

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BİYOKÜTLE TEDARİK ZİNCİRİ İÇİN  
BİR KARAR DESTEK SİSTEMİ TASARIMI**

**DOKTORA TEZİ**

**AHMET ALP ŞENOCAK**

**DENİZLİ, ARALIK - 2022**

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**BİYOKÜTLE TEDARİK ZİNCİRİ İÇİN**  
**BİR KARAR DESTEK SİSTEMİ TASARIMI**

**DOKTORA TEZİ**

**AHMET ALP ŞENOCAK**

**DENİZLİ, ARALIK - 2022**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**Ahmet Alp ŞENOCAK**

## ÖZET

### **BİYOKÜTLE TEDARİK ZİNCİRİ İÇİN BİR KARAR DESTEK SİSTEMİ TASARIMI**

**DOKTORA TEZİ**

**AHMET ALP ŞENOCAK**

**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. HACER GÜNER GÖREN)**

**DENİZLİ, ARALIK - 2022**

Nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler nedeniyle küresel enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılamada birincil enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtlar, sera gazları ortaya çıkararak küresel ısınma ve çevresel problemlere neden olabilmektedir. Fosil yakıtlardan çevreye daha az zararlı olan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, kuruluşlar, hükümetler ve bilim adamları tarafından desteklenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütle, tarım ve orman kalıntıları, enerji bitkileri, tarım ürünleri, hayvansal atıklar, evsel katı atıklar, endüstriyel atıklar, mikroalgler ve bir zamanlar yaşayan diğer organizmalardan elde edilebilir. Yüksek taşıma maliyetleri ve hacimleri nedeniyle biyoenerji sistemlerinin tasarımı oldukça önemlidir. Ülkemizin enerjide dışa bağımlılığını azaltmaya ve sürdürülebilir bir enerji sistemi tasarlamaya odaklanan bu tez çalışmasında biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımı probleminin çözümü için bütünlük bir yaklaşım geliştirilmiştir. Biyokütle çevrim tesislerinin kuruluş yeri uygunluk analizi, biyokütle kaynaklarının tahmini, tedarik zinciri ağ tasarımını birleştiren çözüm çerçevesine ek olarak farklı senaryoların karşılaştırılmasını sağlayan bir karar destek sistemi önerilmiştir. Kuruluş yeri uygunluk analizi çok kriterli karar verme yöntemleri ve coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çeşitli biyokütle kaynaklarının gelecek yıllardaki miktarları yapay zekâ tabanlı bir yöntem olan destek vektör regresyonu ile tahmin edilmiştir. Paranın zaman değerini dikkate alan bir matematiksel model yardımıyla tedarik zinciri ağı tasarlanmıştır; hammadde taşıma miktarları, gübre ve elektrik üretim miktarları, kurulması gereken tesislerin sayıları, konumları ve kapasiteleri belirlenmiştir. Elde edilen çözümde altı çevrim tesisinin açılması gerektiği ve projenin geri ödeme süresinin 2,14 yıl olduğu saptanmıştır. Ayrıca, destek vektör regresyonu, matematiksel modelleme ve ajan tabanlı modellemeden oluşan bir karar destek sistemi, çeşitli senaryo alternatiflerini net bugünkü değer ve yatırım geri dönüş oranı açısından karşılaştırmak için önerilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, karar destek sisteminin sırasıyla gübre satış fiyatına, elektrik satış fiyatına, iskonto oranına ve taşıma maliyetine bağımlı olduğu belirlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Biyokütle tedarik zinciri, ağ tasarımı, lojistik, coğrafi bilgi sistemleri, destek vektör regresyonu, doğrusal programlama, ajan tabanlı modelleme

# ABSTRACT

## A DECISION SUPPORT SYSTEM DESIGN FOR BIOMASS SUPPLY CHAIN

PH.D. THESIS

AHMET ALP ŞENOCAK

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

INDUSTRIAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. HACER GÜNER GÖREN)

DENİZLİ, DECEMBER 2022

Global energy demand has been increasing day by day due to population growth, industrialization, and technological developments. Fossil fuels, which are primarily used to meet demand, can cause global warming and environmental problems via producing greenhouse gases. Transition from fossil fuels to renewable energy sources, which are less harmful to environment, has been supported by organizations, governments, and scientists. Biomass, one of the renewable energy sources, can be obtained from agricultural and forestry residues, energy crops, food crops, animal waste, municipal solid waste, industrial waste, microalgae, and other once living organisms. Due to high transportation costs and volumes, the design of bioenergy systems is of great importance. An integrated approach has been developed to address the solution of biomass supply chain network design problem in this thesis, which focuses on reducing our country's dependence on foreign energy and designing a sustainable energy system. In addition to the solution framework that combines suitability analysis of biomass conversion plants, forecasting of biomass resources, supply chain network design, a decision support system that enables comparison of different scenarios has been proposed. Suitability analysis has been carried out using multi-criteria decision-making methods and geographic information systems. The quantity of various biomass resources in the following years has been forecasted using support vector regression, which is an artificial intelligence-based method. Supply chain network has been designed using a mathematical model that takes into account the time value of money and feedstock flows, fertilizer and electricity production amounts, the number of facilities to be established, their locations and capacities have been determined. Based on the solution obtained, six conversion facilities should be opened and the payback period of the project was 2.14 years. Moreover, a decision support system consisting of support vector regression, mathematical modelling, and agent-based modelling has been proposed to compare various scenario alternatives in terms of net present value and return on investment. The results of this study shows that the decision support system is dependent on fertilizer sales price, electricity sales price, discount rate and transportation cost, respectively.

**KEYWORDS:** Biomass supply chain, network design, logistics, geographic information systems, support vector regression, linear programming, agent-based modelling

