

# Akıllı Tarımda Dayanıkl Kontrol Stratejileriyle Toprak Nem Dinamiği Yönetimi

## Soil Moisture Dynamics Management with Robust Control Strategies in Smart Agriculture

 Gökhan Göksu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Matematik Mühendisliği Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
gokhan.goksu@yildiz.edu.tr

### Özet

Akıllı tarımda dayanıklı kontrol stratejileri, toprak nem dinamiği yönetimi için etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Bu stratejiler sayesinde tarım alanlarında su kaynakları daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılır. Dayanıkl kontrol stratejileri, toprak nem dinamiğinin izlenmesi, analizi ve gerektiğinde sulama veya drenaj sistemlerinin otomatik olarak ayarlanması gibi işlevleri yerine getirebilir. Bu yaklaşım, su kullanım verimliliğinin artırılmasıyla tarımsal üretimde sürdürülebilirliğin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Bu çalışmada, durum geri beslemeli bir dayanıklı kontrol stratejisi, toprak nem dinamiği üzerinde uygulanmıştır. Toprak nem dinamiği sistemi içerisinde yağış miktarı, sulama/drenaj mekanizması, derin sızma ve toprağın buharlaşma düzeyleri gibi faktörlerin karmaşık etkileşimleri göz önünde bulundurularak, topraktaki nem seviyesi belirli bir kritik düzeyde tutan dayanıklı bir kontrol yaklaşımı benimsenmiştir. Ayrıca, bu yaklaşımın etkinliği, bir sayısal örnek üzerinden gösterilmektedir.

Anahtar kelimeler: Dayanıkl kontrol sistemleri, kapalı çevrim kontrol sistemleri, toprak nem dinamiği, akıllı tarım.

### Abstract

Robust control strategies in smart agriculture offer an effective approach for managing soil moisture dynamics. Through these strategies, water resources in agricultural fields are utilized more efficiently and effectively. These robust control strategies can be a function for monitoring and analyzing soil moisture dynamics, as well as automatically adjusting irrigation or drainage systems when necessary. This approach contributes to enhance water usage efficiency, thereby ensuring sustainability in agricultural production. In this study, a robust state feedback control approach applicable to smart agriculture has been developed, focusing on soil moisture dynamics. Within the soil moisture dynamics system, considering complex interactions among factors such as precipitation levels, irrigation/drainage mechanisms, deep percolation, and soil evaporation rates, a robust control

approach is adopted to maintain soil moisture levels at a specific critical threshold. In addition, the effectiveness of this approach is demonstrated through a numerical example.

Keywords: Robust control systems, Closed-loop control systems, soil irrigation dynamics, smart agriculture.

### 1. Giriş

Dünya nüfusu hızla artarken, tatlı su kaynaklarının kısıtlı olması ve kuraklık sorunlarının yaygınlaşması, tarımsal üretimi tehdit eden önemli faktörler haline gelmiştir. Bu durum, su kaynaklarının verimli kullanımı ve tarımın sürdürülebilirliği için yenilikçi çözümler bulma ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Akıllı tarım, tarımsal üretimi optimize etmek, su kullanımını en verimli şekilde gerçekleştirmek ve tarımın sürdürülebilirliğini sağlamak için teknolojinin gücünden yararlanan bir yaklaşımdır [1], [2].

Akıllı tarım, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini artırmak ve verimliliği maksimize etmek amacıyla gelişmiş teknikler ve teknolojilerin kullanıldığı bir yaklaşımdır. Bu alanda bir dizi yenilikçi yöntem ve araçlar geliştirilmiş ve tarım sektöründe yaygın olarak benimsenmiştir.

- **Sensör Teknolojileri [3], [4]:** Akıllı tarım uygulamalarında sensör teknolojileri önemli bir rol oynamaktadır. Toprak nem sensörleri, bitki sağlık sensörleri, hava durumu sensörleri gibi çeşitli sensörler kullanarak tarım alanlarındaki çeşitli parametrelerin izlenmesi mümkün hale gelmiştir. Bu sensörler, toprak nem düzeyleri, bitki büyümesi, hava sıcaklığı, nem ve rüzgar gibi verileri gerçek zamanlı olarak toplar ve analiz eder.
- **Büyük Veri Analitiği [5]:** Büyük veri analitiği, akıllı tarımın önemli bir bileşenidir. Sensörlerden toplanan veriler, bulut tabanlı analitik platformlarında işlenerek tarım alanlarındaki eğilimler, desenler ve tahminler elde edilir. Bu veri analitiği, çiftçilere tarım kararlarında rehberlik

etmek, sulama planlaması yapmak, drenaj önerileri vermek, hastalıkları erken teşhis etmek ve verimliliği artırmak gibi birçok fayda sağlar.

- **Otomasyon ve Kontrol Sistemleri [6], [7]:** Akıllı tarım uygulamalarında otomasyon ve kontrol sistemleri kullanılarak tarım süreçleri optimize edilir. Sulama sistemlerinde otomatik sulama ve drenaj, hassas tarım makinelerinde otomatik navigasyon, gübreleme sistemlerinde otomatik dozajlama gibi otomasyon uygulamaları sayesinde tarım işlemleri daha etkin bir şekilde gerçekleştirilir.
- **Nesnelerin İnterneti (İng: Internet of Things, IoT) [8-11]:** IoT, tarım sektöründe akıllı tarım uygulamalarının temelini oluşturan bir teknoloji alanıdır. Tarım araçları, sensörler ve diğer cihazlar arasında iletişim ve veri paylaşımı sağlayarak, tarım operasyonlarının daha verimli ve veri odaklı hale gelmesini sağlar.
- **Yapay Zeka (YZ) ve Makine Öğrenimi (MÖ) [12], [13]:** Yapay zeka ve makine öğrenimi teknikleri, tarım verilerinin analizi ve işlenmesinde kullanılarak tarım kararlarının daha akıllı ve hızlı bir şekilde alınmasını sağlar. Bitki hastalıklarının tanınması, tarım verimliliğinin tahmini, optimum hasat zamanının belirlenmesi gibi alanlarda YZ ve MÖ teknikleri büyük bir potansiyele sahiptir.

Akıllı tarımda, su kaynaklarının verimli kullanılması ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliği için gelişmiş sulama teknikleri ve teknolojileri kullanılmaktadır. Bu teknikler ve teknolojiler, tarım sulamasının optimize edilmesi ve su kaynaklarının etkin kullanımının sağlanması konusunda önemli gelişmelere işaret etmektedir. Bu teknikler ve teknolojiler hakkında yapılan güncel araştırma konuları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- **Hassas Sulama [14]:** Hassas sulama teknikleri, bitki su ihtiyacını doğru bir şekilde belirleyerek suyun verimli kullanımını sağlar. Toprak nem sensörleri ve hava durumu verileri gibi sensörler kullanılarak bitkilerin su ihtiyacı sürekli olarak izlenir ve bu verilere dayanarak sulama miktarı ve zamanlaması ayarlanır. Bu sayede su israfı önlenir ve bitkilerin su gereksinimleri optimum düzeyde karşılanır.
- **Yağmurlama Sulama Sistemleri [15]:** Yağmurlama sulama sistemleri, suyun bitkilere yağmur damlası şeklinde dağıtıldığı bir sulama yöntemidir. Bu sistemler, tarım alanlarının üzerine yerleştirilen sprinkler veya yağmurlama başlıkları aracılığıyla suyun eşit bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Akıllı tarım uygulamalarında, yağmurlama sulama sistemleri sensörler ve otomatik kontrol mekanizmalarıyla entegre edilerek su kullanımı optimize edilir.
- **Damla Sulama Sistemleri [16]:** Damla sulama sistemleri, bitkilere doğrudan su vermek için kullanılan bir yöntemdir. Bitkilerin kök bölgelerine

düşük hacimli su damlacıkları ile su sağlanır. Bu yöntemde su kaybı minimaldir ve bitkilerin su ihtiyacı doğrudan karşılanır. Akıllı tarım uygulamalarında, damla sulama sistemleri sensörlerle entegre edilerek bitkilerin su ihtiyacına göre sulama yapılır ve su kaynaklarından tasarruf sağlanır.

