlı olarak sulamanın gerekli olup olmadığına karar verilebilir. Ayrıca, toprak nem sensörleri, otomatik sulama yönetimi sağlamak için akıllı sulama sistemleriyle birleştirilebilir. Toprak nemi belirli bir eşiğin altına düştüğünde, sistem otomatik olarak pompayı çalıştırarak toprağı suyla besler; toprak nemi belirli bir değere ulaştığında ise sistem otomatik olarak pompayı kapatarak sulamayı durdurur.

Tablo 2. Piyasadaki mevcut toprak sensörlerinin ölçüm türleri ve güç gereksinimleri

Sensör	Ölçüm Türleri	Güç Kaynağı
HOBOnet Teros 12	Toprak nemi, toprak sıcaklığı ve tuzluluk	Güneş paneli
Decent Lab DL-SMTP-001	Toprak nemi ve toprak sıcaklığı	2 adet alkalın C pil (toplam 3 V)
Dragino LSE01	Toprak nemi, toprak sıcaklığı ve tuzluluk	4000 mAh Li-SOCl ₂ pil
GroPoint 2625-ST	Toprak nemi ve toprak sıcaklığı	Güneş paneli
Sensoterra single depth	Toprak nemi	Lityum pil - 3 V gereksinimi
AquaSpy® Legacy	Toprak nemi, toprak sıcaklığı ve tuzluluk	Güneş paneli
HOBOnet HS10	Toprak nemi	Güneş paneli
Pycno Terra Series	Toprak nemi ve toprak sıcaklığı (diğer sensörler için eklentiler)	Güneş paneli, 3500 mAh batarya
Sensoterra multi depth	Toprak nemi ve toprak sıcaklığı	Lityum pil - 3,6 V

Toprak nem sensörlerine ek olarak, toprak sıcaklığını izlemek için kullanılır ve özellikle serin veya sıcak mevsimlerde

sulama kararlarının değerdendirilebilmesi için toprak sıcaklık sensörleri kullanılmaktadır. Sulama suyunun veya gübrenin akışını ölçerek sulamanın homojenliğini sağlamak için akış sensörleri, sulama sisteminde su basıncını izlemek ve su akışının hedeflenen alana ulaşmasını sağlamak için basınç sensörleri, sulama sistemindeki su seviyesini izlemek ve sistemin aşırı yüklenmesini veya boşalmasını önlemek için su seviye sensörleri de kullanılmaktadır. Ayrıca, sulama suyu kimyasallar içeriyorsa, pH sensörleri suyun asitliğini veya alkaliliğini izleyebilmektedir.

Tarımsal üretim alanında, tarımsal hava istasyonları, gerçek zamanlı meteorolojik veri izleme sağlayan ve sistem entegratörleri ile IoT çözüm sağlayıcılarını verimli tarımsal IoT platformları oluşturmada destekleyen önemli otomatik gözlem sistemleri olarak hizmet vermektedir. Rüzgâr yönü, rüzgâr hızı, sıcaklık, nem, barometrik basınç, yağış ve toprak sıcaklığı-nem sensörlerini entegre eden bu cihazlar, tarımsal üretimde hassas tahmin ve risk yönetimi sağlamada yardımcı olmaktadır. Tarım hava durumu istasyonu, tarımsal üretim ortamları için özel olarak tasarlanmış, yüksek otomasyonlu bir izleme sistemidir. Karar alma süreçlerini desteklemek için çeşitli meteorolojik parametreleri toplar ve analiz eder. Sistem, birden fazla sensörü entegre ederek, geleneksel manuel izlemenin sınırlamalarının üstesinden gelerek çevresel değışkenlerin sürekli gözlemlenmesini sağlar. Tipik tarımsal hava istasyonları, rüzgâr yönü sensörleri, rüzgâr hızı sensörleri, sıcaklık sensörleri, nem sensörleri, barometrik basınç sensörleri, yağış sensörleri ve toprak sıcaklığı-nem sensörleri ile donatılmıştır (Şekil 13). Bu bileşenler, gerçek zamanlı verileri yakalamak için birlikte çalışır ve bu veriler veri kaydediciler aracılığıyla depolanır ve iletilir. Tüketici sınıfı cihazlardan farklı olarak, tarımsal hava istasyonları endüstriyel sınıf dayanıklılık ve uyumluluğa önem verir ve SCADA (Merkezi Denetleme ve Veri Toplama) sistemleri veya PLC (Programlanabilir

Lojik Kontrolör) kontrolörleriyle kolay entegrasyon için Modbus ve RS485 gibi iletişim protokollerini destekler.

Şekil 13. Tarımsal hava durumu istasyonu



Akıllı bir değişken oranlı sulama sisteminde sistemin geliştirme çalıştırma aşamaları aşağıdaki süreçlerle yönetilmektedir (Lakhiar ve ark., 2024):

1. Veri Toplama: Akıllı sulama sistemleri, toprak nem sensörleri, hava istasyonları ve bitki sağlığı monitörleri de dahil olmak üzere tarlaya yerleştirilen çeşitli sensörlerden veri toplar; bu veriler toprak nem seviyeleri, sıcaklık, nem, yağış ve bitki büyüme ölçütleri gibi faktörleri kapsar.
2. Veri Ön İşleme: Toplanan veriler, modelleme için hazırlanmak üzere normalleştirme, ölçeklendirme ve özellik mühendisliği gibi teknikler kullanılarak eksik değerler, aykırı değerler ve gürültü ile başa çıkmak için ön işleme tabi tutulur.

3. Model Seçimi: Karar ağaçları veya gradyan artırma gibi denetimli öğrenme algoritmaları, tahmin görevine göre seçilir. Bu modeller, girdi özellikleri ve çıktı etiketleri arasındaki kalıpları ve ilişkileri öğrenerek en uygun sulama programlarını tahmin etmek üzere eğitilir.
4. Model Eğitimi: Sulama programlarına ve ilgili sensör okumalarına ilişkin geçmiş veriler, makine öğrenimi modelini eğitmek için kullanılır; bu sayede model, ekinlere veya peyzaj alanlarına ne zaman ve ne kadar su verileceğine dair kesin kararlar verebilir.
5. Model Değerlendirmesi: Eğitilmiş modelin performansı, Ortalama Mutlak Hata (MAE) veya doğruluk gibi ölçütler kullanılarak değerlendirilir; modelin genelleme performansı ise çapraz doğrulama teknikleriyle incelenir.
6. Dağıtım: Doğrulandıktan sonra, model akıllı sulama sistemine entegre edilerek toprak nem eşikleri ve hava tahminleri gibi faktörler dikkate alınarak optimum sulama programları için gerçek zamanlı tahminler üretilir.
7. Sürekli Öğrenme: Model, sulama stratejilerini optimize etmek için yeni veriler elde edildikçe parametrelerini güncelleyerek zaman içinde uyum sağlamak ve gelişmek üzere geri bildirim döngülerini içerir.

VRI Türleri ve Donanım -Yazılım Altyapısı

Değişken oranlı sulama (VRI) teknolojileri genel olarak üç ana tipe ayrılabilir (He, 2023):

- Hız kontrolü VRI: Sistemdeki akış hızı sabit olduğundan, sulama uygulama oranı, sulama sisteminin tarlada hareket hızını değiştirerek ayarlanır. Örneğin, bir merkez pivot veya doğrusal hareketli sistem, farklı alanlarda uygulanan su miktarını değiştirmek için hızlanabilir veya yavaşlayabilir.

Bu yöntem nispeten basittir ve tarlada farklı su uygulama oranları sağlayabilir, ancak daha gelişmiş sistemlerin hassasiyetinden yoksundur. Büyük ölçekli değişkenlik için etkili olsa da toprak nemindeki veya bitki su ihtiyaçlarındaki daha ince, yerel farklılıkları ele alırken o kadar doğru olmayabilir (Mohamed ve ark., 2021).

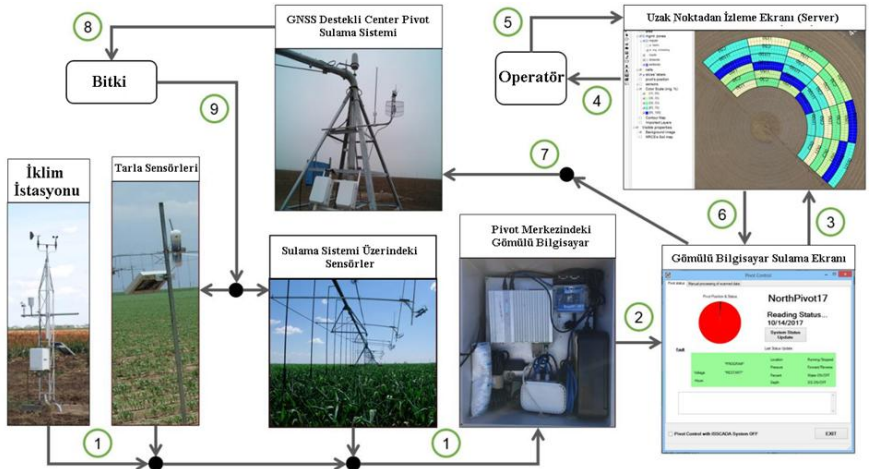
- Bölge kontrolü VRI: Sulama sistemi, genellikle birlikte kontrol edilen yağmurlama başlıklarından oluşan çoklu yönetim bölgelerine ayrılmıştır. Her bölge, toprak dokusu, topografya ve ürün türü gibi tarlaya özgü değişkenlere bağlı olarak farklı sulama oranları uygulamak üzere programlanabilir (Flint ve ark., 2023). Bu yaklaşım, hız kontrolü VRI'ye göre daha hedefli sulama sağlar ve değişen tarla koşullarına daha iyi uyum sağlayabilir. Bununla birlikte, bölgeler bireysel olarak değil, gruplar halinde kontrol edildiğinden, bir bölge içindeki su ihtiyaçları oldukça değişken ise yine de bazı verimsizlikler olabilir (Mohamed ve ark., 2021).
- Bireysel yağmurlama kontrolü VRI: Bu, VRI teknolojisinin en gelişmiş ve hassas biçimidir. Her yağmurlama başlığı bağımsız olarak kontrol edilir, bu da son derece özelleştirilmiş sulama uygulamalarına olanak tanır. Bu, toprak nem haritaları, bitki büyüme aşamaları veya gerçek zamanlı hava koşulları gibi ayrıntılı verilere dayanarak, sulamanın yalnızca ihtiyaç duyulan yerde ve zamanda uygulanmasını sağlar. Bu sistemdeki hassasiyet seviyesi israfı azaltır ve bitki büyümesini optimize eder, bu da onu su ihtiyaçlarında önemli mekansal değişkenlik gösteren tarlalar için ideal hale getirir. Bununla birlikte, nispeten karmaşıktır, yönetmek için teknik beceri ve bilgi gerektirir ve uygulanması ve bakımı pahalıdır (Mohamed ve ark., 2021).

