Tam Metin Yazım Kuralları

Kenar boşlukları : 2,5 cm
Times new roman, 12 punto ile yazınız (Makale başlığı, yazar isimleri, kurumları, mail adresleri, cep telefon numaraları Özet ve anahtar kelimelerin tamamı 12 punto olmalı. Grafik, tablo gibi kısımlar için yazar punto büyüklüğü yazar tarafından en uygun biçimde belirlenebilir)
Satır aralığı 1,25 veriniz
Paragraf başlarında soldan girinti yapmayınız
ANA başlıklar BÜYÜK harfle ve bold yazılmalı
Örnek tam metin aşağıda yer almaktadır
Dilediğiniz atıf biçimini kullanabilirsiniz
Tam metinlerinizin en az 6 sayfa olması gerekmektedir
Tam metinlerinizde ÖZET, GİRİŞ, ARAŞTIRMA VE BULGULAR, SONUÇ ve KAYNAKÇA bölümlerinin ayrı başlıklar altında gösterilmesi gerekmektedir

ÖRNEK TAM METİN

YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ AKILLI SULAMA SİSTEMLERİNİN TARIMSAL SU VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE ETKİSİ

Ad-Soyad. ....., (İlk isim sunum yapacak kişi olmalıdır)
Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
projepazari@balikesir.edu.tr
Cep Tel: 5320059006
Ad-Soyad. ....., (Ekip üyesi sayısı kadar eklenmelidir eğer)
Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
projepazari@balikesir.edu.tr
Cep Tel: 5320059006

Danışman Bilgileri : Ad-Soyad. .....,(Proje danışmanı var ise danışman bilgileri eklenmelidir)
Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
projepazari@balikesir.edu.tr
Cep Tel: 5320059006

ÖZET

Bu çalışmada, yapay zekâ destekli akıllı sulama sistemlerinin tarımsal su verimliliği üzerindeki etkisi incelenmiş; toprak nem sensörleri, meteorolojik veriler ve bitki gelişim parametreleriyle beslenen karar destek algoritmalarının geleneksel sulama yöntemlerine kıyasla su tüketimi ve verim üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Araştırmanın verileri, 2025 yılı

üretim sezonunda Balıkesir ve çevresinde farklı ürün desenlerine sahip 48 tarımsal işletmede yürütülen saha uygulamaları ile elde edilmiştir. Çalışmada, işletmeler geleneksel sulama, sensör tabanlı otomatik sulama ve yapay zekâ destekli tahminleyici sulama olmak üzere üç gruba ayrılmış; her grup için birim alanda kullanılan su miktarı (m^3/da), bitki su stresi indeksi ve birim alan verimi (kg/da) ölçülmüştür. İlk olarak sulama yöntemlerine göre su tüketimi, verim ve su kullanım etkinliği ortalama değerleri t testi ve Çok Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) ile karşılaştırılmış; daha sonra iklimsel ve toprak değişkenleriyle kontrol edildiğinde uygulanan sulama yöntemi ile su kullanım etkinliği arasındaki ilişki Doğrusal Regresyon Analizi uygulanarak belirlenmiştir. Bulgular, yapay zekâ destekli tahminleyici sulama uygulanan işletmelerde birim alanda kullanılan su miktarının, geleneksel yöntem uygulanan işletmelere kıyasla anlamlı olarak daha düşük olduğunu; buna karşın birim alan veriminin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Genel olarak, sensör tabanlı ve yapay zekâ destekli sistemlerin uygulandığı işletmelerde su kullanım etkinliğinin, geleneksel yöntem uygulanan işletmelere göre daha yüksek olduğu; sistemin sağladığı erken uyarı ve otomasyon düzeyi arttıkça su tasarrufunun da paralel biçimde arttığı görülmüştür. Regresyon analizi sonuçlarına göre, sulama otomasyon düzeyi ile su kullanım etkinliği arasında pozitif yönlü, su stresi indeksi ile verim arasında ise negatif yönlü anlamlı bir ilişki saptanmıştır. Bu sonuçlara göre, dijital ve yeşil dönüşümün (ikiz dönüşüm) tarımsal üretime entegrasyonunun, hem su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımına hem de verimliliğe olumlu katkı sağladığı değerlendirilmektedir.

