

Akıllı Sulama için Toprak Nem Dinamiğinde Kapalı Döngü Kontrol Modeli ve Kontrol Edilebilirlik

A Closed-Loop Control Model and Controllability in Soil Moisture Dynamics for Intelligent Irrigation

 Ali Hamidoğlu¹

¹Matematik Bölümü
Bahçeşehir Üniversitesi
ali.hamidoğlu@eng.bau.edu.tr

Özet

Dünyada artan nüfus ve kuraklık nedeniyle, tatlı su kaynaklarına olan talep son zamanlarda artmıştır. Bu nedenle sürdürülebilir tarımsal üretimin geliştirilmesi ve akıllı tarımsal araçların daha yaygın olarak kullanılması çok önemlidir. Toprak nem dinamiklerinin, diğer çevresel süreçlerin yanı sıra tarım, su yönetimi ve ekosistem işlevi üzerinde önemli etkileri vardır. Toprak nem dinamiklerini anlamak için yağış, buharlaşma, terleme, sızma ve toprak özellikleri arasındaki karmaşık etkileşimler dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, akıllı tarımda çok yaygın kullanılan kapalı döngü kontrol yapıları incelenmiş ve toprak nem dinamiğinde bir öngörülülük kontrol modeli önerilmiştir. Kurulan bu modelde, yağış miktarı, sulama mekanizması, derin sızma ve toprağın buharlaşma seviyeleri göz önüne alınmıştır. Bu kontrol sistemi üzerinde, topraktaki nem dinamiğinin zamana göre hangi durumlar altında kontrol edilebilir olduğu teorik bulgular ile sunulmuştur. Sayısal sonuçlar teorik kazanımları desteklemiştir. Böylelikle toprağın alacağı su miktarı, sıcaklık ve buharlaşma verileri öngörülülük sürekli kontroller vasıtasıyla bitkinin daha verimli bir toprak nemine sahip olması sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Kapalı döngü kontrol, sulama yöntemleri, öngörülülük kontrol model, akıllı tarım, kontrol edilebilirlik.

Abstract

Population growth and drought have increased the demand for clean water resources. Consequently, sustainable agricultural production and extensive use of sophisticated agricultural equipment are essential. The dynamics of soil moisture influence agriculture, water management, and ecosystem function. To comprehend the dynamics of soil moisture, one must examine the complex interactions between precipitation, evaporation, transpiration, infiltration, and soil characteristics. This study investigates closed-loop control structures, which are widely used in intelligent agriculture, and proposes a predictive control model for soil moisture dynamics. This model will take into account the soil's precipitation, irrigation mechanism, deep infiltration, and evaporation levels. On this control system, theoretical findings regarding the

conditions under which soil moisture dynamics can be controlled over time are presented. The quantitative findings supported the theoretical benefits. Thus, continuous controls predict the quantity of water that the soil will receive, as well as temperature and evaporation data, to ensure that the plant has a more productive soil moisture.

Keywords: Closed-loop control, model predictive control, irrigation techniques, smart agriculture, controllability.

1. Giriş

Akıllı sulama alanındaki son gelişmeler, su yönetimini iyileştirmek, mahsul verimliliğini artırmak ve sürdürülebilir tarım uygulamalarını teşvik etmek için ileri teknolojilerden ve veriye dayalı yaklaşımlardan yararlanmaya odaklanmıştır. Bu gelişmeler, geleneksel sulama sistemlerini su kullanımını en iyi eden, israfı azaltan ve bitkiler için hassas sulama sağlayan akıllı ve otomatik sistemlere dönüştürdü [1], [2].

Nesnelere internetinin (Nİ) tarım ile bütünleşmesi, akıllı sulamanın evriminde önemli bir rol oynamıştır. Çiftçiler, sulama denetleyicilerini internete bağlayarak sulama sistemlerini gerçek zamanlı olarak uzaktan izleyebilir ve kontrol edebilir [1]. Bu bağlantı, toprak nem seviyeleri, hava koşulları ve bitki sağlığı hakkında değerli verilerin toplanmasını sağlar ve çiftçilerin bilinçli kararlar almasına ve sulama programlarını buna göre ayarlamasına olanak tanır.

Akıllı sulama sistemlerine makine öğrenimi ve yapay zekâ (YZ) teknikleri de uygulanmaktadır. YZ algoritmaları, büyük veri kümelerini analiz ederek bazı kalıpları belirleyebilir, su gereksinimlerini tahmin edebilir ve ürün türü, toprak koşulları ve hava durumu tahminleri gibi faktörlere dayalı olarak sulama programlarını eniyileyebilir [2]. Bu akıllı sistemler, çiftçilerin su israfını en aza indirmesine, aşırı veya yetersiz sulamayı önlemesine ve mahsul verimini en üst düzeye çıkarmasına yardımcı olur.

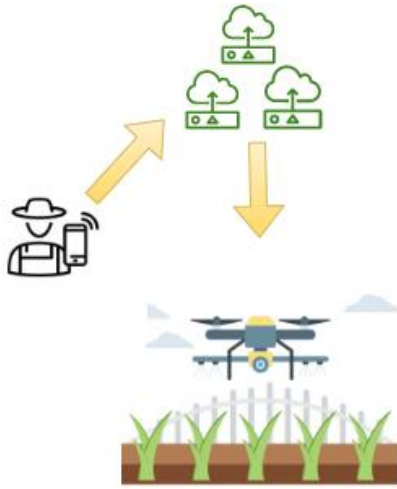
Akıllı sulamada damla sulama ve mikro sulama gibi hassas sulama teknikleri ön plana çıkmıştır [3]. Bu yöntemler suyu doğrudan bitki köklerine ileterek buharlaşma nedeniyle su kaybını azaltır ve verimli su dağılımı sağlar. Akıllı sulama

sistemleri, her bitkinin doğru zamanda doğru miktarda su almasını sağlayarak bu teknikleri hassas bir şekilde kontrol edebilir.

Uydu görüntüleri ve uzaktan algılama teknolojileri de akıllı sulama ile bütünleşmiştir. Bu teknolojiler, bitki sağlığı, su stresi ve mahsulün su gereksinimleri hakkında değerli bilgiler sağlar. Çiftçiler, uydu görüntülerini analiz ederek su stresi olan alanları belirleyebilir, geniş tarlalarda sulamayı eniyilebilir ve sulama sistemi verimsizliklerini tespit edebilir [4].

Ayrıca, akıllı sulama sistemlerinin mahsul ve çiftlik yönetimi yazılımıyla bütünleşmesi, çiftçilerin sulama programlarını diğer tarımsal faaliyetlerle senkronize etmelerine olanak tanır. Bu uyum, genel çiftlik operasyonlarını ve kaynak tahsisini en uygun hale getirerek sulama, gübreleme, haşere kontrolü ve hasat arasında daha verimli bir koordinasyon oluşturur [5].