Değişken oranlı sulama sistemleri, donanım ve yazılım bileşenlerinin entegre çalışmasına dayanır. Merkez pivot sistemlerde VRI uygulaması, pivot kolu üzerindeki nozulların bağımsız kontrolü ile gerçekleştirilir. GPS tabanlı konumlandırma sistemleri sayesinde pivotun tarladaki konumu hassas şekilde belirlenir ve reçete haritasına göre su debisi otomatik olarak ayarlanır. Bu sistemlerde elektromekanik valfler, değişken hız kontrol üniteleri ve kablosuz iletişim modülleri kullanılmaktadır. Yazılım altyapısı, veri işleme ve karar destek sistemlerini içerir. Bulut tabanlı platformlar, sensör verilerini gerçek zamanlı olarak depolar ve analiz eder. Makine öğrenmesi algoritmaları, geçmiş sulama verileri ile ürün verim haritalarını ilişkilendirerek optimum sulama stratejilerini belirler. Derin öğrenme tabanlı modeller, bitki gelişim evrelerine göre su gereksinimini tahmin etmede yüksek doğruluk sağlamaktadır (Cherubini ve Bala Anand, 2025). VRI'daki sulama sistemi donanımı, hassas su dağıtımı için birlikte çalışan temel bileşenlerden oluşur. Sistem, suyu kaynaktan alıp tarlaya dağıtmak için gereken fiskiyeler, açıklıklar, borular, hortumlar ve vanalardan oluşur. Bir kontrol paneli, sistemi programlamak ve kontrol etmek için gereken elektronik ve yazılımı barındırır. Sisteme bağlı olarak, VRI teknolojisi mobil cihazlar kullanılarak uzaktan izlenebilir ve kontrol edilebilir; bu da çiftçilerin internet bağlantısı olan her yerden komut göndermelerine ve sulama oranlarını ve programlarını gerçek zamanlı olarak ayarlamalarına olanak tanır. Sulama sistemleri, toprak nemi ve kızılötesi sensörler, kameralar, yağmur ölçerler, uzaktan algılama vb. gibi sensörler ve diğer ölçüm cihazlarıyla donatılarak, tarla ve hava koşullarının sürekli olarak izlenmesi sağlanabilir. Bu veriler, sulama kararlarının alınmasında kullanılabilir.

Şekil 14, sahaya özgü bir reçete haritasının oluşturulması ve uygulanması için karar destek sistemi ve VRI merkez pivot sistemi ile etkileşimini göstermektedir (Andrade, 2017). Süreç aşağıdaki

aşamalardan geçer. Sezonun başında kullanıcı, server aracılığıyla karar destek sistemine tarla, ürün, VRI merkez pivot sisteminin özellikleri vb. hakkındaki bilgiler girer ve (1) hava istasyonundan, merkez pivot üzerine monte edilmiş sensör ağından ve tarladaki sensörlerden veri toplamak ve bu verileri gömülü bilgisayara kaydetmek için başlatır; (2) bu veriler istemci programı tarafından işlenir, (3) istemci entegre bitki su stresi endeksi yöntemini kullanarak sahaya özgü bir reçete haritası oluşturan sunucu programına gönderilir ve (4) bu harita, sunucu programında uygulanan ekran aracılığıyla kullanıcıya kullanıcı dostu bir biçimde sunulur; (5) Kullanıcı reçete haritasına bakar ve gerekirse, (6) istemci programına gönderilmeden önce onu değiştirir; bu program da (7) onu VRI merkez pivotu tarafından uygulanması için (8) sulama kontrol paneline gönderir; (9) sulamadan sonra işlem, yeni bir bitki örtüsü sıcaklığı ve hava durumu verisi setinin toplanmasıyla yeniden başlar.

Şekil 14. Sensör tabanlı bir karar destek sistemi ve VRI merkez pivot sistemiyle etkileşimi, sahaya özgü reçete haritasının oluşturulması ve uygulanması



Sonuç

Son yıllarda gerçekleştirilen araştırmalar, VRI sistemlerinin su kullanım etkinliğini %10–30 arasında artırabildiğini göstermektedir (Sadler ve ark., 2005). Özellikle kurak yıllarda, değişken oranlı uygulamalar su tasarrufunu daha belirgin hale getirmektedir. Bunun yanı sıra enerji tüketiminde de azalma sağlanmakta ve pompa çalışma süreleri optimize edilmektedir. Verim açısından yapılan çalışmalar, VRI uygulamalarının homojen sulama ile benzer veya daha yüksek verim sağladığını ortaya koymaktadır. Bu durum, su stresinin minimize edilmesi ve aşırı sulamanın önlenmesi ile açıklanmaktadır (Alharbi ve ark., 2024). VRI sistemlerinin yatırım maliyetleri, sensörler, kontrol sistemleri ve yazılım altyapısı nedeniyle başlangıçta yüksek olabilir. Ancak uzun vadede su ve enerji tasarrufu ile üretim optimizasyonu sayesinde yatırımın geri dönüş süresi kısalabilmektedir. Özellikle su fiyatlarının yüksek olduğu bölgelerde VRI sistemlerinin ekonomik avantajı artmaktadır (Sadler ve ark., 2005). Aşırı sulama, nitrat yıkanmasına ve yeraltı su kirliliğine yol açabilmektedir. VRI sistemleri, suyun kontrollü uygulanması sayesinde bu riskleri azaltmaktadır. Ayrıca karbon ayak izinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. IPCC (2022) raporuna göre, tarımda verimlilik artışı sağlayan teknolojiler sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kritik rol oynayacaktır.

Gelecekte VRI sistemlerinin otonom robotik platformlarla entegre edilmesi beklenmektedir. IoT tabanlı sensör ağları ve yapay zekâ destekli karar sistemleri, sulama yönetimini tamamen dijitalleştirebilir. Edge computing ve TinyML uygulamaları, veri işleme süreçlerini sahada gerçekleştirmeyi mümkün kılmaktadır (Hu ve ark., 2025). Değişken oranlı sulama sistemleri, suyun sürdürülebilir yönetimi açısından hassas tarımın en önemli bileşenlerinden biridir. Son beş yıldaki araştırmalar, VRI'nin su tasarrufu, enerji verimliliği ve üretim optimizasyonu açısından

önemli katkıları sunduğunu göstermektedir. Gelecekte yapay zekâ ve IoT entegrasyonlarının artmasıyla birlikte bu sistemlerin daha geniş ölçekte uygulanabilir hale gelmesi beklenmektedir.

Kaynakça

Alharbi, S., Felemban, A., Abdelrahim, A., & Al-Dakhil, M. (2024). Agricultural and Technology-Based Strategies to Improve Water-Use Efficiency in Arid and Semiarid Areas. *Water*, 16(13), 1842. <https://doi.org/10.3390/w16131842>

Ali, A., Rondelli, V., Martelli, R., Falsone, G., Lupia, F., & Barbanti, L. (2022). Management Zones Delineation through Clustering Techniques Based on Soils Traits, NDVI Data, and Multiple Year Crop Yields. *Agriculture*, 12(2), 231. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020231>

Ali, M., Haque, M. A., Ali, M. R., Rahman, M. A., Jin, H., Jang, Y. Y., & Chung, S.-O. (2024). Spatial, Vertical, and Temporal Soil Water Content Variability Affected by Low-Pressure Drip Irrigation in Sandy Loam Soil: A Soil Bin Experimental Study. *Agronomy*, 14(12), 2848. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122848>

Andrade, M., et al. (2017). Site specific irrigation management of a center pivot irrigation system using a sensor based decision support system. In *2017 Irrigation Association Technical Conference*, Fairfax, VA, USA.

Baseca, C. C., Dionísio, R., Ribeiro, F., & Metrôlho, J. (2025). Edge-Computing Smart Irrigation Controller Using LoRaWAN and LSTM for Predictive Controlled Deficit Irrigation. *Sensors*, 25(22), 7079. <https://doi.org/10.3390/s25227079>

Bijekar, S., Padariya, H. D., Yadav, V. K., Gacem, A., Hasan, M. A., Awwad, N. S., Yadav, K. K., Islam, S., Park, S., & Jeon, B.-H. (2022). The State of the Art and Emerging Trends in the Wastewater Treatment in Developing Nations. *Water*, 14(16), 2537. <https://doi.org/10.3390/w14162537>

Chauhdary, J. N., Li, H., Jiang, Y., Pan, X., Hussain, Z., Javaid, M., & Rizwan, M. (2024). Advances in Sprinkler Irrigation: A Review in the Context of Precision Irrigation for Crop Production. *Agronomy*, 14(1), 47. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010047>

Cherubini, C., & Bala Anand, M. (2025). A Novel Deep Learning-Based Soil Moisture Prediction Model Using Adaptive Group Radial Lasso Regularized Basis Function Networks (AGRL-RBFN) Optimized by Hierarchical Correlated Spider Wasp Optimizer (HCSWO) and Incremental Learning (IL). *Water*, 17(16), 2379. <https://doi.org/10.3390/w17162379>

Dashkevych, O., & Housh, M. (2025). Management of Conventional and Non-Conventional Water Sources: A Systematic Literature Review. *Water*, 17(20), 3006. <https://doi.org/10.3390/w17203006>

Delgado-Ramírez, G., Bolaños-González, M. A., Quevedo-Nolasco, A., López-Pérez, A., & Estrada-Ávalos, J. (2023). Estimation of Reference Evapotranspiration in a Semi-Arid Region of Mexico. *Sensors*, 23(15), 7007. <https://doi.org/10.3390/s23157007>

