

Ekim'23

Sayı/Number: 3 / Volume: 13
Yıl/Year: 2023

Yayın Sahibi

TMMOB
Elektrik Mühendisleri Odası Adına
Mahir ULUTAŞ

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Eylem ÖLMEZOĞLU

Yayın İdare Merkezi

Ihlamur Sokak No:10 Kat:3
Kızılay - Ankara
Tel: (312) 425 32 72
Faks: (312) 417 38 18
<http://bilimseldergi.emo.org.tr>
bilimseldergi@emo.org.tr
EMO Üyelerine parasız dağıtılır

Dergi Koordinatörü

Sevgi Kinacı
sevgi.kinaci@emo.org.tr

Sayfa Düzeni

TMMOB
Elektrik Mühendisleri Odası

Yayın Türü

Yerel Süreli Yayın
6 ayda bir yayınlanır

Basım Adedi

500

Basım Tarihi

Ekim 2023

EMO BİLİMSEL DERGİ

Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal
Mühendisliği Bilimsel Dergisi

The Journal of Electrical, Electronics, Computer and
Biomedical Engineering

YAYIN KURULU

BAŞ EDİTÖR/EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Timur Aydemir
Kadir Has Üniversitesi

EDİTÖRLER/EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Erhan Akın
Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Güven Önbilgin
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Prof. Dr. Arif Nacaroğlu
Gaziantep Üniversitesi

Prof. Dr. Özlem Özgün
Hacettepe Üniversitesi

Prof. Dr. Muhittin Gökmen
MEF Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Melih Gür
(Misafir Editör)
Bahçeşehir Üniversitesi



TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası

UCTEA/Chamber of Electrical Engineers

EMO Bilimsel Dergi Danışma Kurulu

| | |
|--------------------------------|--|
| Prof. Dr. A. Hamit Serbest | Çukurova Üniversitesi |
| Prof. Dr. Altay Güvenir | Bilkent Üniversitesi |
| Prof. Dr. Cengizhan Öztürk | Boğaziçi Üniversitesi |
| Prof. Dr. Erhan Akın | Fırat Üniversitesi |
| Prof. Dr. Güven Önbilgin | Ondokuz Mayıs Üniversitesi |
| Prof. Dr. Murat Eyüboğlu | Orta Doğu Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. Timur Aydemir | Kadir Has Üniversitesi |
| Prof. Dr. Ali Hikmet Doğru | Orta Doğu Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. Arif Nacaroğlu | Gaziantep Üniversitesi |
| Prof. Dr. Atilla Bir | Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi |
| Prof. Dr. Aydın Köksal | Bilişim A.Ş. |
| Prof. Dr. Aydoğan Özdemir | İstanbul Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. Aysin Baytan Ertüzün | Boğaziçi Üniversitesi |
| Prof. Dr. Belgin Turkey | İstanbul Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. Bülent Sankur | Boğaziçi Üniversitesi |
| Prof. Dr. Cüneyt Güzeliş | Yaşar Üniversitesi |
| Prof. Dr. Erdal Panayırçı | Kadir Has Üniversitesi |
| Prof. Dr. Erkan Afacan | Gazi Üniversitesi |
| Prof. Dr. Ferit Acar Savacı | İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü |
| Prof. Dr. H. Bülent Ertan | Orta Doğu Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. Haldun Karaca | Dokuz Eylül Üniversitesi |
| Prof. Dr. İbrahim Eksin | İstanbul Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. İnci Çilesiz | İstanbul Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. İrfan Karagöz | Gazi Üniversitesi |
| Prof. Dr. İsmail Hakkı Altaş | Karadeniz Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. İsmail Hakkı Çavdar | Karadeniz Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. Kemal Leblebicioğlu | Orta Doğu Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. Lale Tükenmez Ergene | İstanbul Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. Mithat İdemen | Okan Üniversitesi |
| Prof. Dr. Muhittin Gökmen | MEF Üniversitesi |
| Prof. Dr. Murat Aşkar | İzmir Ekonomi Üniversitesi |
| Prof. Dr. Müjde Güzelkaya | İstanbul Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. Osman Eroğul | TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi |
| Prof. Dr. Oya Kalıpsız | Yıldız Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. Özlem Özgün | Hacettepe Üniversitesi |
| Prof. Dr. Sermin Onaygil | İstanbul Teknik Üniversitesi |
| Prof. Dr. Tayfun Akgül | İstanbul Teknik Üniversitesi |
| Doç. Dr. Ahmet Hasan Koltuksuz | Yaşar Üniversitesi |
| Doç. Dr. Osman Abul | TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi |
| Bora Güngören | Portakal Teknoloji |
| Fikret Küçükdeveci | Kardinero Medikal |
| Hasan Ali Pazar | Siemens |

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

**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 Hamidoğlu

7

Akıllı Tarımda Dayanıklı Kontrol Stratejileriyle Toprak Nem Dinamiği Yönetimi

Soil Moisture Dynamics Management with Robust Control Strategies in Smart Agriculture

Gökhan Göksu

17

**Tarımsal Otomasyon Sistemleri için Muz Olgunluk Seviyelerinin
Derin Öğrenme Yöntemleri İle Sınıflandırılması**

*Classification of Banana Ripeness Levels Using
Deep Learning Methods for Agricultural Automation Systems*

Sezgin Dulkadir, Gökhan Koray Gültekin

27

**Akıllı Tarım Uygulamalarında Robotik Kablosuz Sensör Ağlarında
Çoklu Robot Görev Tahsisi**

*Multi-Robot Task Allocation in Robotic Wireless Sensor Networks in
Smart Agricultural Applications*

Ömer Melih Gül

35

**Akıllı Tarım Uygulamalarında Enerji Hasatlayan Kablosuz Sensör Ağlarında
Veri Toplama**

*Data Collection in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks in
Smart Agricultural Applications*

Ömer Melih Gül

45

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.

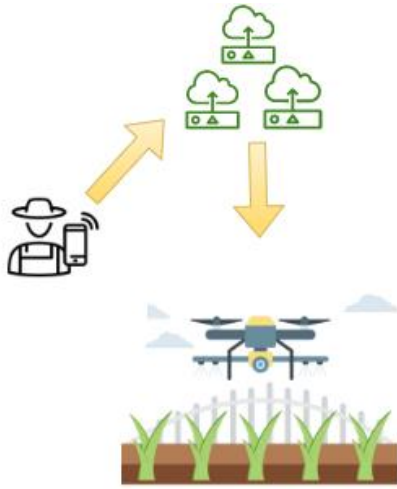
Akıllı sulamada damla sulama ve mikro sulama gibi hassas sulama teknikleri ön plana çıkmıştır [3]. Bu yöntemler suyu doğrudan bitki köklerine ileterek buharlaşma nedeniyle su kaybını azaltır ve verimli su dağılımı sağlar. Akıllı sulama

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.

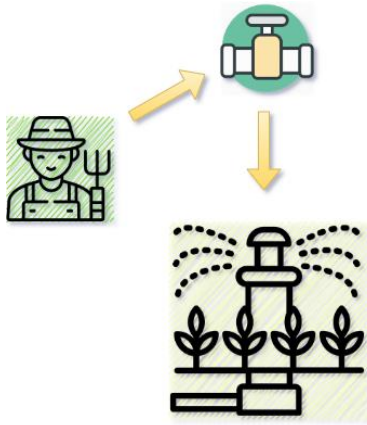
Genel olarak, akıllı sulamadaki son gelişmeler, Nİ bağlantısı, YZ algoritmaları, hassas sulama teknikleri, uzaktan algılama ve verileri birleştirerek tarımsal su yönetiminde devrim yarattı [7]. Bu ilerlemeler, su verimliliğini iyileştirme, mahsul verimini artırma ve artan su kıtlığı ve çevresel zorluklar 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 giriş yapıp, 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 bildirim 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:

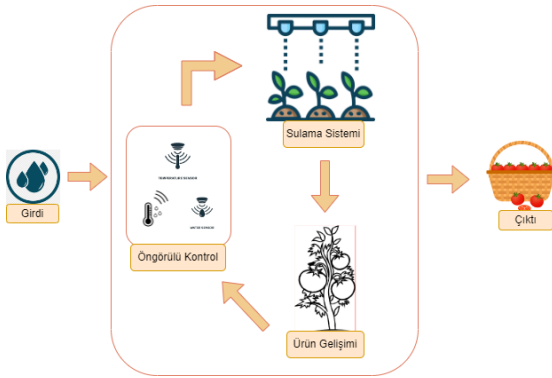
- **Kazanımlar:**
 1. **Su verimliliği:** Kapalı devre sistemler, sulamayı gerçek mahsulün ihtiyaçlarına ve gerçek zamanlı çevre koşullarına göre ayarlayarak su kullanımını eniyiler.
 2. **Hassasiyet:** Bu sistemler, suyu tam olarak ihtiyaç duyulan yere ulaştırarak su kaybını azaltır ve ürün sağlığını 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.



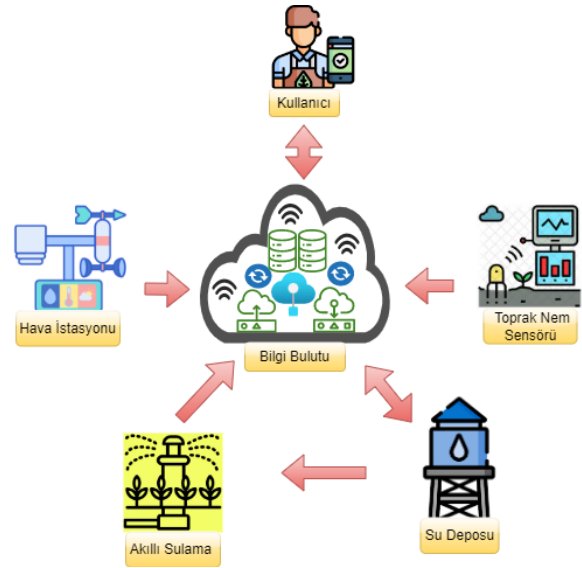
Şekil 3: Mahsulün büyüme aşamaları, toprak nemi, hava koşulları ve kullanılan su miktarı öngörülerek oluşturulan bir kapalı döngü sulama yöntemi.

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

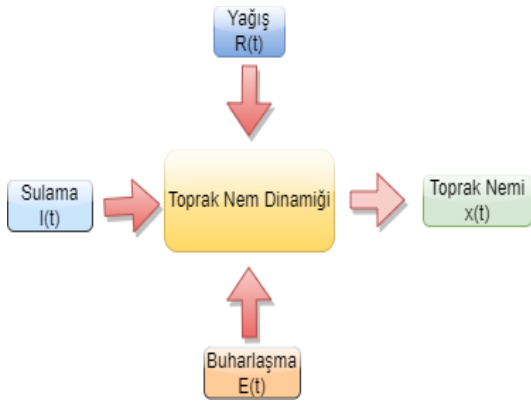
$$\text{rank}[B; AB; A^2B; \dots; A^{n-1}B] = n. \quad (3)$$

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]:

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

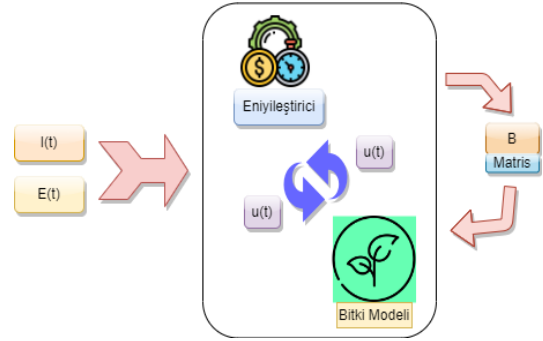
Burada, t zamanında $R(t)$, yağış miktarını $I(t)$, sağlanan su miktarını $E(t)$, bitki terlemesi (buharlaşma) su miktarını göstermektedir. Ek olarak η bir sabit değer olup derin sızma ve toprak nemi ile ilişkilendirilir.

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 çıkartmaktadır.

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.

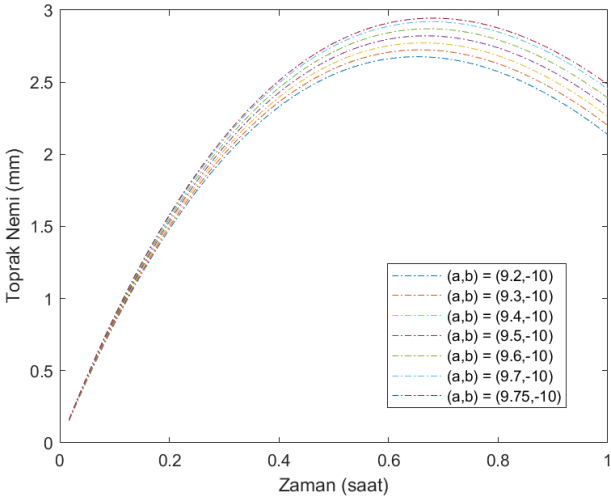
5. Sayısal Sonuçlar

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 $b < 0$

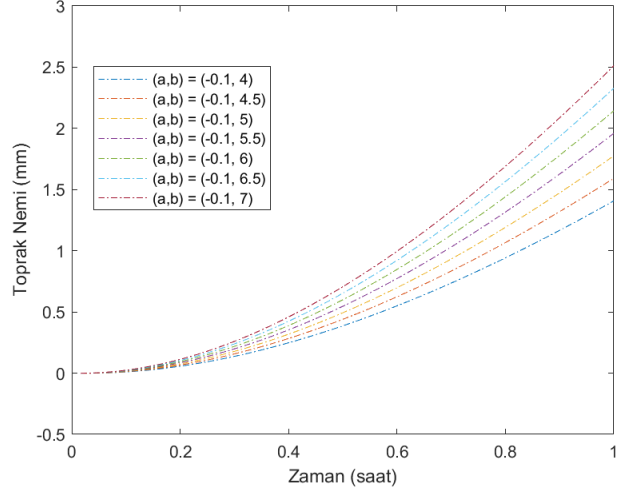
Bu kısımda araştıracağımız sayısal problem şöyledir: verilen başlangıç durumu $x(0) = 0.15 \text{ mm}$, için öyle $a > 0$ ve $b < 0$ var ki, (6) sisteminin çözümü $x(1) = 2.5 \text{ mm}$, durumunu sağlasın. Başka bir deyişle, öyle kontrol parametreleri, $a, b \in \mathbb{R}$, bulmalıyız ki, 1 saat içinde 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 $b > 0$

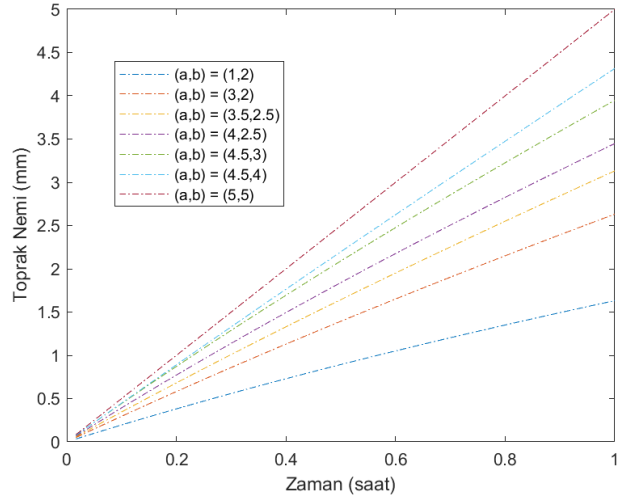
İkinci senaryo olarak araştıracağımız sayısal problem şu şekildedir: verilen başlangıç durumu $x(0) = 0.02 \text{ mm}$, için öyle $a < 0$ ve $b > 0$ parametreleri var ki, (6) sisteminin çözümü $x(1) = 2.5 \text{ mm}$, durumunu sağlasın. Burada, MATLAB R2021b sürümünü kullanarak Şekil 8'de, sistemin kontrol 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, Boğaziçi Üniversitesi (BOUN) Matematik Bölümü'nden lisans ve yüksek lisans derecelerini, Orta Doğu 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.

Akıllı Tarımda Dayanıkl Kontrol Stratejileriyle Toprak Nem Dinamiği Yönetimi

Soil Moisture Dynamics Management with Robust Control Strategies in Smart Agriculture

 Gökhan Göksu¹

¹Matematik 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.

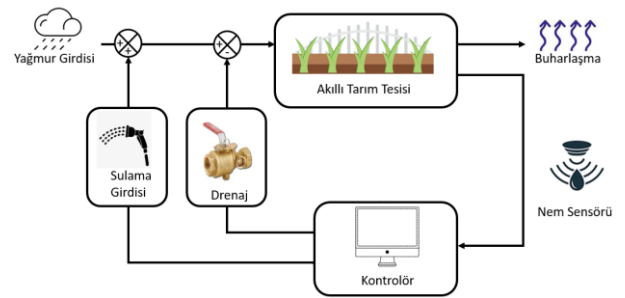
Bir diğer yaklaşım olarak, Zhang ve diğerleri [29], otomatik sulama sistemlerinin verimliliğini artırmak için veri tabanlı dayanıklı model öngörücü kontrol yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem, toprak nem değişkenliklerini anlamak ve belirsizlikleri ele almak için mekanik ve veri tabanlı

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_∞ kontrolünün dayanıklı sulama ve drenaj sistemleri konusundaki çalışmalarda eksik olduğu görülmektedir. Bu noktada, H_∞ 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

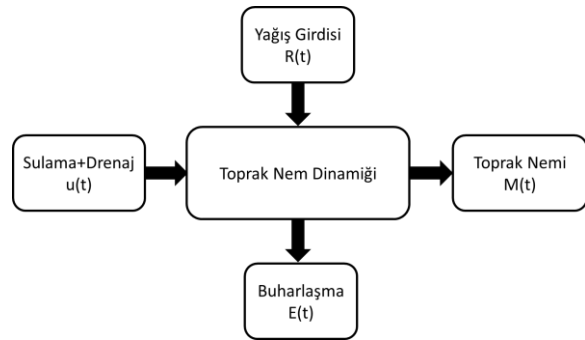
Çalışmanın amacı, toprak nem dinamiğini etkili bir şekilde yönetmek için dayanıklı kontrol stratejilerinin geliştirilmesidir. Bu amaçla, toprak nem dinamiği matematiksel modeli ele alınarak, kritik nem seviyesini korumak hedeflenmiştir.

Çalışmanın kontrol tasarım metodolojisinde, doğrusal sistemlerin dayanıklı kontrolünde yaygın olarak kullanılan H_∞ 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 adayı 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_∞ kontrolörü aşağıdaki gibi tanımlanır.

Tanım 2. (H_∞ kontrolörü): $\gamma > 0$ skaleri verildiğinde, aşağıdaki iki koşul geçerliyse, durum geri beslemeli kontrolörü (2), (1) için bir H_∞ 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 adayı 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_∞ 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 adayı 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:

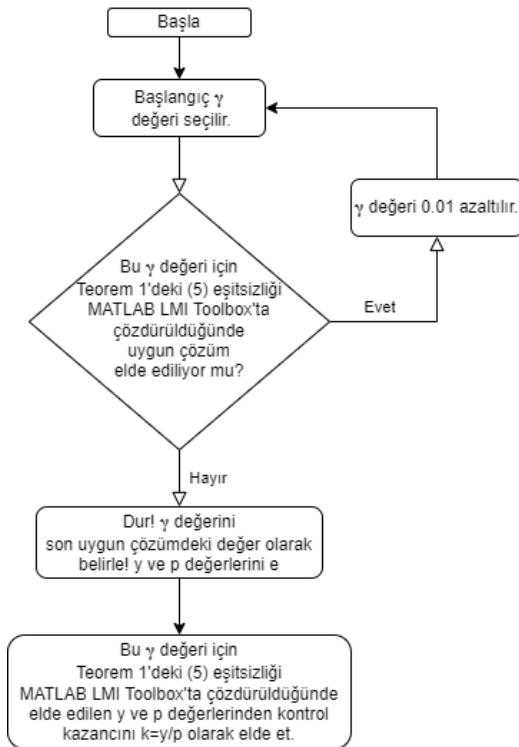
$$\dot{V}(t) + \Gamma(t) < 0 \quad (8)$$

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, γ değerini en küçükleyen uygun değeri bulabilmek için önerilen akış şeması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Teorem 1'in uygulanarak γ 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:

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

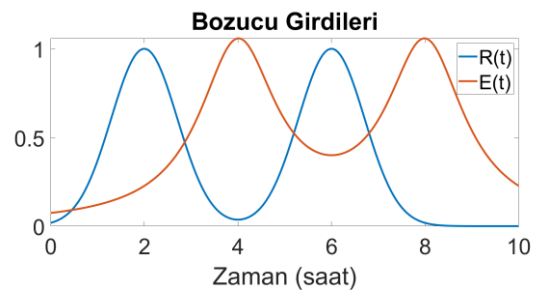
Bu amaçla, sistem parametreleri Tablo 1'deki gibi seçilmiştir.

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_∞ kontrolörü kazancı (11)'deki gibi elde edilir:

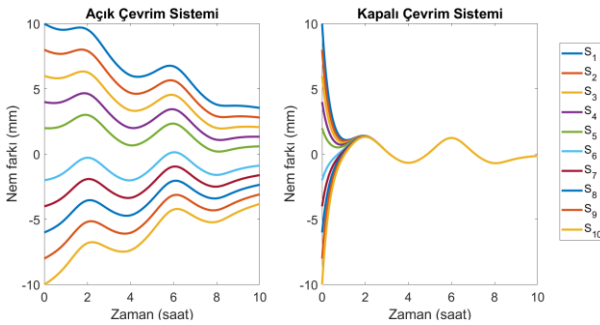
$$k = 2.6562 \quad (11)$$

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} |

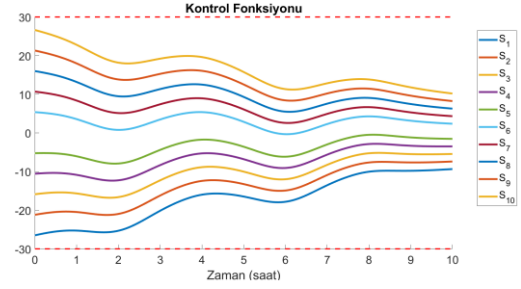
Bu alt senaryolara göre, iki tip durum ele alınmıştır. Birinci durumda kontrol girişi olmayan, $u(t) = 0$, açık çevrim sistemi (1) performansı benzetimi yapılmış, ikinci durumda ise elde edilen H_∞ kontrolörü kazancına göre kapalı çevrim sistemi (3) performansı benzetimi yapılarak, bu iki durum için 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_∞ 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_∞ 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:

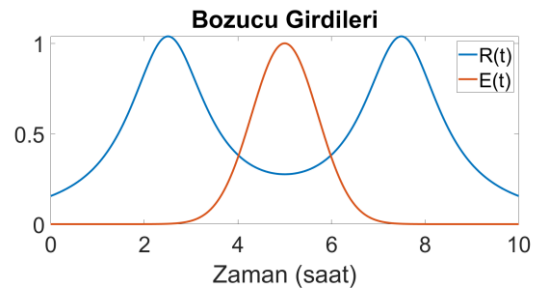
$$w(t) = \begin{bmatrix} R(t) \\ E(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(t-t_1)^2 + s_1} + \frac{1}{(t-t_2)^2 + s_2} \\ e^{-\frac{(t-t_3)^2}{\sigma_1}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

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 | σ_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 $w(t)$.

