

Gediz Havzasında ürün deseninin çok amaçlı doğrusal programlama yaklaşımı ile optimizasyonu

Volkan HACISÜLEYMAN

Orcid: 0000-0003-4340-2045

İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 34469, İstanbul, Türkiye

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 11230, Bilecik, Türkiye

Mehmet ÖZGER

Orcid: 0000-0001-9812-9918

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

Makale Künyesi

*Araştırma Makalesi /
Research Article*

*Sorumlu Yazar /
Corresponding Author
Volkan HACISÜLEYMAN
hacisuleymanv@itu.edu.tr*

*Geliş Tarihi / Received:
14.05.2025*

*Kabul Tarihi / Accepted:
07.08.2025*

*Tarım Ekonomisi Dergisi
Cilt: 31 Sayı: 2 Sayfa: 237-244*

*Turkish Journal of
Agricultural Economics
Volume: 31 Issue: 2 Page: 237-244*

*DOI
10.24181/tarekoder.1699095*

*JEL Classification: Q15, Q18,
Q21*

Özet

Amaç: Küresel nüfusun hızla artması ve iklim değişikliğinin yarattığı belirsizliklerle birlikte, ürün ekim stratejilerinin optimize edilmesi kritik bir mesele haline gelmiştir. Sınırlı arazi ve su kaynakları dahilinde çalışırken gıda güvenliğini sağlamanın yanında kaynakların korunmasını ekonomik uygulanabilirlikle dengeleyen verimli ve sürdürülebilir ekim modellerinin geliştirilmesi, tarımın geleceği için çok önemlidir. Bu çalışmada, su kullanımını en aza indirmek ve tarımsal geliri en üst düzeye çıkarmak gibi çatışan hedeflerle ekim modellerini optimize etmek için çok amaçlı bir doğrusal programlama modeli kullanılmıştır.

Tasarım/Methodoloji/Yaklaşım: Modeldeki başlıca kısıtlar, model aracılığıyla elde edilen gelirin mevcut duruma eşit veya daha yüksek, su kullanımının mevcut duruma eşit veya daha düşük olmasını ve ürün ekim alanlarının maksimum %10 değişmesine izin verilmesini içermektedir. Optimal ürün desenleri 2017, 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemleri için belirlenmiş ve çeşitli ekim senaryolarının sonuçları analiz edilmiştir.

Bulgular: Tüm senaryolar su tüketiminde azalma ve tarımsal gelirde artış gösterirken, bu değişikliklerin boyutunun ekim alanlarında izin verilen değişimlerden etkilendiği görülmüştür. Tüm zaman dilimleri arasında, ekim alanlarında %10'luk bir değişikliğe izin veren Senaryo 6'nın en etkili senaryo olduğu belirlenmiştir. Temel senaryoya kıyasla su kullanımında ortalama %5.30'luk bir azalma ve tarımsal gelirde %2.81'lik bir artışla sonuçlanan bu senaryo, su tasarrufu ve ekonomik kazançların dengelenmesi için en uygun seçenek olarak öne çıkmıştır. Bu çalışmanın bulguları, önerilen çok amaçlı doğrusal programlama modelinin sürdürülebilir tarımsal yönetimin teşvik edilmesinde önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Özgünlük/Değer: Sonuçlar, yalnızca ekim modellerinin ayarlanmasının su tüketiminde önemli azalmalar sağlayabileceğini ve aynı zamanda tarımsal gelirde kayda değer bir artışa yol açabileceğini göstermektedir. Bu durum, tarımda kaynak verimliliğini ve ekonomik sürdürülebilirliği iyileştirmek için pratik ve etkili bir strateji olarak optimize edilmiş ürün planlamasının potansiyelini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Çok amaçlı doğrusal programlama, optimizasyon, tarımsal planlama, ürün deseni.

Optimization of cropping pattern in Gediz Basin using multi-objective linear programming approach

Abstract

Purpose: With the rapid growth of the global population and the uncertainties brought by climate change, optimizing crop planting strategies has become a critical issue. Developing efficient and sustainable cropping models that balance food security, resource conservation, and economic viability within the constraints of limited land and water resources is essential for the future of agriculture. This study employs a multi-objective linear programming model to optimize cropping patterns with the conflicting objectives of minimizing water usage and maximizing agricultural revenue.

Design/Methodology/Approach: The model operates under three key constraints: the income generated must be at least as high as the current level, water usage must not exceed the current amount, and crop acreage can vary by up to 10%. Optimal crop patterns were determined for the periods 2017, 2025-2050, 2050-2075, and 2075-2100, and the results of various cropping scenarios were analyzed.

Findings: While all scenarios demonstrated reductions in water consumption and increases in agricultural income, the extent of these changes was influenced by the permissible variations in cultivation areas. Across all time periods, Scenario 6 which allows for a 10% change in cropland was identified as the most effective scenario. It resulted in an average 5.30% reduction in water usage and a 2.81% increase in agricultural income compared to the base scenario, making it the most favorable option for balancing water conservation and economic gains. The findings of this study demonstrate that the proposed multi-objective linear programming model can play a crucial role in promoting sustainable agricultural management.