- **Mikro Sulama Sistemleri [17]:** Mikro sulama, bitkilere suyu düşük basınçta ve düşük hacimde sağlayan bir sulama yöntemidir. Mikro püskürtücüler veya damla emiciler aracılığıyla bitkilere su sağlanır. Bu yöntem, suyu doğrudan bitkilerin kök bölgelerine yönlendirerek su kaybını minimize eder ve bitkilerin su ihtiyacını etkin bir şekilde karşılar.
- **İklim Tahmini ve Sulama Planlaması [18]:** Akıllı tarım uygulamalarında, hava durumu verileri ve iklim tahminleri sulama planlamasında kullanılır. Bu sayede, gelecekteki yağış miktarı, sıcaklık ve nem gibi faktörler dikkate alınarak sulama programları optimize edilir. İklim tahmini ve sulama planlaması, suyun verimli kullanımını sağlayarak tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini artırır.

Akıllı tarımda, tarımsal üretim süreçlerinde verimliliği artırmak amacıyla çeşitli drenaj teknikleri ve teknolojileri de kullanılmaktadır. Drenaj sistemleri, tarım arazilerinde toprak nemini ve su dengesini yönetmek için önemli bir rol oynar. Bu nedenle, akıllı tarımda kullanılan drenaj teknikleri ve teknolojileri, verimli su yönetimi ve tarımsal üretimin optimize edilmesi için kritik öneme sahiptir [19].

Geleneksel drenaj sistemleri, tarım arazilerindeki fazla suyu uzaklaştırmak için kullanılmaktadır. Ancak, akıllı tarım yaklaşımı, bu süreci daha verimli ve etkili hale getirmek amacıyla gelişmiş teknolojileri entegre eder. Akıllı drenaj sistemleri, toprak nem dinamiğini izlemek ve yönetmek için sensörler ve veri analitiği kullanır. Toprak nem sensörleri sayesinde, tarım arazilerindeki toprak nem düzeyleri sürekli olarak takip edilir ve bu veriler analiz edilerek sulama ve drenaj süreçleri optimize edilir.

Ayrıca, akıllı tarımda kullanılan drenaj sistemleri, yağış tahminleri ve hava durumu verileri ile entegre edilerek daha etkili bir drenaj planlaması yapılmasını sağlar. Böylece, tarım arazilerindeki su dengesi ve toprak nem düzeyleri daha hassas bir şekilde yönetilir. Akıllı drenaj sistemleri aynı zamanda uzaktan izleme ve kontrol imkanı sunar, böylece çiftçiler su yönetimi süreçlerini uzaktan takip edebilir ve gerektiğinde müdahale edebilir [20].

Bununla birlikte, akıllı tarımda kullanılan drenaj teknikleri sadece su yönetimini optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda çevresel etkileri de minimize eder. Drenaj sularının tarım alanlarından çevreye verdiği olumsuz etkileri azaltmak için arıtma ve geri dönüşüm teknolojileri de akıllı drenaj sistemlerine entegre edilebilir [21].

Literatürde yapılan çalışmalar, akıllı tarımın drenaj teknikleri ve teknolojileri ile verimlilik, su tasarrufu ve sürdürülebilirlik

açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir [22]. Akıllı drenaj sistemleri, su kaynaklarının daha etkin kullanımı ve tarımsal üretimin artırılması için önemli bir araçtır ve gelecekte tarım sektöründe daha geniş bir kullanım potansiyeline sahip olması beklenmektedir.

Toprak nem dinamiği, tarım alanlarında su kaynaklarının etkin kullanımının temel bir unsuru olarak kabul edilir. Bundan dolayı bu çalışmada, toprak nem dinamiği üzerinde otomasyon ve kontrol sistemlerinin bir özel uygulaması olan dayanıklı kontrol yaklaşımına odaklanılacaktır. Topraktaki nem düzeyinin doğru şekilde yönetilmesi, bitki büyümesi, verimlilik ve su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşır. Geleneksel sulama yöntemleri genellikle zaman ve kaynak israfına neden olabilmekte ve su kullanım verimliliğini azaltabilmektedir. Bu nedenle, akıllı tarımın toprak nem dinamiğini etkin bir şekilde yönetmek için dayanıklı kontrol stratejileri sunması büyük bir avantajdır. Son dönemde yapılan çalışmalarda, farklı alan kullanım modelleri altında toprak organik karbon dinamiğinin belirlenmesine de odaklanılmıştır [23].

Dayanıkl sulama/drenaj kontrolü yaklaşımı, akıllı tarımın bir parçası olarak kullanılan bir kontrol yöntemidir [13], [19], [24-26]. Bu yaklaşım, toprak nem dinamiğini dikkate alarak sulama ve drenaj süreçlerini optimize etmeyi amaçlar. Dayanıkl kontrol stratejileri, değişken toprak koşullarına ve çevresel faktörlere karşı dirençli olacak şekilde tasarlanır ve tarımsal üretimde su verimliliğini artırır. Dayanıkl sulama/drenaj kontrolü yaklaşımı, bazı temel prensiplere dayanır.

Sulama kararlarının doğru alınabilmesi için toprak nem düzeylerinin sürekli olarak izlenmesi önemlidir. Bu sebepten ötürü, toprak nem sensörleri veya uydu verileri gibi teknolojilerle gerçekleştirilebilir. Toprak nem dinamiği, bitki su ihtiyacını belirlemede, sulama veya drenaj zamanlamasının optimize edilmesinde kritik bir rol oynar. Toprak nem dinamiklerine dayalı olarak bitkilerin su ihtiyacı hesaplanır. Bu, bitki türüne, büyüme aşamasına ve çevresel koşullara bağlı olarak değişir. Su ihtiyacı, bitki su tüketimi, toprak özellikleri ve hava durumu verileri gibi faktörler dikkate alınarak belirlenir.