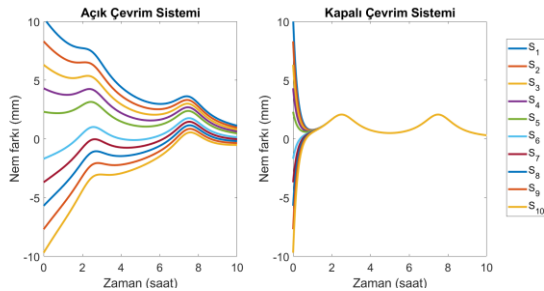
Bozucu girdisi yine karesi integrallenebilir fonksiyonlar sınıfından bir fonksiyon olarak seçilmiştir.

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.

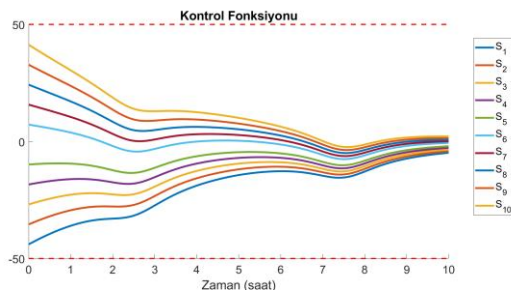
Bu alt senaryolara göre, yine iki tip durum ele alınmıştır. Birinci durumda kontrol girişi olmayan açık çevrim sistemi (1) performansı benzetimi yapılmış, ikinci durumda ise elde edilen H_∞ kontrolörü kazancına göre kapalı çevrim sistemi (3) performansı benzetimi yapılarak, bu iki durum için tüm benzetimler 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_∞ 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_∞ 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 sınaması 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.

Tarımsal Otomasyon Sistemleri için Muz Olgunluk Seviyelerinin Derin Öğrenme Yöntemleri İle Sınıflandırılması

Classification of Banana Ripeness Levels Using Deep Learning Methods for Agricultural Automation Systems

^{id} Sezgin Dulkadir¹, Gökhan Koray Gültekin¹ ^{id}

¹Elektrik - Elektronik Mühendisliği
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
sezgindulkadir@aybu.edu.tr, gkgultekin@aybu.edu.tr

Özet

Tarımsal üretimde kalite ve verimin artırılması ve maliyetlerin azaltılması için yüksek doğrulukla çalışan otonom sistemlerin kullanımı kaçınılmazdır. Ürün hasatının çok sayıda otonom robot sistemi tarafından farklı olgunluk seviyelerindeki ürünlerin toplanması şeklinde gerçekleştirilebilmesi için ürünlerin olgunluklarının yapay zeka yöntemleriyle tespit edilebilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, çoklu otonom robotik hasat sistemlerinde kullanılmak üzere muz olgunluk seviyelerinin otonom olarak sınıflandırılmasına yönelik üç farklı evrimsel yapay sinir ağı modeli (YOLOv5s, YOLOv8n, YOLOv8m) kullanılmıştır. Modeller, 6 sınıflı bir muz olgunluk seviyesi veri kümesi ile eğitilerek elde edilen test sonuçları yaygın kullanılan ölçütler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: tarımsal otomasyon sistemleri, muz olgunluk seviyesi, derin öğrenme, evrimsel yapay sinir ağları

Abstract

The autonomous systems that are working with high accuracy must be utilized in agriculture in order to increase the quality and the efficiency and reduce the costs in agricultural production. For carrying out the harvesting of products with different ripeness levels by a large number of autonomous robot systems, the ripeness of the products must be determined by artificial intelligence methods. In this study, three different convolutional neural network models (YOLOv5s, YOLOv8n, YOLOv8m) were used for autonomous classification of banana ripeness levels for use in multiple autonomous robotic harvesting systems. The models were trained with a 6-class banana ripeness level dataset and the test results are compared using widely used performance metrics.

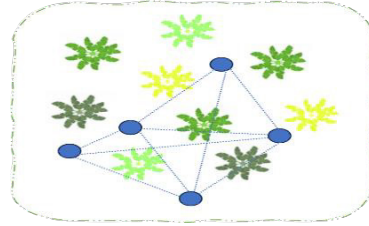
Keywords: agricultural automation systems, banana ripeness level, deep learning, convolutional neural networks

1. Giriş

Tropikal bir meyve olan ve 1000 civarında çeşidi olduğu bilinen muz, Güneydoğu Asya menşeli bir tarım ürünüdür. Dünyanın önemli mahsullerinden biri olarak 130'dan fazla ülkede, küçük ve büyük ölçekli birçok üretici tarafından yetiştirilmektedir [1]. Türkiye'de de muz yetiştiriciliği, ekonomik açıdan önemli bir gelir kaynağıdır. Özellikle son yıllarda gerek açık alanda gerekse örtü altı yetiştiriciliğinde üretimi gitgide artmaktadır. Ülkemizde meyveler ile içecek ve baharat bitkileri üretim

miktarı 2022 yılında bir önceki yıla göre ortalama %7,7 oranında artarken muz üretimi %12,9 oranında artmıştır [2].

Muzların olgunluk derecesi, gıda endüstrisi ve tüketiciler için önemli bir faktördür, çünkü muzlar farklı aşamalarda farklı tat, doku ve besin içeriği özelliklerine sahiptir [3,4]. Muz olgunluk tespiti, meyve endüstrisinde verimliliği artırmak ve tüketicilere daha kaliteli ürünler sunmak için önemli bir adımdır. Bu sınıflandırma işlemi çoğunlukla geleneksel olarak insan eliyle emek yoğun bir çalışma gerektirmektedir.



Şekil 1: Ürünleri olgunluklarına göre sınıflayarak koordineli olarak hasat yapan çok sayıda otonom robotun (mavi daireler) çalışması gösterilmektedir.

Ürün yetiştiriciliği çoğunlukla binlerce ağaçtan oluşan bahçelerde yapılmaktadır. Hasatın kısa sürede yapılabilmesi için çok sayıda otonom robotun eş zamanlı ve koordineli olarak çalışması gerekmektedir [5]. Robotlar üzerindeki kameralar vasıtasıyla aldıkları görüntülerinden ürünleri olgunluk seviyelerine göre sınıflandırır. Her robotun sadece aynı olgunluk sınıfındaki ürünleri toplayacağı varsayılmaktadır. Robotlar arası haberleşme ile hangi ağaçta ne olgunluk seviyesinde ürün olduğu ağ üzerinden tüm robotlarla paylaşılır. İlgili olgunluk seviyesindeki ürünleri toplamaktan sorumlu olan robot veya robotlar en uygun yol planlamasını yaparak ürünleri toplarlar. Yol planlaması, sıklıkla çalışılan gezici satıcı probleminde kullanılan yöntemler ile gerçekleştirilir.

Derin öğrenme, yapay zeka alanında son yıllarda büyük bir dönüşüm yaratmıştır ve tarımsal uygulamalarda da sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Palmiye yağı meyvesinin olgunluğunu sınıflandırmak ve çeşitli meyveleri tanımak için otomatik görüntü açıklama görev tekniğini uygulananır [6]. Önerilen yaklaşım, çiftçilerin meyve yöntemlerinin sınıflandırılmasını geliştirmelerine ve üretimlerini artırmalarına

yardımcı olur. Bu çalışma, YOLO'nun çeşitli versiyonları ile derin öğrenme tabanlı basit ve etkili modeller önermektedir.

Derin evrişimli sinir ağlarını kullanarak meyve tespitine yeni bir yaklaşım sunan [7], otonom bir tarım robotik platformunun hayati bir unsuru olan doğru, hızlı ve güvenilir bir meyve algılama sistemi oluşturmaktır. Meyve verimi tahmini otonom hasat için önemli bir unsurdur. Nesne tespitini gerçekleştirmek için son zamanlarda oldukça popüler olan daha hızlı R-CNN nesne dedektörünü kullanılmaktadır.

Bilgisayarlı görü ve derin öğrenme teknikleri kullanarak havadan alınan görüntülerden hasarlı mısır alanlarını tespit etmek için yapılan bir çalışmada [8], üç popüler nesne dedektörü (Daha hızlı R-CNN, YOLOv2 ve RetinaNet), bir alandaki hasarlı bölgeleri algılama yetenekleri açısından değerlendirilmiştir. Nesne dedektörlerinin performansları ortalama kesinlik ölçütü kullanılarak kıyaslanmıştır.

Derin öğrenme uygulamaları ve bunların tarımda hastalık teşhisi ve yönetimi için kullanımlarıyla ilgili eğilimler üzerine 70 araştırmaya kapsamlı bir genel bakış açısı [9]'de yer alırken, bitkilerde daha yüksek doğrulukta hasare tespiti, geliştirilmiş bir YOLOv5m tabanlı yöntemle [10]'da önerilmiştir. Önerilen yöntemin, orijinal YOLOv3, YOLOv4 ve YOLOv5m modellerinden önemli ölçüde daha iyi olduğu öne sürülmüştür.

Her geçen gün geliştirilen yöntemler ile nesne algılama ve sınıflandırma gibi birçok görsel tanıma probleminde başarılı sonuçlar elde edilebildiği gösterilmektedir. Ancak literatürde, güncel derin öğrenme yöntemleri ile muzların olgunluk derecesinin sınıflandırılması hakkında bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, bir otonom robotik hasat sisteminde yer almak üzere, derin öğrenme yöntemlerinin kullanılmasıyla muzların olgunluk derecesinin otomatik olarak ve yüksek doğrulukla belirlenmesi amaçlanmaktadır. Yapılan çalışma ile literatürde ilk kez derin öğrenme yöntemleri içerisinde YOLOv5 ve YOLOv8 [11] evrişimsel sinir ağı yapılarının farklı büyüklükteki modelleri, 6 sınıfa ayrılmış olan geniş bir muz olgunluğu görüntü veri kümesi ile eğitilerek muz görüntülerinin olgunluklarına göre yüksek doğrulukla sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde kabul gören farklı ölçütler ile karşılaştırılmıştır.

2. Derin Öğrenme ile Nesne Sınıflandırma

Derin öğrenme, büyük miktarda veriden öğrenme yeteneğine sahip sinir ağları kullanarak karmaşık problemleri çözebilen bir yapay zeka yaklaşımıdır. Önceden etiketlenmiş büyük veri kümeleri üzerinde otomatik öğrenme yetenekleriyle bilinen derin sinir ağları kullanarak pek çok karmaşık problemin çözümünde önemli başarılar elde edilmiştir. Derin öğrenme yöntemleri, karmaşık desenleri ve ilişkileri keşfetmek için çok katmanlı yapay sinir ağları kullanır ve genellikle büyük veri kümelerine dayanarak modelin parametrelerini optimize eder. Derin öğrenme yöntemlerinin nesne sınıflandırma [12] ve otomasyon sistemlerindeki [13] uygulamaları bulunmaktadır.

2.1. YOLO Evrişimsel Derin Öğrenme Sinir Ağı Yapısı

YOLO (You Only Look Once) [14] evrişimsel derin öğrenme yöntemlerinden biri olup, gerçek zamanlı nesne algılama ve

sınıflandırmada önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir. Diğer modellere kıyasla hızlı çalışır ve tek bir geçişle nesne tespiti yapar. Bu hızlı algılama yeteneği özellikle gerçek zamanlı çalışma ihtiyacı olan otonom sistemler gibi uygulamalarda büyük avantaj sağlamaktadır.

YOLO, bağlamsal ilişkileri dikkate alabilme yeteneğiyle öne çıkmaktadır. Görüntü ızgara hücrelerine bölünür ve her hücre üzerindeki nesnelere algılanır. Bu sayede nesnelere birbirleriyle olan bağlamsal ilişkileri doğrudan algılanabilir. Örneğin, bir nesnenin diğer nesnelere olan ilişkisi ve konumu kolayca tespit edilebilir. Bu özellik, nesnelere daha iyi anlaşılmasını sağlar ve nesne algılama performansını artırır. YOLOv8, sınıflandırmada sınırlayıcı kutu yitimi ve ikili çapraz entropi için Clou [15] ve DFL [16] yitim fonksiyonlarını kullanır.

2015 yılında çıkan ilk versiyonundan, 2023 yılında çıkan YOLOv8'e kadar akıllı tarım uygulamalarında yapılan birçok akademik çalışmada oldukça başarılı sonuçlar elde edilebildiği gösterilmiştir. Tarlalardaki yabancı otlar ve zararlıların tespit ve sınıflandırmasında [17], bitkilerdeki hastalıkların tespit ve sınıflandırmasında [18], ananas, elma çilek gibi meyvelerin olgunluk seviyelerinin sınıflandırmasında yüksek performans elde edilmiştir [19].

YOLOv5 ve YOLOv8 Tablo 1'de görüldüğü gibi farklı büyüklüklerde model yapılarına sahiptir. YOLOv5; küçükten büyüğe doğru s, m, l ve x takılarıyla adlandırılan 4 farklı modele sahipken, YOLOv8; küçükten büyüğe doğru n, s, m, l ve x takılarıyla adlandırılan 5 farklı modele sahiptir. Özellikle daha düşük donanım performansına sahip olan uygulamalarda küçük modeller daha hızlı sonuç vermeleri nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalarda tercih edilirler. Bununla birlikte küçük modellerin doğruluk performansı ise büyük modellere kıyasla bir miktar daha düşük olabilmektedir.

Tablo 1: YOLOv5 ve YOLOv8 modellerinin parametre sayıları.

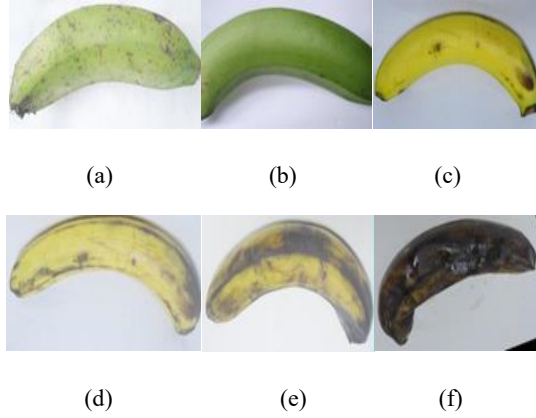
| Model | Parametre Sayısı | Model | Parametre Sayısı |
|---------|------------------|---------|------------------|
| YOLOv5s | 7,5M | YOLOv8n | 3,2M |
| YOLOv5m | 21,8M | YOLOv8s | 11,2M |
| YOLOv5l | 47,8M | YOLOv8m | 25,9M |
| YOLOv5x | 89,0M | YOLOv8l | 43,7M |
| | | YOLOv8x | 68,2M |

Bu çalışmada, YOLO'nun son sürümlerinden olan YOLOv5s, YOLOv8n ve YOLOv8m modellerinin muzların olgunluk seviyelerine göre sınıflandırılması amacıyla eğitilmesi ve testler sonucu elde edilen çalışma performanslarının karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

2.2. Muz Olgunluğu Veri Kümesi

Bu çalışmada kullanılan veri kümesi [20], 18257 muz meyvesi görüntüsünden oluşmaktadır. Veri kümesi, 16000 eğitim kümesi, 1500 geçirme kümesi ve 757 test görüntüsünden oluşmaktadır. Görüntülerin %87'si eğitim kümesine aitken,

görüntülerin %8 geçerleme kümesine, %4'ü de test görüntülerine aittir. Görüntüler 6 olgunluk sınıfına ayrıldı: taze olgun, taze olgunlaşmamış, olgunlaşmış, olgun, çürük ve olgunlaşmamış. Şekil 2, farklı sınıflar içeren muz görüntülerinin görselleştirmesini göstermektedir.



Şekil 2: Olgunlaşmamış (a), taze olgunlaşmamış (b), taze olgunlaşmış (c), olgunlaşmış (d), fazla olgunlaşmış (e) ve çürük muz görüntüleri (f).

Eğitim sürecinde kullanılan çeşitli veri kümesi bölmelerindeki (eğitim, geçerleme, test kümeleri) görüntü sayısı Tablo 2'de gösterilmiştir. Tablo 3, eğitim sürecinde kullanılan farklı muz olgunluk sınıflarında yer alan görüntü sayıları verilmektedir.

Tablo 2: Eğitim sürecinde kullanılan çeşitli veri kümesi bölmelerindeki görüntü sayıları

| | Eğitim Kümesi | Geçerleme Kümesi | Test Kümesi | Toplam |
|----------------|---------------|------------------|-------------|--------|
| Görüntü Sayısı | 16000 | 1500 | 757 | 18257 |

Tablo 3: Eğitim sürecinde kullanılan farklı muz olgunluk sınıflarındaki görüntü sayıları

| Sınıf | Görüntü Sayısı |
|-----------------------|----------------|
| S1. Taze Olgun | 1321 |
| S2. Taze | 940 |
| S3. Fazla Olgunlaşmış | 1657 |
| S4. Olgun | 2146 |
| S5. Çürük | 2656 |
| S6. Olgunlaşmamış | 768 |

2.3. Performans Ölçütleri

Eğitim aşamasında, genelleme yeteneğini değerlendirmek ve modeli kademeli olarak optimize etmek için, değerlendirme

indeksleri olarak kesinlik, duyarlılık, F1 puanı ve ortalama kesinlik değerleri kullanılmıştır.

Ortalama kesinlik, nesne algılama ve segmentasyon sistemlerinin performansını analiz etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ortalama kesinlik, daha hızlı R-CNN, YOLO, Mask R-CNN vb. nesne algılama modellerini değerlendirmek için kullanılan bir ölçüttür. Ortalama kesinlik değerlerinin ortalaması, 0 ile 1 arasındaki duyarlılık değerleri üzerinden hesaplanır.

Ortalama kesinlik, her sınıf için ortalama kesinlik bulunarak ve ardından birkaç sınıf üzerinden ortalama alınarak hesaplanır. Ortalama kesinlik, duyarlılık ve kesinlik arasındaki değiş tokuşu içerir ve hem yanlış pozitifleri hem de yanlış negatifleri dikkate alır. Bu özellik, ortalama kesinlikleri çoğu algılama uygulaması için uygun bir ölçüt yapar [21].

Kesinlik, gerçekte doğru olan tahmin edilen pozitiflerin oranını ölçer. Gerçek pozitif değerinin, gerçek pozitif ve yanlış pozitif değerlerinin toplamına bölünerek bulunur. Matematiksel olarak ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Kesinlik = \frac{Gerçek Pozitif}{Gerçek Pozitif + Yanlış Pozitif} \quad (1)$$

Duyarlılık, doğru tahmin edilen gerçek pozitiflerin oranını ölçer. Tüm Temel Gerçeklerden Gerçek Pozitiflerdir. Matematiksel olarak ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Duyarlılık = \frac{Gerçek Pozitif}{Gerçek Pozitif + Yanlış Negatif} \quad (2)$$

F1 puanı, kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortalamasını ifade etmektedir. Matematiksel olarak ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$F1 Puanı = 2 * \frac{kesinlik * duyarlılık}{kesinlik + duyarlılık} \quad (3)$$

Ortalama kesinlik, gerçek referans değerinin sınırlayıcı kutusunu algılanan kutuyla karşılaştırır ve bir puan verir. Puan ne kadar yüksek olursa, model tespitlerinde o kadar doğru olur. Matematiksel olarak ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Ortalama Kesinlik(mAP) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n AP_k \quad (4)$$

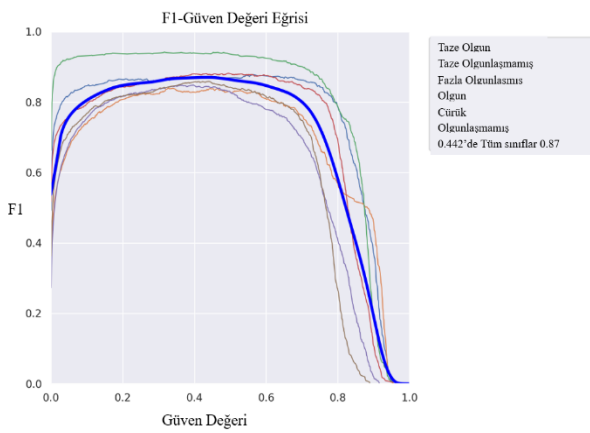
(4)'te yer alan denklemde, n sınıf sayısını temsil ederken, AP_k ise k sınıfının ortalama kesinliğini temsil etmektedir. Matematiksel açıdan, ortalama kesinlik hesaplama, tüm

sınıflardaki ortalama kesinlik puanlarının toplanmasını ve sonucun toplam sınıf sayısına bölünmesini gerektirir.