Anahtar kelimeler: Akıllı sulama, yapay zekâ, su verimliliği, sürdürülebilir tarım, ikiz dönüşüm.

ABSTRACT

In this study, the effect of artificial intelligence supported smart irrigation systems on agricultural water efficiency was examined; the impact of decision support algorithms fed by soil moisture sensors, meteorological data and plant growth parameters on water consumption and yield was evaluated in comparison with conventional irrigation methods. The data of the research were obtained through field applications carried out in 48 agricultural enterprises with different crop patterns in and around Balıkesir during the 2025 production season.

Water scarcity, driven by climate change and the increasing pressure on freshwater resources, has become one of the most critical challenges for sustainable agriculture. Agriculture accounts for a substantial share of total freshwater withdrawal, and inefficient irrigation practices lead to significant water losses. In this context, the integration of digital technologies such as the Internet of Things (IoT), sensor networks and machine learning into irrigation management offers considerable potential for improving water use efficiency while maintaining or increasing yield.

Within the scope of the study, enterprises were divided into three groups as conventional irrigation, sensor-based automatic irrigation and artificial intelligence supported predictive irrigation. For each group, the amount of water used per unit area, the crop water stress index

and the yield per unit area were measured and compared. The findings indicate that predictive irrigation based on artificial intelligence significantly reduces water consumption per unit area while increasing yield compared to conventional methods.

In this paper, the technical structure of the applied smart irrigation systems, the data sources used by the decision support algorithms and the results obtained regarding water efficiency and yield are presented. The results are expected to contribute to the dissemination of sustainable and technology-driven irrigation practices within the framework of the twin transition.

Keywords: Smart irrigation, artificial intelligence, water efficiency, sustainable agriculture, twin transition.

GİRİŞ

Su, tarımsal üretimin en temel girdilerinden biri olmasının yanı sıra, dünya genelinde giderek kıtlaşan ve üzerindeki baskı artan stratejik bir kaynaktır. İklim değişikliğinin etkisiyle yağış rejimlerinin düzensizleşmesi, kuraklık dönemlerinin sıklaşması ve tatlı su kaynaklarının azalması, tarımsal sulamada su verimliliğini kritik bir konu hâline getirmiştir (Rosegrant ve diğerleri, 2009). Küresel ölçekte tatlı su tüketiminin önemli bir bölümü tarımsal sulamada kullanılmakta; ancak geleneksel sulama yöntemlerinde suyun önemli bir kısmı buharlaşma, sızma ve aşırı sulama nedeniyle kaybedilmektedir. Bu durum, hem su kaynaklarının sürdürülebilirliğini hem de tarımsal üretimin ekonomik verimliliğini tehdit etmektedir.

Sürdürülebilir kalkınma hedefleri kapsamında, temiz suya erişim ve suyun verimli kullanımı öncelikli konular arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda, tarımsal üretimde suyun daha etkin yönetilmesini sağlayacak yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda dijital dönüşümün tarıma entegrasyonu ile ortaya çıkan "akıllı tarım" yaklaşımı; nesnelerin interneti (IoT), sensör ağları, büyük veri ve yapay zekâ gibi teknolojileri kullanarak üretim süreçlerinin veriye dayalı biçimde yönetilmesini mümkün kılmaktadır (Wolfert ve diğerleri, 2017).

Dijital ve yeşil dönüşümün bütüncül biçimde ele alındığı "ikiz dönüşüm" yaklaşımı, tarımsal üretimde hem çevresel sürdürülebilirliği hem de kaynak verimliliğini aynı anda gözeten bir bakış açısı sunmaktadır. Bu yaklaşımda dijital teknolojiler, yalnızca üretimi artırmanın değil; aynı zamanda su, enerji ve gübre gibi girdilerin çevresel etkisini azaltacak biçimde daha akıllı kullanılmasının bir aracı olarak konumlandırılmaktadır. Akıllı sulama sistemleri de bu kesişimin en somut uygulama alanlarından birini oluşturmaktadır.

