

Tarımsal Su Planlamasında CBS Tabanlı Optimum Bitki Deseni Modeli: Cihadiye Kaynarca Göleti Sulaması Örneği

Umut MUCAN ^{*1}, Murat YILDIRIM ¹, Kemal Sulhi GÜNDOĞDU ²

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Çanakkale, Türkiye

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

Öz: Bu çalışma, Çanakkale ili Biga ilçesindeki Cihadiye Kaynarca Göleti sulama sahasında faaliyet gösteren tarımsal işletmeler için optimum bitki desenini belirlemeyi amaçlamaktadır. Amaç, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını teşvik ederken ekonomik verimliliği artırmaktır. Bu doğrultuda bölgede yaygın olarak yetiştirilen bitkilerin su gereksinimleri FAO'nun CropWat 8.0 yazılımıyla hesaplanmış ve her ürün için sulama programları hazırlanmıştır. Sulama sahasının fiziksel özellikleri, ürün bazlı minimum-maksimum ekim alanları ve birim alandan elde edilen brüt kârlar dikkate alınarak, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile entegre edilmiş doğrusal programlama tabanlı bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Modelde, %100 su teminini içeren tam sulama (S1) referans senaryo olarak kabul edilmiş, ardından %70 (S2) ve %50 (S3) su arzı senaryoları oluşturularak farklı yönetim stratejileri test edilmiştir. Sınırlı su koşullarında en uygun üretim planlaması analiz edilmiş ve model ile optimum bitki desenleri belirlenmiştir. Sonuçlar, baraj kapasitesi %100 iken brüt kârın 174 milyon TL olduğunu, %30 su kısıtıyla bu değer 111 milyon TL'ye düştüğünü göstermektedir. Ayrıca, su tüketimi yüksek çeltik ve mısır gibi ürünlerin ekim alanları azaltılmış, daha az su isteyen ürünlere yer verilmiştir. 2023 yılı bitki deseniyle yapılan karşılaştırmada ise aynı alan kullanılarak 1 milyon TL ek kâr ve 163.000 m³ su tasarrufu sağlanmıştır. Model, benzer koşullara sahip alanlarda da uygulanabilir niteliktedir.

Anahtar kelimeler: Coğrafi bilgi sistemleri, tarımsal su yönetimi, optimum bitki deseni, kuraklık, baraj yönetimi

GIS Based Optimum Crop Pattern Model in Agricultural Water Planning: Cihadiye Kaynarca Pond Irrigation Example

Abstract: This study aims to determine the optimal crop pattern for agricultural enterprises operating in the irrigation area of the Cihadiye Kaynarca Pond located in Biga district, Çanakkale province. The objective is to promote the sustainable use of water resources while enhancing economic efficiency. To this end, the water requirements of commonly cultivated crops in the region were calculated using the FAO's CropWat 8.0 software, and irrigation schedules were developed for each crop. Taking into account the physical characteristics of the irrigation area, crop-specific minimum and maximum cultivation areas, and gross profit per unit area, a linear programming-based optimization model integrated with Geographic Information Systems (GIS) was developed. In the model, full irrigation (S1: 100% water supply) was set as the reference scenario. Subsequently, scenarios with 70% (S2) and 50% (S3) water supply were created to test different management strategies. Under limited water availability, the most suitable production planning was analyzed, and optimal crop patterns were determined using the model. The results show that when the dam operates at full capacity, the gross profit reaches 174 million TL. However, under a 30% reduction in water supply, this amount drops to 111 million TL. Moreover, the cultivation areas of water-intensive crops such as rice and maize were reduced, and crops with lower water requirements were recommended. Compared to the actual crop pattern of 2023, the model enabled the same land area to generate an additional 1 million TL in gross profit and saved 163,000 m³ of water. The model is adaptable for use in other agricultural areas with similar conditions.

Keywords: Geographic information systems, agricultural water management, optimum crop pattern, drought, reservoir management

GİRİŞ

Sulama, bitkilerin sağlıklı gelişimi için gerekli olan ve doğal yağışlarla karşılanamayan suyun, kök bölgesine zamanında ve yeterli miktarda ulaştırılması sürecidir. Sulama sistemlerinin doğru şekilde tasarlanması ve uygulanması hem su kaynaklarının verimli kullanımı hem de tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşır. Bu nedenle, her bölgenin tarımsal koşullarına uygun sulama yönteminin belirlenmesi ve bu yöntemle uygun sistemin planlanması gereklidir. Dünya genelinde sulama, toplam su tüketiminin yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır. Bu oran, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine ilişkin ciddi endişelere yol açmaktadır. Tarımsal su kullanımının artması, güvenli içme suyu kaynaklarının azalmasına neden olmaktadır (Pierrat ark., 2023). Ayrıca evsel ve endüstriyel su

talebindeki artış, küresel iklim değişikliği, kuraklık ve yağış rejimlerindeki düzensizlikler de tarımsal su kullanımı verimliliğini olumsuz etkilemektedir (Wang ark., 2023; Callejas Moncaleano, 2021). Bu gelişmeler, sulama suyunun daha verimli kullanımını hedefleyen çalışmalara olan ilgiyi artırmıştır.

Tarımsal sulamanın etkin yönetimi, ürün verimliliğini ve ekonomik getiriyi doğrudan etkiler. Nüfus artışı ve su kaynakları üzerindeki baskının yoğunlaşmasıyla birlikte,

***Sorumlu Yazar:** umut.mucan@comu.edu.tr

Geliş Tarihi: 27 Mayıs 2025

Kabul Tarihi: 23 Haziran 2025

Bu makale Umut MUCAN'nın doktora tezinden üretilmiştir.

modern sulama sistemleri ve optimizasyon teknikleri ön plana çıkmaktadır. Özellikle suyun yetersiz olduğu durumlarda, kısıntılı sulama uygulamaları sayesinde mevcut su daha geniş alanlara dağıtılabilmekte; böylece birim su başına elde edilen gelir artırılabilir (English, 1990; Tekinel ve Kanber, 1979).