Flint, E. A., Hopkins, B. G., Svedin, J. D., Kerry, R., Heaton, M. J., Jensen, R. R., Campbell, C. S., Yost, M. A., & Hansen, N. C. (2023). Irrigation Zone Delineation and Management with a Field-Scale Variable Rate Irrigation System in Winter Wheat. *Agronomy*, 13(4), 1125. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041125>

Food and Agriculture Organization (FAO). (2021). The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point. *Rome: FAO*. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>

Gu, Z., Qi, Z., Burghate, R., Yuan, S., Jiao, X., & Xu, J. (2020). Irrigation Scheduling Approaches and Applications: A

Review. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(6).
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0001464](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001464)

Gunarathna, M. H. J. P., Sakai, K., Nakandakari, T., Kazuro, M., Onodera, T., Kaneshiro, H., Uehara, H., & Wakasugi, K. (2017). Optimized Subsurface Irrigation System (OPSIS): Beyond Traditional Subsurface Irrigation. *Water*, 9(8), 599.
<https://doi.org/10.3390/w9080599>

He, L. (2023). Variable Rate Technologies for Precision Agriculture. In: Zhang, Q. (eds) *Encyclopedia of Digital Agricultural Technologies*. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-24861-0_34

Hu, N.-Z., Lin, B.-A., Wu, Y.-Y., Huang, H.-L., Lin, Y.-X., Lin, C.-C., & Lu, P.-H. (2025). Integrating Tiny Machine Learning and Edge Computing for Real-Time Object Recognition in Industrial Robotic Arms. *Engineering Proceedings*, 92(1), 74.
<https://doi.org/10.3390/engproc2025092074>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press

Irmak, S., Hinn, T.A., Kukal, M.S., & Mohammed, A.T. (2025). Concurrent Response of Soybean to Fixed- (Full and Limited) and Variable-Rate Irrigation Management in Three Soil Types: I. Soil Water Dynamics. *Irrigation and Drainage*, 74(5), 1853–1873. <https://doi.org/10.1002/ird.3124>.

Lakhiar, I. A., Yan, H., Syed, T. N., Zhang, C., Shaikh, S. A., Rakibuzzaman, M., & Vistro, R. B. (2025). Soilless Agricultural Systems: Opportunities, Challenges, and Applications for Enhancing Horticultural Resilience to Climate Change and Urbanization. *Horticulturae*, 11(6), 568.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae11060568>

Lakhiar, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., Han, Y., Wang, B., Bao, R., Syed, T. N., Chauhdary, J. N., & Rakibuzzaman, M. (2024). A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints. *Agriculture*, 14(7), 1141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>

Loconsole, D., Elia, M., Conversa, G., De Lucia, B., Cristiano, G., & Elia, A. (2025). Soil Moisture Sensing Technologies: Principles, Applications, and Challenges in Agriculture. *Agronomy*, 15(12), 2788. <https://doi.org/10.3390/agronomy15122788>

Mohamed, A. Z., Peters, R. T., Sarwar, A., Molaei, B., & McMoran, D. (2021). Impact of the Intermittency Movement of Center Pivots on Irrigation Uniformity. *Water*, 13(9), 1167. <https://doi.org/10.3390/w13091167>

Mohamed, N. E., Mustafa, A.-r. A., Bedawy, I. M. A., Ahmed, A. s., Abdelsamie, E. A., Mohamed, E. S., Rebouh, N. Y., & Shokr, M. S. (2024). Utilizing Infrared Thermometry to Assess the Crop Water Stress Index of Wheat Genotypes in Arid Regions under Varying Irrigation Regimes. *Agronomy*, 14(8), 1814. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081814>

Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2020). Implementing Sustainable Irrigation in Water-Scarce Regions under the Impact of Climate Change. *Agronomy*, 10(8), 1120. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081120>

Nițu, A., Florea, C., Ivanovici, M., & Racoviteanu, A. (2025). NDVI and Beyond: Vegetation Indices as Features for Crop Recognition and Segmentation in Hyperspectral Data. *Sensors*, 25(12), 3817. <https://doi.org/10.3390/s25123817>

Qian, M., Qian, C., Xu, G., Tian, P., & Yu, W. (2024). Smart Irrigation Systems from Cyber–Physical Perspective: State of Art and Future Directions. *Future Internet*, 16(7), 234. <https://doi.org/10.3390/fi16070234>

Radočaj, D., Plaščak, I., & Jurišić, M. (2023). Global Navigation Satellite Systems as State-of-the-Art Solutions in Precision Agriculture: A Review of Studies Indexed in the Web of Science. *Agriculture*, 13(7), 1417. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071417>

Ramirez-Gonzalez, D. A., Chokmani, K., Cambouris, A. N., & D'Souza, M. L. (2025). Delineation of Management Zones Based on the Agricultural Potential Concept for Potato Production Using Optical Satellite Images. *Remote Sensing*, 17(22), 3709. <https://doi.org/10.3390/rs17223709>

Rashid, M., Haider, S., Masood, M. U., Pande, C. B., Tolche, A. D., Alshehri, F., Costache, R., & Elkhachy, I. (2023). Sustainable Water Management for Small Farmers with Center-Pivot Irrigation: A Hydraulic and Structural Design Perspective. *Sustainability*, 15(23), 16390. <https://doi.org/10.3390/su152316390>

Sadler, E. J., Evans, R. G., Stone, K. C., & Camp, C. R. (2005). Opportunities for conservation with precision irrigation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60(6), 371–379. <https://doi.org/10.1080/00224561.2005.12435829>

Sanyaolu, M., & Sadowski, A. (2024). The Role of Precision Agriculture Technologies in Enhancing Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 16(15), 6668. <https://doi.org/10.3390/su16156668>

Serrano, J., Shahidian, S., & Marques da Silva, J. (2019). Evaluation of Normalized Difference Water Index as a Tool for Monitoring Pasture Seasonal and Inter-Annual Variability in a

Mediterranean Agro-Silvo-Pastoral System. *Water*, 11(1), 62.
<https://doi.org/10.3390/w11010062>

Ünal, İ., Kabaş, Ö., & Sözer, S. (2020). Real-Time Electrical Resistivity Measurement and Mapping Platform of the Soils with an Autonomous Robot for Precision Farming Applications. *Sensors*, 20(1), 251. <https://doi.org/10.3390/s20010251>

Verstraeten, W. W., Veroustraete, F., & Feyen, J. (2008). Assessment of Evapotranspiration and Soil Moisture Content Across Different Scales of Observation. *Sensors*, 8(1), 70-117.
<https://doi.org/10.3390/s8010070>

Wendland, W.M., Scheidegger, A.E., Herschy, R.W., Brassington, F.C., Back, W., Hordon, R.M. (1998). Hydrological cycle . In: *Herschy, R.W., Fairbridge, R.W. (eds) Encyclopedia of Hydrology and Water Resources. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Dordrecht.* https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4497-7_116

Zhang, Y., Guo, J., Sun, B., Fang, H., Zhu, D., & Wang, H. (2019). Modeling and Dynamic-Simulating the Water Distribution of a Fixed Spray-Plate Sprinkler on a Lateral-Move Sprinkler Irrigation System. *Water*, 11(11), 2296.
<https://doi.org/10.3390/w11112296>

Zhao, B., Wang, S., Wang, A., Liu, T., Li, K., Zhang, M., Yu, Y., & Cao, J. (2025). Water and Nitrogen Transport in Wheat and Maize: Impacts of Irrigation, Fertilization, and Soil Management. *Agriculture*, 15(23), 2442.
<https://doi.org/10.3390/agriculture15232442>

Zisopoulou, K., & Panagoulia, D. (2021). An In-Depth Analysis of Physical Blue and Green Water Scarcity in Agriculture in Terms of Causes and Events and Perceived Amenability to

Economic Interpretation. *Water*, 13(12), 1693.
<https://doi.org/10.3390/w13121693>

HASSAS TARIMDA DEĞİŞKEN ORANLI GÜBRELEME SİSTEMLERİ

Osman ECEOĞLU¹
İlker ÜNAL²

Giriş

Tarımsal üretim sistemlerinde verimliliği artırmaya yönelik uygulamalar uzun yıllar boyunca tarım alanlarını homojen kabul eden yaklaşımlar üzerine kurulmuştur. Ancak tarla ölçeğinde yürütülen araştırmalar, aynı parsel içerisinde dahi toprak özellikleri, bitki gelişimi ve besin maddesi gereksinimlerinin önemli ölçüde mekânsal ve zamansal değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur (Pierce & Nowak, 1999; Zhang vd., 2002). Bu durum, geleneksel sabit oranlı gübreleme uygulamalarının birçok koşulda optimum sonuçlar üretmesini engellemektedir. Pierce & Nowak (1999) tarafından vurgulandığı üzere, tarla içi değişkenliğin göz ardı edilmesi hem verim kayıplarına hem de girdilerin verimsiz kullanımına yol açmaktadır.

¹ Öğr. Gör. Dr, Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Orcid: 0000-0001-5778-6655

² Doç. Dr, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Hassas Tarım ve Tarımsal Robotlar Bölümü, Orcid: 0000-0002-5188-4438

Sabit oranlı gübreleme sistemlerinde, tarla genelinde tek tip gübre dozunun uygulanması yaygın bir yaklaşım olarak benimsenmektedir. Bu yaklaşım, bazı bölgelerde bitkinin gereksiniminden daha az, bazı bölgelerde ise gereğinden fazla gübre uygulanmasına neden olmaktadır. Aşırı gübre uygulamaları, yalnızca üretim maliyetlerini artırmakla kalmamakta; aynı zamanda nitrat yıkanması, yeraltı suyu kirliliği ve sera gazı emisyonları gibi çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Diacono vd. (2013), azot yönetiminde homojen uygulamaların çevresel riskleri artırdığını ve gübre kullanım etkinliğini düşürdüğünü açık biçimde ortaya koymuştur.