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ .....	v
KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problem Tanımı.....	4
1.2 Tezin Amacı .....	6
1.3 Tezin Önemi ve Literatüre Katkısı .....	6
1.4 Tezin Organizasyonu.....	9
<b>2. BİYOKÜTLE TEDARİK ZİNCİRİ .....</b>	<b>11</b>
2.1 Bölüm Özeti .....	17
<b>3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>18</b>
3.1 Giriş.....	18
3.1.1 Kuruluş Yeri Uygunluk Analizi.....	23
3.1.2 Biyokütle Kaynak Miktarlarının Tahmini .....	34
3.1.3 Biyokütle Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı .....	38
3.2 Literatür Taraması Sonucunda Elde Edilen Bulgular.....	45
3.3 Bölüm Özeti .....	50
<b>4. YÖNTEM.....</b>	<b>51</b>
4.1 Coğrafi Bilgi Sistemleri.....	52
4.1.1 CORINE Arazi Sınıflandırma Sistemi.....	54
4.2 DEMATEL Yöntemi .....	56
4.3 Destek Vektör Regresyonu.....	58
4.4 Matematiksel Modelleme .....	61
4.5 Ajan (Etmen) Tabanlı Modelleme.....	62
4.5.1 Java Agent DEvelopment Framework (JADE) .....	63
4.6 Bölüm Özeti .....	64
<b>5. UYGULAMA .....</b>	<b>66</b>
5.1 Kuruluş Yeri Uygunluk Analizi .....	66
5.2 Biyokütle Kaynaklarının Tahmini.....	71
5.3 Biyokütle Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı.....	74
5.4 Karar Destek Sistemi Tasarımı.....	81
5.5 Bölüm Özeti .....	93
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>94</b>
6.1 Genel Değerlendirme .....	94
6.2 Bulgular .....	95
6.3 Tezin Literatüre Katkıları .....	96
6.4 Gelecekte Yapılabilecek Çalışma Önerileri .....	97
<b>7. KAYNAKLAR.....</b>	<b>99</b>
<b>8. ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>119</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Problem için önerilen çözüm yaklaşımı.....	5
Şekil 2.1: Biyokütle tedarik zinciri akış şeması.....	14
Şekil 2.2: Biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımında verilmesi gereken kararlar	17
Şekil 3.1: Biyokütle tedarik zinciri çözüm yaklaşımları.....	22
Şekil 3.2: Biyokütle tedarik zinciri tasarımında bulunan temel işlemler.....	22
Şekil 4.1: Önerilen bütünleşik yaklaşımın adımları.....	52
Şekil 4.2: Vektörel ve raster veriler.....	53
Şekil 4.3: Veri katmanları.....	54
Şekil 4.4: CORINE arazi sınıfları.....	55
Şekil 4.5: Destek vektör makinelerinde veri setlerinin birbirinden ayrılması. .	59
Şekil 4.6: Doğrusal destek vektör regresyonu için kayıp fonksiyonu.....	59
Şekil 4.7: JADE haberleşme mimarisi.....	63
Şekil 4.8: JADE konteyner ve platform yapısı.....	64
Şekil 5.1: Tesis kuruluşu için uygun olmayan alanlar.....	67
Şekil 5.2: Değerlendirmede kullanılan kriterler.....	69
Şekil 5.3: Potansiyel çevrim tesisleri kuruluş noktaları.....	70
Şekil 5.4: Ajanlar arası iletişim şeması.....	82
Şekil 5.5: JADE arayüzü ve ana uygulama kodları.....	83
Şekil 5.6: Tahmin süreci.....	84
Şekil 5.7: Model çözüm süreci.....	85
Şekil 5.8: Karar verme süreci.....	88

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 1.1: Ülkemizin kurulu biyokütle enerjisi kapasitesi .....	3
Tablo 2.1: Biyokütle kaynakları ve çevrim teknikleriyle elde edilen yakıtlar...	12
Tablo 2.2: Biyokütle tedarik zincirinde karar verme aşamaları. ....	16
Tablo 3.1: Kuruluş yeri uygunluk analizini konu alan çalışmalar. ....	23
Tablo 3.2: Biyokütle kaynak miktarı tahminini konu alan çalışmalar. ....	34
Tablo 3.3: Biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımını konu alan çalışmalar. ....	39
Tablo 5.1: DEMATEL yöntemi değerlendirme ölçeği .....	68
Tablo 5.2: Değerlendirme matrisi .....	68
Tablo 5.3: DEMATEL yöntemi sonucu elde edilen kriter ağırlık değerleri. ....	68
Tablo 5.4: Denizli ilçelerinin kanatlı hayvan sayıları. ....	71
Tablo 5.5: Denizli ilçelerinin kanatlı hayvan kaynaklı atık miktarı tahminleri.	72
Tablo 5.6: Denizli ilçelerinin nüfusları .....	73
Tablo 5.7: Denizli ilçelerinin organik çöp kaynaklı atık miktarı tahminleri.....	74
Tablo 5.8: Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretim tesisleri için uygulanacak fiyatlar. ....	78
Tablo 5.9: Modelde kullanılan çeşitli parametreler. ....	79
Tablo 5.10: Biyogaz tesisi kapasite alternatifleri. ....	79
Tablo 5.11: Amaç fonksiyonu değeri.....	79
Tablo 5.12: Açılması gereken tesislerin elektrik ve gübre üretim miktarları ...	80
Tablo 5.13: Uygulamada kullanılan parametreler ve faktör seviyeleri.....	85
Tablo 5.14: Uygulamada çeşitli parametre değerlerine göre araştırılan senaryolar .....	85
Tablo 5.15: Uygulama sonucunda net bugünkü değere ve yatırımın geri dönüş oranına göre elde edilen sıralamalar.....	89



## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>IEA</b>	:	International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
<b>IRENA</b>	:	International Renewable Energy Agency (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı)
<b>ATM</b>	:	Ajan Tabanlı Modelleme
<b>CBS</b>	:	Coğrafi Bilgi Sistemleri
<b>ÇKKV</b>	:	Çok Kriterli Karar Verme
<b>DVR</b>	:	Destek Vektör Regresyonu
<b>MM</b>	:	Matematiksel Modelleme
<b>YDA</b>	:	Yaşam Döngüsü Analizi
<b>DEMATEL</b>	:	Decision Making Trial and Evaluation Laboratory
<b>DEK TMK</b>	:	Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi
<b>EASAC</b>	:	The European Academies Science Advisory Council (Avrupa Akademileri Bilim Danışma Konseyi)
<b>AHS</b>	:	Analitik Hiyerarşi Süreci
<b>YSA</b>	:	Yapay Sinir Ağları
<b>BWM</b>	:	Best-Worst Method (En İyi-En Kötü Yöntemi)
<b>ASECO</b>	:	The Autarkic Spatial Energy Cluster Optimization
<b>ALMANAC</b>	:	Agricultural Land Management Alternative with Numerical Assessment Criteria
<b>MOORA</b>	:	Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis
<b>TOPSIS</b>	:	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
<b>ES</b>	:	Evrimsel Strateji
<b>FIPA</b>	:	Foundation for Intelligent Physical Agents (Akıllı Fiziksel Ajanlar Kurumu)
<b>ACL</b>	:	Agent Communication Language (Ajan Haberleşme Dili)
<b>KQML</b>	:	Knowledge Query and Manipulation Language (Bilgi Sorgulama ve Manipülasyon Dili)
<b>JADE</b>	:	Java Agent DEvelopment Framework
<b>TILAB</b>	:	Telecom Italia Laboratory (Telekom İtalya Laboratuvarı)
<b>AMS</b>	:	Agent Management System (Ajan Yönetim Sistemi)
<b>DF</b>	:	Directory Facilitator (Sarı Sayfalar Servisi)
<b>RMA</b>	:	Remote Monitoring Agent (Uzaktan İzleme Ajanı)
<b>ACC</b>	:	Agent Communication Channel (Mesaj İletim Sistemi)
<b>TÜİK</b>	:	Türkiye İstatistik Kurumu
<b>NBD</b>	:	Net Bugünkü Değer
<b>YEK Belgesi</b>	:	Yenilenebilir Enerji Kaynak Belgesi
<b>ÜFE</b>	:	Yurtiçi Üretici Fiyat Endeksi
<b>TÜFE</b>	:	Yurtiçi Tüketici Fiyat Endeksi
<b>YEKDEM</b>	:	Elektrik Piyasası Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması
<b>JRE</b>	:	Java Runtime Environment (Java Çalıştırma Ortamı)
<b>RMSE</b>	:	Root Mean Square Error (Ortalama Hata Kareleri Kökü)
<b>API</b>	:	Application Programming Interface (Uygulama Programlama Arayüzü)
<b>YGDO</b>	:	Yatırımın Geri Dönüş Oranı

## ÖNSÖZ

Öncelikle, 2013 yılının eylül ayında Denizli’de tekrar karşılaştığım ve bugüne kadar dokuz yılı akademik olarak birlikte geçirdiğim, danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hacer GÜNER GÖREN’e yazmış olduğumuz tüm tezler, makaleler, bildirimler için çok teşekkür ederim ve tekrar başa dönüp seçim şansım olsa yine birlikte çalışmak isterdim. Bana sadece akademik olarak değil kazandırdığı diğer tüm yetenekler için ona minnettarım ve beraber geçirdiğimiz yılların geçireceğimiz uzun yıllar için bir başlangıç olduğunu düşünüyorum.

