

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SU KAYNAKLARI YÖNETİMİNDE GIDA-ENERJİ-SU BAĞLANTISININ
OPTİMİZASYONU**



DOKTORA TEZİ

Volkan HACISÜLEYMAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

ARALIK 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SU KAYNAKLARI YÖNETİMİNDE GIDA-ENERJİ-SU BAĞLANTISININ
OPTİMİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

**Volkan HACISÜLEYMAN
(501192507)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet ÖZGER

ARALIK 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**OPTIMIZING THE FOOD-ENERGY-WATER NEXUS IN WATER
RESOURCES MANAGEMENT**



Ph.D. THESIS

**Volkan HACISÜLEYMAN
(501192507)**

Department of Civil Engineering

Hydraulics and Water Resources Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Mehmet ÖZGER

DECEMBER 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501192507 numaralı Doktora Öğrencisi Volkan HACISÜLEYMAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SU KAYNAKLARI YÖNETİMİNDE GIDA-ENERJİ-SU BAĞLANTISININ OPTİMİZASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mehmet ÖZGER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Abdüsselam ALTUNKAYNAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NURİ
İstanbul Gelişim Üniversitesi

Doç. Dr. Tarkan ERDİK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Necati AĞIRALIOĞLU
Antalya Bilim Üniversitesi

Teslim Tarihi : 24 Ekim 2025
Savunma Tarihi : 5 Aralık 2025





Aileme,



ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmam boyunca bana rehberlik eden ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mehmet ÖZGER'e ve bu tezin geliştirilmesinde verdikleri geri bildirimler ve değerli rehberlikleri için jüri üyesi kıymetli hocalarım Prof. Dr. Abdüsselam ALTUNKAYNAK ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NURİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca daima maddi ve manevi olarak desteklerini gördüğüm, bu günlere gelmemde büyük paya sahip olan annem ve babama şükranlarımı sunarım.

Aralık 2025

Volkan Hacısüleyman
(İnşaat Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Konusu ve Kapsamı	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Literatür Araştırması	5
1.3.1 Doğrusal programlama ile ilgili çalışmalar.....	5
1.3.2 Gıda-enerji-su bağlantısı ile ilgili çalışmalar	9
2. YÖNTEMLER	15
2.1 Doğrusal Programlama.....	15
2.1.1 Doğrusal programlamanın önemi ve tarihsel gelişimi	16
2.1.2 Doğrusal programlama modelinin temel özellikleri	18
2.1.3 Model çözümleri ile ilgili temel terminoloji	19
2.1.4 Doğrusal programlamanın ana bileşenleri ve varsayımları.....	21
2.1.4.1 Orantılılık	22
2.1.4.2 Toplanabilirlik.....	22
2.1.4.3 Belirlilik	23
2.1.4.4 Bölünebilirlik	23
2.2 Çok Amaçlı Doğrusal Programlama	24
2.2.1 Çok amaçlı optimizasyonun ortaya çıkışı ve tarihsel gelişimi.....	26
2.2.2 Çok amaçlı optimizasyonun temel kavramları ve tanımları	29
2.2.3 Problem formülasyonu ve başlıca çözüm kavramları	31
2.2.4 Skalerizasyon yöntemleri	33
2.2.4.1 Ağırlıklandırma yöntemi.....	34
2.2.4.2 Kısıt yöntemi.....	35
2.2.4.3 Ağırlıklı minimaks yöntemi	35
2.3 Gıda-Enerji-Su Bağlantısı	36
3. ÇALIŞMA ALANI.....	43
3.1 Gediz Havzası	43
3.2 Havzanın Topografik ve İklim Özellikleri	44
3.3 Havzanın Arazi Kullanım Özellikleri	46
3.4 Tarımsal Üretim Verileri	48
4. BULGULAR VE YORUMLAR	53
4.1 LP Senaryoları ve FEW Bağlantısına Dayalı Değerlendirme	53

4.1.1 Senaryoların oluşturulması.....	53
4.1.2 Senaryo sonuçlarının karşılaştırmalı analizi	55
4.2 MOLP Senaryoları ve FEW Bağlantısına Dayalı Değerlendirme.....	59
4.2.1 Senaryoların oluşturulması.....	60
4.2.2 Senaryo sonuçlarının karşılaştırmalı analizi	61
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	81



KISALTMALAR

FAO	: Gıda ve Tarım Örgütü
FEW	: Gıda-Enerji-Su
LP	: Doğrusal Programlama
MOLP	: Çok Amaçlı Doğrusal Programlama
GP	: Hedef Programlama
MOFGP	: Çok Amaçlı Kesirli Hedef Programlama
MOLFP	: Çok Amaçlı Doğrusal Kesirli Programlama
WEA	: Su-Ekosistem-Tarım
IRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
CPF	: Köşe Noktası Olurlu
MCDM	: Çok Kriterli Karar Verme
UNECE	: Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu
SYGM	: Su Yönetimi Genel Müdürlüğü
USD	: Amerikan Doları
CORINE	: Çevresel Bilginin Koordinasyonu



SEMBOLLER

Z	: Amaç fonksiyonu
x_j	: Karar değişkeni
c_j	: Karar değişkeni katsayıları
a_{ij}	: Teknolojik katsayılar
A	: Teknolojik katsayılar matrisi
b_i	: Sağ taraf sabitleri
X_{co}	: İdeal çözüm
X_p	: Pareto optimal çözüm
X_{wp}	: Zayıf Pareto optimal çözüm
w_i	: Ağırlık katsayıları
z_i[*]	: Hedef değer
W	: Su kullanımı
E	: Enerji gereksinimi
R	: Tarımsal gelir
CO₂	: Karbondioksit



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Tarımsal üretim verileri ve gelecek dönem üretim projeksiyonları	49
Çizelge 3.2 : HADGEM, MPI ve CRNM modelleri yağış anomalileri	49
Çizelge 3.3 : Tarımsal ürünler için çeşitli gereksinimler ve yakıt tüketim değerleri	50
Çizelge 3.4 : Gediz Havzası'ndaki mevcut hayvan sayıları ve beklenen değişimler	51
Çizelge 4.1 : LP aracılığıyla 2017 yılı için elde edilen ürün deseni	54
Çizelge 4.2 : LP aracılığıyla 2025-2050 dönemi için elde edilen ürün deseni	54
Çizelge 4.3 : LP aracılığıyla 2050-2075 dönemi için elde edilen ürün deseni	55
Çizelge 4.4 : LP aracılığıyla 2075-2100 dönemi için elde edilen ürün deseni	55
Çizelge 4.5 : MOLP aracılığıyla farklı ağırlıklı senaryolar için 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemlerinde su kullanımı, enerji gereksinimi, tarımsal gelir ve CO ₂ emisyonlarındaki değişimler	63
Çizelge 4.6 : MOLP aracılığıyla farklı ekim alanı değişim oranlı senaryolar için 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemlerinde su kullanımı, enerji gereksinimi, tarımsal gelir ve CO ₂ emisyonlarındaki değişimler	65



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İki amaçlı bir problem için tasarım uzayı ve amaç uzayının gösterimi ..	30
Şekil 2.2 : Çalışma metodolojisinin özet gösterimi	41
Şekil 3.1 : Havzanın coğrafi konumu	43
Şekil 3.2 : Havza içerisindeki yerleşim birimleri	44
Şekil 3.3 : Gediz Havzası birinci düzey arazi kullanımı	46
Şekil 3.4 : Gediz Havzası ikinci düzey arazi kullanımı	47
Şekil 4.1 : 2017 yılı için LP senaryoları ile elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmaları	56
Şekil 4.2 : 2025-2050 dönemi için LP senaryolarının sonuçları ve karşılaştırmaları	57
Şekil 4.3 : 2050-2075 dönemi için LP senaryolarının sonuçları ve karşılaştırmaları	58
Şekil 4.4 : 2075-2100 dönemi için LP senaryolarının sonuçları ve karşılaştırmaları	59
Şekil 4.5 : Hedef değerler ve farklı ağırlıklı durumlardaki MOLP çözümleri	60
Şekil 4.6 : 2017 yılı için farklı ağırlıklı MOLP senaryoları ile elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmaları	62
Şekil 4.7 : 2017 yılı için farklı ekim alanı değişim oranlı MOLP senaryoları ile elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmaları	64



SU KAYNAKLARI YÖNETİMİNDE GIDA-ENERJİ-SU BAĞLANTISININ OPTİMİZASYONU

ÖZET

Tarım, toplam su kullanımının yaklaşık %70'ini oluşturarak tatlı su kaynaklarının tüketiminde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, tarımın ve gıda tedarik zincirinin çeşitli aşamalarında enerji gereksinimi de büyük önem taşımaktadır. Küresel ölçekte, tarım ve gıda endüstrileri toplam enerji tüketiminin yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır ve bu tüketimin önemli bir kısmı fosil yakıt kaynaklarından elde edilmektedir. Bu durum, gıda talebinin yeterli düzeyde karşılanması sırasında su ve enerji kaynaklarının verimli kullanımı için giderek artan bir baskı oluşturmakta ve gıda, enerji ve su kaynakları arasındaki karmaşık bağlantının altını çizmektedir. Dolayısıyla gıda, enerji ve su kaynakları arasındaki karmaşık etkileşimin daha iyi anlaşılması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, tarımsal ürün planlamasında optimum ürün desenini belirlemek için hem doğrusal programlama hem de çok amaçlı doğrusal programlama modelleri kullanılmaktadır. Çalışmanın temel yeniliği, sadece bu optimizasyon yöntemlerini kullanarak seçilen bir amaç fonksiyonu için en uygun ekim desenlerini belirlemekle kalmayıp, aynı zamanda bu ekim desenlerini gıda, enerji ve su bağlantısını dikkate alarak bütüncül bir şekilde analiz etmesidir.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak, tarımda su kullanımını en aza indirirken en uygun ekim desenini belirlemek için bir doğrusal programlama modeli kullanılmıştır. Doğrusal programlamada uygulanan kısıtlar, neredeyse aynı tarımsal geliri sürdürmeyi, toplam ekim alanını korumayı ve ekim alanındaki değişim aralıklarını %5 ile sınırlamayı içermektedir. İkinci olarak ise, tarımda su kullanımını en aza indiren ve tarımsal geliri en üst düzeye çıkaran optimum ekim alanlarına yönelik alternatif senaryoları belirlemek için çok amaçlı bir doğrusal programlama modeli kullanılmıştır. Çeşitli ekim senaryoları oluşturmak için bu amaç fonksiyonlarına farklı ağırlık katsayıları atanmıştır. Ayrıca, mahsul ekim alanlarında farklı oranlarda değişime müsaade edilmesi durumları da ayrı senaryolarda incelenmiştir. Hem doğrusal programlama hem de çok amaçlı doğrusal programlama yaklaşımları kullanılarak 2017, 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemleri için ürün desenleri belirlenmiştir. Her bir senaryo için en uygun ekim desenleri belirlendikten sonra, su kullanımı, enerji gereksinimleri, tarımsal gelir ve karbondioksit emisyonları gibi parametreler gıda-enerji-su bağlantısına dayalı olarak hesaplanmıştır. Daha sonra, her bir alternatif ürün deseni senaryosu için ulaşılan sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Doğrusal programlama modeli ile incelenen tüm senaryolar; daha düşük su kullanımı, daha az enerji gereksinimi ve daha az karbondioksit emisyonu ile sonuçlanmıştır. Tüm zaman dilimlerinde, toplam ekim alanı kısıtlaması olmaksızın ekim alanlarında %5'lik bir değişikliğe izin veren senaryo 6 en iyi seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Bu senaryo, baz senaryoya kıyasla su kullanımında ortalama % 3,94, enerji ihtiyacında %2,95 ve karbondioksit emisyonlarında %1,62 azalma sağlamıştır. Toplam ekim alanı kısıtlamasına bağlı olarak ekim alanlarında %5'lik bir değişikliğe izin veren Senaryo

11 ise, su tasarrufu açısından en etkili ikinci senaryo olmuştur. Tüm zaman dilimlerinde su kullanımında ortalama %3,45'lik bir azalma, enerji gereksinimlerinde ortalama %1,85'lik bir azalma ve karbondioksit emisyonlarında %0,11'lik az seviyede azalma sağlamıştır.

Çok amaçlı doğrusal programlama modeli ile elde edilen sonuçlara göre, amaçlara farklı ağırlık katsayılarının atandığı tüm ürün deseni değişikliği senaryolarında su kullanımı ve enerji gereksinimlerinde azalma, tarımsal gelirde ise artış gözlemlenmiştir. Ancak karbondioksit emisyonları, tarımsal gelirin maksimize edilmesine daha fazla ağırlık verilen senaryolarda artarken, su kullanımının minimize edilmesine daha fazla ağırlık verilen senaryolarda azalmıştır. Tüm zaman dilimleri için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, baz senaryoya kıyasla su kullanımında ortalama %3,35 azalma, enerji talebinde ortalama %1,78 azalma, karbondioksit emisyonlarında ortalama %0,26 azalma ve tarımsal gelirde ortalama %1 artış sağlayan senaryo 16, su kullanımını en aza indirme hedefi ön planda tutulduğunda en iyi senaryo olarak belirlenmiştir. Ancak, tarımsal gelirin maksimize edilmesi önceliklendirildiğinde, tüm zaman dilimlerinde tarımsal gelirde ortalama %2,05'lik bir artış sağlayan Senaryo 14 en uygun senaryo olarak değerlendirilmektedir.

Ekim alanlarında farklı izin verilen değişim oranlarını inceleyen çok amaçlı doğrusal programlama senaryolarının sonuçları, önerilen tüm senaryoların daha düşük su tüketimi ve enerji ihtiyacı, daha yüksek tarımsal gelir elde ettiğini ortaya koymaktadır. Su kullanımı ve gelir sonuçlarının daha ayrıntılı incelenmesi, ekim alanlarının ayarlanmasında daha fazla esnekliğin su kullanımında daha büyük azalmalara ve daha yüksek gelir artışlarına yol açtığını göstermektedir. Bunlar arasında, Senaryo 21 en etkili senaryo olarak ortaya çıkmaktadır. Bu senaryo, baz senaryoya kıyasla su tüketiminde ortalama %5,30 azalma, enerji kullanımında %1,74 azalma ve tarımsal gelirde %2,81 artış sağlamaktadır. Bu da, su tasarrufu ve gelir artışı eşit öneme sahip olduğunda Senaryo 21'i en uygun seçenek haline getirmektedir.

Elde edilen bulgular, bu çalışmada önerilen modelin tarımsal yönetimde sürdürülebilirliğin geliştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, sadece ürün deseninin değiştirilmesiyle su kullanımı, enerji gereksinimi ve karbondioksit emisyonlarında kayda değer azalmalar sağlanabilmektedir. Çalışmanın bulgularının, Gediz Havzası'nda tarımın yaygın olduğu bölgelerde tarımsal üretim planlamasının sürdürülebilirliğini artırmak için karar vericilere değerli bilgiler sunacağı düşünülmektedir. Bu çalışmanın sonuçları belirli bir bölge için elde edilmiş olsa da, uygulanan metodoloji farklı uygulamalarda kullanılmak üzere kolaylıkla uyarlanabilecek niteliktedir.

OPTIMIZING THE FOOD-ENERGY-WATER NEXUS IN WATER RESOURCES MANAGEMENT

SUMMARY

Agriculture plays an important role in the total consumption of freshwater resources, accounting for about 70% of total water use. In addition, the energy requirements at various stages of agriculture and the food supply chain are also of great importance. Globally, agriculture and food industries account for around 30% of total energy consumption, a significant portion of which is derived from fossil fuel sources. This puts increasing pressure on the efficient use of water and energy resources to adequately meet food demand and underscores the complex interlinkages between food, energy and water resources. Therefore, a better understanding of the complex interaction between food, energy and water resources is of great importance. In this study, both linear programming and multi-objective linear programming models are used to determine the optimal cropping pattern in agricultural crop planning. The main novelty of the study is that it not only identifies the optimal cropping patterns for a selected objective function using these optimization methods, but also analyzes these cropping patterns in a holistic way, taking into account the food, energy and water nexus.

In this thesis, firstly, a linear programming model was used to determine the optimal cropping pattern while minimizing water use in agriculture. One of the constraints used in the model is that the agricultural income obtained through the model should be equal to or greater than the current income obtained for the available data. Another constraint is the addition of upper and lower bounds to prevent too large or too small changes in the acreage allocated to agricultural crop types to adequately meet food demand. Both the application and non-application of the constraint requiring the total area under cultivation to be equal to or greater than the total available area under cultivation are analyzed as separate cases.

Secondly, a multi-objective linear programming model was used to identify alternative scenarios for optimal cropping areas that minimize agricultural water use and maximize agricultural income. Different weight coefficients were assigned to these objective functions to generate various cropping scenarios. This approach provides a comprehensive understanding of how different weighting schemes impact the balance between conflicting objectives, helping to identify solutions based on varying priorities. Besides, scenarios where varying rates of change are allowed in crop planting areas have also been examined. For the periods 2017, 2025-2050, 2050-2075, and 2075-2100, the existing agricultural production and projection data for the basin served as the base or reference scenario. In addition to the base scenario, using both linear programming and multi-objective linear programming approaches, alternative scenarios for changing crop patterns were generated for these periods. After determining the optimal cropping patterns for each scenario, parameters such as water use, energy requirements, agricultural revenue and carbon dioxide emissions were

calculated based on the food-energy-water nexus. Then, the results obtained for each alternative cropping pattern scenario were evaluated comparatively.

All the scenarios examined with the linear programming model resulted in lower water usage, reduced energy requirements, and decreased carbon dioxide emissions. The inclusion of a constraint in the model requiring the total cultivation area to remain equal to or greater than that of the base scenario was found to limit the extent of achievable reductions. Scenarios without this cultivation area constraint produced more favorable outcomes, demonstrating superior performance compared to those with similar percentage changes but restricted by the constraint. Analyzing various scenarios with different rates of change in planting areas and observing the associated reductions in agricultural water use, energy requirements, and carbon dioxide emissions underscores the inherent trade-offs. As the allowable percentage changes in crop acreage decreased, reductions in these parameters diminished, leading to less favorable overall outcomes.

Across all time periods, scenario 6, allowing a 5% change in cultivation areas without a total cultivation area constraint, emerged as the best option. It achieved an average reduction of 3.94% in water usage, 2.95% in energy requirements, and 1.62% in carbon dioxide emissions compared to the base scenario. Scenario 11, which permits a 5% change in cultivation areas while adhering to a total cultivation area constraint ranked as the second-best scenario for water savings. It achieved an average reduction in water use of 3.45%, an average reduction in energy requirements of 1.85%, and a minimal reduction in carbon dioxide emissions of 0.11% across all time periods. Scenario 5, which ranks third in water use reduction, achieved an average decrease of 3.15% in water use, 2.36% in energy requirements, and 1.29% in carbon dioxide emissions across all periods.

According to the results obtained from the multi-objective linear programming model, all cropping pattern modification scenarios in which different weight coefficients were assigned to the objectives showed a decrease in water use and energy requirements, along with an increase in agricultural income. However, carbon dioxide emissions increased in scenarios where more emphasis was placed on maximizing agricultural income and decreased in scenarios where more emphasis was placed on minimizing water use. The analysis revealed that prioritizing the minimization of water usage proved more effective in reducing both water demand and energy requirements, though it was less successful in boosting agricultural income. Conversely, emphasizing the maximization of agricultural revenue was more effective in increasing income but had limited success in reducing water use and energy requirements, while also leading to an increase in carbon dioxide emissions.

When the results obtained for all time periods are analyzed, scenario 16, which provides an average 3.35% reduction in water use, an average 1.78% reduction in energy demand, an average 0.26% reduction in carbon dioxide emissions and an average 1% increase in agricultural income compared to the baseline scenario, is identified as the best scenario when the objective of minimizing water use is prioritized. However, when maximizing agricultural income is prioritized, Scenario 14, which provides an average increase of 2.05% in agricultural income over all time periods, is considered the most favorable scenario.

The results of the multi-objective linear programming scenarios, which examined different permissible rates of change in cropping areas, reveal that all proposed scenarios achieved lower water consumption and energy demand, along with higher

agricultural income. A more detailed analysis of water use and income outcomes shows that greater flexibility in adjusting cropping areas leads to larger reductions in water consumption and higher income gains. Among these, Scenario 21 emerges as the most effective. Compared to the baseline scenario, it provides an average reduction of 5.30% in water consumption, a 1.74% decrease in energy use, and a 2.81% increase in agricultural income. This makes Scenario 21 the most suitable option when water savings and income growth are considered equally important.

The findings show that the model proposed in this study can significantly contribute to improving sustainability in agricultural management. According to the results, significant reductions in water use, energy requirements and carbon dioxide emissions can be achieved by simply changing the cropping pattern.

The findings of the study are expected to provide valuable information to decision makers to improve the sustainability of agricultural production planning in the regions where agriculture is widespread in the Gediz Basin. Although the results of this study were obtained for a specific region, the methodology applied can be easily adapted for use in different applications.



1. GİRİŞ

1.1 Tezin Konusu ve Kapsamı

Su, enerji ve gıda sistemleri birbiriyle bağlantılıdır. Su enerji üretimi için, enerji ise suya erişim, arıtma ve dağıtım için gereklidir. Ayrıca, hem enerji hem de su, tarım ve hayvancılıkta önemli rol oynamaktadır. Dolayısıyla bu bağlantıyı anlamak büyük önem taşır çünkü bir sistemdeki aksaklık diğerlerini de sekteye uğratabilir. Su, enerji ve gıda arasındaki karmaşık ve sürekli değişen ilişkileri anlamak, bu sınırlı kaynakları sürdürülebilir bir şekilde etkin yönetmek için çok önemlidir.

Birleşmiş Milletler tarafından 2015 yılında oluşturulan 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, gıda ve su güvenliğinin sağlanmasına önemli bir vurgu yapmakta ve sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmeyi amaçlayan toplam 17 hedef belirlemektedir. Hedef 2, açlığın ortadan kaldırılması, gıda güvenliğinin sağlanması, yeterli beslenmenin gerçekleştirilmesi ve sürdürülebilir tarımın teşvik edilmesine odaklanmaktadır. Hedef 6, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminin yanı sıra herkes için temiz su ve sanitasyonun mevcudiyetini sağlamayı amaçlamaktadır (United Nations, 2015).

Tarım, dünyadaki tatlı su tüketiminin yaklaşık %70'ini oluşturarak ve küresel enerjinin yaklaşık %30'unu kullanarak Dünya'nın tatlı su rezervlerinin en önde gelen kullanıcısı konumundadır (FAO, 2011). Açıkça görüldüğü üzere, tarımsal üretim sektörü önemli miktarda su kullanımının gerçekleştiği bir üretim alanıdır. Bu nedenle, su, gıda ve enerji kaynakları arasındaki karmaşık karşılıklı bağımlılık ilişkisi, bu sektöre ilişkin endişeleri artırmaktadır. Su kullanımını belirli bir seviyede sınırlandırmak amacıyla belirli bir arazi alanı için en uygun ekim modelinin belirlenmesine yönelik çalışmalar, tarımsal üretimde suyun sürdürülebilirliği için en önemli konulardan biridir. Ürün ekim alanı planlaması için etkili optimizasyon stratejilerinin uygulanması, tarımsal su kaynaklarının verimli bir şekilde yönetimi için gerekli ve faydalıdır. Suyun farklı ürün alanlarına tahsisini kolaylaştırarak sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasını sağlarlar (Zeng ve diğ., 2010).

Tarımsal su kullanımı için planlama ve programlama çalışmaları, sulu tarımda suyun etkin bir şekilde yönetilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Tarımda suyun etkili bir şekilde yönetilebilmesi için, hem arazi hem de su kullanımının optimize edilmesi ve belirlenen kısıtlar dahilinde optimum ürün deseninin sağlanması gerekmektedir (Vivekanandan ve Viswanathan, 2007). Bölgesel kalkınmanın günlük yaşam, endüstriyel üretim ve tarım gibi temel unsurları su kaynaklarına dayanmaktadır. Her bölgede, sürdürülebilir kullanım ve erişilebilirliği sağlamak için su kaynaklarının yerel koşullara ve coğrafi faktörlere göre seçilmesi gerekmektedir (Zhu, 2023). Su kaynaklarının oldukça kısıtlı olduğu dağlık bölgelerde, potansiyel sulama kaynakları olarak pınarlardan faydalanmak ve sulama için hem mevcut suyu hem de ekilebilir araziyi optimize etmek çok önemlidir. Ayrıca, gelecekteki değişikliklere uyum sağlamak için esnek yönetim stratejilerinin planlanması ve uygulanması, bu alanlarda tarımın sürdürülebilir gelişimi için çok önemlidir (Kumar ve Sen, 2020).

Arazi ve su kaynaklarının tahsisini optimize etmeye yönelik sistematik bir karar destek metodolojisi, tarımsal üretimde hem arazinin hem de suyun daha sürdürülebilir ve verimli kullanılmasını sağlamak için mekansal ekim modellerini yeniden düzenleyerek ve su kaynaklarının dağılımını optimize ederek gıda güvenliğini etkili bir şekilde sağlayabilir, su kıtlığını azaltabilir ve makroekonomik politikalarla uyum sağlayabilir (Cheng ve diğ., 2023). Tarımda su yönetimi, sosyo-ekonomik refah ve ekosistem sürdürülebilirliği arasındaki dengeyi optimize etmek için ekosistemler içinde sürdürülebilir kalkınmayı ve entegre kaynak yönetimini teşvik eden bir süreçtir (Zhang ve diğ., 2024).

İklim değişikliği baskısı bağlamında, tarım sektörünün öncelikli hedefleri suyun korunmasına ve bu kıt kaynağın stratejik olarak en yüksek potansiyel ekonomik getiriye sahip ürünlere tahsis edilmesine yönelmelidir. Ürün tahsisi, arazi kullanım planlaması ve yönetimi ile yakından bağlantılıdır ve çeşitli sosyo-ekonomik sektörleri etkilemektedir (Economidou ve diğ., 2021). Sınırlı su kaynaklarını korumak amacıyla, su tahsisini optimize etmek için verimli ve pratik çözümler gerekmektedir; bu da suyun ekonomik verimliliğini artırarak ve optimal bir ürün deseni oluşturarak sağlanabilir (Mirzaei ve diğ., 2022). Ürünlerin ekim alanının planlanması, arazi ve su kaynakları üzerindeki sınırlamalara bağlı olarak ekili araziden elde edilen getiriyi en üst düzeye çıkarmak gibi belirli hedeflere ulaşmayı amaçlayarak suyun çeşitli ekili alanlara tahsisini belirleyebilir (Zeng ve diğ., 2010).

Birbiri ile çelişen birden fazla amaç fonksiyonu söz konusu olduğunda, bir fonksiyon için en uygun çözüm diğerleri için en uygun çözüm olmayabilir. Bu gibi durumlarda, rekabet halindeki hedeflerin tamamını belirli ölçülerde barındıran dengeli bir çözüm arayışıyla en uygun uzlaşık çözüm kavramı ortaya atılabilir. Örneğin, tarımsal faaliyetlerden elde edilen net getiriye maksimize etmek için su kaynaklarının daha fazla kullanımına ihtiyaç duyulurken, sürdürülebilirliğin sağlanması toplam su tüketiminin azaltılmasını gerektirir (Amini Fasakhodi ve diğ., 2010). Birbiriyle çelişen hedeflerin olduğu bu gibi durumlarda, bu hedefler arasında denge kuran bir uzlaşık çözüm tanımlanması gerekmektedir (Stancu-Minasian ve Pop, 2003).

Gıda-Enerji-Su (FEW) nexus terimi, küresel kaynak sistemlerinin birbirine bağlı doğasını tanımlamak için kullanılan pratik bir kavram olarak kabul edilmektedir. Nexus yaklaşımı, insan faaliyetleri ve çevre arasındaki etkileşimlerin sistematik olarak analiz edilmesinde ve çeşitli sektörler ve ölçeklerde doğal kaynakların entegre yönetiminde kullanılmaktadır (FAO, 2014). Özellikle son yıllarda bu yaklaşım, temel doğal kaynakların korunması ve iklim değişkenliğinin göz önünde bulundurulmasına yönelik görüşlerin ön plana çıkması nedeniyle önem kazanmıştır.

Gıda-enerji-su (FEW) bağlantısı, insanların yaşamını sürdürebilmesi için hayati önem taşıyan üç temel kaynağın birbiriyle olan önemli bağlantısını temsil etmektedir. Bu genişletilmiş kavram, bu kaynaklardaki kıtlıkla ilgili zorlukları ele almak ve yönlendirmek için ortaya atılmıştır. Bağlantının amacı, sektörler arası politikaların yanı sıra sosyal ve çevresel etkileri de dikkate alarak gıda, enerji ve su arasında etkili bir denge kurmaktır (Albrecht ve diğ., 2018).

Su, enerji ve gıda sistemlerindeki kaynakların yönetimi ile ilgili konuları ele alan FEW nexus yaklaşımının kullanımı 2000'li yılların sonlarında ivme kazanmıştır. "Nexus yaklaşımına olan ilgiyi artıran küresel ölçekte önemli bir uluslararası etkinlik olarak değerlendirilen "Bonn 2011 Nexus Konferansı: Su-Enerji ve Gıda Güvenliği Bağlantısı – Yeşil Ekonomi İçin Çözümler," ilk büyük FEW nexus toplantısı olarak kaydedilmiştir. Bu konferans, özel sektör de dahil olmak üzere çeşitli grupların katılımını sağlamış ve küresel ölçekte nexus yaklaşımına ilişkin farkındalığın artmasında etkili olmuştur (Leck ve diğ., 2015). Ayrıca, Bonn 2011 Nexus Konferansı, nexus etkileşimlerinin anlaşılmasına yönelik rehberlik sağlamıştır (Hoff, 2011).

Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), 2050 yılına kadar 9.1 milyara ulaşması beklenen dünya nüfusunun beslenme ihtiyacını karşılamak amacıyla, 2005/2007 yıllarında gözlemlenen seviyelere kıyasla gıda talebinde yaklaşık %60'lık bir artış öngörmektedir (FAO, 2009). Dolayısıyla, mevcut ve gelecekteki insan nüfusunun gıda talebini, sınırlı tarımsal arazi mevcudiyeti kısıtlamaları dahilinde karşılamak için giderek artan bir zorluk söz konusudur. Bu durum, enerji ve su tüketimini en aza indirirken aynı zamanda çevre koruma çabalarına öncelik verme ihtiyacı nedeniyle daha da karmaşık hale gelmektedir (Nie ve diğ., 2019).

1.2 Tezin Amacı

Yukarıdaki bilgiler ışığında, bu çalışmada tarımsal su tüketimini en aza indiren optimum ekim desenleri belirlenmeye çalışılmıştır. Literatür incelendiğinde, tarımsal üretimde optimizasyon ve FEW nexus yaklaşımı üzerine kapsamlı araştırmalar yapıldığı görülmektedir. Doğrusal programlama (LP) yöntemini kullanan optimizasyon çalışmalarının çoğu, yıllık net kârın maksimize edilmesine ve çeşitli ürünler arasında su veya arazinin optimum şekilde tahsis edilmesine odaklanmaktadır. Tarımsal su kullanımının toplam su tüketiminde önemli bir paya sahip olduğu göz önünde bulundurulduğunda, su ayak izini azaltmaya yönelik çalışmaların ise nispeten az olduğu tespit edilmiştir.

Bu boşluğu ele alan bu çalışmanın temel amacı, amaç fonksiyonu olarak su kullanımının en aza indirilmesine öncelik vererek en uygun ürün desenlerini belirlemektir. Ayrıca, bu ekim modellerinin enerji ihtiyacı, tarımsal gelir ve CO₂ emisyonları gibi diğer parametreler üzerindeki etkilerini FEW nexus yaklaşımı ile analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmanın temel yeniliği, FEW nexus tabanlı değerlendirmenin optimum ürün desenlerinin belirlenmesine entegre edilmesidir.

Tarımsal su tüketimini en aza indiren optimum ekim desenlerini belirlemek için LP modeli kullanılmıştır. Daha sonra, LP ile elde edilen ekim desenleri kullanılarak, su kullanımı, enerji tüketimi, tarımsal gelir ve CO₂ emisyonu parametreleri FEW nexus temelinde farklı senaryolar altında hesaplanmış ve senaryolar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Tarımsal üretimde farklı senaryolar altında elde edilebilecek potansiyel su tasarrufunun araştırılması amaçlanmıştır.

Çalışmada ayrıca, daha kapsamlı bir analiz ile birden fazla amaç fonksiyonunun olması durumunun incelenmesi için tarımsal üretimde su kullanımının minimize edilmesi ve tarımsal gelirin maksimize edilmesi birbiriyle çelişen amaçlar olarak ele alınmış ve optimal ürün desenlerinin belirlenmesi için çok amaçlı doğrusal programlama (MOLP) yöntemi kullanılmıştır.

MOLP yönteminde, her bir amaç fonksiyonuna atanan ağırlıklar değiştirilerek farklı bakış açılarını yansıtan alternatif ürün deseni senaryoları oluşturulmaktadır. Ek olarak, mahsul ekim alanlarında farklı oranlarda değişime müsaade edilmesi durumları da ayrı senaryolarda incelenmiştir. Daha sonra, çeşitli senaryolar için MOLP yoluyla elde edilen ürün desenleri, FEW bağlantısına dayalı olarak su kullanımı, enerji tüketimi, tarımsal gelir ve CO₂ emisyonlarını hesaplamak için kullanılmıştır. Bu senaryolar daha sonra karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmiştir. Böylelikle, dikkate alınan iki çatışan hedefe atfedilen göreceli öneme ve farklı ekim alanı değişim oranlarına bağlı olarak bu sonuç parametrelerinin nasıl değiştiğinin araştırılması ve bunlar arasındaki ödüleşimlerin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

1.3 Literatür Araştırması

1.3.1 Doğrusal programlama ile ilgili çalışmalar

Doğrusal programlama, belirli bir tarım arazisi için en uygun ürün düzenlemesini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntem olarak hizmet vermektedir. Çeşitli araştırmacılar, mevcut kaynaklara ve kısıtlamalara dayalı olarak optimum ekim modellerini belirlemek için LP modellerini kullanmışlardır.

Sarker ve diğ. (1997), Bangladeş'te etkili ürün planlama stratejileri uygulayarak tarım sektöründe verimliliği artırma potansiyelini araştırmıştır. Arazi özellikleri, alternatif ürünler veya ürün kombinasyonları, ürün planlamaları, girdi ihtiyaçları ve yatırım dahil olmak üzere çeşitli faktörler tarımsal yetiştiricilikte rol oynamaktadır. En önemli zorluk, belirli arazi tipleri için en uygun ürünlerin seçilmesi, gıda talepleri, arazi mevcudiyeti ve finansal kısıtlamalar karşılanırken kazançların optimize edilmesinde yatmaktadır. Bunu ele almak için, kazançları en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan, farklı ürünler için arazi tahsisine yönelik bir LP modeli geliştirilmiştir. Bulgular, stratejik planlama yoluyla yıllık kazançlarda yaklaşık 15.945,10 milyon Taka'lık potansiyel bir artışa işaret etmektedir.

Singh ve diğ. (2001), Shahi Dağıtım Bölgesi'nde ana ürünler için sulama suyu ihtiyacını ve kanal ve yeraltı suyu yoluyla mevcut toplam suyu tahmin etmiştir. Değişen su mevcudiyeti seviyelerinde en yüksek net karı sağlayan en iyi ürün desenini önermek için bir LP modeli geliştirilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu, farklı mevsimlerde mevcut olan toplam su ve arazi, yerel gıda ihtiyaçlarını karşılamak için buğday ve pirinç için gereken minimum alanlar, çiftçilerin sosyo-ekonomik koşulları ve belirli bölgelerde belirli ürünlerin yetiştirilmesine yönelik özel tercihler gibi kısıtlamalar tarafından yönlendirilmiştir. Modelden elde edilen sonuçlar, çalışma alanı içinde, optimal ekim olarak 4981 hektar buğday, 3560 hektar şeker kamışı, 1817 hektar hardal, 632 hektar mercimek, 355 hektar patates, 87 hektar nohut ve 3653 hektar pirinç yetiştirilebileceğini ve buğdayın bu alanda istikrarlı şekilde en karlı ürün olarak belirlendiğini ortaya koymuştur.

Georgiou ve Papamichail (2008), çalışma alanlarında toprak su dengesini gözetken doğrusal olmayan bir programlama modeli oluşturmuştur. Bu model, optimum hazne salımlarını belirlemekte, sulama suyunu çeşitli tarım ürünlerine tahsis etmekte ve tarımsal üretim için optimum ürün desenini tanımlamaktadır.

Bhuvandas ve diğ. (2010), Ukai rezervuarının sulama alanı içinde ürün alanı tahsisini optimize etmek için bir LP modeli sunmuştur. Amaç, değişen su mevcudiyeti seviyeleri altında sulanan bölgede yetiştirilen tüm ürünlerin birleşik verimini maksimize etmektir. Bu çalışma, mevcut su kaynağına dayalı olarak sulama suyu dağıtımını optimize etmeyi ve ürün alanı, ekim modelleri ve su ihtiyaçları ile ilgili kısıtlamaları dikkate alarak tarımsal geliri artırmayı amaçlamaktadır.

Gadge ve diğ. (2014), mevcut su kaynaklarını dikkate alan bir LP modeli oluşturmuş ve karı maksimize etmeyi amaçlayan bir ekim deseni önermiştir. Uyguladıkları metodoloji ile elde ettikleri sonuçlar, daha sonra mevcut ekim desenine karşı değerlendirilmiştir.

Osama ve diğ. (2017), Mısır'ın belirlenen üç eski bölgesinde yıllık net getiriye maksimize etmeyi amaçlayan doğrusal bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Analiz, 2008'den 2012'ye kadar beş yılı kapsayan 28 üründen elde edilen verileri kapsamaktadır. Model, ürünlerdeki coğrafi farklılıkları, sulama gereksinimlerini, ürün verimlerini ve gıda taleplerini içermektedir. Bulgular, stratejik olmadığı düşünülen soğan, sarımsak, arpa, keten, çemen, nohut, mercimek ve acı bakla gibi ürünler için

tahsis edilen arazide kayda değer bir azalma olduğunu göstermektedir. Buna karşılık buğday, mısır, yonca, pirinç, şeker ürünleri ve pamuk gibi stratejik ürünler, gıda ihtiyaçlarını karşılamak için benzer arazi tahsislerini sürdürmektedir. Öte yandan, domates gibi net getirisi daha yüksek olan ürünlere tahsis edilen arazide önemli bir artış görülmüştür.

Daghighi ve diğ. (2017), su kıtlığının olumsuz etkilerini azaltmak için karar vericilere optimum ürün düzenlemesini belirlemede, yüzey suyu kullanımının verimini en üst düzeye çıkarmada ve suyu çeşitli ürünler arasında etkili bir şekilde dağıtmada yardımcı olan bir su kaynağı planlama modeli oluşturmak için LP'yi kullanmıştır. Beş yıllık bir süre zarfında model, kademeli değişiklikleri hesaba katmak ve mevcut kaynaklardan en uygun su kullanım modelini belirlemek için kullanılmıştır. Bulgular, negatif su dengesinin kademeli olarak iyileştirilerek nihayetinde pozitifte ulaşma potansiyeline işaret etmektedir.

Imron ve Murtiningrum (2021), güvenilir su debisi ve mevcut arazi alanını dikkate alarak sulama suyunun optimize edilmiş tahsisi yoluyla en uygun ekim alanlarına ulaşmayı ve geliri en üst düzeye çıkarmayı amaçlamıştır. Sulama suyu tahsisi için LP kullanarak optimum mahsul alanını belirlemek için çeşitli mahsul desenlerini araştırmışlardır.

Kumar ve diğ. (2022), Bhadra rezervuar kanal sisteminin rotasyonel politikasını dikkate alarak ekim desenleri önermek için bir LP modeli kullanmıştır. Model, tarımsal üretimden elde edilen karı maksimize etmeyi amaçlayan bir ekim deseni elde etmek için su ve arazi mevcudiyeti, çiftçi tercihleri ve toprağın uygunluğu gibi çeşitli kısıtlamaları içermektedir.

Birçok araştırmacı, tarımsal ürün planlamasının doğasında bulunan birbiri ile çelişen birden fazla sayıdaki hedefleri ele almakta uygun bir yöntem olarak MOLP modelini de tercih etmiştir. Mainuddin ve diğ. (1997), net getiriyi ve sulanan alanı maksimize etmek amacıyla bir MOLP modeli oluşturmuş, ardından analitik hiyerarşi sürecini kullanarak her bir sulama senaryosunu farklı seviyelerde su kaynağı mevcudiyeti altında değerlendirmiştir. Ren ve diğ. (2019), Wuwei şehrinin sürdürülebilir kalkınmasını teşvik etmeyi amaçlayan çoklu belirsizlikler altında bir dizi optimum sulama ve ekim planı geliştirmek için çok amaçlı optimizasyon ve analitik hiyerarşi sürecini (AHP) bir araya getirmiştir.

Raju ve Kumar (1999), benzer şekilde ekim alanının planlanması için MOLP modelini kullanmış ve küme analizi ve çok kriterli karar verme yöntemlerini uygulayarak en uygun senaryoyu belirlemiştir.

Saker ve Quaddus (2002), hedef programlama (GP) kullanarak ürün planlama problemi üzerine bir model geliştirmiş ve inceledikleri probleminin ele alınmasında üç farklı hedefin önemini araştırmışlardır.

Xevi ve Khan (2005), sulama yönetimini ele alırken, net gelir, değişken maliyet ve çekilen yeraltı suyu miktarından kaynaklanan potansiyel çatışmaları dikkate alarak GP tekniğini kullanmışlardır.

Vivekanandan ve Viswanathan (2007), doğrusal programlama (LP) ve hedef programlama (GP) yaklaşımlarını kullanarak Barna sulama projesinde ürün desenini optimize etmeye çalışmışlardır. Optimizasyon süreci, net getiriyi, protein değerini ve kalori değerini maksimize etmeyi hedefleyen üç farklı amacı içermiştir. Projedeki ürün desenini optimize etmek için en etkili yaklaşımı seçmek üzere LP ve GP kullanılarak net getiri miktarı, protein ve kalori değerleri ve sulama için kullanılan su miktarı gibi faktörler değerlendirilmiştir.

Amini Fasakhodi ve diğ. (2010), su kaynaklarının sürdürülebilirliğini değerlendirmek ve tarımsal üretim planlamasında en uygun ürün desenini belirlemek için ölçüt olarak “net getiri/su tüketimi” ve “işgücü istihdamı/su tüketimi” olmak üzere iki oran sunmuştur. Amaçları, sürdürülebilirlik göstergeleri olarak bu oranları eş zamanlı olarak optimize etmektir. Bu amaçla, çalışmada çok amaçlı kesirli hedef programlama (MOFGP) yöntemi uygulanmıştır. MOFGP yaklaşımı, tek amaçlı kesirli programlamadan elde edilenlere kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu durum, tek amaçlı kesirli programlama modellerinin sonuçlarından daha iyi performans gösteren sürdürülebilirlik göstergesi sonuçlarıyla kanıtlanmıştır.

Keramatzadeh ve diğ. (2011), hem ekim desenini hem de su tahsisini optimize ederek çiftçilerin net gelirini maksimize etmeyi amaçlayan çok amaçlı bir doğrusal programlama modeli geliştirmiştir. Elde ettikleri bulgular, optimize edilmiş ekim desenlerinin etkin sulama suyu tahsisi ile uyumlu hale getirilmesinin net tarımsal getirileri artırma konusunda önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Ye ve diğ. (2023), küçük ölçekli çiftliklerde ürün deseninin belirlenmesinde maliyet etkinliği, sulama etkinliği, enerji verimliliği, enerji etkinliği ve gıda etkinliği olmak

üzere beş göstergeyi maksimize etmek için doğrusal ve çok amaçlı programlama modelleri kullanmıştır. Bulgular, ürün desenini belirlemek için çok amaçlı planlamanın kullanılmasının hem sulama hem de enerji verimliliğini artırdığını göstermiştir. Bölgedeki sınırlı su kaynakları ve ulusal tarım politikalarıyla uyum gibi kısıtlar göz önünde bulundurularak, sulama etkinliği ve maliyet etkinliğini en üst düzeye çıkaran ekim desenleri önerilmiştir.

Bhatia ve Rana (2020), kaynakların mevcudiyetini göz önünde bulundurarak Rajasthan'ın çeşitli bölgelerinde üreticiler tarafından benimsenen ekim uygulamalarının bir analizini yapmıştır. Rajasthan'ın kurak topografyası ve çeşitli hava koşulları ile sınırlı su kaynakları göz önüne alındığında, formüle edilen model alternatif ürün kombinasyonları önermiştir. Çalışma, MOLP'yi kullanarak girdi maliyetlerini en aza indirmeyi ve çiftlik gelirlerini en üst düzeye çıkarmayı amaçlamıştır.

Niu ve diğ. (2019), su-ekosistem-tarım (WEA) bağlantısı içindeki ilişkileri ve ödüneşimleri tasvir etmek için çok amaçlı doğrusal kesirli programlama (MOLFP) yaklaşımı önermiştir. Bu yaklaşımı kullanarak, hidrolojik koşullar, arazi kullanımı ve su yönetimindeki değışikliklerin Zhangye Havzası'ndaki tarım sistemi üzerindeki etkilerini değlendirmişlerdir.

1.3.2 Gıda-enerji-su bağlantısı ile ilgili çalışmalar

Su, enerji ve gıda kaynakları arasındaki bağlantılar ve çatışmalar Bonn'da düzenlenen Su-Enerji-Gıda Bağlantısı Konferansı'nda açıklığa kavuşturulmuştur. Bu önemli kaynaklar arasındaki karmaşık ilişkileri tanımlamak için “Nexus” terimi bu konferans sırasında ortaya atılmıştır (Hoff, 2011). Bonn konferansından bu yana da, gıda-enerji-su (FEW) bağlantısına odaklanan çok sayıda araştırma yapılmıştır.

El-Gafy ve diğ. (2017), su, enerji ve ekonomik faktörleri entegre eden optimal bir ekim deseni tasarlamak için nexus ve non-nexus yaklaşımları arasında karşılaştırmalı bir çalışma yürütmüştür. Bu yaklaşımları kullanarak doğrusal optimizasyonun etkinliğini değlendirmişler ve su, gıda ve enerji hususlarını birbirine bağlayan nexus yaklaşımını kullanmanın, tarımsal net getiriye en üst düzeye çıkarırken su ve enerji kullanımını en aza indiren ekim modellerini belirlemek için bütünsel bir çerçeve sağladığını ortaya koymuşlardır.

Chen ve diğ. (2018), küresel toprak-su bağlantısını analiz etmek için çok bölgeli bir girdi-çıktı modeli oluşturmuştur. Çalışma, arazinin verimliliğini ve çeşitli ürünlerle ilişkili su ihtiyaçlarını incelemenin yanı sıra, dünya çapında tarımsal arazi kullanımı ve tatlı su kullanımı modellerini izlemeye odaklanmıştır.

Tian ve diğ. (2018), sürdürülebilir tarımı teşvik etmek için FEW bağlantısı içinde kaynak kullanım verimliliğini sistematik olarak geliştirmeye çalışmışlardır. Bir karar destek sistemi içinde kavramsal bir model kullanmışlar ve tarım sistemleri arasında entegre yönetimin önemini vurgulamışlardır.

Li ve diğ. (2019), özellikle belirsizlik koşulları altında, tarımsal FEW bağlantılarının sürdürülebilir yönetimi için kaynakları etkin bir şekilde tahsis etmek üzere tasarlanmış bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Geliştirdikleri model, politika yapıcılarının çevresel etkileri en aza indirirken maksimum ekonomik getiri elde etmek için su, enerji ve arazi kaynaklarına ilişkin en uygun politika seçeneklerini belirlemelerini sağlamaktadır.

Yuan ve Lo (2020), FEW bağlantısı içindeki her sektörle ilgili kapsamlı bir dizi birbirine bağlı gösterge geliştirmeyi amaçlayan sistematik bir yaklaşım ortaya koymuştur. Bu göstergeler, belirli sorunların analiz edilmesini ve bölgeye özgü ve ulusal çözümlerin formüle edilmesini sağlar.

Abdi ve diğ. (2020), yaptıkları derleme çalışmasında, FEW nexus yaklaşımının enerji, su ve gıda güvenliğinin yeterliliğine odaklanan çeşitli alternatif önerilerin geliştirilmesi ve uygulanmasını değerlendirmek için küresel bir çözüm olduğunu belirtmiştir. Bu yaklaşım sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmeyi, doğal, beşeri ve sosyal sermayeyi korurken toplumların yaşam kalitesini artırmayı, uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerini ele almayı ve tüm doğal kaynakları korumayı amaçlamaktadır. Çalışmada, bu konudaki son araştırmalar gözden geçirilmiştir. Bu amaçla, ilk olarak mevcut istatistiklere vurgu yapılmış, ardından orijinal kavramın ortaya atılmasından bu yana yaklaşık on yıl geçtiği göz önünde bulundurularak bu alanda yayınlanan önemli çalışmalar incelenmiştir. Tartışma, politika yapıcılarının nexus yaklaşımına göre atması gereken adımların yanı sıra uygulamaya yönelik önemli zorlukları ve fırsatları da içermekte ve geleceğe yönelik projeksiyonlarla son bulmaktadır.

Saray ve diğ. (2022), Kuzeybatı İran'da yer alan bir çiftlikte su-enerji-gıda bağlantısını ve CO₂ emisyonlarını değerlendirmeyi amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın amacı, iklim değişikliği ile ilgili ulusal stratejilerin oluşturulmasında karar vericileri destekleyen değerli veriler sağlamaktır. Yedi farklı ürün çeşidi (yonca, arpa, silajlık mısır, patates, kanola tohumu, şeker pancarı ve buğday) için enerji girdi-çıktısının yanı sıra su ve enerji tüketimi, üretkenlik ve ekonomik verimlilik dahil olmak üzere altı temel göstergelyi incelemişlerdir. Bu göstergelerden elde edilen su-enerji-gıda bağlantı endeksi, ürünler arasında en yüksek değere sahip olan silajlık mısıırı ve en düşük değere sahip olan patatesi vurgulamıştır. En yüksek enerji tüketimine sahip olan patates aynı zamanda 5166 kg CO₂ ile hektar başına en yüksek CO₂ emisyonunu sergilemiştir ve bu durum enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki doğrudan ilişkiye bağlanmaktadır. Enerji girdilerinin CO₂ emisyonlarıyla ilişkili olarak analiz edilmesi, enerji girdisi ile küresel ısınma potansiyeli arasında doğrudan bir bağlantı olduğunu ortaya koymuştur. Optimizasyon değerlendirmelerine göre, arpa, kanola tohumu, silajlık mısır ve buğday, incelenen koşullar altında su-enerji-gıda bağlantı endeksi ve CO₂ emisyonları açısından en verimli ürünler olarak ortaya çıkmış ve en uygun tarım modelinin belirlenmesi açısından bu ürünler vurgulanmıştır.

Bazilian ve diğ. (2011), iklim değişikliği, arazi kullanımı ve diğer çeşitli faktörleri dikkate alarak kapsamlı bir analiz gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, enerji, su ve gıda sistemleri arasındaki bağlantıları inceleyerek bu faktörlerin birbirleri üzerindeki etkilerini derinlemesine analiz etmiştir. Analiz, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için entegre bir yönetim yaklaşımının önemini vurgulamış ve bu sistemlerin birlikte ele alınmasının, uzun vadeli planlama ve politika oluşturma süreçlerinde kritik olduğunu ortaya koymuştur.

IRENA'nın (2015) raporu, sekiz nexus değerlendirme aracını, girdiler, çıktılar ve analitik özellikler temelinde değerlendirmiştir. Değerlendirilen kriterler arasında, sekiz araçtan sadece ikisinin "basit" bir nexus aracı olarak kabul edilme şartını karşıladığı belirtilmiştir. Kapsamlı araçların genellikle önemli veri gereksinimlerine sahip olduğu ve zaman, kapasite ve finansman açısından önemli kaynaklar gerektirdiği vurgulanmıştır (IRENA, 2015).

Daher ve Mohtar (2015), gıda, enerji ve su arasındaki bağlantıları ve bunların dış çevre ile etkileşimlerini değerlendiren çevrimiçi hesaplamalar için kullanılan WEF Nexus

Tool 2.0'ı geliştirmiştir. Bu araç, su, enerji ve gıda sistemleri arasındaki karmaşık ilişkileri daha iyi anlamak ve analiz etmek amacıyla tasarlanmıştır.

Halbe ve diğ. (2015), FEW bağlantısı içindeki temel ilişkileri incelemek için bir nedensellik diyagramı kullanmıştır. Bu yaklaşım, FEW sistemleri arasındaki karmaşık etkileşimleri ve bu sistemlerin birbiri izerindeki etkilerini görselleştirerek analiz etmeye olanak sağlamıştır. Nedensellik diyagramı, bu kaynakların yönetiminde daha bilinçli kararlar alınmasına katkıda bulunmuştur.

Li ve diğ. (2019), belirsiz koşullar altında FEW nexus kapsamında tarımda kaynak tahsisini optimize etmek amacıyla bir model oluşturmuştur. Bu model, sürdürülebilir kaynak yönetimi uygulamalarını geliştirmeyi amaçlamaktadır. Model, su, enerji ve tarımsal kaynakların en verimli şekilde kullanılmasını sağlayarak ekonomik getirileri maksimize ederken çevresel etkileri minimize etmeye yönelik stratejiler sunmaktadır.

Nie ve diğ. (2019), kaynaklar arasındaki ödünleşimleri analiz etmek ve birbiriyle ilişkili FEW bağlantı ağlarını optimize etmek için sistematik bir çerçevenin temelini ortaya koymuştur. Karar alma süreçlerini desteklemek, çeşitli süreç ve teknolojik alternatifleri değerlendirmek amacıyla ödünleşme analizi için çok amaçlı bir optimizasyon stratejisi kullanılmıştır. Bulgular, bu çerçevenin birden fazla hedefi dengelemede etkili olduğunu ve rekabetçi senaryolarda sistematik karar verme için bir ölçüt olarak hizmet edebileceğini göstermiştir.

Dargin ve diğ. (2019), uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenen nexus araçlarının karmaşıklığını karşılaştırmak için bir yöntem sunmaya çalışmıştır. Her bir aracın karmaşıklık indeksini değerlendirmek amacıyla sekiz farklı kriter ortaya koymuşlardır. Bu kriterler kullanılarak, araçların görece basitlik veya karmaşıklığını gösteren puanlar atanmıştır. Daha yüksek karmaşıklık puanlarına sahip araçlar, belirli kaynak etkileşimlerindeki ayrıntıları yakalamada becerikli olsalar da, daha düşük karmaşıklık puanlarına sahip araçlara kıyasla çok sayıda etkileşimi aynı anda ele alma konusunda sınırlamalarla karşı karşıya kalmaktadırlar.

Wang ve diğ. (2022), hem arz hem de talep yönlerini içeren bölgesel bir Gıda-Enerji-Su (FEW) etkileşim modeli oluşturmuşlardır. Bu model, FEW kaynakları arasındaki bağlantıları ve bu kaynakların bir bölgenin genel gelişimi izerindeki etkilerini açıklamayı amaçlamaktadır. FEW bağlantısındaki arz ve talepler arasındaki ilişkileri nicel olarak değerlendirmek için bir sürdürülebilirlik endeksi göstergesi kullanılmıştır.

Analiz sonuçları, enerjinin FEW bağlantısındaki önemli rolünün ve bölgesel kalkınma üzerindeki önemli etkisinin altını çizmiştir.

Siah ve Zabiri (2022), Malezya'nın tarım sektöründe kaynak tahsisinin en iyi şekilde planlanması için sistematik bir model geliştirmeye çalışmışlardır. Perak'taki bir vaka çalışmasından türetilen bu çerçeve, FEW nexus sisteminin yerel düzeyde uygulanmasında önemli bir rol oynamakta ve farklı alt birimler arasındaki ödünleşimleri modellemektedir.

Mirzaei ve diğ. (2021), FEW bağlantı endeksini ve çiftçilerin brüt getirisini maksimize etmek amacıyla çok amaçlı bir programlama modeli geliştirmiştir. Model aynı zamanda, yeraltı suyu kaynakları üzerindeki kısıtlamaları da dikkate alarak kimyasal gübre ve kimyasal pestisit kullanımını en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Sonuçlar, önerilen sistemdeki ekonomik hedeflere rağmen, çiftçilerin gelirlerinde önemli bir düşüş yaşanabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, çiftçiler için ekonomik teşvikleri artıracak politikaların uygulanması önerilmektedir.

Namany ve diğ. (2019), gıda sektöründeki karar alma süreçlerini desteklemek için FEW bağlantısına dayanan yenilikçi bir metodoloji önermiştir. Bu yaklaşım, Katar'da yerel gıda üretimi için bazı alternatif teknolojileri değerlendirmekte, sermaye ve işletme maliyetleri ile ölçülen ekonomik performansın yanı sıra çevresel performansı da göz önünde bulundurmaktadır.



2. YÖNTEMLER

2.1 Doğrusal Programlama

Doğrusal Programlama, yönetim bilimi olarak da bilinen daha geniş bir alan olan yöneylem araştırması kapsamına giren bir matematiksel programlama türüdür. Bu disiplin, çeşitli karmaşık sistemlerin optimizasyonu ve kontrolüne odaklanmaktadır. Bu bağlamda, “programlama” terimi optimizasyon ile aynı anlamı ifade etmektedir (Eiselt ve Sandblom, 2007).

“Doğrusal programlama” terimi, bilgisayarların yaygın olarak bulunmadığı bir dönemde ortaya çıkmıştır ve bu dönemde “programlama” eğitim, lojistik veya asker konuşlandırma planlarını ve programlarını tanımlamak için kullanılan askeri bir terimdir. Terimde yer alan “doğrusal” sözcüğü ise, olurlu çözümlerin eşitsizlikler şeklindeki doğrusal kısıtlamalarla sınırlandırıldığını ve genellikle incelenen maliyetlerin veya sürenin en aza indirilmesi gibi hedeflerin ilgili değişkenlerin doğrusal bir fonksiyonu kullanılarak değerlendirildiğini ifade etmektedir (Matoušek ve Gärtner, 2007).

Askeri alandaki planlama çalışmalarının dışında, doğrusal programlama, hammaddelerin ve ürünlerin fabrikalar arasında taşınmasının optimize edilmesi, tarımsal ürün ekim programlarının belirlenmesi ve müşteriler tarafından sipariş edilen belirli uzunluklarda kağıt rulolarının kesilmesi gibi çok çeşitli ekonomik faaliyetlerin planlanmasını kapsayacak şekilde geniş bir uygulama alanı bulmuştur. “Doğrusal kısıtlamalarla planlama” terimi anlam açısından yöntemin orijinal amacını daha iyi yansıtsa da, “doğrusal programlama” terimi zaman içinde yaygın olarak kabul görmüş ve yerleşmiştir. Bununla birlikte, “doğrusal programlama” terimi uzun yıllardır sağlam bir şekilde yerleşmiştir. Uygulama alanı matematiksel ekonominin çok ötesine geçerek bilgisayar bilimlerinde ve diğer birçok alanda da önemli bir rol oynamaya başlamıştır (Matoušek ve Gärtner, 2007).

Optimizasyon, karmaşık karar verme ve kaynak tahsisi problemlerini analiz etmek için temel bir ilke olarak kendini kanıtlamış ve yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Hem uygun bir kavramsal çerçeve hem de başka türlü karmaşık problemleri basitleştiren pratik bir yaklaşım sağlamaktadır. Optimizasyon yaklaşımını benimseyerek, genellikle birbirine bağlı birden fazla değişkeni içeren karmaşık kararlara, performansı ölçen ve karar kalitesini değerlendiren tek bir amaca odaklanarak yaklaşılır. Bu amaç daha sonra, değişken değerlerin seçimini kısıtlayabilecek her türlü kısıtlamaya bağlı kalarak, problem formülasyonuna bağlı olarak maksimize veya minimize edilir (Luenberger ve Ye, 2008).