Bu sorunlara yanıt olarak geliştirilen hassas tarım yaklaşımı, üretim girdilerinin konuma özgü olarak yönetilmesini temel alan bir üretim felsefesi sunmaktadır. Hassas tarımın temel amacı; girdilerin doğru zamanda, doğru yerde ve doğru miktarda uygulanmasını sağlayarak hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliği artırmaktır. Değişken oranlı gübreleme sistemleri, bu yaklaşımın uygulamaya aktarılmasında kilit rol oynamaktadır (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004).

Değişken oranlı gübreleme, gübre dozunun tarla içinde mekâna bağlı olarak ayarlanmasını esas almaktadır. Bu ayarlama, önceden oluşturulan reçete haritalarına veya gerçek zamanlı sensör verilerine dayalı olarak gerçekleştirilebilmektedir. Özellikle azot gübrelemesinde bitki gelişim durumunun anlık olarak izlenebilmesi, gübre kullanım etkinliğini artırma potansiyeli taşımaktadır. Raun vd. (2002), bitki temelli algılama yaklaşımlarının azot kullanım etkinliğini iyileştirebileceğini göstermiştir.

Kanopi yansıtım sensörleri kullanılarak yürütülen çalışmalar, bitki gelişim durumu ile azot gereksinimi arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu ortaya koymuştur. Amer vd. (2009), yer tabanlı kanopi sensörlerinin değişken oranlı azot gübrelemesinde etkin biçimde

kullanılabileceğini ve tarla ölçeğinde uygulanabilir sonuçlar ürettiğini bildirmişlerdir.

Bununla birlikte, değişken oranlı gübreleme sistemlerinin her koşulda mutlak bir üstünlük sağladığını söylemek mümkün değildir. Sistemlerin başarısı; tarla içi değişkenliğin düzeyi, kullanılan verinin doğruluğu, karar algoritmalarının uygunluğu ve uygulama makinelerinin teknik yeterliliği gibi birçok faktöre bağlıdır. Just & Lybbert (2009), değişken oranlı uygulamaların ekonomik geri dönüşünün koşula bağlı olduğunu; bazı durumlarda sabit oranlı uygulamalara kıyasla sınırlı avantaj sağladığını ortaya koymuştur.

Benzer şekilde Hedley (2015), hassas tarım ve değişken oranlı gübreleme uygulamalarının, doğru veri ve uygun karar destek sistemleriyle birlikte ele alınmadığı durumlarda beklenen faydayı sağlayamayabileceğini vurgulamaktadır.

Bu bölümde değişken oranlı gübreleme sistemleri, hassas tarım yaklaşımı çerçevesinde ele alınarak kavramsal temelleri, kullanılan veri kaynakları, karar verme yaklaşımları, uygulama sistemleri ve performans değerlendirme ölçütleri açısından incelenmiştir. Bölümün kapsamı, değişken oranlı gübreleme uygulamalarıyla sınırlandırılmış, sulama ve bitki koruma uygulamaları bilinçli olarak çalışma dışında bırakılmıştır. Bu bölümün amacı, değişken oranlı gübreleme sistemlerinin teknik ve bilimsel altyapısını, sağladığı potansiyel avantajları ve mevcut sınırlılıkları, bütüncül ve eleştirel bir bakış açısıyla ortaya koymaktır.

Değişken Oranlı Gübreleme Sistemlerinin Kavramsal Yapısı ve Güncel Yaklaşımlar

Değişken oranlı gübreleme sistemleri, tarla içi mekânsal ve zamansal heterojenliğin yönetilmesini hedefleyen hassas tarım uygulamalarının çekirdek bileşenlerinden biridir. Literatürde bu sistemler, gübre dozunun tarla genelinde sabit bir değer olarak

uygulanması yerine, ölçülen veya tahmin edilen yerel koşullara bağlı olarak dinamik biçimde ayarlanması prensibine dayanmaktadır. Bu yaklaşımın temel amacı, gübre kullanım etkinliğini artırırken çevresel kayıpları ve ekonomik riskleri sınırlamaktır (Guerrero & Mouazen, 2021).

Değişken oranlı gübreleme uygulamaları kavramsal olarak iki ana yaklaşım altında ele alınmaktadır: reçete haritasına dayalı (map-based) ve sensör tabanlı gerçek zamanlı (on-the-go) sistemler. Reçete haritası tabanlı sistemlerde gübreleme kararları, uygulama öncesinde toplanan toprak, bitki veya geçmiş verim bilgilerine dayalı olarak oluşturulan mekânsal veri katmanları üzerinden belirlenmektedir. Bu yaklaşım, planlama aşamasında yüksek kontrol imkânı sunmasına karşın, mevsim içindeki ani değişimlere doğrudan yanıt verme kapasitesi sınırlı bir yapı sergilemektedir (Piikki vd., 2022).

Gerçek zamanlı sensör tabanlı değişken oranlı gübreleme sistemleri ise gübre dozunun uygulama sırasında elde edilen ölçümlere dayanarak anlık biçimde ayarlanmasını esas almaktadır. Bu sistemlerde bitki kanopisinden elde edilen optik ölçümler, toprak özellikleri veya her iki veri türünün birlikte değerlendirilmesi yoluyla bitkinin besin durumu hakkında çıkarımlar yapılmaktadır. Güncel çalışmalar, yalnızca tek bir sensör çıktısına dayalı karar mekanizmalarının sahada yeterli olmadığını; bunun yerine çoklu veri kaynaklarının bir arada kullanıldığı sistemlerin daha kararlı sonuçlar üretebildiğini göstermektedir (Heiß vd., 2021).

Sensör tabanlı sistemlerin pratikte karşılaştığı en önemli teknik sorunlardan biri, ölçüm noktasının algılandığı konum ile gübrenin toprağa fiilen uygulandığı konum arasındaki mekânsal ve zamansal ofset (kayma) problemidir. Traktör hızı, makine geometrisi ve kontrol sistemlerinin tepki süresi, bu ofsetin büyüklüğünü doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle son yıllarda yayımlanan

alışmalar, değişken oranlı gübreleme sistemlerini yalnızca bir algılama problemi olarak değil; ölçüm, karar ve uygulama adımlarının tamamını kapsayan bir kontrol sistemi olarak ele almaktadır (Heiş vd., 2021).

Model tabanlı karar destek sistemleri, değişken oranlı gübreleme yaklaşımlarında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bitki gelişim modellerinin, sensör verileri ve hava koşulları ile kullanılması; reçete haritalarının mevsim boyunca güncellenmesine olanak sağlamaktadır. Ancak yapılan çalışmalar, bu tür modellerin tek başına kullanıldığında genellenebilir sonuçlar üretmekte zorlandığını; sensör ve saha verileriyle desteklenmediği sürece pratik uygulamalarda sınırlı kaldığını vurgulamaktadır (Gobbo vd., 2022).

Değişken oranlı gübreleme sistemlerinin değerlendirilmesinde son yıllarda ne çıkan bir diğer konu, teknolojinin ekonomik performansdır. Güncel alışmalar, farklı bilgi kaynaklarına dayalı olarak oluşturulan gübreleme reçetelerinin kârlılık açısından tutarlı sonuçlar üretmediğini; başarının büyük ölçüde kullanılan veri türü, ürün deseni ve yerel koşullara bağlı olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, değişken oranlı gübrelemenin evrensel bir çözüm olarak sunulmasından ziyade, koşula duyarlı bir yönetim aracı olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Lee vd., 2025).

Saha temelli sensör tabanlı uygulamalara odaklanan güncel araştırmalar, değişken oranlı azot gübrelemesinin değerlendirilmesinde tarla ortalaması yerine tarla içi dağılımının dikkate alınmasının daha anlamlı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Özellikle şerit denemelerine dayalı çalışmalar, verim, azot alımı ve azot dengesi gibi göstergelerin mekânsal varyasyonu üzerinden yapılan analizlerin, değişken oranlı uygulamaların gerçek

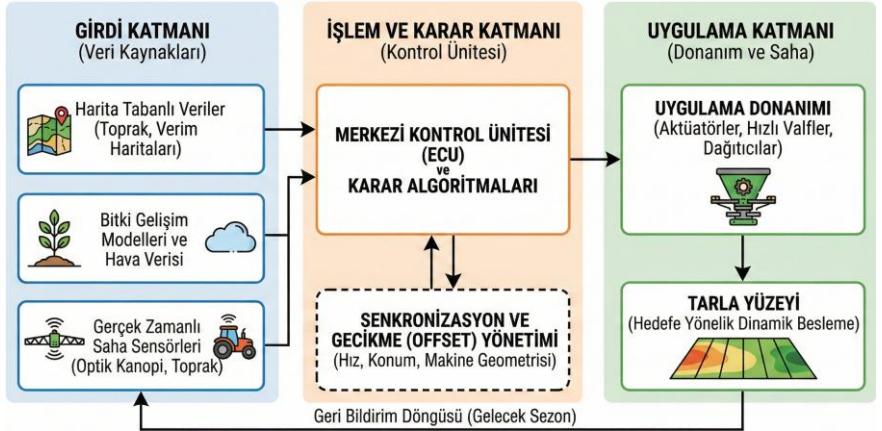
etkisini daha doğru biçimde yansıttığını göstermektedir (Hagn vd., 2025).

Uygulama sistemleri açısından bakıldığında, değişken oranlı gübreleme yalnızca yazılım veya algoritma düzeyinde değil; donanım mimarisiyle birlikte ele alınmalıdır. Sensör girdilerinin kontrol üniteleri üzerinden akış kontrol elemanlarına aktarılması sırasında oluşan gecikmelerin ve doz hatalarının, sistem performansını belirleyen kritik faktörler olduğu vurgulanmaktadır. Bu nedenle değişken oranlı gübreleme sistemleri, sensör–kontrolcü–aktüatör zincirinin bütüncül biçimde tasarlanmasını gerektiren mühendislik sistemleri olarak değerlendirilmektedir (Pramod Pawase vd., 2024).