Mobil uygulamalar, çiftçilerin akıllı sulama sistemlerini akıllı telefonlarından veya tabletlerinden izlemesi ve kontrol etmesi için uygun araçlar olarak ortaya çıkmıştır [6]. Bu uygulamalar, gerçek zamanlı veri görselleştirmesi sağlar, hareket halindeyken sulama ayarlamalarına olanak tanır ve sistem performansıyla ilgili bildirimler ve uyarılar sunar. Şekil 1'de verildiği gibi çiftçiler mobil uygulama ve alıcılar vasıtasıyla akıllı sulama işlemini gerçekleştirmektedir.



Şekil 1: Çiftçilerin mobil cihazlar yardımı ile akıllı sulama yöntemini insansız hava araçları ve alıcılar ile hayata geçirmesi.

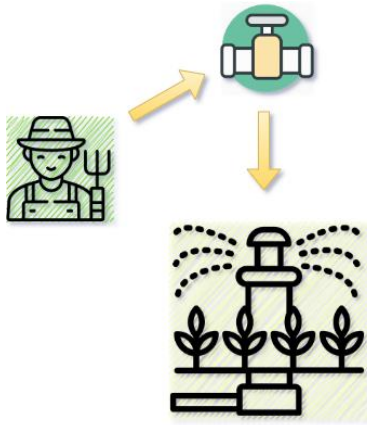
Genel olarak, akıllı sulamadaki son gelişmeler, Nİ bağlantısı, YZ algoritmaları, hassas sulama teknikleri, uzaktan algılama ve verileri birleştirerek tarımsal su yönetiminde devrim yarattı [7]. Bu ilerlemeler, su verimliliğini iyileştirme, mahsul verimini artırma ve artan su kıtlığı ve çevresel zorluklar karşısında sürdürülebilir tarım uygulamalarına katkıda bulunma potansiyeline sahiptir [8].

Akıllı sulama sistemleri, su kullanımını eniyilemek ve verimli sulama sağlamak için çeşitli kontrol stratejileri kullanır. Akıllı sulama sistemleri için yaygın olarak kullanılan bazı sulama kontrol stratejileri şunlardır [9], [10], [11], [12]:

- *Hava durumuna dayalı sulama planlaması:* Bu strateji, sıcaklık, nem ve yağış oranları dâhil olmak üzere gerçek zamanlı hava durumu verilerine dayalı olarak sulama programlarını ayarlar. Sistem bu faktörleri göz önünde bulundurarak uygun sulama süresini ve sıklığını belirleyerek bitkilerin yeterli su almasını sağlarken aşırı sulamadan kaçınır.
- *Toprak nemine dayalı sulama:* Topraktaki nem içeriğini ölçmek için toprak nem alıcıları kullanılır. Bu ölçümlere dayanarak, sulama sistemi ne zaman ve ne kadar su uygulanacağını belirleyebilir. Alıcılar, sulamanın yalnızca toprak nem seviyesinin belirli bir eşiğin altına düştüğünde yapılmasını sağlayarak aşırı sulamanın önlenmesine yardımcı olur.
- *Bitki tabanlı sulama planlaması:* Bu strateji, farklı bitki türlerinin çok özel su gereksinimlerini dikkate alır. Sistem, bitkiye özgü verileri kullanarak, her bitki türünün ihtiyaçlarını karşılamak için sulama programlarını ve sürelerini uyarlayabilir. Bu yaklaşım, bitkilerin bireysel özelliklerine göre en elverişli miktarda su almasını sağlar.
- *Bölgeye özel sulama planlaması:* Akıllı sulama sistemleri, bitki türleri, toprak türleri, güneşe maruz kalma ve su gereksinimleri gibi faktörlere dayalı olarak peyzajı farklı bölgelere ayırabilir. Sistem, benzer özelliklere sahip alanları gruplandırarak, farklı bölgelerde fazla veya az sulamanın önüne geçer ve daha hassas sulama sağlayabilir.
- *Yağmur suyu hasadı ve kullanımı:* Akıllı sulama sistemleri, yağmur suyunu daha sonra sulamada kullanmak üzere toplamak ve depolamak için yağmur suyu toplama tekniklerini içerebilir. Bu, tatlı su kaynaklarına olan bağımlılığı azaltır ve sürdürülebilir su yönetimini destekler. Sistem, diğer su kaynaklarına girmeden önce toplanan yağmur suyunun kullanımına da öncelik verebilir.
- *Kaçak tespiti ve izleme:* Akıllı sulama sistemleri, sulama sistemindeki herhangi bir sızıntıyı veya arızayı tespit etmek için genellikle kaçak tespit alıcıları veya akış ölçerler içerir. Sızıntıları hemen tespit ederek su israfını en aza indirilebilir ve sistem verimliliğini iyileştirebilir.
- *Uzaktan izleme ve kontrol:* Çiftçiler, akıllı sulama sistemlerine web tabanlı ara yüzler veya mobil uygulamalar aracılığıyla uzaktan erişilebilir ve kontrol edilebilir. Bu yöntem, kullanıcıların sulama programlarını izlemesine ve ayarlamasına, ve sistem performansı hakkında bildirimler almasına olanak tanıyarak sulamanın daha rahat ve verimli bir şekilde yönetilebilmesini sağlar.

Yukarıda bahsedilen yöntemler, akıllı sulama sistemlerinde kullanılan kapalı döngü sulama kontrol yapılarından bazılarıdır. Bunun dışında, genellikle küçük ölçekli tarım işletmelerinde, peyzaj ve bahçelerde kullanılan açık döngü sulama kontrol yapıları, temel ve uygun maliyetli bir sulama yönetimi olarak çeşitli alanlarda karşımıza çıkmaktadır [13]. Şekil 2'de gösterildiği gibi çiftçilerin rahatlıkla günümüzde uyguladığı zamana dayalı fiskeye düzeneği, açık döngü kontrol yapılarına bir örnek teşkil etmektedir. Genel olarak, açık döngü sulama kontrol sistemlerinin kontrol edilebilirliği, kapalı devre veya akıllı sulama sistemlerine kıyasla nispeten sınırlıdır. Açık döngü sulama kontrol sistemleri belirlenmiş programlara veya

sabit zaman aralıklarına göre çalıştığı için program ayarlandıktan sonra, sistem herhangi bir gerçek zamanlı ayarlama yapmadan onu takip eder ve sadece sistemin belirli zamanlarda açılıp kapanmasıyla sınırlı kalır. Burada sistemin kontrol edilebilirliği kapalı döngü kontrol sistemlerine göre daha rahat olsa da daha gelişmiş kontrol yöntemlerinin hassasiyetinden ve uyarlanabilirliğinden yoksundur. Genel olarak, kapalı devre sulama kontrol sistemleri, açık devre sistemlere kıyasla daha yüksek düzeyde kontrol edilebilirlik ve uyarlanabilirlik sunar. Su kullanımını en uygun hale getirmek, ürün sağlığını iyileştirmek ve genel sulama verimliliğini artırmak için gerçek zamanlı veriler, geri bildirim mekanizmaları ve akıllı algoritmalar kullanılır.



Şekil 2: Çiftçilerin zamana dayalı fiskeye programı için kullandığı vanalar ile açık döngü kontrol sulama yöntemi.