Sulama havzaları, mevcut su kaynaklarını ve piyasa taleplerini dikkate alarak en yüksek geliri elde etmeyi hedefler. Tarımsal işletmeler de benzer şekilde, uygun ürün desenini belirleyerek ekonomik verimliliği artırmak istemektedir. Bu noktada, su kullanımını optimize eden ve karar alma süreçlerini destekleyen modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

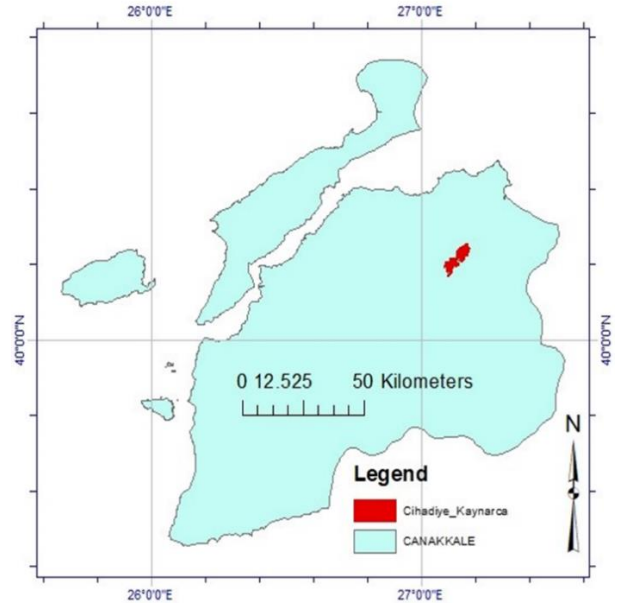
Bu çalışmada, Çanakkale ili Biga ilçesindeki Cihadiye Kaynarca Göleti sulama sahasında faaliyet gösteren tarımsal işletmeler için optimum bitki desenini belirlemeye yönelik bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Model, göletin mevcut su potansiyeli, iklim verileri, toprak özellikleri, potansiyel bitki türleri ve ürün gelirlerini temel alarak parsel bazlı bir çözüm sunmaktadır. Tarımsal su kullanımının iyileştirilmesi konusunda yapılan çok sayıda çalışmada, doğrusal programlama yöntemi öne çıkmaktadır. Bu yöntem, belirli bir hedef fonksiyonun tanımlı kısıtlar altında en iyi sonucu verecek şekilde çözülmesini sağlar (Kodal, 2003). Literatürde bu yöntemle sulama sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik birçok uygulama gerçekleştirilmiştir (Ağlamış ark., 1997; Benli ve Kodal, 2003; Selenay, 2001; Demir, 2005; Fayrap ve Kızıloğlu, 2010; Osama ark., 2017).

Bu çalışma, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı bir model geliştirilerek sulama sistemlerinin planlanmasına yeni bir yaklaşım sunmayı amaçlamaktadır. CBS'nin sunduğu mekânsal analiz yetenekleri, suyun dağıtımı ve bitki desenlerinin yönetimi açısından önemli avantajlar sağlar. Geliştirilen model, sulama verimliliğini artırmayı, su kaynaklarını daha etkin kullanmayı ve tarımsal karar alma süreçlerini desteklemeyi hedeflemektedir. Bölgesel su kısıtlarını dikkate alarak optimum bitki desenlerini belirleyen bu modelin, tarımsal işletmelere yön gösterici bir karar destek aracı olması amaçlanmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, Çanakkale ili Biga ilçesindeki Cihadiye Kaynarca Göleti sulama sahasında gerçekleştirilmiştir. Gölet, Cihadiye Kaynarca Sulama Birliği tarafından yönetilmekte olup, 19,119.2 dekarlık tarım alanının su ihtiyacını karşılamaktadır. Çalışmada, Çanakkale merkez meteoroloji istasyonundan alınan verilerle doğrusal programlama yöntemi kullanılarak parsel bazlı bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Bu model, tarımsal işletmelerin büyüklükleri, bitkilerin su gereksinimleri ve ekonomik getirileri dikkate alınarak, farklı bitki deseni senaryolarını belirlemeye yönelik hazırlanmıştır. Göletin rezervuar alanı 251.40 km² olup, yıllık ortalama akımı

63.83 hm³tür. Aktif hacmi 126,475 hm³, ölü hacmi 4.420 hm³, sulama hattı uzunluğu 12.625 km'dir.



Şekil 1. Çalışma alanı (Cihadiye Kaynarca Göleti)

2020-2023 yılları arasında tarımsal işletme sahiplerinin yetiştirdiği ürünler dikkate alınarak bitki deseni oluşturulmuş ve üç yıllık değerler simülasyonda esas alınmıştır.

Genellikle yem bitkileri kışlık ekim olarak yapılmakta olup, 13,261.37 da alanda yetiştirilen başlıca tarla bitkileri arasında ayçiçeği, mısır, arpa, yonca ve çeltik yer almaktadır. Meyve ve sebze üretimi kapsamında ise armut, biber, ceviz, domates ve karpuz yetiştirilmektedir. Bölgedeki toprak yapısı incelendiğinde, en yaygın toprak türü %43.7 oranla killi-tınlı toprak olup, bunu %34.5 oranında killi, %16.5 oranında tınlı ve %4.8 oranında ağır killi topraklar takip etmektedir (Taşova ve Akın, 2013). Marmara Bölgesi toprak bünye haritasına göre, Cihadiye Kaynarca Göleti sulama sahasında toprak bünyesi killi-tın olarak tespit edilmiştir (Ayyıldız, 1990). Bu kapsamda, tarla kapasitesi %33, solma noktası %19, su tutma kapasitesi 140 mm/m ve infiltrasyon hızı 167 mm/gün olarak kabul edilmiştir.