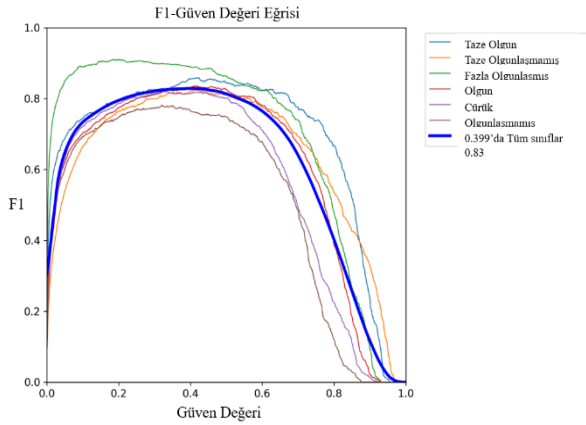
Ağırlıklı kesinlik, sınıf bazında elde edilen sonuçların örnek ağırlık ortalamasını alır. Matematiksel olarak ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\text{Ağırlıklı Kesinlik} = \sum_{i=1}^n w_i \times \text{Precision}_i \quad (5)$$

$$w_i = \frac{\text{Sınıf } i \text{ 'deki örnek sayısı}}{\text{Toplam örnek sayısı}}$$



Şekil 3: YOLOv8n ile yapılan çalışmanın F1-GD grafiği

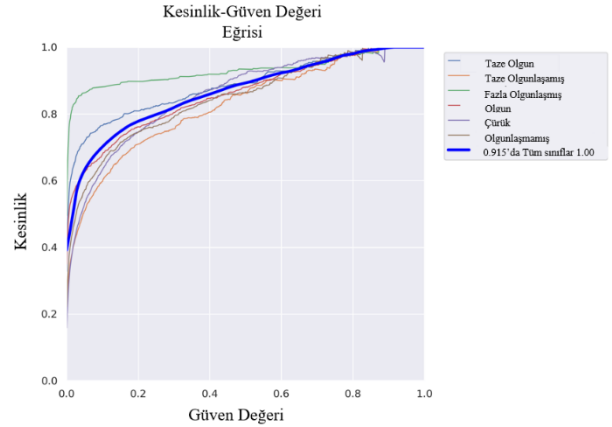


Şekil 4: YOLOv5s ile yapılan çalışmanın F1-GD grafiği

3. Deneysel Sonuçlar

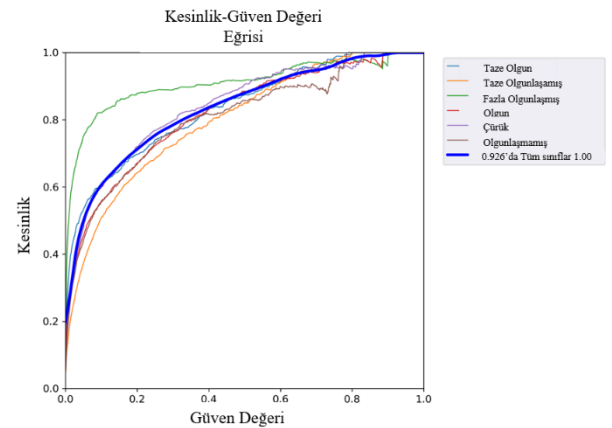
Taze muz meyvesinin kalitesi, tüketiciler ve meyve endüstrisi şirketleri için temel bir endişe kaynağıdır. Muzun olgunluk aşamasının etkinliği ve hızlı sınıflandırılması, kalitesinin belirlenmesinde en belirleyici faktörlerdir. Gelen farklı taze muz salkımlarının olgunlaşma evrelerinin doğru sınıflandırılması için görüntü işleme araçlarının tasarlanması ve uygulanması gerekmektedir. Muz meyvesinde olgunluk genel olarak meyvenin kullanım amacını, yeme kalitesini ve piyasa fiyatını etkiler. Bu bölümde, muzların olgunlaşma aşamalarını belirlemek için uygulanan en son derin öğrenme

algoritmalarına dayalı yöntemin sonuçları test edilmektedir. Farklı sahnelerdeki değerlendirme indeksleri, eğitim parametreleri ve nesne bulma etkileri açıklanmıştır.



Şekil 5: YOLOv8n ile yapılan çalışmanın K-GD grafiği

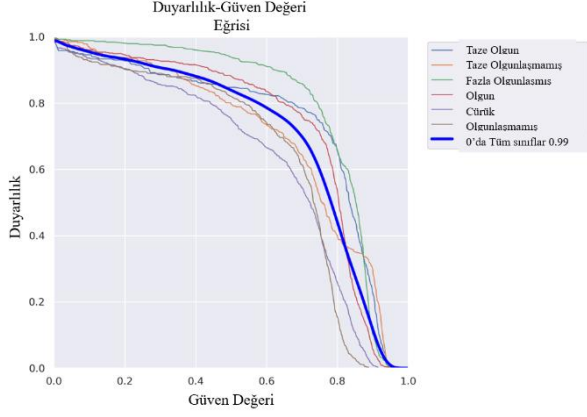
Yapay zekâ ve derin öğrenme projeleri üzerinde çalışanlar için etkileşimli, tamamen bulut tabanlı, kullanımı kolay ve ortak çalışmaya dayalı bir programlama ortamı olan Google Colaboratory ile YOLOv5s, YOLOv8n ve YOLOv8m algoritmaları kullanılarak eğitim süreci gerçekleştirildi. Eğitim süreci boyunca Dell marka bilgisayar, işletim sistemi olarak Windows 10 kullanılmıştır. Kullanılan bilgisayar 16 GB Ram ve Core i7 CPU modeline sahiptir. Eğitim süreci boyunca her üç model için epok sayısı 30, görüntü boyutu 800x800 piksel olarak belirlendi. Eğitim YOLOv5s için 5 saat 10 dakika 12 saniye sürerken YOLOv8n için 6 saat 25 dakika 16 saniye ve YOLOv8m 6 saat 54 dakika 48 saniye sürmüştür. Eğitimde parti büyüklüğü 8 olarak belirlenmiştir. Her iterasyonda 8 adet görüntü alınmıştır. Her epokun ağırlık sonuçları geçeri kümesinde doğrulandı.



Şekil 6: YOLOv5s ile yapılan çalışmanın K-GD grafiği

Derin öğrenme modeli her bir görüntüdeki tespit edilen nesnelere için bir güven değeri hesaplar. Bu güven değeri, görüntünün algoritma tarafından doğru algılanma olasılığını gösterir ve yüzde olarak verilir. Puanlar, farklı IoU (Birleşim Üzerinden Kesişme) eşiklerinde ortalama kesinlik üzerinden alınır [19]. Şekil 3,4,5,6 ve 7 güven değerine karşılık farklı ölçütlerin değişimini göstermektedir. Bir eşığe bağlı olarak, bir

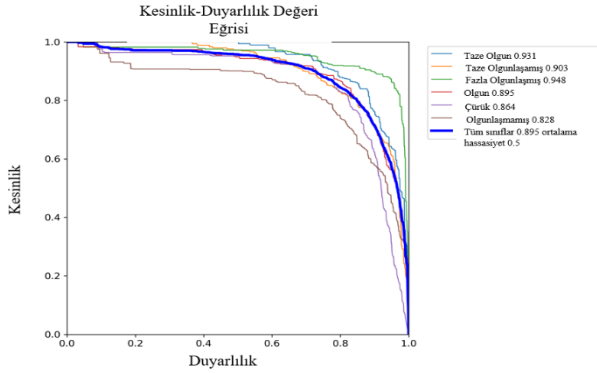
grup kesinlik ve modelin duyarlılığı elde edilebilir. Model için farklı eşikler ayarlandığında, çoklu kesinlik, duyarlılık ve F1 puanı grupları elde edilir böylece K-G, D-G ve F1-G eğrisi çizilebilir.



Şekil 7: YOLOv8n ile yapılan çalışmanın D-G grafiği

Şekil 3, YOLOv8n ile yapılan eğitim sırasında artan güven değeri ile F1 puanının nasıl değiştiğini göstermektedir. Model, %84'lik genel bir F1 puanına ulaştı ve bu ölçüt altında iyi bir doğruluk gösteriyor. Şekil 4, YOLOv5s ile yapılan eğitim sırasında artan güven değeri ile F1 puanının nasıl değiştiğini göstermektedir. Model, %81'lik genel bir F1 puanına ulaştı ve bu ölçüt altında iyi bir doğruluk göstermekle birlikte YOLOv8n'den daha düşük bir performans göstermektedir.

YOLOv8n ile yapılan çalışmanın, tüm muz olgunluk sınıfları için kesinlik ve güven değerleri Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi, 0,915'in üzerindeki bir güven değeri için kesinlik değeri 1 elde edilmektedir.

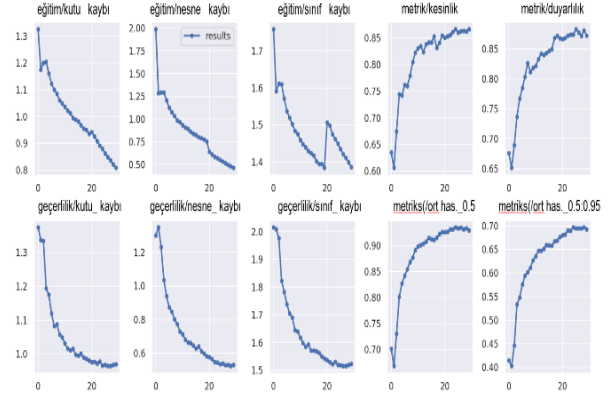


Şekil 8: YOLOv5s ile yapılan çalışmanın K-D grafiği

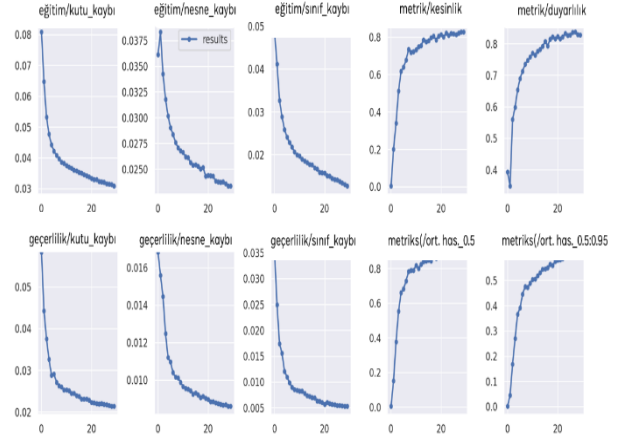
YOLOv5s ile yapılan çalışmanın, tüm muz olgunluk sınıfları için kesinlik ve güven değerleri gösterilmektedir. Şekil 6'da, 0,926'nın üzerindeki bir güven değeri için kesinlik değeri 1 elde edilmektedir.

Şekil 7 Duyarlılık-Güven eğrisinin sonuçlarını göstermektedir. Görselde yer alan sonuçlara göre, 0 güven değerinde tüm muz

olgunluk sınıflarının 0.99 duyarlılık değerine ulaştığı gösterilmektedir.



Şekil 9: YOLOv8n modeline sahip evrimsel sinir ağının performans eğitimi analizi çizim grafikleri.



Şekil 10: YOLOv5s modeline sahip evrimsel sinir ağının performans eğitimi analizi çizim grafikleri

Kesinlik-Duyarlılık eğrileri, farklı olasılık eşikleri kullanan bir tahmine dayalı model için gerçek pozitif oran ile pozitif tahmin değeri arasındaki değiş tokuşu özetler. Şekil 8'de yer alan sonuçlara göre, en yüksek skor fazla olgunlaşmış sınıfa aittir, en düşük skor 0.864 ile çürük sınıfa aittir. Tüm sınıflar 0.895 değerinde, 0.5 ortalama hassasiyet değerine sahiptir.

Şekil 9 muz olgunluk seviyeleri veri kümesi için YOLOv8n algoritmasının nesne dedektörünün ve 30 epok sınıflandırmanın hem eğitim hem de geçerleme kayıplarını gösterir. Eğitim ve geçerleme aşamasındaki kesinlik ve duyarlılık ölçütleri en yüksek %97,4 doğrulukta birleşirken, ortalama hassasiyet 0,5 eşik ile %95'te birleşir.

Şekil 10 muz olgunluk seviyeleri veri kümesi için YOLOv5s algoritmasının nesne dedektörünün ve 30 epok sınıflandırmanın hem eğitim hem de geçerleme kayıplarını gösterir. Eğitim ve geçerleme aşamasındaki kesinlik ve duyarlılık ölçütleri en yüksek %94,8 doğrulukta birleşirken, ortalama hassasiyet 0,5 eşik ile %95'te birleşir.

Tablo 4: YOLOv5s algoritması ile elde edilen değerlendirme sonuçları

| Sınıf | Kesinlik | Duyarlılık | F1 | Ort. Kesinlik 50 |
|-------|----------|------------|------|------------------|
| S1 | 0.82 | 0.84 | 0.83 | 0.93 |
| S2 | 0.78 | 0.87 | 0.82 | 0.90 |
| S3 | 0.90 | 0.89 | 0.89 | 0.95 |
| S4 | 0.65 | 0.88 | 0.75 | 0.90 |
| S5 | 0.75 | 0.83 | 0.79 | 0.86 |
| S6 | 0.76 | 0.79 | 0.77 | 0.83 |

Tablo 4 YOLOv5s algoritması ile elde edilen değerlendirme sonuçlarını göstermektedir. En yüksek kesinlik, duyarlılık, F1 ve ortalama kesinlik değeri S3 sınıfında kaydedilmiştir. En düşük kesinlik, duyarlılık, F1 ve ortalama kesinlik değerleri sırasıyla S4,S6,S4 ve S6 sınıflarında kaydedilmiştir.

Tablo 5: YOLOv8n algoritması ile elde edilen değerlendirme sonuçları

| Sınıf | Kesinlik | Duyarlılık | F1 | Ort. Kesinlik 50 |
|-------|----------|------------|------|------------------|
| S1 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.95 |
| S2 | 0.76 | 0.91 | 0.83 | 0.92 |
| S3 | 0.91 | 0.95 | 0.93 | 0.97 |
| S4 | 0.71 | 0.90 | 0.79 | 0.95 |
| S5 | 0.73 | 0.89 | 0.80 | 0.91 |
| S6 | 0.78 | 0.85 | 0.81 | 0.92 |

Tablo 5 YOLOv5s algoritması ile elde edilen değerlendirme sonuçlarını göstermektedir. Değerlendirme metriklerinin her biri için en yüksek değer S3 sınıfında kaydedilmiştir. En düşük kesinlik, duyarlılık, F1 ve ortalama kesinlik değerleri sırasıyla S2,S1,S4 ve S5 sınıflarında kaydedilmiştir.

Tablo 6 YOLOv8m algoritması ile elde edilen değerlendirme sonuçlarını göstermektedir. Eğitim YOLOv8n için 6 saat 25 dakika 16 saniye sürerken, YOLOv8m için 6 saat 54 dakika 48 saniye sürmüştür. YOLOv8m modeli, YOLOv8n algoritmasına göre daha uzun bir eğitim sürecine sahipken, elde edilen değerlendirme sonuçlarında belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Çalışmamızda, YOLOv8n modeli zaman ve performans açısından bazı sınıflarda YOLOv8m modeline göre daha başarılı bir sonuç elde etmiştir.

Tablo 6: YOLOv8m algoritması ile elde edilen değerlendirme sonuçları

| Sınıf | Kesinlik | Duyarlılık | F1 | Ort. Kesinlik 50 |
|-------|----------|------------|------|------------------|
| S1 | 0.88 | 0.90 | 0.89 | 0.94 |
| S2 | 0.79 | 0.88 | 0.83 | 0.93 |
| S3 | 0.91 | 0.96 | 0.93 | 0.97 |
| S4 | 0.71 | 0.89 | 0.79 | 0.94 |
| S5 | 0.74 | 0.92 | 0.82 | 0.91 |
| S6 | 0.78 | 0.87 | 0.82 | 0.91 |

Tablo 7: YOLOv5s, YOLOv8n ve YOLOv8m algoritmaları ile elde edilen ağırlıklı kesinlik sonuçları

| Model | Ağırlıklı Kesinlik |
|---------|--------------------|
| YOLOv5s | 0.77 |
| YOLOv8n | 0.78 |
| YOLOv8m | 0.79 |

Tablo 7 YOLOv5s, YOLOv8n ve YOLOv8m algoritmaları ile elde edilen ağırlıklı kesinlik sonuçlarını göstermektedir. 3 farklı model kullanılarak elde edilen ağırlıklı kesinlik değerleri, birbirine oldukça yakındır.



Şekil 11: YOLOv8n modeli ile eğitilen muz olgunluk seviyelerini içeren veri kümesindeki fazla olgunlaşmış

muzların tespitini göstermektedir. 0.9 güven skoru ile algoritmanın başarılı bir sonuç elde ettiğini göstermektedir.



Şekil 12: YOLOv5s modeli ile eğitilen muz olgunluk seviyelerini içeren veri kümesindeki farklı sınıflardaki muzların tespitini göstermektedir. Fazla olgun ve olgun sınıfındaki güven skoru 0.8 üzerinde sonuç vermektedir.

4. Sonuç

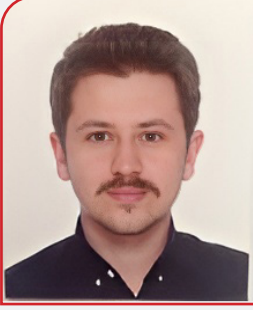
Bu çalışmada, çok robotlu otonom tarımsal hasat sistemlerinde kullanılmak üzere yenilikçi derin öğrenme temelli yöntemler kullanılarak muz olgunluk seviyesi sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Özellikle robotik sistemlerdeki kısıtlı işlem kaynakları nedeniyle gerçek zamanlı sınıflandırma yapılabilmesi için küçük modellerin kıyaslaması yapılmıştır. İki farklı evrimsel yapay sinir ağı temelli yöntemin üç farklı büyüklükteki modeli (YOLOv5s, YOLOv8n, YOLOv8m) altı sınıflı bir veri kümesi ile eğitilmiş ve her bir sınıf için 0.9 üzerinde bir ortalama kesinlik değeri ile sınıflandırma performansı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, daha küçük bir model olan YOLOv8n modeliyle daha eski bir model olan YOLOv5s'den daha yüksek ortalama kesinlik değerlerine ulaşılabildiğini göstermiştir. Gerçekleştirilen otonom muz olgunluk seviyesi sınıflandırma sisteminin, kurgulanan otonom robotik hasat sisteminde kullanılması ile fire ve hasat maliyetlerinde önemli bir düşüş ile muz tarımında verim artışı elde edilmesi beklenmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Boz, F. ve Hüseyinli, N. "Türkiye'de Muz Üretimi ve İthalatına Yönelik Bir Tahmin Modellemesi." Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi 1.1-2 2019: 63-82.
[2] <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2022-45504>, 30.12.2022, Erişim tarihi: 06.07.2023.
[3] Phillips, K. M. et al. "Dietary fiber, starch, and sugars in bananas at different stages of ripeness in the retail market." *PLOS ONE*, vol. 16, no. 7, 2021.

[4] Yap, M. et al. "The effects of banana ripeness on quality indices for puree production," *LWT*, vol. 80, pp. 10–18, 2017.
[5] Gul, O.M. ve Erkmn, A. M. "Energy-Aware UAV-Driven Data Collection With Priority in Robotic Wireless Sensor Network," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 15, 2023.
[6] Mamat, N., Othman, M. F., Abdulghafar, R., Alwan A. A., ve Gulzar Y., "Enhancing image annotation technique of fruit classification using a deep learning approach," *Sustainability*, vol. 15, no. 2, 2023.
[7] Sa, I., Ge. Z., Dayoub, F., Upcroft, B., Perez, T. ve McCool, C. "DeepFruits: A Fruit Detection System Using Deep Neural Networks," *Sensors*, vol. 16, no. 8, 2016.
[8] Hamidisepehr, A., Mirnezami, S. V. ve Ward, J. K., "Comparison of Object Detection Methods for Corn Damage Assessment Using Deep Learning," *Transactions of the ASABE*, vol. 63, no. 6, 2020.
[9] Ahmad, A., Saraswat, D. ve Gamal, A. E. "A survey on using deep learning techniques for plant disease diagnosis and recommendations for development of appropriate tools," *Smart Agricultural Technology*, vol. 3, 2023.
[10] Dai, M., Dorjoy, M. M. H., Miao, H. ve Zhang, S. "A new pest detection method based on improved YOLOV5M," *Insects*, vol. 14, no. 1, 2023.
[11] Jocher, G., Chaurasia, A., ve Qiu, J. "YOLO by Ultralytics" <https://github.com/ultralytics/>, 2023.
[12] Uysal, F. ve Erkan, M. "Evrimsel Sinir Ağları Temelli Derin Öğrenme Modelleri Kullanılarak Beyin Tümörü Manyetik Rezonans Görüntülerinin Sınıflandırılması" *EMO Bilimsel Dergi* 13.2: 19-27 2022.
[13] Koç, İ. et al. "Raylı Sistemlerde Peron Ayırıcı Kapı Sistemi İçin Yapay Sinir Ağı Tabanlı Hata Teşhis Yaklaşımı." *EMO Bilimsel Dergi* 13.1: 13-22 2022.
[14] Redmon, J., Divvala S., Girshick, R. ve Farhadi A., "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection" *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, USA, 2016.
[15] Zheng, Z., Wang, P., Liu, W., Li, J., Ye, R. ve Ren, D. "Distance-IoU Loss: Faster and Better Learning for Bounding Box Regression," *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 34, no. 07, 2020.
[16] Li, X. et al., "Generalized Focal Loss: Learning Qualified and Distributed Bounding Boxes for Dense Object Detection," *Neural Information Processing Systems*, vol. 33, 2020.
[17] Liu, B. ve Bruch, R. "Weed Detection for Selective Spraying: a Review," *Current Robotics Reports*, vol. 1, no. 1, 2020.
[18] Liu, J. ve Wang, X. "Tomato Diseases and Pests Detection Based on Improved Yolo V3 Convolutional Neural Network," *Frontiers in Plant Science*, vol. 11, 2020.
[19] Sharma, A. K., Nguyen, H. H. C., Bui, T. X., Bhardwa, S. ve Thang, D. V. "An Approach to Ripening of Pineapple Fruit with Model Yolo v5," *2022 IEEE 7th International conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 2022.
[20] <https://universe.roboflow.com/fruit-ripening/banana-ripening-process/dataset/2>, 15.03.2022, Erişim tarihi: 05.07.2023.
[21] Ren, S., He, K., Girshick, R. ve Sun, J. "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks," *arXiv (Cornell University)*, 2015.