2.1.1 Doğrusal programlamanın önemi ve tarihsel gelişimi

Doğrusal programlama, yakın tarihte çeşitli disiplinlerde problem çözme yetenekleri sunan önemli bir gelişme olarak görülmektedir (Simonovic, 1992). Doğrusal programlamanın geçmişi 1930'lara ve 1940'lara kadar uzanmaktadır. Yöneylem araştırması ve doğrusal programlamanın resmi olarak tanımlanmasından önce, yine bu dönemlerde oyun teorisi alanı da önemli ölçüde ilerleme kaydedilen bir diğer ilişkili alan olarak öne çıkmaktadır (Eiselt ve Sandblom, 2007).

Doğrusal kısıtlamalar ve doğrusal bir amaç fonksiyonu ile karakterize edilen problemlerin çözümüne teorik olarak izin veren otomatik bir yaklaşım olan simpleks yöntemi George Dantzig tarafından 1947 yılında geliştirilmiştir. Bunu takip eden dönemde yöneylem araştırmasının hızla gelişmesi büyük ölçüde hesaplama teknolojisindeki ilerlemelerden kaynaklanmaktadır. Simpleks yönteminin ilk bilgisayar uygulamalarından biri, 71 değişkenli ve 48 kısıtlamalı bir modeli içermekte ve çözülmesi yaklaşık 18 saat sürmekteydi. Günümüz standartlarına göre çok uzun çalışma süresine rağmen bu başarı, Dantzig'in yenilikçi yöntemi kullanılarak pratik bir sorunun çözülebildiği ilk örneklerden biri olduğu için alanda çığır açan önemli bir atılım olarak görülmektedir (Eiselt ve Sandblom, 2007).

Simpleks yönteminin ortaya çıkışı, ekonominin hem teorik hem de pratik alanlarını önemli ölçüde etkilemiştir. Doğrusal programlama hızla kaynak tahsisi, üretim planlaması, iş programlarının düzenlenmesi, yatırım portföyü ve pazarlama optimizasyonu ve askeri stratejilerin geliştirilmesi için güçlü bir araç haline gelmiştir. Genellikle deneyimlerine ve sezgilerine güvenen yöneticiler, işin kendisini yakından tanımayan, yalnızca sayısal verilerle çalışan analistler tarafından gerçekleştirilen

karmaşık matematiksel hesaplamalarla yönlendirilen basit bir yeniden yapılanma ile işletmelerinde maliyetleri %20 düzeyinde azaltabildiğinde oldukça etkilenmiştir. Bu durum, rekabetçi bir ortamda, bu matematiksel yöntemlerin yadsınamaz gücünü göstermiş ve işletmelerin karar verme sürecine yaklaşımını temelden değiştirmiştir (Matoušek ve Gärtner, 2007).

1960'larda tamsayı programlama, doğrusal olmayan programlama ve akış problemleri de dahil olmak üzere doğrusal programlama ile ilgili alanlarda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Daha güçlü bilgisayarların ortaya çıkması, daha büyük ve daha karmaşık problemlerin çözülmesini sağlamış, bu da doğrusal programlama modellerinin ve uygulamalarının ilerlemesinin yanı sıra daha geniş anlamıyla yöneylem araştırması alanını teşvik etmiştir. Edmonds (1965), en kötü durumda girdinin uzunluğunun bir polinom fonksiyonu kadar işlem gerektiren algoritmaların verimli kabul edilmesi gerektiği fikrini ortaya atmıştır. Bu fikir, sonraki on yılda başlıca önemli konular haline gelecek olan karmaşıklık teorisi ve algoritma analizi için zemin hazırlamıştır (Eiselt ve Sandblom, 2007).

Optimizasyon araçlarının elektronik tablolara entegrasyonu da dahil olmak üzere kullanıcı dostu yazılımların yaygınlaşmasının yanı sıra donanım teknolojisindeki gelişmeler de ek ilerlemelere yol açmıştır. İşlem hızındaki sürekli gelişmeler, genişleyen bellek kapasiteleri ve azalan donanım maliyetleri, özellikle doğrusal programlama yöntemi açısından optimizasyon tekniklerinin erişilebilirliğini ve kullanımını önemli ölçüde artırmıştır (Eiselt ve Sandblom, 2007).

LP, büyük ölçekli problemleri ele almadaki verimliliği, global optimuma yakınsama kabiliyeti ve hassasiyet analizi için faydalı olan köklü bir dualite teorisi dahil olmak üzere birçok önemli avantaj sunmaktadır (Labadie, 2004). Bu modeller genellikle kullanıcı dostu uygulama sunar ve mevcut LP çözümleri kullanılarak çözülebilir, böylece kullanıcı tarafından sağlanan ilk çözümlere olan ihtiyacı ortadan kaldırır. LP problemlerini çözebilen bilgisayar programları sayesinde LP, çeşitli pratik uygulamalarda en çok kullanılan optimizasyon algoritmalarından biri olarak yaygın bir şekilde kabul görmüştür. Tarım, işletme, ticaret, eğitim, mühendislik, finans, kamu sektörü ve diğer birçok alanda alternatif stratejileri, planlamaları ve idari yaklaşımları değerlendirmeye hizmet etmektedir (Loucks ve van Beek, 2017).

2.1.2 Doğrusal programlama modelinin temel özellikleri

Doğrusal program, amaç fonksiyonunun bilinmeyen değişkenlerin doğrusal bir ifadesi olduğu ve kısıtlamaların doğrusal denklemler ve eşitsizliklerden oluştuğu bir optimizasyon problemi türüdür. Bir problemin modeli oluşturulduktan sonra değeri belirlenecek olan bilinmeyenler karar değişkenleri olarak adlandırılır. Karar değişkenlerinden elde edilecek olan optimum çözümün (maksimum ya da minimum) bulunmasını sağlayan doğrusal fonksiyon amaç fonksiyonu olarak tanımlanır. Bir modeldeki karar değişkenleri veya karar değişkenleri ile modelinin davranışını etkileyen sabit katsayılar (karar değişkeni katsayıları, teknolojik katsayılar ve sağ taraf sabitleri) arasındaki zorunlu ilişkileri belirten denklemlere ise “kısıt” adı verilir. Kısıtların biçimi bir problemten diğerine değişebilse de, herhangi bir doğrusal program aşağıdaki standart formdaki gibi formüle edilebilir (Luenberger ve Ye, 2008).

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Maksimizasyon veya minimizasyon } Z = \sum_j c_j x_j \quad (2.1)$$

Kısıt denklemleri:

$$\sum_j a_{ij} x_j \leq \text{veya} \geq b_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2.2)$$

ve

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.3)$$

Burada, x_j karar değişkenlerini, Z amaç fonksiyonunu, c_j amaç fonksiyonundaki karar değişkenlerinin katsayılarını, a_{ij} kısıtların sol tarafında bulunan teknolojik katsayıları, b_i ise sağ taraf sabitlerini ifade etmektedir (Hillier ve Lieberman, 2010).

Bir doğrusal programlama problemi temel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak karar değişkenlerinin ($x_1, x_2, \dots, x_n$) doğrusal bir fonksiyonu olan amaç fonksiyonu matematiksel olarak ifade edilir. Amaç fonksiyonu maksimizasyon veya minimizasyon amaçlı olabilir. İkinci olarak, karar değişkenlerinin alabileceği değerleri sınırlandıran kısıtlar tanımlanır. Her bir kısıt denklemi doğrusal eşitlik veya eşitsizlik

halinde ifade edilmelidir. Son olarak, karar değişkenlerinin sağlaması gereken negatif olmama şartını belirten bir kısıt $x_j \geq 0$, ($j=1,2,3,\dots,n$) tanımlanır.

Bir model bu genel yapıya uyuyorsa, bilinmeyen tüm karar değişkenleri için en uygun değerleri belirlemek üzere çok sayıda LP yazılım aracı mevcuttur. Çoğu ticari LP yazılımı, çözüm algoritmalarında negatif olmama kısıtlamalarını içermekte ve bireysel uygulamalar için bu koşulları tanımlama gerekliliğini ortadan kaldırmaktadır (Loucks ve van Beek, 2017).

Denklem (2.1) ile ifade edilen doğrusal programlama modelinin açık gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$\text{Maks veya min } Z = \sum_j c_j x_j = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (2.4)$$

Kısıtlar;

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n &\geq 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Bu form, doğrusal programlama problemi için standart form olarak adlandırılır. Matematiksel formülasyonu bu modele uyan her durum bir doğrusal programlama problemidir.

2.1.3 Model çözümleri ile ilgili temel terminoloji

Doğrusal programlamada “çözüm” terimi, diğer uygulamalardan farklı olarak bir problemin nihai cevabından daha geniş bir anlama sahiptir. Bu terim, karar değişkenlerine ($x_1, x_2, \dots, x_n$) atanan herhangi bir değer kümesini, bu değerlerin uygulanabilir veya optimal olup olmadığına bakılmaksızın ifade eder. Daha sonra belirli çözüm türleri, problem bağlamındaki özelliklerini belirtmek için “olurlu çözüm”, “optimal çözüm” veya “olurlu olmayan çözüm” şeklinde uygun sıfatlar kullanılarak ayrıştırılmaktadır (Hillier ve Lieberman, 2010).

Olurlu bir çözüm, tüm kısıtlamaların karşılandığı bir çözümdür. Olurlu olmayan bir çözüm ise en az bir kısıtın ihlal edildiği bir çözümdür. Olurlu bölge, tüm olurlu

Çözümlerin toplamını ifade etmektedir. Bir problemin hiç olurlu çözümü olmaması da mümkündür. Bu durum genellikle kısıtlardan birinin diğerk kısıtlara bağılı oluşan olurlu bölgenin dışında kalması halinde ortaya çıkar, bu nedenle karar değışkenlerine atanan hiçbir değıer kümesi aynı anda tüm kısıtları karşılayamaz (Hillier ve Lieberman, 2010).

Olurlu çözümler olduğı göz önüne alındığında, doğrusal programlamanın amacı, modeldeki amaç fonksiyonunun alacağı değıere dayalı olarak en iyi olurlu çözümü belirlemektir. Optimum özm, amaç fonksiyonunun en uygun değıerini veren olurlu bir çözümdür. En uygun değıer, amaç fonksiyonu maksimize edilecekse en büyük değıerdir, amaç fonksiyonu minimize edilecekse en küçük değıerdir (Hillier ve Lieberman, 2010).

Genellikle, problemlerin çoğunda tek bir optimal çözüm vardır, ancak birden fazla optimal çözümün mevcut olduğı durumlar da söz konusu olabilmektedir. Bu durum, en uygun çözümü sağılayan bir doğru parçası üzerindeki farklı noktaların amaç fonksiyonu için en uygun değıeri aynı anda sağılaması halinde ortaya çıkar. Bu şekilde birden fazla optimal çözümü olan herhangi bir problemde, hepsi de amaç fonksiyonunun aynı optimal değıerini veren sonsuz sayıda optimal çözüm vardır (Hillier ve Lieberman, 2010).

Bir başka olasılık da bir problemin optimal çözümünün olmamasıdır. Bu durum ancak olurlu çözümleri yoksa ya da kısıtlamalar amaç fonksiyonunun (Z) değıerinin olumlu yönde (pozitif ya da negatif) sonsuza kadar geliştirilmesini engellemiyorsa ortaya çıkar. İkinci durum, sınırsız bir amaç fonksiyonuna veya sınırsız Z 'ye sahip olmak olarak adlandırılır; burada amacın değıeri sınırsız olarak iyileştirilebilir (Hillier ve Lieberman, 2010).

Bir köşe noktası olurlu (CPF) özm, olurlu bölgenin bir köşesinde veya tepe noktasında bulunan bir çözümdür ve yöneylem araştırmasında bu çözümler genellikle uç noktalar olarak da adlandırılmaktadır. CPF özmleri, bu köşe noktalarını değıerlendirerek sistematik olarak optimal bir çözüm arayan simpleks yönteminde çok önemli bir rol oynamaktadır. Olurlu özmleri ve sınırlı bir olurlu bölgesi olan herhangi bir doğrusal programlama problemi düşünüldüğünde, problem CPF çözümlerine ve en az bir optimal çözüme sahip olmalıdır. Ayrıca, en iyi CPF özm optimal bir çözüm olmalıdır. Dolayısıyla, bir problemin tam olarak bir optimal çözümü varsa, bu bir CPF özm olmalıdır. Bununla birlikte, problemin birden fazla optimal

çözümü varsa, bunlardan en az ikisi CPF çözümü olacaktır, bu da doğrusal programlamada optimal değerleri bulmada köşe noktalarının önemini vurgulamaktadır (Hillier ve Lieberman, 2010).

2.1.4 Doğrusal programlamanın ana bileşenleri ve varsayımları

Matematiksel programlama problemleri, değişkenler ve parametreler içeren matematiksel modeller kullanarak gerçek hayattaki bir durumu temsil etmek üzere tasarlanmıştır. Hem değişkenler hem de parametreler sayısal değerleri temsil etse de, farklı rollere hizmet ederler: parametreler, karar verici tarafından sabit girdiler olarak alınması gereken bilinen değerlerdir, değişkenler ise değerleri optimizasyon süreci ile belirlenen bilinmeyenlerdir. Genel olarak, parametreler karar vericinin kontrolü dışındayken, değişkenler kararlarından doğrudan etkilenmektedir.

Tüm matematiksel programlama problemleri, kısıtlar ve amaçlar olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Kısıtlamalar, sistem tarafından dayatılan sınırlamaları temsil eder ve karar vericinin kontrolü dışındadır, karar verici sadece bunları dikkate almalı ve bunlara uymalıdır. Çeşitli pratik problemler kapsamında karşılaşılabilecek yaygın kısıtlama örnekleri arasında bütçe gibi kaynaklar üzerindeki sınırlamalar, mevcut sözleşme yükümlülüklerine uyma zorunluluğu (örneğin, belirli miktarlarda ürün teslim etme), anlaşmalar nedeniyle işgücü kısıtlamaları ve fiziksel veya kimyasal sınırlar yer alır. Problem kapsamında olurlu çözümler bulmak için bu kısıtlamalara uyulmalıdır. Diğer bir yandan, karar vericilerin isteklerini ifade eden amaçlar da vardır. Çoğu optimizasyon modelinde tek bir amaç fonksiyonu kullanılmaktadır (Eiselt ve Sandblom, 2007).

Doğrusal programlamaya özgü tüm varsayımlar aslında model formülasyonunda örtük olarak yer almaktadır. Özellikle, matematiksel bir bakış açısından, varsayımlar basitçe modelin doğrusal kısıtlamalara tabi doğrusal bir amaç fonksiyonuna sahip olması gerektiğidir. Ancak, modelleme açısından bakıldığında, doğrusal programlama modelinin bu matematiksel özellikleri, faaliyetlerin seviyelerini değiştirmenin etkisi hakkındaki varsayımlar da dahil olmak üzere, modellenen problemin faaliyetleri ve verileri hakkında belirli varsayımların bütün olması gerektiği anlamına gelir. Bu varsayımların anlaşılması, modelin analiz edilen gerçek dünya senaryosunu doğru bir şekilde temsil etmesini sağladığından, herhangi bir özel soruna uygulandığında doğrusal programlamanın uygunluğunu ve etkinliğini değerlendirmek için çok

önemlidir. Bir doğrusal programlama modelinin karşıladığı varsayımlar, orantılılık, toplanabilirlik, belirlilik ve bölünebilirlik varsayımları olarak sıralanabilir (Hillier ve Lieberman, 2010).

2.1.4.1 Orantılılık

Orantılılık, bir doğrusal programlama modelinde hem amaç fonksiyonu hem de fonksiyonel kısıtlamalar için geçerli olan temel bir varsayımdır. Her bir faaliyetin Z amaç fonksiyonuna katkısının x_j faaliyetinin seviyesi ile doğru orantılı olduğunu belirtir ve bu da amaç fonksiyonundaki $c_j x_j$ terimi ile ifade edilir. Aynı şekilde, bu orantılılık ilişkisi kısıtlamalar için de geçerlidir. Her bir faaliyetin her bir fonksiyonel kısıtlamanın sol tarafına katkısı, kısıtlamalardaki $a_{ij} x_j$ terimi ile temsil edilen x_j faaliyetinin seviyesi ile orantılıdır. Örnek olarak 1 adet ürünün amaç fonksiyonuna katkısı 10 birim ise 4 adet aynı tipte ürünün amaç fonksiyonuna toplam katkısı bunun dört katı olan 40 birim olacaktır. Benzer şekilde, 1 adet ürün üretim sürecinde 4 dakikada işleniyorsa, 5 adet aynı tipte ürün bunun beş katı olan 20 dakikada işlenecektir. Sonuç olarak, bu varsayım, modeli doğrusal terimlerle kısıtlar ve amaç fonksiyonunun veya kısıtlamaların herhangi bir terimindeki değişkenler için 1'den farklı herhangi bir üsse izin vermez. Bu, modelin mutlak surette doğrusal kalmasını ve doğrusal programlamanın temel ilkelerine bağlı kalmasını sağlar (Hillier ve Lieberman, 2010).

2.1.4.2 Toplanabilirlik

Orantılılık varsayımı, her değişkenin amaç fonksiyonuna ve kısıtlamalara katkısının seviyesiyle doğru orantılı olmasını sağlarken, birden fazla değişkeni içeren çapraz çarpım terimlerinin dahil edilmesini açıkça engellemez. Bununla birlikte, toplanabilirlik varsayımı, doğrusal programlama modelindeki her bir fonksiyonun (ister amaç fonksiyonu isterse bir kısıtlamanın sol tarafı olsun) her bir faaliyetten gelen bireysel katkıların basit bir toplamı olmasını zorunlu kılarak bunu ele almaktadır (Hillier ve Lieberman, 2010).

Genel olarak, toplanabilirlik varsayımı, i . ürünün a_{ij} birimlerinin j . faaliyetin 1 birimi tarafından ve a_{ik} birimlerinin k . faaliyetin 1 birimi tarafından sağlanması durumunda, i . ürünün $a_{ij} x_j + a_{ik} x_k$ birimlerinin j . faaliyetin x_j birimleri ve k . faaliyetin x_k birimleri tarafından sağlandığı anlamına gelir. Benzer şekilde, j . faaliyetinin 1 biriminin maliyeti c_j ve k . faaliyetinin 1 biriminin maliyeti c_k ise, j . faaliyetinin x_j biriminin ve

k. faaliyetinin x_k biriminin toplam maliyeti $c_j x_j + c_k x_k$ olur. Bu tanımı daha somut ve açık hale getirmek gerekirse, örneğin 2 dilim ekmek 155 kalori ve bir haşlanmış yumurta 80 kalori sağlıyorsa, 2 dilim ekmek ve 1 haşlanmış yumurta tüketilmesi halinde 235 kalori sağlanmış olur (Dantzig ve Thapa, 1997).

Esas itibarıyla, toplanabilirlik varsayımı, birden fazla faaliyetin toplam katkısının basitçe bireysel katkılarının toplamı olmasını zorunlu kılar ve amaç fonksiyonunun $c_{kj} x_k x_j$ gibi karışık terimler olmaksızın değişkenler arasında ayrılabilir olmasını sağlar. Bu kısıtlama, modelin doğrusallığını ve basitliğini koruyarak değişkenler arasındaki doğrusal olmayan etkileşimlerin getirdiği karmaşıklığı önler (Dantzig ve Thapa, 1997).

2.1.4.3 Belirlilik

Belirlilik varsayımı, doğrusal programlama modelinin parametreleri, özellikle de amaç fonksiyonundaki katsayılar (c_j), fonksiyonel kısıtlardaki katsayılar (a_{ij}) ve fonksiyonel kısıtların sağ tarafları (b_i) ile ilgilidir. Bu varsayım, her bir parametre değerinin bilindiği ve sabit olduğu anlamına gelir. Ancak, gerçek dünya uygulamalarında bu varsayım nadiren tam olarak karşılanır. Doğrusal programlama modelleri genellikle gelecekteki eylemler hakkında karar vermeye yardımcı olmak için tasarlanmıştır, yani parametre değerleri çoğunlukla gelecekteki koşulların tahminlerine dayanır. Sonuç olarak, tahminlere olan bu bağlılık, gelecekteki gerçek koşullar planlama aşamasında yapılan varsayımlardan farklı olabileceğinden, modele bir belirsizlik unsuru getirmektedir (Hillier ve Lieberman, 2010).

2.1.4.4 Bölünebilirlik

Doğrusal programlamadaki bölünebilirlik varsayımı, karar değişkenleri için izin verilen değerlerle ilgilidir ve değişkenlerin tam sayılarla sınırlandırılmaları yerine kesirler de dahil olmak üzere herhangi bir gerçek sayı almalarına izin verir. Bu varsayım, genellikle faaliyetlerin miktarlarını veya seviyelerini temsil eden karar değişkenlerinin tam sayılarla sınırlı olmadığı, ancak hem fonksiyonel kısıtlamaları hem de negatif olmama kısıtlamalarını karşılayan herhangi bir değeri alarak sürekli değişebileceği anlamına gelir (Hillier ve Lieberman, 2010).

Pratik uygulama bakımından bu, bu değişkenler tarafından temsil edilen faaliyetlerin kesirli seviyelerde çalışabileceği anlamına gelir ve kaynakların daha esnek ve incelikli

bir şekilde optimize edilmesine olanak tanır. Örneğin, bir değişken üretilecek birim sayısını veya tahsis edilecek kaynak miktarını temsil ediyorsa, süreçleri kısmen çalıştırma veya kaynakları tamsayı olmayan miktarlarda bölme olasılığını yansıtacak şekilde kesirli değerler alabilir. Bu varsayım, çözüm uzayını genişlettiği ve modelin belirlenen kısıtlamalar dahilinde optimum çözümü daha verimli bir şekilde bulmasını sağladığı için doğrusal programlamada kilit öneme sahiptir (Hillier ve Lieberman, 2010).

Örneğin, fasulye konserve üretimi işi ele alınırsa, planlama modelindeki konserve sayısını temsil eden değişkenin tam sayı olması gerekir, çünkü kısmi konserve pratik veya satılabilir değildir. Ancak, bölünebilirlik varsayımından vazgeçmenin sorunu önemli ölçüde karmaşıktır ve iyi bilinmektedir. Özellikle, doğrusal bir program değişkenlerin yalnızca tamsayı değerler almasını gerektiriyorsa, standart bir doğrusal programlama problemine kıyasla çözülmesi genellikle çok daha zor olan bir tamsayı doğrusal programlama problemi haline gelir. Bu nedenle, olağan uygulama mümkün olan her durumda bölünebilirlik varsayımı yapmaktır (Eiselt ve Sandblom, 2007).

Fasulye konserve örneği söz konusu olduğunda, bu yaklaşım her zaman en uygun çözümü vermese de, bölünebilirlik varsayımında bulunarak, her ne kadar bu tür bir prosedürün mutlaka optimal bir çözümle sonuçlanmayabileceği bilinse de elde edilen çözüm basitçe yuvarlanabilir. Bir konserve kutusunun bir kısmının potansiyel kaybı o kadar küçüktür ki, kesin bir tamsayı çözümü elde etmek için gereken ilave zaman ve gayret harcamaya değmez. Buna karşılık, konut inşası ve satışı gibi yüksek değerli ürünlerle uğraşılıyorsa, bir fazla veya bir eksik ev inşa etme kararı önemli bir etkiye sahip olabilir. Bu nedenle, küçük miktarlardaki değerli kalemleri yönetirken, genellikle bölünebilirlik varsayımından vazgeçmek ve daha karmaşık tamsayı problemini ele almak gerekir. Ancak büyük miktarlarda üretilen daha düşük değerli ürünler için bölünebilirlik varsayımını korumak ve bir tamsayı programlama problemini çözmenin karmaşıklığından kaçınmak genellikle yeterlidir (Eiselt ve Sandblom, 2007).

2.2 Çok Amaçlı Doğrusal Programlama

Sistem analizindeki son zamanlarda görülen bir eğilim çoklu amaç fonksiyonlarına sahip problemlerin ele alınmasıdır. Bu durum özellikle, sistem modelleyicisinin

tanımlayabileceği, birbiriyle çelişen ve birbiriyle bağdaşmayan birçok amacın söz konusu olduğu büyük ölçekli sistemlerin incelenmesinde önem taşımaktadır. Örneğin, su kaynakları planlamasında hedefler arasında hem parasal birimlerle ölçülen ekonomik verimliliğin en üst düzeye çıkarılması hem de kirletici konsantrasyonu birimleriyle ölçülen çevresel kalitenin artırılması yer alabilir (Haimes ve diğ., 1975).

Geleneksel olarak, ekonomik verimlilik gibi sadece bir ana hedef göz önünde bulundurulurken, diğer hedefler kısıtlama olarak ele alınmış veya ana hedefle ilişkili parametrelere dönüştürülmüştür. Ancak günümüzde toplumlar, parasal olarak ölçülmesi zor olan maddi olmayan hedeflere giderek daha fazla önem vermektedir. Çoklu amaç analizi, ulaşım, araştırma faaliyetleri için proje seçimi, ekonomik üretim, yaşam kalitesi değerlendirmeleri, akademik bir bölümün yönetimi, oyun teorisi gibi çok çeşitli alanlarda uygulanmıştır. Bu yönelim, karmaşık karar verme senaryolarında birbiriyle yarışan çeşitli hedeflerin dengelenmesinin önemini kabul etmektedir (Haimes ve diğ., 1975).

Geleneksel tek amaçlı doğrusal optimizasyon yaklaşımı, bilimler ve insan faaliyetlerindeki çeşitli gerçek dünya problemlerini ve teorik problemleri incelemek için genel bir çerçeve sunar. Bununla birlikte, birçok pratik senaryoda, problemler genellikle birbiriyle çelişen birden fazla kriter içerir ve bu da onları tek amaçlı bir optimizasyon çerçevesi kullanarak modellemeyi imkansız hale getirir (Luc, 2016).

Örneğin, otomotiv tasarımının amacı, üretim maliyetlerini, yakıt tüketimini ve emisyonları en aza indirirken, performansı ve çarpışma güvenliğini en üst düzeye çıkarmak için bir aracın teknik parametrelerini belirlemektir. Bu kriterler her zaman uyumlu değildir; örneğin yüksek performanslı bir motor genellikle çok yüksek üretim maliyetleri içerir, bu da tek bir tasarımın tüm kriterleri aynı anda en iyi şekilde karşılamasını imkansız hale getirir (Luc, 2016).

Bir başka örnek de, bir insanın hayatındaki en zorlu kararlarından biri olan ve genellikle emlak acentelerinin yardımını gerektiren mülk satın alma konusudur. Acenteler, potansiyel alıcının bütçesini ve gereksinimlerini kabaca karşılayan bir dizi ev veya daire önerir. Alıcı daha sonra bu seçenekleri, maliyet ve bakım masraflarını en aza indirirken kaliteyi, konforu ve çevre olanaklarını en üst düzeye çıkarmak gibi çeşitli kriterlere göre değerlendirir. Doğal olarak, daha yüksek kaliteli mülkler daha pahalı olma eğilimindedir ve karar verme sürecinde bu rekabet eden faktörleri

dengelemek için ödünleşimler yapılmasını gerektirir. Bu örnekler, çok kriterli karar verme sürecinde en iyi çözümü bulmanın genellikle ödün vermeyi gerektirdiğini göstermektedir, çünkü birbiriyle çelişen tüm hedefleri aynı anda optimize etmek mümkün değildir (Luc, 2016).

Bir başka açıklayıcı örnek olarak, iki sanayi bölgesi ve çevresindeki yerleşim alanları arasında her gün çok sayıda insanın taşınması verilebilir. Çeşitli bütçe kısıtları ve teknolojik kısıtlamalar altında, en uygun taşıma türlerinin seçilmesi ve her hizmet için gerekli birim sayısının belirlenmesi gerekir. Optimum çözüm, maliyetleri en aza indirmek, hızı en üst düzeye çıkarmak, güvenliği artırmak, çevresel etkiyi azaltmak, karlılığı artırmak veya sürdürülebilirliği sağlamak gibi taşımacılıkla ilgili birden fazla hedefi içerebilir. Ayrıca, seyahat süreleri, tüketici maliyetleri, yapım masrafları, işletme maliyetleri, potansiyel ölüm ve yaralanma riskleri ve gecikme olasılığı da dahil olmak üzere dikkate alınması gereken çok sayıda kriter vardır. Tüm bu farklı kriterleri matematiksel bir programlama problemi için tanımlanacak tek bir amaç fonksiyonuna entegre etmek imkansız olabilir. Bunun yerine, her biri verilen kısıtlamalar dahilinde mümkün olan “en iyi” değeri elde etmeyi amaçlayan birden fazla amaca sahip bir problem olarak yaklaşmak daha etkili olabilir. Bu çok amaçlı bakış açısı, karmaşık karar verme senaryolarının doğasında bulunan ödünleşimleri tanıyan daha dengeli ve ayrıntılı bir optimizasyona olanak tanır (Zeleny, 1974).

2.2.1 Çok amaçlı optimizasyonun ortaya çıkışı ve tarihsel gelişimi

Çok amaçlı matematiksel programlamanın kökenleri ekonomi teorisine kadar uzanmaktadır. İtalyan ekonomist Vilfredo Pareto, kendi adını taşıyan ve ekonomi teorisinde bir dönüm noktası olarak kabul edilebilecek optimallik kavramını ortaya atmıştır. İlk formülasyonunda Pareto, bir topluluğun, o topluluktaki hiçbir kişi, yine o topluluktaki başka herhangi bir kişinin durumunu kötüleştirmeden kendi durumunu iyileştiremiyorsa optimum durumda olduğunu düşünmektedir (Ballestro ve Romero, 1998). Pareto, 1906 yılında bu alan için çok önemli bir kavram ortaya atmıştır; bu kavram Pareto optimal çözümü olarak bilinir ve aynı zamanda baskın olmayan veya daha düşük olmayan çözüm olarak da adlandırılır. Bir çözüm, tüm amaç fonksiyonu değerlerini aynı anda iyileştirebilecek başka bir olurlu çözüm mevcut değilse baskın olmayan çözüm olarak kabul edilir. Diğer bir deyişle, bir amaçtaki herhangi bir iyileştirme, en azından diğer amaç fonksiyonlarından birinde taviz verilmesine neden

olacaktır (Zeleny, 1974). Bu kavram, bir kriterin iyileştirilmesinin genellikle diğerinin zarar görmesine yol açtığı çok amaçlı optimizasyonun doğasında var olan ödünleşmeleri yansıtmaktadır.