Tez izleme komitesi üyelerimden Sayın Prof. Dr. Hasan SELİM’e lisans yıllarımdan bu yana bana destek olduğu ve bilgi birikimiyle tezimi daha ileriye taşıdığı için teşekkürü borç bilirim. Sayın Doç. Dr. Aliye Ayça SUPÇİLLER’e özellikle sonuç odaklı yaklaşımları, tez yazım sürecinde belirttiği önemli noktalar ve her zaman dile getirdiği candan tavsiyeleri için şükranlarımı sunarım. Komite üyelerimden biri olan fakat daha sonra ayrılmak zorunda kalan, tez savunma jürimde tekrar kavuştuğum, akademisyenliği seçmemde oldukça etkili olan ve beni bu mesleğe yönlendiren Sayın Doç. Dr. Leyla DEMİR’e çok teşekkür ederim. Tez savunma jürime katılımıyla beni mutlu eden ve değerlendirmeleriyle tezin sonuçlandırılmasına katkıda bulunan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan AKYER’e teşekkür ederim. Tez çalışmasında ihtiyaç duyduğum çeşitli parametreler, çevrim tesisi büyüklükleri ve çevrim yöntemleri hakkında oldukça detaylı bilgileri benimle paylaşan Sayın Prof. Dr. Nuri AZBAR’a katkıları ve naif yaklaşımı nedeniyle teşekkür ederim.

Tezimin ortaya çıkma sürecinde, başta bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Aşkîner GÜNGÖR olmak üzere, Pamukkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm hocalarıma, almış olduğum derslerde vermiş oldukları değerli bilgiler, yarattıkları keyifli çalışma ortamı ve çoğulcu yönetim anlayışı nedeniyle çok teşekkür ederim.

Bilgisayar programlama dilleri konusunda engin bilgilere sahip, benim de bu konuda gelişmemi sağlayan Bekir YILMAZ’a tezimin olgunlaşması için sunduğu katkılardan dolayı çok teşekkür ederim.

Bana hayatımın her anında destek veren, yarattıkları sevgi ve özgürlük ortamıyla aldığım tüm kararlarda güçlerini hissettiğim annem ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, birlikte geçireceğimiz zamandan çalarak yapmış olduğum çalışmalara her daim anlayışla yaklaşan, beni çalışmaya teşvik eden değerli eşim Alime ŞENOCAK'a, tez yazım süresince gösterdiği hoşgörü, yollarımızın kesiştiği günden bu yana varlığıyla vermiş olduğu huzur ve desteği nedeniyle çok teşekkür ederim.

# 1. GİRİŞ

Nüfus artışına, konfor ihtiyacına ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak küresel enerji talebi her geçen gün artış göstermektedir. Özellikle sanayi devriminden bu yana, enerji tüketimi önemli ölçüde artmıştır. Bu sebeple enerji kaynaklarına ulaşma ve enerji güvenliği konuları tüm dünyada stratejik önem arz etmektedir. Artan talebi karşılamada birincil kaynak olarak kullanılan fosil yakıtlar, sera gazları oluşturarak küresel ısınmaya ve çevresel sorunlara neden olabilmektedir. Güvenilir gıda ve enerji kaynaklarına ulaşma sürecinde, çevreye mümkün olduğunca az zarar vererek, iklim değişikliklerine neden olmadan ihtiyaçları karşılamak için sürdürülebilir politikalar geliştirmek gerekmektedir. Ekosisteme verilen zararın azaltılarak dünya enerji talebinin karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi gün geçtikçe artmaktadır. Enerji ihtiyacının sürdürülebilir bir biçimde karşılanabilmesi için çevreye daha az zararlı olan yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımı kuruluşlar, hükümetler ve bilim adamları tarafından desteklenmektedir. Her geçen gün çevrim yöntemlerinin gelişmesi ve verimlerinin artması ile yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji ihtiyacını karşılama oranı artmaktadır.

Yenilenebilir enerji kavramı, zaman içinde tekrar aynı miktarda mevcut olabilen kaynaklar kullanılarak elde edilen enerjiyi ifade etmektedir (Hersh 2006). Güneş, rüzgâr, akarsular, biyokütle, yeraltı suları, denizlerde oluşan dalga ve gel-git başlıca yenilenebilir enerji kaynakları arasında sayılabilir. Söz konusu kaynaklar kullanılarak enerji eldesi sonucunda tükenmediği veya yenilenebildiği için sürdürülebilir bir biçimde, istenilen zamanda, istenilen noktada, doğanın ve çevrim yöntemlerinin mümkün kıldığı miktarda enerji üretimi yapılabilir. Bu yönüyle sürdürülebilir olan yenilenebilir kaynakları enerji üretiminde oldukça az emisyon oluşturur, bu sayede çevrenin ve canlıların sağlığının korunmasına katkıda bulunur.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütle, tarım ve orman kalıntıları, enerji bitkileri, tarım ürünleri, hayvansal atıklar, evsel katı atıklar, endüstriyel atıklar, mikroalgler ve bir zamanlar yaşayan diğer organizmalardan elde

edilebilir. Günümüzde küresel enerji arzının %10'una katkıda bulunan biyokütle enerjisinin üçte ikisi gelişmekte olan ülkelerde üretilmektedir (IEA Bioenergy 2013). İklim ve arazi şartlarının el verdiği hemen hemen her yerde yetiştirilebilme, hammadde veya farklı enerji türlerine dönüştürülerek depolanabilme, kanalizasyon, belediye atığı gibi çeşitli atıklardan elde edilebilme özellikleri nedeniyle biyokütleden üretilen enerjiye olan ilgi hızla artmaktadır. Söz konusu avantajlarına karşın sahip olduğu yüksek taşıma hacmi ve maliyetleri nedeniyle biyoenerji sistemlerinin etkin bir biçimde tasarlanması zincirin karlılığı için büyük önem taşımaktadır.