Literatürde dış bozucu girdileri altında dayanıklı sulama ve drenaj sistemleri konusundaki çalışmalar, akıllı tarım uygulamalarını desteklemek ve tarım verimliliğini artırmak amacıyla çeşitli yaklaşımların incelendiğini göstermektedir. Örneğin, Ostrom [27], sulama sistemlerinin sürekliliği için dayanıklı su yönetiminin önemini vurgulamış ve dayanıklı su yönetimini sağlamak için gerekli ve yeterli koşulları belirlemeye yönelik bir analiz gerçekleştirmiştir. Aynı şekilde, Zeng ve diğerleri [28], değişken dinamik parametrelere sahip ana sulama kanallarını kontrol etmek için dayanıklı PID kontrolörler geliştirmişlerdir. Bu çalışma, sulama kanallarının performansını ve dayanıklılığını artırmada başarılı bir yaklaşımı sunmaktadır.

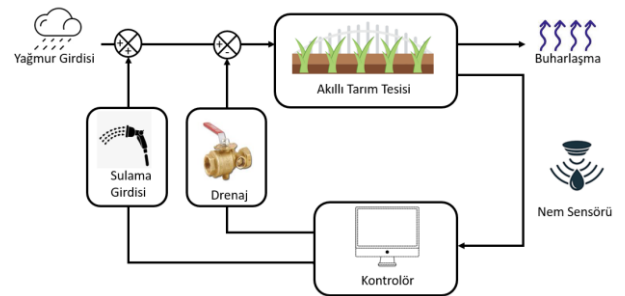
Bir diğer yaklaşım olarak, Zhang ve diğerleri [29], otomatik sulama sistemlerinin verimliliğini artırmak için veri tabanlı dayanıklı model öngörücü kontrol yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem, toprak nem değişkenliklerini anlamak ve belirsizlikleri ele almak için mekanik ve veri tabanlı

modellerin bütünlük bir kontrol çerçevesine entegre edilmesini sağlar. Bu çalışma, sulama sistemlerinin kontrolünde belirsizliği ele almanın önemini vurgulamaktadır.

Ayrıca, güvenilirlik, esneklik ve sürdürülebilirlik gibi amaçlara hizmet eden dayanıklı drenaj sistemleri geliştirilmiştir [30], [31]. Bu çalışmalar, çeşitli stratejilerin dayanıklılığını ve performansını değerlendirmek amacıyla farklı senaryolarda analiz edildiğini göstermektedir.

Ancak, literatürde  $H_\infty$  kontrolünün dayanıklı sulama ve drenaj sistemleri konusundaki çalışmalarda eksik olduğu görülmektedir. Bu noktada,  $H_\infty$  kontrolünün akıllı tarım uygulamalarında dayanıklı sulama ve drenaj sistemlerinin geliştirilmesindeki potansiyeli ve eksikliği üzerinde daha fazla odaklanması bu çalışmanın ana motivasyonudur.

Dayanıkl sulama ve drenaj kontrolü, Şekil 1'de de görüldüğü üzere, otomatik sulama ve drenaj sistemleriyle entegre edilir. Şekil 1, dinamikleri yağmur girdisi ve buharlaşma çıktısı olan bir akıllı tarım tesisinin bir nem sensörü vasıtasıyla toprak neminin ölçülerek toprak nem seviyesine göre bir geri beslemeli kontrol tasarlanarak toprak neminin sulama girdisi ve/veya drenaj sistemi ile düzenlendiği bir kapalı çevrim sistemini göstermektedir. Bu sistemde, sensör verileri veya model tahminleri kullanılarak suyun doğru miktar ve zamanlamada uygulanması sağlanır. Böylece, bitkilerin su gereksinimi karşılanırken su kaynakları verimli bir şekilde kullanılır. Dayanıkl sulama/drenaj kontrolü için özel algoritmalar ve kontrol stratejileri geliştirilir. Bu algoritmalar, değişken toprak nem dinamiği, hava durumu değişiklikleri ve bitki su tüketimi gibi faktörlere dayanıklı olacak şekilde tasarlanır ve su tasarrufu sağlamak için sulama ve drenaj miktarını ve zamanlamasını optimize eder.



Şekil 1: Dayanıkl Sulama/Drenaj Kontrolü Akış Diyagramı.

Dayanıkl sulama/drenaj kontrolü yaklaşımı, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini artırmak için su kaynaklarının etkin kullanımını hedefler. Bu yaklaşım, su israfını önler, bitkilerin su ihtiyacını doğru bir şekilde karşılar ve çevresel değişkenlere dayanıklıdır. Akıllı tarım uygulamalarında dayanıklı sulama/drenaj kontrolü, verimlilik ve su tasarrufu sağlayarak tarımsal sektörün sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına yardımcı olur.

Bu çalışmanın ana odak noktası, toprak nem dinamiğinde dayanıklı kontrol stratejilerinin uygulanması olacaktır. Bu stratejiler, gerçek zamanlı veri kullanımı, sensör ağları ve otomatik kontrol sistemlerinin entegrasyonunu içermektedir.

Bu sayede, toprak nem düzeylerinin sürekli olarak izlenmesi, analiz edilmesi ve gerektiğinde sulama/drenaj sistemlerinin otomatik olarak ayarlanması mümkün olacaktır. Bu yaklaşım, su kullanım verimliliğini artırırken tarımın sürdürülebilirliğini sağlama potansiyeline sahiptir. Bu bağlamda bu makalede, bir örnek model kullanılarak dayanıklı kontrol stratejilerinin akıllı tarım bağlamında nasıl uygulanabileceği ve toprak nem dinamiği üzerindeki etkileri gösterilecektir. Bu çalışmanın kazanımları aşağıdaki şekilde maddelendirilebilir:

- Akıllı tarımda dayanıklı kontrol stratejilerinin toprak nem dinamiği yönetimi için etkili bir yaklaşım olduğunun gösterilmesi.
- Su kaynaklarının daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayarak tarım alanlarında sürdürülebilirlik ve su kullanım verimliliğinin artırılması.
- Toprak nem dinamiğini izleme, analiz etme ve otomatik olarak sulama veya drenaj sistemlerini ayarlama yeteneği.
- Toprak nem seviyesini belirli bir kritik seviyede tutarak bitki sağlığını ve üretkenliğini artırma.
- Sayısal örneklerle dayanıklı kontrol stratejisinin etkinliğinin gösterilmesi.

Bu kazanımların, tarım sektöründe su kaynaklarının verimli kullanımı, sürdürülebilir tarımsal üretim ve akıllı tarım teknolojilerinin geliştirilmesi açısından önemli bir ilerleme sağlanması öngörülmektedir.