Originality/Value: The results indicate that significant reductions in water consumption can be achieved solely by adjusting cropping patterns, while simultaneously leading to a notable increase in agricultural income. This highlights the potential of optimized crop planning as a practical and effective strategy for improving resource efficiency and economic sustainability in agriculture.

Keywords: Multi-objective linear programming, optimization, agricultural planning, crop pattern.

GİRİŞ

Kurak bölgelerde tarımsal sulama, toplam su tüketiminin %85'inden fazlasını oluşturmakta, bu da su kaynaklarını hem tarımsal verimlilik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir kısıt haline getirmektedir (Kang ve ark., 2017). Sürdürülebilir tarım, çevresel ve sosyal sonuçları da hesaba katarak, doğal kaynakların tükenmesini önlemek ve yenilenme kapasitelerini korumak için sorumlu bir şekilde yönetilmesini içerir (Dağ ve Yılmaz, 2024). Su mevcudiyeti üzerindeki artan baskı göz önüne alındığında, uzun vadeli tarımsal sürdürülebilirliğin sağlanması için daha etkili yönetim stratejileri gerekmektedir. Planlama yaklaşımları genellikle birim kaynak girdisi başına maksimum ekonomik, sosyal ve çevresel çıktılar elde edilmesine yönelik olarak şekillendirilmektedir (Zhang ve ark., 2023). Optimizasyon teknikleri, zamanlama, planlama, kaynak tahsisi ve seçimi de dahil olmak üzere karmaşık problemler için en verimli çözümleri belirlemek amacıyla çeşitli mühendislik disiplinlerinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Tarım sektörü de optimizasyon yöntemlerinin verimliliği artırmada çok önemli bir rol oynayabileceği benzer zorluklarla karşı karşıyadır. Bu tekniklerin kullanıldığı başlıca alanlar arasında mahsul planlaması, sulama suyu tahsisi ve ürün deseni optimizasyonu yer almaktadır (Jain ve ark., 2021).

Doğrusal programlama (LP), bir tarımsal alan için en uygun ürün desenini bulmak amacıyla yaygın olarak kullanılan optimizasyon yöntemlerinden biridir. Çeşitli araştırmacılar, mevcut kaynaklara ve kısıtlara dayalı olarak optimum ekim modellerini belirlemek için LP modellerini kullanmıştır. Ganesh Kumar ve ark. (2021), verimi en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan optimum ekim desenini belirlemek için bir LP modeli geliştirmiştir. Geliştirdikleri model, Hindistan'ın Karnataka eyaletinde seçilen bir bölgede mevcut ekilebilir arazi, su kaynakları gibi temel kısıtlamaları hesaba katmaktadır. Zhai ve ark. (2024), farklı arazilerdeki mahsul uygunluğunu değerlendirerek ekonomik getiriye maksimize etmeye odaklanan bir LP modeli formüle etmiştir. Yaklaşımları, dengeli ve sürdürülebilir bir tarım stratejisi sağlamak için ekilebilir arazi mevcudiyeti ve ürün rotasyonu gereksinimleri dahil olmak üzere birtakım sınırlayıcı faktörleri entegre etmektedir. Sejati ve Akbar (2023), sulama suyunun verimli kullanımını artırmak için doğrusal bir optimizasyon tekniği uygulamıştır. Geliştirdikleri model, sulama yönetiminin genel etkinliğini artırırken hem tarımsal üretimi hem de karlılığı maksimize edecek şekilde tasarlanmıştır.

Taye ve ark. (2021), net kârı maksimize etmek için en uygun ürün desenini belirlemek amacıyla çeşitli ürünlerin su gereksinimlerini analiz etmiştir. Kulsi Nehri Havzası'nda yürütülen çalışmada, ürün seçimi ve kaynak tahsisini optimize etmek için simülasyon teknikleri ve doğrusal programlama modelinin bir kombinasyonu kullanılmıştır. Benzer şekilde, Shreedhar (2018) değişen su mevcudiyeti koşulları altında farklı ürünler için arazi tahsisini optimize etmeye odaklanmıştır. Çalışmada, verimli su kullanımı sağlarken net faydayı maksimize etmek amacıyla LP kullanılarak formüle edilmiş çoklu ürün modeli kullanılmıştır. Wei ve ark. (2024), karma tamsayılı doğrusal programlama ve benzetimli tavlama algoritmasını kullanarak optimum ürün ekim stratejilerini araştırmıştır. Araştırmaları, kırsal tarım arazilerindeki mevcut ekim alanlarını ve mevcut tarım uygulamalarını dikkate alarak 2024'ten 2030'a kadar ürün planlaması için bilimsel bir karar verme temeli sağlamayı amaçlamıştır.