Geniş tarım alanları, verimli toprakları ve elverişli iklimi nedeniyle ülkemiz enerji bitkilerinin ekimine uygundur. Ayrıca tarımsal üretimin, ormancılığın, büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvancılığının yaygın olarak yapılması sebebiyle oldukça fazla tarımsal, hayvansal atığa ve orman varlığı atığına sahiptir. Tüm bunlara ek olarak, nispeten yüksek insan nüfusu ve yoğun sanayi faaliyetleri nedeniyle elde edilebilecek evsel ve endüstriyel organik atık miktarı hayli fazladır. Söz konusu bilgiler ışığında ülkemizin biyokütle kaynaklı enerji potansiyelinin oldukça yüksek olduğunu söylemek mümkündür. Türkiye Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası 2022 yılına ait verilere göre ülkemizde biyokütle kaynaklı atıkların toplam yıllık enerji eşdeğeri yaklaşık 400 milyar kWh olarak belirtilmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2022). Ülkemiz söz konusu enerji potansiyelini açığa çıkarmak için son yıllarda yenilenebilir enerji konusunda yaptığı atılımlarla enerji kapasitesini hızla arttırmakta ve her yıl yeni çevrim tesislerini işletmeye almaktadır. Tablo 1.1'de gösterildiği üzere Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın verilerine göre ülkemiz biyokütle kaynaklı enerji kapasitesini, kurulu güç bakımından 10 yılda yaklaşık 11 kat arttırmıştır (IRENA 2022). Her ne kadar bu artış oldukça fazla olsa da ülkemizin biyokütle kaynaklı enerji potansiyeli düşünüldüğünde, organik atıklardan enerji elde etmek için kurulu güç bakımından olması gereken seviyeye henüz ulaşamadığı gözlemlenmektedir.

**Tablo 1.1:** Ülkemizin kurulu biyokütle enerjisi kapasitesi (IRENA 2022).

<b>Kapasite (MW)</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>
<b>Katı biyoyakıtlar ve yenilenebilir atıklar</b>	10	10	10	12	55	83	130	216	320	622
<b>Likit biyoyakıtlar</b>	-	-	7	7	7	12	19	19	19	19
<b>Biyogaz</b>	132	162	204	252	297	377	438	548	762	1000
<b>Biyoenjerji (Toplam)</b>	<b>142</b>	<b>172</b>	<b>221</b>	<b>271</b>	<b>359</b>	<b>472</b>	<b>587</b>	<b>784</b>	<b>1101</b>	<b>1641</b>

Yenilenebilir enerji planlamasında, politika belirleme ve karar alma süreçlerinde öncelikle kullanılacak kaynakların belirlenmesi ve söz konusu kaynakların gelecek yıllardaki dağılım ve miktarlarının olabildiğince doğru tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu sayede gelecekle ilgili yapılan çıkarımların gerçeği yansıtmaya oranı artış göstermektedir. Söz konusu tahminler daha geleneksel bir metod olan parametrik yöntemlerle yapılabileceği gibi zeki canlıların karar verme süreçlerinin modellenmesine dayanan yapay zekâ tabanlı yöntemlerle de gerçekleştirilebilir. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ve hesaplama gücünün hızla artmasıyla birlikte uzun vadeli planlama için enerji tahmininde makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımların (Şenocak ve Güner Gören 2022; Geng ve diğ. 2021; Goettsch ve diğ. 2020) nispeten kısa sürede oldukça iyi sonuçlar verebildiği gözlemlenmektedir.

Biyokütle kaynaklarının dağılım ve miktarlarının yüksek doğruluk payı ile tahmininin yanı sıra enerji hammaddelerinin yüksek taşıma hacmine sahip olması nedeniyle daha verimli bir ağ tasarlamak için her geçen gün yeni lojistik modelleri, farklı taşıma yöntemleri ve çeşitli çözüm algoritmaları önerilmektedir. Gerçek durumun modellenmesi yoluyla bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlayan simülasyon yönteminin (Enström ve diğ. 2021; Lo ve diğ. 2021; Simon ve diğ. 2021) yanı sıra kesin sonuçların elde edildiği fakat büyük ölçekli problemlere nispi olarak uygulama zorluğu bulunan matematiksel modeller (Wu ve diğ. 2022; Ahmadvand ve diğ. 2021; Gital Durmaz ve Bilgen 2020) çalışmalarda çözüm yöntemi olarak sıklıkla kullanılmakta ve tatmin edici sonuçlar elde edilebilmektedir. Son yıllarda hesaplama gücünün artmasıyla literatürde daha fazla yer almaya başlayan yapay zekâ uygulamaları da ağ tasarımıdaki karar süreçlerinde etkin rol oynamakta ve zincirde bilgi paylaşımının gelişmesine katkıda bulunmaktadır. Bu noktada, yapay zekâ ve matematiksel modellerin çözümde birlikte kullanımı ile daha şeffaf karar verme süreçlerinin oluşturulması ve daha az hata payına sahip sonuçların daha kısa sürede

elde edilmesi sağlanabilmektedir. Kaynakların dağılım ve miktarlarının gelecek yıllardaki tahminlerinin tutarlı bir biçimde gerçekleştirilmesinden sonra verimli bir tedarik sistemi tasarlayabilmek için karar verme süreçlerinin açık ve net bir biçimde ele alınması gerekmektedir. Özellikle kurulan tedarik zincirlerinin uzun yıllar verimli ve bir bütün halinde çalışması arzulanan enerji sektöründe, bileşenlerin sağlam ilişkilerle birbirlerine bağlı olmaları, fayda sağlamaları ve tüm kararların şeffaf bir biçimde alınması oldukça önemlidir.

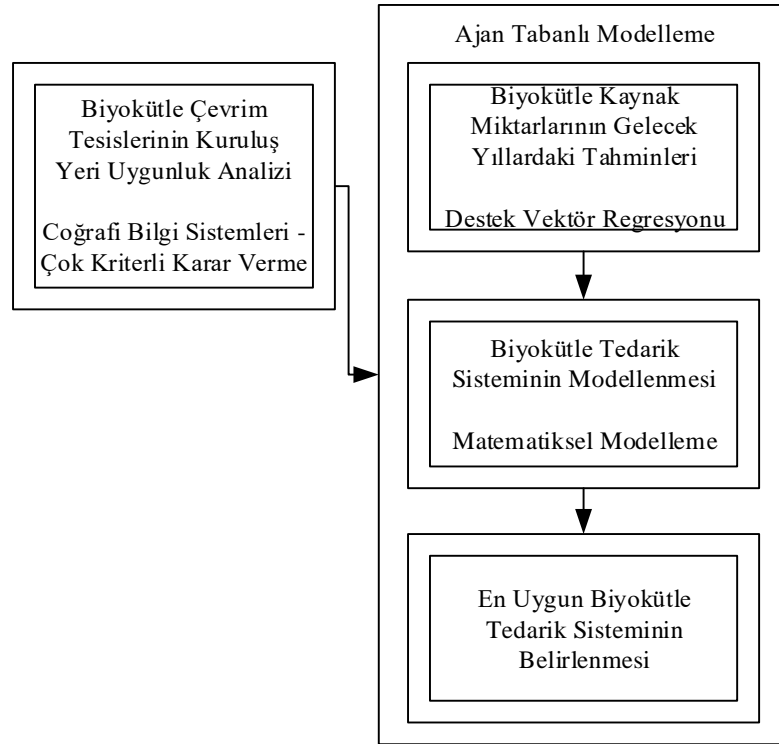
Bu tez çalışmasının ana motivasyon kaynağı, ülkemizin enerjide dışa bağımlılığını azaltmak için sürdürülebilir ve temiz enerji kaynağı olan biyokütle odaklanarak, enerji tedarik sistemi için etkin iletişim ve daha düzenli bilgi paylaşımına olanak sağlayan yapay zekâ tabanlı bir karar destek sisteminin tasarlanmasıdır. Bu noktada, yenilenebilir enerji üretimi için hangi biyokütle kaynaklarının kullanılacağı, tedarik zincirinde düğümler arasındaki tüm taşıma miktarları, çevrim tesislerinin hangi büyüklükte olacağı ve ne şekilde konumlandırılacağı maliyet unsurları göz önüne alınarak araştırılmıştır. Söz konusu karar destek sistemi tasarlanırken ülkemizde var olan organik atıkların gelecek yıllardaki dağılım ve miktarları saptanarak atıkların bertaraf edilmesi sonucunda elektrik enerjisi ve gübre üretiminin gerçekleştirildiği tedarik sistemi planlanmış ve Denizli ilinde uygulaması gerçekleştirilmiştir.