Özgeçmişler



Sezgin Dulkadir, Lisans ve yüksek lisans eğitimini Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde sırasıyla 2017 ve 2020 yıllarında tamamladı. Şu anda 2020 yılında başladığı Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde doktora eğitimine devam etmektedir. Halen Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi'nde Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında görüntü işleme, yapay zeka ve makine öğrenmesi yer almaktadır.



Gökhan Koray Gültekin, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde tam zamanlı öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde 7 yıl araştırma görevlisi olarak çalışmış ve aynı zamanda doktora ve yüksek lisans eğitimlerini aynı bölümde sırasıyla 2016 ve 2010 yıllarında tamamlamıştır. Doktora sonrasında 3 yıl süresince ODTÜ Görüntü Analiz Merkezinde (OGAM), Aselsan ve Roketsan firmaları ile ortak olarak gerçekleştirilen görüntü işleme odaklı çeşitli savunma sanayi projelerinde tam zamanlı bilimsel proje uzmanı olarak çalışmış ve aynı zamanda ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Ankara ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti kampüslerinde yarı zamanlı öğretim üyesi olarak çeşitli dersler vermiştir. Robotik sistemler, FPGA, GPU vb. yüksek hızlı sinyal işleme donanımları, görüntü ve video işleme, makine öğrenmesi ve yeni nesil olay tabanlı görüntüleme sistemleri alanlarında araştırmalar yapmaktadır.

Akıllı Tarım Uygulamalarında Robotik Kablosuz Sensör Ağlarında Çoklu Robot Görev Tahsisi

Multi-Robot Task Allocation in Robotic Wireless Sensor Networks in Smart Agricultural Applications

 Ömer Melih Gül

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
Email: omermelih.gul@bau.edu.tr

Özetçe—Bu makale, akıllı tarım uygulamalarında bir baz istasyonu ve birkaç robot kümesi içeren bir robot ağ kümesinde enerji farkında çok robotlu görev tahsisi (ÇRGT) problemi incelemektedir. Her turda M sayıda görev ve $M+1$ robot bulunur. Bir robot, küme başkanı seçilir ve o turdaki her robota bir görev verir. Kalan M robotlarından veri toplar ve bunu baz istasyonuna gönderir. Bu çalışma, her bir düğümün seyahat mesafesi, her görev için gereken enerji, pil seviyesi ve enerji toplama kapasitelerini göz önünde bulundurarak M görevlerini kalan M robotlarına optimum veya ideale yakın olarak tahsis eder. Bu makale, makine öğrenmesi tabanlı yeni bir algoritma tanıtmaktadır. Performansı, 5 görev içeren 6-robotlu ve 10 görev içeren 11-robotlu senaryo için farklı enerji hasatlama yöntemleri altında incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler — Çok robotlu sistemler, görev tahsisi, kablosuz ağlar, enerji toplaması

Abstract—This paper studies an energy-aware multi-robot task-allocation (MRTA) problem in a robot network cluster with a base station and several clusters of robots in smart agricultural applications. Each round has M number of tasks and $M+1$ robots. A robot is elected cluster head and assigns one duty to each robot in that round. It gathers data from the remaining M robots and sends it to the BS. This work allocates M tasks to the remaining M robots optimally or near ideally by considering each node's distance to travel, energy required for each task, battery level, and energy-harvesting capabilities. This paper introduces a new machine learning-based algorithm. Its performance is examined under different energy-harvesting methods for 6-robot for 5 tasks and 11-robot scenario for 10 tasks.

Keywords — Multi-robot systems, task allocation, wireless networks, energy harvesting

I. GİRİŞ

Geçmiş zamanda, tarımda işçiler yabancı otları tohumları ekmeden evvel doğrudan tespit etmekteydi. Gelişen tarım teknolojisiyle beraber insan emeği bugünkü tarımda ise oldukça azdır. Çiftçiler başka tarlalara taşınması gıda üretimini zarara uğratmıştır.

Uzmanlar, nüfus arttıkça, arazi küçüldükçe ve doğal kaynakların azalmasıyla kendisine yeterli akıllı tarıma daha çok odaklanmaktadır; bu amaçla çözümler üzerine çalışmaktadır. Algoritmaların bir arada uyumlu biçimde çalışması, sistem genelinde nesnelerin interneti temelli gözetimini etkinleştirir.

Bitki, toprak ile çevreyi iyi bilir. Melez tohum ve yapay kompost verimlilik artırmaktadır. İklim, hava, su, tohum ve kompost ile çiftçilik etkilenmektedir. Bu etkenlerden iklim kontrol edilememektedir; havayı, suyu dağıtır. Gübre ve tohum seçimi ise yönetilebilmektedir. Bu yönetilebilen etkenler de doğru seçim yapabilmek için akıllı tarıma olan ihtiyacı ortaya koymaktadır [1].

Tarımda yeni robot teknolojileri yaygınlaşmaktadır. Buna örnek olarak birkaç çalışma gösterilebilir. Otonom tarımsal robotlarına yapılan büyük yatırımlar ile modern çiftlikler üretkenlik artışı hedefleyebilmektedir. Tarımsal çalışma ortamının karmaşıklığı ve çeşitliliği, mevcut makine tasarımıyla engellerin aşılmasını zorlaştırmaktadır. [2]'deki araştırma, sera zorluklarına karşı mobil bir robot platformunun inşa edilmesini ve kontrol edilmesini incelemektedir. [3]'deki çalışma, çoklu yapay zekalı derin öğrenme sistemi, robot işletim algoritması ve VPN tabanlı ağ ve güvenlik iletişimi sunmaktadır. [4]'e göre, meyve üretimi, meyve bahçesi koşulları ve ağaç türlerinin çeşitliliği nedeniyle fiziksel emek gerektirdiğinden, makineleşme ve otomasyon gecikmiştir. [5]'deki çalışma, robotik kollu bir meyve toplama cihazı önermiştir. Meyve hasat eden robot, son efektörleri alt kısmına yerleştirmeden önce meyvenin konumunu belirlemek için sensörleri ve bilgisayar görüşünü kullanmaktadır. Armut ve elmalar sahada bu teknikle bağımsız olarak tespit edilmiş ve toplanmıştır.

Akıllı tarım, birçok fayda sağlasa da bunu yapabilmeyenin de zorlukları ve ortaya çıkan problemler vardır. Bunlardan bir tanesi de akıllı tarımda kullanılan sensörlerin (algılayıcılar) ve robotların uyumlu biçimde görev yapabmesidir.

Bu giriş bölümünün kalan altbölümlerinde, öncelikle incelenen problemin güdülenmesi verilmektedir. Sonraki alt bölümde, bu makalede ele alınan probleme yakın (benzer problemleri inceleyen) makalelerden bahsedilmiştir. Sonraki altbölümde, makalemizde literatüre yapılan ana katkılar özetlenmiştir. Son altbölümde ise, makalenin sonraki bölümlerinin organizasyonu verilmiştir.

A. Güdüleme

Kablosuz sensör ağları (KSA), tarım gözetimini, çevrenin gözetimini, trafiğin gözetimini, hava trafiğinin kontrolünü, fiziki güvenliği, sanayi üretim otomasyonu, sağlık hizmetlerini, akıllı şehirleri ve dağıtık robotları kapsayan uygulamaları olan kablosuz haberleşen akıllı ve ucuz küçük boyutlu sensörleri kullanmaktadır. [6,7].

Çok sayıda ucuz, pilli kablosuz düğüm, ortamlarını KSA'lerle izlemektedir. Kablosuz sensörler ve robot ağları artık zengin kaynaklı hareketli robotlar içermektedir. Tehlikeli ortamlarda dahi robotlar, otomatikleştirilmiş görevleri insan yardım etmeden tamamlayabilmektedir. Durağan sensörler, volkanik ortamdaki gazların yoğunluğu, sıcaklık ve diğer parametreleri ölçebilirler. Bu parametreler görece değiştiğinde acil bir durum oluşmaktadır. Termal kameraları ve sismometreleri olan bir robot olayları incelemelidir [8].

Yakın zamanda, tehlike içeren bölge temizlemek, tarla hasatı, alanın keşfedilmesi, savaşın gözetimi, arama ve kurtarma görevleri gibi uygulama alanlarında robot konuşlandırılması üzerinde çalışılmıştır. Kompleks görev alanları başarısızlığa karşı duyarlıdır ve buralarda görev tamamlanması yavaş olur. Böyle durumlarda bir robotun yerine çok robotlu sistemler kompleks görevler tamamlamak için daha iyi bir çözüm olabilir [9].

Robotik ve KSA 20 yıldır oldukça fazla çalışmada incelenmiştir. Bununla birlikte, bu bilimsel alanın kesişimi, araştırmacılara henüz keşfedilmemiş birçok potansiyel araştırma yönü sağlamaktadır. Robotlar ve kablosuz sensörler birbirini tamamlamaktadır. [10] çalışmasında KSA'da robotik uygulamaları incelenmiştir. [12]'e göre robotik ve KSA'nın işbirliğinden oluşan RKSA, işbirliğine dayalı kontrol, öğrenme ve adaptasyon yoluyla belirli iletişim performansı gereksinimlerini karşılayıp sürdürürken belirli algılama hedeflerine ulaşmayı amaçlayan otonom ağ bağlantılı çok robotlu bir sistemdir. Robotik ve KSA, ulaşım, hava tahmini, sağlık, madencilik, tarım, çevre, otonom sürüş, arama kurtarmada kullanılır [11,12].

Çoklu robot sistemleri, bağımsızca çalışmak için çok robotlu görev tahsisi (ÇRGT) problemini çözmelidir. Temel doğrusal atama problemi, tüm etkenlerin getirilerini eniyileştiren (ya da maliyeti enazaltan) görevlere birebir etken atama bulmak biçimindedir [13].

Otonom keşfetme [13], lojistik [14], insansız arama ve kurtarma [15], keşfetme [16] gibi alanlarda ÇRGT

problemi ortaya çıkabilir. ÇRGT NP-zor bir problem olarak kabul görmektedir [17, 18]. Önerilen yöntemler zamansal karmaşıklık-ters özelliğe maliktir. Makalemiz, tarım uygulamalarını, çok robotlu sistemini ve görev dağıtımını düşünerek tasarlamıştır.

Robotlar, bir haberleşme ağında sayıları az, pil değişimi zor ve pahalı cihazlardır. Bu pil değişimleri için de genelde başka robotların kullanılmaktadır. Bu anlamda, bir robot ağının ömrünün olabildiğince uzaması, bu pil değişimi ve diğer bakımları daha seyrek (daha uzun zaman aralıklarıyla) yapmak anlamına gelmektedir. Bu da pil değişimi gibi ek işleri yapan robotların daha az kullanımı ve daha ekonomik çözüm anlamına gelmektedir. Özellikle, tarım gibi ürün maliyetlerinin olabildiğince azaltılmaya çalışıldığı bir alanda verimli bir çoklu robot görev tahsis algoritması, ekonomik olarak belirgin bir katkı verebilir. Tarımda robotların kullanılması, tarımda işletme maliyetlerini ve tepki sürelerini azaltmaktadır [19].

Enerjide verimlilik, çoklu robot sisteminde ağ ömrünü artırmaktadır. Bu makale, her robotun aldığı mesafe, pil seviyesi ve tahmini hasatlanan enerjiyi değerlendirmektedir.

Bu çalışmada incelenen probleme genel bir yaklaşım önerebilmek için daha genel bir robot kümesi ele alınmıştır. Bu robot kümesinin haberleşmesine çok sınırlama getirmesek de biraz geniş bir alanda görev yaptığını düşünülürse robotların RF veya WiFi ile haberleştiği düşünülebilir (Tarımsal uygulamalarda Bluetooth'un yetersiz kalması beklenebilir).

B. Önemli Katkılarımız

Bu makale, [29]'daki bildirinin genişletilmiş halidir. Makalemizin literatüre esas katkısı şu şekilde özetlenebilir:

- Bilindiği kadarıyla, bu makale tarım uygulamalarında kullanılan ve enerji hasatlayabilen robotlar için görevlerin tahsisi üzerine ilk çalışmadır.
- ÇRGT eniyileştirmemiz, her robotun göreve mesafesini, görevin tamamlanması için gerekli enerjiyi, pil seviyesini ve enerji hasat yeteneğini tahmin edebilmektedir.
- Bu makalede makine öğrenmesi tabanlı ÇRGT yaklaşım sunulmaktadır.

C. Teşkil

Makalemiz şu biçimde teşkil edilmektedir. Bölüm II makaleyle benzer çalışmaları sunulmaktadır. Bölüm III sistemin modelini ve problemi tanıtır. Bölüm IV'te, yeni ÇRGT yaklaşımı tanıtılmaktadır. Bölüm V, 5 ve 10 robot durumlarını farklı enerji hasatlama modelleri ile aynı sayıda göreve sahip durumlarda ÇRGT algoritmalarını değerlendirir. Bölüm VI, makaleyi özetler ve gelecek problemleri önermektedir.

II. İLGİLİ LİTERATÜR

Bu bölümde son yıllarda gelişen çok robotlu görev tahsisi (ÇRGT) probleminin literatüründeki ilgili çalışmalara değinilmektedir.

[20]'deki çalışmada Macar (Hungarian) yöntemi, çoklu robot bir sistemindeki temel bir ÇRGT sorununa merkezi yapıda bir en iyi çözümdür. Bu çözüm, merkeziyetçi yaklaşımın sınırlamasına maliktir. Örneğin, topolojide dinamik değişime yavaş reaksiyon gösterirler. Bu sebeple, dağıtık algoritmalar pratik çözümler olarak sunulmaktadır.

[21]'deki çalışma, çok robotlu bir sistemde bir ÇRGT problemi incelemektedir. Bu sistem, görevler ile robotların aynı sayıda olduğunu ve her robotun tek görev yapabileceğini varsaymaktadır. Makalemiz, merkeziyetçi ve dağıtılmış algoritmalar arasında iyi bir değiş tokuş sağlaması nedeniyle robotlar görev almak amacıyla teklifine izin veren, dağıtılmış ihale tabanlı bir ÇRGT yöntemi önermektedir.

[22]'deki çalışma, bir ÇRGT problemi incelemiştir. Herhangi bir robot, her turda bir ya da birden çok göreve atanabilmektedir. Ek olarak, bu çalışmada sensörlerin görevleri algıladığı ve bunların robotlara bildirildiği dağıtık bir kablosuz sensör ağ senaryosu ayrıca araştırılmıştır. Robot-görev çifti arasında ikili değiş tokuşlar, ikili mesafe tabanlı bir eşleştirim yöntemi kullanıp robotların aldığı toplam yol uzunluğu azaltılmıştır.

[23]'teki çalışma, bir çoklu robot sisteminde görevlerin ayrı gruplarla oluşturduğu ve robotların görev içinde başarabileceği iş sayısında bir sınırlamanın var olduğu dağıtık bir çevrimdışı ÇRGT problemini incelemiştir. Hedef, görevleri robotlara atayıp tüm robot getirilerinin toplamını enükseltmektir. Yazarlar, merkeziyetçi, merkeziyetçi olmayan ve dağıtık ihaleye temelli çözümler önermektedir.

[24]'de, ayrı değişken kullanmış çok, doğrusal olmayan kritere malik bir robotlu bir görev, robot, süresi uzatılmış atamak ve ÇRGT problemi tanımlanmıştır. Bu probleme yönelik yaklaşımlar, yol mesafesini, görevi tamamlama süresini ve enerji fizibilitesini eş zamanda en iyileştirmektedir. Yöntemler, sadece termogüneş enerji santraline değil, lineer olmayan bir maliyet işlevine malik çok kriterli ÇRGT problemlerine uygulanabilmektedir. Genetik algoritma, geniş ölçekli bir problem için global optimuma çabuk ulaşmaktadır. Hesaplamak kapasitesini gözönünde bulundurularak, parametrelerin ayarlaması basit biçimde hesaplama süresi ve doğruluk arasında değiş tokuş yapabilmektedir.

[25], program tabanlı bir ÇRGT problemi inceler. Bu problemin çözümü için kombinatorik eniyileştirmek NP-zor bir yaklaşımdır. Bu çözüm de, dağıtık bir ÇRGT için altmodülerliği ve görevlerin örneklemelerini kullanmaktadır. Çözümsel bakımdan, çokterimli zamanda tekdüze altmodüler için eniyi çözümün yarısını ve tekdüze olmayan altmodüler için çeyreğini

garantileyebilir. Performansı değerlendirmek ile kuramsal incelemeleri doğrulama amacıyla iki ÇRGT durumunun benzetimi yapılmıştır. Görece az işlem karmaşıklığıyla tekdüze ve tekdüze olmayan durumda güncel önerilen yöntemlerden daha iyi başarımlar sergilediği gösterilmektedir.

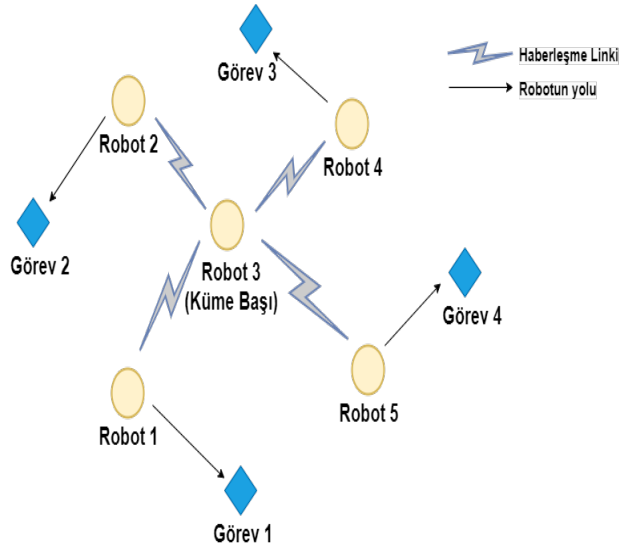
III. SİSTEM MODELİ VE PROBLEM TANIMI

Bu bölümde incelenen iletişim sisteminin modeli sunulmaktadır. Sonrasında, bu sisteme göre incelenen problem tanımlanmaktadır.

A. Sistem Modeli

Bu makalede, çok mobil robot içeren bir robot ağını ele almaktadır. Bu sistemde küme başı robot diğer robotların herbirine bir görev tahsis etmektedir; bunun için de bu robotlarla farklı haberleşme kanalları üzerinden girişim olmadan haberleşebilmekte ve görevleri sonunda değerlendirme yapmak için onlardan veri toplamaktadır.

Şekil 1, bir çoklu robot sisteminin kurulumunu ve burada atanan görevleri göstermektedir.



Şekil 1. Robot 3'un küme başı olduğu toplamda 5 robottan oluşan bir çoklu robot sisteminde 4 robota 4 görevin olduğu çoklu robot görev tahsisi problemi. Burada, küme başı robot diğer robotlara görev tahsisi etmektedir.

S , robotların indeks kümesidir. $M + 1$ robottan biri küme başı robot olarak seçilir. Kalan M sayıda robotlar için her turda M görev bulunmaktadır. Eğer i . robot t . turunda küme başıysa $H(t) = i$. Küme başı robot, çok robotlu sistemdeki kalan M robottan verimi toplar. $E_i^h(t)$, i . robot tarafından t . zaman diliminde hasatlanan enerjidir ve $B(t)$, robotun pilindeki t . Zamanında kalmış enerjidir.

Enerji farkında çok robotlu görev tahsisi, eşleşen bir gönderme problemidir. $M - to - M$ görev tahsis (ya da eşleştirim) algoritması şu şekilde tanımlanmaktadır.

Tanım 1. Bir $M - to - M$ görev tahsis algoritması, t . turundaki i . robota j . görev atanmaktadır. t . tur için eşleştirim fonksiyonu şu şekildedir: $\pi(i, t): i \rightarrow j$, burada $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ ve $i \in S - H(t)$ 'dir.

B. Problem Tanımı

ÇRGT problemi, birçok eşleşim gönderme yönteminden farklı olarak, robotun enerjisini gözönünde bulundurur. Bir robot, olayına ya da hedefine varduktan sonra bir görevi yapmaya yetecek enerjiye sahip değil ise, onun atanmaması gerekir.

Bu çalışmada makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım sunulmaktadır. Enerji hasatlama süreçleri üzerine tahmin yapıp karar verebilmek için uygulanan takviyeli (pekiştirmeli) öğrenme yaklaşımının da yaygın bir örneği olarak Q-öğrenme tercih edilmektedir. Bunun önemli nedenlerinden birisi Q-öğrenmenin modelden bağımsız bir pekiştirmeli öğrenme yöntemi olmasıdır.

Bu problemin çevresi ile ilgili bilgiler önceki altbölümde verilmiştir.

Bu problemde, Q-öğrenmeyi modellemek için eylemleri (a_t), durumları (s_t), ödülü (R_t) tanımlamak gerekir.

Bir robot için her bir görevi seçmesi bir eylemdir. M robot için M görevin olduğu senaryoda eylem kümesi, $A = \{1, 2, \dots, M\}$ şeklinde tanımlanabilir.

Bir robot için her bir görevi seçmesi sonucunda oluşan konum bir durumdur. M robot için M görevin olduğu senaryoda durum kümesi, S robotun pil seviyesi şeklinde tanımlanabilir.

Bir robot için her bir görevi gerçekleştirmesi bir ödüldür.

Bir robotun bir turda enerji yetersizliğinden dolayı hiçbir görevi gerçekleştirememesi ise bir cezadır.

γ , indirim faktörüdür (etkenidir).

Aşağıdaki adımlara dayanarak Q-öğrenme yapılır:

- 1) Ortam, aracıya mevcut durumları s_t sağlar;
- 2) Aracı, Q değerlerine göre bir eylem a_t seçer;
- 3) Çevre, temsilciye geri bildirim ödülleri veya cezaları verir;
- 4) Aracı, seçilen eylemin Q değerini Q tablosunda günceller.

Q değerinin güncellenmesi denklemi aşağıda verilmiştir:

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \alpha \left(R_{t+1} + \gamma \max_{a \in A} [Q_t(s_{t+1}, a)] - Q_{t+1}(s_t, a_t) \right)$$

IV. ÖNERİLEN MAKİNA ÖĞRENMESİ (MÖ)-TABANLI ÇRGT ALGORİTMASI

ÇRGT problemi, her bir robotun aldığı mesafeyi, pillerin seviyelerini, görevleri tamamlamaya yetecek için gereken enerjiyi ve hasatlanacak tahmini enerjiyi göz önünde bulundurularak çözülmektedir. Robot, enerji hasadını tahmin edilebilir. Burada önerilen EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRGT Yaklaşımı, Macar algoritma [20] bazlı bir algoritmadır. En iyi Macar (Hungarian) algoritması, M robot için $O(M^3)$ hesaplama karmaşıklığındadır.