Mellaku ve ark. (2018), Etiyopya'daki kırsal küçük ölçekli tarımsal üretim sistemlerinin performansı üzerinde ekim alanı tahsisi kararlarının etkisini değerlendirmek için LP yöntemini uygulamışlardır. Elde ettikleri bulgular, LP tabanlı ekim alanı tahsis modellerinin küçük ölçekli tarımın karlılığını artırabileceğini, hane halkının gıda güvenliğini sağlayabileceğini ve çevresel kaynakların sürdürülebilir kullanımını destekleyebileceğini göstermektedir. Yine benzer doğrultuda, Phillip ve ark. (2019), Nijerya'daki küçük ölçekli üreticiler için en uygun ürün kombinasyonunu belirlemek için doğrusal programlamayı kullanmış ve kaynak kullanımını optimize ederken geliri maksimize etmeyi amaçlamıştır. Jain ve ark. (2018), LP kullanarak Hindistan'ın Assam Eyaleti için optimum ürün bileşimi modeli geliştirmiştir. Yaklaşımları, arazi ve doğal kaynakların verimli kullanımını sağlarken net getiriye maksimize etmeyi amaçlamıştır. Sonuçlar, optimize edilmiş ekim deseninin mevcut tarımsal uygulamalara kıyasla daha yüksek finansal getiri sağladığını göstermiştir.

Literatür incelendiğinde, tarımsal üretimde optimizasyon teknikleri üzerine kapsamlı araştırmalar yapıldığı görülmektedir. Doğrusal programlama kullanılan çalışmaların çoğu, yıllık net kârın maksimize edilmesine ve suyun veya arazinin farklı ürünler arasında optimum şekilde dağıtılmasına odaklanmaktadır. Ancak, tarımsal su kullanımı toplam su tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturmaya rağmen, nispeten az sayıda çalışma su ayak izini en aza indirmeye öncelik vermektedir. Ayrıca, mevcut araştırmaların çoğu optimizasyon sürecinde tek bir amaç fonksiyonunu dikkate almaktadır. Bu boşluğu ele almak için, bu çalışma amaç fonksiyonu olarak hem su kullanımının minimizasyonu hem de tarımsal gelirin maksimizasyonunu aynı anda göz önünde bulundurarak en uygun ekim modellerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, tarımsal su tüketimini en aza indiren ve tarımsal geliri en üst düzeye çıkaran optimum ekim desenlerini belirlemek için çok amaçlı doğrusal programlama modeli kullanılmıştır.

Çalışmanın temel amacı, çeşitli tarımsal üretim senaryoları altında su tasarrufu ve gelir artışı potansiyelini değerlendirmek, tarım uygulamalarında sürdürülebilir su yönetimi ve ekonomik verimlilik konusunda içgörü sağlamaktır.

MATERYAL ve YÖNTEM

Çok amaçlı doğrusal programlama

Çok amaçlı matematiksel programlamanın temeli ekonomi teorisine dayanmaktadır. Pareto, 1906 yılında bu alanın temelini oluşturan Pareto optimal çözümü kavramını ortaya atmıştır (Zeleny, 1974). Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin amaçları, probleme tek bir ideal çözüm bulmayı imkansız kılacak şekilde birbiriyle çelişmektedir. Bu durum karşısında, Pareto-optimal çözümler olarak bilinen ve hiçbir çözümün tüm hedeflerde diğerlerinden üstün olmadığı bir dizi baskın olmayan çözüm belirlenir (Jain ve ark., 2021). Birden fazla çelişkili doğrusal amaç fonksiyonunu belirli doğrusal kısıtlamalar dahilinde eş zamanlı olarak optimize etme süreci, çok amaçlı doğrusal programlama (MOLP) problemi olarak adlandırılır (Sakawa ve ark., 2013). Bu problem genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Eşitlik 1):

$$\left. \begin{array}{l} \min z_1(x) = c_1x \\ \min z_2(x) = c_2x \\ \vdots \\ \min z_k(x) = c_kx \\ \text{öyle ki } Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{array} \right\} \quad 1$$

Burada tüm amaç fonksiyonları ve kısıtlar doğrusaldır. $z_i(x) = c_i x$ amaç fonksiyonlarını, x ise problemdeki karar değişkenlerini ifade etmektedir. c_i vektörü amaç fonksiyonunun katsayılarını ifade etmektedir, A problemin kısıtlarını belirten teknolojik katsayılar matrisidir, b ise sağ taraf sabitleri vektörüdür (Eşitlik 2 ve 3).

$$c_i = (c_{i1}, \dots, c_{in}), i = 1, 2, 3, \dots, k \quad 2$$

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}, b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \quad 3$$

Amaç fonksiyonlarının çatıştığı durumlarda, tüm amaçları aynı anda minimize eden tek bir çözüme ulaşmak genellikle mümkün değildir. Bu nedenle, MOLP tamamen optimal bir çözüm aramak yerine, Pareto optimallik şeklindeki yeni bir çözüm kavramını ortaya koymaktadır. MOLP problemlerini ele almak için kullanılan farklı skalerleştirme tekniklerine bağlı olarak Pareto optimal çözümleri belirlemek için çeşitli hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir (Sakawa ve ark., 2013).