## **1.1 Problem Tanımı**

Bu çalışmada ülkemizin enerji ihtiyacını daha sürdürülebilir biçimde karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyoenerji ele alınmış ve taşıma hacminin büyüklüğü nedeniyle ağ tasarımının sistem karlılığı üzerinde oldukça fazla etkisi bulunan biyokütle tedarik zinciri tasarımı probleminin çözümü için bir karar destek sistemi önerilmiştir. Bu sayede uzun vadeli etkileri bulunan hammadde seçimi, çevrim tesislerinin kurulması ve enerji politikalarının belirlenmesi gibi kararların mümkün olduğunca etkin alınmasına yardımcı olmak hedeflenmiştir.

Tedarikçilerle ilişkilerin oldukça önemli olduğu yenilenebilir enerji sistemi tasarımında daha düzenli bilgi paylaşımı gerçekleştirerek etkin iletişim kurulmasının amaçlandığı ve daha hızlı karar alınmasına olanak sağladığı için yapay zekâ tabanlı

bir yöntem olan ajan tabanlı modelleme (ATM) önerilen karar destek sisteminin iskeletini oluşturmaktadır. Çeşitli ajanlar kullanılarak ve karar verme süreçleri modellenerek karar vericilerin daha hızlı, daha yapılandırılmış ve daha doğru kararlar alabilmelerine yardımcı bütünleşik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Biyokütle tedarik zinciri tasarımı probleminin çözümü için önerilen karar destek sistemi dört aşamadan oluşmaktadır (Bakınız Şekil 1.1). İlk aşamada biyokütle işleme tesislerinin kurulabileceği uygun noktalar coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemi kullanılarak saptanmıştır. Daha sonra en uygun biyokütle kaynakları ve bu kaynakların miktarlarının gelecek yıllardaki tahminleri destek vektör regresyonu (DVR) yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar tahminleme ajanı yardımıyla karar destek sistemine aktarılmıştır. Üçüncü aşamada, matematiksel modelleme (MM) yardımıyla paranın zaman değeri de hesaba katılarak kurulması gereken tesis sayılarına, konumlarına ve kapasitelerine karar verilmiş ve sonuçlar modelleme ajanı kullanılarak bütünleşik sisteme aktarılmıştır. Son aşamada ise farklı parametre değerleri için oluşturulan çeşitli senaryoların sonucunda elde edilebilecek sonuçlar karar verme ajanı kullanılarak destek sistemine aktarılmıştır. Önerilen karar destek sisteminin Denizli ili için uygulaması yapılmış ve en uygun ağ tasarımı belirlenmiştir.



Şekil 1.1: Problem için önerilen çözüm yaklaşımı.



## 1.2 Tezin Amacı

Yapılan çalışmanın en önemli amacı, ülkemizin enerjide dışa bağımlılığının yenilenebilir enerji kaynağı olan biyokütle kullanılarak sürdürülebilir biçimde azaltılmasını sağlamak adına hammadde kaynaklarının gelecek yıllardaki miktarlarının tahmin edildiği, çevrim tesislerinin konumlarının, büyüklüklerinin ve miktarlarının, sistemde düğümler arası tüm taşıma miktarlarının belirlendiği bir karar destek sistemi geliştirmektir.

Bu amaç doğrultusunda şekillenen çalışmada, gelecek yıllarda enerji ihtiyacını karşılama oranının kaçınılmaz olarak artması beklenen yenilenebilir enerji kaynaklarından biyokütle kullanılarak sürdürülebilir enerji üretiminin, depolanmasının ve taşınmasının etkin şekilde planlanmasına katkıda bulunmak istenilmiştir. Bu sayede ülkemizin enerjide dışa bağımlılığının çeşitli organik atıkların değerlendirilmesi yoluyla azaltılması hedeflenmektedir.

Önerilen bütünsel yaklaşımda biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımı probleminin çözümü için sistem bileşenleri arasında daha düzenli bilgi paylaşımı ve etkin iletişim kurulması, böylece daha kısa sürede daha doğru kararların alınabilmesi amaçlanmıştır. Bu noktadan hareketle yapılan tez çalışmasının amacı temiz enerji üretiminin daha etkin şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlayabilmektir. Bu çalışmanın diğer bir amacı da biyokütle tedarik zinciri tasarımı için sistematik bir çözüm yaklaşımı geliştirmek, farklı senaryoların değerlendirilmesine olanak sağlayan bir karar destek sistemi oluşturmak ve bu sayede konuyla ilgilenenlere kaynak olabilmektir.

## 1.3 Tezin Önemi ve Literatüre Katkısı

Günümüzde küresel enerji ihtiyacı; nüfusa, sanayileşmeye ve konfor ihtiyacına paralel olarak artmaktadır. Artan enerji talebini karşılamada, şimdilik yeterli rezervlere sahip olan, işleme, taşıma ve depolama maliyetleri nispeten düşük olan fosil yakıtlar birincil enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar fosil yakıtlar günümüzde enerji elde etmede sıklıkla kullanılsa da rezervleri sınırlı olduğu için sürdürülebilir değildir. Her geçen gün tükenmelerinin yanı sıra kullanımları

sırasında çevreye verdikleri zarar ne yazık ki doğaya geri dönülemeyen etkiler bırakmaktadır. Ayrıca, asit yağmurları oluşturup karbon emisyonlarını arttırarak canlıların sağlığını tehdit etmektedir. Söz konusu nedenlere bağlı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretiminde kullanımı devletler, organizasyonlar ve işletmeler tarafından desteklenmektedir.