2026 itibarıyla değişken oranlı gübreleme literatüründe öne çıkan temel eğilim, sistemlerin “daha fazla veri” üretmesinden ziyade, daha düşük gecikme, daha iyi senkronizasyon ve daha şeffaf karar mekanizmaları üzerinden geliştirilmesidir. Toprak ve bitki özelliklerinin gerçek zamanlı olarak ölçülmesi ve bu bilgilerin uygulama sistemleriyle eşzamanlı biçimde kullanılması, değişken oranlı gübrelemenin geleceğini şekillendiren ana eksen olarak değerlendirilmektedir (Dou vd., 2026).

Şekil 1’de gösterildiği üzere, değişken oranlı gübreleme sistemlerinde harita tabanlı veriler, gerçek zamanlı saha sensörleri ve bitki gelişim modelleri karar katmanında bütünleştirilmekte; elde edilen çıktılar, mekânsal ve zamansal ofsetler dikkate alınarak uygulama donanımına aktarılmaktadır.

Şekil 1 Bütüncül değişken oranlı gübreleme (VRA) sisteminin katmanlı mimarisi



Veri Kaynakları ve Algılama Teknolojileri

Değişken oranlı gübreleme sistemlerinin başarısı, büyük ölçüde kullanılan veri kaynaklarının niteliğine ve bu verilerin doğru biçimde yorumlanmasına bağlıdır. Güncel literatürde, gübreleme kararlarının desteklenmesinde kullanılan veri kaynakları genel olarak toprak tabanlı, bitki tabanlı ve uzaktan algılama temelli olmak üzere üç ana grupta ele alınmaktadır. Bu veri türlerinin her biri, tarla içi heterojenliğin farklı bir yönünü temsil etmekte ve değişken oranlı uygulamalara farklı düzeylerde katkı sunmaktadır (Guerrero & Mouazen, 2021).

Toprak Tabanlı Veri Kaynakları

Toprak özellikleri, bitki besin maddesi dinamiklerini doğrudan etkileyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Toprak tekstürü, organik madde içeriği, su tutma kapasitesi ve elektriksel iletkenlik gibi parametreler, besin maddelerinin bitki tarafından alınabilirliğini belirleyen başlıca unsurlardır. Değişken oranlı gübreleme uygulamalarında toprak tabanlı veriler, genellikle

yönetim zonlarının oluşturulmasında temel katman olarak kullanılmaktadır.

Toprak elektriksel iletkenliği (EC), tarla içi heterojenliğin hızlı ve sürekli biçimde haritalanabilmesine olanak sağlayan önemli bir gösterge olarak öne çıkmaktadır. EC ölçümleri, toprak tekstürü ve nem durumu gibi özelliklerle ilişkilendirilerek gübreleme kararlarında dolaylı bilgi kaynağı olarak kullanılabilir. Güncel çalışmalar, gerçek zamanlı EC sensörlerinin değişken oranlı gübreleme sistemlerine entegrasyonunun, özellikle reçete haritası oluşturma sürecinde pratik avantajlar sunduğunu göstermektedir (Dou vd., 2026).

Bununla birlikte, toprak tabanlı verilerin tek başına kullanımı, mevsim içindeki bitki gelişimini doğrudan yansıtmada sınırlıdır. Toprak özellikleri genellikle zamansal olarak yavaş değiştiğinden, bu verilerin bitkinin anlık besin gereksinimini temsil etme kapasitesi düşüktür. Bu nedenle çalışmalarda, toprak tabanlı verilerin bitki veya uzaktan algılama verileriyle birlikte kullanılması gerektiği vurgulanmaktadır (Piikki vd., 2022).

Bitki Tabanlı Sensör Sistemleri

Bitki tabanlı sensör sistemleri, değişken oranlı gübrelemede bitkinin mevcut besin durumunu doğrudan veya dolaylı olarak yansıtmayı amaçlamaktadır. Bu sistemler genellikle bitki kanopisinden yansıyan ışığın belirli dalga boylarındaki ölçümlerine dayanmaktadır. Elde edilen spektral bilgiler, bitkinin biyokütle durumu, klorofil içeriği ve stres seviyeleri hakkında çıkarımlar yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Güncel çalışmalarda, tek başına optik ölçümlere dayalı sensörlerin sahada yeterli doğruluk sağlamadığı; özellikle farklı çeşitler, ekim tarihleri ve çevresel koşullar altında performanslarının değişkenlik gösterdiği belirtilmektedir. Bu nedenle, çoklu sensör

verilerinin birlikte değerlendirildiği yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. Heiß vd. (2021), bitki temelli optik sensörlerin toprak özellikleriyle birlikte kullanıldığı çok parametrelili sistemlerin, değişken oranlı gübreleme kararlarında daha kararlı sonuçlar üretebildiğini ortaya koymuştur.

Sensör tabanlı sistemlerin önemli bir avantajı, mevsim içindeki değişimlere hızlı yanıt verebilme potansiyelidir. Ancak bu sistemlerin uygulanmasında, sensör ölçüm noktası ile gübrenin toprağa uygulandığı nokta arasındaki mesafenin ve zaman gecikmesinin doğru biçimde yönetilmesi gerekmektedir. Güncel mühendislik çalışmaları, sensör tabanlı gübreleme sistemlerinde kontrol algoritmaları kadar mekanik ve hidrolik bileşenlerin de performansı belirlediğini göstermektedir (Heiß vd., 2022).

Uzaktan Algılama Tabanlı Veri Kaynakları

Uydu ve insansız hava aracı (İHA) tabanlı uzaktan algılama sistemleri, tarla ölçeğinde geniş alanların kısa sürede izlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu sistemler, bitki gelişimini yansıtan çeşitli spektral indekslerin (örneğin NDVI, NDRE) hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzaktan algılama verileri, özellikle değişken oranlı gübreleme için reçete haritalarının oluşturulmasında önemli bir girdi sağlamaktadır.

Güncel literatürde, uzaktan algılama verilerinin değişken oranlı gübreleme kararlarında kullanımına ilişkin en önemli tartışma, mekânsal ve zamansal çözünürlük konusudur. Uydu verileri geniş alanlar için avantaj sağlarken, bulutluluk ve tekrar geçiş süresi gibi kısıtlar içermektedir. İHA tabanlı sistemler ise yüksek mekânsal çözünürlük sunmasına karşın, operasyonel maliyet ve veri işleme gereksinimleri açısından sınırlılıklar taşımaktadır (Guerrero & Mouazen, 2021).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, uzaktan algılama verilerinin tek başına kullanılması yerine, sensör ve toprak verileriyle bütünleştirilmesinin daha güvenli gübreleme kararları üretebildiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, değişken oranlı gübrelemenin “tek veri kaynağına dayalı” bir teknoloji değil; çok kaynaklı bir karar destek sistemi olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Lee vd., 2025).

Veri Füzyonu ve Karar Sürecine Etkisi

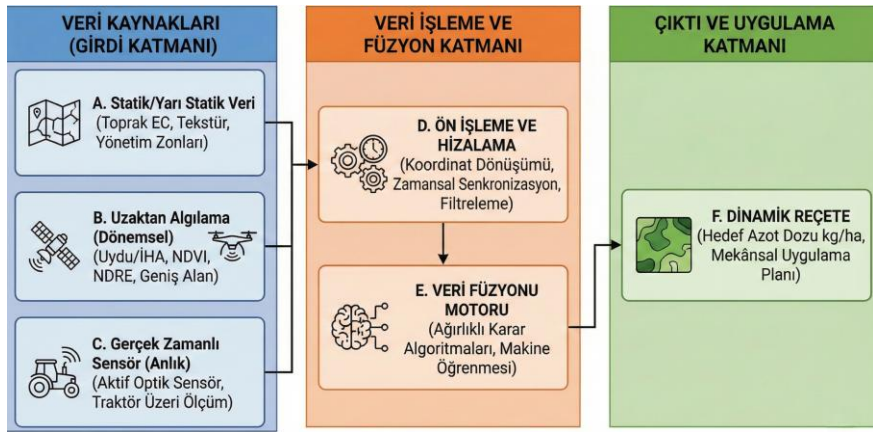
Değişken oranlı gübreleme literatüründe ne çıkan en belirgin eğilim, farklı veri kaynaklarının birlikte kullanıldığı veri füzyonu yaklaşımlarıdır. Toprak, bitki ve uzaktan algılama verilerinin tek bir karar mekanizması içerisinde değerlendirilmesi, her bir veri türünün sınırlılıklarını dengelemeyi amaçlamaktadır. Güncel alışmalar, veri füzyonunun değişken oranlı gübreleme sistemlerinde karar kararlılığını artıracıebileceğini, ancak bu sürecin şeffaf ve izlenebilir algoritmalarla yürütülmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Gobbo vd., 2022).

Bu çerçevede, veri kalitesi, ölçüm sıklığı ve senkronizasyon gibi unsurlar, değişken oranlı gübreleme sistemlerinin başarısında belirleyici faktörler olarak öne çıkmaktadır. Farklı kaynaklardan elde edilen verilerin zamansal ve mekânsal olarak uyumlu hle getirilmediğı durumlarda, sistemlerin beklenen faydayı sağlamadığı açıkça belirtilmektedir. Dolayısıyla VRA uygulamalarında veri üretimi kadar veri yönetimi ve entegrasyonu da kritik öneme sahiptir.

şekil 2’de gösterildiğı üzere, değişken oranlı gübreleme sistemlerinde karar destek süreci; statik ve yarı statik toprak verileri, uzaktan algılama ıktıları ve gerçek zamanlı saha sensörlerinden elde edilen bilgilerin ortak bir veri işleme ve füzyon katmanında bütünleştirilmesine dayanmaktadır. Bu aşamada veriler, koordinat dönüşümü, zamansal senkronizasyon ve filtreleme gibi ön işlemlerden geçirilerek karar algoritmalarına uygun hle

getirilmektedir. Ardından ağırlıklı karar mekanizmaları ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar kullanılarak dinamik gübre reçeteleri oluşturulmakta ve bu reçeteler mekânsal uygulama planı olarak sahaya aktarılmaktadır. Bu yapı, değişken oranlı gübrelemenin tek bir veri kaynağına dayalı değil, çok kaynaklı ve bütünleşik bir karar destek sistemi olarak ele alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 2 Değişken oranlı gübreleme sistemlerinde çok kaynaklı veri füzyonu ve karar destek mimarisi



Karar Verme Yaklaşımları ve Reçete Oluşturma

Değişken oranlı gübreleme sistemlerinde karar verme süreci, ölçüm verilerinin doğrudan uygulamaya dönüştürüldüğü en kritik aşamayı temsil etmektedir. Çalışmalar, karar verme yaklaşımlarını kural tabanlı, model tabanlı ve veri bütünleşik karar destek sistemleri (DSS) başlıkları altında ele almaktadır. Bu yaklaşımların her biri, kullanılan veri türleri, belirsizlikle başa çıkma biçimleri ve sahadaki uygulanabilirlikleri açısından farklı güçlü ve zayıf yönler barındırmaktadır (Gobbo vd., 2022).