Çalışmanın temel bileşenlerinden biri, bitkisel su tüketim değerlerinin hesaplanması olup, bu kapsamda Penman-Monteith yöntemi kullanılarak referans evapotranspirasyon (E_{to}) belirlenmiş ve bitkilerin dönemsel su ihtiyaçları CropWat 8.0 programı yardımıyla hesaplanmıştır. Bölgedeki iklimsel değişkenlerin modele entegrasyonu için Çanakkale Merkez Meteoroloji İstasyonu'ndan sağlanıp ortalama sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı ve güneşlenme süresi gibi parametreler modele aktarılmıştır. Tarımsal üretimde su-verim ilişkisini değerlendirmek amacıyla, Stewart modeli esas alınmış ve su kullanım etkinliği ile ilgili verim kayıplarını

tahmin etmek için su verim ilişki katsayısı (K_y) parametresi dikkate alınmıştır (Doorenbos ve Kassam, 1986; Raes ark, 1988). Stewart modeli, su eksikliği koşullarında gerçekleşen verim kayıplarını tahmin etmek için kullanılan ampirik bir yaklaşımdır ve verim ile evapotranspirasyon (ET) arasındaki doğrusal ilişkiyi ifade eder. Model aşağıdaki formül ile tanımlanır:

$$1 - (Y_a / Y_m) = K_y \times [1 - (E_{Ta} / E_{Tm})]$$

Burada Y_a mevcut verimi, Y_m maksimum verimi, E_{Ta} mevcut evapotranspirasyonu, E_{Tm} ise maksimum evapotranspirasyonu ve K_y ise su verim ilişkisi katsayısını temsil eder.

Modelin uygulanabilirliğini test etmek ve farklı su yönetimi stratejilerinin etkilerini değerlendirmek amacıyla baraj kapasitesinin yeterli olduğu (K_1) ve kısıtlı olduğu (K_2 , K_3) senaryoları geliştirilmiştir. Birincisi mevcut durum senaryosu; 2020-2023 yılları arasındaki tarımsal üretim verileri dikkate alınarak oluşturulmuş olup, sulama sahasında hâlihazırda yetiştirilen bitkilerin dağılımını ve su kullanımını simüle ederek temel almaktadır. Bu senaryoda, mevcut bitki deseni sürdürülebilirliği, mevcut su tahsisi ile uyumluluğu ve ekonomik getirisi analiz edilmiştir. İkinci Su kısıtlı senaryosu ise bölgedeki olası kurak dönemleri simüle etmek amacıyla oluşturulmuş olup, baraj rezervuarında mevcut olan toplam su miktarını belirli miktarlarda azaltarak senaryoyu kapsamaktadır. Bu senaryoda, su kıtlığı koşullarında çiftçilerin ekonomik kayıplarını en aza indirmek amacıyla, düşük su tüketimiyle yüksek ekonomik getiri sağlayan bitkiler önerilmiştir. Üçüncüsü (K_3) ise maksimum ekonomik getiri senaryosu, sulama sahasında su kaynaklarının en verimli şekilde kullanılarak çiftçilerin toplam gelirlerinin maksimize edilmesini amaçlamaktadır. Sulama sahasında yer alan meyve bahçeleri (armut, ceviz, şeftali) sabit tesis olarak değerlendirilmiş ve optimizasyon sürecine doğrudan dahil edilmemiştir. Bunun yerine, bu tesislerin mevsimsel su tüketimleri baraj kapasitesinden düşülerek analiz gerçekleştirilmiştir.

Bu doğrultuda aşağıdaki sorulara yanıt aranmıştır:

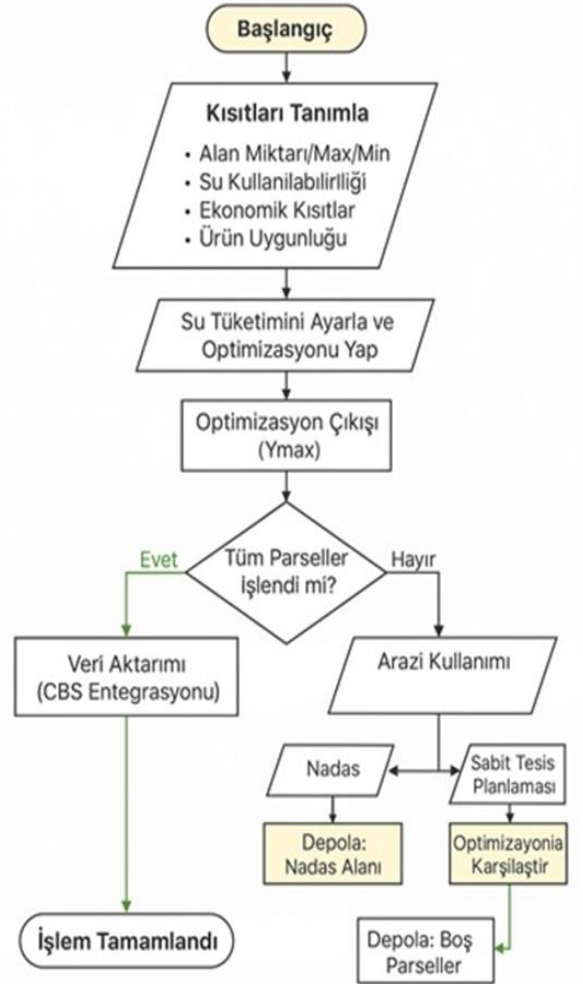
Baraj kapasitesinin yeterli olduğu (K_1) koşulunda, maksimum gelir sağlayacak optimum bitki deseni nasıl olmalıdır?