Enerji hasat süreci tahmini için çok sayıda yöntem kullanılır [26]; bu çalışmada makina öğrenmesi (MÖ)-tabanlı bir ÇRGT yaklaşımı Algoritma 1'de önerilmektedir.

Algorithm 1 Makina Öğrenmesi (MÖ)-tabanlı Çoklu Robot Görev Tahsisi (ÇRGT) Algoritması

Başlangıç: The index set of tasks is $T = \{T_1, \dots, T_M\}$.

Algoritma:

(1) Her robotu bir görevle eşleştirin.

for $i = 1 : M$

(2) Her robot i için, robotta eşleştirilen görev yerine ulaşmaya kadar hasatlanan enerjiyi makina öğrenmesi (MÖ) ile tahmin edin.

(3) Her robot i için, her robot tarafından katedilen mesafenin tamamı ve pil seviyesi, her görevi gerçekleştirmek için gereken enerji ve her robotta hasatlanan enerjinin MÖ-tabanlı tahmini değerleri ile toplam tahmini enerji harcaması maliyetlerini hesaplayın.

(4) Her robot i için diğer robotların maliyetlerine bakın.

(5) İki robot birbiriyle görev değiştirdiğinde maliyet düşerse.

(6) Robotlar atanan görevlerini değiştirir.

(7) Aksi takdirde robotlar kendilerine atanan görevleri değiştirmezler.

end

Şekil 2, MÖ Tabanlı ÇRGT Algoritmasını göstermektedir.

Burada kullanılan makine öğrenmesi yaklaşımı takviyeli öğrenmedir. Bunun içinde Q-learning algoritması [27] kullanılabilir.

V. SAYISAL SONUÇLAR

Burada EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRGT, [28] çalışmasının önerdiği eniyi başarılı EH ve Göreve duyarlı ÇRGT yaklaşımıyla kıyaslanacaktır. Benzetim deneyleri, her robotun atandığı göreve doğru $v = 10$ m/s hız ile yol aldığı $1000 m \times 1000 m$ 'lik bir alanda gerçekleştirilmiştir. En başta her bir robot $B_i = 600 mJ$ enerji depolayabilen dolu bir pile malikdir.

Bu bölümde, makine öğrenmesine dayalı çoklu robot görev tahsisi politikasının performansını diğer politikaların performansı ile 5-robot ve 10-robotlu senaryolarda iki farklı enerji hasatlama şekle karşılaştırılmıştır: 1) Bağımsız ve Özdeş Dağıtılmış (B.Ö.D.) EH Süreci 2) Markov EH Süreci

A. 5-robotlu durum

Bu altbölümde 5-robotlu senaryoda öncelikle robotların enerji hasatlama süreçleri bağımsız ve özdeş dağıtılmış (B.Ö.D.) EH Sürecine göre düşünülerek çoklu robot görev tahsisi algoritmalarının performansı karşılaştırılmıştır. Daha sonra robotların enerji hasatlama süreçleri Markov EH Sürecine göre düşünülerek çoklu robot görev tahsisi algoritmalarının performansı karşılaştırılmıştır.

1. Bağımsız ve Özdeş Dağıtılmış (B.Ö.D.) EH Süreci

Bu altbölümde, B.Ö.D. EH sürecinde 5 robot -5 görev durumu incelenmektedir. Her robottaki süreç birbirinden farklı B.Ö.D biçiminde oluşturulur.

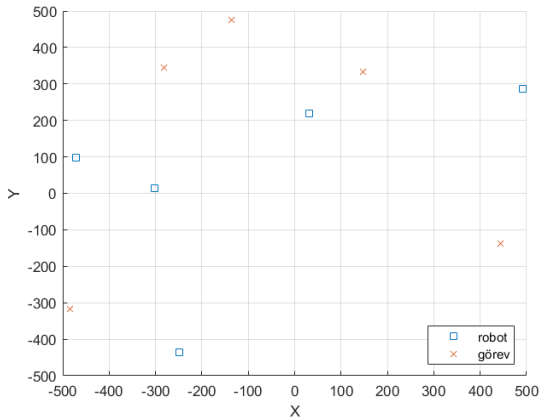
Şekil 3, 1000 m × 1000 m alandaki 5 B.Ö.D. EH robot düğümleri ve 5 görevin konumlarını gösterir.

Şekil 3'te 5 B.Ö.D. EH robotların konumları şu şekildedir:

$$(\varepsilon_1(0), \varepsilon_2(0), \varepsilon_3(0), \varepsilon_4(0), \varepsilon_5(0)) = ((-472, 99), (-302, 15), (31, 219), (492, 287), (-248, -437)).$$

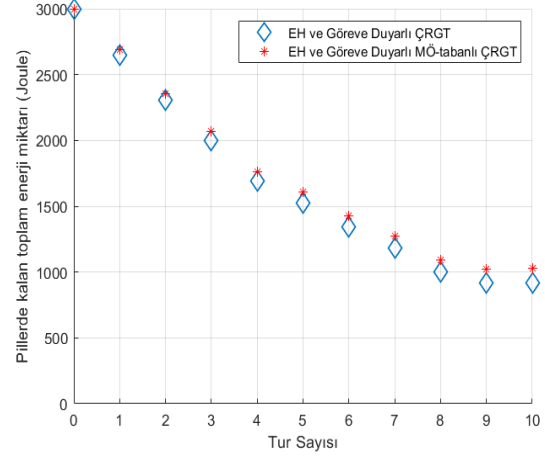
Şekil 3'te 5 görevin konumu şu şekildedir:

$$(\xi_1(1,1), \xi_2(2,1), \xi_3(3,1), \xi_4(4,1), \xi_5(5,1)) = ((282, 346), (-137, 475), (148, 334), (443, -137), (-484, -317)).$$



Şekil 3. 5 B.Ö.D. EH robotların ve 5 görevlerin pozisyonları, sırası ile "kare" ve "çapraz" işaretçilerle gösterilmektedir.

Şekil 4, 5 B.Ö.D.'nin pillerinde kalan toplam enerjiyi gösterir. B.Ö.D. EH süreçleri. 5 robot olduğundan, robotların pillerinde kalmış enerjinin toplamı en başta $5 \times 600 \text{ mJ} = 3000 \text{ mJ}$ 'tür.



Şekil 4. B.Ö.D. EH sürecindeki tur sayısına karşı 5 B.Ö.D. EH robotların bataryalarında kalmış enerjinin toplamı

Şekil 4'ten aşağıdaki gözlemler yapılabilir. 1., 2., 3. turda, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRGT, EH ve Görev farkında ÇRGT'ye kıyasla daha iyi başarımlar göstermektedir (%2.2 fazla enerji depolamaktadır). 4. turda, EH ve Görev farkında olan ÇRGT da EH ve Görev farkında olan ÇRGT'den %4.3 iyi başarımlar göstermeye başlamaktadır. Esasen 7. turda, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRGT, EH ve Görev farkında ÇRGT'yle kıyaslandığında %7.45 daha iyi görece başarımlar göstermektedir. Son olarak, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRGT, 10. turda EH ve Görev farkında ÇRGT kıyaslandığında görece eniyi başarımlarını (%12 fazla) göstermektedir.

Daha fazla ayrıntı için Tablo I incelenebilir.

TABLO I. BU TABLO, BAĞIMSIZ VE ÖZDEŞ DAĞITILMIŞ (B.Ö.D.) EH SÜRECİNE SAHİP 6 ROBOTLU BİR ÇOKLU ROBOT SİSTEMİNDE EH VE GÖREV FARKINDA MAKİNE ÖĞRENME TABANLI ÇRGT POLİTİKASI İLE EH VE GÖREV FARKINDA MAKİNE ÖĞRENME TABANLI ÇRGT POLİTİKASI UYGULANDIĞINDA ROBOTLARIN PİLLERİNDE KALAN TOPLAM ENERJİ MİKTARININ (KİLOJoule) TUR SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİNİ GÖSTERİR (EGMÖ, EH VE GÖREV FARKINDA MÖ-TABANLI ÇRGT'Yİ GÖSTERİRKEN EG, EH VE GÖREV FARKINDA ÇRGT'Yİ GÖSTERMEKTEDİR.) 0.TUR (0.T) BAŞLANGIÇ ZAMANI OLDUĞU İÇİN HEM EGMÖ HEM DE EG ALTINDA ROBOTLARIN PİLLERİNİN TOPLAMDA 3.00 Joule ENERJİSİ VARDIR.

| Tur | 1T | 2T | 3T | 4T | 5T | 6T | 7T | 8T | 9T | 10T |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| EGMÖ | 2.69 | 2.36 | 2.07 | 1.76 | 1.61 | 1.43 | 1.27 | 1.09 | 1.02 | 1.02 |
| EG | 2.65 | 2.31 | 2.00 | 1.69 | 1.53 | 1.35 | 1.18 | 1.00 | 0.92 | 0.92 |

2. Markov EH Süreci

Bu altbölümde, Markov EH sürecinde 5 robotlar -5 görevler durumu incelenmektedir. Robotların EH süreçleri birbirinden farklı Markov biçiminde oluşturulur.

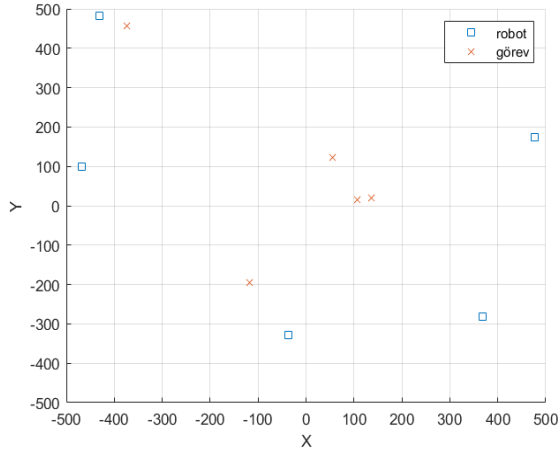
Şekil 5'te 1000 m × 1000 m alandaki 5 Markov EH robot düğümlerinin ve beş görevin konumlarını göstermektedir.

Şekil 5'te Markov EH süreçlerine sahip 5 robotun konumları şu şekildedir:

$$(\varepsilon_1(0), \varepsilon_2(0), \varepsilon_3(0), \varepsilon_4(0), \varepsilon_5(0)) = ((477, 175), (368, -282), (-468, 99), (-37, -329), (-431, 482)).$$

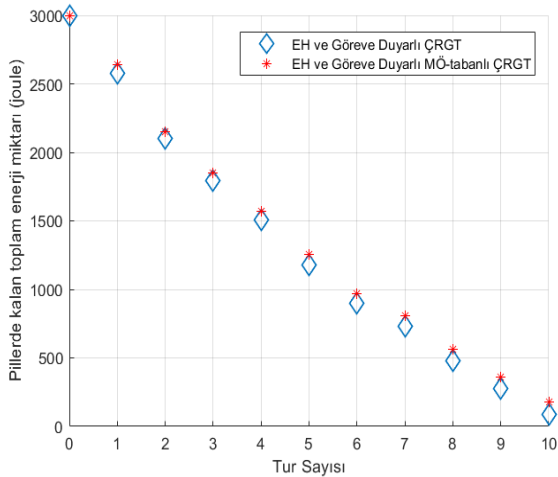
Şekil 5'te 5 görevin konumları şu şekildedir:

$$(\xi_1(1,1), \xi_2(2,1), \xi_3(3,1), \xi_4(4,1), \xi_5(5,1)) = ((-373, 457), (56, 123), (106, 16), (136, 20), (-117, -195)).$$



Şekil 5. 5 Markov EH robotların ve 5 görevlerin pozisyonları, sırası ile "kare" ve "çapraz" işaretçilerle gösterilmektedir.

Şekil 6, 5 Markov EH sürecindeki pillerde kalan enerji toplamını gösterir. 5 robot olduğundan, robotların pillerinde kalmış enerjinin toplamı en başta $5 \times 600 \text{ mJ} = 3000 \text{ mJ}$ 'tür.



Şekil 6. Markov EH süreçlerindeki tur sayısına karşı 5 Markov EH robotların bataryalarında kalmış enerjinin toplamı

Şekil 6'dan aşağıdaki gözlemler yapılabilir. 1., 2., 3. turlarda, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRGT, EH ve Görev farkında ÇRGT'ye kıyasla daha çok başarımlı göstermektedir (fazla enerjiyi depolayabilmektedir). 4. turunda, EH ve Görev farkında ÇRGT'dan %4.0 daha fazla başarımlı göstermeye başlamaktadır. Esasen 7. turda, EH ve Göreve Duyarlı MÖ-tabanlı ÇRGT, EH ve Göreve Duyarlı ÇRGT'yle kıyaslandığında %10.67 görece fazla başarımlı göstermektedir. Son olarak, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRGT, 10. turdaki EH ve Görev farkında ÇRGT'yle kıyaslandığında görece eniyi başarımlı (%80 fazla) göstermektedir.

Daha fazla ayrıntı için Tablo II incelenebilir.

TABLO II. BU TABLO, MARKOV EH SÜRECİNE SAHİP 6 ROBOTLU BİR ÇOKLU ROBOT SİSTEMİNDE EH VE GÖREV FARKINDA MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI ÇRGT POLİTİKASI İLE EH VE GÖREV FARKINDA MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI ÇRGT POLİTİKASI UYGULANDIĞINDA ROBOTLARIN PİLLERİNDE KALAN TOPLAM ENERJİ MİKTARININ (KİLOJoule) TUR SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİNİ GÖSTERİR (EGMÖ, EH VE GÖREV FARKINDA MÖ-TABANLI ÇRGT'Yİ GÖSTERİRKEN EG, EH VE GÖREV FARKINDA ÇRGT'Yİ GÖSTERMEKTEDİR.) 0.TUR (0.T) BAŞLANGIÇ ZAMANI OLDUĞU İÇİN HEM EGMÖ HEM DE EG ALTINDA ROBOTLARIN PİLLERİNİN TOPLAMDA 3.00 Joule ENERJİSİ VARDIR.

| Tur | 1T | 2T | 3T | 4T | 5T | 6T | 7T | 8T | 9T | 10T |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| EGMÖ | 2.64 | 2.15 | 1.85 | 1.57 | 1.26 | 0.97 | 0.81 | 0.56 | 0.36 | 0.18 |
| EG | 2.58 | 2.10 | 1.79 | 1.51 | 1.18 | 0.90 | 0.73 | 0.48 | 0.27 | 0.08 |

B. 10 robotlu durum

Bu altkısımda 10-robotlu senaryoda öncelikle robotların enerji hasatlama süreçleri bağımsız ve özdeş dağıtılmış (B.Ö.D.) EH Sürecine göre düşünülerek çoklu robot görev tahsisi algoritmalarının performansı karşılaştırılmıştır. Daha sonra robotların enerji hasatlama süreçleri Markov EH Sürecine göre düşünülerek çoklu robot görev tahsisi algoritmalarının performansı karşılaştırılmıştır.

1. Bağımsız ve Özdeş Dağıtılmış (B.Ö.D.) EH Süreci

Bu altbölümde, B.Ö.D. EH sürecindeki 10 robotlar -10 görevlerin durumu incelenmektedir. Robotların EH süreçleri birbirinden farklı B.Ö.D şeklinde oluşturulur.

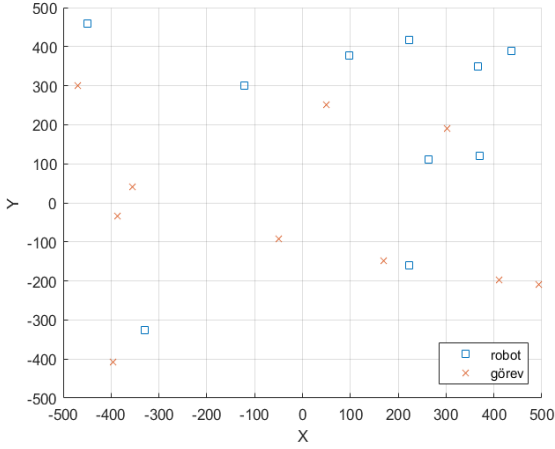
Şekil 7, $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ alandaki 10 B.Ö.D. EH robotları ve 10 görevin konumlarını göstermektedir.

Şekil 7'te 10 B.Ö.D. EH robot düğümlerinin konumları şu şekildedir:

$$(\varepsilon_1(0), \varepsilon_2(0), \varepsilon_3(0), \varepsilon_4(0), \varepsilon_5(0), \varepsilon_6(0), \varepsilon_7(0), \varepsilon_8(0), \varepsilon_9(0), \varepsilon_{10}(0)) = ((367, 350), (263, 111), (436, 388), (223, 418), (-121, 300), (222, -161), (98, 378), (-449, 460), (-329, -326), (370, 121)).$$

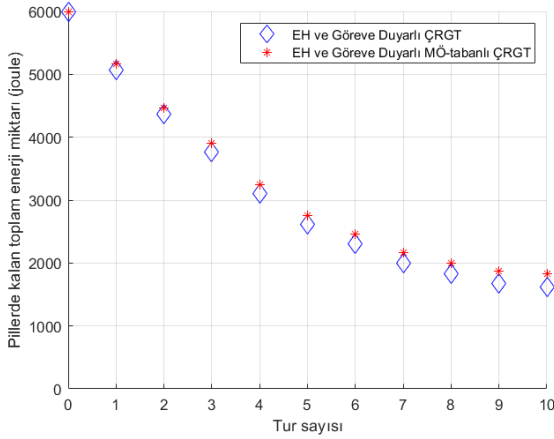
Şekil 7'te 10 görevlerin konumları şu şekildedir:

$$(\xi_1(1,1), \xi_2(2,1), \xi_3(3,1), \xi_4(4,1), \xi_5(5,1), \xi_6(6,1), \xi_7(7,1), \xi_8(8,1), \xi_9(9,1), \xi_{10}(10,1)) = ((-469, 300), (-386, -35), (-355, -\$40), (-49, -93), (49, 251), (302, 190), (493, -208), (411, -198), (170, -149), (-396, -407)).$$



Şekil 7. 10 B.Ö.D. EH robot düğümleri ve 10 görevin pozisyonları, sırası ile "kare" ve "çapraz" işaretçilerle gösterilmektedir.

Şekil 8, 10 B.Ö.D.'nin pillerinde kalan toplam enerjiyi göstermektedir. B.Ö.D. EH süreçleri. 10 robot olduğundan, robotların pillerinde kalmış enerjinin toplamı en başta $10 \times 600 \text{ mJ} = 6000 \text{ mJ}$ 'tür.



Şekil 8. B.Ö.D. EH süreçlerindeki tur sayısına karşı 10 B.Ö.D. EH robotlarının bataryalarında kalmış enerjinin toplamı

Şekil 8'den aşağıdaki gözlemler yapılabilir. İlk üç turda, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRGT, EH ve Görev farkında ÇRGT'ye kıyasla iyi başarımlar göstermektedir (%3.5 fazla enerjiyi depolamaktadır). 4. turunda, EH ve Görev farkında ÇRGT'den %5 iyi performans göstermeye başlar. Esasen 7. turunda, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRGT, EH ve Görev farkında ÇRGT'yle kıyaslandığında %8.7 daha fazla görelî performansını gösterir. Son olarak, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı MRTA, 10. turda EH ve Görev farkında MRTA'yla kıyaslandığında görece eniyî başarımlarını (%12.6 fazla) göstermektedir.

Daha fazla ayrıntı için Tablo III incelenebilir.

TABLO III. BU TABLO, BAĞIMSIZ VE ÖZDEŞ DAĞITILMIŞ (B.Ö.D.) EH SÜRECİNE SAHİP 11 ROBOTLU BİR ÇOKLU ROBOT SİSTEMİNDE EH VE GÖREV FARKINDA MAKİNE ÖĞRENME TABANLI ÇRGT POLİTİKASI İLE EH VE GÖREV FARKINDA MAKİNE ÖĞRENME TABANLI ÇRGT POLİTİKASI UYGULANDIĞINDA ROBOTLARIN PİLLERİNDE KALAN TOPLAM ENERJİ MİKTARININ (KİLOJULE) TUR SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİNİ GÖSTERİR (EGMÖ, EH VE GÖREV FARKINDA MÖ-TABANLI ÇRGT'Yİ GÖSTERİRKEN EG, EH VE GÖREV FARKINDA ÇRGT'Yİ GÖSTERMEKTEDİR.) BAŞLANGIÇ ZAMANI OLDUĞU İÇİN HEM EGMÖ HEM DE EG ALTINDA ROBOTLARIN PİLLERİNİN TOPLAMDA 6.00 JOULE ENERJİSİ VARDIR.

| Tur | 1T | 2T | 3T | 4T | 5T | 6T | 7T | 8T | 9T | 10T |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| EGMÖ | 5.16 | 4.47 | 3.90 | 3.25 | 2.75 | 2.46 | 2.17 | 2.00 | 1.87 | 1.82 |
| EG | 5.07 | 4.37 | 3.77 | 3.10 | 2.62 | 2.31 | 1.99 | 1.83 | 1.68 | 1.62 |

2. Markov EH Süreci

Bu altbölümde, Markov EH sürecinde 5 robotlar -5 görevler durumu incelenmektedir. Robotların EH süreçleri birbirinden farklı Markov biçiminde oluşturulmaktadır.

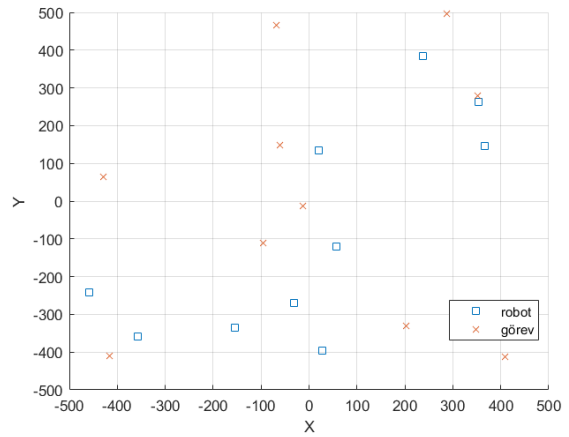
Şekil 9'da $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ alandaki 10 B.Ö.D. EH robot düğümleri ve 10 görevin konumlarını göstermektedir.