Kural Tabanlı Yaklaşımlar

Kural tabanlı karar mekanizmaları, değişken oranlı gübreleme uygulamalarında en yalın ve şeffaf yapı olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşımlarda gübre dozu, belirli eşik değerlerine veya önceden tanımlanmış if-then (eğer-ise) kurallarına göre belirlenmektedir. Örneğin, bitki gelişim indeksinin belirli bir aralığın altında veya üstünde olması durumunda uygulanacak gübre dozunun artırılması ya da azaltılması gibi basit karar kuralları kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmalar, kural tabanlı yaklaşımların sahada uygulanabilirliğinin yüksek olduğunu; ancak karmaşık ve çok değişkenli koşullarda sınırlı esneklik sunduğunu göstermektedir. Özellikle farklı veri kaynaklarının aynı anda kullanıldığı durumlarda, tek boyutlu eşiklere dayalı kararlar sistem performansını sınırlandırabilmektedir (Heiß vd., 2021).

Model Tabanlı Karar Verme

Model tabanlı yaklaşımlar, bitki büyüme ve besin maddesi dinamiklerini matematiksel veya simülasyon tabanlı modeller aracılığıyla temsil etmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşımlarda gübreleme kararı; bitki gelişim modeli, hava koşulları ve toprak özellikleri gibi girdiler kullanılarak hesaplanmaktadır. Model tabanlı sistemlerin temel avantajı, gübreleme kararlarını yalnızca mevcut duruma değil, beklenen gelişim senaryolarına da dayandırabilmesidir.

Bununla birlikte, araştırmalar model tabanlı karar verme yaklaşımlarının pratik uygulamalarda dikkatli kullanılması gerektiğini vurgulamaktadır. Modellerin parametre hassasiyeti ve yerel koşullara uyarlanma gereksinimi, bu sistemlerin genellenebilirliğini sınırlandıran başlıca faktörlerdir. Gobbo vd. (2022), model tabanlı değişken oranlı azot gübrelemesinin sensör verileriyle

desteklenmediği durumlarda, saha performansının değişkenlik gösterebildiğini raporlamıştır.

Veri Bütünleşik Karar Destek Sistemleri (DSS)

2021 sonrası literatürde, değişken oranlı gübreleme uygulamalarında veri bütünleşik karar destek sistemleri ön plana çıkmaktadır. Bu sistemler, toprak verileri, bitki sensörleri, uzaktan algılama ıktıları ve model tahminlerini tek bir karar erevesi içerisinde birleştirmeyi hedeflemektedir. Amaç, tek bir veri kaynağının sınırlılıklarını diğer kaynaklarla dengeleyerek daha kararlı ve izlenebilir gübreleme kararları üretmektir.

Konu ile ilgili yapılan alışmalar, DSS tabanlı yaklaşımların özellikle reçete haritası üretiminde ve mevsim içi güncellemelerde avantaj sağladığını göstermektedir. Piikki vd. (2022), uzaktan algılama verileri ile saha denemelerinin birlikte kullanıldığı DSS yaklaşımlarının, mevsim içi azot yönetiminde daha esnek kararlar üretebildiğini ortaya koymuştur.

Belirsizlik, Risk ve Karar Kararlılığı

Değişken oranlı gübreleme kararlarında belirsizlik hem ölçüm hatalarından hem de çevresel koşullardaki ngrlemezlikten kaynaklanmaktadır. Literatürde, belirsizliğin göz ardı edilmesinin, değişken oranlı uygulamaların beklenen faydasını azaltabileceğini vurgulanmaktadır. Bu nedenle karar mekanizmalarının, yalnızca tek bir optimum çözüme odaklanmak yerine, farklı senaryoları ve risk düzeylerini dikkate alması önerilmektedir(Lee vd., 2025)

Ekonomik değerlendirme odaklı çalışmalarda, farklı karar stratejilerinin kârlılık dağılımları üzerinden karşılaştırılması, değişken oranlı gübrelemenin performansını daha gerçekçi biçimde ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, karar verme sürecinin yalnızca agronomik değer; aynı zamanda ekonomik riskleri de kapsayan çok boyutlu bir problem olduğunu göstermektedir.

Reçete Haritası Oluşturma Süreci

Reçete haritası oluşturma, değişken oranlı gübreleme kararlarının sahaya aktarılmasında kilit bir adımdır. Güncel yaklaşımlarda bu süreç; veri ön işleme, yönetim zonlarının belirlenmesi, doz atama ve doğrulama adımlarından oluşmaktadır. Yönetim zonlarının belirlenmesinde kümeleme yöntemleri, istatistiksel sınıflandırmalar veya model çıktıları kullanılabilir.

Çalışmalar, reçete haritalarının statik bir çıktı olarak değil, mevsim boyunca güncellenebilen dinamik bir araç olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Özellikle sensör ve uzaktan algılama verilerinin mevsim içi entegrasyonu, reçete haritalarının geçerliliğini artırabilmektedir (Guerrero & Mouazen, 2021).

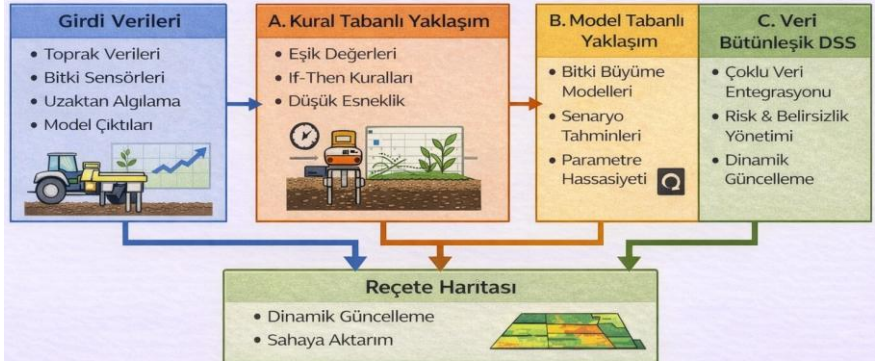
Karar Mekanizmalarının Uygulamaya Etkisi

Karar verme yaklaşımı, değişken oranlı gübreleme sistemlerinin sahadaki başarısını doğrudan etkilemektedir. Güncel mühendislik çalışmaları, doğru karar algoritmasının; sensör–kontrolcü–aktüatör zinciriyle uyumlu olmadığı durumlarda, teorik olarak doğru kararların dahi sahada hatalı uygulamalara dönüşebileceğini göstermektedir. Bu nedenle karar verme süreci, uygulama sistemlerinin teknik sınırlılıklarıyla birlikte ele alınmalıdır (Heiß vd., 2022).

Şekil 3'te gösterildiği üzere, değişken oranlı gübreleme sistemlerinde toprak verileri, bitki sensörleri, uzaktan algılama çıktıları ve model sonuçları farklı karar verme yaklaşımları kapsamında işlenerek reçete haritasına dönüştürülmektedir. Kural tabanlı yaklaşımlar genellikle önceden tanımlanmış eşik değerleri ve if–then kuralları üzerinden düşük esnekliğe sahip kararlar üretirken; model tabanlı yaklaşımlar bitki büyüme modelleri ve senaryo tahminleri aracılığıyla daha ileriye dönük kararlar sunmaktadır. Veri

bütünleşik karar destek sistemleri (DSS) ise çoklu veri entegrasyonu, belirsizlik yönetimi ve dinamik güncelleme yetenekleri sayesinde reçete haritalarının mevsim içi olarak güncellenmesine olanak sağlamaktadır. Bu farklı yaklaşımlar, nihai olarak gübre dozunun sahaya aktarılma biçimini ve uygulama kararlılığını doğrudan etkilemektedir.

Şekil 3 Değişken oranlı gübrelemede karar verme yaklaşımlarının reçete haritası oluşturma sürecine etkisi



Uygulama Sistemleri ve Tarım Makineleri

Değişken oranlı gübreleme sistemlerinin sahadaki başarısı, yalnızca doğru karar verme yaklaşımlarına değil, bu kararların tarım makineleri aracılığıyla doğru ve tekrarlanabilir biçimde uygulanabilmesine bağlıdır. Güncel literatürde değişken oranlı uygulamalar, dağıtıcı tipi, kontrol altyapısı ve konum bilgisi entegrasyonu çerçevesinde ele alınmaktadır. Bu unsurlar arasındaki uyum sağlanmadığında, teorik olarak doğru kararların pratikte hatalı uygulamalara dönüşebildiği açıkça raporlanmaktadır (Pramod Pawase vd., 2024).

Değişken Oranlı Gübre Dağıtıcı Sistemler

Değişken oranlı gübreleme uygulamalarında kullanılan dağıtıcı sistemler, katı ve sıvı gübre uygulamalarına göre farklı

mühendislik çözümleri içermektedir. Katı gübre dağıtıcılarında doz ayarlaması genellikle disk hızı, açıklık genişliği veya konveyör besleme oranı üzerinden gerçekleştirilirken; sıvı gübre sistemlerinde akış kontrolü valfler ve pompa hızları aracılığıyla sağlanmaktadır. Güncel çalışmalar, her iki sistem tipinde de doz hassasiyetinin makine tasarımı ve kontrol sisteminin tepki süresine doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir (Heiß vd., 2022).

Katı gübre dağıtıcılarında partikül boyutu, nem içeriği ve dağılım paterni gibi faktörler, değişken oranlı uygulamalarda ek belirsizlik kaynakları oluşturmaktadır. Bu nedenle literatürde, değişken oranlı gübreleme için kullanılan makinelerin saha koşullarında kalibrasyonunun, sabit oranlı sistemlere kıyasla daha kritik olduğu vurgulanmaktadır (Guerrero & Mouazen, 2021).