Baraj kapasitesinin %70 seviyesine düştüğü (K_2) durumda, sabit tesislerin sulama oranlarının %100, %70 ve %50 seviyelerinde olması halinde en uygun bitki deseni nasıl olmalıdır?

Baraj kapasitesinin %30 olduğu (K_3) durumda, sabit tesislerin sulama seviyelerinin %100, %70 ve %50 olması halinde, optimum bitki deseni nasıl olmalıdır?

Bu modelin işleyişi iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, sulama sahasının geneli için mevcut su kaynakları dikkate alınarak optimum bitki deseni belirlenir. Bu süreçte

toplam sulama alanı, bitkilerin mevsimsel su ihtiyacı ve baraj kapasitesi gibi faktörler kısıt olarak tanımlanır. İkinci aşamada ise parsel bazında, çiftçi tercihleri ve tarımsal üretim kabiliyeti doğrultusunda ürün yerleşimi optimize edilir. Bu aşamada işlenmeyen parseller nadas, sabit tesis ya da üretime uygun alanlar olarak sınıflandırılır. Uygun tahsis yapılamayan alanlar "boş parsel" olarak kayıt altına alınır.



Şekil 2. Modelin Akış Diyagramı

Modelde kısıtlar; maksimum ve minimum ekim alanları, sulama için ayrılacak toplam su miktarı, ekonomik faktörler ve her bir bitkinin belirlenen toprak özelliklerine uygunluğu gibi parametrelerden oluşmaktadır. Şekil 2'de görüldüğü üzere, model belirlenen kısıtlar doğrultusunda su tüketimini ayarlayarak optimum bitki deseni belirlemekte ve hedef fonksiyona göre en uygun çözümü üretmektedir. Sürecin tamamlanıp tamamlanmadığı kontrol edilir; tüm parseller işlendiğinde sonuçlar CBS veri tabanına aktarılır ve ArcGIS ortamında görselleştirilir.

Henüz işlenmemiş parseller, nadas, sabit tesis veya üretime uygun alanlar olarak sınıflandırılır. Sabit tesis alanları (örneğin meyve bahçeleri), ilgili sürece kaydedilirken;

üretim uygun olup tahsis yapılmayan alanlar “boş parsel” olarak tanımlanır.

Son aşamada tüm veriler mekansal analiz sistemine aktarılır, model çıktıları harita temelli görsellerle desteklenir ve senaryolar arası farklar coğrafi olarak analiz edilir. Böylece, su kaynaklarının etkin kullanımı sağlanır ve ekonomik kayıplar minimize edilerek optimum tarımsal planlama gerçekleştirilir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, Cihadiye Kaynarca Göleti sulama sahasında geliştirilen optimizasyon modelinin normal koşullardaki sonuçları değerlendirilmiştir. Model, her bitki için optimum su miktarını ve sulama periyotlarını belirlemiş, elde edilen verilerle ekonomik analiz yapılmıştır.

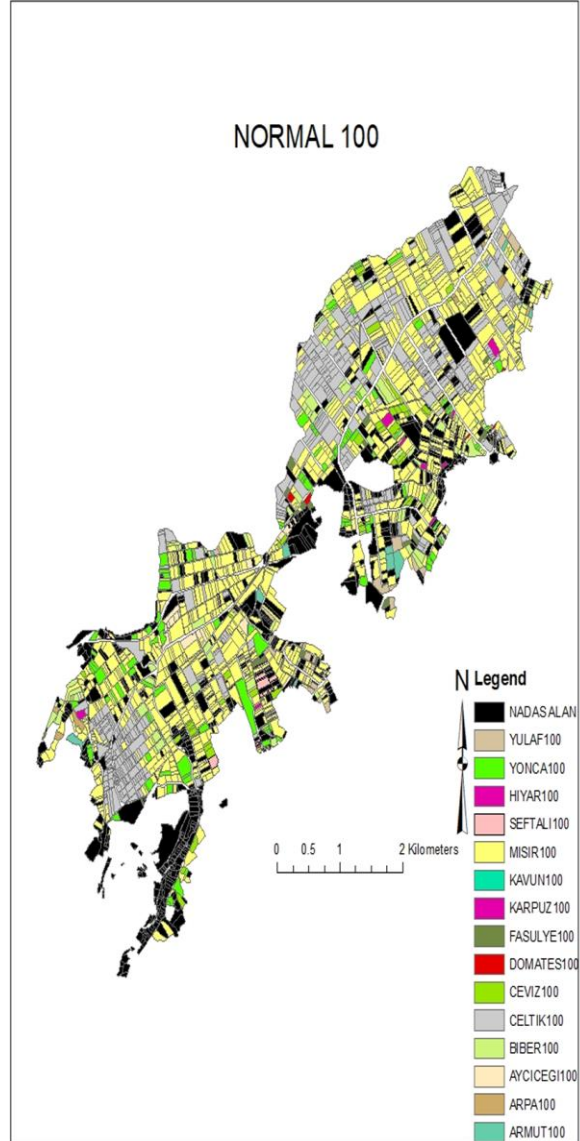
Tam sulama koşullarında tüm bitkiler maksimum verime ulaşmış olsa bile model ekonomik getiriyi maksimize etmek amacıyla bazı ürünlerin ekim alanlarını yeniden düzenlemiştir. Su tüketimi yüksek ancak getirisi düşük bitkilerin alanları azaltılırken, daha kârlı ürünlerin alanları artırılmıştır. Böylece, mevcut su kaynaklarının verimli kullanımı ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliği sağlanmıştır. Barajdaki Su Miktarının Yeterli (%100) Olması Durumunda Optimum Bitki Deseni

Cihadiye Kaynarca Göleti sulama sahasında, baraj kapasitesinin tam dolu olduğu normal koşullarda optimum bitki desenini belirlemek amacıyla doğrusal programlama yöntemiyle bir model geliştirilmiştir. Sabit tesisler (armut, ceviz, şeftali) modele doğrudan dahil edilmemiş; bu bitkilerin yıllık su tüketimi baraj kapasitesinden düşülerek kalan su miktarı üzerinden analiz gerçekleştirilmiştir.