Akıllı sulama sistemleri, temel olarak toprak nem sensörlerinden, meteorolojik istasyonlardan ve bitki gelişim verilerinden elde edilen bilgileri bir karar destek mekanizmasında işleyerek, bitkinin gerçek su ihtiyacına göre sulama yapılmasını sağlar. Geleneksel sulamada çiftçinin deneyimine veya sabit bir sulama takvimine dayanan kararlar, akıllı sistemlerde gerçek zamanlı verilere ve tahminleyici modellere dayandırılmaktadır. Böylece, bitkinin ihtiyaç duyduğu su, ihtiyaç duyduğu zamanda ve ihtiyaç duyduğu miktarda

verilerek hem su tasarrufu sağlanmakta hem de bitki su stresinin önüne geçilerek verim korunmaktadır (Abioye ve diğerleri, 2020).

Yapay zekâ, akıllı sulama sistemlerinde özellikle tahminleme ve karar verme aşamalarında öne çıkmaktadır. Makine öğrenmesi algoritmaları; geçmiş iklim verileri, toprak özellikleri ve bitki gelişim örüntülerini analiz ederek gelecekteki su ihtiyacını öngörebilmekte, böylece sulamanın önceden planlanmasına imkân tanımaktadır. Bu tahminleyici yaklaşım, yalnızca anlık ölçümlere dayanan sensör tabanlı sistemlere kıyasla daha proaktif bir su yönetimi sağlamaktadır. Literatürde, yapay zekâ destekli sulama yaklaşımlarının su tüketiminde önemli oranda azalma sağladığı; buna karşın verimde koruma ya da artış gözlendiği çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir (Gu ve diğerleri, 2021).

Bununla birlikte, akıllı sulama teknolojilerinin sahadaki etkinliği; uygulanan bölgenin iklim koşullarına, toprak yapısına, ürün desenine ve sistemin otomasyon düzeyine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle, farklı üretim koşullarında bu sistemlerin su verimliliği ve verim üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi önem taşımaktadır. Özellikle ülkemizde, tarımsal su kullanımının yoğun olduğu bölgelerde bu teknolojilerin sağlayacağı katkının ortaya konulması, hem çiftçiler hem de politika yapıcılar açısından yol gösterici olacaktır.

Tüm bu nedenlerle bu araştırmanın amacı, yapay zekâ destekli akıllı sulama sistemlerinin tarımsal su verimliliği üzerindeki etkisini incelemek; iklimsel ve toprak değişkenleriyle kontrol edildiğinde uygulanan sulama yöntemi ile su kullanım etkinliği arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktır. Bu çalışmanın tamamlanması, sürdürülebilir tarım ve su yönetimi konusundaki mevcut literatüre katkı sağlayacak; dijital ve yeşil dönüşümün tarımsal üretime entegrasyonuna yönelik uygulama temelli veriler sunacaktır. Bu kapsamda, akıllı sulama sistemlerinin farklı otomasyon düzeylerinde su verimliliği ve verim üzerindeki etkilerinin bir bütünlük içinde ele alınması, bölgesel ölçekte su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine yönelik önemli çıkarımlar sunacaktır.

YÖNTEM

Evren ve Örneklem

Araştırmanın evreni olarak, tarımsal üretimin yoğun olduğu ve farklı ürün desenlerini barındıran Balıkesir ili ve çevresindeki tarımsal işletmeler seçilmiştir. İşletmelerin belirlenmesinde, sulanan alan büyüklüğü, ürün deseni çeşitliliği ve teknolojik altyapıya erişim düzeyi gibi ölçütler göz önünde bulundurulmuştur. Saha uygulamalarının sağlıklı biçimde yürütülebilmesi için, benzer iklim kuşağında yer alan ve karşılaştırılabilir toprak özelliklerine sahip işletmeler tercih edilmiştir.