Skalerleştirme, çok amaçlı bir optimizasyon probleminin daha sonra standart optimizasyon yöntemleri kullanılarak çözülebilecek tek amaçlı bir probleme dönüştürülmesini içermektedir. Skalerleştirme yöntemlerinden biri olan ağırlıklı minimaks algoritması, amaçlar arasındaki maksimum ağırlıklı sapmayı en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Ağırlık katsayıları w_i ile gösterilmek üzere, matematiksel olarak şu şekilde formüle edilebilir (Eşitlik 4):

$$\text{Min} \max_{i=1, \dots, k} \{w_i(z_i(x) - z_i^*)\} \quad 4$$

Burada z_i^* i'inci amaç için bir referans veya hedef değeri ifade etmektedir. Bu yöntem, bir referans noktasından en büyük ağırlıklı sapmayı minimize ederek birbiriyle çatışan amaçların süreç içinde dengelenmesini sağlamaktadır.

Bu çalışma, tarımsal üretimde su kullanımını en aza indirmeyi ve tarımsal geliri en üst düzeye çıkarmayı birbiriyle çelişen hedefler olarak ele almakta ve optimum ekim desenlerini belirlemek için MOLP yöntemini kullanmaktadır. Önerilen model, hedeflerin bir referans noktasından, tipik olarak ideal veya hedef değerden maksimum ağırlıklı sapmasını en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Hedef değer veya ideal nokta, çok amaçlı bir optimizasyon probleminde bağımsız olarak çözüldüğünde her bir amaç için mümkün olan en iyi sonucu temsil etmektedir.

Modelde kullanılan ana kısıtlar, model aracılığıyla elde edilen gelirin mevcut veriler için elde edilen mevcut gelire eşit veya daha fazla olması, su kullanımının mevcut seviyelere eşit veya daha altında olması şeklinde belirlenmiştir.

Bu kısıtlar matematiksel olarak aşağıdaki denklemlerle formüle edilebilir.

$$R = \sum_{i=1}^n Y_i L_i U_i \geq R_e \quad 5$$

Burada n ürün sayısını, L_i , Y_i ve U_i sırasıyla her bir ürünün ekim alanını, verimini ve birim fiyatını temsil etmektedir. R_e ise mevcut geliri belirtmektedir.

$$W_c = \sum_{i=1}^n W_{c_i} L_i \leq W_{c_e} \quad 6$$

Burada W_c ürünler için toplam su kullanımı, W_{c_i} ise her bir ürün için su ihtiyacını ifade etmektedir.

Ayrıca, ekim alanı tahsisinde aşırı değişimleri önlemek için tarımsal ürünlerin ekim alanlarına üst ve alt sınırlar getirilmiştir.

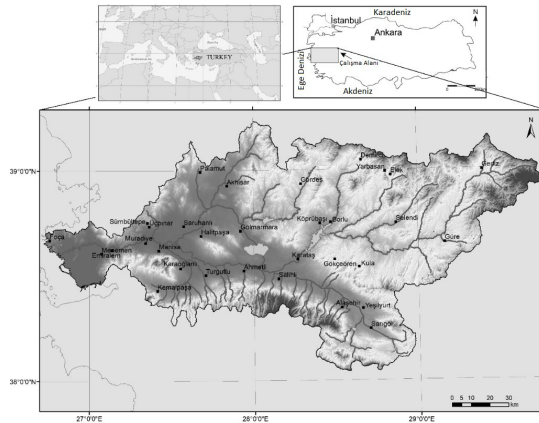
$$L_{\min_i} \leq L_i \leq L_{\max_i} \quad 7$$

Burada $L_{\min_i}$ ve $L_{\max_i}$ her bir ürünün ekim alanları için alt ve üst sınırları göstermektedir.

Modelin çözümünde Microsoft Excel Çözücü Eklentisi (Excel Solver) kullanılmıştır. Çözücü aracında amaç, değişken hücreleri ve kısıtlar girildikten sonra çözüm yöntemi seçilerek birkaç saniye içerisinde optimum çözüm belirlenmektedir. Araçta, doğrusal problemler için LP simplex ve doğrusal olmayan problemler için genel indirgenmiş gradyan (GRG) çözüm metodları bulunmaktadır.

Çalışma Alanı

Türkiye'nin batısında, Ege Bölgesi'nde yer alan Gediz Havzası, Gediz Nehri ve kolları aracılığıyla Ege Denizi'ne dökülen suların drenaj alanını oluşturmaktadır. Kuzey Ege, Susurluk ve Küçük Menderes Havzaları ile komşu durumdadır. Havza yaklaşık 17140 km²'lik bir alanı kaplamakta olup, Türkiye'nin toplam yüzölçümünün yaklaşık %2.2'sini oluşturmaktadır. Yaklaşık 275 km uzunluğundaki Gediz Nehri, havzadaki birincil su kaynağı olarak nitelendirilebilir (SYGM, 2019). Gediz Havzası'nın coğrafi konumu Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Gediz Havzası'nın konumu

Figure 1. Location of Gediz Basin

Havza, sıcak, kurak yazlar ve serin, yağışlı kışlarla karakterize edilen tipik bir Akdeniz iklimine sahiptir. Havzada bulunan meteoroloji istasyonlarının gözlemlerine göre yıllık ortalama sıcaklık değerleri 12-18 °C arasında değişmektedir (SYGM, 2018). Havza genelinde sıcaklık açısından en yüksek ortalama aylık sıcaklıklar Temmuz ve Ağustos aylarında gözlenirken, en düşük ortalama sıcaklıklar Ocak ayında kaydedilmektedir. Havza genelinde en

yüksek ortalama aylık yağış Aralık ve Ocak aylarında kaydedilirken, en düşük ortalama yağış Temmuz ve Ağustos aylarında gerçekleşmektedir (SYGM, 2019).