Model sonuçlarına göre, tam sulama koşullarında (S1) tüm bitkiler maksimum verime ulaşmış ve toplam brüt kâr 174.209.884 TL olarak hesaplanmıştır. En yüksek brüt kâr, sırasıyla çeltik 43 milyon TL, mısır 40.9 milyon TL, yonca 21.4 milyon TL, biber 18.9 milyon TL ve cevizden 34.3 milyon TL elde edilmiştir (Çizelge 1). Ancak bu ürünler aynı zamanda en fazla sulama suyu tüketen bitkiler olup; mısır yaklaşık 5.4 milyon m³, çeltik 3.1 milyon m³ su kullanmıştır.

Modelin önerdiği ekim alanı dağılımında çeltik 3.799 da, mısır 8.017 da, yonca 891 da, biber 773 da ve ceviz 381 da alanda yer almıştır. Bu sonuçlar, yüksek getirili ürünlerin aynı zamanda su tüketiminde öncelikli olduğunu göstermektedir. Özellikle çeltik ve mısır gibi ürünlerin planlamasında, uzun vadeli su yönetimi stratejilerinin dikkatle ele alınması

gerekmektedir. Sonuç olarak, geliştirilen optimizasyon modeli hem üreticilerin gelirlerini maksimize etmekte hem de mevcut su kaynaklarının etkin kullanımını sağlayarak sürdürülebilir bir tarımsal üretim stratejisi sunmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Barajdaki su miktarının yeterli (%100) olması durumunda optimum bitki deseni

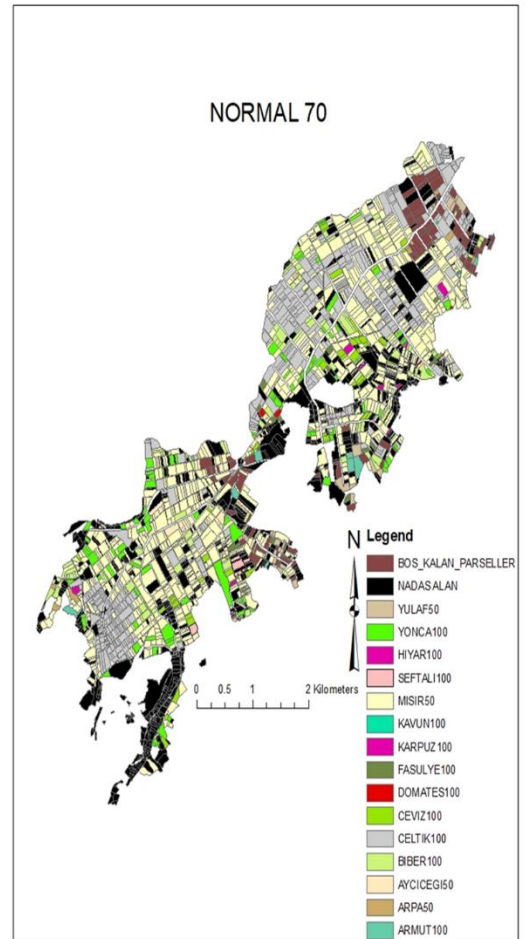
Çizelge 1. Barajdaki su miktarının yeterli (%100) olması durumunda optimum bitki deseni

Bitkiler	Brüt kar (TL)	Sulama suyu miktarı (m ³)	Alan (da)
Armut	696,224.2	95,696.5	137.2
Ceviz	34,322,400	318,435.6	381.4
Şeftali	530,966.4	57,046.5	80.9
SBT* Toplam	35,549,590.6	471,178.6	599.5
Arpa100	143,775.9	13,591.9	73.4
Aycıceğı100	959,464.7	91,997.6	220.1
Biber100	18,928,700	487,047	772.6
Celtik100	43,127,841.8	3,088,619.5	3,799
Domates100	556,308.8	14,125.8	25.7
Fasulye100	1,410,282.1	62,116.1	132.7
Karpuz100	127,197	8,544.4	20.2
Kavun100	53,892.9	2,313.2	4.7
Mısır100	40,886,292	5,388,973.6	8,016.9
Hıyar100	10,763,640	32,334.2	61.9
Yonca100	21,392,880	631,090	891.4
Yulaf100	310,018.8	51,218.2	260.5
Nadas	0	0	4,240.8
Genel Toplam	174,209,884.6	10,343,151	19,119.2

*SBT: Sabit tesisler toplamı

Baraj kapasitesinin %70 seviyesine düştüğü (K2) durumda, sabit tesislerin sulama oranlarının %100 seviyesinde olması halinde en uygun bitki deseni