Araştırmalarda örneklem büyüklüğünü belirlemek amacıyla farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, karşılaştırmalı saha denemelerinde grup başına yeterli istatistiksel güce ulaşmak amacıyla her sulama yöntemi grubunda en az 15 işletmenin yer alması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında toplam 48 tarımsal işletmeden veri

toplanmış; işletmeler geleneksel sulama, sensör tabanlı otomatik sulama ve yapay zekâ destekli tahminleyici sulama olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Grupların oluşturulmasında, işletmelerin başlangıç koşulları (toprak tipi, ürün deseni, sulama altyapısı) bakımından dengeli dağılım göstermesine özen gösterilmiştir.

Araştırmada uygun örnekleme (convenient sampling) yöntemi seçilmiştir. Uygun örnekleme yöntemi, örneklemin rahat ulaşılabilir ve uygulama yapılabilir birimlerden seçilmesidir. Saha çalışmasına başlanmadan önce, ilgili işletme sahipleriyle görüşülmüş; hem araştırmanın amacı ve kapsamı hakkında bilgi verilmiş hem de uygulama sürecine ilişkin gönüllü katılımları alınmıştır. Ölçümler, üretim sezonu boyunca düzenli aralıklarla ve standart bir protokol çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmaya katılan işletmelerin sulanan alan büyüklüğü 10 ile 120 dekar arasında değişmektedir. İşletmelerin ürün deseni ağırlıklı olarak endüstriyel ve sebze ürünlerinden oluşmakta; toprak tipi tınlı ve killi-tınlı yapıda yoğunlaşmaktadır. İşletmelerin sosyo-teknik özelliklerine ilişkin bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Araştırmaya Katılan İşletmelerin Özellikleri

Değişken	Gruplar	n	%
Sulama yöntemi	**Geleneksel sulama**	**16**	**33.3**
	Sensör tabanlı otomatik	**16**	**33.3**
	Yapay zekâ destekli	**16**	**33.4**
Toprak tipi	**Kumlu-tınlı**	**14**	**29.2**
	Tınlı	**20**	**41.7**
	Killi-tınlı	**14**	**29.1**
Ürün deseni	**Endüstriyel bitkiler**	**22**	**45.8**
	Sebze	**18**	**37.5**
	Meyve	**8**	**16.7**
Sulanan alan	**10-40 da**	**18**	**37.5**
	41-80 da	**20**	**41.7**
	81-120 da	**10**	**20.8**

Veri Toplama Araçları

Bu araştırma kapsamında, işletmelerden su tüketimi, verim ve bitki su stresi verilerini toplamak amacıyla üç temel ölçüm aracı kullanılmıştır. Birim alanda kullanılan su miktarını belirlemek amacıyla her işletmenin sulama hattına debimetre yerleştirilmiş ve sezon boyunca kullanılan toplam su miktarı (m^3/da) kaydedilmiştir. Bitki su stresi düzeyini ölçmek için, kızılötesi termometre ve toprak nem sensörlerinden elde edilen verilerle hesaplanan Bitki Su Stresi İndeksi (BSSİ) kullanılmıştır. Birim alan verimi ise hasat döneminde her işletme için ayrı ayrı ölçülerek kg/da cinsinden kaydedilmiştir. İşletmelerin teknik ve yapısal özelliklerine ilişkin veriler ise araştırmacılar tarafından geliştirilen İşletme Bilgi Formu (İBF) ile elde edilmiştir.

Bağımlı Değişken

Su Kullanım Etkinliği (SKE): Su kullanım etkinliği, birim su başına elde edilen ürün miktarını ifade eden ve tarımsal su verimliliğinin temel göstergesi olarak kabul edilen bir değişkendir. Bu araştırmada su kullanım etkinliği, birim alan veriminin (kg/da) birim alanda kullanılan su miktarına (m^3/da) oranlanması ile hesaplanmıştır (SKE = kg/m^3). Su kullanım etkinliğinin yüksek olması, aynı miktar su ile daha fazla ürün elde edildiği; dolayısıyla suyun daha verimli kullanıldığı anlamına gelmektedir. Değişkenin güvenilirliğini artırmak amacıyla ölçümler sezon boyunca birden fazla kez tekrarlanmış ve ortalama değerler kullanılmıştır.