Bu noktadan hareketle yapılan çalışmanın önemi, ülkemizin enerji ihtiyacının bir kısmının daha sürdürülebilir biçimde karşılanmasına destek olmak için verimli bir biyokütle tedarik zinciri tasarlanmasıdır. Bunun için ülkemizin enerji ihtiyacını karşılamada, yenilebilir enerji kaynaklarından biyokütlenin etkin biçimde kullanımı araştırılmış, organik atıklardan enerji eldesi için bir karar destek sistemi önerilmiştir. Söz konusu bütünleşik yaklaşım hem atıkların yok edilmesi ile hem de onlardan enerji elde edilmesi ile çevrenin korunmasına katkı sunmaktadır.

Yapılan çalışmada, ülkemizdeki organik atıklardan faydalanılarak üretilen enerjinin üretiminden nihai kullanıcıya ulaşana kadar geçen süreçte, en uygun hammadde bölgeleri, hammadde taşıma miktarları, ürün depolama miktarları, çevrim tesislerinin kapasiteleri, sayıları ve konumları belirlenmiştir. Tedarik zincirlerinin uzun yıllar verimli ve bir bütün halinde çalışması için bileşenlerin sağlam ilişkilerle birbirlerine bağlı olmaları, fayda sağlamaları ve tüm kararların şeffaf bir biçimde alınması oldukça önemlidir. Bu noktada, yapılan çalışmada, biyokütle tedarik zinciri tasarımında ATM kullanımıyla sistemde daha düzenli bilgi paylaşımı ve etkin iletişim kurulması amaçlanmıştır. Önerilen yaklaşımın bir diğer katkısı ise zincirdeki koordinasyonun yapılandırılarak bilginin taşınmasının kolaylaştırılması yoluyla daha hızlı sürede daha etkin kararların alınabilmesini sağlamaktır. Bu sayede ülkemizin hem mevcut biyoatıkları değerlendirilmiş hem de kırsal çeşitlendirme yoluyla bölgesel kalkınma, istihdam ve gelir elde edilmesine olanak sağlayan bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

Tez çalışmasıyla literatüre sunulan katkılar ise aşağıda özetlenmiştir.

- Biyokütle tedarik zinciri tasarımındaki temel işlemlere odaklanan detaylı ve kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiş, geliştirilmeye açık noktalar belirlenmiştir.

- Dünyada ve ülkemizde önemi artan sürdürülebilir enerji yönetimi konusunda, biyokütle tedarik zincirindeki tüm bileşenleri ve aralarındaki etkileşimleri dinamik ve kapsamlı biçimde tasarlayıp bir çerçeve sunan çalışma sayısı literatürde oldukça azdır. Bu boşluğu gidermek için sistemdeki belirsizlikleri çözüme entegre eden, paranın zaman değerini dikkate alan, biyokütle tedarik zincirindeki karmaşıklığı ve bileşenler arasındaki ilişkileri net bir biçimde ortaya koyan bütünlük bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu sayede, yenilenebilir enerji kaynaklarının, ülkemiz enerji ihtiyacını karşılama oranı arttıkça, fosil yakıtlara olan bağımlılığımız azalacaktır. Ayrıca geliştirilen karar destek sisteminin kullanımıyla daha çevreci, ekonomik ve sosyal enerji üretimi, depolanması, taşınması gerçekleştirilerek, doğaya salınan sera gazı miktarının azaltılması öngörülmektedir.
- Biyoenerji ağ tasarımında coğrafi veriler ile kuruluş yeri uygunluk analizi ve hammadde kaynaklarının tahminini içeren oldukça az çalışma bulunmaktadır. Önerilen bütünlük yaklaşım, DVR kullanılarak organik atıkların gelecek yıllardaki miktarlarına ilişkin tahminlerin oluşturulduğu tedarik zinciri tasarımı alanındaki ilk çalışmalardandır.
- Yapılandırılmış ve şeffaf karar almayı kolaylaştırıp kısa sürede çözüme ulaşmayı sağlayabilen ATM yönteminin biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımında kullanıldığı ilk çalışmalardandır.
- Oluşturulan karar destek sistemi; CBS ve DEMATEL (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) kullanarak çevrim tesislerinin uygunluk analizini gerçekleştirmektedir. Uygunluk analizinden elde edilen veriler ışığında yapay zekâ tabanlı yaklaşımlardan ATM ve DVR ile biyokütle tedarik zinciri literatüründe tespit edilen eksiklikler giderilmektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde literatürde söz edilen yöntemleri birleştirip, bütünlük bir çözüm yaklaşımı sunan ilk çalışma özelliğini taşımaktadır.

## 1.4 Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışmasında yenilenebilir enerji planlamasının daha verimli biçimde yapılması için biyokütle tedarik zinciri tasarımı probleminin çözümü için bütünleşik bir çözüm yaklaşımı ve farklı senaryoların değerlendirmesine olanak sağlayan bir karar destek sistemi önerilmiştir. Çalışmanın kapsamı aşağıda özetlenmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde konuya giriş yapılmış, küresel enerji ihtiyacı, enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılan kaynaklar, çeşitli enerji kaynaklarının avantaj ve dezavantajları, yenilenebilir enerji tedarik sistemlerinin özellikleri, biyoenerji ağ tasarımında dikkat edilmesi gereken ve problem çözümünde dikkate alınması gereken noktalar ana hatlarıyla incelenmiş, problem tanımlanmış, tezin amacı, önemi, literatüre katkısı belirtilmiş ve tezin organizasyonu açıklanmıştır.

İkinci bölümde, biyokütle tedarik zincirinin yapısına, çeşitlerine, sistemdeki karar düzeylerine, farklı hammadde kaynaklarına, çevrim yöntemlerine, ağ tasarımındaki düğümlere ve organik atıklardan enerji eldesi için gerekli operasyonlara yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, konu hakkında yapılan çalışmalar biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımındaki temel işlemlere göre incelenmiştir. Biyokütle tedarik zinciri tasarımı hakkında çeşitli derleme ve araştırma çalışmalarının bulunduğu bölümde, literatürde konuyla ilgili eksikler ortaya konarak tezin yapılan çalışmalardan farklı yönleri açıkça belirtilmiştir. Böylece yapılan çalışmanın literatüre katkısı daha net olarak gösterilmiş, birtakım çıkarımlar yapılarak gelecekte çalışılması uygun olan noktalar ortaya konmuştur.

Dördüncü bölümde, problemin çözümü için önerilen bütünleşik karar destek sistemini oluşturan; CBS, ÇKKV yöntemlerinden biri olan DEMATEL yöntemi, DVR, MM, ATM yaklaşımları açıklanarak her bir yöntemin avantajları ve dezavantajları belirtilmiştir.

Beşinci bölümde, önerilen bütünleşik çözüm yaklaşımının ve karar destek sisteminin Denizli ilinin tüm ilçelerini içeren gerçek bir biyokütle tedarik zinciri

tasarımı problemine uygulanması gösterilmiş ve çeşitli senaryolar dâhilinde elde edilen deney sonuçlarına yer verilmiştir.

Son bölümde ise yapılan çalışma sonucunda elde edilen bulgular incelenmiş, önerilen bütünleşik yaklaşımın sunduğu katkılar, sahip olduğu eksik yönler ve gelecek yıllarda bu alanda yapılabilecek çalışma önerileri özetlenmiştir.