Cihadiye Kaynarca Göleti sulama sahasında baraj kapasitesinin %70 olduğu ve sabit tesislerin tam olarak sulandığı bu senaryoda, toplam brüt kâr 152.5 milyon TL, toplam üretim alanı yaklaşık 18,000 da, su kullanımı ise yaklaşık 7 milyon m³ olarak hesaplanmıştır (Çizelge 2). Sabit tesisler kapsamında değerlendirilen armut, ceviz ve şeftali üretimi toplam 599.5 da alanda gerçekleştirilmiş, 471.179 m³ su kullanılarak yaklaşık 35 milyon TL brüt kâr elde edilmiştir. En yüksek getirili sabit tesis ürünü ceviz olurken, 381 da alanda 318.436 m³ su kullanarak 34,3 milyon TL brüt kâr sağlamıştır. Tek yıllık bitkilerde ise çeltik, mısır, yonca ve biber en yüksek ekonomik getiriyi sunmuştur. Çeltik 3.799 da alanda 3,09 milyon m³ su ile 43,1 milyon TL brüt kâr elde etmiş; mısır 7.035 da alanda 2,36 milyon m³ suyla 19,5 milyon TL kâr getirmiştir. Yonca ve biberin brüt kârları sırasıyla 21,4 milyon TL ve 18,9 milyon TL olmuştur. Diğer ürünlerde de farklı alan ve su tüketimleriyle üretim yapılmış; örneğin hıyar 61,9 da alanda 10,76 milyon TL brüt kâr sağlamış, fasulye ise 132,7 da alanda 1,4 milyon TL gelir elde etmiştir. Bununla birlikte, sulama sahasında 4.240 da alan nadas olarak bırakılmış, bu alanlar için su ve ekonomik getiri hesaplanmamıştır. Modelin bu senaryodaki çıktıları, su kıtlığı koşullarında dahi kaynakların verimli şekilde tahsis edilmesiyle yüksek ekonomik getiri sağlanabileceğini göstermektedir. Sabit tesislerin sulama önceliği korunarak, diğer ürünlerde su kullanımı optimize edilmiş ve toplam gelirin maksimum düzeye ulaşması sağlanmıştır.



Şekil 4. Barajdaki su miktarının yeterli (%70) olması durumunda optimum bitki deseni

Çizelge 2. Barajdaki su miktarının yeterli (%70) olması durumunda optimum bitki deseni

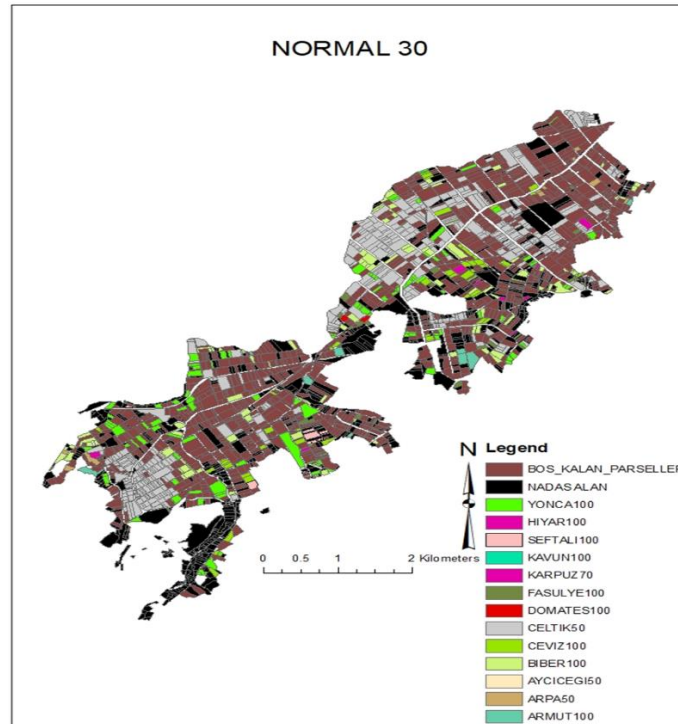
Bitkiler	Brüt kar (TL)	Sulama Suyu Miktarı (m ³)	Alan (da)
Armut	696,224.2	95,696.5	137.2
Ceviz	34,322,400	318,435.6	381.4
Şeftali	530,966.4	57,046.5	80.9
SBT Toplam	35,549,590.6	471,178.6	599.5
Arpa50	138,443.2	6,795.9	73.4
Ayıciceği50	639,916.5	45,998.8	220.1
Biber100	18,928,700	487,047	772.6
Çeltik100	43,127,841.8	3,088,619.5	3,799.0
Domates100	556,308.8	14,125.8	25.7
Fasulye100	1,410,282.1	62,116.1	132.7
Karpuz100	127,197	8,544.4	20.2
Kavun100	53,892.9	2,313.2	4.7
Mısır50	19,479,662.8	2,364,432.9	7,034.9
Hıyar100	10,763,640	32,334.2	61.9
Yonca100	21,392,880	631,090	891.4
Yulaf50	287,077.4	25,609.1	260.5
Nadas	0	0	4,240.8
Toplam	116,905,842.5	6,769,027.1	17,537.7
Genel Toplam	152,455,433	7,240,205.7	18,137.2

*SBT: Sabit tesisler toplamı

Baraj kapasitesinin %30 seviyesine düştüğü (K3) durumda, sabit tesislerin sulama oranlarının %100 seviyesinde olması halinde en uygun bitki deseni