Kontrol Üniteleri ve ISOBUS Entegrasyonu

Değişken oranlı gübreleme sistemlerinde kontrol üniteleri, sensörlerden veya reçete haritalarından gelen girdileri uygulama ekipmanına aktaran temel bileşenlerdir. Güncel tarım makinelerinde bu iletişim genellikle ISOBUS (ISO 11783) standardı üzerinden sağlanmaktadır. ISOBUS entegrasyonu, farklı üreticilere ait traktör, sensör ve dağıtıcıların ortak bir iletişim altyapısı üzerinden çalışmasına olanak tanımaktadır.

Ancak güncel çalışmalar, ISOBUS uyumluluğunun tek başına sistem başarısını garanti etmediğini göstermektedir. Özellikle veri iletim gecikmeleri, mesaj senkronizasyonu ve kontrol komutlarının uygulamaya yansıma süresi, değişken oranlı gübrelemede doz doğruluğunu etkileyen faktörler arasında yer almaktadır (Heiß vd., 2022).

GNSS ve Konum Doğruluğu

Bu gübreleme uygulamalarında gübre dozunun doğru konumda uygulanabilmesi için güvenilir konum bilgisi gereklidir.

GNSS tabanlı konumlama sistemleri, reçete haritalarının ve sensör verilerinin tarla üzerindeki doğru noktalarla eşleştirilmesini sağlamaktadır. Güncel literatürde, özellikle gerçek zamanlı sensör tabanlı uygulamalarda konum doğruluğunun uygulama başarısını doğrudan etkilediği vurgulanmaktadır.

RTK-GNSS gibi yüksek doğruluklu konumlama sistemleri, uygulama hatalarını azaltma potansiyeline sahip olmakla birlikte, maliyet ve altyapı gereksinimleri nedeniyle her işletme için uygulanabilir değildir. Bu durum, bu sistemlerinin ekonomik değerlendirmesinde konumlama teknolojisinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Lee vd., 2025).

Kalibrasyon, Tepki Süresi ve Uygulama Hataları

VRA uygulamalarında kalibrasyon, sistem performansını belirleyen en kritik adımlardan biridir. Güncel çalışmalar, sensör doğruluğu kadar dağıtıcı sistemlerin tepki süresinin de uygulama hatalarına neden olabildiğini göstermektedir. Özellikle traktör hızındaki değişimler, doz ayarlama komutlarının sahaya yansımada gecikmelere yol açabilmektedir.

Bu bağlamda, söz konusu sistemlerin değerlendirilmesinde yalnızca uygulanan ortalama doz değil; dozun tarla içindeki dağılımı ve hedeflenen değerlerden sapma düzeyi de dikkate alınmalıdır. Pramod Pawase vd. (2024), sıvı gübre uygulamalarında kontrol gecikmelerinin doz hatalarını artırabildiğini ve bu durumun saha performansını sınırlayabildiğini raporlamıştır.

Saha Uygulamalarında Karşılaşılan Teknik Sınırlılıklar

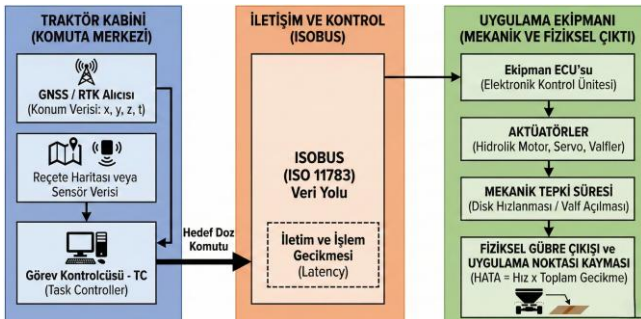
Saha uygulamalarına odaklanan güncel literatür, değişken oranlı gübreleme sistemlerinin teknik sınırlılıklarının çoğunlukla sensör, kontrol ve mekanik bileşenler arasındaki uyumsuzluktan kaynaklandığını göstermektedir. Sensör ölçüm sıklığı, veri işleme

süresi ve aktüatör tepkisi arasındaki dengesizlikler, uygulama doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir.

Bu nedenle bu sistemler, yalnızca “akıllı” bir karar algoritması olarak değil; bütüncül bir mekatronik sistem olarak ele alınmalıdır. Güncel çalışmalar, bu bütüncül yaklaşımın benimsenmediği durumlarda değişken oranlı gübrelemenin beklenen avantajları sağlayamadığını açıkça ortaya koymaktadır (Heiß vd., 2021).

Şekil 4’te gösterildiği üzere, VRA sistemlerinde karar çıktılarının sahaya doğru ve zamanında yansıtılması; traktör kabininde yer alan görev kontrolcüsü, ISOBUS iletişim altyapısı ve uygulama ekipmanının mekatronik bileşenleri arasındaki etkileşime bağlıdır. Reçete haritası veya sensör verisine dayalı hedef doz komutları, ISOBUS veri yolu üzerinden ekipman kontrol ünitesine iletilmekte; bu süreçte oluşan iletişim gecikmeleri, aktüatörlerin mekanik tepki süreleriyle birleşerek uygulama noktasında mekânsal kaymalara neden olabilmektedir. Bu durum, değişken oranlı gübreleme performansının yalnızca karar algoritmalarına değil, iletişim altyapısı, kontrol senkronizasyonu ve mekanik sistemlerin dinamik özelliklerine de doğrudan bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 4 Değişken oranlı gübreleme sistemlerinde traktör–ISOBUS–uygulama ekipmanı etkileşimi ve gecikme kaynakları



Performans Değerlendirmesi ve Sınırlılıklar

Bu sistemlerinin performansı, yalnızca verim artışı gibi tekil çıktılar üzerinden değil; gübre kullanım etkinliği, ekonomik geri dönüş, çevresel etkiler ve uygulama kararlılığı gibi çok boyutlu göstergeler üzerinden değerlendirilmelidir. Güncel literatür, değişken oranlı gübrelemenin başarısının büyük ölçüde yerel koşullara ve kullanılan bilgi kaynaklarının uygunluğuna bağlı olduğunu göstermektedir (Guerrero & Mouazen, 2021).

Verim ve Gübre Kullanım Etkinliği

Son yıllarda yapılan saha temelli çalışmalar, değişken oranlı gübreleme uygulamalarının tarla ortalaması üzerinden değerlendirildiğinde tutarlı verim artışları göstermeyebildiğini; ancak tarla içi varyasyonun dikkate alındığı analizlerde daha anlamlı sonuçlar ortaya koyabildiğini göstermektedir. Bu durum, söz konusu sistemlerin değerlendirilmesinde yalnızca ortalama verim değerlerine odaklanmanın yanıltıcı olabileceğine işaret etmektedir (Hagn vd., 2025)

Azot kullanım etkinliği (NUE) açısından bakıldığında, güncel çalışmalar değişken oranlı uygulamaların bazı koşullarda sabit oranlı gübrelemeye kıyasla daha dengeli bir besin dağılımı sağlayabildiğini, ancak bu etkinin ürün türü ve çevresel koşullara bağlı olarak değiştiğini raporlamaktadır. Bu nedenle literatürde, değişken oranlı gübrelemenin her zaman daha yüksek NUE sağlayacağı yönünde genelleme yapılmaması gerektiği özellikle vurgulanmaktadır (Piikki vd., 2022).

Ekonomik Performans ve Kârlılık

Değişken oranlı gübreleme sistemlerinin benimsenmesinde ekonomik performans belirleyici bir faktördür. Güncel ekonomik analizler, değişken oranlı gübrelemenin kârlılığının; gübre fiyatları, ürün fiyatları, tarla içi heterojenliğin düzeyi ve kullanılan veri

kaynaklarının maliyeti gibi unsurlara duyarlı olduğunu göstermektedir. Lee vd. (2025), farklı bilgi kaynaklarına dayalı olarak oluşturulan azot reçetelerinin kârlılık açısından tutarlı sonuçlar üretmediğini ve bazı senaryolarda sabit oranlı uygulamaların daha avantajlı olabildiğini ortaya koymuştur.

Bu bulgular, değişken oranlı gübrelemenin ekonomik açıdan “her koşulda üstün” bir teknoloji olarak sunulmasının bilimsel karşılığı olmadığını göstermektedir. Aksine, teknoloji yatırımlarının geri dönüşü; işletme ölçeği, ekipman altyapısı ve karar verme kalitesi gibi faktörlerle birlikte değerlendirilmelidir.

Çevresel Etkiler

Çevresel açıdan bakıldığında, değişken oranlı gübreleme sistemlerinin temel hedeflerinden biri, aşırı gübre uygulamalarını azaltarak besin maddesi kayıplarını sınırlamaktır. Yapılan çalışmalar, özellikle azot yönetiminde, tarla içi değişkenliğin dikkate alınmasının potansiyel çevresel faydalar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Ancak bu faydaların otomatik olarak gerçekleşmediği; uygulamanın kalitesi ve veri doğruluğu ile yakından ilişkili olduğu belirtilmektedir (Guerrero & Mouazen, 2021).

Bazı çalışmalarda, sensör tabanlı veya reçete haritası temelli uygulamaların, azot dengesi ve potansiyel kayıplar üzerindeki etkilerinin ürün ve yıl bazında önemli farklılıklar gösterdiği raporlanmıştır. Bu durum, çevresel performans değerlendirmelerinde uzun dönemli ve çok yıllık verilerin önemini ortaya koymaktadır.

Uygulama Kararlılığı ve Teknik Sınırlılıklar

Bu sistemlerinin performansını sınırlayan başlıca unsurlardan biri, uygulama kararlılığıdır. Güncel çalışmalar, sensör doğruluğu, veri senkronizasyonu, kontrol gecikmeleri ve makine kalibrasyonu gibi teknik faktörlerin, saha performansını doğrudan

etkilediğini göstermektedir. Bu tür teknik sınırlılıklar, doğru kararların dahi sahada beklenen sonucu üretmesini engelleyebilmektedir (Pramod Pawase vd., 2024).