## 2. BİYOKÜTLE TEDARİK ZİNCİRİ

Biyokütle, bir zamanlar hayatını sürdürmüş veya halen sürdürmekte olan canlılardan veya canlıların artıklarından elde edilen ve fosil hale gelmemiş olan maddeleri ifade eden genel bir kavramdır. Biyoenerji veya biyokütle kaynaklı enerji, söz konusu biyolojik maddelerin çeşitli çevrim yöntemleri sonucunda enerjiye dönüştürülmesi ile elde edilir. Biyokütlenin temel yapıtaşı yeşil yapraklı bitkilerin güneş ışığını kullanarak fotosentez işlemi sonucunda oluşturduğu besinlerdir. Bitkiler atmosferde mevcut olan CO<sub>2</sub> gazını kullanarak besin ürettikleri için biyokütlenin çevrim yöntemleri kullanılarak enerjiye dönüştürülmesi sürecinde çevre, CO<sub>2</sub> salınımı açısından korunmuş olur (Karadağ 2017).

Biyoenerji elde etmek için kullanılan biyokütle kaynakları farklı kriterlere göre gruplandırılabilir fakat başlıca biyoenerji hammaddeleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Tarımsal atıklar
- Orman kalıntıları
- Hayvansal atıklar
- Enerji bitkileri
- Tarımsal ürünler
- Enerji ormanları
- Organik çöpler
- Endüstriyel atıklar
- Mikroalgler

Biyoyakıtlar, biyokütleden elde edilen, başlıca ürünleri katı, sıvı yakıtlar ve çeşitli gazlar olan ürünleri içermektedir (Allen ve diğ. 1998). Biyoyakıtlar, biyokütleden, bitki ve hayvanlardan ve diğer organik maddelerden elde edilen yenilenebilir yakıtlardır (Demirbaş 2009). Biyokütle enerjisine, nişasta ve selüloz gibi hammaddelerin, fizikokimyasal, biyokimyasal veya termokimyasal işlemler uygulanarak etanol, metanol, dizel, benzin ve metan gibi yakıtlara dönüştürülmesiyle

erişilebilir. Biyokütle enerjisinden faydalanmak için uygulanması gereken dönüşüm yöntemi ve elde edilen biyoyakıt türleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

**Tablo 2.1:** Biyokütle kaynakları ve çevrim teknikleriyle elde edilen yakıtlar (DEK TMK 2007).

<b>Biyokütle Kaynağı</b>	<b>Çevrim Yöntemi</b>	<b>Yakıt Formu</b>
Bitkisel kaynaklar (yağlı-tohumlu bitkiler)	Fizikokimyasal	Sıvı yakıt
Algler		
Orman artıkları	Termokimyasal, biyokimyasal	Sıvı yakıt, gaz yakıt
Tarımsal atıklar		
Enerji bitkileri		
Şehir ve endüstri atıkları, organik çöpler	Biyokimyasal, termokimyasal	Gaz yakıt, sıvı yakıt
Hayvansal atıklar	Biyokimyasal	Gaz yakıt
Bitkisel kaynaklar (şeker, nişasta ve selüloz içerikli bitkiler)	Biyokimyasal	Sıvı yakıt

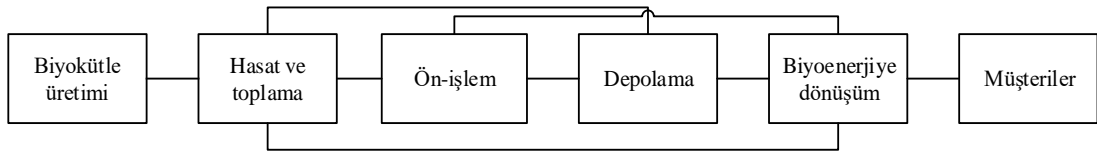
Termokimyasal işlemler ile biyokütlenin doğrudan yakılarak enerji üretilmesi sağlanmaktayken; fizikokimyasal işlemler sonucunda biyodizel; biyokimyasal işlemler sonucunda ise fermantasyon, biyofotoliz, havasız ortamda bozundurma işlemlerinin türüne göre sırasıyla etanol, hidrojen ve biyogaz elde edilebilmektedir (Olgun 2005). Genellikle, biyokütleden etanol ve biyodizel üretiminde mısır, soya fasulyesi, şeker kamışı, şeker pancarı, dallı darı, arpa ve kenevir bitkileri hammadde olarak kullanılmaktadır. Bu hammaddeler tarımsal ürünler oldukları için tedarik ve üretim maliyetleri sabit değildir. Bu belirsizliğin kaynağı; üretimin hava koşullarına, böcek popülasyonuna, bitki hastalıklarına, çiftçilerin gelecek sezon için bitki ekme kararlarına bağlı olmasıdır. Dahası, hammaddelerin üretilebilecekleri arazi miktarları sınırlıdır. Üstelik tarımsal ürünler tüketim malları olarak da satıldığından taleplerindeki artış hammadde olarak alım fiyatlarını da arttırmaktadır. Ayrıca yılda bir veya birkaç kere hasat edilmelerine rağmen biyoyakıt talebinin sürekli olması nedeniyle depolama ve taşıma maliyetleri artmakta ve enerjiye dönüşüm sürecinin planlanması önem kazanmaktadır (Ekşioğlu ve diğ. 2009). Son yıllarda yapılan çalışmalarda biyoenerji üretmek için daha az arazi kullanımına, daha az belirsizliğe ve her dönem elde edilebilme şansına sahip; tarımsal atıklar, orman kalıntıları, organik çöpler ve enerji bitkilerini içeren lignoselülozik biyokütle kullanımı yaygınlaşmaktadır (Aden ve diğ. 2002).

Biyoyakıtlar kökenleri ve çevrim teknolojilerine göre birinci nesil, ikinci nesil, üçüncü nesil ve dördüncü nesil olmak üzere dörde ayrılabilir (EASAC 2012; Aro 2016). Birinci nesil biyoyakıtlar, ekilebilir arazilerde yetiştirilen gıda ürünlerinden elde edilen enerjiyi ifade etmektedir. Şeker kamışı, nişasta içeren bitkiler, yağlar, mısır, soya ve palmye, birinci nesil biyoyakıtların en yaygın örnekleridir (Awudu ve Zhang 2012). Hayvanlar veya insanlar için beslenme kaynağı olarak kullanılabilmesi birinci nesil biyoyakıtların enerji üretiminde kullanımını tartışmalı hale getirmekte ve söz konusu biyokütle hammaddelerinin ekim kararlarının stratejik olarak verilmesi gerekliliğini doğurmaktadır. Artan yerleşim yeri talebi, kuraklık ve küresel ısınma nedeniyle gün geçtikçe azalan tarım arazilerinin birincil öncelik olan canlıların beslenme ihtiyacı yerine enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılması ikinci nesil biyoyakıtların ortaya çıkmasına neden olmuştur. İkinci nesil biyoyakıtlar, genellikle lignoselülozik biyokütleden elde edilmektedir. Bu tür biyoyakıtlar temel olarak tarımsal atıkları, orman kalıntılarını ve beslenme amaçlı kullanılmayan enerji bitkilerini içermektedir. Birinci nesil biyoyakıtlardan farklı olarak, ikinci nesil biyoyakıtlar verimli tarım arazilerine ihtiyaç duymazlar ve çoğunlukla gıda fiyatlarından etkilenmezler (Yue ve diğ. 2014). Üçüncü nesil biyoyakıtlar hammadde olarak mikroalglerden yararlanırlar. Mikroalgler enerji üretimi için yalnızca su, güneş ışığı ve çeşitli minerallere ihtiyaç duyarlar (Zandiatashbar ve diğ. 2018). Bu özellikleri ile ekilebilir araziye gereksinim duymazlar ve enerji talebinin yüksek olduğu noktalara yakın yerlerde enerji üretimi yapılabilmesine olanak sağlarlar. Halen gelişimi devam etmekte olan bir süreci ifade eden dördüncü nesil biyoyakıtlar, hammadde tahribatı olmadan enerji üreten kaynaklara odaklanmaktadır. Sentetik biyolojiden doğan ve gelişime oldukça açık olan fotobiyolojik güneş yakıtları ve elektroyakıtlar dördüncü nesil biyoyakıtlara örnek olarak gösterilebilmektedir (Aro 2016).