Pareto optimallik kavramı doğal olarak çok kriterli karar vermede (MCDM) bir başka kritik kavrama yol açmaktadır: kriterler arasındaki ödünleşimlerin değeri. İki kriter arasındaki ödünleşme, bir kriterdeki başarının diğerinde bir birimlik artış elde etmek için ne kadar feda edilmesi gerektiğini ölçer. Bu ödünleşme değerleri MCDM uygulamalarında birkaç nedenden dolayı önemlidir. İlk olarak, bir kriterin diğerine göre fırsat maliyetini ölçmek için faydalı bir endeks sağlarlar ve kaynakların veya çabaların nasıl yeniden tahsis edilebileceğine dair öngörü sunarlar. Ayrıca, ödünleşme değerleri, kriterler arasındaki ikame veya dönüşüm oranları gibi ekonomik kavramların anlaşılmasında değerlidir ve bir kriterin diğeriyle nasıl değiştirilebileceğini gösterir. Son olarak, ödünleşim kavramı, karar vericilerin hedefler arasındaki değişen ödünleşme oranlarını dikkate alarak farklı alternatifleri keşfettiği, daha bilinçli ve dengeli karar vermeyi kolaylaştıran etkileşimli MCDM yaklaşımlarının geliştirilmesinde temel teşkil etmektedir (Ballestro ve Romero, 1998).

Pareto'nun bu çalışmalarına paralel olarak, İrlandalı ekonomist Francis Ysidro Edgeworth (1845-1926), P ve Q olmak üzere iki tüketiciyi içeren bir çoklu fayda problemi için bir optimum nokta tanımlamıştır. Edgeworth bu optimum noktayı, herhangi bir yönde atılacak sonsuz küçük bir adımın bir tüketicinin faydası artarken diğerinin azalmasına neden olacağı, ancak her ikisinin de aynı anda artmayacağı bir (x,y) noktası olarak tanımlamıştır. Bu tanıma göre, tüm kriterlerde aynı anda iyileştirilebilen olurlu alternatifler optimal olarak kabul edilemez. Bir kriterdeki herhangi bir iyileşme diğerinde kötüleşmeye yol açıyorsa, dolayısıyla bir taviz vermeyi gerektiriyorsa, bir alternatif optimal olarak kabul edilir (Luc, 2016).

Matematiksel bir bakış açısıyla bu kavram, birden fazla kritere dayalı uygulanabilir alternatifler kümesi içinde bir baskınlık sırası tanımlanarak formüle edilebilir. Spesifik olarak, bir a alternatifi, a'daki her kriter fonksiyonunun değeri b'dekinden büyük veya eşitse ve en az bir kriter kesinlikle daha iyiye, başka bir b alternatifini domine eder. Bir alternatif, başka hiçbir alternatif tarafından domine edilmiyorsa Pareto optimal olarak kabul edilir, yani en az birini feda etmeden tüm kriterleri iyileştirebilecek olurlu bir çözüm yoktur. Bu baskın olmama kavramı, çatışan hedefler arasında mümkün olan

en iyi ödünleşimi temsil eden çözümleri tanımladığı için çok kriterli karar verme sürecinde büyük öneme sahiptir (Luc, 2016).

Karar vermede çoklu amaç fonksiyonlarına duyulan gereksinimin farkına varılması, von Neumann ve Morgenstern'in (1947) oyun teorisi ve ekonomik davranış üzerine yaptıkları ufuk açıcı çalışmalarında vurgulanmıştır. Bu tespit, MCDM alanında önemli gelişmelere zemin hazırlamıştır. Koopmans (1951), doğrusal üretim modelleri bağlamında etkin çözümler ve baskın olmayan vektörler kavramlarını ortaya atarak vektör optimizasyonu için temel bir çerçeve oluşturmuştur. Kuhn ve Tucker (1951), matematiksel programlamada çoklu amaç fonksiyonlarını ele alarak bu fikirleri genişletmiş ve vektör optimizasyon problemlerinde üstün olmama koşullarını oluşturmuştur (Antunes ve diğ., 2016).

Charnes, Cooper ve Ferguson (1955), MCDM alanında bir başka ufuk açıcı gelişme olarak kabul edilen hedef programlamayı tanıtarak çok önemli bir katkıda bulunmuştur. Bu yöntem, karar vericilerin birden fazla, potansiyel olarak birbiriyle çelişen hedefleri yapılandırılmış bir şekilde takip etmesine olanak tanıyarak hedefler arasındaki ödünleşmeleri ele almak için esnek bir araç sağlamıştır. 1960'lar boyunca çok amaçlı yaklaşımlar gelişmeye devam etmiştir. Zadeh (1963) ve Marglin (1967) yeni metodolojiler geliştirirken, Charnes ve Cooper (1961) ve Ijiri (1965) hedef programlama kavramını, hedeflerin sıralı bir düzende önceliklendirildiği leksikografik optimizasyona doğru genişletmiştir (Ballestro ve Romero, 1998).

Geoffrion (1967), parametrik doğrusal programlama kullanarak iki amaç fonksiyonunu maksimize etmek için bir algoritma sunmuş ve çok amaçlı optimizasyon için mevcut hesaplama yöntemlerini daha da geliştirmiştir. Bu alanda önemli bir dönüm noktası da, 1972 yılında Güney Carolina Üniversitesi'nde düzenlenen çok kriterli karar verme üzerine ilk konferanstır. Cochrane ve Zeleny (1973) tarafından yayınlanan bu konferansın bildiri kitabı, MCDM alanında gelişen ilgi ve araştırmaları bir araya getirmiştir (Eiselt ve Sandblom, 2007).

1970'lerin başında, Evans ve Steuer (1973) ve Yu ve Zeleny (1975) gibi araştırmacılar tarafından çok amaçlı doğrusal programlama (MOLP) için ilk özel algoritmalar geliştirilmiş ve bu da MOLP problemlerinin çözümüne yönelik sistematik algoritmik yaklaşımların başlangıcı olmuştur. Bu gelişmeler toplu olarak MCDM'nin evriminde

önemli dönüm noktalarını temsil etmekte ve bugün alanı şekillendirmeye devam eden temel araçları ve kavramları sağlamaktadır (Antunes ve diğ., 2016).

2.2.2 Çok amaçlı optimizasyonun temel kavramları ve tanımları

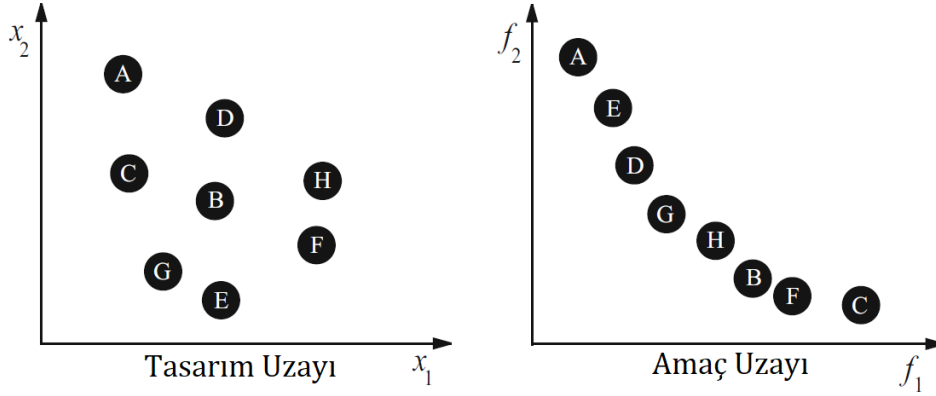
Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin amacı, belirlenen tüm amaç fonksiyonları için en iyi uzlaşık çözümleri veren tasarım değişkenleri vektörünün belirlenmesidir. Bir çözüm vektörü, en az bir başka amaçta kötüleşmeye neden olmadan bir amacı iyileştirebilecek başka bir olurlu çözüm yoksa o çözümün Pareto optimal olması şeklinde ifade edilebilir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde optimallik tanımı tek amaçlı problemlerdekinden farklıdır. Dolayısıyla, bu durum optimizasyon problemini ve Pareto optimalitesini karakterize eden birtakım terimlerin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Lobato ve Steffen Jr., 2017).

Optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonu; bir sistemin, maliyetlerin en aza indirilmesi, verimliliğin en üst düzeye çıkarılması veya birden fazla hedefin dengelenmesi gibi iyileştirilmesi gereken temel özelliğini tanımlar. Bu fonksiyon matematiksel olarak, genellikle tasarım değişkenleri vektörü olarak adlandırılan çeşitli değişkenlere bağlı bir denklemle temsil edilir. Bu değişkenler, amaç fonksiyonunu optimize etmek için tanımlanmış bir aralıkta ayarlanmaktadır. Genellikle birbiriyle çatışan birden fazla amaç fonksiyonu, en iyi genel sonuca ulaşmak için bir denge veya uzlaşma gerektirir (Lobato ve Steffen Jr., 2017).

Kısıtlamalar, optimizasyon probleminde karşılanması gereken sınırlamaları ve gereksinimleri tanımlar. Bu kısıtlamalar problemin türüne bağlı olarak; tasarım değişkenleri üzerindeki izin verilen aralıklar veya belirli değerler gibi sınırları belirten tasarım kısıtlamaları, malzeme dayanımı, ağırlık veya boyut sınırlamaları gibi fiziksel sınırlamalar, tasarımın güvenli ve güvenilir olmasını sağlayan standartları içeren güvenlik kısıtlamaları, emisyon sınırları gibi çevresel etkilerle ilgili yönetmelikler veya hedefleri kapsayan çevresel kısıtlamalar, maliyetle ilgili kısıtlamalar veya bütçe sınırlamalarına dair ekonomik kısıtlamalar gibi çeşitli sınırlamaları içerebilir. Bu kısıtlamalar, çözümün içinde yer alması gereken olurlu bir bölge oluşturur.

Tasarım uzayı, alt ve üst sınırlar ve uygulanan kısıtlamalar dikkate alınarak tasarım değişkenleri için olası tüm değerlerin aralığı ile tanımlanır. Bu uzay, problemin temel gereksinimlerini karşılayan tüm potansiyel çözümleri temsil eder. Çok amaçlı problem bağlamında, amaç uzayı, amaç fonksiyonlarının değerleri tarafından tanımlanan uzayı

karakterize eder. Tasarım uzayındaki her nokta (tasarım değişkenlerinin belirli bir kombinasyonu), amaç uzayındaki karşılık gelen bir nokta ile eşleşir ve amaç fonksiyonları açısından sonucu temsil eder. İki amaçlı bir optimizasyon problemi için hem tasarım uzayının hem de amaç uzayının gösterimi Şekil 2.1’de sunulmuştur (Lobato ve Steffen Jr., 2017).



Şekil 2.1: İki amaçlı bir problem için tasarım uzayı ve amaç uzayının gösterimi.

Çok amaçlı optimizasyonda, tasarım değişkenlerindeki değişikliklerin hedefleri nasıl etkilediğini gösterdiği için tasarım uzayı ile hedef uzayı arasındaki ilişki çok önemlidir. Temel hedef, tipik olarak Pareto cephesi ile temsil edilen hedef uzayında optimum veya optimuma yakın konumlar sağlayan noktaları bulmak için tasarım uzayında hareket etmektir. Bu süreç, verilen kısıtlamalar altında mümkün olan en iyi çözüm kümesine ulaşmak için çatışan hedefler arasındaki ödünleşimlerin dengelenmesini içerir.

Optimizasyon problemlerinde çözümler, problemin kısıtlamalarını ne kadar iyi karşıladıklarına göre olurlu ve olurlu (uygun) olmayan çözüm şeklinde ayrılabilir. Olurlu bir çözüm, değişken sınırları, eşitsizlik kısıtlamaları ve eşitlik kısıtlamaları dahil olmak üzere optimizasyon probleminin tüm kısıtlamalarını karşılar. Bu, çözümün, problem tarafından dayatılan tüm koşulların karşılandığı tanımlanmış olurlu bölge içinde yer aldığı anlamına gelir. Olurlu olmayan bir çözüm bir veya daha fazla kısıtlamayı karşılayamaz, dolayısıyla olurlu bölgenin dışında kalır. Olurlu olmama durumu, çözümün optimizasyon probleminin gerekli koşullarına uymadığını gösterir (Lobato ve Steffen Jr., 2017).

İdeal amaç vektörü, tüm kısıtlamalara tabi olarak çok amaçlı bir optimizasyon problemindeki her bir amaç fonksiyonunu ayrı ayrı optimize eden (minimize veya

maksimize eden) varsayımsal bir çözümü ifade etmektedir. Başka bir deyişle, diğer amaçlar üzerindeki etkisine bakılmaksızın tek başına optimize edilmesi halinde her bir amaç için mümkün olan en iyi sonuçtur. Bu kavram, çeşitli nedenlerden dolayı çok amaçlı optimizasyonda çok önemlidir. İdeal amaç vektörü genellikle orijinal optimizasyon problemini normalleştirmek için kullanılır. Böylelikle, amaç fonksiyonlarının farklı ölçekleri ve boyutları ile ilgili sorunları azaltılarak ödünleşimlerin daha dengeli bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanınmış olur. Ayrıca, ideal amaç vektörü, her bir hedef için ulaşılabilecek maksimum performansın bir ölçüsünü sağlayan bir kıyaslama veya referans noktası olarak hizmet eder. Her bir kriter için performans iyileştirmesinin potansiyel sınırlarını göstermektedir (Lobato ve Steffen Jr., 2017).

İdeal çözüm, her bir amaç için bağımsız olarak en iyi sonucu öngörmektedir ki birden fazla amaç çeliştiğinde bu genellikle gerçekçi değildir. Çok amaçlı bir problem bağlamında, amaçlar genellikle birbirleriyle çatışır ve bu da tüm amaçlar için aynı anda ideal sonuca ulaşmayı imkansız hale getirir. Dolayısıyla, çok amaçlı optimizasyon, hedefleri dengeleyen uzlaşık çözümler aramaktadır ve bu çözümler en iyi ödünleşimleri sunmaktadır. Sonuç olarak, ideal amaç vektörü bir hedef düzeyi sağlar, ancak pratik uygulamadaki çözümlerin birden fazla birbiriyle rekabet eden amacın karmaşıklığına uyum sağlaması gerekir.

2.2.3 Problem formülasyonu ve başlıca çözüm kavramları

Birbiri ile çatışan birden fazla doğrusal amaç fonksiyonunu verilen doğrusal kısıtlar altında aynı anda optimize etme problemine çok amaçlı doğrusal programlama (MOLP) problemi ismi verilmektedir. Bu problem genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\left. \begin{array}{l} \min z_1(x) = c_1x \\ \min z_2(x) = c_2x \\ \vdots \\ \min z_k(x) = c_kx \\ \text{öyle ki } Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

Burada tüm amaç fonksiyonları ve kısıtlar doğrusaldır. $z_i(x)=c_i x$ minimize edilecek doğrusal amaç fonksiyonlarını, x ise problemde değerleri belirlenecek tasarım (karar) değişkenlerini ifade etmektedir. c_i vektörü amaç fonksiyonunun katsayılarına karşılık

gelir, A problemin kısıtlarını temsil eden teknolojik katsayılarından oluşan bir matristir, b ise genellikle mevcut kaynakları ve gereksinimleri temsil eden sağ taraf sabitleri vektörüdür. $x \geq 0$ koşulu da karar değişkenlerinin negatif olmamasını sağlar. A matrisi ile c_i , x ve b vektörleri denklem (2.7) ve (2.8)'de gösterilmiştir (Sakawa ve diğ., 2013).

$$c_i = (c_{i1}, \dots, c_{in}), i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (2.7)$$

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Böyle bir çok amaçlı doğrusal programlama problemi bazen aşağıdaki gibi bir vektör minimizasyon problemi olarak da ifade edilir (Sakawa ve diğ., 2013).

$$\left. \begin{aligned} \min z(x) &= (z_1(x), z_2(x), \dots, z_k(x))^T \\ &\text{öyle ki } Ax \leq b \\ &x \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Burada $z(x) = (z_1(x), z_2(x), \dots, z_k(x))^T = (c_1x, c_2x, \dots, c_kx)^T$ k boyutlu bir vektördür. Problemin olurlu bölgesi ise matematiksel açıdan denklem (2.10)'da gösterildiği gibi ifade edilir (Sakawa ve diğ., 2013).

$$X = \{ x \in R^n \mid Ax \leq b, x \geq 0 \} \quad (2.10)$$

Tek amaçlı optimizasyonda optimal çözüm, amaç fonksiyonunun tüm kısıtlamaları yerine getirirken mümkün olan en iyi değere ulaştığı çözümdür. Tek amaçlı doğrusal programlama için kullanılan optimallik kavramı bu çok amaçlı doğrusal programlama problemine doğruca uygulanırsa, ideal çözüm kavramına ulaşılmaktadır.

Matematiksel olarak ifade etmek gerekirse, bir x^* noktasının ideal çözüm olduğu ancak ve ancak her $x \in X$ için $z_i(x^*) \leq z_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, k$ olacak şekilde $x^* \in X$ varsa söylenebilir. Ancak, MOLP'de hedefler genellikle birbiriyle çatıştığı için, hedefler mükemmel bir şekilde birbiriyle uyumlu olmadığı sürece birden fazla amaç fonksiyonunun tümünü aynı anda minimize eden bir ideal çözüm her zaman mevcut değildir. Bu nedenle, çok amaçlı doğrusal programlamada ideal çözüm yerine Pareto optimallik adı verilen yeni bir çözüm kavramı ortaya atılmıştır (Sakawa ve diğ., 2013).

Pareto optimal çözüm, bir amaçtaki herhangi bir iyileşmenin başka bir amacı kötüleştireceği bir ödünleşmeyi beraberinde getireceği bir çözümdür. Bu nedenle

çözüm, belirlenmiş kısıtlar altında çatışan hedefler arasında en iyi dengeyi yansıtan bir uzlaşık çözümdür.

Matematiksel olarak, bir x^* noktası, ancak ve ancak tüm i 'ler için $z_i(x) \leq z_i(x^*)$ ve en az bir j için $z_j(x) \neq z_j(x^*)$ olacak şekilde başka bir $x \in X$ yoksa Pareto optimal çözüm olarak adlandırılır. Tanımdan da görülebileceği üzere, Pareto optimal çözüm kümesi karakteristik olarak Pareto sınırını oluşturan sonsuz sayıda noktadan oluşur. Pareto optimal çözüm baskın değildir, yani tüm hedeflerde belirgin şekilde daha iyi olan başka bir olurlu çözüm bulmak mümkün değildir (Sakawa ve diğ., 2013).

Pareto optimal çözümün yanı sıra, Pareto optimalliğinden biraz daha az katı bir çözüm kavramı olarak zayıf Pareto optimalliği tanımlanmaktadır. Matematiksel olarak, bir x^* noktası, ancak ve ancak $z_i(x) < z_i(x^*)$, $i = 1, 2, \dots, k$ olacak şekilde başka bir $x \in X$ yoksa zayıf Pareto optimal çözüm olarak adlandırılır (Sakawa ve diğ., 2013). Bu durumda da, tüm amaçlarda kati surette daha iyi olan başka hiçbir olurlu çözüm mevcut değildir. Ancak Pareto optimallikten farklı olarak zayıf Pareto optimallik, tüm amaçlarda kesin olarak daha iyi olmadıkları sürece bazı amaçlarda eşit olabilecek çözümlere müsaade eder. Bu da zayıf Pareto optimalitesini Pareto optimalitesine kıyasla daha az katı bir durum haline getirmektedir.

Notasyonel olarak daha rahat ifade edilebilmesi için X_{co} , X_p ve X_{wp} sırasıyla ideal, Pareto optimal ve zayıf Pareto optimal çözüm kümelerini göstermek üzere, tanımlarından yola çıkarak, aşağıdaki ilişki geçerlidir (Sakawa ve diğ., 2013).

$$X_{co} \subseteq X_p \subseteq X_{wp} \quad (2.11)$$

Tüm hedeflerin aynı anda optimize edilmesi daha iyi bir çözümün bulunmadığı anlamına geldiğinden, herhangi bir tam optimal çözüm aynı zamanda Pareto optimaldir. Herhangi bir Pareto optimal çözüm aynı zamanda zayıf Pareto optimaldir çünkü hiçbir olurlu çözüm Pareto optimal çözümler için tüm hedeflerde kesinlikle daha iyi değildir. Bu hiyerarşi, ideal çözüm kümesinin en kısıtlayıcı, zayıf Pareto optimal çözümler kümesinin ise en kapsayıcı olduğunu göstermektedir.

2.2.4 Skalerizasyon yöntemleri

Çok amaçlı doğrusal programlama (MOLP) problemlerinde Pareto optimal çözümlerin karakterize edilmesi çeşitli skalerleştirme teknikleri ile gerçekleştirilmektedir. Skalerleştirme, çok amaçlı bir optimizasyon probleminin daha

sonra standart optimizasyon yöntemleri kullanılarak çözülebilecek tek amaçlı bir probleme dönüştürülmesini içermektedir. Pareto optimal çözümleri belirlemek için kullanılan üç yaygın skalerleştirme yöntemi ağırlıklandırma yöntemi, kısıt yöntemi ve ağırlıklı minimaks yöntemidir (Sakawa ve diğ., 2013).

2.2.4.1 Ağırlıklandırma yöntemi

Ağırlıklandırma yöntemi, tek bir birleştirilmiş amaç fonksiyonu oluşturmak için orijinal çok amaçlı doğrusal programlama problemindeki tüm amaç fonksiyonlarına negatif olmayan bir ağırlık atanmasını ve amaç fonksiyonlarının ağırlıklı toplamını optimize etmeyi içermektedir (Sakawa ve diğ., 2013).

Amaç fonksiyonları $z_i(x)=c_i x$ şeklinde ifade edilen çok amaçlı bir problem için ağırlıklandırma yöntemine göre elde edilen amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir:

$$\min w z(x) = \sum_{i=1}^k w_i z_i(x) = \sum_{i=1}^k w_i (c_i x) \quad (2.12)$$

Burada $w_i \geq 0$ her bir amaca atanan ağırlık katsayılarıdır ve en az bir $w_i > 0$ 'dır. Ağırlık katsayıları her bir amacın göreceli önemini temsil etmektedir.

Ağırlıklandırma probleminin ağırlıklandırma katsayıları, amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşme bilgisini vermektedir. Diğer amaç fonksiyonundan bir birim daha fazla değer elde etmek için bir amaç fonksiyonundan kaç birim değerden vazgeçilmesi gerektiğini gösterirler. Geometrik olarak, k-boyutlu $z=(z_1,...,z_k)$ uzayında;

$$W = w_1 z_1(x) + w_2 z_2(x) + \dots + w_k z_k(x) = C \text{ (sabit)} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13), $w=(w_1,...,w_k)$ normal vektörüne sahip hiper düzlemi temsil eder. Verilen ağırlık katsayıları için ağırlıklandırma problemi çözüldüğünde, bu hiper düzlemin $z=(z_1,...,z_k)$ uzayında Z olurlu bölgesi ile en az bir ortak noktası olacak şekilde minimum C elde edilir ve buna karşılık gelen Pareto optimal çözümü x^* elde edilir. Ağırlık katsayıları değiştirilerek farklı Pareto optimal çözümler bulunabilir.

2.2.4.2 Kısıt yöntemi

Kısıt yöntemi, çok amaçlı doğrusal programlama problemlerinde Pareto optimal çözümleri karakterize etmek için yaygın olarak kullanılan bir diğer yaklaşımdır. Bu yöntem, çok amaçlı bir doğrusal programlama probleminin amaç fonksiyonlarından birini optimize ederken diğerlerini problem için kısıtlamalar olarak ele almayı içermektedir (Sakawa ve diğ., 2013). Böylece, çok amaçlı problemi doğrudan kısıtlı tek amaçlı bir probleme dönüştürür.

Seçilen bir amaç fonksiyonu $z_1(x)$ için optimizasyon problemi matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned} \text{Min } z_1(x) &= c_1x \\ z_1(x) &= c_1x \leq \alpha_i \quad i = 2, 3, \dots, k \end{aligned} \quad (2.14)$$

Burada α_i , kısıtlamaya dönüştürülen diğer amaçlar için belirlenmiş sınırlardır.

Kısıt yöntemindeki önemli bir husus, çözümün tekliğinin her zaman garanti edilememesidir. Bunun nedeni, birden fazla çözümün eşitsizlik kısıtlamalarını karşılayabilmesi ve çözücünün kullanılan formülasyon ve algoritmalara bağlı olarak bunlardan herhangi birini döndürebilmesidir. Teklik olmadan, yalnızca zayıf Pareto optimalliği garanti edilebilmektedir. Kesin Pareto optimalliğinin sağlanması için sınırların baskın çözümlerden kaçınmak için dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, Pareto cephesini keşfetmek ve baskın olmayan çözümleri belirlemek için optimizasyon sürecinin bu sınırları değiştirerek birden çok kez tekrarlanması gerekebilir (Sakawa ve diğ., 2013).

Özetle, bu yöntem, bir amacı optimize ederek ve diğerlerini eşitsizlik kısıtlamaları olarak düzenleyerek çok amaçlı bir problemi tek amaçlı bir probleme dönüştürmektedir. Özellikle bazı hedeflerin diğerlerine göre öncelikli olduğu durumlarda, Pareto cephesini daha sistematik bir şekilde araştırmak için uygundur. Pareto cephesinin tamamını inceleyebilmek için yöntem, kalan amaç fonksiyonları üzerindeki sınırlar değiştirilerek iteratif olarak uygulanmalıdır.

2.2.4.3 Ağırlıklı minimaks yöntemi

Ağırlıklı minimaks yöntemi, amaçlar arasındaki maksimum ağırlıklı sapmayı bir referans noktasından, genellikle ideal bir noktadan veya bir hedef değerden en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntem en fazla sapmayı ele alır ve böylece amaçlar

arasındaki dengeye odaklanır. Ağırlık katsayıları w_i ile gösterilmek üzere, problem şu şekilde formüle edilebilir (Bowman, 1976):

$$\text{Min} \max_{i=1,\dots,k} \{w_i(z_i(x) - z_i^*)\} \quad (2.15)$$

Burada z_i^* i'inci amaç için bir referans değer veya hedef değeri ifade etmektedir.

Yöntemin özellikleri şu şekilde sıralanabilir. Yöntem, bir referans noktasından en büyük ağırlıklı sapmayı minimize ederek amaçların süreç içinde dengelenmesini sağlamaktadır. Karar vericinin hedefler arasındaki en olumsuz durum performansını en aza indirmekle ilgilendiği senaryolar için etkilidir. Özellikle amaçların çelişkili olduğu ve dengeli bir ödünleşmenin istendiği durumlarda oldukça kullanışlıdır (Sakawa ve diğ., 2013).

Özet olarak, her bir skalerizasyon yöntemi, çok amaçlı optimizasyonda Pareto optimal çözümleri keşfetmek için farklı bir yaklaşım sağlar. Ağırlıklandırma yöntemi esnek ve kullanımı basit olmakla birlikte konveks olmayan bölgeleri gözden kaçırabilir. Kısıt yöntemi, amaçları kısıtlara dönüştürerek Pareto optimal çözümleri sistematik olarak araştırır. Ağırlıklı minimaks yöntemi, amaçlar arasında adil bir uzlaşma sağlayarak en büyük sapmaların dengelenmesine odaklanır. Bu yöntemler, problem yapısına ve karar vericinin tercihlerine bağlı olarak Pareto optimal çözümleri karakterize etmek ve tanımlamak için çeşitli yollar sağlayan çok amaçlı optimizasyonda güçlü araçlardır.

2.3 Gıda-Enerji-Su Bağlantısı

“Bağlantı noktası” veya “nexus” terimi genel olarak, birbirine bağlı unsurların geri bildirim döngüleri yoluyla etkileşime girdiği ve karşılıklı bağımlılıklarını anlamak için bu unsurların birlikte analiz edilmesini gerektiren bir sistemi tanımlamaktadır (Caputo ve diğ., 2021). Bu tanım, FEW nexus kavramı ile birlikte ilk olarak 2010'ların başında geliştirilmiştir (Hoff, 2011). Kelime anlamı olarak da nexus, “iki veya daha fazla şeyi birbirine bağlayan bir veya daha fazla bağlantı” anlamına gelmektedir (Leck ve diğ., 2015). Bu kavram aynı zamanda bu unsurların birbirinden ayrı öğeler olmadığını, birbirleriyle son derece bağlantılı olduğunu ve bir unsurda meydana gelen değişikliklerin diğerlerini de önemli ölçüde etkileyebileceğini kabul etmektedir (Ansari ve diğ., 2023). Gıda-enerji-su (FEW) bağlantısı yaklaşımı da bu kavrama dair somut bir örnek teşkil etmektedir. FEW nexus, karmaşık ve birbirine bağlı doğal

kaynak sistemlerini, kullanıcı hedefleri ve çıkarlarıyla birlikte tanımlamak, ele almak ve analiz etmek için değerli bir kavram olarak ortaya çıkmıştır (Yuan ve Lo, 2022).