Toprak nemi, karasal ekosistemin hayati bir bileşenidir ve akıllı tarımda çok önemli bir rol oynar. Toprak nemini etkin bir şekilde anlamak ve yönetmek, sürdürülebilir ve verimli tarım uygulamalarını destekleyen akıllı tarım tekniklerini uygulamak için çok önemlidir. Su, besin alımı, fotosentez ve terleme gibi çeşitli fizyolojik işlemler için gerekli olduğundan, toprak nem mevcudiyeti doğrudan bitki büyümesini etkiler. Yetersiz toprak nemi bitkilerde su stresine yol açarak mahsul veriminin düşmesine, düşük kaliteli ürünlere ve hatta mahsulün bozulmasına neden olabilir [14]. Öte yandan, aşırı toprak nemi su basmasına neden olabilir, kök gelişimini bozabilir ve bitki sağlığını olumsuz yönde etkileyen patojenlerin büyümesi için uygun koşullar yaratabilir [14].

Akıllı tarımda, toprak neminin doğru bir şekilde izlenmesi ve yönetimi, sulama uygulamalarını eniyilemek için çok önemlidir. Çiftçiler, farklı derinliklerdeki ve konumlardaki toprak nem seviyelerini ölçerek, ürünleri için gereken uygun su zamanlamasını ve miktarını belirleyebilir. Bu, suyu doğrudan bitki köklerine kontrollü bir şekilde ileten damla sulama veya yağmurlama sistemleri gibi hassas sulama tekniklerinin uygulanmasını sağlar [15]. Akıllı sulama sistemleri, sulama işlemlerini otomatikleştirmek ve verimli su kullanımını sağlamak, su israfını ve ilgili maliyetleri azaltmak için genellikle hava durumu tahminleri ve bitki su gereksinimleriyle birlikte toprak nem verilerini kullanır.

Ayrıca toprak nemi izleme, çiftçilerin eşit olmayan su dağılımı veya sulama sistemlerindeki sızıntılar gibi sulama

verimsizliklerini belirlemesine ve ele almasına yardımcı olabilir [15]. Yüksek veya düşük toprak nemi seviyelerine sahip alanların tespit edilmesiyle, sulama uygulamalarında ayarlamalar yapılabilir, bu da su kullanım verimliliğinin ve mahsul performansının olumlu yönde artmasına yol açar.

Sulama yönetimine ek olarak, gübre uygulamasını eniyilemek için toprak nem verileri değerlidir. Toprak nem içeriği, bitkilerin besin mevcudiyetini ve alımını etkiler. Çiftçiler, toprak nem koşullarını anlayarak, besinlerin bitkiler için en çok ihtiyaç duydukları anda mevcut olmasını zamanlayabilir ve hedefleyebilir. Bu yaklaşım, sızıntı ve akış yoluyla besin kaybını azaltır, çevresel etkileri en aza indirir ve gübrelerin verimli kullanımını en üst düzeye çıkarır. Ayrıca, toprak nem bilgisi, ürün seçimi, dikim programları ve hasare yönetimi ile ilgili karar verme süreçlerinde etkilidir [16]. Farklı mahsullerin değişen su gereksinimleri ve toprak nem seviyeleri bilgisi, çiftçilerin kendi tarlaları için daha uygun mahsuller seçmelerine yardımcı olabilir. Böylece, çiftçiler dikim programlarını daha elverişli ve uyumlu hale getirerek çimlenmeyi, yerleşmeyi ve genel mahsul gelişimini olumlu yönde destekleyebilir.

Öngörülü kontrol modeli, belirli bir zaman diliminde en elverişli kararlar almak için matematiksel modelleri, optimizasyon algoritmalarını ve gerçek zamanlı verileri kullanan bir kapalı döngü kontrol stratejisidir [17]. Bu model, toprak nemi yönetimi bağlamında çok sayıda fayda ve uygulama sağlar. Bu kontrol modelleri, toprak nem verilerini ve hava tahminlerini kullanarak, sulama programını daha verimli hale getirebilirler. Böylelikle, toprak-bitki-atmosfer sisteminin matematiksel bir modelini uyumlu duruma getirerek, istenen toprak nem seviyelerini korumak için gereken en elverişli zamanı ve su miktarını belirleyebilir. Bu yöntem, sulamanın yalnızca gerektiğinde yapılmasını sağlayarak su tasarrufu sağlar ve verimsiz sulama olasılığını en aza indirir [18].

Bu çalışmada biz, genel toprak nem dinamiği üzerine bir öngörülü kontrol modeli kuracağız ve oluşturulan yeni kontrol sisteminde kontrol edilebilirlik koşulu araştıracağız. Bu çalışmanın temel kazanımları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Kapalı döngü sulama kontrol modellerine girip yapılar, bazı kontrol yapıları incelenecektir.
- Zamana dayalı akıllı sulama sistemi ile bitki buharlaşması/terlemesi arasında bir kontrol bağlantısı kurulacaktır.
- Kurulan bu kontrol bağlantısına dayanarak, toprak nem dinamik denklemleri üzerinde öngörülü kontrol modeli sunulacaktır.
- Elde edilen yeni toprak nem dinamik sistemi üzerinde kontrol edilebilirlik problemi düşünülecektir.
- Topraktaki nemin zamana bağlı kontrol edilebilirliği bazı koşullar altında sağlanacaktır.
- Toprak nem modelinin kontrol edilebilirliği üç farklı senaryo çerçevesinde sayısal olarak araştırılacak ve sistemin kontrol edilebilirliği, üç farklı kontrol yapısı altında sayısal olarak elde edilecektir.

Bu çalışma ile kapalı döngü sulama kontrol yapılarının daha iyi anlaşılması ve toprak nem dinamiklerinde öngörülü kontrol modeli kullanılarak oluşturulabilecek kontrol edilebilirlik

kavramı, daha verimli su yönetimine, sürdürülebilir tarıma ve bilinçli çevresel kaynak yönetimi kararlarına katkıda bulunması amaçlanmıştır.

2. Kapalı Döngü Sulama Kontrol

Bu bölümde, kapalı döngü sulama kontrol modelinin tanımını ve işlevini geniş bir çerçeveden inceleyeceğiz. Ayrıca bu modelin akıllı sulama yöntemlerinde ne gibi kazanımlar ve kısıtlamalara yol açacağı bazı maddeler altında incelenecektir.

2.1. Tanım

Kapalı döngü sulama kontrolü, değişen çevre koşullarına ve mahsul ihtiyaçlarına göre sulamayı ayarlamak için gerçek zamanlı verileri ve geri bildirim mekanizmalarını kullanan bir sistemi ifade eder [19]. Bu yaklaşım, toprak nem seviyeleri, hava koşulları ve bitki su ihtiyaçları gibi faktörleri izlemek ve bunlara yanıt vermek için alıcıların, veri toplamanın ve kontrol mekanizmalarının kullanılmasını içerir. Toplanan veriler, kesin ve verimli su kullanımını sağlamak için sulama zamanlamasını, süresini ve miktarlarını sürekli olarak analiz etmek ve eniyilemek için kullanılır. Kapalı döngü sulama kontrolü, sulama uygulamalarını ekinlerin ve tarla koşullarının özel gereksinimlerine göre ayarlamayı ve bunun sonucunda daha iyi su yönetimi ve ekin sağlığı sağlamayı amaçlar.