Cihadiye Kaynarca Göleti sulama sahasında baraj kapasitesinin %30'a düştüğü ve sabit tesislerin tam sulandığı bu senaryoda, toplam brüt kâr 111 milyon TL, toplam üretim alanı 10.239,5 da, su kullanımı ise 3.1 milyon m³ olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3). Sabit tesisler (armut, ceviz, şeftali) 599.5 da alanda üretim yapmış; 471 bin m³ su kullanılarak yaklaşık 35.5 milyon TL brüt kâr elde edilmiştir. Bu ürünler arasında ceviz, en yüksek getiriye sağlayan ürün olmuş, 381 da alanda 318 bin m³ su ile 34.3 milyon TL kazanç sağlamıştır. Tek yıllık bitkilerde en yüksek kârlılık çeltik, mısır, yonca ve biber üretiminde gözlenmiştir. Su kısıtı nedeniyle çeltik %50 sulama düzeyinde 3,417 da alanda 1.39 milyon m³ suyla 22.1 milyon TL, mısır %50 sulama ile 19.5 milyon TL brüt kâr

sağlamıştır. Yonca ve biberin getirisi sırasıyla 21.4 milyon TL ve 18.9 milyon TL olarak hesaplanmıştır. Diğer bitkilerden hıyar 10.76 milyon TL, fasulye 1.4 milyon TL, domates 556 bin TL, karpuz 105 bin TL brüt kâr elde etmiştir. Ayçiçeği ve kavun gibi bazı ürünler ise bu senaryoda üretim dışı kalmıştır. Ayrıca, 4,240 da alan nadasa bırakılmıştır. Su kısıtı nedeniyle toplam ekim alanı ve kâr, önceki senaryolara göre önemli ölçüde azalmış; çeltik %50 sulamaya düşürülmüş, bazı mısır alanları tahsis dışı kalmıştır. Model çıktıları, düşük baraj kapasitesi koşullarında bile suyun stratejik dağılımıyla önemli bir gelir elde edilebileceğini göstermektedir. Bu durum, su yönetiminde optimizasyonun önemini vurgulamakta ve sürdürülebilir tarım planlaması için güçlü bir araç sunduğunu göstermektedir (Şekil 5, Çizelge 3).



Şekil 5. Barajdaki su miktarının yeterli (%30) olması durumunda optimum bitki deseni

Çizelge 3. Barajdaki su miktarının yeterli (%30) olması durumunda optimum bitki deseni

Bitkiler	Brüt Kar (TL)	Sulama Suyu Miktarı (m ³)	Alan (da)
Armut	696,224.16	95,696.5	137.2
Ceviz	34,322,400	318,435.6	381.4
Şeftali	530,966.40	57,046.5	80.9
SBT* Toplam	35,549,590.56	471,178.6	599.5
Arpa50	138,443.16	6,795.9	73.4
Aycicegi50	0	0	0
Biber100	18,928,700	487,047	772.6
Celtik70	0	0	0
Celtik50	22,149,077.86	1,390,658.4	3,416.9
Domates100	556,308.80	14,125.8	25.7
Fasulye100	1,410,282.10	62,116.1	132.7
Karpuz70	105,191.92	5,980.3	20.2
Kavun100	0	0	0
Kavun70	44,030.50	1,618.9	4.7
Hıyar100	10,763,640	32,334.2	61.9
Yonca100	21,392,880	631,090	8,91.4
Nadas	0	0	4,240.8
Genel Toplam	111,038,144.90	3,102,945.3	10,239.5

*SBT: Sabit tesisler toplamı

Geliştirilen CBS tabanlı doğrusal programlama modeli, mevcut literatürdeki sulama planlama yaklaşımlarına kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Literatürde yer alan birçok çalışmada (Benli ve Kodal, 2003), sulama planlaması toplam su potansiyeline göre yapılmış ve mekânsal farklılıklar göz ardı edilmiştir. Bu çalışmada ise farklı su arz senaryoları (K1, K2, K3) detaylı biçimde ele alınmış, sabit tesislerin etkisi dışlanarak daha gerçekçi ve esnek bir su tahsisi sağlanmıştır. Akyüz ve Yıldırım (2022) gibi çalışmalarda sulama alanları bütüncül şekilde değerlendirilirken, bu model parsel bazlı çözümleme ile üretim kapasitesi ve çiftçi tercihini dikkate alarak daha hassas bir optimizasyon sunmuştur. Çakmak ve Gündüz (2005) tarafından önerilen ürün desenlerinin uygulanabilirliği mekânsal olarak sınırlıyken, bu çalışma ArcGIS entegrasyonu sayesinde harita tabanlı çıktılar üretmekte ve karar destek sistemine entegre edilebilmektedir. Ayrıca model, CBS altyapısında geliştirildiği için tüm CBS özelliklerinin kullanımına olanak tanımakta ve bu sayede hem mekânsal analiz hem de görselleştirme açısından kapsamlı bir platform sunmaktadır.

FAO CropWat 8.0 verileriyle bitki bazında mevsimsel su ihtiyacı detaylı olarak hesaplanmış, böylece su kullanım verimliliği öne çıkarılmıştır. Bu yönüyle, tarımsal sulama kararlarının sadece teknik değil, bağlamsal ve davranışsal boyutlarını vurgulayan Callejas Moncaleano et al. (2021) yaklaşımıyla da örtüşmektedir.

Sonuç olarak geliştirilen model; ekonomik getiriye maksimize ederken, mekânsal analiz kabiliyeti ve esnek senaryo yapısıyla klasik modellerin ötesine geçerek sürdürülebilir tarımsal su yönetimi için güçlü bir araç sunmaktadır (Benli ve Kodal, 2003; Akyüz ve Yıldırım, 2022; Callejas Moncaleano et al., 2021).