Bu çalışmada analiz edilen altı ürün türü için tarımsal üretim verileri, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) tarafından yayınlanan havzaya özgü bir rapordan alınmıştır. Gediz Havzası Kuraklık Yönetim Planı Nihai Raporu'ndan elde edilen 2017 yılı verileri ve gelecek dönemler için öngörülen yıllık üretim tahminleri Çizelge 1'de sunulmuştur (SYGM, 2019).

Çizelge 1. Tarımsal üretim verileri ve gelecek dönem üretim projeksiyonları

Table 1. Agricultural production data and future production projections

Ürün	Üretim(ton) (2017)	Üretim(ton) (2025-2050)	Üretim(ton) (2050-2075)	Üretim(ton) (2075-2100)
Domates	916950	1377834	2059207	2733990
Buğday	257807	291761	305572	350489
Mısır	251641	325543	457944	621618
Üzüm	1098109	1368957	1836569	2307080
Kiraz	108028	143965	206602	269594
Zeytin	206932	260526	341855	427850

Her bir ürün için mevsimlik su ihtiyacı, sulama ihtiyacı, verimlilik ve birim fiyat değerleri Çizelge 2'de sunulmaktadır (TÜİK, 2014; SYGM, 2019).

Çizelge 2. Tarımsal ürünlere dair su ihtiyacı, verimlilik ve birim fiyat verileri

Table 2. Water requirement, productivity and unit price data for agricultural products

Ürün	Mevsimlik Su İhtiyacı (m ³ /ha)	Sulama İhtiyacı (m ³ /ha)	Verimlilik (ton/ha)	Birim Fiyat (TL/ton)
Domates	4028.5	2849.5	68.66	1070
Buğday	4836.1	1182.9	2.75	890
Mısır	2530.0	1794.9	10.26	750
Üzüm	6584.5	5396	17.89	1410
Kiraz	2094.4	1084.5	5.74	4060
Zeytin	8928.4	0.0	2.22	4930

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, tarımsal üretimde farklı ve genellikle birbiriyle çelişen perspektiflerden ekim alanlarındaki değişiklikleri analiz etmek için MOLP yöntemi kullanılmış ve optimum ekim modellerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Gediz Havzası'nda 2017 yılı için mevcut üretim verileri ve gelecek dönemler (2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100) için öngörülen veriler kullanılarak baz veya referans senaryo oluşturulmuştur.

Baz senaryonun yanında, alternatif ürün deseni senaryoları geliştirilmiştir. Bu senaryolar, MOLP çerçevesinde su kullanımının minimize edilmesi ve tarımsal gelirin maksimize edilmesi temel amaç fonksiyonları olarak belirlenerek formüle edilmiştir. Tarımsal gelirin baz senaryodakine eşit veya daha yüksek kalmasını sağlamak için kısıtlamalar uygulanırken, su kullanımı baz senaryo seviyesinde veya altında kalacak şekilde kısıtlanmıştır. Ayrıca, ürün ekim alanlarında izin verilen değişimler %2, %4, %6, %8 ve %10 olarak belirlenmiştir. Her bir ürün için belirlenen ekim alanına alt ve üst değişim sınırlarının uygulanmasının nedenleri, çok büyük değişimleri önlemek ve gıda talebinin karşılanmasını sağlamaktır.

MOLP ile gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde ilk olarak her bir amaç fonksiyonu bağımsız olarak çözümlenerek hedef değerler belirlenmiştir. Daha sonra, her iki hedef aynı anda ele alınmış ve bu hedef değerlerden ağırlıklı sapmalar minimize edilerek Pareto optimal çözümler elde edilmiştir. Bu çalışmada, su tasarrufu ve tarımsal gelir maksimizasyonunun dengeli bir şekilde değerlendirilmesini sağlamak için her iki hedefe de eşit ağırlık katsayıları atanmıştır.

Senaryo isimlendirmesi ulaşılan bulguları bir referans noktası ile karşılaştırmayı kolaylaştıracak şekilde yapılmıştır. Mevcut verilerden elde edilen baz senaryo referans noktası olarak kullanılmış ve senaryo 1 olarak adlandırılmıştır. MOLP çerçevesinde incelenen senaryolar olan senaryo 2, 3, 4, 5 ve 6 ise, her bir ürün için ekim alanlarında sırasıyla %2, %4, %6, %8 ve %10 değişime izin verilmesi durumlarını temsil etmektedir. 2017, 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 zaman dilimleri için incelenen senaryolar çerçevesinde MOLP ile elde edilen tarımsal ürün desenleri Çizelge 3, 4, 5 ve 6'da gösterilmektedir.