Şekil 9'da 10 Markov EH robot düğümlerinin konumları şu şekildedir:

$$(\varepsilon_1(0), \varepsilon_2(0), \varepsilon_3(0), \varepsilon_4(0), \varepsilon_5(0), \varepsilon_6(0), \varepsilon_7(0), \varepsilon_8(0), \varepsilon_9(0), \varepsilon_{10}(0)) = ((-31, -271), (366, 147), (21, 134), (-155, -336), (-358, -358), (-459, -241), (57, -120), (28, -395), (238, 385), (354, 263))$$

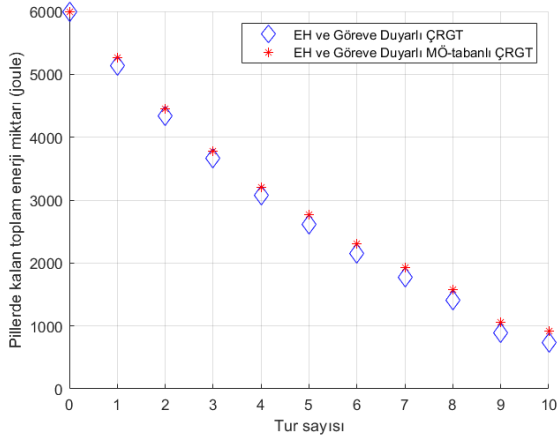
Şekil 9'da 10 görevin konumları şu şekildedir:

$$(\xi_1(1,1), \xi_2(2,1), \xi_3(3,1), \xi_4(4,1), \xi_5(5,1), \xi_6(6,1), \xi_7(7,1), \xi_8(8,1), \xi_9(9,1), \xi_{10}(10,1)) = ((-429, 65), (-60, 149), (-69, 465), (287, 496), (351, 280), (409, -412), (202, -331), (-13, -14), (-96, -111), (-417, -411))$$



Şekil 9. 10 Markov EH robotlar ve 10 görevlerin pozisyonları, sırası ile "kare" ve "çapraz" işaretçilerle gösterilmektedir.

Şekil 10, 10 Markov EH sürecinde pillerde kalan toplam enerjiyi gösterir. 10 robot olduğundan, robotların pillerinde kalmış enerjinin toplamı en başta $10 \times 600 \text{ mJ} = 6000 \text{ mJ}$ 'tür.



Şekil 10. Markov EH süreçlerinde tur sayısına karşı 10 Markov EH robotlarının bataryalarında kalmış enerjinin toplamı

Şekil 10'dan aşağıdaki gözlemler yapılabilir. 1., 2., 3. turlarda, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRGT, EH ve Görev farkında ÇRGT'ye kıyasla daha iyi başarımlar gösterir (daha çok enerjiyi depolayabilmektedir). 4. turda, EH ve Görev farkında ÇRGT'dan %4.2 daha fazla başarımlar gösterir. 7. turunda, EH ve Göreve Duyarlı MÖ-tabanlı ÇRGT, EH ve Göreve Duyarlı ÇRGT'yle kıyaslandığında %8.7 daha fazla görece performansını gösterir. Son olarak, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRGT, 10. turda EH ve Görev farkında ÇRGT'yle kıyaslandığında görece eniyi başarımlarını (%26.7 fazla) göstermektedir.

Daha fazla ayrıntı için Tablo IV incelenebilir.

TABLO IV. BU TABLO, MARKOV EH SÜRECİNE SAHİP 11 ROBOTLU BİR ÇOKLU ROBOT SİSTEMİNDE EH VE GÖREV FARKINDA MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI ÇRGT POLİTİKASI İLE EH VE GÖREV FARKINDA MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI ÇRGT POLİTİKASI UYGULANDIĞINDA ROBOTLARIN PİLLERİNDE KALAN TOPLAM ENERJİ MİKTARININ (KİLOJoule) TUR SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİNİ GÖSTERİR (EGMÖ, EH VE GÖREV FARKINDA MÖ-TABANLI ÇRGT'Yİ GÖSTERİRKEN EG, EH VE GÖREV FARKINDA ÇRGT'Yİ GÖSTERMEKTEDİR.) BAŞLANGIÇ ZAMANI OLDUĞU İÇİN HEM EGMÖ HEM DE EG ALTINDA ROBOTLARIN PİLLERİNİN TOPLAMDA 6.00 JOULE ENERJİSİ VARDIR.

| Tur | 1T | 2T | 3T | 4T | 5T | 6T | 7T | 8T | 9T | 10T |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| EGMÖ | 5.26 | 4.45 | 3.78 | 3.20 | 2.76 | 2.30 | 1.92 | 1.57 | 1.06 | 0.92 |
| EG | 5.14 | 4.34 | 3.66 | 3.07 | 2.62 | 2.15 | 1.77 | 1.40 | 0.89 | 0.73 |

VI. SONUÇLAR VE SONRAKİ ARAŞTIRMA ÖNERİLERİ

Geçmiş zamanda, tarımda işçiler yabancı otları tohumları ekmeden evvel doğrudan tespit etmekteydi. Gelişen tarım teknolojisiyle beraber insan emeği bugünkü tarımda ise oldukça azdır. Çiftçiler başka tarlalara taşınması gıda üretimini zarara uğratmıştır. Uzmanlar, nüfus arttıkça, arazi küçüldükçe ve doğal kaynakların azalmasıyla kendisine yeterli akıllı tarıma daha çok odaklanmaktadır; bu amaçla çözümler üzerine çalışmaktadır.

Bu makalede tarım uygulamalarında çoklu robot görev tahsisi (ÇRGT) problemi incelenmektedir. Herbir turda, kümebaşı olmayan diğer robotların herbiri bir görevi tamamlamaktadır. Bu robotlara görevleri tahsisi yöntemi, enerjiyi ve mesafeyi eraber gözönünde bulundurur. Bu da birbir eşleşen gönderim problemidir. Makalemizde, farklı enerji hasatlama süreçlerini ve robot sayılarını gözönünde bulundurularak makine öğrenmesi tabanlı yeni bir ÇRGT yaklaşımını önerilir ve başarımlarını incelenir. Bu yaklaşımın önceki yaklaşıma görece iyi bir başarımlar sergilediği görülmektedir. Bu yeni önerilen ÇRGT algoritması, ilk turlarda önceki ÇRGT algoritmasına göre yaklaşık %2 fazla enerjinin pil kalmasını (tasarrufunu) sağlarken özellikle son turlarda önceki ÇRGT algoritmasına göre enerji tasarrufu enerji hasatlama süreci ve robot senaryosunun büyüklüğüne bağlı olarak %100'ü aşabilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]P. Samuel S., K. Malarvizhi, S. Karthik and M. Gowri S.G., "Machine Learning and Internet of Things based Smart Agriculture," 2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 2020, pp. 1101-1106.
- [2]Baek, E.T.; Im, D.Y. ROS-Based Unmanned Mobile Robot Platform for Agriculture. Appl. Sci. 2022, 12, 4335.
- [3]Devanna, R.P.; Milella, A.; Marani, R.; Garofalo, S.P.; Vivaldi, G.A.; Pascuzzi, S.; Reina, G. In-field automatic identification of pomegranates using a farmer robot. Sensors 2022, 22, 5821.
- [4]Yoshida, T.; Onishi, Y.; Kawahara, T.; Fukao, T. Automated harvesting by a dual-arm fruit harvesting robot. ROBOMECH J. 2022, 9, 19.
- [5]Moraitis, M.; Vaiopoulos, K.; Balafoutis, A.T. Design and Implementation of an Urban Farming Robot. Micromachines 2022, 13, 250.
- [6]Chong, C.-Y.; Kumar, S.P. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. Proc. IEEE 2003, 91, 1247-1256.
- [7]Akyildiz, I.F.; Su, W.; Sankarasubramanian, Y.; Cayirci, E. A survey on sensor networks. IEEE Commun. Mag. 2002, 40, 102-114.
- [8]Lukic, M.; Barnawi, A.; Stojmenovic, I. Robot Coordination for Energy-Balanced Matching and Sequence Dispatch of Robots to Events. IEEE Trans. Comput. 2015, 64, 1416-1428.
- [9]Gautam, A.; Thakur, A.; Dhanania, G.; Mohan, S. A distributed algorithm for balanced multi-robot task allocation. In Proceedings of the 2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Roorkee, India, 3-4 December 2016; pp. 622-627.
- [10]Shue, S.; Conrad, J. A Survey of Robotic Applications in Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the IEEE Southeastcon 2013, Jacksonville, FL, USA, 4-7 April 2013; pp. 1-5.
- [11]Ryu, J.H.; Irfan, M.; Reyaz, A. A review on sensor network issues and robotics. J. Sens. 2015, 2015, 1-14.
- [12]Ghosh, P.; Gasparri, A.; Jin, J.; Krishnamachari, B. Robotic wireless sensor networks. In Mission-Oriented Sensor Networks

- and Systems: Art and Science. Studies in Systems, Decision and Control; Springer: Cham, Switzerland, 2019; Volume 164.
- [13] Dasgupta, P. Multi-robot task allocation for performing cooperative foraging tasks in an initially unknown environment. In *Innovations in Defence Support Systems-2: Socio-Technical Systems*; Jain, L.C., Aidman, E.V., Abeynayake, C., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2011; pp. 5–20.
- [14] Lim, S.; Rus, D. Stochastic motion planning with path constraints and application to optimal agent, resource, and route planning. In *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, MN, USA, 14–18 May 2012; pp. 4814–4821.
- [15] Jones, E.G.; Dias, M.B.; Stentz, A. Time-extended multi-robot coordination for domains with intra-path constraints. *Auton. Robot.* 2011, 30, 41–56.
- [16] Lenagh, W.; Dasgupta, P.; Munoz-Melendez, A. A spatial queuing based algorithm for multi-robot task allocation. *Robotics* 2015, 4, 316–340.
- [17] Gerkey, B.P.; Mataric, M.J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. *Int. J. Robot. Res.* 2004, 23, 939–954.
- [18] Hojda, M. Task allocation in robot systems with multi-modal capabilities. *IFAC-PapersOnLine* 2015, 48, 2109–2114.
- [19] Patil, D.D., Singh, A.K., Shrivastava, A., Bairagi, D. (2023). IOT Sensor-Based Smart Agriculture Using Agro-robot. In: Sindhvani, N., Anand, R., Niranjnamurthy, M., Chander Verma, D., Valentina, E.B. (eds) *IoT Based Smart Applications*. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04524-0_20
- [20] Kuhn, H.W. The hungarian method for the assignment problem. *Nav. Res. Logist. Q.* 1955, 2, 83–97.
- [21] Trigui, S.; Koubaab, A.; Cheikhrouhou, O.; Yousseff, H.; Bennaceurg, H.; Sritig, M.F.; Javed, Y. A Distributed Market-Based Algorithm for the Multi-Robot Assignment Problem. *Procedia Comput. Sci.* 2014, 32, 1108–1114.
- [22] Lukic, M.; Stojmenovic, I. Energy-balanced matching and sequence dispatch of robots to events: Pairwise exchanges and sensor assisted robot coordination. In *Proceedings of the 10th IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, Hangzhou, China, 14–16 October 2013; pp. 249–253.
- [23] Luo, L.; Chakraborty, N.; Sycara, K. Provably-Good Distributed Algorithm for Constrained Multi-Robot Task Assignment for Grouped Tasks. *IEEE Trans. Robot.* 2015, 31, 19–30.
- [24] Martin, J.G.; Frejo, J.R.D.; García, R.A.; Camacho, E.F. Multi-robot task allocation problem with multiple nonlinear criteria using branch and bound and genetic algorithms. *Intel. Serv. Robot.* 2021, 14, 707–727.
- [25] Shin, H.S.; Li, T.; Lee, H.I.; Tsourdos, A. Sample greedy based task allocation for multiple robot systems. *Swarm Intell.* 2022, 16, 233–260.
- [26] Ashraf, N.; Faizan, M.; Asif, W.; Qureshi, H.K.; Iqbal, A.; Lestas, M. Energy management in harvesting enabled sensing nodes: Prediction and control. *J. Netw. Comput. Appl.* 2019, 132, 104–117.
- [27] Watkins, C.J.C.H., Dayan, P. Q-learning. *Mach Learn* 8, 279–292 (1992). <https://doi.org/10.1007/BF00992698>
- [28] Gul OM. Energy Harvesting and Task-Aware Multi-Robot Task Allocation in Robotic Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2023; 23(6):3284.
- [29] Gul OM. Akıllı Tarım Uygulamalarında Robotik Kablosuz Sensör Ağlarında Çoklu Robot Görev Tahsisi. *TOK* 2023; syf. 348-352.

Özgeçmiş



Ömer Melih Gül (S'17, M'21), Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans, yüksek lisans ve doktora derecelerini sırasıyla 2012, 2014 ve 2020 yıllarında aldı. Bu esnada aynı bölümde araştırma görevlisi olarak da görev yaptı. Uluslararası yayınları 11 dergi makalesi, 16 konferans bildirisi ve 4 kitap bölümünü kapsarken ulusal yayınları 3 dergi makalesi ve 3 konferans bildirisini kapsamaktadır.

IEEE Computer Society tarafından 2019 Lance Stafford Larson Üstün Öğrenci Makale Ödülü'nde (2019 Lance Stafford Larson Outstanding Student Paper Award) üçüncülük ödülüne layık görülmüştür. 2021 IEEE Rising Stars Global Konferansı'nda poster yarışmasında üçüncülük ödülüne layık görülmüştür. 2022 yılında Kanada'da Ottawa Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Okulu'nda doktora sonrası araştırmacı olarak çalıştı. 2022 yılında 48. Kablosuz Dünya Araştırma Forumu'nda (WWRF) en iyi konferans bildirisi ödülünü aldı. Mevcut durumda, İstanbul'da Bahçeşehir Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır.

2021'den bu yana IEEE Computer Society'de Region 8 (Avrupa, Orta Doğu ve Afrika Bölgesi) Koordinatörü olarak görev yapmaktadır. Nisan 2023'ten beri IEEE Computer Society Member&Geographic Activities (MGA) Board'da Özel Üye (Member-at-Large) olarak görev yapmaktadır. 2022 IEEE MGA Genç Profesyoneller Başarı Ödülü'ne (2022 IEEE MGA Young Professionals Achievement Award) layık görülmüştür. 2020-2021 yıllarında başkanlığını yaptığı IEEE Türkiye Genç Profesyonel Grup ile 2021 IEEE Region 8 Outstanding Young Professionals Affinity Group Award ve 2022 IEEE MGA Young Professionals Hall of Fame Honorable Mention ödülleri kazanmıştır.

Akıllı Tarım Uygulamalarında Enerji Hasatlayan Kablosuz Sensör Ağlarında Veri Toplama

Data Collection in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks in Smart Agriculture Applications

 Ömer Melih Gül

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
Email: omermelih.gul@bau.edu.tr

Özetçe—Bu literatür taraması, akıllı tarım uygulamalarında enerji hasatlayan kablosuz sensör ağlarında veri toplama için ortaya çıkan bir çizelgeleme probleminin farklı durumları ve bunlara önerilen çözümler incelemektedir. İlk olarak, bir füzyon merkezinin (FM) m EH sensörlerinden bilgi topladığı bir kablosuz ağı dikkate alıyoruz. FM, her bir zaman dilimi için k ortogonal kanal üzerinden iletim için k adet m düğüm planlar. FM, yalnızca iletim girişimlerinin sonuçları hakkında nedensel bilgiye sahiptir; düğümlerin pil durumları veya EH faaliyetleri hakkında doğrudan bilgisi yoktur. Toplanan enerji iletimi kısıtlandığında FM'nin bu veri destekli sistemde mümkün olan en fazla verimi toplamasına izin verecek bir zamanlama mekanizması bulmak amaçtır. Düğüm pillerinde bir depolama kapasitesine kadar enerjinin kayıpsız olarak depolandığı varsayılır (sınırsız kapasite olasılığı da dikkate alınır). Sorunu ele almak için hem sonlu hem de belirsiz problem ufukları kullanılır. İkinci olarak, sonsuz bir veri birikimi önermesinin bozulduğu senaryoyu dikkate alıyoruz. Üçüncü olarak, birinci çizelgeleme probleminin ikili probleminde bakıyoruz. Düşük karmaşıklığa sahip bir politika olan Düzgünleştirilen Rastgele Sıralı Politikanın (DRSP) önerilir; genel enerji hasadı ve veri toplama süreçleri için optimuma yakın olduğu gösterilmiştir. Sayısal örneklerle göre, DRSP, pil ve tampon kapasitesi kabul edilebilir bir boyutta olduğunda, gelen enerjiyi ve verileri neredeyse mükemmel bir verimlilikle kullanır. Buradaki problemler, başka birçok alanda görülebileceği için buradaki çözümler, haberleşme ağından daha geniş bir uygulama alanına sahip olabilir.

Anahtar Kelimeler —kaynak tahsisi, kablosuz duyurga ağları, enerji hasatlama, çizelgeleme

Abstract—This literature survey investigates various versions of a scheduling problem occurring in data collection in energy-harvesting (EH) wireless sensors networks (WSN) in smart agricultural applications and their solutions. First, we take into account a wireless network where a fusion center (FC) gathers information from m EH sensors. FC plans k of m nodes for transmission over k orthogonal channels for each time slot. FC only has causal knowledge about the results of transmission attempts; it has no direct knowledge of battery conditions of nodes or EH activities.

Finding a scheduling mechanism that will allow FC to collect the most throughput possible in this data-backed up system, when harvested energy restricts transmission, is the goal. It is assumed that energy is stored losslessly in node batteries up to a storage capacity (the possibility of unlimited capacity is also taken into consideration). Both finite and indefinite problem horizons are used to treat the issue. Second, we take into account the scenario in which the premise of an infinite data backlog is broken. Thirdly, we look at the first scheduling problem's dual problem. Uniformizing Random Ordered Policy (UROP), a low-complexity policy, is suggested; its near-optimality is demonstrated for general energy harvesting and data arriving processes. According to numerical examples, UROP utilises the incoming energy and data with practically perfect efficiency when the battery and buffer capacity are of an acceptable size. As these problems may be faced in many other areas, their solutions may have a wider application area than communication network.

Keywords —resource allocation, wireless sensor networks, energy harvesting, scheduling

I. GİRİŞ

Geçmişte, tarım işçileri yabancı otları tohum ekmeden önce doğrudan tespit ederdi. İnsan emeği bugün ise kıttr. Tarım işçileri başka tarlalara taşınırken gıda üretimi zarar gördü. Uzmanlar, nüfus arttıkça, arazi küçüldükçe ve doğal kaynaklar azaldıkça kendi kendine yeten bir sistem talep eden hassas ve akıllı tarıma daha fazla odaklanmaktadır. Bu anlamda farklı alt görevleri yapan algoritmaları birleştirmek, sistem genelinde nesnelere internetini ve gözetim sistemini etkinleştirir.

Bitkiler, toprağı ve çevresini bilirler. Melez tohumlar ve yapay kompostlar verimliliği artırır. İklim, su, tohumlar ve kompostlar çiftçiliği etkiler. İklim kontrol edilemez. Havayı, suyu dağıtır. Tohum ve gübre seçimi yönetilebilir. Bu da akıllı tarıma olan ihtiyacı ortaya koyar [1].

Akıllı tarım, birçok fayda sağlasa da bunu yapabilmemizin de zorlukları ve ortaya çıkan problemler vardır. Bunlardan bir tanesi de akıllı tarımda kullanılan algılayıcıların enerji verimliliğiyle görev yapabmesidir.

Bu bölümün kalan altkısımlarında, öncelikle incelenen problemin güdülenmesi verilmektedir. Sonraki alt kısımda, problemin ilgili literatüründeki yakın çalışmalardan bahsedilmiştir. Daha sonraki alt kısımda, bu makalede literatüre yapılan ana katkılar özetlenmiştir. Son olarak, makalenin geriye kalan kısmının teşkili verilmiştir.

A. Güdüleme

Kablosuz sensör ağları (KSA), tarımsal gözetimi, çevre gözetimi, trafik gözetimi, hava trafik kontrolü, fiziksel güvenlik, endüstriyel ve üretim otomasyonu, sağlık hizmetleri, akıllı şehirler ve dağıtılmış robotlar, kablosuz bağlantılar üzerinden akıllı ve ucuz küçük boyutlu sensörler kullanır. [2].

KSA, güç kaynakları ve pillerinin ömrü ile ilgili kritik zorluklarla karşı karşıyadır. Enerji hasadı (EH) [3], KSA'ların düzenli bakımın pratik olmadığı veya çok pahalı olduğu yerlerde çalışmasını mümkün kılan bir tekniktir. Genellikle EH olarak bilinen enerji hasadı, güvenilir çalışmanın ömrünü uzatabilir [4, 5]. Güneş, kinetik ve diğerleri dahil olmak üzere çok sayıda enerji biçimi doğal çevrelerinden çıkarılabilir [6]. Enerji toplayıcılar temel olarak öngörülemez enerji kaynaklarına bağlıdır ve toplanan enerji miktarı tipik olarak çok az miktardadır [6, 7], bu nedenle KSA'ların çalışma stratejilerinin sağlam, çevreye uyurlanabilir ve enerji açısından verimli olması gerekir.

Enerji verimliliği, enerji hasatlayan kablosuz sensör ağ sisteminin ağ ömrünü artırır. Bu çalışma, her düğümün pil seviyesi ve tahmin edilen enerjiyi değerlendirmektedir.

B. Önemli Katkılar

Bu makalenin literatüre ana katkıları şu şekildedir:

- Bildiğimiz kadarıyla, bu makale akıllı tarım uygulamalarında enerji hasatlayan düğümlerini kullanarak veri toplama üzerine yapılan ilk literatür taramasıdır.
- Bu probleme en iyi çözümler, her bir düğümün pil seviyesini ve enerji hasatlama yeteneklerini tahmin eden bir yaklaşım sergileyen çözümler olmadığı da gösterilir.
- Bu makalede geleceğe dair yeni araştırma yönleri de ortaya koyulmaktadır.