Bağımsız Değişkenler

Sulama Yöntemi: Araştırma kapsamında işletmeler üç sulama yöntemine göre gruplandırılmıştır. Geleneksel sulama grubunda, sulama kararları çiftçinin deneyimine ve sabit bir sulama takvimine dayanmaktadır. Sensör tabanlı otomatik sulama grubunda, toprak nem sensörlerinden elde edilen anlık verilere göre belirlenen eşik değerler aşıldığında sulama otomatik olarak başlatılmaktadır. Yapay zekâ destekli tahminleyici sulama grubunda ise; toprak nem verileri, meteorolojik tahminler ve bitki gelişim parametreleri makine öğrenmesi algoritmalarıyla işlenerek, gelecekteki su ihtiyacı öngörülmekte ve sulama önceden planlanmaktadır. Sulama otomasyon düzeyi, geleneksel yöntemden yapay zekâ destekli yönteme doğru artmaktadır.

Bitki Su Stresi İndeksi (BSSİ): Bitki su stresi indeksi, bitkinin yaşadığı su stresini niceliksel olarak ifade eden bir göstergedir. İndeks, bitki yaprak sıcaklığı ile çevresel referans değerler arasındaki farka dayanılarak hesaplanmakta olup 0 ile 1 arasında değer almaktadır. İndeks değerinin 0'a yakın olması bitkinin yeterli su aldığını, 1'e yakın olması ise bitkinin ciddi su stresi yaşadığını göstermektedir. Bu araştırmada BSSİ, sulama yöntemlerinin bitki üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla bağımsız değişken olarak kullanılmıştır.

Toprak ve İklim Değişkenleri: Araştırma kapsamında, işletmelerin toprak tipi, tarla kapasitesi, ortalama sıcaklık, toplam yağış ve buharlaşma gibi toprak ve iklim özellikleri hakkında bilgi toplanmış; bu değişkenler regresyon analizinde kontrol değişkenleri olarak kullanılmıştır.

Verilerin Analizi

Sulama yöntemlerine göre su tüketimi, verim ve su kullanım etkinliği ortalama değerlerinin karşılaştırılması amacıyla t testi ve Çok Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Toprak ve iklim değişkenleriyle kontrol edildiğinde, uygulanan sulama yöntemi ile su kullanım etkinliği arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla Doğrusal Regresyon Analizi uygulanmıştır.

BULGULAR

Su Tüketimi, Verim ve Su Kullanım Etkinliğine İlişkin Betimsel Değerler

Sulama yöntemlerine göre işletmelerin birim alanda kullandıkları su miktarı, birim alan verimi ve su kullanım etkinliği değerleri hesaplanmış ve gruplar arasında karşılaştırılmıştır.

Elde edilen betimsel değerler incelendiğinde, otomasyon düzeyi arttıkça birim alanda kullanılan su miktarının azaldığı, buna karşın su kullanım etkinliğinin arttığı gözlenmektedir. Değişkenlere ilişkin betimsel istatistikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Değişkenlere İlişkin Betimsel İstatistikler

Değişken	N	Min.	Max.	Ort.
Su tüketimi (m^3/da)	**48**	**180.0**	**520.0**	**342.5**
Verim (kg/da)	**48**	**820.0**	**2450.0**	**1585.0**
Su kullanım etkinliği (kg/m^3)	**48**	**2.10**	**9.80**	**5.24**
Bitki su stresi indeksi	**48**	**0.08**	**0.62**	**0.31**

Sulama Yöntemine Göre Ortalamaların Karşılaştırılmasına İlişkin Bulgular

İşletmelerin "su tüketimi", "verim" ve "su kullanım etkinliği" değişkenlerine ilişkin ortalama değerlerinin sulama yöntemine göre karşılaştırılmasına ilişkin bulgular Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te görüldüğü gibi, sulama yöntemleri arasında her üç değişken bakımından da farklar gözlenmektedir. Bu farkların anlamlı olup olmadığını test etmek amacıyla, grup sayısı üçten fazla olmadığından gruplar arası karşılaştırmalarda Çok Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) uygulanmış; F değeri anlamlı çıkan değişkenlere ilişkin Post-Hoc Testi yapılmıştır.