SONUÇ

Bu çalışma, Çanakkale ili Biga ilçesinde yer alan Cihadiye Kaynarca Göleti sulama sahasında optimum bitki desenini belirlemek ve su kaynaklarının verimli kullanımını sağlamak amacıyla CBS tabanlı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Model, barajın mevcut kapasitesine göre farklı su arz senaryoları (K1: %100, K2: %70, K3: %30) altında optimum ürün desenlerini belirlemiş ve ekonomik getirileri karşılaştırmalı olarak sunmuştur. Tam sulama koşullarında (K1) brüt kâr 174 milyon TL ve toplam üretim alanı 19,119.2 da olarak gerçekleşmiş; %70 su arzında (K2) brüt kâr 152.5 milyon TL'ye, üretim alanı ise 18.000 da seviyesine düşmüştür. En kısıtlı senaryo olan %30 su arzında (K3) ise üretim alanı 10,239.5 da'ya düşmüş, brüt kâr ise yaklaşık 111 milyon TL olmuştur. Su kısıtı altında özellikle çeltik ve mısır gibi yüksek su tüketimli ürünlerin üretim alanlarında daralma yaşanmış; buna karşın yonca, biber ve fasulye gibi daha az su tüketen ürünler ön plana çıkmıştır. Sabit tesis olarak değerlendirilen meyve bahçeleri ise her senaryoda sabit kalmış ve ekonomik katkısını sürdürmüştür. Modelin

önerdiği desenler ayrıca 2023 yılı Kaynarca Göleti'nde uygulanan mevcut bitki deseniyle de kıyaslanmıştır. Aynı toplam alan korunarak yaklaşık 1 milyon TL daha fazla brüt kâr elde edilmiş ve 163.000 m³ düzeyinde su tasarrufu sağlanmıştır. Bu durum, modelin hem ekonomik hem çevresel açıdan avantaj sağladığını göstermektedir.

Bu çalışmanın literatürdeki benzerlerinden farkı, su tahsisi, ürün tercihi ve ekonomik verimliliği mekânsal olarak entegre etmesi ve karar destek sistemine dönüştürmesidir. Model, parsel bazlı analiz kabiliyeti ve ArcGIS entegrasyonu sayesinde farklı senaryolara hızlı ve dinamik şekilde yanıt verebilmektedir.

Modelin uygulanabilirliğini ve karar destek kapasitesini artırmak adına, farklı iklim senaryoları altında test edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, model çıktılarının saha gözlemleri ve çiftçi uygulamalarıyla karşılaştırılarak geçerlilik analizlerinin yapılması, güvenilirliğin artırılması açısından önem arz etmektedir. Gelecekteki çalışmalarda, üretici tercihleri, destekleme politikaları ve sürdürülebilirlik göstergelerinin modele entegre edilmesi, optimizasyonun yalnızca ekonomik değil aynı zamanda çevresel ve sosyal boyutlarını da kapsamasını sağlayacaktır. Son olarak, geliştirilen modelin kullanıcı dostu bir arayüz ile (web/mobil tabanlı) desteklenerek paydaşlara sunulması, modelin yaygın kullanımı ve sahadaki etki gücünü önemli ölçüde artıracaktır.

KAYNAKLAR

- Ağlamış N, Tokgöz MA (1997) Ankara Murted sulamasında su kullanım ve dağıtım etkinliğinin belirlenmesi. *Journal of Agricultural Sciences* 3(2): 83–86.
- Akyüz S, Yıldırım M (2022) Çanakkale Özbek ovasındaki işletmelerde yeterli ve kısıtlı su koşullarında optimum bitki deseninin belirlenmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi* 10(2): 236–244.
- Ayyıldız M (1990) Sulama suyu kalitesi ve tuzluluk problemleri. Yayın No: 1196, Ders Kitabı No: 344. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.
- Benli B, Kodal S (2003) A non-linear model for farm optimization with adequate and limited water supplies. *Agricultural Water Management* 62(3): 187–203.
- Callejas Moncaleano DC, Pande S, Rietveld L (2021) Water use efficiency: A review of contextual and behavioral factors. *Frontiers in Environmental Science* 9: 764916.
- Demir H (2005) Farklı işletme büyüklüklerinde optimum bitki deseniyle çiftçilerin sulama yatırımı ve su ücreti ödeme gücünün belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Doorenbos J, Kassam AH (1986) Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper* No: 33. FAO, Roma.

- English MJ (1990) Deficit irrigation I: Analytical framework. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 116(3): 399–412.
- Fayrap A, Kızıloğlu FM (2010) Demirdöven sulama sahası için optimum bitki deseninin belirlenmesi. *GOÜ Ziraat Fakültesi Dergisi* 27(1): 35–41.
- Kodal S (2003) Türkiye'de güvenilir yağışın mekansal dağılımı. *Journal of Agricultural Sciences* 9(4): 529–534.
- Osama S, Elkholy M, Kansoh RM (2017) Optimization of the cropping pattern in Egypt. *Alexandria Engineering Journal* 56(4): 557–566.
- Pierrat E, Dorber M, de Graaf I, Laurent A, Hauschild MZ, Rygaard M, Barbarossa V (2023) Multicompartment depletion factors for water consumption on a global scale. *Environmental Science & Technology* 57(10): 4318–4331.
- Raes D, Lemmens H, Van Aelst PM, Vanden Bluche, Smith M (1988) IRSIS, Irrigation Scheduling Information System: Reference Manual. FAO, Roma.
- Selenay MF (2001) GAP-Fırat sulama birliğinde yeterli ve kısıtlı sulama suyu koşullarında sulama programlaması ve optimum bitki deseni. *Tarım Bilimleri Dergisi* 7(3): 149–155.
- Taşova H, Akın A (2013) Marmara bölgesi topraklarının bitki besin maddesi kapsamalarının belirlenmesi, veri tabanının oluşturulması ve haritalanması. *Toprak Su Dergisi* 2(2): 20–27.
- Tekinel O, Kanber R (1979) Çukurova koşullarında kısıtlı su kullanma durumunda pamuğun su tüketimi ve verimi. *Tarsus BTAE Yayınları* 98: 39 s.
- Wang W, Elahi E, Sun S, Tong X, Zhang Z, Abro MI (2023) Factors influencing water use efficiency in agriculture: A case study of Shaanxi, China. *Sustainability* 15(3): 2157.