Ayrıca, VRA sistemlerinin başarısı, operatör deneyimi ve sistemin doğru kullanımı ile de yakından ilişkilidir. Literatürde, teknolojiye erişimin tek başına yeterli olmadığı; sistemin doğru kalibre edilmesi ve işletme koşullarına uygun biçimde yönetilmesinin kritik olduğu vurgulanmaktadır.

Genellenebilirlik ve Uygulama Sınırları

Değişken oranlı gübreleme çalışmalarının önemli bir sınırlılığı, elde edilen sonuçların farklı ürünler, bölgeler ve yıllar arasında genellenebilirliğinin sınırlı olmasıdır. Bir bölgede başarılı sonuçlar veren bir uygulamanın, farklı çevresel ve üretim koşullarında benzer performans göstermemesi mümkündür. Bu nedenle güncel literatür, değişken oranlı gübreleme sonuçlarının bağlamı açıkça belirtilmeden genellenmemesi gerektiği konusunda ortak bir uyarı sunmaktadır (Dou vd., 2026).

Bu bağlamda değişken oranlı gübreleme, tekil bir teknoloji çözümünden ziyade, koşula duyarlı bir yönetim stratejisi olarak değerlendirilmelidir. Performansın sürdürülebilir biçimde artırılabilmesi, yerel koşullara uygun veri kaynaklarının seçimi ve karar süreçlerinin sürekli olarak güncellenmesiyle mümkündür.

Şekil 5’te gösterildiği üzere, VRA sistemlerinin performansı yalnızca verim artışı üzerinden değil; gübre kullanım etkinliği, ekonomik performans, çevresel etkiler ve uygulama kararlılığı gibi birbirini tamamlayan boyutlar üzerinden değerlendirilmelidir. Bu performans göstergeleri; yerel koşullar, veri kalitesi, operatör etkisi, yıl/iklim farklılığı ile ürün türü ve fenolojik evre gibi bağlamsal faktörlerden doğrudan etkilenmektedir. Dolayısıyla u teknolojinin

başarısı, tekil bir teknik çıktıya indirgenemeyecek ölçüde çok boyutlu ve koşula duyarlı bir yapı sergilemektedir.

Şekil 5 Değişken oranlı gübreleme sistemlerinde performansın çok boyutlu değerlendirme çerçevesi



Gelecek Perspektifi ve Sonuç

Değişken oranlı gübreleme sistemleri, 2026 itibarıyla yalnızca bir uygulama tekniği olarak değil, uçtan uca bir karar ve uygulama sistemi olarak ele alınmaktadır. Güncel literatürdeki eğilim, gübreleme kararlarının tek bir veri kaynağına veya sabit reçete haritalarına dayandırılmasından ziyade, çok kaynaklı veri bütünleşmesi, daha kısa karar–uygulama gecikmesi ve saha koşullarına uyarlanabilir sistem mimarileri üzerinden şekillenmektedir. Bu yaklaşım, değişken oranlı gübrelemenin geleceğini “daha fazla veri” üretmekten çok, verinin doğru zamanda ve doğru biçimde kullanılmasına odaklanmaktadır (Guerrero & Mouazen, 2021).

Geleceğe yönelik çalışmalarda öne çıkan bir diğer konu, bu sistemlerin dijital tarım altyapılarıyla entegrasyonudur. Karar destek sistemlerinin, sensör verileri ve uzaktan algılama çıktılarının yanı

sıra, hava durumu tahminleri ve üretim geçmişi gibi ek bilgi kaynaklarını da dikkate alacak biçimde geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ancak güncel çalışmalar, bu entegrasyonun yalnızca yazılım düzeyinde değil, veri kalitesi, senkronizasyon ve izlenebilirlik gibi temel unsurlar gözetilerek ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Gobbo vd., 2022).

VRA uygulamalarının yaygınlaşmasını sınırlayan temel etmenlerden biri, elde edilen sonuçların farklı ürünler, çevresel koşullar ve üretim sistemleri arasında tutarlı biçimde genellenememesidir. 2022–2025 döneminde yayımlanan saha ve modelleme temelli çalışmalar, farklı ürünler, bölgeler ve yıllar arasında tutarlı performans sonuçları elde etmenin güç olduğunu; bu nedenle teknolojinin “tek tip çözüm” olarak sunulmaması gerektiğini göstermektedir. Bu durum, değişken oranlı gübrelemenin gelecekte daha fazla koşula duyarlı ve esnek yönetim yaklaşımlarıyla birlikte ele alınacağını göstermektedir (Piikki vd., 2022).

Ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından bakıldığında, VRA sistemlerinin değerinin, çoğu zaman ortalama verim artışlarından ziyade risk yönetimi ve girdi kullanımının dengelenmesi üzerinden ortaya çıktığı görülmektedir. Güncel ekonomik analizler, teknolojinin başarısının gübre ve ürün fiyatlarındaki dalgalanmalara, tarla içi heterojenliğin düzeyine ve kullanılan veri kaynaklarının maliyetine duyarlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, değişken oranlı gübreleme yatırımlarının değerlendirilmesinde kısa vadeli kazanç beklentileri yerine, uzun vadeli performans ve çevresel etkiler dikkate alınmalıdır (Lee vd., 2025).

Teknik açıdan gelecekteki gelişmelerin odak noktası, sensör–kontrol–uygulama zincirinin daha iyi senkronize edilmesi ve saha koşullarına uyarlanabilirliğin artırılmasıdır. Gerçek zamanlı toprak

ve bitki algılamaya dayalı uygulamaların, gecikme ve uygulama hatalarını azaltmaya yönelik mühendislik çözümleriyle desteklenmesi, değişken oranlı gübrelemenin sahadaki güvenilirliğini artırma potansiyeli taşımaktadır (Dou vd., 2026).

Bu bölümde ele alınan bulgular bir bütün olarak değerlendirildiğinde, VRA sistemlerinin tek başına bir teknoloji çözümü olarak değil; veri üretimi, karar verme ve uygulama süreçlerinin bütünleşik bir yönetim sistemi olarak ele alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Başarılı uygulamalar, genellikle uygun veri kaynaklarının seçildiği, karar mekanizmalarının şeffaf biçimde tanımlandığı ve uygulama makinelerinin teknik sınırlılıklarının dikkate alındığı koşullarda elde edilmektedir.

Sonuç olarak, değişken oranlı gübreleme sistemleri, 2026 itibarıyla hassas tarımın olgunlaşan bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. Ancak bu olgunluk, teknolojinin her koşulda üstün olduğu anlamına gelmemektedir. Gelecekteki çalışmaların, teknolojinin sınırlarını açıkça ortaya koyan, bağlama duyarlı ve uzun dönemli değerlendirmelere odaklanması; değişken oranlı gübrelemenin sürdürülebilir tarım sistemleri içerisindeki gerçek rolünü daha net biçimde tanımlayacaktır.

Kaynakça

Amer, K. H., Midan, S. A., & Hatfield, J. L. (2009). Effect of deficit irrigation and fertilization on cucumber. *Agronomy Journal*, 101(6), 1556–1564. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0112>

Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*, 5(4), 359–387. <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa>

Diacono, M., Rubino, P., & Montemurro, F. (2013). Precision nitrogen management of wheat: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 219–241. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0111-z>

Dou, H., Hu, L., Zhang, Y., Zhai, C., Li, S., & Chen, L. (2026). Precision variable-rate fertilizer application method based on real-time field soil electrical conductivity sensing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 241, 111267. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111267>

Gobbo, S., De Antoni Migliorati, M., Ferrise, R., Morari, F., Furlan, L., & Sartori, L. (2022). Evaluation of different crop model-based approaches for variable rate nitrogen fertilization in winter wheat. *Precision Agriculture*, 23(6), 1922–1948. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09957-5>

Guerrero, A., & Mouazen, A. M. (2021). Evaluation of variable rate nitrogen fertilization scenarios in cereal crops from economic, environmental and technical perspectives. *Soil and Tillage Research*, 213, 105110. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105110>

Hagn, L., Mittermayer, M., Kern, A., Kimmelman, S., Maidl, F. X., & Hülsbergen, K. J. (2025). Effects of sensor-based, site-specific nitrogen fertilizer application on crop yield, nitrogen

balance, and nitrogen efficiency. *Sensors*, 25(3), 795.
<https://doi.org/10.3390/s25030795>

Hedley, C. (2015). 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>

Heiß, A., Paraforos, D. S., Sharipov, G. M., & Griepentrog, H. W. (2021). Modeling and simulation of a multi-parametric fuzzy expert system for variable rate nitrogen application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 106008.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106008>

Heiß, A., Paraforos, D. S., Sharipov, G. M., & Griepentrog, H. W. (2022). Real-time control for multi-parametric data fusion and dynamic offset optimization in sensor-based variable rate nitrogen application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196, 106893.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106893>

Just, D. R., & Lybbert, T. J. (2009). Risk averters that love risk? Marginal risk aversion in comparison to a reference gamble. *American Journal of Agricultural Economics*, 91(3), 612–626.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8276.2009.01273.x>

Lee, S. W., Swinton, S. M., & Basso, B. (2025). Comparing profitability of variable rate nitrogen prescriptions. *Precision Agriculture*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1007/s11119-025-10256-y>

Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, 67, 1–85.
[https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60513-1](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60513-1)

Piikki, K., Söderström, M., & Stadig, H. (2022). Remote sensing and on-farm experiments for determining in-season nitrogen

rates in winter wheat: Options for implementation, model accuracy and remaining challenges. *Field Crops Research*, 289, 108742. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108742>

Pawase, P. P., Nalawade, S. M., Walunj, A. A., Bhanage, G. B., Kadam, P. B., Durgude, A. G., & Patil, M. R. (2024). Comprehensive study of on-the-go sensing and variable rate application of liquid nitrogenous fertilizer. *Computers and Electronics in Agriculture*, 216, 108482. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108482>

Raun, W. R., Solie, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Muten, R. W., Freeman, K. W., & Lukina, E. V. (2002). Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agronomy Journal*, 94(4), 815–820. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.8150>

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture: A worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), 113–132. [https://doi.org/10.1016/s0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/s0168-1699(02)00096-0)