Bu çalışmada, toprak nem dinamiği üzerinde durum geri beslemeli bir dayanıklı kontrol stratejisi kullanılmıştır. Bölüm 2’de toprak nem dinamiği ve ele alınan sistem tanımlanarak problem tanımlanmış ve problemin çözümü için bazı ön bilgiler verilmiştir. Toprak nem dinamiği sistemi içerisinde yağış miktarı, sulama/drenaj mekanizması, derin sızma ve toprağın buharlaşma düzeyleri gibi faktörlerin karmaşık etkileşimleri göz önünde bulundurularak, topraktaki nem seviyesini belirli bir kritik düzeyde tutan dayanıklı bir kontrol yaklaşımı yine aynı bölüm içerisinde ana sonuç olarak verilmiştir. Bu yaklaşımın etkinliği Bölüm 3’te bir sayısal örnek ile gösterilerek, yağmur ve buharlaşma bozucu girdileri altında, açık çevrim sistemi ve kapalı çevrim sistem performansları karşılaştırılmıştır. Son olarak, Bölüm 4’te sonuçlar tartışılarak, olası gelecek çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

## 2. Toprak Nem Dinamiği ve Dayanıklı Kontrolü

Toprak nem dinamiği, su sızma, buharlaşma ve bitki alımı gibi süreçler aracılığıyla bitkiler için suyun mevcudiyetini, toprak sağlığını ve ekosistem işleyişini etkileyen bir dizi faktörü içeren bir kavramdır. Yağış, toprak nemini yenileyen temel su kaynağıdır. Yağış miktarı, yoğunluğu ve dağılımı, toprak nem seviyelerini etkileyen ilk nem içeriğini ve sonrasındaki değişimleri belirleyen önemli faktörler arasındadır. Buharlaşma, güneş radyasyonu ve atmosferik koşullar tarafından yönlendirilir ve toprak yüzeyinden su kaybına neden olur. Aynı şekilde, bitkilerin kökleri aracılığıyla su emerken yapraklar aracılığıyla suyu atmosfere salmaları olan terleme süreci de toprak nem dinamiğini etkiler. Çalışmanın

temel metodolojik yaklaşımlarını ve kullanılan yöntemleri bir sonraki bölümde açıklanmaktadır.

### 2.1. Amaç, Yöntem ve Metodoloji

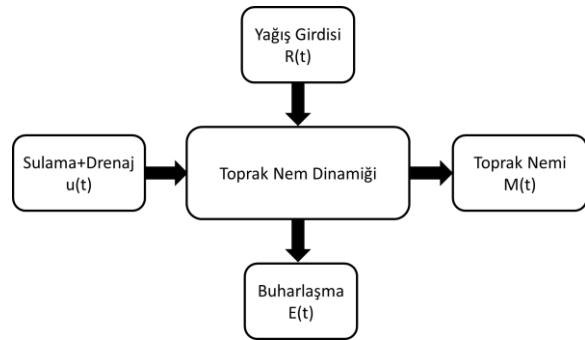
Çalışmanın amacı, toprak nem dinamiğini etkili bir şekilde yönetmek için dayanıklı kontrol stratejilerinin geliştirilmesidir. Bu amaçla, toprak nem dinamiği matematiksel modeli ele alınarak, kritik nem seviyesini korumak hedeflenmiştir.

Çalışmanın kontrol tasarım metodolojisinde, doğrusal sistemlerin dayanıklı kontrolünde yaygın olarak kullanılan  $H_\infty$  kontrol stratejisi kullanılmıştır. Kontrol girdilerini ve dış bozucu girdilerini içeren dinamik modele dayalı olarak durum geri beslemeli kontrol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yöntem olarak, Lyapunov fonksiyonları ve  $L_2$  performans kriterleri, istenen nem seviyelerini koruma amacıyla kullanılmıştır.

Geliştirilen kontrol stratejilerinin performansını değerlendirmek için sayısal benzetimler yapılmıştır. Uygulama senaryoları olarak, dayanıklı kontrol stratejileri farklı uygulama senaryolarında test edilmiştir. Farklı dinamikler altında stratejilerin nasıl çalıştığı incelenmiştir.

### 2.2. Toprak Nem Dinamiği Modeli

Bu çalışmada ele alınan sistem modeli, genel çerçevede, sistem teorisi literatüründe yaygın kullanılan “bölmeli model” veya “kompartman modeli” (İng: *compartment model*) olarak bilinen bir modeldir. Bu çalışmada ele alınan model “tek-kompartman modeli” (İng: *single-compartment model*) olup, [14] çalışmasından türetilmiştir. Bu model Şekil 2’de gösterildiği üzere, toprak nem dinamiği değişkenlerini ve aralarındaki ilişkileri göstermektedir.



Şekil 2: Toprak nem dinamiği değişkenleri.

Şekil 2’de yer alan şematik gösterim, yukarıda bahsi geçen kompartman modellerinde yaygın kullanılan bir gösterim olup toprak nem dinamiğine  $R(t) \in \mathbb{R}$  yağmur girdisi ve  $E(t) \in \mathbb{R}$  buharlaşma çıktısının etki ettiğini ve toprak neminin  $M(t) \in \mathbb{R}$  sulama girdisi ve/veya drenaj ile  $u(t) \in \mathbb{R}$  kontrol edildiği bir yapıyı belirtmektedir.

### 2.3. Sistem Dinamiği

Toprak nem dinamiği değişkenleri tanımlandığına göre sistem dinamiği tanımlanabilir.  $M_{cr}$  topraktaki kritik (hedeflenen)

nem miktarını belirtmek üzere, çalışmanın amacı toprak nemini  $M_{cr}$  civarında tutabilmek olduğu için, sistem durumu, toprak neminin kritik nem miktarından farkı olarak  $x(t) = M(t) - M_{cr}$  şeklinde tanımlanmaktadır. Sistem kontrol girdisi  $u(t)$  sulama veya drenaj ile sağlanacak; karesi integrallenebilir fonksiyon sınıfından olan bozucu girdisi ise yağış girdisi ve buharlaşma kaynaklı olacağından  $w(t) = [R(t) \ E(t)]^T$  olarak tanımlanacaktır ( $w \in L_2[0, \infty)$ ). Bu tanımlamalardan sonra, toprak nem dinamiği (1)'de ele alınmıştır [14]:

$$\dot{x}(t) = -ax(t) + u(t) + Cw(t) \quad (1)$$

Burada  $a > 0$  sızma katsayısını,  $c_1 > 0$  yağmur girdi katsayısını,  $c_2 > 0$  ise buharlaşma katsayısını belirtmek üzere  $C = [c_1 \ -c_2]$  olacaktır.

#### 2.4. Notasyon, Problem Tanımı ve Bazı Ön Bilgiler

Bu çalışmada kullanılan notasyon oldukça standarttır. Bir matris için  $P < 0$ ,  $P$  negatif tanımlı olduğunu gösterir.  $\mathcal{C}^0$  ve  $\mathcal{C}^1$  sırasıyla sürekli ve sürekli türevlenebilir fonksiyonların sınıflarıdır.  $L_2[0, \infty)$  karesi integrallenebilir fonksiyonların sınıfını belirtir. Aksi belirtilmediği sürece matrislerin cebirsel işlemler için uyumlu boyutlara sahip olduğu varsayılır.

Bu çalışmada (2)'de belirtildiği gibi bir durum geri beslemeli kontrolör uygulanmıştır:

$$u(t) = -kx(t) \quad (2)$$

Elde edilen kapalı çevrim sistemin (3)'te verilmiştir:

$$\dot{x}(t) = -(a+k)x(t) + Cw(t) \quad (3)$$

Öngörülen  $\gamma > 0$  skaleri için, kapalı çevrim sistemi (3)'ün, (4) ile verilen  $L_2$  kazanç performansını sağlaması beklenmektedir:

$$J_\infty = \int_0^\infty (x^\top(\tau)x(\tau) - \gamma^2 w^\top(\tau)w(\tau)) d\tau \quad (4)$$

(4) ile verilen söz konusu  $L_2$  kazanç performansını garanti edebilmek için aşağıdaki tanımdaki özellikleri sağlayan özel tipte fonksiyonlar kullanılır.