2.2. Operasyon

Kapalı döngü sulama kontrolünün operasyonu, gerçek zamanlı veri toplama, işleme, analiz ve dinamik ayarlamalar, uyum, geribildirim ve izleme yöntemlerini içermektedir. Aşağıda, kapalı devre sulama kontrolünün nasıl çalıştığına dair adım adım bir genel bakış verilmiştir:

- **Veri Toplama:** İlk aşamada, toprak nemi, hava koşulları, mahsulün büyüme aşaması ve diğer ilgili faktörler hakkında gerçek zamanlı verileri toplamak için tarlalara alıcılar yerleştirilir.
- **Veri Analizi:** Toplanan veriler, gelişmiş algoritmalar ve karar alma modelleri kullanılarak sürekli olarak işlenir ve analiz edilir.
- **Geri Bildirim:** Veri analizi, toprak nem seviyeleri, hava koşulları ve mahsulün su ihtiyaçları dâhil olmak üzere tarlanın mevcut durumu hakkında geri bildirim sağlar. Bu geri bildirim, sulama kontrol sistemini bilgilendirmek ve karar vermeye rehberlik etmek için kullanılır.
- **Kontrol:** Veri analizinden elde edilen geri bildirimle dayalı bilgiler ışığında, bir kontrol mekanizması su uygulamasını en uygun hale getirmek için sulama parametrelerini ayarlar.
- **Dinamik Ayarlamalar:** Kapalı devre sulama sistemi, gerçek zamanlı geri bildirim ve sulama kontrol algoritmalarına dayalı olarak sulama programını, zamanlamasını ve uygulanan su miktarını dinamik olarak ayarlar.
- **Optimizasyon ve Uyum:** Sistem, su kullanımını eniyilemek ve değişen çevre koşullarına uyum sağlamak için sulama ayarlarını sürekli olarak değerlendirir ve iyileştirir.
- **Geri Bildirim Döngüsü:** Kapalı döngü sulama sistemi, sulama ayarlarının toprak nem seviyeleri, mahsul sağlığı ve genel sistem performansı üzerindeki etkilerini izleyerek sürekli bir geri bildirim döngüsü sürdürür.
- **İzleme ve Bakım:** Doğru veri toplama ve güvenilir çalışma ortamı sağlamak için kontrol mekanizmalarının ve genel

sistem performansının sürekli olarak izlenmesi alıcılar tarafından sağlanır.

Bu uygulamada, açık döngü sulama kontrol yapılarının aksine hassas ve ayarlanabilir su yönetimi sağlar. Böylelikle, su kullanımını eniyiler, ürün sağlığını ve üretkenliği artırır ve değişen çevre koşulları ve su kıtlığı karşısında sürdürülebilir tarım uygulamalarını destekler. Bu uygulama ile ilgili kazanımları ve sınırlamaları aşağıdaki bölümde inceleyeceğiz.

2.3. Kazanımlar ve Sınırlamalar

Kapalı döngü sulama kontrollerinin tarımda sağladığı avantajlar ve kısıtlamalar başlıca aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

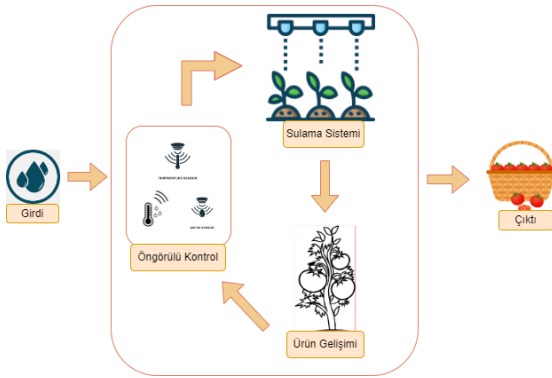
- **Kazanımlar:**
 1. **Su verimliliği:** Kapalı devre sistemler, sulamayı gerçek mahsulün ihtiyaçlarına ve gerçek zamanlı çevre koşullarına göre ayarlayarak su kullanımını eniyiler.
 2. **Hassasiyet:** Bu sistemler, suyu tam olarak ihtiyaç duyulan yere ulaştırarak su kaybını azaltır ve ürün sağlığını iyileştirir.
 3. **Uyum:** Kapalı devre sistemleri, değişen hava koşullarına, toprak nem seviyelerine ve bitki büyüme aşamalarına uyum sağlayabilir.
- **Sınırlamalar:**
 1. **Karmaşıklık ve maliyet:** Kapalı devre sistemleri, veri toplama altyapısı ve gelişmiş kontrol kurulumu gerektirir, bu da onları daha karmaşık ve uygulanması maliyetli hale getirir.
 2. **Bakım:** Kapalı devre sistemlerinin alıcıları ve kontrol mekanizmaları, doğru veri toplama ve güvenilir çalışma sağlamak için düzenli bakım ve ölçümleme gerektirir.
 3. **Teknik uzmanlık:** Kapalı devre sistemlerini tarıma uygulamak ve yönetmek, teknik uzmanlık ve eğitim gerektirebilir.

3. Kapalı Döngü Sulama Kontrol Modelleri

Bu bölümde, tarımda kullanılan bazı kapalı döngü kontrol yapıları incelenecek ve araştırılacaktır. Burada, kapalı döngü sulama kontrol modelleri, güncel hayatımızda çok sık karşımıza çıkan kapalı döngü öngörülü kontrol ve kapalı döngü akıllı kontrol modelleri olarak ayrı ayrı incelenecektir.

3.1. Kapalı Döngü Öngörülü Kontrol

Kapalı döngü tahmine dayalı sulama kontrolü, su uygulamasını öngörülen gelecekteki ihtiyaçlara göre eniyilemek için gerçek zamanlı verileri, tahmine dayalı modellemeyi ve geri bildirim mekanizmalarını kullanan gelişmiş bir sulama yöntemidir. Bu yaklaşımda, sulama sistemi sürekli olarak toprak nemi, hava koşulları, mahsulün büyüme aşaması ve diğer ilgili faktörler gibi parametreler hakkında veri toplar. Bu veriler daha sonra gelecekteki su gereksinimlerini tahmin etmek için tahmine dayalı modeller ve algoritmalar kullanılarak analiz edilir.



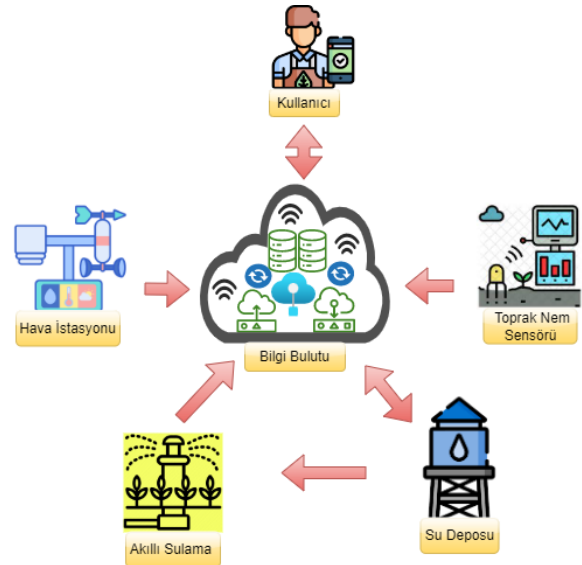
Şekil 3: Mahsulün büyüme aşamaları, toprak nemi, hava koşulları ve kullanılan su miktarı öngörülerek oluşturulan bir kapalı döngü sulama yöntemi.