Bağlantılı yaklaşım, artan gıda, enerji ve su talepleri gibi kalkınma ihtiyaçlarını ele alırken, ekosistem ve doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimini sağlamak için umut verici bir strateji olarak kabul edilmektedir. Bağlantının farklı yönleri arasında politika geliştirme, planlama ve değerlendirme için daha entegre ve verimli bir süreci teşvik etmektedir (El-Gafy, 2017). Su kullanımının yanı sıra su yoğun ürünlere olan talebi ve bu ürünlerin yetiştirilmesini etkileyerek gıda üretimini ve tüketimini de etkileyebilmektedir (Caputo ve diğ., 2021). Gıda üretimi, su ve toprak kaynaklarının, elektrik, gübre, böcek ilacı ve tarım makinelerinin yeterli kullanımını gerektirmektedir. Bu tarım faaliyetleri, küresel ısınma eğilimine katkıda bulunan önemli miktarda sera gazı açığa çıkarmaktadır (Yue ve diğ., 2021).

FEW nexus yaklaşımının temel avantajlarından biri, tek disiplinli bir bakış açısıyla gözden kaçabilecek potansiyel etkileşim ve ödünleşimleri vurgulama kapasitesidir. Bu karşılıklı etkileşimler tipik olarak kaynak sistemlerinin kendi aralarındaki ilişkiler incelenerek tespit edilir. Kurian (2017) tarafından su-gıda-enerji bağlantısının sağlam bilimsel temellere dayandığı savunulmuş ve sinerji, ödünleşme ve kaynak kullanımının optimize edilmesi gibi kavramlar da dahil olmak üzere bu yaklaşımla ilgili karşılaşılabilecek çeşitli güçlükler dikkat çekilmiştir. Son on yılda, nexus yaklaşımı, toplumların daha yeşil ekonomilere geçişine yardımcı olmak ve kaynak güvenliğini artırmak için bir araç olarak araştırmalarda kayda değer bir ilgi görmüştür (Proctor ve diğ., 2021).

Bu bağlamda su, enerji ve gıda birbiriyle ilişkili üç kritik kaynaktır ve bu kaynaklarla ilgili kararlar, aralarındaki karşılıklı ödünleşimlerin incelenmesini gerektirir. Su, tarımsal üretimde önemli bir rol oynar; traktör ve tarım aletlerinin kullanımı, tarım ürünlerinin taşınması, yeraltı suyunun pompalanması ve yüzey suyunun taşınması gibi çeşitli tarımsal faaliyetler için enerji gereklidir ve gıda üretimi de her iki kaynakla da bağlantılıdır.

Herhangi bir kaynağın yetersizliği ya da bu bağ içindeki bileşenlerden birinin aşırı kullanımı diğerlerini de sekteye uğratarak istikrarları açısından risk oluşturabilir ve bu durum da genel güvenliklerinin sağlanması için gereken hassas dengenin altını çizer (Mohtar ve Daher, 2012). Dolayısıyla, su, enerji ve gıda yönetimine yönelik bir sistem

yaklaşımı, özellikle artan küresel talepler ve çevresel baskılar karşısında uzun vadeli kaynak güvenliğinin sürdürülmesi için büyük bir önem taşımaktadır.

Bu kaynaklar arasındaki karşılıklı bağımlılığı anlamak, veri merkezli ve nicel modelleme yaklaşımlarıyla bağlantılarının düzeyinin incelenmesini gerektirir (Degirmencioglu ve diğ., 2019). Su-enerji-gıda (WEF) bağlantısına dayalı modelleme, sürdürülebilir kaynak tahsisi politikalarına yönelik karar alma süreçlerinin tutarlılığını artırma potansiyeline sahiptir. Daher ve Mohtar (2015), sürdürülebilir kaynak tahsisi stratejilerinin belirlenmesine yönelik farklı senaryoların değerlendirilmesi için ortak bir platform olarak WEF Nexus Tool 2.0'ı geliştirmiştir. Bu araç su, enerji ve gıda kaynaklarının farklı durumlarına bağlı olarak çeşitli senaryoların oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Kaynak analizleri temel olarak ulusal düzeyde kaynak gereksinimleri, tüketim kalıpları ve karbon emisyonları gibi çıktılar vermektedir. Bununla birlikte, belirli bir bölgedeki kaynaklar arasındaki ayrıntılı etkileşimleri yakalamak için, bölgesel veya havza düzeyinde senaryolar geliştirmek gerekmektedir (Mohtar ve Daher, 2014).

Havzaya özgü çalışmalar, havzada yetiştirilen ürünler için su güvenliğine öncelik veren optimum ürün deseni senaryolarının oluşturulmasını sağlar. Her bir senaryonun çıktıları su kullanımı, enerji tüketimi, karbondioksit emisyonları ve tarımsal gelir gibi parametreler de dahil olmak üzere niceliksel olarak belirlenebilir. Net göstergeler, önerilen çözümlerin etkilerinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bağlantı yaklaşımında, spesifik göstergelerin oluşturulması değerlendirme sürecini önemli ölçüde geliştirebilmektedir. Bununla birlikte, her değerlendirme, kapsamlı bir analiz sağlamak için genellikle belirli bir düzeyde uyarlama gerektirmektedir (UNECE, 2018). Bu amaçla, her bir senaryo, su gereksinimlerine dayalı olarak tarımsal ürün desenindeki potansiyel değişiklikler dikkate alınarak tanımlanır ve bu senaryoları özetlemek için elektronik hesap tabloları oluşturulur.

Su ihtiyacı, tarımsal ürün üretiminin bir sonucudur ve her tarımsal ürün türü belirli miktarda sulama suyuna gereksinim duyar. Havzadaki tarımsal ürünlerin yetiştirilmesi için toplam su talebini karşılamak üzere yüzey suyu ve yeraltı suyu gibi çeşitli kaynaklardan yararlanılabilir. Tarım sektörüne yönelik toplam su ihtiyacının daha kapsamlı bir şekilde hesaplanması için, çiftlik hayvanları tarafından tüketilen su miktarı mahsul su ihtiyacına eklenir (Kulat ve diğ., 2019). Bu hesaplamada, küçük ve büyük baş hayvanlar ile kümes hayvanları için hayvan başına ortalama günlük su

ihtiyacı dikkate alınır. Toplam tarımsal su tüketimi, Denklem (2.16) ila (2.18) kullanılarak bitkisel ürünler ve hayvancılık için su ihtiyaçlarının toplanmasıyla elde edilir (Kulat ve diğ., 2019).

$$W_c = \sum_i W_{c_i} L_i \quad (2.16)$$

$$W_l = \sum_i W_{l_i} N_i . 365 \quad (2.17)$$

$$W_T = W_c + W_l \quad (2.18)$$

Burada, L_i belirli bir ürün için tahsis edilen araziyi, W_c tüm ürünler için toplam sulama ihtiyacını, N_i hayvan sayısını, W_l hayvancılık için toplam yıllık su ihtiyacını ve W_T hem ürün sulamasını hem de hayvancılık su ihtiyacını kapsayan toplam tarımsal su kullanımını ifade etmektedir.

Havzadaki enerji talebi, çeşitli kaynaklardan su temininin sağlanmasının yanı sıra tarlalarda üretim aşamasında meydana gelen çeşitli tarım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi için de büyük önem taşımaktadır. Sulama için yüzey veya yeraltı suyu kullanımına yönelik enerji gereksinimleri, her kaynak türü için ilgili enerji ayak izi değerlerine göre değerlendirilir. Tarımsal uygulamalardaki enerji talepleri, toprak hazırlığı, ekim, yetiştirme, hasat, gübreleme ve diğer çeşitli tarımsal işlemler dahil olmak üzere bir dizi faaliyeti kapsar. Enerji gereksinimlerinin değerlendirilmesi her bir tarımsal ürün türü için ayrı ayrı yapılır. Tarımsal faaliyetler için gereken toplam enerji, bölgedeki tüm tarımsal ürünler için enerji ihtiyaçlarının toplamıdır ve her bir ürün için toprak işlemeden hasada kadar tüm süreçler boyunca yakıt tüketimine dayalı olarak hesaplanır. Her bir tarımsal ürün türü için enerji ihtiyacı, bu aşamalar için gerekli yakıt tüketimi ile o ürüne ayrılmış ekili alanın çarpılmasıyla belirlenir. Toplam enerji ihtiyacı, denklem (2.19) ila (2.21) kullanılarak su temini ve tarımsal faaliyetler için gereksinimlerin toplanmasıyla elde edilir (Kulat ve diğ., 2019).

$$E_T = E_{sw} + E_{gw} + E_{fo} \quad (2.19)$$

$$E_{sw} = \alpha_{sw} \times V_{sw} \quad (2.20)$$

$$E_{gw} = \alpha_{gw} \times V_{gw} \quad (2.21)$$

Burada E_T toplam enerji ihtiyacını, E_{sw} yüzey suyunun taşınması için gereken enerjiyi, E_{gw} yeraltı suyunun pompalanması için gereken enerjiyi ve E_{fo} tarımsal faaliyetler için gereken enerjiyi temsil etmektedir. Ayrıca, α birim su hacmi başına ihtiyaç duyulan enerjiyi, V ise kullanılan su hacmini ifade etmektedir.

CO₂ emisyonları, bir senaryonun sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir ölçüttür. Bu emisyonlar ağırlıklı olarak enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır. Bir senaryoda kullanılan her enerji türü, tüketilen enerji birimi başına ton cinsinden CO₂ emisyonlarını gösteren belirli katsayılarla sahiptir. Her bir enerji türünden kaynaklanan emisyonlar ayrı ayrı değerlendirilir ve daha sonra senaryonun genel emisyon etkisini değerlendirmek için toplanır (Degirmencioglu ve diğ., 2019).

$$CO_2 = \sum_i E_i \Delta_i \quad (2.22)$$

Burada E farklı enerji tüketim türlerini gösterirken, Δ tüketilen enerji birimi başına ton cinsinden CO₂ emisyon miktarını temsil etmektedir.

Tarımsal gelir, her bir senaryonun finansal değerlendirmesi için önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Toplam tarımsal gelir, denklem (2.23) kullanılarak her bir tarımsal ürün için toplam üretim değerleri ve birim fiyatları kullanılarak hesaplanabilir (Degirmencioglu ve diğ., 2019).

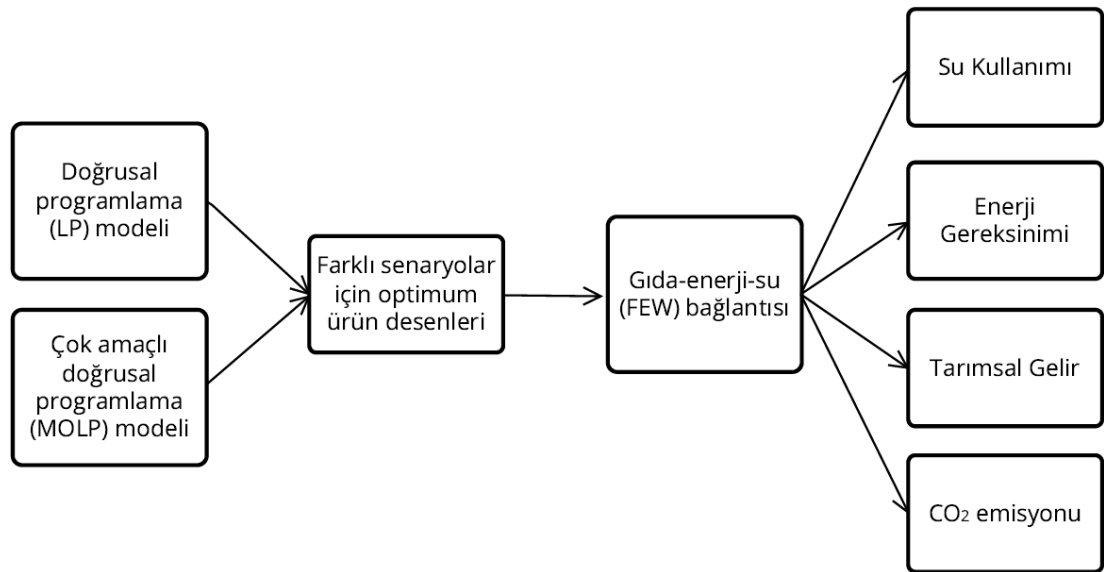
$$R = \sum_i P_i U_i \quad (2.23)$$

Burada R toplam tarımsal geliri, P tarımsal üretimi ve U her bir tarımsal ürünün birim fiyatını temsil etmektedir.

Bu çalışmada ilk olarak tarımsal üretimde su tüketimini en aza indiren optimum ekim desenini elde etmek için LP modeli geliştirilmiştir. Modelde kullanılan kısıtlardan biri, model aracılığıyla elde edilen tarımsal gelirin mevcut veriler için elde edilen mevcut gelire eşit veya daha büyük olmasıdır. Bir diğer kısıt ise gıda talebini yeterli düzeyde karşılamak için tarımsal ürün türlerine ayrılan ekim alanlarında çok büyük veya çok küçük değişiklikleri önlemek amacıyla alt ve üst sınırların eklenmesidir. Toplam ekim alanının mevcut toplam ekim alanına eşit veya daha büyük olmasını gerektiren kısıtın hem uygulanması hem de uygulanmaması ayrı durumlar olarak incelenmiştir.

Çalışmada ikinci olarak ise tarımsal üretimde su kullanımının minimize edilmesi ve tarımsal gelirin maksimize edilmesi birbiriyle çelişen amaçlar olarak ele alınmış ve optimum ürün desenlerinin belirlenmesi için MOLP yöntemi kullanılmıştır. MOLP yönteminde, her bir amaç fonksiyonuna atanan ağırlıklar değiştirilerek farklı bakış açılarını yansıtan alternatif ürün deseni senaryoları oluşturulmuştur. Kısıtlar, model aracılığıyla elde edilen gelirin mevcut durumdakine eşit veya daha yüksek olması, su kullanımının mevcut durumdakine eşit veya daha düşük olması ve ekim alanları için izin verilen değişim aralığının %5 ile sınırlandırılması şeklinde belirlenmiştir. Hedeflere farklı ağırlık katsayıları atanan senaryoların yanı sıra, ekim alanlarındaki izin verilen değişiklik yüzdelerinin farklı değerler alması durumunun çıktı parametrelerini nasıl etkilediği de ayrı senaryolar altında değerlendirilmiştir. Önceki durumlarda olduğu gibi, tarımsal gelirin mevcut seviyede veya üzerinde tutulması ve su kullanımının ise bu seviyenin altında kalması için kısıtlamalar getirilmiştir. Su tasarrufunun ve tarımsal gelirin maksimize edilmesinin dengeli bir şekilde değerlendirilebilmesi için her iki hedefe de eşit ağırlık katsayıları uygulanmıştır.

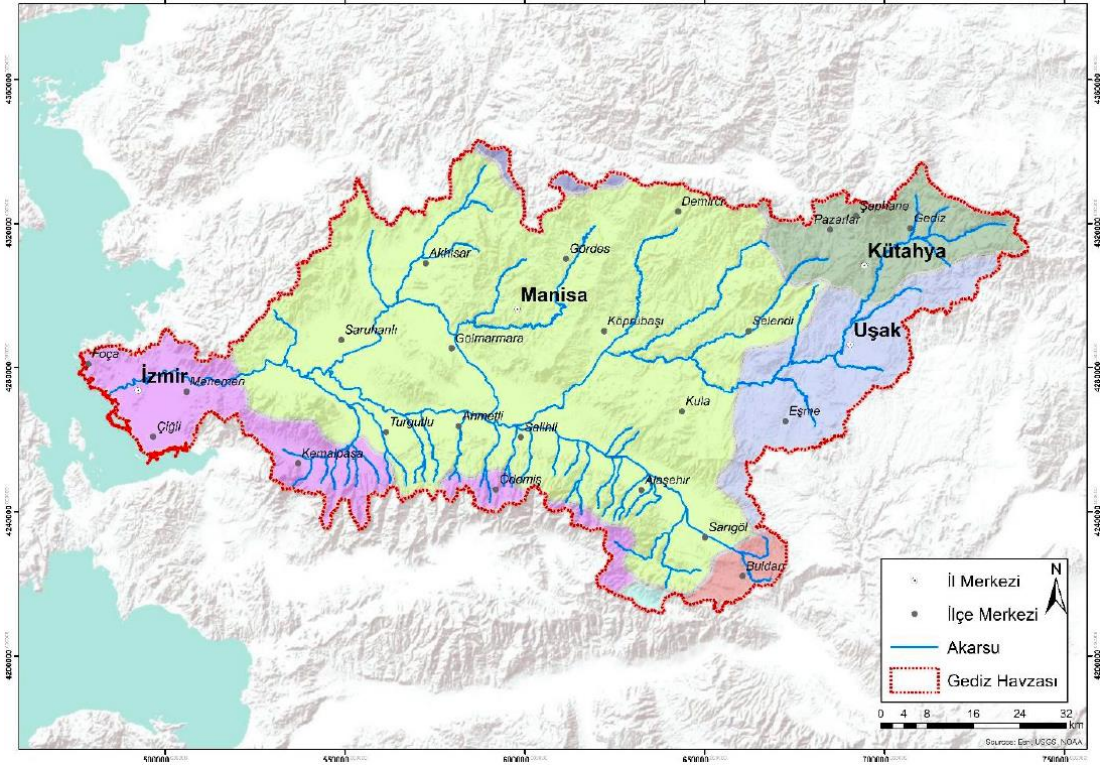
Daha sonra, çeşitli senaryolar için LP ve MOLP yoluyla elde edilen ekim desenleri, FEW bağlantısına dayalı olarak su kullanımı, enerji ihtiyacı, tarımsal gelir ve CO₂ emisyonlarını hesaplamak için kullanılmıştır. Bu senaryolar daha sonra karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan metodoloji Şekil 2.2'de özetlenmiştir.



Şekil 2.2: Çalışma metodolojisinin özet gösterimi.



Gediz Havzası sınırları itibarıyla, Manisa, İzmir, Kütahya, Uşak, Aydın, Denizli ve Balıkesir illerinin bir kısmını kapsamaktadır. Havzadaki en çok yerleşim yeri Manisa iline aittir. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, havza alanının büyük bir kısmını Manisa ili (%66) oluşturmakta, bunu sırasıyla İzmir (%11,5), Uşak (%10,8) ve diğer iller takip etmektedir (SYGM, 2019).



Şekil 3.2: Havza içerisindeki yerleşim birimleri.

3.2 Havzanın Topografik ve İklim Özellikleri

Gediz Havzası yaklaşık 17.140 kilometrekarelik (km²) bir alanı kaplamakta ve bu alan Türkiye'nin toplam yüzölçümünün %2,2'sini oluşturmaktadır. Havzanın adını aldığı Gediz Nehri yaklaşık 275 kilometre (km) uzunluğundadır ve havzadaki temel su kaynağıdır. Gediz Nehri'nin 175 km'lik kısmı Manisa ilinden, 40 km'si Kütahya'dan, 35 km'si İzmir'den ve 25 km'si Uşak'tan geçmektedir. Gediz Havzası'nın su bütçesi incelendiğinde, yıllık ortalama yağışın 585 mm olduğu görülmektedir. Bunun yıllık ortalama 343 mm'si buharlaşma ve terleme yoluyla kaybedilmektedir (SYGM, 2018). Yıllık bazda 79 mm yüzey akışı yoluyla havzayı terk etmektedir. Havza genelinde yeraltı suyu beslenmesi yılda ortalama 163 mm'dir (SYGM, 2018).

Gediz Nehri, kaynağını Gediz ilçesinin 26 km doğusundaki Murat Dağı'ndan almaktadır. Daha sonra, Deli İniş (Kocaçay), Demrek (Demirci), Kum Deresi, Alaşehir ve Nif Deresi bu nehirle birleşmektedir. Nehir, Foça ve Çamaltı tuzlası yakınlarında Ege Denizi'ne dökülmektedir (SYGM, 2019).

Gediz Havzası, Türkiye'nin batı kesimlerinde Ege Denizi'ne dikey olarak uzanan Batı Anadolu Dağları arasındaki bölgede yer almaktadır. Havzayı üç taraftan çevreleyen dağlar çok yüksek değildir. En yüksek dağ 2.312 m ile havzanın doğusundaki Murat Dağı'dır. Bu dağ Bozdağlar (2.159 m), Simav Dağları (1.664 m), Umurbaba Dağı (1.555 m), Çulha Dağı (1.553 m) ve Nif Dağı (1.510 m) izlemektedir. Dağların yükseklikleri doğudan batıya doğru sürekli olarak azalmaktadır. Batıda dağlar genellikle 400-800 m arasında bir yüksekliğe sahiptir. (SYGM, 2019).

Gediz Nehri havzasındaki ovalar, nehrin yukarı havzasında nehir boyunca dar bir şerit halinde yer alırken, orta ve aşağı kesimlerde önemli ölçüde genişlemektedir. Bu ovalar genellikle doğudan batıya sıralanan dağlar arasında uzanır, ancak farklı yönlerde, özellikle kuzey-güney yönünde uzanan ovalar da bulunmaktadır. Bu ovaların yüksekliği yukarı havzada 400 ila 600 metre arasında değişmekte, batıya doğru gidildikçe kademeli olarak azalmaktadır (SYGM, 2019).

Kar örtüsü oluşumu ve kar erimesi süreçleri yalnızca yukarı havza kısımlarında gözlemlenebilmektedir. Havza, sıcak, kurak yazlar ve serin, yağışlı kışlarla karakterize edilen tipik bir Akdeniz iklimine sahiptir. Yağış verileri incelendiğinde, yıllık ortalama yağışın Kemalpaşa ve Demirci istasyonları çevresinde yüksek olduğu, havzanın kuzey kısımlarında bu iki istasyon dolaylarına göre daha düşük ve güney kısımlarında en düşük olduğu görülmektedir. Havza genelinde en yüksek ortalama aylık yağış Aralık ve Ocak aylarında kaydedilirken, en düşük ortalama yağış Temmuz ve Ağustos aylarında gerçekleşmektedir (SYGM, 2019).

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 içerisinde aylık ortalama maksimum sıcaklık değeri 08/2010 tarihinde Manisa istasyonunda 30,7 C°, aylık ortalama minimum sıcaklık değeri ise 02/1992 tarihinde Gediz istasyonunda -2,1 C° olarak ölçülmüştür. Havzadaki yıllık ortalama sıcaklık

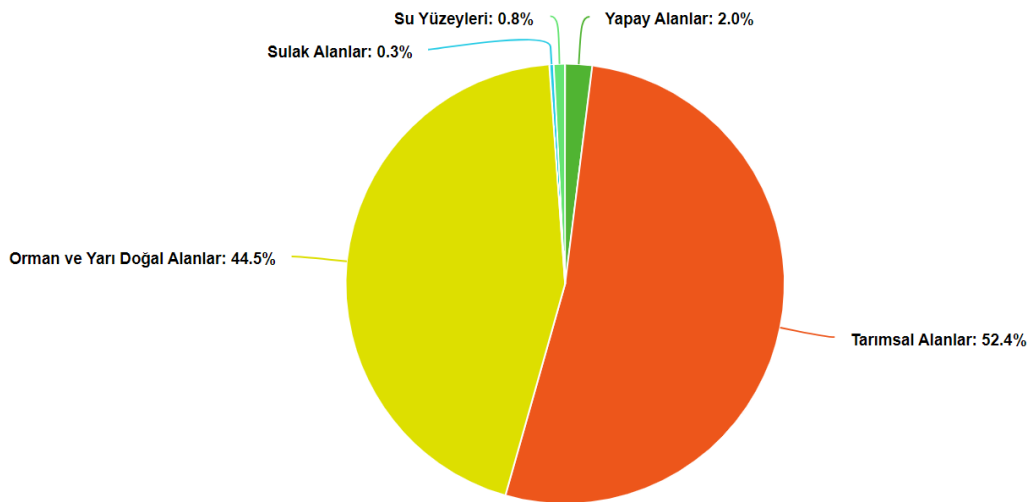
değerlerine bakıldığında, ortalama sıcaklık değerlerinin genel olarak batıdan doğuya doğru azaldığı görülmektedir (SYGM, 2019).

Penman-Monteith yöntemi kullanılarak hesaplanan Mayıs-Eylül ayları arasındaki büyüme sezonu için havza genelindeki aylık referans evapotranspirasyon (ET_0) değerleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir: Mayıs için 132,5 mm, Haziran için 167,35 mm, Temmuz için 194,5 mm, Ağustos için 178,7 mm ve Eylül için 126,4 mm (Yıldırım ve diğ., 2019). Bu veriler, bölgedeki iklim koşullarına bağlı olarak, bitki su ihtiyacının büyüme dönemi boyunca Temmuz ve Ağustos aylarında en yüksek olduğunu göstermektedir.

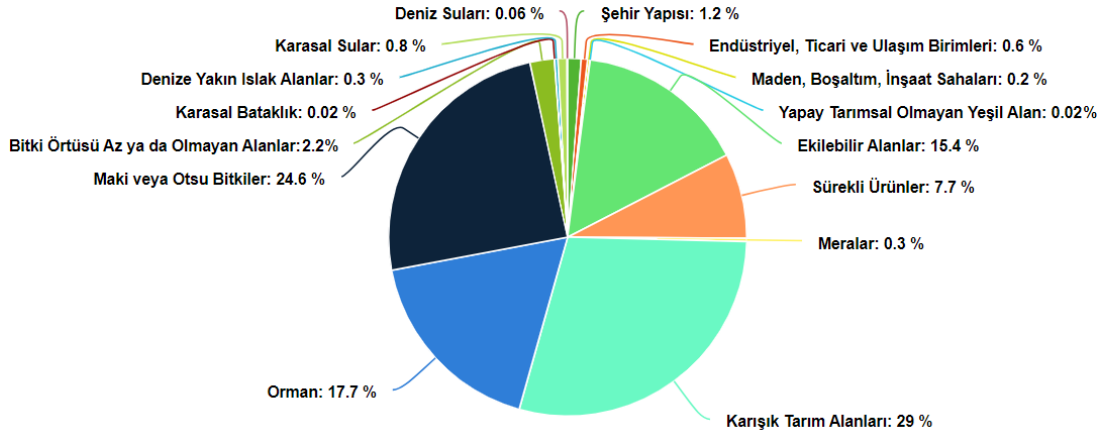
Havzadaki ortalama nispi nem oranı %64 olarak belirlenmiştir. Havza genelinde en yüksek aylık ortalama nispi nem değerleri Aralık ayında, en düşük ortalama nem değerleri ise Temmuz ayında kaydedilmektedir. Havza geneline bakıldığında bağıl nem değerlerinin Alaşehir istasyonu çevresinde çok düşük, orta ve batı kesimlerde ortalama, kuzeydoğu kesimde ise en yüksek olduğu görülmektedir (SYGM, 2019).

3.3 Havzanın Arazi Kullanım Özellikleri

CORINE 2012 veri tabanı kullanılarak belirlenen Gediz Havzası bölgesinin arazi kullanım durumu, havza için daha önce hazırlanan kapsamlı bir rapordan (SYGM, 2018) elde edilmiştir. Havzanın arazi kullanım dağılımı CORINE'in birinci düzey sınıflandırmasına göre Şekil 3.3'te, CORINE'in ikinci düzey sınıflandırması doğrultusunda daha detaylı bir dağılım ise Şekil 3.4'te gösterilmektedir (SYGM, 2018).



Şekil 3.3: Gediz Havzası birinci düzey arazi kullanımı.



Şekil 3.4: Gediz Havzası ikinci düzey arazi kullanımı.

Tarımsal, kentsel ve endüstriyel bölgeler birlikte Gediz Havzası'ndaki toplam arazi alanının yaklaşık %54'ünü oluşturmaktadır ve bu bölgelerin mekânsal dağılımı havzanın genel çevre ve kaynak yönetimini etkileme konusunda kritik bir rol oynamaktadır (SYGM, 2018). Ormanlar havzanın %17,7'sini kaplarken, çalılık veya otsu bitki örtüsü %24,6'sını, seyrek veya hiç bitki örtüsü olmayan bölgeler ise %2,2'sini oluşturmaktadır. Bu bölgeler ağırlıklı olarak havzanın kuzey ve kuzeydoğusundaki dağlık alanlarda bulunmaktadır (SYGM, 2018). Havzanın batı kesiminde, yanlış arazi kullanımı, kentleşme, sanayileşme, turizm ve yoğun tarım nedeniyle arazi bozulumu riski artmaktadır. Buna karşılık, doğu kesimleri daha yüksek arazi verimliliği seviyelerine sahip olma eğilimindedir (SYGM, 2018).

Dengiz (2018), Gediz Nehri Havzası'ndaki iki komşu mikro havzada arazi verimliliğini ve toprak organik karbon yoğunluğunu değerlendirerek arazi bozulumunun etkilerini incelemiştir. Çalışmada, 2001-2015 yılları arasındaki dönemde arazi kullanımı, arazi örtüsü ve bitki örtüsü yoğunluğundaki değişimleri analiz etmek için Landsat uydu görüntüleri kullanılmıştır. Bulgular, havza alanının %23'ünden fazlasının arazi verimliliğinde gözle görülür bir düşüş yaşadığını, yaklaşık %24'ünün ise erken bozulma belirtileri gösterdiğini ortaya koymaktadır (Dengiz, 2018). Yüzey ve yüzey altı katmanlarında yapılan toprak analizi, yoğun orman örtüsüne sahip alanların en yüksek toprak organik karbon seviyelerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu yüksek karbon içeriği, yüzeydeki organik maddenin birikmesine ve yavaş çürümesine bağlanmaktadır. Buna karşılık, organik maddenin ayrışmasını ve mineralizasyonunu hızlandıran yoğun tarım uygulamaları, özellikle de toprak işleme

nedeniyle ekili araziler en düşük karbon seviyelerini sergilemiştir. Bu nedenle, bitki kalıntılarının toprakta tutulması gerekmektedir. Ayrıca, toprak sıkışması, kabuklanma ve yapısal bozulma gibi sorunları önlemek için ürün rotasyonu, yeşil gübre kullanımı ve azaltılmış toprak işleme gibi sürdürülebilir arazi yönetimi uygulamaları hayata geçirilmelidir (Dengiz, 2018).