C. Teşkil

Bu makale şu şekilde devam etmektedir. Bölüm II sistem modelini ve problemini tanıtmaktadır. Bölüm III ilgili çalışmaları sunar. Bölüm IV, tartışma ve gelecekteki araştırma yönleri sunulmaktadır. Bölüm IV makaleyi özetler ve gelecekteki problemleri önermektedir.

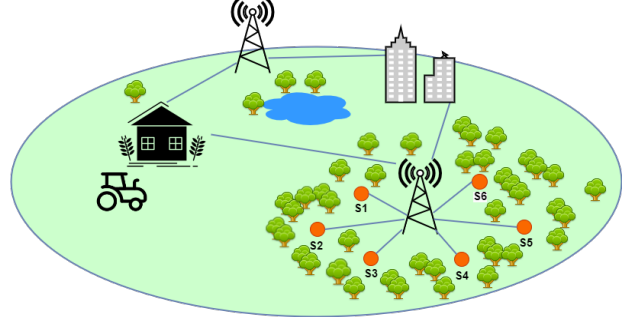
II. SİSTEM MODELİ VE PROBLEM TANIMI

Bu kısımda, öncelikle göz önünde bulundurulacak bilgisayar haberleşme sisteminin modeli verilmektedir. Daha sonra, bu sistemde ele alınan problemin tanımı yapılmaktadır.

A. Sistem Modeli

Bu çalışmada m enerji hasatlayan (EH) sensörlerden bir füzyon merkezi (FM) tarafından zaman belirli zaman dilimlerinde veri toplandığı tek atlamalı bir KSA dikkate alınmaktadır.

Şekil 1, akıllı tarım uygulamasındaki bir enerji hasatlayan KSA kurulumunu göstermektedir.



Şekil 1. Toplamda bir füzyon merkezi (FM) olarak çalışan bir baz istasyonu ve 6 sensörden (S1, S2, S3, S4, S5, S6) oluşan bir enerji hasatlayan kablosuz sensör ağı (KSA) FM sensörlerden veri toplamaktadır. Burada, FM sensörlere kaynak (veri iletebilmeleri için haberleşme kanalını anlık) tahsis etmektedir.

S , sensör dizin kümesidir, öyleki, $i \in S = \{1, 2, \dots, m\}$. Bu kümede m sensör ve her turda k kanallı bir füzyon merkezi tarafından çizelgelenir. Eğer i . sensör t . Zaman diliminde seçilmişse ise $i \in H(t)$. Füzyon merkezi olan baz istasyonuna, m sensörden verileri toplar. $E_i^h(t)$, i . sensör tarafından t . zaman diliminde hasatlanan enerjidir ve $B(t)$, sensör pilinde kalan enerjidir.

B. Problem Tanımı

Bir düğümün iletecek verisi varsa ve bir zaman diliminde iletim için planlandığında iletim yapmak için yeterli enerjisi varsa, o zaman düğüm bir paket iletecektir. FM, sistemin durumu (düğümlerde depolanan veri paketlerinin veya enerji paketlerinin miktarı gibi) hakkında doğrudan bilgiye sahip olmadığı gibi, enerji toplama süreci veya veri varış süreci ile ilgili istatistiklere de sahip değildir. k benzersiz düğümün herhangi bir alt kümesinin herhangi bir zamanda programlanabileceği varsayımı altında çalışıyoruz. FM'nin amacı, sonlu veya belirsiz bir zaman ufkunda mümkün olan en yüksek toplam verimi elde etmektir.

III. İLGİLİ LİTERATÜR

Bu bölümde son yıllarda gelişen enerji hasatlayan kablosuz sensör ağlarda veri toplama ile ilgili literatüründeki ilgili çalışmalara değinilmektedir.

Güç kontrolü (veya enerji yönetimi) ağlar için çok önemli bir endişe kaynağı olduğundan, son yıllarda enerji verimli iletişim sistemlerinde zamanlama üzerine artan miktarda araştırma ve yazı yapılmaktadır. [8, 9], enerji verimli iletim çizelgeleme problemi sağlayan ve "tembel çizelgeleme" tekniğini çözüm olarak öneren öncü

çalışmalardır. Bu teknik, veri iletim hızının, iletim gücünün içbükey bir fonksiyonu olduğu gerçeğine dayanmaktadır. [8, 9] öncü çalışmaları da sunmaktadır. Sonraki yıllarda aynı türden konuları araştıran birkaç çalışma yayınlanmaktadır ([10]–[18]). Ek olarak [19], iki alıcıya ayrı veri gönderen bir enerji toplama vericisini içeren bir sorunu (problemi) araştırmaktadır. Benzer bir çizelgeleme problemi [20]'de, sönümlene kanallarına ek olarak statik kanallar yoluyla iletilmesi gereken belirgin bir iletim hızları kümesine sahip olan bir enerji toplama vericisi için incelenmiştir. [21, 22] kendi çalışmalarında [6, 7]'de tartışılan çizelgeleme probleminin genişletilmiş bir biçimini araştırdılar. Bu çalışmalarda [21,22], sönümlenen kanallar ve enerji toplayan vericiler ile çizelgeleme problemi ele alınmış ve probleme optimuma yakın buluşsal çözümler önerilmiştir. Yazılım tanımlı bir radyoda, [20,21]'de açıklanan programlama politikalarının uygulanması, [23, 24]'te temsil edilen bir dizi deneysel sonuç üretir.

Ek olarak [25], düşük enerjili Bluetooth cihazları için enerji toplayan KSA'larda çeşitli görev döngüsü optimizasyon tekniklerinin kullanımını araştırmaktadır. Ayrıca, [26, 27], kullanıcıların ortamdan enerji toplayabildiği senaryoyu dikkate alarak, bir MISO uydurucu bağı bağlantısındaki geri besleme sistemi için optimizasyon tekniklerini inceler. [28] idealist oransız kodları ve minimum enerjili tek noktaya yayın yönlendirme problemini araştırmaktadır. Bir mobil İnternet servis sağlayıcısının (stratosferin alt kısmında yenilenebilir enerjiyle çalışan uçan bir platform), bir alan üzerinde hareket ederken kullanıcıların İnternet erişimi sağlaması öngörülüyor. Benzer şekilde, [29, 30, 31] bir iletişim sistemindeki çizelgeleme probleminin çeşitli varyasyonlarını araştırır. Bu problem, dinamik sırt çantası problemi olarak adlandırılır. Belirleyici bir paradigma içinde abonelere İnternet bağlantısı sunmak için mobil İnternet servis sağlayıcıları için en iyi karar verme teknikleri [29, 30]'da incelenmiştir. Çalışmanın en önemli katkılarından biri, konu için deterministik bir model altında oluşturulan rekabetçi çevrimiçi buluşsal yöntemlerin yanı sıra genetik algoritmalar ve kural tabanlı optimizasyon kullanmasıdır. Olasılıksal modele göre problem [31]'de 0/1 sırt çantası problemi olarak modellenmiştir. Kural tabanlı buluşsal yöntemler gibi karar konusuna uygulanan farklı yaklaşımlar kullanılarak türetilen eşik politikaları, bir dizi çevrimiçi buluşsal yöntem önermek için kullanılır.

Bu literatür taramasında, akıllı tarım uygulamalarında enerji hasatlayan kablosuz sensör ağlarında veri toplama için ortaya çıkan bir çizelgeleme probleminin farklı durumları ve bunlara önerilen çözümler incelenmiştir. Başlamak için, verilerin m EH sensör düğümlerinden bir füzyon merkezi (FM) tarafından toplandığı bir kablosuz sensör ağı (KSA) inşa edeceğiz; Her bir düğüm için her zaman gönderilecek veri olması beklenir (ayrıca veri biriktirilen düğümler olarak da bilinir). Her düğüm,

toplanan enerjiyi, belirli kapasite gereksinimlerini karşılaması ve sızdırmaz olması gereken kendi pilinde depolar. Ayrıca çoklu erişim iletişimde hata olmayacağı ve sönümlene olmayacağı varsayılmıştır. Programda bir düğüm varsa, kullanması için kanallardan biri atanacaktır. Bir düğümün bir paket göndermek için yeterli enerjisi varsa ve veri iletmek için programlanırsa, o zaman iletim sırası kendisine geldiğinde verileri FM'ne gönderebilir. Her paketin iletimi, bir zaman aralığının boyunca sürer. FM'nin amacı, sonlu veya sonsuz olabilen bir problem ufku boyunca en fazla bir toplam veri hacmi elde etmektir. Bu konu [32]'de araştırılmıştır ve bu çalışmanın bulguları daha sonra [33]'te daha genel olan bir senaryoya uygulanmıştır. [32, 33]'ün içeriği bu çalışmada daha derinlemesine sunulmuştur.

Pratik uygulamada, düğümlerin pil durumları, biraz daha fazla maliyet pahasına (ek geri besleme nedeniyle ek zaman ve enerji israfı gibi) ve biraz daha büyük karmaşıklık pahasına FM için erişilebilir hale getirilebilir. Bununla birlikte, FM'nin düğümlerdeki anlık pil seviyeleri veya bunların istatistikleri hakkında bilgi sahibi olmadan programlama kararları verdiği problemi pratik bir bakış açısından keşfetmek ilginç bir problem sunmaktadır. Bilgedeki bu boşluğun performans üzerinde çok az etkisi olduğu, bizi çok rahatlatır. FM'nin, önceki iletim girişimlerinin sonuçlarının yalnızca farkında olmasına rağmen, neredeyse her şeyi bilen bir programlayıcı kadar etkili bir şekilde planlama yapabildiğini göstereceğiz.

A. Kısmen Gözlemlenebilir Markov Karar Süreci (KGMKS) Yaklaşımı

EH süreçlerinin Markov süreçleri olduğunu varsayarsak, bu problem kısmen gözlemlenebilir Markov Karar Süreci (KGMKS) olarak tanımlanabilir ve probleme en uygun çözümü bulmak için Dinamik Programlama (DP) [34] kullanılabilir. Ancak, enerji gibi sürekli durum değişkenleri ile ilgili konulara adil bir yaklaşım elde etmek için, DP'nin durum uzayı oldukça geniş olmalıdır. Ek olarak, DP'nin karmaşıklığı, m [34] düğüm sayısı ile orantılı olarak katlanarak artar. Sonuç olarak, önemli sayıda (yüzlerce) düğüm ve önemli miktarda durum alanı olduğunda, DP'nin karmaşıklığı EH çizelgeleme problemi için makul olmayan bir şekilde yüksek olabilir.

Takviyeli öğrenme, bu çizelgeleme problemini çözmek için kullanılacak ikinci bir yöntemdir. Bu yöntem probleme bir KGMKS olarak modelleyerek yaklaşır. Pek çok takviyeli öğrenme algoritması arasında, Q-learning [35] hem uygulamaya koyması en kolay hem de en etkili olan modelden bağımsız yaklaşımdır. Q-learning, jenerik bir modelin eninde sonunda en iyi durumuna yakınsamasını sağlar. Bununla birlikte, Q-learning, çözümler üzerinde yakınsama yapmak için uzun zaman aldığından, geniş bir durum uzayı içeren problemler için kullanılamaz [36]. Aslında, çok sayıda algoritma en iyi olan yakınsak davranışı garanti edebilmektedir [37]. Bununla birlikte, pek çok pratik uygulamada, optimuma

yakın hızla ulaşan bir strateji, kesin en iyiliğe yavaş yavaş yaklaşan bir politikaya tercih edilir [36]. Bunun nedeni, birincisinin ikincisinden daha hızlı yakın en iyilik elde etmesidir. Q-öğrenmenin yakınsama oranı, indirim faktörü 1 değerine yaklaştıkça daha düşük bir seviyeye düşer, bu da indirimin olmadığı durumu temsil eder. Alınan tipik ödülü en üst düzeye çıkarmak için tasarlanmış R-öğrenme [38] gibi stratejiler vardır; buna rağmen, R-öğrenmenin yakınsaması kanıtlanmamıştır. Takviyeli öğrenmeyle ilgili bir diğer önemli konu, keşfederek öğrenme ile sömürücü öğrenme arasında yapılması gereken değiş tokuştur [39]. Sonuç olarak, Q-öğrenme ve daha geniş olarak takviyeli öğrenme, bu çizelgeleme problemine etkili ve uygulanabilir bir çözüm üretme amacı için uygun görünmemektedir. Bu, özellikle çok sayıda sensörün yanı sıra enerji gibi sürekli bir durum değişkeni dikkate alındığında daha fazla geçerlidir.

B. Huzursuz Çok Kollu Haydut (HÇKH) Yaklaşımı

Bu belirli zamanlama problemine, huzursuz çok kollu haydut problemi (HÇKH) olarak düşünülerek de yaklaşılabilir. Bu, standart KGMKS formülasyonunun bir çeşididir. HÇKH problemi, geleneksel çok kollu haydut (ÇKH) probleminin bir uzantısıdır. ÇKH problemi Gittins [40] tarafından en iyi olarak çözüldürken, Whittle [41] belirli varsayımlar altında problem için en iyi bir çözüm önermiştir. Papadimitriou ve Tsitsiklis [42] tarafından genel bir HÇKH'ye en uygun çözümü bulmanın PSPACE-zor bir problem olduğu gösterilmiştir ve bu problem aynı zamanda bu problemin çok yüksek bir hesaplama karmaşıklık seviyesine sahip olduğunu göstermektedir. Sensörlerin bellek kısıtlamaları dikkate alındığında, önemli ölçüde daha ilgili bir politika gereklidir. Sonuç olarak, HÇKH sorunları için miyop politika (MP) olarak adlandırılan daha basit bir strateji önerilir ve [43, 44, 45]'te tartışılan sensör yönetimi zorlukları için belirli durumlarda en iyi olduğu gösterilmiştir. Öte yandan, miyop bir yaklaşım ideal değildir çünkü sadece buraya ve şimdiye odaklanır ve geleceği hesaba katmaz [46, 47]. [48]'de, kanal araştırmayı içeren bir problem araştırılmış ve MP'nin mutlaka en iyi çözüm olmadığı gösterilmiştir. [43, 44, 45, 48]'de gündeme getirilen sorunları doğru bir şekilde ele almak için, zamanlama kararının geçiş olasılıkları üzerinde bir etkisinin olmadığı varsayımını yapmak gereklidir. Ancak bu geçerli bir varsayım değildir, çünkü enerji depolanabilen (herhangi bir indirim yapılmadan ve aslında son derece düşük olan pil sızıntısını göz ardı etmeden [2]) ve istendiğinde kullanılabilen esnek bir kaynaktır. Bu varsayım, halihazırda ele alınan EH çizelgeleme problemi için geçerli değildir. Spektrum ise depolanamayan ve var olduğu anda kullanılması gereken bir kaynaktır. Bu nedenle, spektrum esnek bir kaynak olarak kabul edilemez. Bunun bir sonucu olarak, çalışmalarda [43, 44, 45, 48] önerilen çareler, problemimize hemen uygulanamamaktadır.

[47, 49, 54]'de incelenen zamanlama zorlukları, eldeki konuyu ele almaya en yakın olan araştırma kapsamındaki çalışmalardır. Sırasıyla [47] ve [49]'da hiç pil olmadığını ve düğümlerdeki pillerin boyutunun birim boyutunda olduğunu varsayılmıştır. Hem [47] hem de [49], çizelgeleme problemini bir KGMKS biçiminde sunarlar, esasen müteakip ödüllerden ziyade anlık ödüle odaklanılır. Tek atlamalı bir kablosuz algılayıcı ağı, huzursuz çok kollu haydut probleminin (HÇKH) bir örneği olarak kabul edilir. Bu ağda, her biri birim boyutunda bir pile sahip olan EH verici düğümleri ve merkezi bir alıcı ve birden fazla kanala sahip olan bir füzyon merkezi vardır. Normalde HÇKH [50] için yetersiz olan Whittle indeks politikasının en iyiliği, EH sürecine ilişkin belirli varsayımlar verildiğinde belirli bir senaryo için gösterilmiştir. Round-Robin tabanlı bir miyop politikanın en iyiliği [49]'da, her düğümün yalnızca birim boyutlu bir pile sahip olduğu ve merkezi düğümün verici düğümlerinin sayısı ile iletişim kanallarının sayısı arasındaki oranın (m/k) bir tamsayı olduğu varsayımları altında gösterilmiştir. Bu, miyop politikasının bu özel durumlarda kullanılabilecek en etkili politika olduğunu kanıtlıyor. Problem [47]'de bir KGMKS olarak tanımlanmıştır ve MP'nin en iyiliği iki farklı özel durum için kanıtlanmıştır: 1) düğümler aynı anda veri toplayıp iletmez ve EH süreç geçişinin olasılıkları etkilenir. zamanlama kararları; ve 2) düğümlerin pilleri yoktur. [47, 49]'da sunulan miyop politikaları Round-Robin (RR) yaklaşımına dayalı olduğundan (m/k aynı zamanda RR Politikası altında bir tur süresidir) "m/k'nin bir tamsayı olduğunu" varsaymak çok önemlidir. Bu varsayımların gerçek dünyada nasıl uygulamaya konulabileceği konusunda bazı sınırlamaları vardır. [54]'teki çalışmada [47]'deki çalışma birim pil kapasitesi yerine sonlu bir pil kapasitesi düşünülerek genişletilmiştir. Burada olasılıksal süreçler üstünde [47]'deki kabulleri yaptığı için probleme belli başlı durumlar için en iyi çözüm getirmektedir. Bunun dışındaki durumlara en iyi altı çözüm önerebilmektedir.

Miyop politika (MP), beklenen anlık ödül işlevini enyükselten k düğümü çizelgeler. Ödül işlevi için MP, en yüksek inanç durumuna sahip k düğümü çizelgeler.

Şekil 2'de 2 kanala sahip bir füzyon merkezi 6 sensörden Miyop Politikayla (MP) veri toplarken oluşan çizelgeleme tablosu verilmektedir.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| Kanal 1 | 1 | 3 | 5 | 1 | 3 | 5 | 1 | 3 | 5 | 1 |
| Kanal 2 | 2 | 4 | 6 | 2 | 4 | 6 | 2 | 4 | 6 | 2 |

Şekil 2. Bir füzyon merkezi (FM) olarak çalışan bir baz istasyonu ve 6 sensörden (S1, S2, S3, S4, S5, S6) oluşan bir enerji hasatlayan KSA'da FM sensörlerden Miyop Politika (MP) Yaklaşımı ile veri toplamaktadır.

C. Düzgünleştiren Rastgele Sıralı Politika (DRSP) Yaklaşımı

Problemin ortaya konulabilmesi için enerji üretimi ve uygulaması ile ilgili bir modele ihtiyaç vardır. Başlamak için, bir düğümün pilinde depolanan enerji miktarı, o düğüm bir veri paketi gönderdiğinde azalır. İkincisi, bir bataryada depolanan enerji, toplanan enerjinin bir sonucu olarak tutarlı bir şekilde artar. Üçüncüsü, pil sızıntısı ihmal edilir. Bugün kullanımda olan yaygın pillerin incelenmesi, bu pillerden sızıntının birkaç dakika boyunca önemsiz düzeyde düşük olduğu bulunduğundan, bu varsayımın oluşmasına yol açmıştır. Bir politika için iyi bir performans ölçütü, gecikmeye duysuz bir iletişim problemi olan bu çizelgeleme problemi için beklenen toplam iskonto edilmiş ödül yerine sonlu ve sonsuz ufuktaki ortalama ödül olabilir [51]. Bunun nedeni, enerji hakkındaki bu hafif varsayımların, beklenen toplam indirimli ödülü uygunsuz bir performans ölçüsü haline getirebilmesidir. Haberleşme ağlarıyla ilgili problemler araştırılırken, indirim yerine ortalama gecikme kullanılarak gecikme incelenir. EH kaynakları, davranışları genellikle öngörülemeyen uygulamalarda titreşim veya kinetik enerji kullanılabilir [1, 3]. Bu sürekli ve bağımsız EH sürecinin en iyi çizelgelemesi zor bir iş haline gelir ve problemin çözülmesi için en iyiye yakın iyi çözümler bulmak gerekir.

Sensörlerin makul büyüklükte sonlu bir bataryası varsa, Düzgünleştiren Rastgele Sıralı Politika (DRSP)'nin makul büyüklükte bir sonlu batarya varsayımı altındaki verimliliği ile hemen hemen aynı verimliliğe sahip olduğu gösterilecektir. Bu, DRSP [32] olarak bilinen en iyiye yakın bir iletim programlama politikasının geliştirilmesine yönelik belirleyici bir yaklaşım benimsenerek başarılmıştır. Bu politikanın, her sensörün sonsuz kapasiteli bir pile sahip olduğu varsayılarak en iyiye yakın olduğu gösterildi. Ufku uzunluğu arttıkça, DRSP 'un sonsuz bir pil (bir birimden daha büyük kapasiteli bir pil) varsayımı altında çalışan bir enerji varış sürecinin genel bir örneği için asimptotik olarak en iyi olacağı da garanti edilir. [47, 49]'da açıklanan miyopik yaklaşımların aksine, DRSP, m/k bir tamsayıya eşit olmadığında bile en iyiye yakın performansı garanti edebilmektedir.

Çizelgeleme probleminin ikinci bir varyantı, problemin birinci varyantını birikmiş senaryoya genişleterek oluşturulur. Bu, veri arabelleklerinin tutarlılığı, toplanan enerjinin etkili kullanımı ile birlikte dikkate alındığında ortaya çıkar. Özellikle, sadelik adına aşağıda yeniden tanımlanacak olan DRSP'nin en iyiye yakınlığı, sonsuz bir pil ve arabellek varsayılırken nispeten genel enerji hasadı (EH) ve veri geliş (VG) prosedürleri altında gösterilmiştir. Ayrıca simülasyonlar aracılığıyla, uygun kapasiteye ve tampona sahip sonlu bir batarya varsayımı altındaki DRSP verimliliğinin, sonsuz tampon varsayımı altındaki verimlilikten önemli ölçüde farklı olmadığını gösterdik. Birçok RR tabanlı algoritmadan farklı olarak, DRSP'nin bir seferde programlanabilen kullanıcı sayısının (k)

kullanıcı havuzundaki toplam kullanıcı sayısına (m) oranı açısından tamamen esnek olduğunu belirtmek önemlidir. Bu akılda tutulması gereken bir şeydir.