Tablo 3'te görüleceği üzere, sulama yöntemine göre işletmelerin birim alanda kullandıkları su miktarı anlamlı olarak farklılaşmaktadır ($F= 18.42$, $p< .05$). Post-Hoc Testi sonuçlarına göre, yapay zekâ destekli sulama uygulanan işletmelerin su tüketimi ortalaması (Ort.= 248.6 m^3/da), sensör tabanlı sulama (Ort.= 336.4 m^3/da) ve geleneksel sulama (Ort.= 442.5 m^3/da) uygulanan işletmelerin su tüketimi ortalamalarından anlamlı olarak daha düşük bulunmuştur. Genel olarak, sulama otomasyon düzeyi arttıkça birim alanda kullanılan su miktarının anlamlı olarak azaldığı görülmektedir.

Sulama yöntemine göre birim alan verimi de anlamlı olarak farklılaşmaktadır ($F= 9.87$, $p< .05$). Post-Hoc Testi sonuçlarına göre, yapay zekâ destekli sulama uygulanan işletmelerin verim ortalaması (Ort.= 1820.0 kg/da), geleneksel sulama uygulanan işletmelerin verim ortalamasından (Ort.= 1340.0 kg/da) anlamlı olarak daha yüksek bulunmuştur. Bu bulgu, akıllı sulama sistemlerinin yalnızca su tasarrufu sağlamakla kalmayıp, bitki su stresini azaltarak verimi de olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Su kullanım etkinliği bakımından da sulama yöntemleri arasında anlamlı fark bulunmuştur ($F= 27.65$, $p< .05$). Post-Hoc Testi sonuçlarına göre, yapay zekâ destekli sulama uygulanan işletmelerin su kullanım etkinliği ortalaması, sensör tabanlı ve geleneksel sulama uygulanan işletmelerin ortalamalarından anlamlı olarak daha yüksek bulunmuştur. Sonuç olarak, otomasyon ve tahminleme düzeyi arttıkça suyun daha verimli kullanıldığı belirlenmiştir.

Tablo 3. Sulama Yöntemine Göre Ortalama Değerler

Değişken	Sulama Yöntemi	Ort.	Ss
Su tüketimi (m^3/da)	**Geleneksel**	**442.5**	**48.2**

	Sensör tabanlı	**336.4**	**39.7**
	Yapay zekâ destekli	**248.6**	**31.5**
Verim (kg/da)	**Geleneksel**	**1340.0**	**182.4**
	Sensör tabanlı	**1595.0**	**168.9**
	Yapay zekâ destekli	**1820.0**	**175.3**
Su kullanım etkinliği (kg/m³)	**Geleneksel**	**3.03**	**0.51**
	Sensör tabanlı	**4.74**	**0.62**
	Yapay zekâ destekli	**7.32**	**0.78**

Su Kullanım Etkinliğine İlişkin Regresyon Sonuçları

Tablo 4'te su kullanım etkinliğine ilişkin regresyon sonuçları verilmiştir. Tablo incelendiğinde, sulama otomasyon düzeyi ile su kullanım etkinliği arasında pozitif yönlü bir ilişki olduğu saptanmıştır. Bu sonuca göre, işletmelerin sulama otomasyon düzeyi arttıkça su kullanım etkinliği de artmaktadır (Model 1). Model 1'de otomasyon düzeyinin etkisinin devam etmesiyle birlikte, bitki su stresi indeksi ile su kullanım etkinliği arasında negatif yönlü bir ilişki olduğu belirlenmiştir; bitki su stresi arttıkça su kullanım etkinliği azalmaktadır (Model 2). Model 3'te bu değişkenlere ek olarak toprak ve iklim değişkenleriyle kontrol edildiğinde, otomasyon düzeyinin su kullanım etkinliği üzerindeki etkisinin anlamlılığını koruduğu görülmüştür. Ayrıca toplam yağış ile su kullanım etkinliği arasında pozitif yönlü, buharlaşma ile su kullanım etkinliği arasında ise negatif yönlü bir ilişki belirlenmiştir (Model 3).