Bitki türlerinin çeşitlendirilmesi, sürdürülebilirliği ve dayanıklılığı artırmak amacıyla ekolojik olarak yoğunlaştırılmış tarımsal ekosistemler için birincil stratejilerden biridir. Ürün rotasyonları, haşere ve yabancı ot popülasyonlarını kontrol etmeye yardımcı olmakta, hastalık prevalansını azaltmakta ve toprak verimliliğinin ve mahsul veriminin artmasına katkıda bulunmaktadır (Ripoche ve diğ., 2021). Artan ürün çeşitliliği, daha yüksek seviyelerde toprak organik maddesi, toplam azot, mikrobiyal aktivite ve genel toprak verimliliğine katkıda bulunan gelişmiş toprak biyolojik topluluklarıyla ilişkilendirilmektedir (Tiemann ve diğ., 2015).

Genellikle yanlış sulama uygulamaları ve yetersiz drenaj nedeniyle ortaya çıkan toprak tuzluluğu ve su basması, tarımsal verimliliği düşüren ve tarımsal geliri azaltan, sürdürülebilir tarımı tehdit eden diğer önemli arazi bozulma biçimleridir. Atis (2006) Gediz Deltası'nda arazi bozulmasının pamuk üretimi üzerindeki ekonomik etkilerini incelemiş ve bu bozulma faktörleri nedeniyle pamuk veriminin %34,4 oranında düştüğünü ve brüt kâr marjının hektar başına 860,2 USD azaldığını tespit etmiştir.

3.4 Tarımsal Üretim Verileri

Gediz Nehri boyunca uzanan merkez ilçe, Saruhanlı, Alaşehir, Akhisar, Salihli, Turgutlu ve Sarıgöl ovaları Türkiye'nin en verimli toprakları arasında yer almakta ve bu bölgede pamuk, çekirdeksiz üzüm ve çeşitli meyveler gibi yüksek verimli ürünler yetiştirilmektedir. Kırkağaç ve Soma'yı içerisine alan Bakırçay Ovası'nın kapladığı alan Gediz Ovası kadar geniş olmasa da bu bölgede de tütün, zeytin, gibi birtakım sanayi bitkileri ve çeşitli meyve ve sebzeler yetiştirilmektedir. Ancak bu bölgede Gediz Ovası'ndaki kadar ürün çeşitliliği bulunmamaktadır (SYGM, 2019).

Gördes, Demirci, Selendi ve Kula'yı içine alan ve İç Batı Anadolu iklimiyle karakterize edilen bölge ise, arazi yapısı ve ürün desenleri açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Daha engebeli bir araziye ve Akdeniz etkisinden uzaklaşan bir iklime

sahip olan bu bölgede ağırlıklı olarak tahıl, baklagil ve bazı meyveler yetiştirilmektedir (SYGM, 2019).

Gediz Havzası'nda ekilen ürünler ekim alanlarına göre incelendiğinde, kurutmalık çekirdeksiz üzüm ve domates havzanın en önemli tarımsal ürünleri arasında yer almaktadır. Daha sonra kiraz, zeytin, buğday ve mısır havza için diğer önemli sayılabilecek ürünleri oluşturmaktadır (SYGM, 2019).

Çalışmada kullanılan altı ürün türü için tarımsal üretim verileri, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) tarafından havza özelinde hazırlanan bir rapordan temin edilmiştir. Bu veriler, uygulanan kısıtlamalara bağlı olarak çeşitli alternatif senaryoların türetilmesi için bir baz senaryo görevi görmüştür. Bu verilerden elde edilen su tüketimi, enerji ihtiyacı ve CO₂ emisyonlarına ilişkin sonuçlar, karşılaştırmalı analiz için referans değerler olarak kullanılmıştır. SYGM tarafından hazırlanan Gediz Havzası Kuraklık Yönetim Planı Nihai Raporu'ndan elde edilen 2017 yılı tarımsal üretim verileri ve gelecek dönemler için yıllık üretim projeksiyonları aşağıdaki Çizelge 3.1'de sunulmuştur (SYGM, 2019).

Çizelge 3.1: Tarımsal üretim verileri ve gelecek dönem üretim projeksiyonları.

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

Havzanın kuraklık raporunda, projeksiyon dönemi 2015'ten 2100'e kadar uzanmaktadır ve gelecekteki su mevcudiyetini değerlendirmek için, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kullanılarak HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR ve CNRM-CM5.1 modellerinden yağış projeksiyon verileri elde edilmiştir (SYGM, 2019). Bu modeller tarafından tahmin edilen yağış anomalileri Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2: HADGEM, MPI ve CRNM modelleri yağış anomalileri.

Periyot	HadGEM RCP4.5(%)	HadGEM RCP8.5(%)	MPI RCP4.5(%)	MPI RCP8.5(%)	CNRM RCP4.5(%)	CNRM RCP8.5(%)
2015-2020	+4,66	-11,23	-8,46	-14,62	+10,76	-10,04
2021-2030	+8,06	+5,36	-10,82	-4,14	-0,25	-11,21
2031-2040	+0,19	+2,04	-8,75	-4,72	-4,46	-6,11

Çizelge 3.2 (devam): HADGEM, MPI ve CNRM modelleri yağış anomalileri.

Periyot	HadGEM RCP4.5(%)	HadGEM RCP8.5(%)	MPI RCP4.5(%)	MPI RCP8.5(%)	CNRM RCP4.5(%)	CNRM RCP8.5(%)
2041-2050	+8,19	-3,49	-7,09	+1,52	+4,76	-5,26
2051-2060	-7,92	-17,34	-3,2	-7,36	+0,11	-9,03
2061-2070	-16,57	-13,71	-10,66	-19,98	-3,24	-8,89
2071-2080	+0,37	-15,08	-7,81	-19,78	-3,05	-11,46
2081-2090	-1,66	-7,01	-3,17	-22,2	-4,48	-5,18
2091-2100	-7,53	-17,86	-8,36	-27,1	-1,38	-6,06

Her bir ürün için gübre ihtiyaçları, sulama ihtiyacı ve tarımsal faaliyetlerde traktör kullanımına dayalı yakıt tüketimi hektar başına kilogram (kg/ha), hektar başına metreküp (m³/ha) ve hektar başına litre (L/ha) cinsinden Çizelge 3.3'te gösterilmektedir (TÜİK, 2014).

Çizelge 3.3: Tarımsal ürünler için çeşitli gereksinimler ve yakıt tüketim değerleri.

Ürün	Azot İhtiyacı (kg/ha)	Fosfor İhtiyacı (kg/ha)	Potasyum İhtiyacı (kg/ha)	Sulama İhtiyacı (m ³ /ha)	Mazot Tüketimi (L/ha)
Domates	136,1	73,1	37,7	2849,5	180,46
Buğday	120	40	0	1182,9	65,6
Mısır	272,7	166,6	0	1794,9	159,1
Üzüm	55,8	51,5	41,6	5396	225,55
Kiraz	187,5	180,2	166,1	1084,5	267,93
Zeytin	90	72	55,4	0	50,93

Yakıt tüketimi, tarımsal üretim süreçlerinde en temel enerji girdisi olarak öne çıkmaktadır; bu durum da Türkiye'de mazot kullanımının tarım için ana enerji kaynağı olduğu gerçeği ile örtüşmektedir. Havzadaki sulama suyu olarak kullanılan farklı su kaynakları için enerji gereksinimleri değişmektedir. Birim su hacmi başına enerji gereksinimi yeraltı suyu için 0,4068 kWh/m³ ve yüzey suyu için 0,209 kWh/m³'tür (Degirmencioglu ve diğ., 2019). Ayrıca, tarımsal üretim süreçlerinde mazot kullanımından kaynaklanan karbondioksit emisyonu litre başına 0,00268 ton, azot, fosfor ve potasyum gübrelerinin kullanımından kaynaklanan karbondioksit emisyonu ise kilogram başına 0,0026 tondur (Wood ve Cowie, 2004).

Gediz Havzası'nda hayvancılık faaliyetleri de önemli bir yer tutmaktadır. Gediz Havzası'ndaki 2017 yılına ait büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanı sayıları ve gelecek dönem projeksiyonları Çizelge 3.4'te verilmiştir (SYGM, 2019).

Çizelge 3.4: Gediz Havzası'ndaki mevcut hayvan sayıları ve beklenen değişmeler.

Hayvan Türü	2017	2025-2050	2050-2075	2075-2100
Büyükbaş	398191	501004	634638	758071
Küçükbaş	1195222	1479158	1851022	2191258
Kümes Hayvanı	51284996	76544579	108389348	138948762

2017 yılı verilerine göre Gediz Havzası, Türkiye'deki kümes hayvanlarının %14,8'ini, büyükbaş hayvanların %1,85'ini ve küçükbaş hayvanların %2,7'sini beslemektedir. Hayvanların toplam su ihtiyacı, büyükbaş hayvanların su ihtiyacı için 50 litre/adet-gün, küçükbaş hayvanların su ihtiyacı için 15 litre/adet-gün ve kanatlı hayvanların su ihtiyacı için 0,25 litre/adet-gün değerleri kullanılarak belirlenmiştir (SYGM, 2019).



4. BULGULAR VE YORUMLAR

4.1 LP Senaryoları ve FEW Bağlantısına Dayalı Değerlendirme

Bu tez çalışması kapsamında, tarımsal uygulamalarda su kullanımını en aza indirmek amacıyla en uygun ekim desenlerini belirlemek için öncelikle LP yöntemi uygulanmıştır. 2017, 2025-2050, 2050-2075 2075-2100 zaman dilimleri için havzanın mevcut üretim ve projeksiyon verileri baz veya referans senaryo olarak alınmıştır. Daha sonra, bu zaman dilimleri için su tüketimi, enerji talepleri, tarımsal gelir ve CO₂ emisyonlarına ilişkin hesaplamalar, FEW bağlantısı çerçevesi kullanılarak temel senaryo ile ilişkili verilerden hareketle gerçekleştirilmiştir. Baz senaryonun yanı sıra, ürün desenindeki değişiklikler de farklı senaryolar olarak değerlendirilmiştir.

4.1.1 Senaryoların oluşturulması

Farklı senaryoların türetilmesinde, su kullanımını en aza indirme amaç fonksiyonu ile optimum ekim alanlarını elde etmek için LP kullanılmış ve kısıtlar elde edilecek tarımsal gelir baz senaryodaki tarımsal gelir miktarına eşit veya daha yüksek olacak ve ekim alanlarında %1, %2, %3, %4 ve %5 aralıklarında mekansal değişikliklere izin verecek şekilde oluşturulmuştur.

Her bir ürün için ekim alanlarının belirlenmesinde üst ve alt sınırların uygulanması, arazi tahsisinde görülebilecek olası büyük çaplı değişimlerin azaltılmasına hizmet etmekte, değişikliklerin yönetilebilir bir aralıkta kalmasını ve aynı zamanda gıda talebinin de karşılanmasını sağlamaktadır. Toplam ekim alanı kısıtının da uygulandığı ürün deseni değişikliği senaryolarında, amaç fonksiyonu su kullanımını en aza indirmek olan LP yine kullanılmış ve kısıtlar elde edilecek tarımsal gelir baz senaryodaki tarımsal gelir miktarına eşit veya daha yüksek olacak, toplam ekim alanı baz senaryodakine eşit veya daha büyük olacak ve ekim alanlarında %1, %2, %3, %4 ve %5 aralıklarında mekansal değişikliklere izin verecek şekilde belirlenmiştir. Bu iki ayrı durumu analiz ederek, toplam ekim alanı kısıtının varlığının veya yokluğunun

FEW nexus çerçevesinde oluşturulan parametreleri nasıl etkilediğinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılması amaçlanmaktadır.

İncelenen senaryoların isimlendirilmesinde, mevcut veriler karşılaştırmalar için baz veya referans senaryo olarak alınmış ve Senaryo 1 olarak gösterilmiştir. LP'de senaryo 2, 3, 4, 5 ve 6, toplam ekim alanı üzerinde herhangi bir kısıtlamanın olmadığı ve her bir ürün için ekim alanlarındaki mekansal değişikliklerin %1, %2, %3, %4 ve %5 aralıklarında olduğu durumları temsil etmektedir. Senaryo 7, 8, 9, 10 ve 11 ise, ekim alanlarında %1, %2, %3, %4 ve %5 aralıklarındaki mekansal değişimler dikkate alınarak toplam ekim alanına bir sınırlama getirildiği durumları temsil etmektedir. Her bir dönem için LP yöntemi kullanılarak su tüketimini en aza indiren optimum ürün deseni için elde edilen ekim alanı değerleri hektar (ha) cinsinden Çizelge 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: LP aracılığıyla 2017 yılı için elde edilen ürün deseni.

Ekim Alanı (ha)	Domates	Buğday	Mısır	Üzüm	Kiraz	Zeytin
Senaryo 1	13354,4	93885,3	24534,9	61397,8	18806,4	93297
Senaryo 2	13487,9	92945,7	24290,6	60784,3	18837,8	94229,6
Senaryo 3	13621,4	92006,9	24045,3	60170,4	18820,9	95162,6
Senaryo 4	13755	91068	23799,9	59556,4	18804,1	96095,6
Senaryo 5	13888,5	90129,2	23554,5	58942,4	18787,2	97028,5
Senaryo 6	14022,1	89190,3	23309,2	58328,4	18770,3	97961,5
Senaryo 7	13417,8	93558,2	24290,6	60784,3	18995,2	94229,6
Senaryo 8	13465,6	93248,7	24045,3	60170,4	19183,3	95162,6
Senaryo 9	13513,4	92939,2	23799,9	59556,4	19371,3	96095,6
Senaryo 10	13561,2	92629,7	23554,5	58942,4	19559,4	97028,5
Senaryo 11	13609	92320,2	23309,2	58328,4	19747,5	97961,5

Çizelge 4.2: LP aracılığıyla 2025-2050 dönemi için elde edilen ürün deseni.

Ekim Alanı (ha)	Domates	Buğday	Mısır	Üzüm	Kiraz	Zeytin
Senaryo 1	20066,7	106250,3	31740,3	76541,5	25062,6	117460,3
Senaryo 2	20267,3	105187	31424,3	75776,8	24979,9	118634,5
Senaryo 3	20467,9	104124,5	31106,9	75011,3	24837,9	119809,1
Senaryo 4	20668,6	103062	30789,5	74245,9	24695,8	120983,7
Senaryo 5	20869,3	101999,5	30472	73480,5	24553,8	122158,3
Senaryo 6	21069,9	100937	30154,6	72715,1	24411,8	123332,9
Senaryo 7	20140,1	105831,9	31424,3	75776,8	25314,2	118634,5
Senaryo 8	20194,4	105435,2	31106,9	75011,3	25564,8	119809,1
Senaryo 9	20248,8	105038,5	30789,5	74245,9	25815,5	120983,7
Senaryo 10	20303,1	104641,7	30472	73480,5	26066,1	122158,3
Senaryo 11	20357,4	104245	30154,6	72715,1	26316,7	123332,9

Çizelge 4.3: LP aracılığıyla 2050-2075 dönemi için elde edilen ürün deseni.

Ekim Alanı (ha)	Domates	Buğday	Mısır	Üzüm	Kiraz	Zeytin
Senaryo 1	29990,2	111279,8	44649,4	102686,8	35967	154128,1
Senaryo 2	30290	110166,2	44204,8	101660,8	35751,4	155668,9
Senaryo 3	30589,9	109053,4	43758,3	100633,9	35454,1	157210,1
Senaryo 4	30889,8	107940,6	43311,8	99607	35156,8	158751,4
Senaryo 5	31189,7	106827,8	42865,3	98580,2	34859,5	160292,7
Senaryo 6	31489,6	105715	42418,8	97553,3	34562,2	161834
Senaryo 7	30088,1	110750,6	44204,8	101660,8	36328	155668,9
Senaryo 8	30159,8	110251,4	43758,3	100633,9	36687,7	157210,1
Senaryo 9	30231,4	109752,2	43311,8	99607	37047,4	158751,4
Senaryo 10	30303,1	109253	42865,3	98580,2	37407,1	160292,7
Senaryo 11	30374,8	108753,7	42418,8	97553,3	37766,7	161834

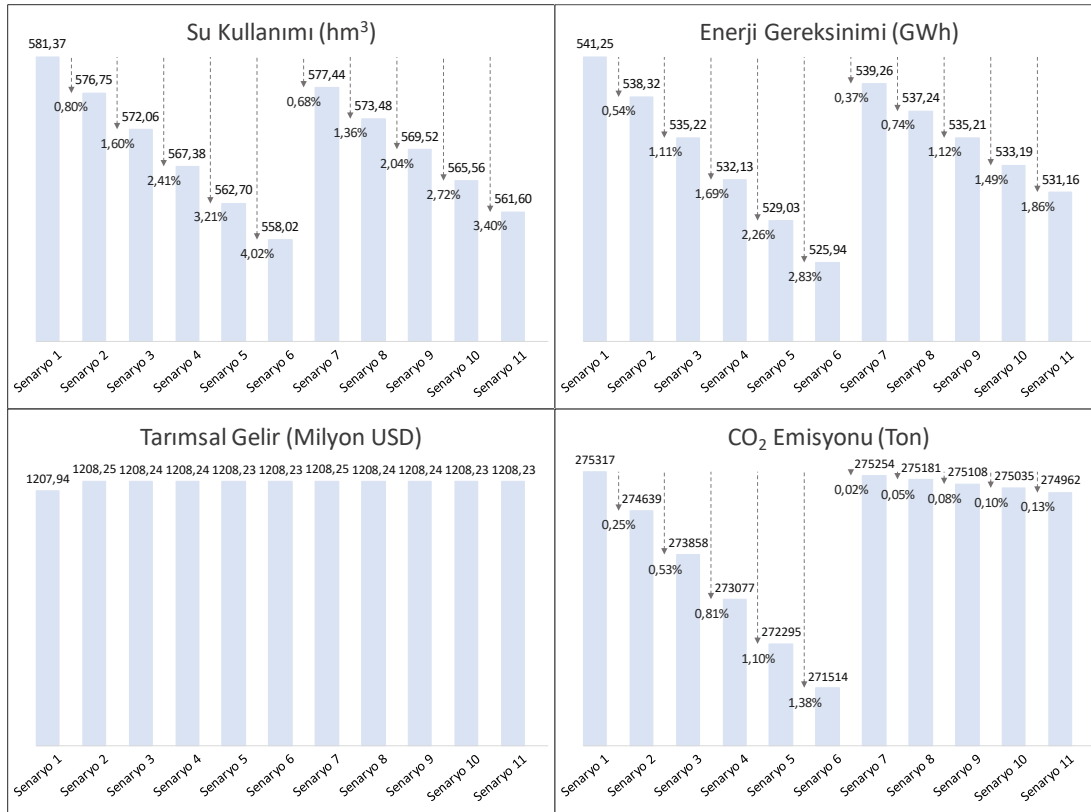
Çizelge 4.4: LP aracılığıyla 2075-2100 dönemi için elde edilen ürün deseni.

Ekim Alanı (ha)	Domates	Buğday	Mısır	Üzüm	Kiraz	Zeytin
Senaryo 1	39817,7	127637,2	60607,5	128994,1	46933,1	192899,7
Senaryo 2	40215,7	126359,8	60004,1	127705,3	46603,2	194828
Senaryo 3	40613,9	125083,5	59398	126415,3	46167,5	196757
Senaryo 4	41012	123807,1	58791,9	125125,4	45731,7	198686
Senaryo 5	41410,2	122530,8	58185,8	123835,4	45295,9	200615
Senaryo 6	41808,4	121254,4	57579,7	122545,5	44860,2	202544
Senaryo 7	39940,7	127007	60004,1	127705,3	47404,3	194828
Senaryo 8	40029,8	126415,6	59398	126415,3	47873,6	196757
Senaryo 9	40118,9	125824,3	58791,9	125125,4	48342,9	198686
Senaryo 10	40207,9	125232,9	58185,8	123835,4	48812,3	200615
Senaryo 11	40297	124641,6	57579,7	122545,5	49281,6	202544

4.1.2 Senaryo sonuçlarının karşılaştırmalı analizi

LP ile farklı ürün deseni senaryoları elde edildikten sonra, bu senaryolar için su kullanımı, enerji ihtiyacı, tarımsal gelir ve CO₂ emisyonları FEW nexus doğrultusunda hesaplanmış ve 2017, 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemlerinde her bir senaryo için karşılaştırılmıştır. Senaryolarla 2017 yılı için elde edilen sonuçlar ve senaryo sonuçlarının karşılaştırmaları Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

Senaryoların sonuçları 2017 yılı için karşılaştırıldığında, su kullanımındaki en büyük düşüş, toplam ekim alanı kısıtlaması olmaksızın ekim alanlarında %5'lik bir değişikliğe izin veren senaryo 6'da ve toplam ekim alanı kısıtlaması ile ekim alanlarında %5'lik bir değişikliğe izin veren senaryo 11'de, sırasıyla baz senaryoya kıyasla 23,4 milyon m³ ve oransal olarak %4,02'lik bir düşüşle, 19,8 milyon m³ ve oransal olarak %3,4'lük bir düşüşle gerçekleşmiştir.

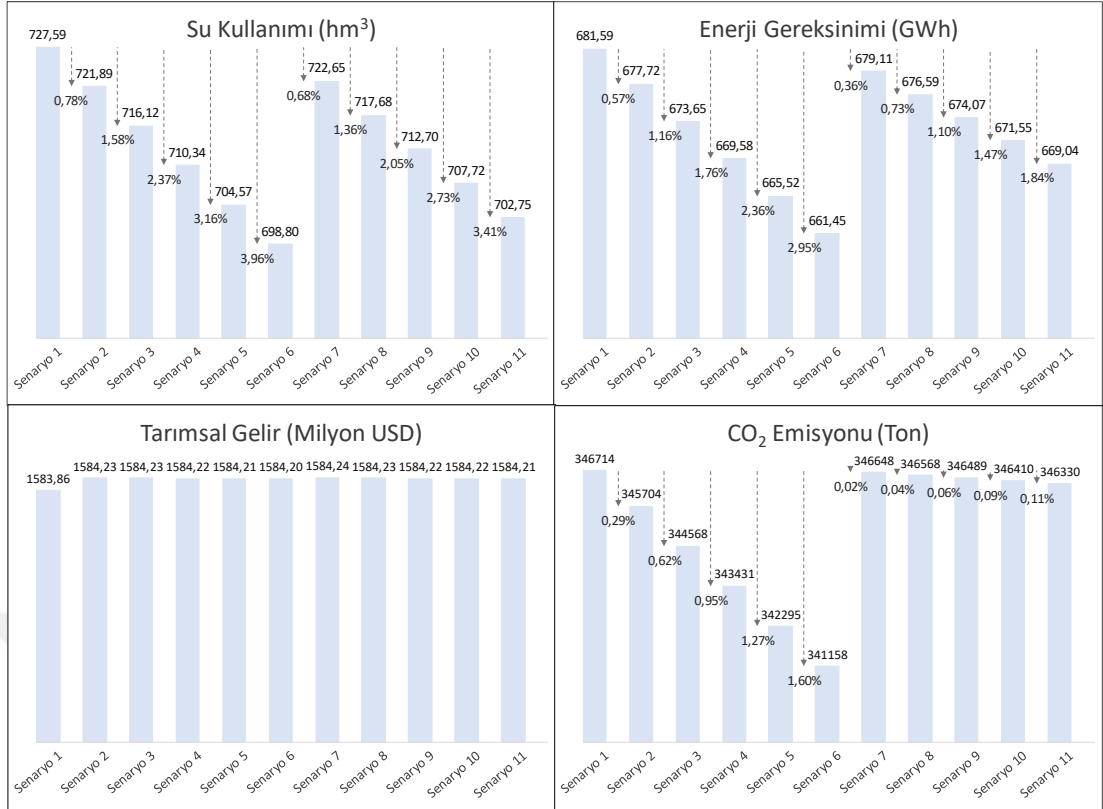


Şekil 4.1: 2017 yılı için LP senaryoları ile elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmaları.

Yapılan analiz, senaryo 6'nın %2,83'lük bir azalma ile enerji gereksinimlerinde en büyük düşüşe sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bunu %2,26'lık düşüşle senaryo 5 yakından takip etmiştir. Tarımsal gelir düzeyi tüm senaryolarda neredeyse eşit seyretmiştir. CO₂ emisyonlarında tüm senaryolarda azalma meydana gelmiş, en yüksek azalma %1,38 ile senaryo 6'da ve %1,1 ile senaryo 5'te gerçekleşmiştir.

2025 ila 2050 yılları için analiz edilen senaryolardan elde edilen bulgular ve bu sonuçların karşılaştırmalı bir değerlendirmesi Şekil 4.2'de gösterilmektedir.

2025'ten 2050'ye kadar olan dönem için üretilen senaryoların analizi, 6. senaryonun su kullanımında en belirgin azalmayı sağladığını ve toplamda 28,8 milyon m³'lük bir azalma ile referans senaryoya göre %3,96'lık bir oransal düşüşe karşılık geldiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, 11. senaryo 24,8 milyon m³'lük bir düşüş kaydetmiştir ve bu da referans senaryoya kıyasla %3,41'lik bir oransal düşüşe karşılık gelmektedir. Enerji gereksinimlerindeki en önemli azalma %2,95'lik düşüşle senaryo 6'da görülürken, bunu %2,36'lık düşüşle senaryo 5 izlemiştir. Tarımsal gelir, analiz edilen tüm senaryolarda istikrarlı bir seyir sergilemiştir. Karbondioksit emisyonları her senaryoda düşüş göstermiş, en belirgin düşüşler %1,6 ile senaryo 6'da ve %1,27 ile senaryo 5'te gözlenmiştir.

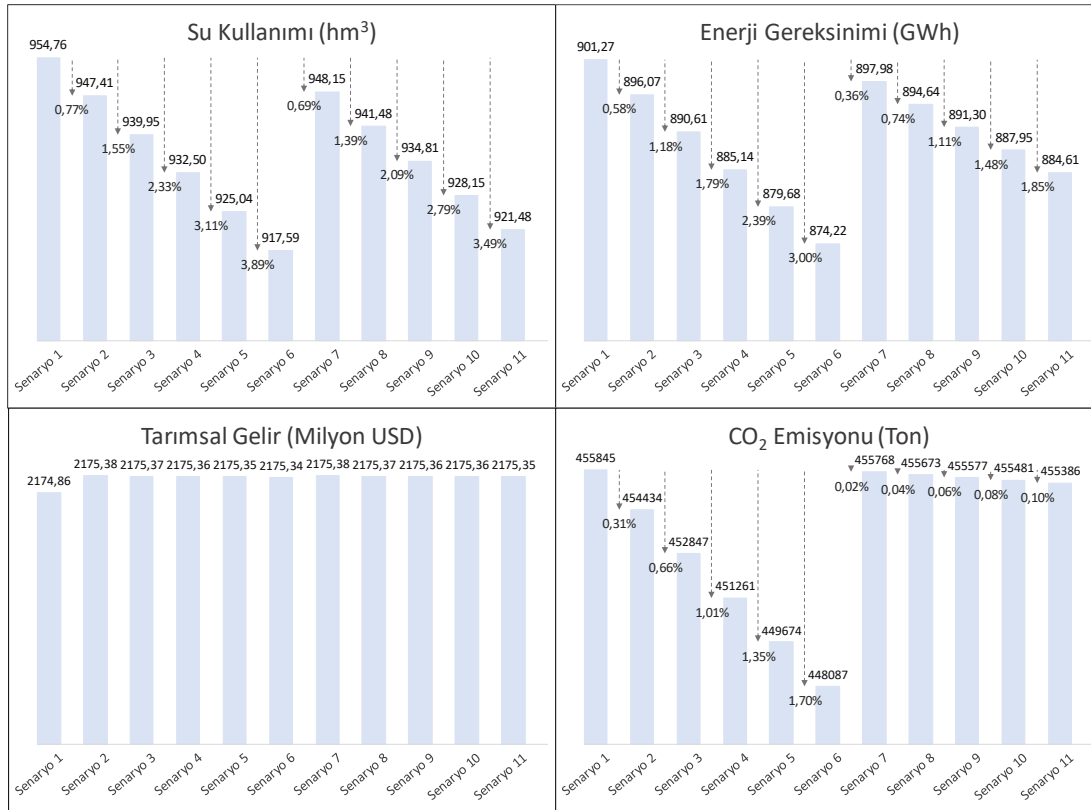


Şekil 4.2: 2025-2050 dönemi için LP senaryolarının sonuçları ve karşılaştırmaları.

2050-2075 dönemi için incelenen senaryolardan alınan sonuçlar ve senaryo sonuçlarının karşılaştırmaları Şekil 4.3'te sunulmuştur.

2050-2075 zaman dilimi için sonuçlar incelendiğinde, 6. senaryonun su kullanımında toplam 37,2 milyon m³ ile en önemli azalmaya yol açtığı görülmektedir. Bu azalma, referans değerle karşılaştırıldığında oransal olarak %3,89'luk bir düşüşü ifade etmektedir. Bunu takiben, senaryo 11, baz senaryoya kıyasla %3,49'luk oransal bir düşüşü yansıtan 33,3 milyon m³'lük bir azalma ile belirgin bir düşüş sergilemektedir.