Çizelge 3. MOLP aracılığıyla 2017 yılı için elde edilen ürün deseni

Table 3. Crop pattern obtained through MOLP for 2017

Ekim Alanı (ha)	Domates	Buğday	Mısır	Üzüm	Kiraz	Zeytin
Senaryo 1	13354	93885	24535	61398	18806	93297
Senaryo 2	13621	92007	24045	60733	19183	95163
Senaryo 3	13889	90129	23555	60037	19559	97029
Senaryo 4	14156	88251	23064	59317	19936	98894
Senaryo 5	14423	86374	22573	58575	20312	100760
Senaryo 6	14690	84496	22082	57811	20688	102626

Çizelge 4. MOLP aracılığıyla 2025-2050 dönemi için elde edilen ürün deseni

Table 4. Crop pattern obtained through MOLP for the period 2025-2050

Ekim Alanı (ha)	Domates	Buğday	Mısır	Üzüm	Kiraz	Zeytin
Senaryo 1	20067	106250	31740	76542	25063	117460
Senaryo 2	20468	104124	31107	75625	25565	119809
Senaryo 3	20869	101999	30472	74670	26066	122158
Senaryo 4	21271	99874	29837	73687	26567	124507
Senaryo 5	21672	97749	29202	72677	27069	126857
Senaryo 6	22073	95625	28568	71639	27570	129206

Çizelge 5. MOLP aracılığıyla 2050-2075 dönemi için elde edilen ürün deseni

Table 5. Crop pattern obtained through MOLP for the period 2050-2075

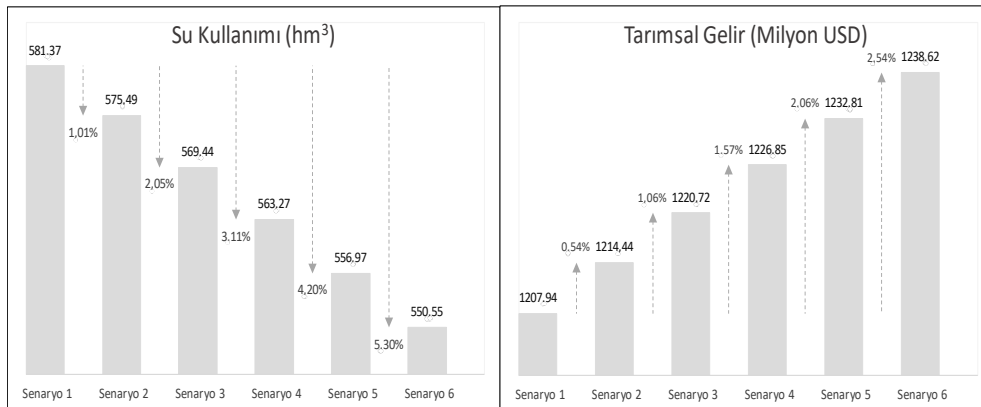
Ekim Alanı (ha)	Domates	Buğday	Mısır	Üzüm	Kiraz	Zeytin
Senaryo 1	29990	111280	44649	102687	35967	154128
Senaryo 2	30590	109053	43758	101338	36688	157210
Senaryo 3	31190	106828	42865	99940	37407	160293
Senaryo 4	31789	104602	41972	98507	38126	163375
Senaryo 5	32389	102377	41079	97040	38846	166458
Senaryo 6	32989	100151	40186	95538	39565	169540

Çizelge 6. MOLP aracılığıyla 2075-2100 dönemi için elde edilen ürün deseni

Table 6. Crop pattern obtained through MOLP for the period 2075-2100

Ekim Alanı (ha)	Domates	Buğday	Mısır	Üzüm	Kiraz	Zeytin
Senaryo 1	39818	127637	60608	128994	46933	192900
Senaryo 2	40614	125083	59398	127253	47874	196757
Senaryo 3	41410	122531	58186	125450	48812	200615
Senaryo 4	42207	119978	56974	123605	49751	204473
Senaryo 5	43003	117425	55761	121716	50690	208331
Senaryo 6	43799	114873	54549	119785	51628	212189

MOLP ile belirlenen farklı ürün deseni senaryoları neticesinde 2017 yılı için elde edilen su kullanımı ve tarımsal gelir sonuçları Şekil 2'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. 2017 yılı için MOLP ile elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmaları

Figure 2. Results obtained for 2017 with MOLP and comparisons

İncelenen senaryolar doğrultusunda 2017 yılı için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, su kullanımındaki en büyük azalmanın, ekim alanlarında %10'luk bir değişime izin veren senaryo 6'da gerçekleştiği görülmektedir. Bu senaryo ile su kullanımında 30.8 milyon m³'lük bir azalma ile referans senaryoya göre %5.30'luk bir oransal düşüş meydana gelmektedir. Su kullanımı açısından ikinci sırada ise, baz senaryoya göre 24.4 milyon m³ azalma ile %4.20'lik düşüş gözlenen senaryo 5 gelmektedir. Tarımsal gelire dair sonuçlar analiz edildiğinde de benzer şekilde senaryo 6 ve senaryo 5'in baz senaryoya göre sırasıyla %2.54 ve %2.06'lık artış ile tarımsal gelirin en fazla arttığı senaryolar olduğu gözlenmektedir.