**Tanım 1.** (Lyapunov fonksiyon adayı): (3) sistemi için  $V: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  şeklinde tanımlanan ve aşağıda verilen özellikleri sağlayan fonksiyonlara Lyapunov fonksiyon adayları verilir:

- $V \in \mathcal{C}^1$  olmalıdır.

- $V(0) = 0$  ve  $\mathbb{R} \setminus \{0\}$  kümesinde  $V(x) > 0$  olmalıdır ( $\mathbb{R}$ 'de artı tanımlılık).
- $x \rightarrow \infty$  olduğunda  $V(x) \rightarrow \infty$  olmalıdır (radyal sınırsızlık).

Özel olarak, toprak nem dinamiği için  $H_\infty$  kontrolörü aşağıdaki gibi tanımlanır.

**Tanım 2.** ( $H_\infty$  kontrolörü):  $\gamma > 0$  skaleri verildiğinde, aşağıdaki iki koşul geçerliyse, durum geri beslemeli kontrolörü (2), (1) için bir  $H_\infty$  kontrolörü olduğu söylenir:

- Kapalı çevrim sistemi (3), tüm  $t \geq 0$  için  $w(t) = 0$  sıfır bozucu girdisi altında asimptotik kararlıdır.
- Sıfır başlangıç koşulu altında,  $V: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$  şeklinde tanımlanan,  $V \in \mathcal{C}^1$  olan ve kapalı çevrim sistemi (3)'ün çözümü boyunca her  $w \in L_2[0, \infty)$  için  $\dot{V}(t) < \gamma^2 w^\top(t)w(t) - x(t)^2$  sağlayan bir Lyapunov fonksiyon adayları vardır.

Toprak nem dinamiğinin kapalı çevrim sistemi, açık döngü sulama kontrol yapılarına kıyasla daha hassas ve uyarlanabilir bir su yönetimi sunar. Bu sayede su kullanımını optimize eder, ürün sağlığını ve verimliliğini artırır ve değişen çevresel koşullar ve su kıtlığı gibi zorluklarla karşılaşıldığında sürdürülebilir tarım uygulamalarını destekler.  $L_2$  kazanç performansının sağlanması ise sistem bozucu etkisine yani yağmura ve buharlaşmaya dayanıklı bir toprak dinamiği sağlar.

#### 2.5. Ana Sonuç

Toprak nem dinamiğinin kapalı çevrim sisteminin  $L_2$  kazanç performansını sağlaması için gerek koşullar aşağıdaki teoremdedir:

**Teorem 1:** Verilen  $\gamma > 0$  için (5) eşitsizliğini sağlayan  $p > 0$  ve  $y$  reel sayıları varsa, (2) durum geri besleme kontrolörü (1) için bir  $H_\infty$  kontrolörü olarak adlandırılır:

$$\begin{bmatrix} -2(ap+y) & C & p \\ C^\top & -\gamma^2 I & 0 \\ p & 0 & -1 \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

Ayrıca, kazanç  $k = y/p$  olarak elde edilir.

**İspat.** Lyapunov fonksiyonu adayları olarak  $V(x) = (1/p)x^2$  ele alınsın ve  $\Gamma(t) = x(t)^2 - \gamma^2 w^\top(t)w(t)$  fonksiyonu tanımlansın.  $V$  kapalı çevrim sistemi (3)'ün çözümleri boyunca türetilirse, (6) yazılabilir:

$$= \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -(2/p)(a+k)+1 & (1/p)C \\ (1/p)C^T & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Durum dönüşümü ile (7) yazılabilir:

$$\dot{V}(t) + \Gamma(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} (1/p) \\ I \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -2p(a+k)+p^2 & C \\ C^T & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1/p) \\ I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Schur tümleyen lemması ve (5) kullanılarak (8) elde edilir:

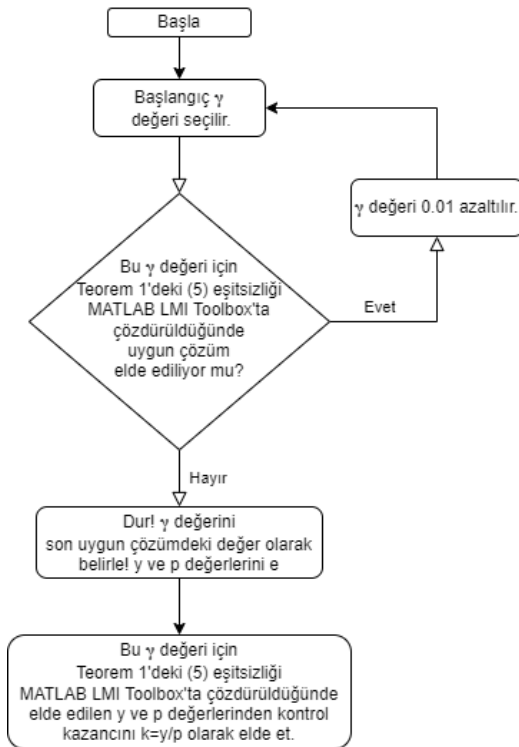
$$\dot{V}(t) + \Gamma(t) < 0 \quad (8)$$

Tüm  $t \geq 0$  için  $w(t) = 0$  olacak şekilde (8)'den  $\dot{V}(t) < 0$  elde edilir ve bu da asimptotik kararlılığı garanti eder. Ayrıca,  $\Gamma(t)$ 'nin (8)'de yerleştirilmesi (9)'u verir:

$$\dot{V}(t) < \gamma^2 w^T(t)w(t) - x(t)^2 \quad (9)$$

Bu da ispatı tamamlamaktadır.  $\square$

Bu teoremi uygulayarak,  $\gamma$  değerini en küçükleyen uygun değeri bulabilmek için önerilen akış şeması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Teorem 1'in uygulanarak  $\gamma$  değerinin en küçüklenmesi için önerilen akış şeması.

gösterilen sulama ve/veya drenajı belirleyen kontrol kazancı elde edilmektedir.

### 3. Sayısal Örnekler

Bu bölümde, Teorem 1'in geçerliliğini göstermek için çeşitli bozucu girdi senaryolarına göre sayısal örnekler sunulmaktadır. Dolayısıyla, kapalı çevrim sisteminin (3) davranışı analiz edilerek, sistem performansı kontrol girişi olmayan (yani  $u(t) = 0$  olacak şekilde seçilen) açık çevrim sistemiyle (1) karşılaştırılmaktadır.