Tablo 4. Su Kullanım Etkinliği Regresyon Sonuçları

Bağımsız Değişkenler	Model 1	Model 2	Model 3
	B (SE)	B (SE)	B (SE)
Sulama otomasyon düzeyi	**2.145 (.312)*** **	**1.702 (.284)*** **	**1.518 (.301)*** **
Bitki su stresi indeksi		**-3.821 (.642)*** **	**-3.402 (.658)*** **
Toprak tipi			**.284 (.216)**
Ortalama sıcaklık			**-.118 (.094)**
Toplam yağış			**.392 (.148)** **
Buharlaşma			**-.276 (.121)***
Sabit	**1.842 (.402)**	**3.015 (.451)**	**3.284 (.612)**
R^2	**.402**	**.618**	**.651**

*p< .05, **p< .01, ***p< .001

TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapay zekâ destekli akıllı sulama sistemlerinin tarımsal su verimliliği üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan bu araştırmadan elde edilen bulgulara göre, sulama otomasyon düzeyi arttıkça birim alanda kullanılan su miktarı anlamlı olarak azalmakta, buna karşın birim alan verimi ve su kullanım etkinliği artmaktadır. Bu bulgu, akıllı sulama teknolojilerinin su tasarrufu ve verim artışını aynı anda sağlayabildiğini gösteren çalışmalarla tutarlılık göstermektedir (Abioye ve diğerleri, 2020). Geleneksel sulamada sabit takvime veya deneyime dayanan kararlar yerine, gerçek zamanlı verilere ve tahminleyici modellere dayanan

kararların alınması, suyun bitkinin gerçek ihtiyacına göre kullanılmasını sağlamakta ve gereksiz su kullanımının önüne geçmektedir.

Araştırmada, yapay zekâ destekli sulama uygulanan işletmelerin su tüketiminin geleneksel yönteme kıyasla anlamlı olarak daha düşük olduğu bulunmuştur. Bu durum, tahminleyici yaklaşımın sağladığı proaktif su yönetimiyle açıklanabilir. Yapay zekâ algoritmaları, yalnızca anlık nem ölçümlerine değil; aynı zamanda meteorolojik tahminlere ve bitki gelişim örüntülerine dayanarak sulama kararı verdiğinden, yağış öncesi gereksiz sulamanın önüne geçilebilmekte ve su kaynakları daha verimli kullanılabilmektedir. Bu bulgu, sensör tabanlı sistemlerin anlık ölçüme dayalı yapısına kıyasla, tahminleyici sistemlerin su tasarrufunda daha etkili olduğunu göstermektedir (Gu ve diğerleri, 2021).

Araştırmanın bir diğer önemli bulgusu, akıllı sulama sistemlerinin verim üzerindeki olumlu etkisidir. Yapay zekâ destekli sulama uygulanan işletmelerde birim alan verimi, geleneksel yönteme kıyasla anlamlı olarak daha yüksek bulunmuştur. Bu bulgu, akıllı sulamanın yalnızca su tasarrufu sağlamakla kalmayıp, bitki su stresini azaltarak verimi de koruduğunu ve artırdığını göstermektedir. Regresyon sonuçlarında da bitki su stresi indeksi ile su kullanım etkinliği arasında negatif yönlü bir ilişki bulunması, su stresinin azaltılmasının hem verim hem de su verimliliği açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır. Bitkinin doğru zamanda ve doğru miktarda sulanması, hem aşırı sulamaya bağlı su kaybını hem de yetersiz sulamaya bağlı verim düşüşünü engellemektedir.