2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemleri için senaryoların sonuçları incelendiğinde, 2017 yılı bulgularına benzer şekilde, Senaryo 6 ve Senaryo 5'in öne çıkan senaryolar olduğu görülmektedir. İncelenen bu dönemlerde tüm senaryolarda elde edilen su kullanımı ve tarımsal gelir sonuçları ile bu sonuçların baz senaryoya kıyasla yüzde değişimleri, her bir zaman dilimi için Çizelge 7'de toplu olarak özetlenmiştir. Bu karşılaştırmalı analiz, bu senaryoların kaynakların daha verimli kullanımı ve tarımsal performans üzerindeki etkilerini vurgulayarak sürdürülebilir tarımsal planlama için önemli bilgiler sunmaktadır.

Çizelge 7. MOLP aracılığıyla 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemlerinde su kullanımı ve tarımsal gelirdeki değişimler

Table 7. Changes in water use and agricultural revenue over the periods 2025-2050, 2050-2075 and 2075-2100 through MOLP

Dönem	Senaryo	Su Kullanımı (hm ³)	Değişim (%)	Gelir (Milyon USD)	Değişim (%)
2025-2050	Senaryo 1	727.59	—	1583.859	—
	Senaryo 2	720.22	-1.01	1593.109	0.58
	Senaryo 3	712.63	-2.06	1602.090	1.15
	Senaryo 4	704.89	-3.12	1610.879	1.71
	Senaryo 5	697.01	-4.20	1619.478	2.25
	Senaryo 6	688.98	-5.31	1627.889	2.78
2050-2075	Senaryo 1	954.76	—	2174.862	—
	Senaryo 2	945.09	-1.01	2188.112	0.61
	Senaryo 3	935.14	-2.06	2201.018	1.20
	Senaryo 4	925.01	-3.12	2213.684	1.79
	Senaryo 5	914.69	-4.20	2226.110	2.36
	Senaryo 6	904.18	-5.30	2238.299	2.92
2075-2100	Senaryo 1	1203.24	—	2785.756	—
	Senaryo 2	1191.05	-1.01	2803.098	0.62
	Senaryo 3	1178.53	-2.05	2820.009	1.23
	Senaryo 4	1165.77	-3.11	2836.621	1.83
	Senaryo 5	1152.78	-4.19	2852.937	2.41
	Senaryo 6	1139.56	-5.29	2868.957	2.99

Hacısüleyman ve Özger (2024), benzer şekilde tarımsal su kullanımını minimize etmeyi amaç fonksiyonu olarak alıp optimal ürün desenlerinin elde edilmesi için tek amaçlı doğrusal optimizasyon çalışması gerçekleştirmişler. Kısıt olarak ürün ekim alanlarında en fazla %5 değişime müsaade edilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, en uygun çözüm senaryosunda su kullanımı ortalama %3.93 azalırken, tarımsal gelir neredeyse aynı kalmıştır. Bu çalışmada ise, hem su tüketimini en aza indirme hem de tarımsal geliri en üst düzeye çıkarma hedefleri gözetilerek MOLP ile ekim modellerinin çok amaçlı optimizasyonu araştırılmış ve ürün ekim alanlarındaki izin verilen değişim aralığı maksimum %10 ile sınırlandırılmıştır. Modelde her iki amaca da eşit ağırlık katsayıları atanarak eşit düzeyde önem atfedilmiştir. Bu çok amaçlı yaklaşıma dayalı senaryolar ile elde edilen sonuçlar, önceki çalışmalardan farklı olarak ekim modellerinin değiştirilmesinin su kullanımında önemli ölçüde tasarruf sağlarken aynı zamanda tarımsal geliri de artırabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, Gediz Havzası'nda sürdürülebilir tarım uygulamalarının teşvik edilmesinde ve tarımsal üretim planlamasının iyileştirilmesinde karar vericiler için dikkate değer nitelikte veriler sunmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, su kullanımını azaltma ve tarımsal geliri maksimize etme gibi birbiriyle çelişen hedefleri dengeleyerek altı farklı senaryo altında ürün desenlerini optimize etmek için MOLP yöntemi kullanılmıştır. Ulaşılan bulgular, önerilen tüm senaryoların daha düşük su tüketimi ve daha yüksek tarımsal gelirle sonuçlandığını göstermektedir.