Ek olarak, öngörülü kontrol modeli, sulama ve gübrelemeyi eniyilemek için toprak nem verilerini besin gereksinimleri bilgileriyle birleştirebilir. Şekil 3'de gösterildiği gibi toprak nemi, besin mevcudiyeti ve bitki emilimi arasındaki ilişkileri analiz ederek verimli su ve besin kullanımını sağlamak için en uygun sulama ve besin uygulama oranlarını belirleyebilir. Bu yöntem su sızıntısını önler, gübre israfını azaltır ve ürün verimini artırır. Sistem, bu tahminlere ve gerçek zamanlı geri bildirim dayalı olarak zamanlama, süre ve su miktarı gibi sulama parametrelerini dinamik olarak ayarlar. Bitkinin su ihtiyacını öngören bu kontrol yapısı, su kullanımını en uygun hale getirmeyi, israfı en aza indirmeyi ve mahsullerin ve çevrenin değişen ihtiyaçlarını karşılamak için hassas su uygulamasını sağlamayı amaçlar. Bu yöntem, uyarlanabilir sulama yönetimine izin verir ve gelişmiş su verimliliği, mahsul sağlığı ve genel üretkenliğe yol açabilir.

3.2. Kapalı Döngü Akıllı Kontrol

Kapalı döngü akıllı sulama kontrolü, dinamik çevre koşullarına ve mahsulün su ihtiyaçlarına dayalı olarak su uygulamasını eniyilemek için gerçek zamanlı verilerden, gelişmiş analitiklerden ve akıllı algoritmalarından yararlanan gelişmiş bir sulama yöntemidir. Bu yaklaşımda sulama sistemi, toprak nemi, hava koşulları, mahsulün büyüme aşaması ve diğer ilgili faktörler gibi parametreleri izleyen alıcılardan sürekli olarak veri toplar. Şekil 4'de gösterildiği gibi bitki için oluşturulacak sulama stratejisi, toplanan veriler, veri odaklı kararlar almak için makine öğrenimi, yapay zekâ veya diğer hesaplama tekniklerini içeren akıllı algoritmalar kullanılarak oluşturulur. Sistem, gerçek zamanlı veri analizi ve geri bildirim mekanizmalarına dayalı olarak zamanlama, süre ve su miktarı gibi sulama parametrelerini dinamik olarak ayarlar ve uygular.

Kapalı döngü akıllı sulama kontrolü, değişen koşullara akıllıca uyum sağlayarak su verimliliğini en üst düzeye çıkarır, su israfını en aza indirir ve mahsul sağlığını ve verimini en uygun hale getirir. Bu yöntem, sürdürülebilir sulama uygulamalarına ve iyileştirilmiş tarımsal üretkenliğe teşvik ederek hassas ve uyarlanabilir su yönetimi sağlar.



Şekil 4: Kapalı döngü akıllı kontroller vasıtasıyla toprak nemi ve hava koşullarından alınan güncel ve geleceğe dair veriler bilgi bulutunda depolanır ve akıllı algoritmalar ile bitkilere ne kadar su verileceği tespit edilip, akıllı sulama uygulanır.

4. Toprak Nem Dinamiğinde Kontrol Edilebilirlik

Bu bölümde, kontrol teorisi ve toprak nem dinamiği ile ilgili bazı temel bilgiler verilecek ve bu dinamik model üzerinde bir kapalı döngü öngörülü kontrol modeli sunulacaktır. Bu sunulacak olan yeni kontrol modeli ile oluşan kontrol sisteminde kontrol edilebilirlik analizi yapılacak ve bu kavramın zamana göre hangi koşullar altında sağlanacağı araştırılacaktır.

4.1. Kontrol Teorisi

Bu bölümde, esas olarak aşağıdaki kontrol modeline odaklanacağız:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + w(t) \quad (1)$$

Burada $w(t) \in [0, T]$ kapalı zaman aralığında tanımlı sürekli bir fonksiyon, $u(t)$ kontrol girdisi A ve B matrisleri ise sırasıyla $n \times n$ ve $n \times m$ boyutlu matrisler olarak $n \geq m$, düşüneceğiz. Öte yandan, yukarıdaki kontrol modeli (1), aşağıdaki kontrol sisteminin özel bir versiyonudur:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2)$$

Şimdi, (1) model için kontrol edilebilirlik kavramını tanımlayacağız [20]:

Tanım 1. (Kontrol Edilebilirlik): (1) sistemi, her T zamanı için kontrol edilebilirdir, eğer her verilen başlangıç zamanı ve vektörler için, $t_0 \in \mathbb{R}, x_0, x_f \in \mathbb{R}^n$, öyle bir kontrol $u(t): [t_0, T] \rightarrow \mathbb{R}^m$, bulunabilir ki (1) sisteminin çözümü, $x(0) = x_0$ ve $x(T) = x_f$ durumlarını sağlasın.

Kontrol teorisinde, (2) sistemi için kontrol edilebilirlik koşulu aşağıda Kalman koşulu olarak sunulmuştur [20]:

Teorem 1. (Kalman Koşulu): Doğrusal sistemin (2) kontrol edilebilir olma bilmesi için gerek ve yeter koşul

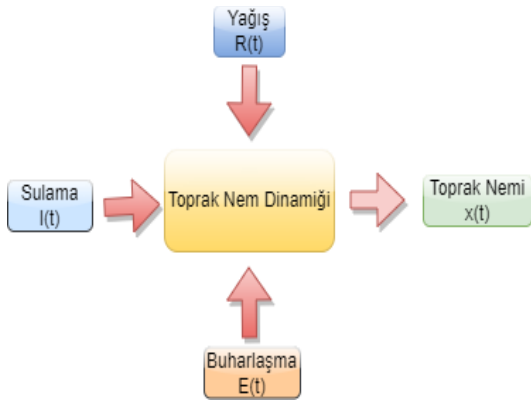
$$\text{rank}[B; AB; A^2B; \dots; A^{n-1}B] = n. \quad (3)$$

Benzer sonuç, (1) sistemi için aşağıdaki gibi geçerlidir [21]:

Teorem 2. Eğer Kalman koşulu doğrusal olmayan (1) sistemi için sağlanıyorsa ve $w(t)$ fonksiyonu $(0, T)$ zaman aralığında sürekli ve sınırlı ise, o zaman (1) sistemi kontrol edilebilirdir.