Regresyon analizi sonuçlarına göre, sulama otomasyon düzeyi ile su kullanım etkinliği arasındaki pozitif ilişki, toprak ve iklim değişkenleriyle kontrol edildiğinde dahi anlamlılığını korumaktadır. Bu durum, akıllı sulama sistemlerinin sağladığı katkının yalnızca elverişli çevresel koşullara bağlı olmadığını; sistemin kendisinin su verimliliği üzerinde bağımsız ve belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca toplam yağış ile su kullanım etkinliği arasında pozitif, buharlaşma ile negatif ilişki bulunması, iklim koşullarının su yönetiminde göz önünde bulundurulması gereken önemli faktörler olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu araştırma sonucunda, sulama otomasyon düzeyi, bitki su stresinin yönetimi ve iklim koşullarının dikkate alınması gibi faktörlerin tarımsal su verimliliğini doğrudan etkilediği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını sağlamak ve tarımsal verimliliği artırmak amacıyla akıllı sulama teknolojilerinin yaygınlaştırılması önem taşımaktadır. Bu kapsamda, çiftçilere akıllı sulama sistemlerinin kurulumu ve kullanımı konusunda teknik destek ve teşvik sağlanması yararlı olabilir. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerin bu teknolojilere erişimini kolaylaştıracak destek mekanizmalarının geliştirilmesi, dijital dönüşümün tarımda daha geniş kitlelere yayılmasına katkı sağlayacaktır.

Dijital ve yeşil dönüşümün bütünleşik biçimde ele alındığı ikiz dönüşüm yaklaşımı çerçevesinde, akıllı sulama sistemleri hem su kaynaklarının korunmasına hem de tarımsal üretimin sürdürülebilirliğine önemli katkı sunmaktadır. Bu teknolojilerin yaygınlaştırılması amacıyla, üniversite–sanayi iş birliğinin güçlendirilmesi, yerel yönetimlerin ve tarımsal destek

kuruluşlarının süreçlere dâhil edilmesi ve çiftçilere yönelik eğitim programlarının düzenlenmesi yararlı olabilir. Bu araştırma; tarım teknolojileri alanında çalışan uzmanlar, ziraat mühendisleri, su yönetimi politikaları geliştiren kamu kurumları, girişimciler ve akademisyenler için referans niteliği taşımaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı iklim kuşaklarında ve ürün desenlerinde bu sistemlerin etkinliğinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi, elde edilen bulguların genellenebilirliğini artıracaktır.

KAYNAKLAR

Abioye, E. A., Abidin, M. S. Z., Mahmud, M. S. A., Buyamin, S., Ishak, M. H. I., Abd Rahman, M. K. I., … & Ramli, M. S. A. (2020). A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. Computers and Electronics in Agriculture, 173, 105441.

Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., & Norton, T. (2017). Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation. Sustainability, 9(3), 353.

Chartzoulakis, K., & Bertaki, M. (2015). Sustainable water management in agriculture under climate change. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 4, 88-98.

Gu, Z., Qi, Z., Burghate, R., Yuan, S., Jiao, X., & Xu, J. (2021). Irrigation scheduling approaches and applications: A review. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 147(7), 04021024.

Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. Journal of Experimental Botany, 55(407), 2427-2436.

Kamienski, C., Soininen, J. P., Taumberger, M., Dantas, R., Toscano, A., Salmon Cinotti, T., … & Torre Neto, A. (2019). Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture. Sensors, 19(2), 276.

Levidow, L., Zaccaria, D., Maia, R., Vivas, E., Todorovic, M., & Scardigno, A. (2014). Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. Agricultural Water Management, 146, 84-94.

Rosegrant, M. W., Ringler, C., & Zhu, T. (2009). Water for agriculture: maintaining food security under growing scarcity. Annual Review of Environment and Resources, 34, 205-222.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming – A review. Agricultural Systems, 153, 69-80.

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture – a worldwide overview. Computers and Electronics in Agriculture, 36(2-3), 113-132.