Üçüncüsü, birinci zorluğa iki yönlü bir yaklaşım dikkate alınır. Bu özel konuda, tek bir sekmeden oluşan ve m farklı düğümden ayrı bir zamansal biçimde veri toplamak için merkezi bir denetleyici (MD) kullanan bir iletişim ağını dikkate alıyoruz. Gönderilecek verileri varsa, bir düğüm yalnızca belirli bir zaman dilimini kaplayacak şekilde planlandığında bir veri paketini iletir. MD, sistemin durumu (yani, düğümlerde depolanan veri paketlerinin miktarı) hakkında doğrudan bilgiye sahip olmadığı gibi, verilerin ulaştığı prosedürlerle ilgili istatistiklere de sahip değildir. k benzersiz düğümün herhangi bir alt kümesinin herhangi bir zamanda programlanabileceği varsayımı altında çalışıyoruz. MD'nin amacı, sonlu veya belirsiz bir zaman ufku altında mümkün olan en yüksek toplam verimi elde etmektir.

[56]'daki çalışmada miyop politikanın enerji hasatlayan kablosuz sensör ağlarında oluşan çizelgeleme probleminde çoğu zaman eniyi altı verihacmini başardığı gösterilmiştir. Benzer şekilde [57, 58]'deki çalışmada miyop politikanın bilişsel radyo ağlarında oluşan benzer fırsatçı spektrum erişimi amaçlı çizelgeleme probleminde çoğu zaman eniyi altı verihacmini başardığı gösterilmiştir. [55] ise [56]'da incelenen probleme asimptotik bir çözüm olarak DRSP'yi önermiştir. [59]'da [55]'deki çözümün asimptotik eniyiliğini yanında sonlu zaman ufku altında eniyiye yakın verihacmini başardığı gözlenmiştir. [60], [62]'de DRSP'nin enerji hasatlayan ve veri trafiği olan kablosuz sensör ağlarında oluşan çizelgeleme probleminde en iyi adilliği başardığı gözlenmiştir. [61] veri trafiği olan kablosuz sensör ağlarında oluşan çizelgeleme probleminde DRSP'nin en iyi verihacmini başardığı gözlenmiştir. [62, 63]'de oldukça geniş veri geliş hız süreçleri altında ağlar için DRSP'nin en iyi adilliği başardığı gösterilmiştir.

Şekil 3'te 2 kanala sahip bir FM 6 sensörden Düzgünleştiren Rastgele Sıralı Politika (DRSP) ile veri toplarken oluşan çizelgeleme tablosu verilmektedir.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| Kanal 1 | 1 | 3 | 3 | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| Kanal 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 2 | 2 | 2 |

Şekil 3. Bir FM olarak çalışan bir baz istasyonu ve 6 sensörden (S1, S2, S3, S4, S5, S6) oluşan bir enerji hasatlayan KSA'da FM sensörlerden DRSP Yaklaşımı ile veri toplamaktadır.

IV. TARTIŞMA VE GELECEKTEKİ ARAŞTIRMA YÖNLERİ

Önceki kısımlarda enerji hasatlayan KSA'da en iyi verihacmini başaracak şekilde veri toplama yaklaşımlarını ve algoritmalarını inceledik. Burada önerilen DRSP

yaklaşımının KGMKS ve HÇKH yaklaşımlarına ve onların MP gibi çözümlerine göre daha verimli bir verihacmi ve adillik performansı gösterdiği belirtilmiştir.

Diğer yandan, tarımsal uygulamalar için ekonomikliği de tartışılmalıdır. Enerji hasatlama, yenilebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar, vs) temelli bir enerji üretim teknolojisidir. Özellikle doğada, zor koşullarda çalışan küçük pilli sensörler için oldukça umut verici bir enerji üretim şeklidir.

[64]'te tarımsal üretimde yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı incelenmektedir. Bu çalışmada; tarım sektöründe etkili biçimde yararlanılabilecek yenilenebilir enerji kaynaklarının uygulamalı örnekleri ele alınmıştır. Bunlar güneş enerjisi ile sulama, ilaçlama, zararlı öldürücü, sera havalandırma, çit sistemi, jeotermal enerji ile sera ısıtma, balık yetiştiriciliği, rüzgar enerjisi ile su çıkarma ve yenilenebilir enerji kaynaklı kurutucular olarak listelenebilir.

[65]'te, sürdürülebilir tarımsal üretim için entegre kaynak verimliliği değerlendirilmiştir. Tarımsal üretimde sürdürülebilirlik için, teknik, ekonomik ve çevresel ölçütler tanımlanmıştır. Tarımsal üretimde enerji verimliliği sağlamak için gerekli enerji tasarrufu uygulamaları üretimde kullanılan sistemlere, işletimsel uygulamalara ve üretime giren sermaye malları/çiftlik altyapısına uygulandığı zaman önemli bir katkı sağlayacaktır.

[66]'da yenilenebilir enerji kaynaklarıyla tarımsal üretimde elektrik enerjisi sorunu çözülebileceği önerilmiştir. Seralarda havalandırma miktarını istenilen seviyeye çıkarabilmek için, mekaniksel havalandırmanın uygulanması gerektiği bunun için gereken enerjinin üretiminin de özellikle rüzgar enerjisi potansiyelinin yüksek olan bölgelerde rüzgar türbinlerinden yararlanılabileceği belirtilmiştir.

Kablosuz sensör ağlarının akıllı tarımın birçok yerinde özellikle gözlem ve denetleme için kullanılan önemli bir teknoloji olduğu düşünüldüğünde enerji hasatlama teknolojisinin akıllı tarımsal uygulamalar için ekonomikliği de tartışılmalıdır. Bilindiği kadarıyla literatürde bunu inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Önerilen yöntemler daha az enerji ve zaman harcanmasını sağlamaktadır; bu anlamda önerilen yaklaşımlar ve algoritmalar ekonomiktir.

Diğer yandan, enerji hasatlama teknolojisinin kurulum maliyeti ise başka bir araştırma konusudur. Bu yüzden, bu konu incelenmeye açık bir problem olarak düşünülebilir. Bu problemi incelemek için [64], [65], [66]'daki yaklaşımlardan faydalanılabilir.

V. SONUÇLAR VE SONRAKİ ARAŞTIRMA ÖNERİLERİ

Dünyada nüfus arttıkça, arazi küçüldükçe ve doğal kaynaklar azaldıkça kendi kendine yeten bir sistem talep eden hassas ve akıllı tarıma daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu literatür taraması, akıllı tarım uygulamalarında enerji hasatlayan kablosuz sensör ağlarında bir füzyon merkezi etrafındaki sensörlerden veri toplarken ortaya çıkan bir çizelgeleme probleminin farklı durumları ve bunlara önerilen çözümleri incelemektedir. Burada önerilen DRSP yaklaşımının KGMKS ve HÇKH yaklaşımlarına ve onların MP gibi çözümlerine göre daha verimli bir verihacmi ve adillik performansı göstermektedir.

Buradaki problemler, yöneylem araştırması problemleri olduğu için haberleşme ve bilgisayar ağları dışında başka birçok alanda görülebilir. Bu anlamda buradaki çözümler, haberleşme ve bilgisayar ağlarından daha geniş bir uygulama alanına sahip olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] P. Samuel S., K. Malarvizhi, S. Karthik and M. Gowri S.G., "Machine Learning and Internet of Things based Smart Agriculture," 2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 2020, pp. 1101-1106.
- [2] Chong, C.-Y.; Kumar, S.P. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. Proc. IEEE 2003, 91, 1247–1256.
- [3] J. A. Paradiso and T. Starner. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. IEEE Pervasive Computing, pp. 18-27, January 2005.
- [4] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M. B. Srivastava. Power management in energy harvesting sensor networks. ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS) , vol. 6, no. 4, p.32, September 2007.
- [5] C. F. García-Hernández, P. H. Ibarguengoytia-González, J. García-Hernández, J. A. Pérez-Díaz. Wireless Sensor Networks and Applications: a Survey. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 7, No. 3, pp. 264-273, March 2007.
- [6] S. Sudevalayam, P. Kulkarni. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.13, no.3, pp.443-461, Third Quarter 2011.
- [7] S. Baghaee, H. Ulsan, S. Chamanian, O. Zorlu, E. Uysal-Biyikoglu, and H. Kulah. Demonstration of Energy-Neutral Operation on a WSN Testbed Using Vibration Energy Harvesting. European Wireless 2014 (EW2014), Barcelona, Spain, 14-16th May 2014.
- [8] B. Prabhakar, E. Uysal-Biyikoglu, and A. E. Gamal. Energy-efficient transmission over a wireless link via lazy scheduling. Proc. IEEE/ACM INFOCOM, pp. 386-394, April 2001.
- [9] E. Uysal-Biyikoglu, B. Prabhakar, and A. E. Gamal. Energy-efficient packet transmission over a wireless link. IEEE Transactions on Networking, vol. 10, pp. 487-499, August 2002.
- [10] M. A. Zafer and E. Modiano. A calculus approach to minimum energy transmission policies with quality of

- service guarantees. Proceedings of IEEE INFOCOM, Miami, pp. 548-559, March 2005.
- [11] W. Chen, M.J. Neely, and U. Mitra, "Energy Efficient Scheduling with Individual Packet Delay Constraints: Offline and Online Results," in Proceedings of IEEE INFOCOM, pp. 1136-1144, May 2007.
- [12] M. A. Zafer and E. Modiano. A calculus approach to energy-efficient data transmission with quality of service constraints. IEEE Transactions on Networking, vol. 17, pp. 898-911, June 2009.
- [13] R. Berry, E. Modiano, M. Zafer, Energy-Efficient Scheduling under Delay Constraints for Wireless Networks, Synthesis Lectures on Communication Networks, Morgan and Claypool Publishers, September 2009.
- [14] M. Gatzianas, L. Georgiadis, and L. Tassiulas. Control of wireless networks with rechargeable batteries. IEEE Transactions on Communications, vol. 9, pp. 581-593, February 2010.
- [15] V. Sharma, U. Mukherji, V. Joseph, and S. Gupta. Optimal energy management policies for energy harvesting sensor nodes. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 4, pp. 1326-1336, 2010.
- [16] M. A. Anteppli, E. Uysal-Biyikoglu, and H. Erkal. Optimal packet scheduling on an energy harvesting broadcast link. IEEE J. Selected Areas in Communications, vol. 29, pp. 1721-1731, September 2011.
- [17] J. Yang and S. Ulukus. Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system. IEEE Transactions on Communications, vol. 60, pp. 220-230, January 2012.
- [18] K. Tutuncuoglu and A. Yener. Optimum transmission policies for battery limited energy harvesting nodes. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 11, pp. 1180-1189, March 2012.
- [19] H. Erkal, F. M. Ozcelik, E. Uysal-Biyikoglu. Optimal offline broadcast scheduling with an energy harvesting transmitter. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2013:197.
- [20] B. T. Bacinoglu and E. Uysal-Biyikoglu. Finite-horizon online transmission rate and power adaptation on a communication link with markovian energy harvesting. Journal Communications and Networks, June, vol. 16, no. 3, June 2014.
- [21] B. T. Bacinoglu and E. Uysal-Biyikoglu. Finite Horizon Online Packet Scheduling with Energy and Delay Constraints. IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, Batumi, Georgia, 3-5 July 2013.
- [22] B. T. Bacinoglu and E. Uysal-Biyikoglu. Finite Horizon Online Lazy Scheduling with Energy Harvesting Transmitters over Fading Channels. IEEE International Symposium on Information Theory, Honolulu, HI, USA, pp. 1176-1180, June 29 - July 4, 2014. 80
- [23] G. Uctu, O. M. Gul, B. T. Bacinoglu and E. Uysal-Biyikoglu. Implementation of Energy Efficient Transmission Scheduling Policies on Software Defined Radio. accepted to IEEE Globecom, Austin, TX, USA, December 8-12, 2014.
- [24] G. Uctu. Optimal transmission scheduling for energy harvesting systems and implementation of energy efficient scheduling algorithms on software defined radio. Master's thesis, METU, June 2014.
- [25] B. Akgun. Duty cycle optimization in energy harvesting sensor networks with application to bluetooth low energy. Master's thesis, METU, June 2014.
- [26] M. Shakiba-Herfeh. Optimization of feedback in a multiuser MISO communication downlink with energy harvesting users. Master's thesis, METU, June 2014.
- [27] M. Shakiba-Herfeh and E. Uysal-Biyikoglu. Optimization of feedback in a MISO downlink with energy harvesting users. In 20th European Wireless 2014, Spain, May 2014.
- [28] M. Shakiba-Herfeh, T. Girici, E. Uysal-Biyikoglu. Routing with Mutual Information Accumulation in Energy-Limited Wireless Networks. 24th Tyrrhenian Int. Workshop on Digital Comm.: Green ICT, Sept. 23-25, 2013.
- [29] E. T. Ceran, T. Erkilic, E. Uysal-Biyikoglu, T. Girici, and K. Leblebicioglu. Wireless access point on the move: Dynamic knapsack with incremental capacity. In Globecom 2014 - Symposium on Selected Areas in Communications: GC14 SAC Green Communication Systems and Networks (GC14 SAC Green Communication Systems and Networks), Austin, USA, Dec. 2014. submitted.
- [30] T. Erkilic. Optimizing the service policy of a mobile service provider through competitive online solutions to the 0/1 knapsack problem with dynamic capacity. Master's thesis, METU, June 2014.
- [31] E. T. Ceran. Dynamic Allocation of Renewable Energy through a Stochastic Knapsack Problem Formulation for an Access Point on the Move. MS thesis, METU, June 2014.
- [32] O. M. Gul, E. Uysal-Biyikoglu. A Randomized Scheduling Algorithm for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks Achieving Nearly 100% Throughput. IEEE Wireless Communication and Networking Conference, Istanbul, Turkey, pp. 2492-2497, April 2014.
- [33] Ö. M. Gül, "A low-complexity near-optimal scheduling policy for solving a restless multi-armed bandit problem occurring in a single-hop wireless network", MSc. Thesis, June 2014.
- [34] R. E. Bellman, Dynamic Programming. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1957. 81
- [35] C. J. Watkins. Learning from delayed rewards. Ph.D. dissertation, University of Cambridge, Psychology Dep., 1989.
- [36] L. P. Kaelbling, Michael L. Littman, Andrew W. Moore. Reinforcement learning: a survey. Journal of Artificial Intelligence Research, v.4 n.1, pp.237-285, January 1996.
- [37] C. J. Watkins, P. Dayan. Q-learning. Machine Learning, 8 (3), pp. 279-292, 1992.
- [38] S. Mahadevan. Average reward reinforcement learning: Foundations, algorithms, and empirical results. Machine Learning, Special Issue on Reinforcement Learning, vol. 22, pp. 159-196, 1996.

- [39] R. S. Sutton, A. G. Barto, Reinforcement Learning: An Introduction. MIT Press, Cambridge, MA, 1998.
- [40] J. C. Gittins. Bandit processes and dynamic allocation indices (with discussion). *J. Roy. Statist. Soc. Series B*, Vol. 41, No.2, pp. 148-177, 1979.
- [41] P. Whittle. Restless bandits: Activity allocation in a changing world. In *A Celebration of Applied Probability* J. Gani (Ed.), *J. Appl. Prob.* 25A pp. 287-298, 1988.
- [42] C. H. Papadimitriou and J. N. Tsitsiklis. The complexity of optimal queueing network control. *Math. Oper. Res.*, vol 24, pp. 293-305, May 1999.
- [43] S. H. A. Ahmad, M. Liu, T. Javidi, Q. Zhao and B. Krishnamachari. Optimality of myopic sensing in multi-channel opportunistic Access. *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol 55, No. 9, pp. 4040-4050, September 2009.
- [44] S. H. A. Ahmad, L. Mingyan. Multi-channel opportunistic access: A case of restless bandits with multiple plays. in *Proc. 47th Ann. Allerton Conf. Commun., Contr., Comput.*, Monticello, IL, pp. 1361-1368, September 2009.
- [45] K. Liu and Q. Zhao. Indexability of restless bandit problems and optimality of Whittle index for dynamic multichannel access. *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol 56, no. 11, pp. 5547-5567, November 2010.
- [46] A. Hero, D. Castanon, D. Cochran, K. Kastella. *Foundations and Applications of Sensor Management*, Chapter 6, Springer, US, 2007.
- [47] P. Blasco, D. Gunduz, and M. Dohler. Low-Complexity Scheduling Policies for Energy Harvesting Communication Networks. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Istanbul, Turkey, pp. 1601-1605, July 2013.
- [48] M. Johnston, E. Modiano, I. Kesslasy. Channel Probing in Communication Systems: Myopic Policies Are not Always Optimal. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Istanbul, Turkey, pp. 1934-1938, July 2013.
- [49] F. Iannello, O. Simeone, and U. Spagnolini. Optimality of myopic scheduling and whittle indexability for energy harvesting sensors. in *46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, Princeton, NJ, USA, pp. 1-6, March 2012.
- [50] J. Gittins, K. Glazerbrook, R. Weber, *Multi-armed bandit allocation indices*. West Sussex, UK, Wiley, 2011.
- [51] A. Arapostathis, V. S. Borkar, E. Fernandez-gaucherand, M. K. Ghosh, and S. I. Marcus. Discrete-time controlled Markov processes with average cost criterion: A survey. *SIAM J. Control Optim.*, vol. 31, no. 2, pp. 282-344, 1993.
- [52] O. M. Gul and E. Uysal-Biyikoglu. Achieving Nearly 100% Throughput without Feedback in Energy Harvesting Wireless Networks. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT'2014)*, Honolulu, HI, USA, pp. 1171-1175, June 29 - July 4, 2014.
- [53] F. Iannello, O. Simeone. On the Optimal Scheduling of Independent, Symmetric and Time-Sensitive Tasks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, no. 9, pp. 2421-2425, September 2013.
- [54] P. Blasco and D. Gündüz, "Multi-Access Communications With Energy Harvesting: A Multi-Armed Bandit Model and the Optimality of the Myopic Policy," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 3, pp. 585-597, March 2015, doi: 10.1109/JSAC.2015.2391852.
- [55] O. M. Gul, "Asymptotically Optimal Scheduling for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks", 28th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 08-13 October 2017, Montreal, QC, Canada, pp.1-7.
- [56] O.M.Gul,M.Demirekler,"Average throughput performance of myopic policy in energy harvesting wireless sensor networks", *Sensors*, vol.17,no.10, Sept.2017,pp. 1-20.
- [57] O.M.Gul,"Average Throughput of Myopic Policy for Opportunistic Access over Block Fading Channels",*IEEE Networking Letters*,vol.1,no.1, March 2019, pp. 38-41.
- [58] Ö. M. Gül, "Average Throughput Performance of Greedy Policy in Cognitive Radio Enabled Vehicular Networks," 2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2021, pp. 1-4.
- [59] O. M. Gul, M. Demirekler, "Asymptotically Throughput Optimal Scheduling for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 45004-45020, September 2018.
- [60] O. M. Gul, "Achieving Near-Optimal Fairness in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks", *IEEE International Symposium on Computers and Communications (ISCC 2019)*, 30 June-3 July 2019, Barcelona, Spain, pp. 673-678.
- [61] O. M. Gul, "Near-Optimal Data Communication Between Unmanned Aerial and Ground Vehicles", 20th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2020), December 12-15, 2020, pp. 1-12.
- [62] Ö. M. Gül, "Fair Data Collection in Wireless Networks," 2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2021, pp. 1-4.
- [63] Ö. M. Gül, "Fair Data Collection in Wireless Communications Networks," 2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Safranbolu, Turkey, 2022, pp. 1-4.
- [64] O. Taşkın ve A. Vardar , "Tarımsal Üretimde Bazı Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kullanımı", *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, c. 30, sayı. 1, ss. 179-184, Tem. 2016.
- [65] Mutlu, N. (2020). Tarımsal Üretim İçin Entegre Kaynak Verimliliği . *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (20) , 293-298.
- [66] Yüksel, E. & Yüksel, A. (2023). Means of Using Renewable Energy Resource: Wind Energy for Controlling Climate in Greenhouses . *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi* , 10 (2) , 431-437

Özgeçmiş



Ömer Melih Gül (S'17, M'21), Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans, yüksek lisans ve doktora derecelerini sırasıyla 2012, 2014 ve 2020 yıllarında aldı. Bu esnada aynı bölümde araştırma görevlisi olarak da görev yaptı. Uluslararası yayınları 11 dergi makalesi, 16 konferans bildirisi ve 4 kitap bölümünü kapsarken ulusal yayınları 3 dergi makalesi ve 3 konferans bildirisini kapsamaktadır.

IEEE Computer Society tarafından 2019 Lance Stafford Larson Üstün Öğrenci Makale Ödülü'nde (2019 Lance Stafford Larson Outstanding Student Paper Award) üçüncülük ödülüne layık görülmüştür. 2021 IEEE Rising Stars Global Konferansı'nda poster yarışmasında üçüncülük ödülüne layık görülmüştür. 2022 yılında Kanada'da Ottawa Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Okulu'nda doktora sonrası araştırmacı olarak çalıştı. 2022 yılında 48. Kablosuz Dünya Araştırma Forumu'nda (WWRF) en iyi konferans bildirisi ödülünü aldı. Mevcut durumda, İstanbul'da Bahçeşehir Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır.

2021'den bu yana IEEE Computer Society'de Region 8 (Avrupa, Orta Doğu ve Afrika Bölgesi) Koordinatörü olarak görev yapmaktadır. Nisan 2023'ten beri IEEE Computer Society Member&Geographic Activities (MGA) Board'da Özel Üye (Member-at-Large) olarak görev yapmaktadır. 2022 IEEE MGA Genç Profesyoneller Başarı Ödülü'ne (2022 IEEE MGA Young Professionals Achievement Award) layık görülmüştür. 2020-2021 yıllarında başkanlığını yaptığı IEEE Türkiye Genç Profesyonel Grup ile 2021 IEEE Region 8 Outstanding Young Professionals Affinity Group Award ve 2022 IEEE MGA Young Professionals Hall of Fame Honorable Mention ödülleri kazanmıştır.