#### 3.1. Dengeli Yağış ve Buharlaşma Örneği

Bu sayısal örnekte, yağış ve buharlaşma sistem bozucu girdilerinin dengeli olduğu, yani aralarında ölçek farkı olmadığı durum ele alınmıştır. Sistem benzetimi için, yağmur ve buharlaşmayı içeren bozucu girdileri (10)'daki gibi seçilmiştir:

$$w(t) = \begin{bmatrix} R(t) \\ E(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\frac{(t-t_1)^2}{\sigma_1}} + e^{-\frac{(t-t_2)^2}{\sigma_2}} \\ \frac{1}{(t-t_3)^2 + s_1} + \frac{1}{(t-t_4)^2 + s_2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

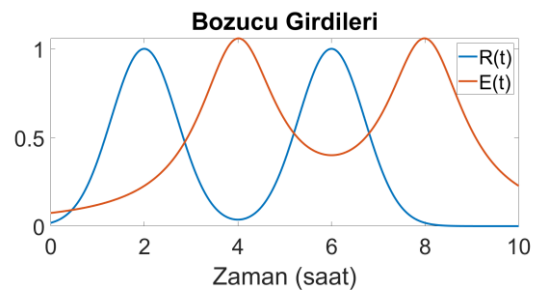
Bu amaçla, sistem parametreleri Tablo 1'deki gibi seçilmiştir.

Tablo 1: Sistem parametre değerleri

Parametre	Değeri	Parametre	Değeri
$a$	0.1	$t_1$	2
$c_1$	1.5	$t_2$	6
$c_2$	0.7	$t_3$	4
$\sigma_1, \sigma_2, s_1, s_2$	1	$t_4$	8

Tablo 1'de verilen sistem parametre değerlerine göre, bozucu girdisinin (10) ile seçimi Şekil 4'te gösterilmiştir.

Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus bozucu girdisinin karesi integrallenebilir fonksiyonlar sınıfından bir fonksiyon olduğu, yani  $w \in L_2[0, \infty)$  olduğudur.



Şekil 4: Seçilen bozucu girdisi  $w(t)$ .

Tablo 1'deki doğrusal matris çarptırma (3), sulama ve drenaj kapasitelerinin 30 mm olduğu kabulü altında, en küçük  $L_2$  kazancını veren  $\gamma = 0.94$  değerine kadar MATLAB LMI Toolbox kullanarak çözümlenerek  $H_\infty$  kontrolörü kazancı (11)'deki gibi elde edilir:

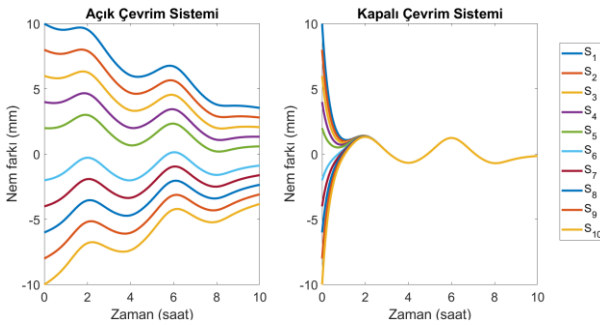
$$k = 2.6562 \quad (11)$$

Performans karşılaştırması için  $x(0) \in \{\pm 2mm, \pm 4mm, \pm 6mm, \pm 8mm, \pm 10mm\}$  değişik başlangıç koşulları seçilmiştir. Bu başlangıç koşullarına göre, 10 farklı alt senaryo oluşturulmuş ve Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Başlangıç koşullarına göre ilgili alt senaryolar

Başlangıç Koşulu	Alt Senaryo	Başlangıç Koşulu	Alt Senaryo
$x(0) = 10mm$	$S_1$	$x(0) = -2mm$	$S_6$
$x(0) = 8mm$	$S_2$	$x(0) = -4mm$	$S_7$
$x(0) = 6mm$	$S_3$	$x(0) = -6mm$	$S_8$
$x(0) = 4mm$	$S_4$	$x(0) = -8mm$	$S_9$
$x(0) = 2mm$	$S_5$	$x(0) = -10mm$	$S_{10}$

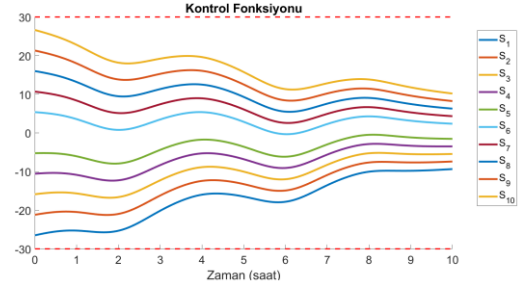
Bu alt senaryolara göre, iki tip durum ele alınmıştır. Birinci durumda kontrol girişi olmayan,  $u(t) = 0$ , açık çevrim sistemi (1) performansı benzetimi yapılmış, ikinci durumda ise elde edilen  $H_\infty$  kontrolörü kazancına göre kapalı çevrim sistemi (3) performansı benzetimi yapılarak, bu iki durum için tüm benzetimler tüm alt senaryolara göre Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5: Açık ve kapalı çevrim sistemleri sistem durumu  $x(t)$  performans karşılaştırması.

Bu şekile göre açık çevrim sistemi 10 saatlik süre zarfında kararlılığını koruyamazken,  $H_\infty$  kontrolörü uygulanarak elde edilen kapalı çevrim sistemi 1.5 saat içerisinde nem farkını, yani sistem hatasını 2mm'den düşük bir hata değerine düşürerek sistem kararlılığını sağlamaktadır.

İlgili alt senaryolar altında, (12)'de elde edilen  $H_\infty$  kontrolörü kazancına göre kontrol fonksiyonu  $u(t) = -kx(t)$  Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: Kontrol fonksiyonunun  $u(t)$  zamana bağlı değişimi.

Bu şekile göre, elde edilen kontrol fonksiyonu kapalı çevrim sistemini kararlılaştırmasının yanı sıra sulama ve drenaj kapasitelerini aşmamaktadır.

### 3.2. Yağışın Baskın Olduğu Örnek

Bu sayısal örnekte ise, yağış ve buharlaşma sistem bozucu girdilerinin denge olmadığı ve yağışın baskın olduğu, yani aralarında belirgin bir ölçek farkı olduğu durum ele alınmıştır. Sistem benzetimi için, yağmur ve buharlaşmayı içeren bozucu girdileri (12)'deki gibi seçilmiştir:

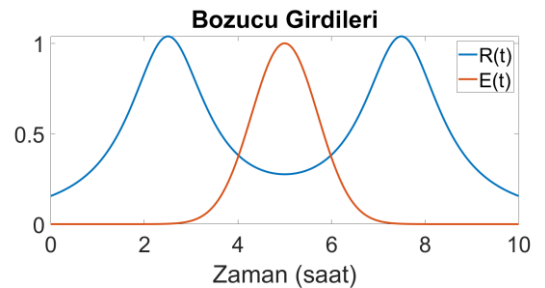
$$w(t) = \begin{bmatrix} R(t) \\ E(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(t-t_1)^2 + s_1} + \frac{1}{(t-t_2)^2 + s_2} \\ e^{-\frac{(t-t_3)^2}{\sigma_1}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Bu amaçla, sistem parametreleri Tablo 3'teki gibi seçilmiştir.

Tablo 3: Sistem parametre değerleri

Parametre	Değeri	Parametre	Değeri
$a$	0.25	$t_1$	2.5
$c_1$	2	$t_2$	7.5
$c_2$	0.05	$t_3$	5
$s_1$	1.5	$\sigma_1$	5
$s_2$	2		

Bozucu girdisinin (12) ile seçimi, Tablo 3'te verilen sistem parametre değerlerine göre Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7: Seçilen bozucu girdisi  $w(t)$ .