4.2. Toprak Nem Dinamiği

Toprak nem dinamiği, bitkiler için suyun mevcudiyetini, toprak sağlığını ve ekosistem işleyişini topluca etkileyen su sızma, buharlaşma ve bitki alımı süreçlerini kapsar. Çeşitli faktörler toprak nem dinamiklerini etkiler. Yağış, toprak nemini yenileyen birincil su kaynağıdır. Yağışın miktarı, yoğunluğu ve dağılımı, ilk nem içeriğini ve ardından toprak nem seviyelerindeki değişiklikleri etkiler. Güneş radyasyonu ve atmosferik koşullar tarafından yönlendirilen buharlaşma, toprak yüzeyinden su kaybına yol açar. Bitkilerin kökleri aracılığıyla suyu emdiği ve yaprakları aracılığıyla atmosfere saldırdığı süreç olan terleme de toprak nem dinamiklerini etkiler.



Şekil 5: Toprak nem dinamiğinde girdiler ve çıktılar.

Şekil 5'te gösterildiği gibi, sistemin toprak nem dinamiği aşağıda verilmiştir [11]:

$$\dot{x}(t) = R(t) + I(t) - \eta x(t) - E(t) \quad (4)$$

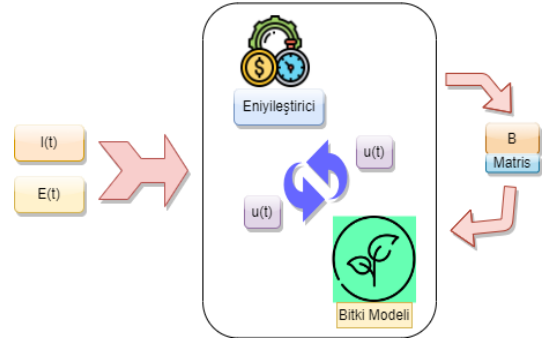
Burada, t zamanında $R(t)$, yağış miktarını $I(t)$, sağlanan su miktarını $E(t)$, bitki terlemesi (buharlaşma) su miktarını göstermektedir. Ek olarak η bir sabit değer olup derin sızma ve toprak nemi ile ilişkilendirilir.

4.3. Bir Kapalı Döngü Öngörülü Kontrol Modeli

Bu bölümde, (4) denklemini genel olarak, n boyutlu diferansiyel sistem olarak düşüneceğiz ve bu sistem için öngörülü kontrol modeli önereceğiz. Önerdiğimiz kontrol modeli toprağa giren sulama miktarını ve bitkinin buharlaşma/terlemede kaybettiği su miktarını alıcılar vasıtasıyla kontrol edecektir. Önerilen kontrol modelimiz aşağıdaki denklem sistemini sağlayacaktır:

$$I(t) - E(t) = Bu(t) \quad (5)$$

Burada, $I(t), E(t) \in \mathbb{R}^n$, ve B , belirlenecek olan sabit bir $n \times m$ matrisi ve $u(t) \in \mathbb{R}^m$ kontrol vektörü, $n \geq m$.



Şekil 6: B matrisini belirlemek için bitki modeline giren buharlaşma ve su miktarı, öngörülü kontrol vasıtası ile en iyileştirilmesi.

Şekil 6'da gösterildiği gibi, (5) sistemi için önceden öngörülecek olan öngörülü kontrol modeli $u(t)$, (5) sistemini en iyileştirecek ve bu en uygun kontrol çerçevesinde B matrisi oluşturulacaktır. Burada uygulanan strateji, öngörülü kontrol model yapısını kullanarak en uygun B matrisini, sistem için ortaya çıkartmaktır.

4.4. Kontrol Edilebilirlik

Burada, bir önceki bölümde oluşturulan öngörülü kontrol modelinde kontrol edilebilirlik problemini araştıracağız. Bunun için (4) ve (5) sistemlerini birleştirip bir arada sonlu boyutlu diferansiyel doğrusal olmayan kontrol sistemi olarak düşüneceğiz. Buradaki $R(t)$, zamana göre bitkinin aldığı yağış miktarı ve dolayısıyla belirsizlik barındırdığı için (4) sistemi doğrusal olmaz. Yalnız, $R(t)$ ifadesini sürekli bir fonksiyon olarak görebiliriz; yağışın yağdığı veya yağmadığı zamanlarda fonksiyonun zamana göre hareketini kırılmadan ya da kırılma yapmadan sürekli bir şekilde düşünmek mümkündür. Bu çerçevede, (4) ve (5) sistemleri bize aşağıdaki doğrusal olmayan kontrol modelini verecektir:

$$\dot{x}(t) = \tilde{A}x(t) + \tilde{B}u(t) + \tilde{w}(t) \quad (6)$$

Burada \tilde{A} , derin sızma ve toprak nemi ile ilişkilendirilen katsayı değerlerine sahip $n \times n$ köşegen matris, \tilde{B} öngörülü kontrol modelinde oluşturulan $n \times m$ kontrol matrisi, $\tilde{w}(t)$, yağış miktarı $R(t)$ ve son olarak $x(t)$, t zamanındaki toprak nem miktarını göstermektedir.

Burada, $\tilde{w}(t)$, fonksiyonu, verilen her zaman aralığı için sürekli ve sınırlıdır. Dolayısıyla, Teorem 2 kullanarak, bu çalışmada aşağıdaki kontrol edilebilirlik koşulu, sonuç olarak elde edilmiştir:

Teorem 3. Verilen her $T > 0$ zamanı için eğer Kalman koşulu, doğrusal olmayan (6) sisteminde sağlanıyorsa, o zaman (6) sistemi $t = T$ zamanı için kontrol edilebilirdir.

Dolayısıyla, yukarıda elde ettiğimiz sonuçtan yola çıkarak, (6) sisteminde verilen toprak nem dinamiği her zaman dilimi için kontrol edilebilirdir eğer aşağıdaki Kalman koşulu sağlanırsa:

$$\text{rank}[\tilde{B}; \tilde{A}\tilde{B}; \tilde{A}^2\tilde{B}; \dots; \tilde{A}^{n-1}\tilde{B}] = n.$$

Sonuç olarak, kapalı döngü öngörülü kontrol modeli kullanılarak elde edilen bu yeni toprak nem modeli için kontrol edilebilirlik durumu elde edilmiştir.