Su kullanımı ve gelir seviyeleri detaylı bir şekilde analiz edildiğinde, ekim alanlarının değiştirilmesinde gösterilen daha fazla esnekliğin su tüketiminde daha önemli azalmalara ve daha yüksek gelir kazanımlarına yol açtığı görülmektedir. Tüm senaryolar arasında senaryo 6 en etkili senaryo olarak öne çıkmakta ve baz senaryoya kıyasla su

kullanımında ortalama %5.30 azalma ve tarımsal gelirde ortalama %2.81 artış sağlamaktadır. Bu senaryo, su tasarrufu ve gelir artışının eşit derecede önemli kabul edilmesi halinde en uygun seçenek olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmanın sonuçları, önerilen MOLP modelinin sürdürülebilir tarım yönetimine önemli ölçüde katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Bu durum, tarımda kaynak verimliliğini ve ekonomik sürdürülebilirliği artırmaya yönelik uygulanabilir ve etkili bir yaklaşım olarak optimize edilmiş ürün planlamasının değerinin altını çizmektedir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını ve intihal yapmadıklarını beyan eder.

Çıkar Çatışması

Bu çalışmada yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- Dağ, M. M., ve Yılmaz, H. (2024), "Tarımsal üretimde geleneksel yöntemlerin ötesine geçiş: Rejeneratif tarım". *Tarım Ekonomisi Dergisi*, 30(2), 197-205.
- Ganesh Kumar, S. B., Ramesh, B. R. and Surendra, H. J. (2021), "Linear Programming Model for the Design of Optimal Cropping Pattern for a Major Distributary Canal", Mehta, Y. A., Carnacina, I., Kumar, D. N., Rao, K. R. and Kumari, M. (Eds.), *Advances in Water Resources and Transportation Engineering*, Springer, Singapore.
- Hacısüleyman, V., ve Özger, M. (2024). "Optimal cropping patterns using linear programming and evaluation based on food-energy-water nexus". *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10 (Special Issue: Biosorbents & Environmental Management), 1-18.
- Jain, R., Immaneulraj, K., Malangmeih, L., Deka, N., Raju, S. S., Srivastava, S. K., Hazarika, J., Kaur, A.P. and Singh, J. (2018), "Linear Programming Based Optimum Crop Mix for Crop Cultivation in Assam State of India", Abraham, A., Muhuri, P., Muda, A. K. and Gandhi, N. (Eds.), *Intelligent Systems Design and Applications*, Springer, Cham.
- Jain, S., Ramesh, D. and Bhattacharya, D. (2021), "A multi-objective algorithm for crop pattern optimization in agriculture". *Applied Soft Computing*, 112, 107772.
- Kang, S., Hao, X., Du, T., Tong, L., Su, X., Lu, H., Li, X., Huo, Z., Li, S. and Ding, R. (2017), "Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: from research to practice". *Agricultural Water Management*, 179, 5–17.
- Mellaku, M. T., Reynolds, T. W. and Woldeamanuel, T. (2018), "Linear programming-based cropland allocation to enhance performance of smallholder crop production: a pilot study in Abaro Kebele, Ethiopia". *Resources*, 7 (4), 76.
- Phillip, D. O. A., Peter, E. and Girei, A. A. (2019), "Determination of optimum crop mix using linear (LP) programming among small holder farmers in agricultural zone four of Adamawa state, Nigeria". *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 34 (2), 1–10.
- Sakawa, M., Yano, H. and Nishizaki, I. (2013), *Linear and multi-objective programming with fuzzy stochastic extensions*, Springer Science Business Media, New York.
- Sejati, W. and Akbar, T. T. (2023), "Optimization study of cropping pattern in the klakah irrigation area, lumajang regency, using linear programming". *ADI Journal on Recent Innovation*, 5 (2), 136–145.
- Shreedhar, R. (2018), "Multi crop optimization using linear programming model for maximum net benefit". *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3.12), 797-801.
- SYGM (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü). (2018), Gediz Nehir Havzası Yönetim Planı Hazırlanması Projesi Nihai Raporu. Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- SYGM (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü). (2019), Gediz Havzası Kuraklık Yönetim Planı Nihai Raporu. Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Taye, J., Sarma, B. and Lade, A. D. (2021), "Optimal Cropping Pattern of Kulsi River Basin, Assam, India Using Simulation and Linear Programming Model", Jha, R., Singh, V. P., Singh, V., Roy, L. and Thendiyath, R. (Eds.), *Water Resources Management and Reservoir Operation*, Springer, Cham.
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu). (2014), Bitkisel Üretim İstatistikleri.
- Wei, Y., Ji, M. and Wang, C. (2024), "An exploration of crop planting based on simulated annealing algorithm and mixed integer linear programming". *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*, 10 (3), 59-64.
- Zeleny, M. (1974), *Linear Multiobjective Programming. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, No. 95, Springer-Verlag, Berlin.
- Zhai, B., Zhu, H. and Wan, H. (2024), "Research on crop planting based on linear programming and multiple regression functions". *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*, 10 (2), 43-49.
- Zhang, C., Yang, G., Wang, C. and Huo, Z. (2023), "Linking agricultural water-food-environment nexus with crop area planning: A fuzzy credibility-based multi-objective linear fractional programming approach". *Agricultural Water Management*, 277, 108135.