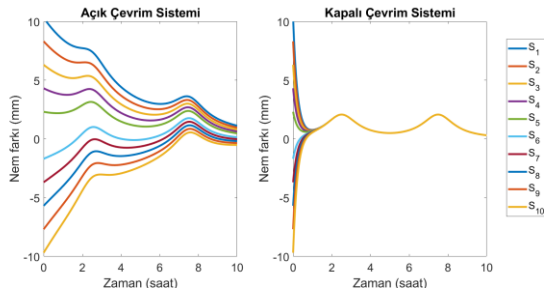
Bozucu girdisi yine karesi integrallenebilir fonksiyonlar sınıfından bir fonksiyon olarak seçilmiştir.

Teorem 1'deki doğrusal matris eşitsizliği (5), sulama ve drenaj kapasitelerinin 50 mm olduğu kabulü altında, en küçük  $L_2$  kazancını veren  $\gamma = 0.58$  değerine kadar MATLAB LMI Toolbox kullanılarak çözümlenerek kazanç (13)'teki gibi elde edilir:

$$k = 4.2657 \quad (13)$$

Performans karşılaştırması için, Tablo 2'de verilen bir önceki örnekteki başlangıç koşulları ve alt senaryolar seçilmiştir.

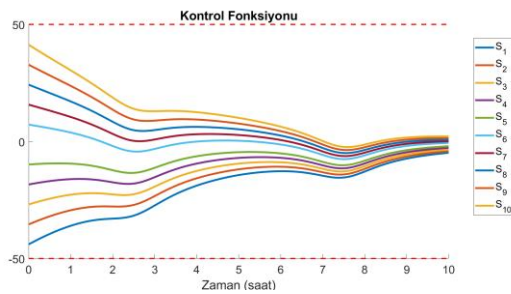
Bu alt senaryolara göre, yine iki tip durum ele alınmıştır. Birinci durumda kontrol girişi olmayan açık çevrim sistemi (1) performansı benzetimi yapılmış, ikinci durumda ise elde edilen  $H_\infty$  kontrolörü kazancına göre kapalı çevrim sistemi (3) performansı benzetimi yapılarak, bu iki durum için tüm benzetimler tüm alt senaryolara göre Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8: Açık ve kapalı çevrim sistemleri sistem durumu  $x(t)$  performans karşılaştırması.

Bu şekile göre, açık çevrim sistemi 10 saatlik süre zarfında kararlılığını koruyamazken,  $H_\infty$  kontrolörü uygulanarak elde edilen kapalı çevrim sistemi 0.5 saat içerisinde nem farkını, yani sistem hatasını 1.5mm'den düşük bir hata değerine düşürerek sistem kararlılığını sağlamaktadır.

İlgili alt senaryolar altında, (13)'de elde edilen  $H_\infty$  kontrolörü kazancına göre kontrol fonksiyonu ise Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9: Kontrol fonksiyonunun  $u(t)$  zamana bağlı değişimi.

Bu şekile göre, elde edilen kontrol fonksiyonu kapalı çevrim sistemini kararlılaştırmasının yanı sıra sulama ve drenaj kapasitelerini aşmamaktadır. Öte yandan, bu kontrol fonksiyonu daha düşük bir  $L_2$  kazanç değeri vermesinin yanı sıra daha kısa sürede sistem durumunu belli eşik değerinin altına düşürebilmeyi başarmıştır. Bunun sebebi ise, bu örnekte buharlaşma girdisinin ölçek bazında nisbi olarak daha düşük genlikte olmasıdır. Bu durum da bir önceki hem yağış hem de buharlaşma sistem durumlarıyla karşılaştırıldığında beklenen bir durumdur.

#### 4. Sonuçlar ve Gelecek Çalışma Yöneleri

Bu çalışmada, durum geri beslemeli bir dayanıklı kontrol stratejisinin toprak nem dinamiği üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Toprak nem dinamiği sistemi içerisindeki yağış miktarı, sulama/drenaj mekanizması, derin sızma ve toprağın buharlaşma düzeyleri gibi karmaşık etkileşimleri göz önünde bulunduran bu strateji, topraktaki nem seviyesini belirli bir kritik düzeyde sabit tutmayı amaçlamıştır. Ayrıca, bu çalışma, dayanıklı kontrol yaklaşımının etkinliğini bir sayısal örnek üzerinden somut bir şekilde göstermiştir.

Akıllı tarım çerçevesinde bu araştırma, toprak nem dinamiği yönetiminde dayanıklı kontrol stratejilerinin etkili bir yaklaşım olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur. Bu stratejiler, toprak nem dinamiğini izlemek, analiz etmek ve gerektiğinde otomatik olarak sulama veya drenaj sistemlerini otonom olarak ayarlamak için kullanılabilir. Bu sayede, toprak nem dinamiğini etkileyen faktörlerin karmaşık etkileşimlerini dikkate alarak, topraktaki nem seviyesi belirli bir kritik seviyede tutulmuştur.

Bu çalışmanın sayısal benzetim kısmında, teorik kısımda elde edilen koşulların sınanması için sayısal bir örnek verilmiştir. Uygun yağmur ve buharlaşma bozucu girdileri altında, açık ve kapalı çevrim sistem performansları karşılaştırılmış, dayanıklı kontrol yaklaşımının uygulandığı kapalı çevrim sisteminin açık çevrim sistemine göre çok daha kısa sürede nem farkını belli bir kritik seviyenin altına düşürebildiği gösterilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, akıllı tarımda dayanıklı kontrol stratejileri farklı iklim koşullarına, bitki türlerine ve tarım sistemlerine adapte edilebilir. Ayrıca, daha fazla veri toplama ve analiz yöntemleri üzerinde çalışılarak, sensör teknolojileri ve otomasyon sistemleri daha da geliştirilebilir. Gözlemci temelli kontrol ve NARMA-L2 temelli kontrol gibi yöntemler, toprak nem dinamiğinin nonlineer modellerinde ve kontrolünde de etkili olabilir [32-34]. Bununla birlikte, akıllı tarımda dayanıklı kontrol stratejilerinin ekonomik ve çevresel etkileri de daha fazla araştırılabilir. Bu stratejilerin maliyet-etkinliği, çiftçilerin kabul ve benimseme oranı, su tasarrufu ve verimlilik gibi faktörler detaylı analiz edilebilir.

#### 5. Açık Kaynak Kodları

Çalışmanın "Sayısal Sonuçlar" bölümünde yapılan analizler için kaynak kodları GitHub deposunda erişime sunulmuştur [35].