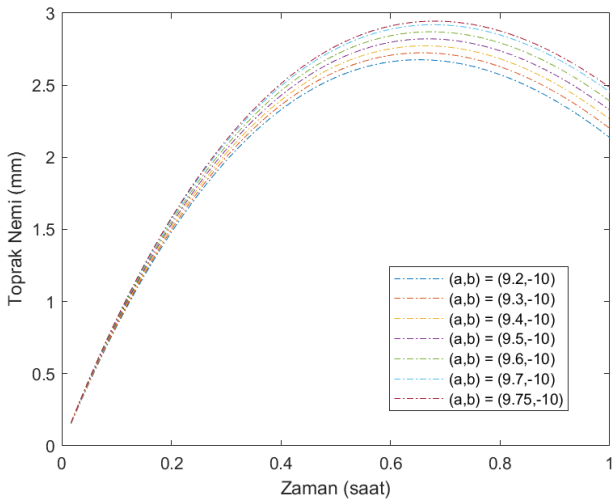
5. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde (6) modeli için kontrol edilebilirlik durumunu $n = 1$ için sayısal olarak analiz edeceğiz. Burada kullanacağımız ayrık zaman dilimi 1 saniye olarak alıp, toprağın alacağı yağış miktarı $\tilde{w}(t) = 0.1 \text{ mm}$ olarak düşüneceğiz. Bunun dışında, kontrol matrisi ve parametresini, $\tilde{B}u(t) = a + bt$, $a, b \in \mathbb{R}$ doğrusal kontrol yapısı olarak düşünülecektir. Bunun dışında, derin sızma katsayısı değeri $\eta = 1$ olarak alacağız ve toprak nemini derinlik kapasitesi olarak milimetre (mm) cinsinden (6) modelini kullanarak hesaplayacağız. Dolayısıyla, $\tilde{A} = -1$, olarak bu modelde düşünülecektir. Problemimiz bir boyutlu olduğu için Kalman koşulu, $\tilde{B}u(t) = a + bt$ kontrol modeli bazı $a, b \in \mathbb{R}$ değerleri için sağlanacaktır.

Aşağıdaki bölümlerde, (6) modeli için sayısal olarak üç farklı kontrol edilebilirlik problemi araştırılacaktır. Araştırılacak her problem için sistemi kontrol edilebilir yapan kontrol yapısı sayısal olarak hesaplanacaktır.

5.1. Birinci Sayısal Senaryo: $a > 0$ ve $b < 0$

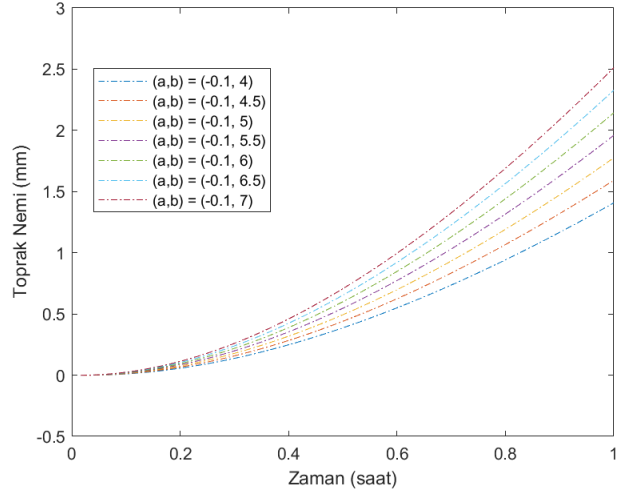
Bu kısımda araştıracağımız sayısal problem şöyledir: verilen başlangıç durumu $x(0) = 0.15 \text{ mm}$, için öyle $a > 0$ ve $b < 0$ var ki, (6) sisteminin çözümü $x(1) = 2.5 \text{ mm}$, durumunu sağlasın. Başka bir deyişle, öyle kontrol parametreleri, $a, b \in \mathbb{R}$, bulmalıyız ki, 1 saat içinde toprak nem değeri derinlik cinsinden 2.5 mm olsun ve $a > 0$, $b < 0$, durumları sağlansın. Bu problemde, MATLAB R2021b sürümünü kullanarak Şekil 7'de, sistemin kontrol edilebilir olabilmesi için $a = 9.75$ ve $b = -10$ olması gerekmektedir. Yani, $x(1) = 2.5 \text{ mm}$ değerini yakalamak için sayısal olarak elde edilen kontrol modeli $\tilde{B}u(t) = 9.75 - 10t$ olacaktır.



Şekil 7: Yedi sayısal sonuç üzerinden (6) sistemi, $\tilde{B}u(t) = 9.75 - 10t$, kontrolü altında $x(1) = 2.5 \text{ mm}$ değerine ulaşmaktadır.

5.2. İkinci Sayısal Senaryo: $a < 0$ ve $b > 0$

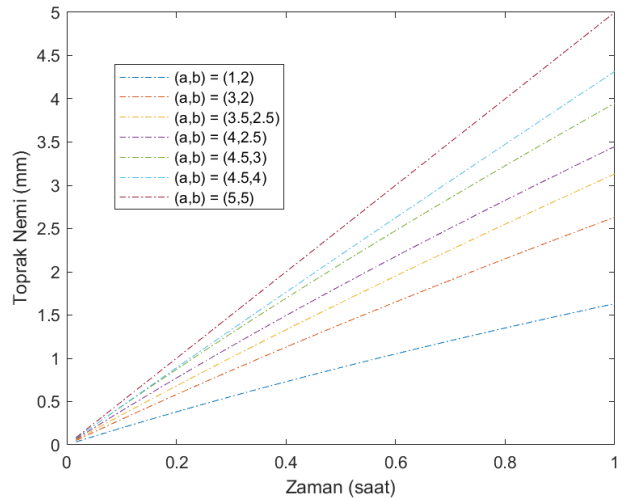
İkinci senaryo olarak araştıracağımız sayısal problem şu şekildedir: verilen başlangıç durumu $x(0) = 0.02 \text{ mm}$, için öyle $a < 0$ ve $b > 0$ parametreleri var ki, (6) sisteminin çözümü $x(1) = 2.5 \text{ mm}$, durumunu sağlasın. Burada, MATLAB R2021b sürümünü kullanarak Şekil 8'de, sistemin kontrol edilebilir olabilmesi için $a = -0.1$ ve $b = 7$ olması gerekmektedir. Yani, $x(1) = 2.5 \text{ mm}$ değerini yakalamak için sayısal olarak elde edilen kontrol modeli $\tilde{B}u(t) = -0.1 + 7t$ olacaktır.



Şekil 8: Yedi sayısal sonuç üzerinden (6) sistemi, $\tilde{B}u(t) = -0.1 + 7t$, kontrolü altında $x(1) = 2.5 \text{ mm}$ değerine ulaşmaktadır.

5.3. Üçüncü Sayısal Senaryo: $a > 0$ ve $b > 0$

Son senaryo için araştıracağımız sayısal problem şu şekildedir: verilen $x(0) = 0.08 \text{ mm}$, için öyle $a, b \in \mathbb{R}$ var ki $a > 0$ ve $b > 0$ koşulları sağlansın ve (6) sisteminin çözümü $x(1) = 5 \text{ mm}$, koşulunu gerçekleştirsin. Şekil 9'de gösterildiği gibi, son koşul olan $x(1) = 5 \text{ mm}$ tam olarak $a = 5$ ve $b = 5$ durumu altında elde edilecek ve dolayısıyla sistemin kontrol edilebilirliğini sağlayan kontrol modeli $\tilde{B}u(t) = 5 + 5t$ olacaktır.



Şekil 9: Yedi sayısal sonuç üzerinden (6) sistemi, $\tilde{B}u(t) = 5 + 5t$, kontrolü altında $x(1) = 5$ mm değerine ulaşmaktadır.