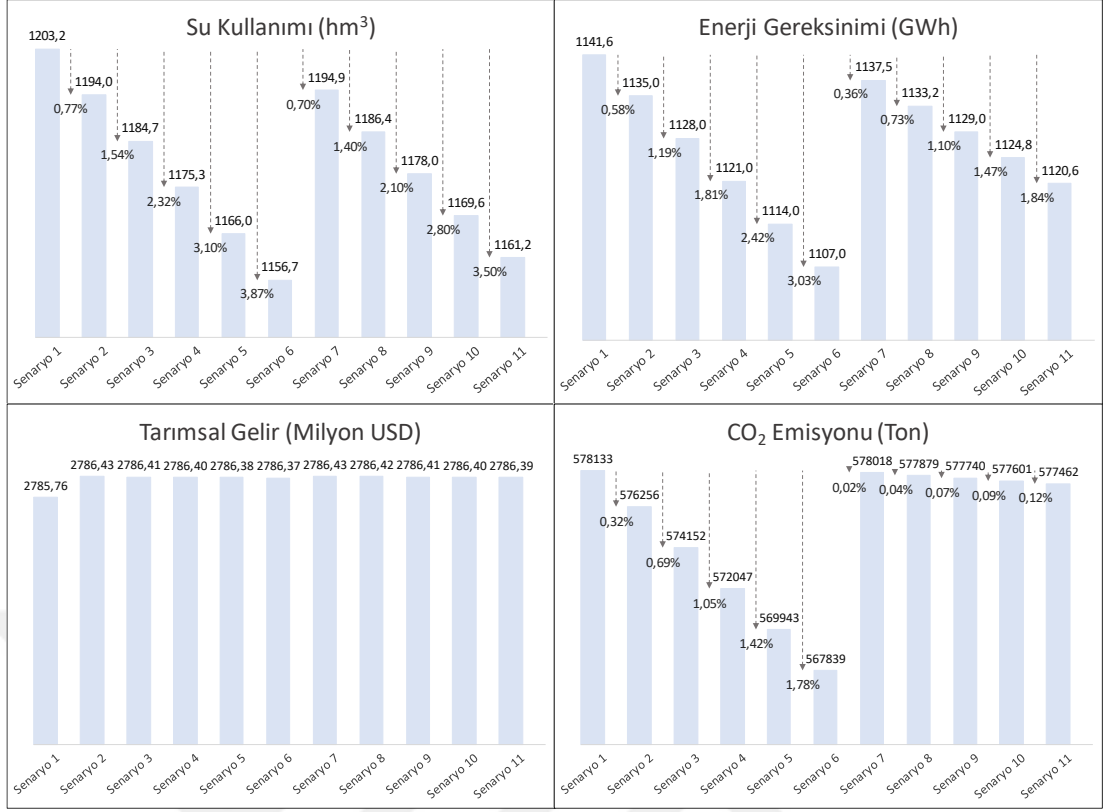
Enerji gereksinimlerindeki en kayda değer düşüşler %3'lük bir azalma ile senaryo 6'da ve %2,39'luk bir azalma ile senaryo 5'te görülmektedir. Tarımsal gelir tüm senaryolarda nispeten sabit bir seviyede kalmıştır. Dikkate değer bir şekilde, CO₂ emisyonları senaryoların tamamında düşüş göstermiş olup, en belirgin düşüş %1,7 ile senaryo 6'da gerçekleşmiş ve bunu senaryo 5'teki %1,35'lik düşüş takip etmiştir.



Şekil 4.3: 2050-2075 dönemi için LP senaryolarının sonuçları ve karşılaştırmaları.

2075-2100 dönemi için incelenen senaryolardan elde edilen sonuçlar ve senaryo sonuçlarının karşılaştırmaları Şekil 4.4'te verilmiştir.

2075-2100 dönemi için senaryoların sonuçları karşılaştırıldığında, su kullanımındaki en önemli azalmalar, baz senaryoya kıyasla %3,87'lik bir oransal düşüşe işaret eden 46,6 milyon m³'lük bir azalma ile senaryo 6'da gözlemlenmiştir. Senaryo 11 de, baz senaryoya kıyasla 42,1 milyon m³'lük önemli bir azalma göstermiştir, bu ise oransal olarak %3,5'lik bir düşüşü temsil etmektedir. Enerji gereksinimlerindeki en büyük düşüşler %3,03'lük bir azalma ile senaryo 6'da ve %2,42'lik bir azalma ile senaryo 5'te gözlemlenmiştir. Tarımsal gelir tüm senaryolarda benzer bir eğilim göstermiştir. CO₂ emisyonları tüm senaryolarda azalma göstermiş, en büyük düşüşler %1,78 ile senaryo 6'da ve %1,42 ile senaryo 5'te gerçekleşmiştir.



Şekil 4.4: 2075-2100 dönemi için LP senaryolarının sonuçları ve karşılaştırmaları.

LP ile oluşturulan senaryolar ile yapılan analizlerde, mevcut tarımsal gelir düzeyinin korunması, her bir ürün için ekim alanlarındaki değişikliklerin sınırlandırılması ve toplam ekim alanının sabit tutulması gibi kısıtlar dikkate alınırken, tarımsal üretimde elde edilebilecek potansiyel su tasarruflarına odaklanan su merkezli bir bakış açısı benimsenmiştir. Sonuçlar, tarımsal gelir büyük ölçüde korunurken, ürün desenlerinde yapılacak değişikliklerle su kullanımı, enerji gereksinimleri ve CO₂ emisyonlarında önemli miktarda azalma sağlanabileceğini ortaya koymaktadır.

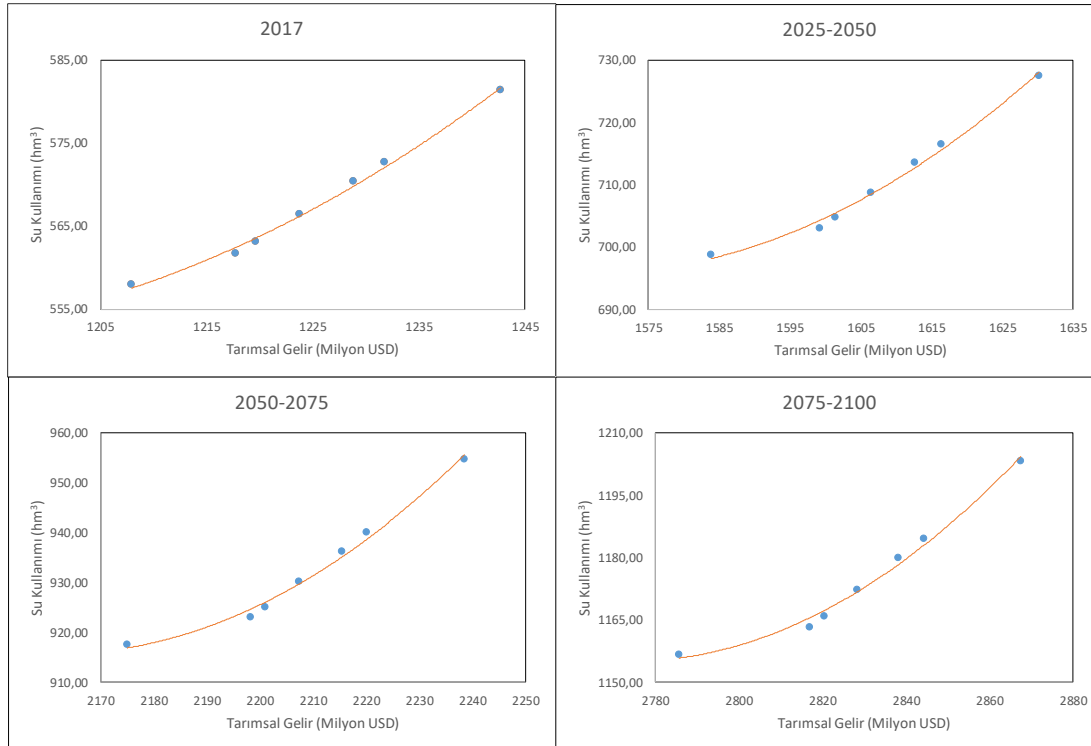
4.2 MOLP Senaryoları ve FEW Bağlantısına Dayalı Değerlendirme

Tez çalışması kapsamında ikinci olarak ise, tarımsal üretimdeki farklı ve birbiriyle çelişen perspektiflere dayalı olarak ekim alanlarındaki değişimleri incelemek ve optimum ekim desenlerini elde etmek için MOLP yöntemi kullanılmıştır. 2017, 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemleri için havzanın mevcut üretim ve projeksiyon verileri baz veya referans senaryo olarak kullanılmıştır. Bu mevcut verilere dayanarak, her bir zaman dilimi için su kullanımı, enerji gereksinimleri, tarımsal gelir ve karbondioksit emisyonları ile ilgili hesaplamalar yapılmıştır. Baz senaryoya ek olarak, değişen ürün desenleri için alternatif senaryolar üretilmiştir.

4.2.1 Senaryoların oluşturulması

Bu senaryoların türetilmesinde, MOLP yönteminde amaç fonksiyonu olarak su kullanımının en aza indirilmesi ve tarımsal gelirin artırılması alınmıştır. Kısıtlar, gelirin baz senaryodakine eşit veya daha yüksek, su kullanımının baz senaryodakine eşit veya daha düşük ve ürün ekim alanları için izin verilen değişim aralığının %5 olması şeklinde belirlenmiştir.

MOLP yöntemi ile optimizasyon sürecinde öncelikle her bir amaç fonksiyonu için ayrı ayrı elde edilen sonuçlar hedef değerler olarak alınmaktadır. Daha sonra her iki amaç birlikte ele alınmakta ve bu hedef değerlerden ağırlıklı sapmalar minimize edilerek Pareto optimal çözümler türetilmektedir. Sonuçların amaçlara atfedilen önem düzeyine göre nasıl değiştiğini araştırmak için, amaçlar için 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 ve 3:1 gibi değişen ağırlık katsayısı oranları kullanılarak beş farklı senaryo incelenmiştir. Bu yaklaşım, farklı ağırlıklandırma uygulamalarının çatışan hedefler arasındaki dengeyi nasıl etkilediğinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak farklı önceliklere dayalı çözümlerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Amaçlar tek başına ele alındığında elde edilen hedef değerler ve farklı ağırlık katsayılarına sahip oldukları durumdaki MOLP çözümleri optimal çözüm eğrileri ile birlikte Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Hedef değerler ve farklı ağırlıklı durumlardaki MOLP çözümleri.

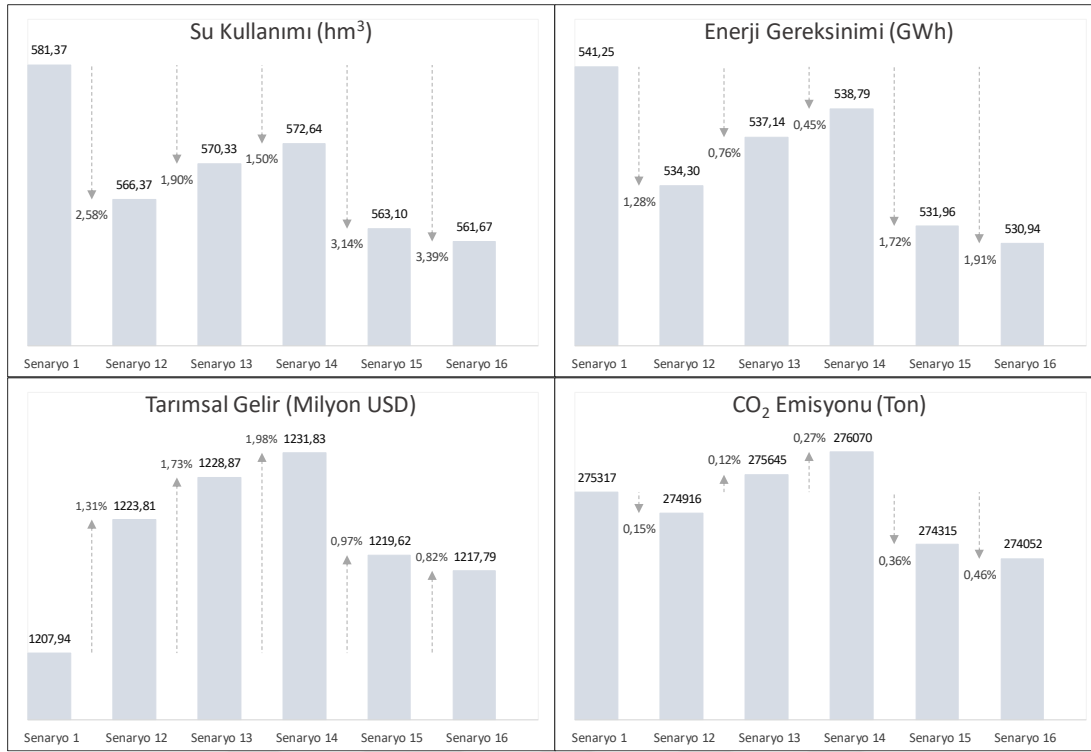
İncelenen senaryoların isimlendirilmesinde, mevcut verilere dayanan baz senaryo karşılaştırmalar için referans olarak alınmış ve yine senaryo 1 olarak belirtilmiştir. Her iki amaç fonksiyonunun eşit ağırlıkta olduğu durum ise senaryo 12 olarak belirlenmiştir. Ağırlık oranları sırasıyla 1:2 ve 1:3 olan tarımsal gelirin maksimize edilmesine daha fazla odaklanan senaryolar ise senaryo 13 ve senaryo 14 olarak adlandırılmıştır. Buna karşılık, 2:1 ve 3:1 ağırlık oranlarıyla su kullanımını en aza indirmeyi vurgulayan senaryolar senaryo 15 ve 16 olarak isimlendirilmiştir.

Amaçlara farklı ağırlık katsayıları atanan senaryolar yanında, ürün ekim alanlarında izin verilen farklı değişim yüzdelерinin çıktı parametreleri üzerindeki etkisi de ayrı senaryolarda incelenmiştir. Benzer şekilde tarımsal gelirin baz senaryodakine eşit veya daha yüksek kalmasını sağlayacak ve su kullanımı baz senaryo seviyesinde veya altında kalacak şekilde kısıtlar uygulanmıştır. Su tasarrufu ve tarımsal gelir maksimizasyonunun dengeli bir şekilde değerlendirilmesini sağlamak için her iki hedefe de eşit ağırlık katsayıları atanmıştır. Ürün ekim alanlarında izin verilen değişimler %2, %4, %6, %8 ve %10 olarak belirlenmiştir ve bu değişim durumlarının incelendiği senaryolar sırasıyla senaryo 17, 18, 19, 20 ve 21 olarak ifade edilmiştir.

Daha sonra tüm senaryolar için su kullanımı, enerji gereksinimi, tarımsal ürünlerden elde edilen gelir ve karbondioksit emisyonu parametreleri FEW nexus kapsamında hesaplanmıştır. Her bir zaman dilimi için bu parametreler karşılaştırılarak senaryolar analiz edilmiştir.

4.2.2 Senaryo sonuçlarının karşılaştırmalı analizi

MOLP ile elde edilen farklı ağırlık katsayılarına sahip senaryolar için su kullanımı, enerji ihtiyacı, tarımsal gelir ve CO₂ emisyonu parametreleri FEW nexus doğrultusunda hesaplanmış ve 2017, 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemlerinde her bir senaryo için karşılaştırılmıştır. İncelenen senaryolarla 2017 yılı için elde edilen sonuçlar ve senaryo sonuçlarının karşılaştırmaları Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6: 2017 yılı için farklı ağırlıklı MOLP senaryoları ile elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmaları.

Senaryo sonuçları 2017 yılı için karşılaştırıldığında, su kullanımında baz senaryoya kıyasla 19,7 milyon m³ ve %3,39 ile en büyük azalma su kullanımının minimize edilmesinin vurgulandığı senaryo 16'da, baz senaryoya kıyasla 8,74 milyon m³ ve %1,5 ile en küçük azalma ise tarımsal gelirin maksimize edilmesinin vurgulandığı senaryo 14'te gözlenmiştir. Enerji ihtiyacı baz senaryoya kıyasla %1,91 ile en fazla senaryo 16'da azalırken, en az azalma %0,45 ile senaryo 14'te görülmüştür. Tarımsal gelirde ise baz senaryoya göre en fazla artış %1,98 ile senaryo 14'te, en az artış ise %0,82 ile senaryo 16'da gerçekleşmiştir. Karbondioksit emisyonları baz senaryoya göre en fazla %0,46 ile senaryo 16'da azalırken, senaryo 14'te %0,27'lik bir artış meydana gelmiştir. Her iki amaç fonksiyonunun eşit ağırlıkta olduğu senaryo 12'de su kullanımının azaltılması ve tarımsal gelirin artırılması amaçları arasında daha dengeli sonuçlar elde edilmiştir.

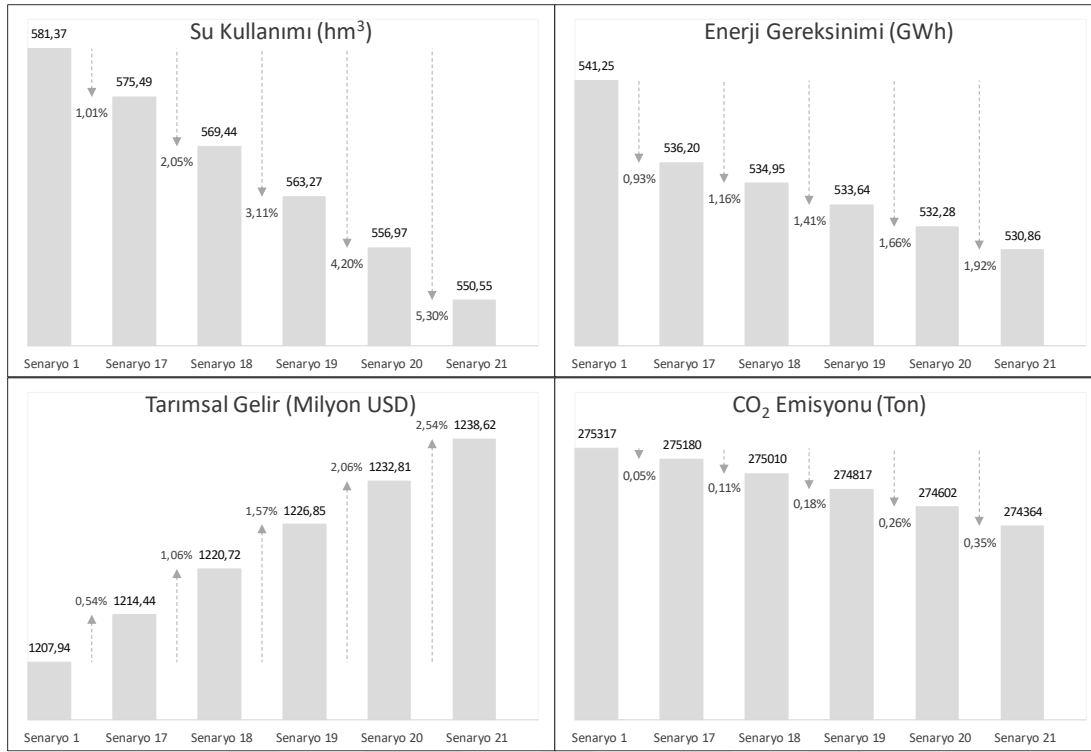
2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemleri için senaryoların sonuçları incelendiğinde, 2017 yılı bulgularına benzer şekilde, Senaryo 16 ve Senaryo 14'ün öne çıkan senaryolar olduğu görülmektedir. İncelenen bu dönemlerde tüm senaryolarda elde edilen baz senaryoya kıyasla su kullanımı, enerji gereksinimleri, tarımsal gelir ve CO₂ emisyonlarındaki yüzde değişimler, her bir zaman dilimi için Çizelge 4.5'te toplu

olarak özetlenmiştir. Bu karşılaştırmalı analiz, bu senaryoların kaynak verimliliği ve tarımsal performans üzerindeki etkisini vurgulamakta ve sürdürülebilir tarımsal planlama için değerli bilgiler sağlamaktadır.

Çizelge 4.5: MOLP aracılığıyla farklı ağırlıklı senaryolar için 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemlerinde su kullanımı, enerji gereksinimi, tarımsal gelir ve CO₂ emisyonlarındaki değişimler.

Dönem	Senaryo	Su Kullanımı (hm ³)	Fark (%)	Enerji Gereksinimi (GWh)	Fark (%)	Gelir (Milyon USD)	Fark (%)	CO ₂ Emisyonu (Ton)	Fark (%)
2025-2050	Senaryo 1	727,59	—	681,59	—	1583,859	—	346713,9	—
	Senaryo 12	708,78	-2,59	673,25	-1,22	1606,508	1,43	346630,9	-0,02
	Senaryo 13	713,63	-1,92	676,72	-0,71	1612,715	1,82	347523,3	0,23
	Senaryo 14	716,49	-1,53	678,78	-0,41	1616,383	2,05	348050,6	0,39
	Senaryo 15	704,83	-3,13	670,42	-1,64	1601,456	1,11	345904,6	-0,23
	Senaryo 16	703,12	-3,36	669,20	-1,82	1599,267	0,97	345589,8	-0,32
2050-2075	Senaryo 1	954,76	—	901,27	—	2174,862	—	455845,4	—
	Senaryo 12	930,10	-2,58	891,00	-1,14	2207,381	1,50	456505,8	0,14
	Senaryo 13	936,31	-1,93	895,46	-0,64	2215,340	1,86	457650,1	0,40
	Senaryo 14	940,03	-1,54	898,12	-0,35	2220,100	2,08	458334,4	0,55
	Senaryo 15	925,11	-3,11	887,42	-1,54	2200,990	1,20	455586,8	-0,06
	Senaryo 16	922,96	-3,33	885,89	-1,71	2198,244	1,08	455192,0	-0,14
2075-2100	Senaryo 1	1203,24	—	1141,60	—	2785,756	—	578133,2	—
	Senaryo 12	1172,18	-2,58	1128,89	-1,11	2828,353	1,53	579133,7	0,17
	Senaryo 13	1179,95	-1,94	1134,46	-0,63	2838,300	1,89	580563,9	0,42
	Senaryo 14	1184,61	-1,55	1137,80	-0,33	2844,272	2,10	581422,5	0,57
	Senaryo 15	1165,97	-3,10	1124,44	-1,50	2820,400	1,24	577990,3	-0,02
	Senaryo 16	1163,31	-3,32	1122,54	-1,67	2816,993	1,12	577500,5	-0,11

MOLP kullanılarak elde edilen ve ürün ekim alanlarımda farklı değişim oranlarına sahip senaryolar için de su kullanımı, enerji gereksinimi, tarımsal gelir ve CO₂ emisyonu parametreleri FEW nexus çerçevesinde hesaplanmış ve 2017, 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemlerinde her bir senaryo için karşılaştırılmıştır. İncelenen senaryolarla 2017 için elde edilen sonuçlar ve senaryo sonuçlarının karşılaştırmaları Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7: 2017 yılı için farklı ekim alanı değişim oranlı MOLP senaryoları ile elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmaları.

2017 yılı için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, su kullanımındaki en büyük azalmanın, ekim alanlarında %10'luk bir değişime izin veren senaryo 21'de 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 20 gelmektedir. Enerji ihtiyacındaki en fazla azalma da yine baz senaryoya kıyasla %1,92 ile senaryo 21'de ve %1,66 ile senaryo 20'de görülmüştür. Tarımsal gelire dair sonuçlar analiz edildiğinde de benzer şekilde senaryo 21 ve senaryo 20'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 dönemlerine ait senaryoların sonuçları değerlendirildiğinde, 2017 yılına ait bulgulara paralel olarak Senaryo 21 ve Senaryo 20'nin en belirgin senaryolar olduğu görülmektedir. Bu dönemler için tüm senaryolarda elde edilen sonuçlar ile bu sonuçların referans senaryoya göre yüzde değişimleri, her zaman aralığı için toplu olarak Çizelge 4.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.6: MOLP aracılığıyla farklı ekim alanı değişim oranlı senaryolar için 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemlerinde su kullanımı, enerji gereksinimi, tarımsal gelir ve CO₂ emisyonlarındaki değişimler.

Dönem	Senaryo	Su Kullanımı (hm ³)	Fark (%)	Enerji Gereksinimi (GWh)	Fark (%)	Gelir (Milyon USD)	Fark (%)	CO ₂ Emisyonu (Ton)	Fark (%)
2025-2050	Senaryo 1	727,59	—	681,59	—	1583,859	—	346713,9	—
	Senaryo 17	720,22	-1,01	675,40	-0,91	1593,109	0,58	346709,6	0,00
	Senaryo 18	712,63	-2,06	673,99	-1,12	1602,090	1,15	346664,0	-0,01
	Senaryo 19	704,89	-3,12	672,50	-1,33	1610,879	1,71	346591,0	-0,04
	Senaryo 20	697,01	-4,20	670,94	-1,56	1619,478	2,25	346490,6	-0,06
	Senaryo 21	688,98	-5,31	669,32	-1,80	1627,889	2,78	346363,0	-0,10
2050-2075	Senaryo 1	954,76	—	901,27	—	2174,862	—	455845,4	—
	Senaryo 17	945,09	-1,01	893,42	-0,87	2188,112	0,61	456146,6	0,07
	Senaryo 18	935,14	-2,06	891,83	-1,05	2201,018	1,20	456394,7	0,12
	Senaryo 19	925,01	-3,12	890,15	-1,23	2213,684	1,79	456608,2	0,17
	Senaryo 20	914,69	-4,20	888,39	-1,43	2226,110	2,36	456787,3	0,21
	Senaryo 21	904,18	-5,30	886,54	-1,63	2238,299	2,92	456932,3	0,24
2075-2100	Senaryo 1	1203,24	—	1141,60	—	2785,756	—	578133,2	—
	Senaryo 17	1191,05	-1,01	1131,81	-0,86	2803,098	0,62	578580,0	0,08
	Senaryo 18	1178,53	-2,05	1129,89	-1,03	2820,009	1,23	578959,9	0,14
	Senaryo 19	1165,77	-3,11	1127,87	-1,20	2836,621	1,83	579296,7	0,20
	Senaryo 20	1152,78	-4,19	1125,73	-1,39	2852,937	2,41	579590,9	0,25
	Senaryo 21	1139,56	-5,29	1123,50	-1,59	2868,957	2,99	579842,6	0,30

MOLP ile oluşturulan senaryolar ile yapılan analizlerde, gelirin en azından baz senaryo seviyesinde tutulması, su kullanımının baz senaryodakini aşmamasının sağlanması ve ürün ekim alanlarındaki değişikliklerin sınırlandırılması gibi kısıtlamalarla birlikte hem su merkezli hem de gelir merkezli bakış açıları incelenmiştir. Bulgular, ekim modellerinin değiştirilmesinin su tüketimi ve enerji taleplerinde önemli azalmalara yol açabileceğini ve aynı zamanda tarımsal geliri artırabileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulguların, Gediz Havzası'nda tarımsal üretim planlaması yoluyla tarımda sürdürülebilirliğin artırılması için politika yapıcılara değerli bilgiler sağlaması amaçlanmaktadır. Tarımsal sulama verimliliğini artırabilecek diğer pratik önlemler için öneriler, sulama sisteminin rehabilitasyonu ve havzanın iklim ve su kaynaklarına uygun ürünlerin teşvik edilmesi olarak sıralanabilir.

Modelleme açısından, çok amaçlı programlama yöntemleri, mahsul planlama problemlerinde en sık uygulanan tekniklerdir (Yıldırım ve diğ., 2023). Bunun nedeni, bu tür problemlerin, kaynak tahsisi, sürdürülebilirlik ve ekonomik getiri gibi tarımın çeşitli yönlerini hesaba katması gereken stratejik kararları içermesidir ve bunların

tümü, çoklu hedefler arasında denge kurulmasını gerektirir. Mahsul yönetimine odaklanan çalışmalar genellikle çevresel sürdürülebilirliği vurgulamakta, özellikle herbisit ve pestisit gibi kimyasalların kullanımını azaltmanın yanı sıra gübrelerin uygun miktarlarda ve en uygun zamanlarda uygulanmasına odaklanmaktadır (Ahodo ve diğ., 2019). Mardani Najafabadi ve diğ. (2019), İran'ın İsfahan eyaletinde bölgesel ekim düzeni konusunda alınacak kararları optimize etmek için çok amaçlı bir model önermiştir. Model, ekonomik, sosyal ve çevresel hedefleri ele almıştır. Benzer şekilde, Mardani Najafabadi ve Ashktorab (2022), İran'ın güneybatısındaki Gotvand bölgesinde ekim desenini optimize ederek sürdürülebilir tarımsal üretimin ekolojik ve sosyal boyutlarını incelemiştir. Sonuçları, istihdamda %2,2'lik bir artışın yanı sıra, kimyasal pestisitler gibi sürdürülebilir tarıma zarar veren kritik girdilerin kullanımında önemli azalmalar olduğunu göstermiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarım, küresel tatlı su tüketiminin yaklaşık %70'ini oluşturarak en büyük su tüketicisi konumundadır ve aynı zamanda dünya genelinde toplam enerjinin yaklaşık %30'unu kullanmaktadır. Bu durum, gıda talebini yeterince karşılarken su ve enerji kaynaklarının verimli kullanımı için giderek artan bir zorlayıcı durum oluşturmaktadır. Bu nedenle gıda, enerji ve su kaynakları arasındaki karşılıklı ilişkilerin anlaşılması büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışması ile de LP ve MOLP yöntemleri aracılığıyla optimum ürün desenleri belirlenmiş ve bunlara bağlı olarak FEW bağlantısına dayalı olarak çıktı parametreleri hesaplanmıştır.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak tarımsal üretimde su kullanımını en aza indirmek amacıyla en uygun ekim deseninin elde edilmesi için çeşitli senaryolar incelenmiştir. LP yöntemi, havzadaki her bir ürün türü için su tüketimini minimum yapan ekim alanlarını bulmak için kullanılmıştır. Ürün deseni değişim senaryolarında LP modeli için kısıtlar, gelirin baz senaryodaki tarımsal gelir miktarına eşit veya daha yüksek olması, toplam ekim alanının baz senaryodakine eşit veya daha büyük olması ve ekim alanlarında %1, %2, %3, %4 ve %5 aralıklarında mekânsal değişikliklere izin verilmesi olarak belirlenmiştir.

İkinci olarak ise, tarımsal üretimde çatışan hedeflerin araştırılması için, optimum ekim alanlarının elde edilmesinde MOLP yöntemi kullanılmıştır. MOLP modelinde amaç fonksiyonları su kullanımının minimize edilmesi ve tarımsal gelirin maksimize edilmesi olarak belirlenmiştir. Her bir amaç fonksiyonuna atfedilen öneme göre değişen ağırlık katsayıları ile tarımsal üretimde farklı perspektiflerin önceliklendirilmesi altı farklı senaryoda incelenmiştir.