- [1] L. Lipper, P. Thornton, B. M. Campbell, T. Baedeker, A. Braimoh, M. Bwalya, P. Caron, A. Cattaneo, D. Garrity, K. Henry ve R. Hottle, "Climate-smart agriculture for food security", *Nature Climate Change*, 4(12), 1068-1072, 2014.
- [2] M. Taylor, "Climate-Smart Agriculture: What is it good for?", *The Journal of Peasant Studies*, 45(1), 89-107, 2018.
- [3] F. K. Shaikh, S. Karim, S. Zeadally ve J. Nebhen, "Recent trends in Internet of Things enabled sensor technologies for smart agriculture", *IEEE Internet of Things Journal*, Basımda, 2022.
- [4] R. Rayhana, G. Xiao ve Z. Liu, "RFID sensing technologies for smart agriculture", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 24(3), 50-60, 2021.
- [5] Z. Sun, F. Zheng ve S. Yin, "Perspectives of research and application of Big Data on smart agriculture", *Journal of Agricultural Science and Technology (Beijing)*, 15(6), 63-71, 2013.
- [6] S. I. Hassan, M. M. Alam, U. Illahi, M. A. Al Ghamdi, S. H. Almotiri ve M. M. Suud, "A systematic review on monitoring and advanced control strategies in smart agriculture", *IEEE Access*, 9, 32517-32548, 2021.
- [7] I. Marcu, G. Suci, C. Bălăceanu, A. Vulpe ve A. M. Drăgulescu, "Arrowhead technology for digitalization and automation solution: Smart cities and smart agriculture", *Sensors*, 20(5), 1464, 2020.
- [8] A. Rehman, T. Saba, M. Kashif, S. M. Fati, S. A. Bahaj, ve H. Chaudhry, "A revisit of Internet of Things technologies for monitoring and control strategies in smart agriculture", *Agronomy*, 12(1), 127, 2022.
- [9] P. P. Ray, "Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction", *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 9(4), 395-420, 2017.
- [10] B. B. Sinha ve R. Dhanalakshmi, "Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey", *Future Generation Computer Systems*, 126, 169-184, 2022.a
- [11] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, ve E. H. M. Aggoune, "Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk", *IEEE Access*, 7, 129551-129583, 2019.
- [12] T. A. Shaikh, T. Rasool ve F. R. Lone, "Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming", *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107119, 2022.
- [13] B. Güzel ve E. Okatan, "Tarım ve Yapay Zeka", *Yapay Zekanın Değiştirdiği Dinamikler*, 199-224, 2022.
- [14] E. Bwambale, F. K. Abagale ve G. K. Anornu, "Data-driven model predictive control for precision irrigation management", *Smart Agricultural Technology*, 100074, 2022.
- [15] R. G. Evans, J. LaRue, K. C. Stone ve B. A. King, "Adoption of site-specific variable rate sprinkler irrigation systems", *Irrigation Science*, 31, 871-887, 2013.
- of drip irrigation systems", *The Pharma Innovation Journal*, 7(1), 346-348, 2018.
- [17] R. G. Evans, I. P. Wu ve A. G. Smajstrala, "Microirrigation systems", *In Design and Operation of Farm Irrigation Systems*, 2nd Edition, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007.
- [18] D. A. An-Vo, S. Mushtaq, K. Reardon-Smith, L. Kouadio, S. Attard, D. Cobon ve R. Stone, "Value of seasonal forecasting for sugarcane farm irrigation planning", *European Journal of Agronomy*, 104, 37-48, 2019.
- [19] L. K. Smedema, W. F. Vlotman ve D. Rycroft, "Modern land drainage: Planning, design and management of agricultural drainage systems", CRC Press, 2004.
- [20] G. Cembrano, J. Quevedo, M. Salamero, V. Puig, J. Figueras ve J. Marti, "Optimal control of urban drainage systems. A case study", *Control Engineering Practice*, 12(1), 1-9, 2004.
- [21] A. Nahvi, A. Daghighi ve S. Nazif, "The environmental impact assessment of drainage systems: a case study of the Karun river sugarcane development project", *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(2), 185-195, 2018.
- [22] Q. Zhou, "A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts", *Water*, 6(4), 976-992, 2014.
- [23] G. Evliyaoğlu, "Farklı alan kullanımlarında toprak organik karbon dinamiğinin belirlenmesi", *Anadolu Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi*, 2019.
- [24] M. V. Carstensen, F. Hashemi, C. C. Hoffmann, D. Zak, J. Audet ve B. Kronvang, "Efficiency of mitigation measures targeting nutrient losses from agricultural drainage systems: A review", *Ambio*, 49, 1820-1837, 2020.
- [25] M. J. Castellano, S. V. Archontoulis, M. J. Helmers, H. J. Poffenbarger ve J. Six, "Sustainable intensification of agricultural drainage", *Nature Sustainability*, 2(10), 914-921, 2019.
- [26] C. Yılmaz, E. Sefer ve M. E. Şahin, "Güneş Pili ile Çalışan Sera Otomasyonu", 1. Elektrik Elektronik Mühendisliğinde Güncel Gelişmeler Sempozyumu (EEMGG 2021), Trabzon, Türkiye, 24.09.2021-25.09.2021.
- [27] R. Ma'Mun, A. Loch ve M. D. Young, "Robust irrigation system institutions: A global comparison", *Global Environmental Change*, 64, p.102128, 2021.
- [28] V. Feliu-Battle, R. R. Perez ve L. S. Rodriguez, "Fractional robust control of main irrigation canals with variable dynamic parameters", *Control Engineering Practice*, 15(6), pp.673-686, 2007.
- [29] C. Shang, W. H. Chen, A. D. Stroock ve F. You, "Robust model predictive control of irrigation systems with active uncertainty learning and data analytics", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 28(4), pp.1493-1504, 2019.
- [30] Y. Yu, M. Shen, H. Sun ve Y. Shang, "Robust design of siphon drainage method for stabilizing rainfall-induced landslides", *Engineering Geology*, 249, pp.186-197, 2019.
- [31] A. Casal-Campos, S. M. Sadr, G. Fu ve D. Butler, "Reliable, resilient and sustainable urban drainage systems: an analysis of robustness under deep

- uncertainty", Environmental Science & Technology, 52(16), pp.9008-9021, 2018.
- [32] K. Uçak ve G. Ö. Günel, "Online support vector regression based adaptive NARMA-L2 controller for nonlinear systems", Neural Processing Letters, 53(1), 405-428, 2021.
- [33] G. D. Şen ve G. Ö. Günel, "NARMA-L2-based online computed torque control for robotic manipulators", Transactions of the Institute of Measurement and Control, 01423312231153255, 2023.
- [34] G. D. Şen, "NARMA-L2 controller design for nonlinear systems using online least square support vector regression", İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [35] G. Göksu, Smart Agriculture GitHub Repository, <https://github.com/gokhangoksu/SmartAgriculture>, Erişim tarihi: 21.08.2023.

### Özgeçmiş



**Gökhan Göksu**, 1988 yılında İstanbul'da doğdu. 2011 yılında matematik mühendisliği ana dal ve 2015 yılında fizik mühendisliği yan dal lisans; 2020 yılında ise matematik mühendisliği alanında doktora derecelerinin hepsini İstanbul Teknik Üniversitesi'nden (İTÜ) aldı. Şubat 2019 - Nisan 2020 tarihleri arasında Sinyal ve Sistemler Laboratuvarı (Laboratoire des Signaux et Systèmes, L2S)-CentraleSupélec-Paris-Saclay Üniversitesi'nde misafir araştırmacı olarak çalıştı. Şu anda Yıldız Teknik Üniversitesi'nde (YTÜ) uygulama birim öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında anahtarlamalı sistemler, zaman gecikmeli sistemler, sonlu zaman kararlılık, girdiden duruma kararlılık ve otoyol trafik kontrolü yer almaktadır.