6. Sonuçlar

Özet olarak, öngörmeye dayalı kontrol teknikleri, tarımsal üretkenliği artırma, sulama stratejilerini en uygun hale getirme ve su kaynaklarını koruma açısından önemli avantajlar sağlar. Çiftçiler, tahmine dayalı modelleri ve hava durumu tahminleri ve toprak alıcı okumaları gibi gerçek zamanlı verileri birleştirerek sulamanın zamanlaması, süresi ve miktarı hakkında bilinçli yargılarda bulunabilirler. Öngörülmesi kontrol ile toprak nem yönetimi, kontrol edilebilirlik kavramını gerektirebilir. İhtiyaçları karşılamak ve toprak nemini yönetebilmek için doğru tahmin modelleri ve güvenilir çalıştırma sistemleri, kontrol edilebilirliği iyileştirerek hassas toprak nem içeriği kontrolüne olanak tanır. Bu çalışmada biz, bu araştırma yönüne teorik bir bakış açısı ile pencere açtık ve topraktaki nemin zamana bağlı kontrol edilebilirliği koşulunu, öngörülmesi kontrol modeli yardımı ile elde etmiş olduk. Sayısal sonuçlar teorik bulguları doğrulamış ve toprak nem dinamiklerinin zamana göre sürekli ve öngörülmesi kontroller ile değiştirilebileceği tespit edilmiştir. Sunulan bu model ile, toprağın alacağı su miktarı, sıcaklık ve buharlaşma verileri kontrol edilerek bitkinin daha verimli bir toprak nemine sahip olması sağlanmıştır.

Gelecekteki araştırma yönleri olarak, toprak neminin kontrol edilebilirliğini artırmaya yönelik çalışmalara odaklanılabilir. Bu, tahmine dayalı kontrol sinyallerine yanıt verebilen ve sulamayı gerçek zamanlı olarak değiştirebilen akıllı sulama denetleyicileri ve otomatik vanalar gibi güvenilir ve verimli çalıştırma sistemlerinin kullanılması sağlayabilir. Bunun dışında, hassas tarım ve otonom sulama sistemleri gibi diğer tarım sistemleriyle bütünleşme, topraktaki nemin kontrol edilebilirliğini daha da iyileştirebilir ve böylelikle gelecek çalışmalara ışık tutabilir.

7. Kaynaklar

- [1] Obaideen, K., Yousef, B.A., AlMallahi, M.N., Tan, Y.C., Mahmoud, M., Jaber, H. ve Ramadan, M. "An overview of smart irrigation systems using IoT", *Energy Nexus*, 100124, 2022.
- [2] Vallejo-Gómez, D., Osorio, M. ve Hincapié, C.A., "Smart Irrigation Systems in Agriculture: A Systematic Review", *Agronomy*, 13(2), 342, 2023.
- [3] Jiménez, A.F., Cárdenas, P.F. ve Jiménez, F., "Smart water management approach for resource allocation in High-Scale irrigation systems", *Agricultural Water Management*, 256, 107088, 2021.
- [4] Ahansal, Y., Bouziani, M., Yaagoubi, R. Sebari, I. Sebari, K. ve Kenny, L., "Towards smart irrigation: A literature review on the use of geospatial technologies and machine learning in the management of water resources in arboriculture", *Agronomy*, 12(2), 297, 2022.
- [5] Khan, A.I., Alsolami, F., Alqurashi, F., Abushark, Y.B. ve Sarker, I.H., "Novel energy management scheme in IoT enabled smart irrigation system using optimized intelligence methods", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114, 104996, 2022.
- [6] Guntur, J., Raju, S.S., Jayadeepthi, K. ve Sravani, C.H., "An automatic irrigation system using IOT devices", *Materials Today: Proceedings*, 68, 2233-2238, 2022.
- [7] García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., ve Lorenz, P., "IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture", *Sensors*, 20(4), 1042, 2020.
- [8] Taştan, M., "Nesnelerin İnterneti Tabanlı Akıllı Sulama ve Uzaktan İzleme Sistemi", *Avrupa Bilim ve Teknoloji*, (15), 229-236, 2019.
- [9] Romero, R., Muriel, J. L., García, I., ve de la Peña, D. M., "Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results", *Agricultural water management*, 114, 59-66, 2012.
- [10] Ahmet, U., "Akıllı Kentler ve Su Kullanımı", *Medeniyet Araştırmaları Dergisi*, 7(1), 1-14, 2022.
- [11] Bwambale, E., Abagale, F.K. ve Anornu, G.K., "Data-driven model predictive control for precision irrigation management", *Smart Agricultural Technology*, 100074, 2022.
- [12] Bwambale, E., Abagale, F.K. ve Anornu, G.K., "Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review", *Agricultural Water Management*, 260, 107324, 2022.
- [13] Kantaroğlu, Ö., "Yüksek Performanslı Binalarda Su Stratejileri", *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 123, 32-43, 2011.
- [14] Kanber, R., Çullu, M. A., Kendirli, B., Antepli, S. ve Yılmaz, N., "Sulama, drenaj ve tuzluluk", *Türkiye Ziraat Mühendisliği VI. Teknik Kongresi*, 3(7), 213-251, 2005.
- [15] Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S. ve Norton, T., "Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation", *Sustainability*, 9(3), 353, 2017.
- [16] Tantalaki, N., Souravlas, S. ve Roumeliotis, M., "Data-driven decision making in precision agriculture: The rise of big data in agricultural systems", *Journal of Agricultural & Food Information*, 20(4), 344-380, 2019.
- [17] Ding, Y., Wang, L., Li, Y. ve Li, D., "Model predictive control and its application in agriculture: A review", *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 104-117, 2018.
- [18] Cáceres, G., Millán, P., Pereira, M. ve Lozano, D., "Smart farm irrigation: Model predictive control for economic optimal irrigation in agriculture", *Agronomy*, 11(9), 1810, 2021.
- [19] Nahar, J., Liu, S., Mao, Y., Liu, J. ve Shah, S. L., "Closed-loop scheduling and control for precision irrigation", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(26), 11485-11497, 2019.
- [20] Sontag, E.D., *Mathematical control theory: deterministic finite dimensional systems*, 6, Springer, 2013.
- [21] Lukes, D., "Global controllability of nonlinear systems", *SIAM Journal on Control*, 10(1), 112-126, 1972.

Özgeçmiş



Ali Hamidoğlu, Bođaziçi Üniversitesi (BOUN) Matematik Bölümü'nden lisans ve yüksek lisans derecelerini, Orta Dođu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Matematik Bölümü'nden ise doktora derecesini sırasıyla 2010, 2013 ve 2020 yıllarında aldı. Doktora tez döneminde, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Matematik Bölümü'nde, 2018-2020 yılları arası araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2022 yılından günümüze, Bahçeşehir Üniversitesi Matematik Bölümü'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır. Başlıca araştırma alanları: Kontrol teorisi ve uygulamaları; Sistem modelleme; Optimal kontrol; Optimizasyon; Oyun teorisi. Akademi dışında, 2009 yılından günümüze birçok okul ve devlet kurumlarında (TÜBİTAK dahil) ilkokul, ortaokul ve lise öğrencilerine ve öğretmenlere matematik olimpiyat eğitimi vermiş olup, öğrencileri çeşitli ulusal ve uluslararası matematik olimpiyatlarına hazırlamıştır.