Çalışmada, amaçlara farklı ağırlık katsayıları atanmasının yanı sıra, ekim alanlarındaki izin verilen değişiklik yüzdelерinin farklı senaryolar altında çıktı parametrelerini nasıl etkilediği de araştırılmıştır. Benzer şekilde, tarımsal gelirin mevcut seviyede veya

üzerinde tutulması ve su kullanımının mevcut seviyede veya altında kalması için kısıtlamalar getirilmiştir.

2017, 2025-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemleri için mevcut veriler, LP ve MOLP aracılığıyla elde edilen ürün desenleri kullanılarak, FEW nexus bağlamında, her senaryo için su kullanımı, enerji gereksinimleri, tarımsal gelir ve karbondioksit emisyonları gibi parametreler hesaplanmıştır. Tüm senaryoların sonuçları daha sonra karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmanın alana getirdiği yenilik ve yaptığı temel katkı, FEW nexus temelli değerlendirmelerin ekim desenlerinin optimize edilmesi sürecine entegre edilmesidir.

LP modeli senaryolarının sonuçları ve karşılaştırmaları, tarımsal gelir büyük ölçüde aynı seviyede kalırken, su kullanımı, enerji ihtiyacı ve CO₂ emisyonlarında dikkate değer düşüşlerin yalnızca ürün desenindeki değişikliklerle gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. LP modeline toplam ekim alanının baz senaryodakine eşit veya daha büyük olmasını zorunlu kılan bir kısıtın dahil edilmesinin potansiyel azaltımları kısıtladığı gözlemlenmiştir. Toplam ekim alanı kısıtlamasının olmadığı senaryolar, benzer yüzdesel değişikliklere sahip ancak toplam ekim alanı kısıtlaması olan senaryolara kıyasla daha üstün sonuçlar vermiştir. Ekim alanlarında farklı değişim oranlarına sahip çeşitli senaryoların incelenmesi ve tarımsal su kullanımı, enerji gereksinimleri ve CO₂ emisyonlarında buna karşılık gelen azalmaların gözlemlenmesi, ilgili ödünleşimlerin altını çizmektedir. İzin verilen yüzde değişiklikleri azaldığında, bu çıktı parametreleri daha küçük azalmalar göstermiş ve daha az elverişli sonuçlara yol açmıştır. Ürün ekim alanında izin verilen yüzde değişiklikleri arttıkça, daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

LP modeli senaryoları içinde, tüm zaman dilimleri boyunca incelendiğinde, senaryo 6 en iyi senaryo olarak belirlenmiş ve baz senaryoya kıyasla su kullanımında ortalama %3,94, enerji gereksinimlerinde ortalama %2,95 ve CO₂ emisyonlarında %1,62 azalma sağlamıştır. Senaryo 11, tüm zaman dilimlerinde su kullanımında ortalama %3,45'lik bir azalma sağlayarak su tasarrufu açısından en iyi ikinci senaryo olmuştur, ancak enerji gereksinimlerinde ortalama %1,85'lik bir azalma ve CO₂ emisyonlarında yalnızca %0,11'lik bir azalma sağlamıştır. Su kullanımının azaltılmasında üçüncü sırada yer alan Senaryo 5, tüm dönemlerde su kullanımında ortalama %3,15, enerji ihtiyacında %2,36 ve CO₂ emisyonlarında %1,29 azalma sağlamıştır. Önerilen model

ile tüm bu sonuçlarda sağlanan iyileşmelerin tarımın sürdürülebilir yönetimine katkı sağlaması açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

MOLP modeli ile elde edilen sonuçlara göre ise, tüm ürün deseni değişikliği senaryoları su kullanımı ve enerji gereksinimlerinde azalma ve tarımsal gelirden artış göstermiştir. Ancak, karbondioksit emisyonları tarımsal gelirin maksimize edilmesine daha fazla ağırlık verilen senaryolarda artarken, su kullanımının minimize edilmesine daha fazla ağırlık verilen senaryolarda azalmaktadır.

Su kullanımını en aza indirmeye daha fazla önem vermenin su talebini ve enerji gereksinimlerini azaltmada daha etkili olduğu, ancak tarımsal geliri artırmada ve karbondioksit emisyonlarını azaltmada daha az etkili olduğu belirlenmiştir. Tersine, tarımsal geliri en üst düzeye çıkarmaya daha fazla önem vermenin geliri artırmada daha etkili olduğu, ancak su kullanımı ve enerji gereksinimlerini azaltmada daha az etkili olduğu ve karbondioksit emisyonlarını artırdığı görülmüştür.

MOLP modeli senaryoları içerisinde, tüm zaman dilimleri için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bazı senaryoya kıyasla su kullanımında ortalama %3,35 azalma, enerji talebinde ortalama %1,78 azalma, karbondioksit emisyonlarında ortalama %0,26 azalma ve tarımsal gelirden ortalama %1 artış sağlayan senaryo 16, su kullanımının en aza indirilmesi amacının ön planda tutulması halinde en iyi senaryo olarak belirlenmiştir. Ancak tarımsal gelirin maksimize edilmesi önceliklendirildiğinde, tüm zaman dilimlerinde tarımsal gelirden ortalama %2,05 artış sağlayan Senaryo 14 en uygun senaryo olarak belirlenmiştir. Her iki amaç fonksiyonuna da eşit önem verilen Senaryo 12, tüm zaman dilimlerinde daha dengeli sonuçlar vermiştir.

Ekim alanlarında müsaade edilen değişim oranlarının farklı değerlerinin incelendiği MOLP senaryolarında 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. Bu senaryolar arasında senaryo 21 en etkili senaryo olarak öne çıkmakta ve bazı senaryoya kıyasla su kullanımında ortalama %5.30 azalma, enerji gereksinimlerinde ortalama %1.74 azalma ve tarımsal gelirden ortalama %2.81 artış sağlamaktadır. Bu senaryo, su

tasarrufu ve gelir artışının eşit derecede önemli kabul edilmesi halinde en uygun seçenek olarak ortaya çıkmaktadır.

Çalışmanın bulgularının, Gediz Havzası'nda tarımın yaygın olduğu bölgelerde tarımsal üretim planlamasının sürdürülebilirliğinin artırılması için karar vericilere değerli bilgiler sunacağı düşünülmektedir. Bu çalışmanın sonuçları belirli bir bölge için elde edilmiş olsa da, uygulanan metodoloji diğer çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere kolayca adapte edilebilecek niteliktedir.



KAYNAKLAR

- Abdi, H., Shahbazitabar, M. & Mohammadi-Ivatloo, B.** (2020). Food, Energy and Water Nexus: A Brief Review of Definitions, Research and Challenges. *Inventions*, 5(4), 56. doi:10.3390/inventions5040056.
- Ahodo, K., Oglethorpe, D., Hicks, H. L. & Freckleton R. P.** (2019). Estimating the farm-level economic costs of spring cropping to manage *Alopecurus myosuroides* (blackgrass) in UK agriculture. *The Journal of Agricultural Science*, 157, 318–332. doi: 10.1017/S0021859619000650
- Albrecht, T. R., Crotoft, A. & Scott, C. A.** (2018). The water-energy-food nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. *Environmental Research Letters*, 13 (4), 043002. doi: 10.1088/1748-9326/aaa9c6.
- Amini Fasakhodi, A., Nouri, H. & Amini, M.** (2010). Water resources sustainability and optimal cropping pattern in farming systems; a multi-objective fractional goal programming approach. *Water Resources Management*, 24, 4639-4657. doi: 10.1007/s11269-010-9683-z.
- Ansari, A., Wuryandani, S., Pranesti, A., Telaumbanua, M., Ngadisih, Hardiansyah, M. Y., ..., Taryono.** (2023). Optimizing water-energy-food nexus: achieving economic prosperity and environmental sustainability in agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1207197. doi:10.3389/fsufs.2023.1207197.
- Antunes, C. H., Alves, M. J. & Clímaco, J.** (2016). *Multiobjective Linear and Integer Programming*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-28746-1.
- Atis, E.** (2006). Economic impacts on cotton production due to land degradation in the Gediz Delta, Turkey. *Land Use Policy*, 23, 181-186. doi:10.1016/j.landusepol.2004.06.004.
- Ballestro, E. & Romero, C.** (1998). *Multiple criteria decisions making and its applications to economic problems*. New York: Springer Science+Business Media. doi: 10.1007/978-1-4757-2827-9.
- Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., ..., Yumkella, K. K.** (2011). Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, 39 (12), 7896–7906. doi: 10.1016/j.enpol.2011.09.039.
- Bhatia, M. & Rana, A.** (2020). Integrated Farm Model for Optimal Allocation of Resources-A Linear Programming Approach. *Applications and Applied Mathematics: An International Journal (AAM)*, 15 (2), 1336-1347.

- Bhuvandas, N., Mirajkar, A. B., Timbadiya, P. V. & Patel, P.L.** (2010). Optimization of Irrigation Area of Ukai Right Bank Main Canal-A Linear Programming Approach. *AIP Conference Proceeding*, 1324 (1), 127–129. doi: 10.1063/1.3526173.
- Bowman, V. J.** (1976). On the Relationship of the Tchebycheff Norm and the Efficient Frontier of Multiple-Criteria Objectives. In: Thiriez, H., Zionts, S. (eds) *Multiple Criteria Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Berlin: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-87563-2_5.
- Caputo, S., Schoen, V., Specht, K., Grard, B., Blythe, C., Cohen, N., ..., Ponizy, L.** (2021). Applying the food-energy-water nexus approach to urban agriculture: From FEW to FEWP (Food-Energy-Water-People). *Urban Forestry & Urban Greening*, 58, 126934. doi: 10.1016/j.ufug.2020.126934.
- Charnes A., Cooper W. W. & Ferguson, R. O.** (1955). Optimal estimation of executive compensation by linear programming. *Management Science*, 1, 138-151. doi: 10.1287/mnsc.1.2.138.
- Charnes, A. & Cooper, W. W.** (1961). *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*. New York: John Wiley and Sons.
- Chen, B., Han, M. Y., Peng, K., Zhou, S. L., Shao, L., Wu, X. F., ..., Chen, G. Q.** (2018). Global land-water nexus: Agricultural land and freshwater use embodied in worldwide supply chains. *Science of the Total Environment*, 613–614, 931–943. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.138.
- Cheng, H., Jiang, X., Wang, M., Zhu, T., Wang, L., Miao, L., ..., Cheng, J.** (2023). Optimal allocation of agricultural water and land resources integrated with virtual water trade: A perspective on spatial virtual water coordination. *Journal of Environmental Management*, 347, 119189. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119189.
- Cochrane, J. L. & Zeleny, M. (eds).** (1973). *Multiple Criteria Decision Making*. Columbia: University of South Carolina Press.
- Daghighi, A., Nahvi, A. & Kim, U.** (2017). Optimal Cultivation Pattern to Increase Revenue and Reduce Water Use: Application of Linear Programming to Arjan Plain in Fars Province. *Agriculture*, 7 (9), 73. doi: 10.3390/agriculture7090073.
- Daher, B. T. & Mohtar, R. H.** (2015). Water–energy–food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. *Water International*, 40 (5–6), 748–771. doi: 10.1080/02508060.2015.1074148.
- Dantzig, G. B. & Thapa, M. N.** (1997). *Linear Programming 1: Introduction*. New York: Springer-Verlag. doi: 10.1007/b97672.
- Dantzig, G. B.** (1963). *Linear Programming and Extensions*. Princeton: Princeton University Press.

- Dargin, J., Daher, B. & Mohtar, R. H.** (2019). Complexity versus simplicity in water energy food nexus (WEF) assessment tools. *Science of the Total Environment*, 650, 1566–1575. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.080.
- Degirmencioglu, A., Mohtar, R. H., Daher, B. T., Ozgunaltay-Ertugrul, G. & Ertugrul, O.** (2019). Assessing the Sustainability of Crop Production in the Gediz Basin, Turkey: A Water, Energy, and Food Nexus Approach. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(4), 2511-2522.
- Dengiz, O.** (2018). Potential impact of land use change on land productivity dynamics with focus on land degradation in a sub-humid terrestrial ecosystem. *Theoretical and Applied Climatology*, 133, 73–88. doi: 10.1007/s00704-017-2162-1.
- Economidou, Y., Doula, M. K. & Zorpas, A. A.** (2021). Mitigation of the effects of climate change in the agricultural sector of Cyprus, through optimization of benefit. *Water Supply*, 21 (6), 2947–2958. doi: 10.2166/ws.2021.118.
- Edmonds, J.** (1965). Paths, Trees, and Flowers. *Canadian Journal of Mathematics*, 17, 449-467. doi: 10.4153/CJM-1965-045-4.
- Eiselt, H. A. & Sandblom, C. L.** (2007). *Linear Programming and Its Applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-540-73671-4.
- El-Gafy, I.** (2017). Water–food–energy nexus index: analysis of water–energy–food nexus of crop’s production system applying the indicators approach. *Applied Water Science*, 7, 2857-2868. doi: 10.1007/s13201-017-0551-3.
- El-Gafy, I., Grigg, N. & Waskom, R.** (2017). Water-food-energy: nexus and non-nexus approaches for optimal cropping pattern. *Water Resources Management*, 31, 4971–4980. doi: 10.1007/s11269-017-1789-0.
- Evans, J. P. & Steuer, R.E.** (1973). A revised simplex method for linear multiple objective programs. *Mathematical Programming*, 5(1), 54–72. doi: 10.1007/BF01580111.
- FAO (Food and Agriculture Organization).** (2009). *Global agriculture towards 2050*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (Food and Agriculture Organization).** (2011). *The State of the World’s Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW) - Managing systems at risk*. London: The Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan.
- FAO (Food and Agriculture Organization).** (2014). *The Water-Energy-Food Nexus. A new approach in support of food security and sustainable agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gadge, S. B., Gorantiwar, S. D., Kumar, V. & Kothari, M.** (2014). Linear programming approach for allocation of land and water resources in canal command area under surface method of irrigation-a case study. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(4), 153–168.
- Geoffrion, A. M.** (1967). Solving Bicriterion Mathematical Programs. *Operations Research*, 15, 39-54. doi: 10.1287/opre.15.1.39.

- Georgiou, P. E. & Papamichail, D. M.** (2008). Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions. *Irrigation Science*, 26, 487–504. doi: 10.1007/s00271-008-0110-7.
- Haimes, Y. Y., Hall, W. A. & Freedman, H. T.** (1975). *Multiobjective Optimization in Water Resources Systems*. New York: Elsevier.
- Halbe, J., Pahl-Wostl, C. A., Lange, M. & Velonis, C.** (2015). Governance of transitions towards sustainable development—the water–energy–food nexus in Cyprus. *Water International*, 40 (5–6), 877–894. doi: 10.1080/02508060.2015.1070328.
- Hillier, F. S. & Lieberman, G. J.** (2010). *Introduction to Operations Research*, 9th. Ed. New York: McGraw-Hill Education.
- Hoff, H.** (2011). Understanding the Nexus. *Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus*. Stockholm: Stockholm Environment Institute.
- Ijiri, Y.** (1965). *Management Goals and Accounting for Control*. Amsterdam: North-Holland Publishing.
- Imron, F. & Murtiningrum** (2021). Optimization of irrigation water allocation by using linear programming: Case study on Belitang irrigation system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 653, 012023. doi: 10.1088/1755-1315/653/1/012023.
- IRENA (International Renewable Energy Agency).** (2015). *Renewable energy and the water, energy and food nexus*. Abu Dhabi: IRENA.
- Keramatzadeh, A., Chizari, A. H. & Moore, R.** (2011). Economic optimal allocation of agriculture water: mathematical programming approach. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13, 477–490.
- Koopmans, T. C.** (1951). Analysis of production as an efficient combination of activities. In: T.C. Koopmans (ed), *Activity analysis of production and allocation* (vol 13, pp. 33-37), Wiley, New York. Retrieved from <https://cowles.yale.edu/sites/default/files/2022-09/m13-all.pdf>
- Kuhn H. W. & Tucker A. W.** (1951). Nonlinear programming. In: J. Neyman, (ed), *Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, (pp. 481–492). Berkeley, CA: University of California, July 31-August 12, 1950.
- Kulat, M. I., Mohtar, R. H. & Olivera, F.** (2019). Holistic Water-Energy-Food Nexus for Guiding Water Resources Planning: Matagorda County, Texas Case. *Frontiers in Environmental Science*, 7 (3). doi: 10.3389/fenvs.2019.00003.
- Kumar, S. B., Ramesh, B. R. & Surendra, H. J.** (2022). Optimal cropping pattern for a tail-end distributary canal of Bhadra command area using linear programming model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8, 3897–3906. doi: 10.1007/s40808-021-01338-7.
- Kumar, V. & Sen, S.** (2020). Assessment of spring potential for sustainable agriculture: a case study in lesser Himalayas. *Applied Engineering in Agriculture*, 36 (1), 11-24. doi: 10.13031/aea.13520.

- Kurian, M.** (2017). The water-energy-food nexus: trade-offs, thresholds and transdisciplinary approaches to sustainable development. *Environmental Science & Policy*, 68, 97–106. doi: 10.1016/j.envsci.2016.11.006.
- Labadie, J. W.** (2004). Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130 (2), 93-110. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(93).
- Leck, H., Conway, D., Bradshaw, M. & Rees, J.** (2015). Tracing the Water–Energy–Food Nexus: Description, Theory and Practice. *Geography Compass*, 9 (8), 445-460. doi: 10.1111/gec3.12222.
- Li, M., Fu, Q., Singh, V. P., Liu, D. & Li, T.** (2019). Stochastic multi-objective modeling for optimization of water-food-energy nexus of irrigated agriculture. *Advances in Water Resources*, 127, 209–224. doi: 10.1016/j.advwatres.2019.03.015.
- Li, M., Fu, Q., Singh, V., Ji, Y., Liu, D., Zhang, C. & Li, T.** (2019). An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty. *Science of the Total Environment*, 651, 1416–1434. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.291.
- Lobato, F. S. & Steffen Jr. S.** (2017). *Multi-Objective Optimization Problems Concepts and Self-Adaptive Parameters with Mathematical and Engineering Applications*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Loucks, D. P. & Van Beek, E.** (2017). *Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications*, 1st. Ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Luc, D. T.** (2016). *Multiobjective Linear Programming: An Introduction*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing,. doi: 10.1007/978-3-319-21091-9.
- Luenberger, D. G. & Ye, Y. Y.** (2008). *Linear and Nonlinear Programming*. New York: Springer-Verlag US. doi: 10.1007/978-0-387-74503-9.
- Mainuddin, M., Gupta, A. D. & Onta, P. R.** (1997). Optimal crop planning model for an existing groundwater irrigation project in Thailand. *Agricultural Water Management*, 33 (1), 43–62. doi: 10.1016/S0378-3774(96)01278-4.
- Mardani Najafabadi, M. & Ashktorab, N.** (2022). Mathematical programming approaches for modeling a sustainable cropping pattern under uncertainty: a case study in Southern Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 9731–9755. doi: 10.1007/s10668-022-02458-5.
- Mardani Najafabadi, M., Ziaee, S., Nikouei, A. & Ahmadpour Borazjani, M.** (2019). Mathematical programming model (MMP) for optimization of regional cropping patterns decisions: A case study. *Agricultural Systems*, 173, 218-232. doi: 10.1016/j.agsy.2019.02.006.
- Marglin, S. A.** (1967). *Public Investment Criteria*. Cambridge: Allen and Unwin and MIT Press.

- Matoušek, J. & Gärtner, B.** (2007). *Understanding and Using Linear Programming*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-540-30717-4.
- Mirzaei, A., Abdeslahi, A., Azarm, H. & Naghavi, S.** (2021). New design of water-energy-food-environment nexus for sustainable agricultural management. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, 1861–1874. doi: 10.1007/s00477-021-02131-9.
- Mirzaei, A., Azarm, H. & Naghavi, S.** (2022). Optimization of cropping pattern under seasonal fluctuations of surface water using multistage stochastic programming. *Water Supply*, 22 (6), 5716–5728. doi: 10.2166/ws.2022.224.
- Mohtar, R. H. & Daher, B.** (2012). Water, Energy, and Food: The Ultimate Nexus. In: *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton. doi: 10.1081/E-EAFE2-120048376.
- Mohtar, R. H. & Daher, B.** (2014). *A Platform for Trade-off Analysis and Resource Allocation: The Water-Energy-Food Nexus Tool and its Application to Qatar's Food Security*. Chatham House, United Kingdom.
- Namany, S., Al-Ansari, T. & Govindan, R.** (2019). Optimisation of the energy, water, and food nexus for food security scenarios. *Computers & Chemical Engineering*, 129, 106513. doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.106513.
- Nie, Y., Avraamidou, S., Xiao, X., Pistikopoulos, E. N., Li, J., Zeng, Y., ..., Zhu, M.** (2019). A Food-Energy-Water Nexus approach for land use optimization. *Science of the Total Environment*, 659, 7–19. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.242.
- Niu, G., Zheng, Y., Han, F. & Qin, H.** (2019). The nexus of water, ecosystems and agriculture in arid areas: A multiobjective optimization study on system efficiencies. *Agricultural Water Management*, 223, 105697. doi: 10.1016/j.agwat.2019.105697.
- Osama, S., Elkholy, M. & Kansoh, R. M.** (2017). Optimization of the cropping pattern in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 56 (4), 557–566. doi: 10.1016/j.aej.2017.04.015.
- Proctor, K. W., Tabatabaie, S. M. H. & Murthy, G. S.** (2021). Gateway to the perspectives of the Food-Energy-Water nexus. *Science of the Total Environment*, 764, 142852. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142852.
- Raju, K. S. & Kumar, D. N.** (1999). Multicriterion decision making in irrigation planning. *Agricultural Systems*, 62, 117–129. doi: 10.1016/S0308-521X(99)00060-8.
- Ren, C., Li, Z. & Zhang, H.** (2019). Integrated multi-objective stochastic fuzzy programming and AHP method for agricultural water and land optimization allocation under multiple uncertainties. *Journal of Cleaner Production*, 210, 12–24. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.348.
- Ripoche A., Autfray P., Rabary B., Randriamanantsoa R., Blanchart E., Trap J., ..., Letourmy P.** (2021). Increasing plant diversity promotes ecosystem functions in rainfed rice based short rotations in Malagasy

- highlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 320, 107576. doi: 10.1016/j.agee.2021.107576.
- Sakawa, M., Yano, H. & Nishizaki, I.** (2013). *Linear and multi-objective programming with fuzzy stochastic extensions*. New York: Springer Science Business Media. doi: 10.1007/978-1-4614-9399-0.
- Saker, R. A. & Quaddus, M. A.** (2002). Modelling a nationwide crop planning problem using a multiple criteria decision making tool. *Computers & Industrial Engineering*, 42, 541–553. doi: 10.1016/S0360-8352(02)00022-0.
- Saray, M. H., Baubekova, A., Gohari, A., Eslamian, S.S., Klove, B. & Haghighi, A.T.** (2022). Optimization of water-energy-food nexus considering CO₂ emissions from cropland: A case study in northwest Iran. *Applied Energy*, 307, 118236. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118236.
- Sarker, R., Talukdar, S. & Anwarul, H.** (1997). Determination of optimal crop mix for crop cultivation in Bangladesh. *Applied Mathematical Modelling*, 21 (10), 621-632. doi: 10.1016/S0307-904X(97)00083-8.
- Siah, Q. & Zabiri, H.** (2022). Modeling and Optimization of Water–Food–Energy Nexus for Malaysia’s Agricultural Sector. *Sustainability*, 14 (3), 1799. doi: 10.3390/su14031799.
- Simonovic, S. P.** (1992). Reservoir Systems Analysis: Closing Gap between Theory and Practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118 (3), 262-280. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1992)118:3(262).
- Singh, D. K., Jaiswal, C. S., Reddy, K. S., Singh, R. M. & Bhandarkar, D. M.** (2001). Optimal cropping pattern in a canal command area. *Agricultural Water Management*, 50 (1), 1-8. doi: 10.1016/S0378-3774(01)00104-4.
- Stancu-Minasian, I. M. & Pop, B.** (2003). On a fuzzy set approach to solving multiple objective linear fractional programming problem. *Fuzzy Sets and Systems*, 134, 397–405. doi: 10.1016/S0165-0114(02)00142-2.
- SYGM (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü).** (2018). *Gediz Nehir Havzası Yönetim Planı Hazırlanması Projesi Nihai Raporu*. Ankara: Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- SYGM (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü).** (2019). *Gediz Havzası Kuraklık Yönetim Planı Nihai Raporu*. Ankara: Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- Tian, H., Lu, C., Pan, S., Yang, J., Miao, R., Ren, W., ..., Reilly, J.** (2018). Optimizing resource use efficiencies in the food-energy-water nexus for sustainable agriculture: from conceptual model to decision support system. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 33, 104–113. doi: 10.1016/j.cosust.2018.04.003.
- Tiemann, L. K., Grandy, A. S., Atkinson, E. E., Marin-Spiotta, E. & McDaniel, M. D.** (2015). Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecology Letters*, 18, 761–771. doi: 10.1111/ele.12453.
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu).** (2014). *Bitkisel Üretim İstatistikleri*, Ankara: Türkiye İstatistik Kurumu.

- UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). (2018). *Methodology for Assessing the Water-Food-Energy-Ecosystems Nexus in Transboundary Basins and Experiences from its Application: Synthesis*. No. ECE/MP.WAT/55. New York and Geneva: United Nations.
- United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution. Retrieved from https://www.unfpa.org/sites/default/files/resource-pdf/Resolution_A_RES_70_1_EN.pdf.
- Vivekanandan, N. & Viswanathan, K. (2007). Optimization of multi-objective cropping pattern using linear and goal programming approaches. *Mausam*, 58, 323-334. doi: 10.54302/mausam.v58i3.1326.
- Von Neumann, J. & Morgenstern, O. (1947). *Theory of games and economic behavior*. Princeton: Princeton University Press.
- Wang, J., Wang, J., Ge, W. & Xie, K. (2022). Interactive quantitative modeling and cost optimization of regional sustainable development based on water-energy-food nexus. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 1070-1081. doi: 10.1016/j.spc.2022.01.031.
- Wood, S. & Cowie, A. (2004). *A Review of Greenhouse Gas Emission Factors for Fertiliser Production*. IEA Bioenergy Task 38.
- Xevi, E. & Khan, S. (2005). A multi-objective optimisation approach to water management. *Journal of Environmental Management*, 77, 269–277. doi: 10.1016/j.jenvman.2005.06.013.
- Ye, Z., Miao, P., Li, N., Wang, Y., Zhang, W. & Yin, S. (2023). Optimizing water efficiency and energy productivity in choosing a cropping pattern. *Water Supply*, 23 (7), 2899–2906. doi: 10.2166/ws.2023.148.
- Yıldırım, Y. E., Taş, İ., & Özaydın, K. A. (2019). Referans Evapotranspirasyonun Mekansal Değişiminin Belirlenmesinde Gediz Havzası Örneği. *Toprak Su Dergisi*, 8 (Özel Sayı), 153-161. doi: 10.21657/topraksu.655582.
- Yıldırım, Y., Ulucan, A., & Atıcı, K. B. (2023). Recent Advances in Planning Farm Operations through Optimization Models. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 41 (Tarım Özel Sayısı), 124-144. doi: 10.17065/huniibf.1233694.
- Yu, P. L. & Zeleny, M. (1975). The set of all nondominated solutions in linear cases and a multicriteria simplex method. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 49 (2), 430–468. doi: 10.1016/0022-247X(75)90189-4.
- Yuan, M. H. & Lo, S. L. (2020). Developing indicators for the monitoring of the sustainability of food, energy, and water. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109565. doi: 10.1016/j.rser.2019.109565.
- Yuan, M. H. & Lo, S. L. (2022). Principles of food-energy-water nexus governance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111937. doi: 10.1016/j.rser.2021.111937.
- Yue, Q., Zhang, F., Wang, Y., Zhang, X. & Guo, P. (2021). Fuzzy multi-objective modelling for managing water-food-energy-climate change-land nexus

- towards sustainability. *Journal of Hydrology*, 596, 125704. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125704.
- Zadeh L.** (1963). Optimality and non-scalar-valued performance criteria. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 8 (1), 59-60. doi: 10.1109/TAC.1963.1105511.
- Zeleny, M.** (1974). *Linear Multiobjective Programming*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-80808-1.
- Zeng, X., Kang, S., Li, F., Zhang, L. & Guo, P.** (2010). Fuzzy multi-objective linear programming applying to crop area planning. *Agricultural Water Management*, 98 (1), 134-142. doi: 10.1016/j.agwat.2010.08.010.
- Zhang, P., Jia, M. & Wei, X.** (2024). Sustainable water–ecosystem management using the Bayesian network and variable relationship analysis. *Water Supply*, 24 (6), 1999–2008. doi: 10.2166/ws.2024.109.
- Zhu, M.** (2023). Water–energy–food nexus based on a new perspective of regional sustainable development. *Water Supply*, 23 (11), 4466–4478. doi: 10.2166/ws.2023.281.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Volkan Hacısüleyman

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019-2022 İstanbul Teknik Üniversitesi, Araştırma Görevlisi
- 2022- Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Öğretim Görevlisi

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Hacısüleyman, V. & 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. doi: 10.22034/GJESM.2024.SI.01.
- **Hacısüleyman, V. & Özger, M.** (2024). Multi-objective cropping pattern optimization and comparative assessment with the food-energy-water nexus. *Water Supply*, 24(12), 4077-4093. doi: 10.2166/ws.2024.254.
- **Hacısüleyman, V. & Özger, M.** (2025). Gediz havzasında ürün deseninin çok amaçlı doğrusal programlama yaklaşımı ile optimizasyonu. *Tarım Ekonomisi Dergisi*, 31(2), 237-244. doi: 10.24181/tarekoder.1699095.
- **Hacısüleyman, V. & Özger, M.** (2024). Food-energy-water nexus based analysis of the agricultural crop pattern optimization. *International Multidisciplinary Ecology and Environmental Studies Congress*, August 29-30, 2024, London, United Kingdom.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Özger, M., Başakın, E. E., Ekmekcioğlu, Ö. & Hacısüleyman, V.** (2020). Comparison of wavelet and empirical mode decomposition hybrid models in drought prediction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105851. doi: 10.1016/j.compag.2020.105851.