Çeşitli hammaddelerden elde edilebilme, kolayca depolanabilme ve hemen her yerde yetiştirilebilme gibi avantajlara sahip olan biyokütle enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde oldukça büyük bir potansiyele sahiptir. Birçok araştırmacı biyokütlenin biyoyakıtlara dönüştürülme teknolojilerine ve bu teknolojilerin verimliliğine odaklanmıştır fakat nihai tüketiciye ulaşılabilir bir ürün sunabilmek için güvenilir, sürdürülebilir bir biyokütle tedarik zinciri ağı tasarlamak da çevrim yöntemi kadar önemlidir (Awudu ve Zhang 2012).



Biyokütle tedarik zincirleri, çeşitli biyokütle kaynaklarının çevrim tesislerine en düşük maliyetle, istenilen zaman ve miktarda ulaştırılması için tasarlanır (Rentizelas 2013). Tedarik zinciri ağ tasarımının en önemli zorluklarından biri, karmaşık gerçek sistemlerin karşılaştığı sorunlara, çeşitli ölçeklerde, çoklu seviyelerde, çoklu dönemlerde, birden fazla amacın ve çok sayıda paydaşın dâhil olduğu durumlarda çözüm aramasıdır (Miranda-Ackerman ve diğ. 2017). Biyoenerji üretiminin en uygun biçimde yapılması amacıyla tasarlanan temel enerji ağı; biyokütle (hammadde) kaynağının üretimi, kaynakların toplanması/hasat edilmesi, ön işlem yapılacaksa ön işlem süreci, kaynakların uygun koşullarda depolanması, hammaddelerin ve yarı mamullerin taşınması, taşınan kaynakların uygun çevrim yöntemleriyle enerjiye dönüştürülmesi ve elde edilen enerjinin müşterilere ulaştırılması aşamalarından oluşmaktadır. Temel biyokütle tedarik zinciri adımları Şekil 2.1’de sunulmuştur.



Şekil 2.1: Biyokütle tedarik zinciri akış şeması (De Meyer ve diğ. 2012).

İlk iki aşamada biyokütle hammaddesi olarak orman kalıntıları, tarımsal atıklar, enerji bitkileri, mikroalgler, organik çöpler, endüstriyel atıklar, arıtma çamuru ve hayvansal atıklar gibi çeşitli biyokütle türleri kullanılabilir. İsteğe bağlı olan sonraki aşamada, biyokütle kaynağının çeşidine ve arazi mevcudiyetine göre hammaddelere boyut küçültme, yoğunlaştırma, kurutma yöntemleri gibi ön-işlemler uygulanabilir. Bu sayede biyokütle hammaddesinin yoğunluğu ve ısıl değeri artırılarak taşıma işleminin kolaylaştırılması amaçlanmaktadır. Depolama, elleçleme ve nakliye kolaylaştırma gibi avantajlara sahip olan ön-işlem, bazı durumlarda maliyet bakımından etkin olmayabilir. Bu nedenle, tedarik zincirinin genel verimliliği göz önünde bulundurularak bu işleme karar verilmelidir. Hammadde stoğunun veya ön-işleme tabi tutulmuş biyokütlenin depolanması, özellikle mevsimsel mevcudiyet olduğunda, biyokütle ağ tasarımının önemli bir aşamasıdır. Depolama kararları kuru madde kaybına ve yanma karakteristiklerinin değişimine neden olarak biyokütle kalitesini etkileyebilir (Darr ve Shah 2012). Biyokütle tedarik sistemleri tasarlanırken karşılaşılan temel sorun, ekilebilir arazi alanlarının genellikle

yüksek enerji talebine sahip şehirlerden uzak olmasıdır. Bu noktada biyoenerji kaynaklarının ön-işlem merkezleri, depolama alanları ve çevrim tesisleri arasında verimli ve sürdürülebilir bir şekilde taşınması gerekmektedir (Searcy ve diğ. 2014). Tedarik zincirinin sonunda, çeşitli dönüşüm yöntemleri kullanılarak farklı enerji biçimleri elde edilebilir. En çok kullanılan çevrim yöntemleri biyokimyasal, termokimyasal ve fizikokimyasal süreçler olarak gruplandırılabilir. Biyokimyasal çevrim tekniği temel olarak fermantasyon ve anaerobik çürütme olmak üzere iki işlem seçeneğini içermektedir. Termokimyasal dönüştürme tekniği temel olarak gazlaştırma, piroliz, hidrotermal işlemler ve yanma olmak üzere dört işlem seçeneğinden oluşur. Transesterifikasyon işlemini içeren fizikokimyasal dönüşüm tekniği ile ekstrakt yağı elde edilebilir (Adams ve diğ. 2018).

Şekil 2.1’de belirtilen temel işlemlerden biyokütle üretimi, hasat ve toplama, ön-işlem ve depolama, biyokütle tedarik sisteminin yukarı akış (upstream) kısmını oluştururken, üretilen enerjiyi müşterilere ulaştırma ve varsa uygun bir biçimde enerjinin depolanması tedarik zincirinin aşağı akış (downstream) kısmını oluşturmaktadır (Akhtari ve diğ. 2014). Sadece biyoenerjiye dönüşüm işlemi ise üçüncü kısım olarak orta akış (midstream) şeklinde adlandırılmıştır (De Mayer ve diğ. 2014; Zandiatashbar ve diğ. 2018). Yukarı akış kısmı genellikle biyokütle hammadde kaynaklarına yakın bölgelerde gerçekleştirilirken, bu işlemler sırasında alınan kararların orta akış ve aşağı akış kısımlarına da etkileri oldukça fazladır. Benzer biçimde üst akış kararları alt ve orta akış kısımlarını etkilerken, orta akış kararları hem alt hem de üst akış kısımlarındaki işlemlerin türünü, dizilişini, iş istasyonlarının konumlarını ve sayılarını etkilemektedir.

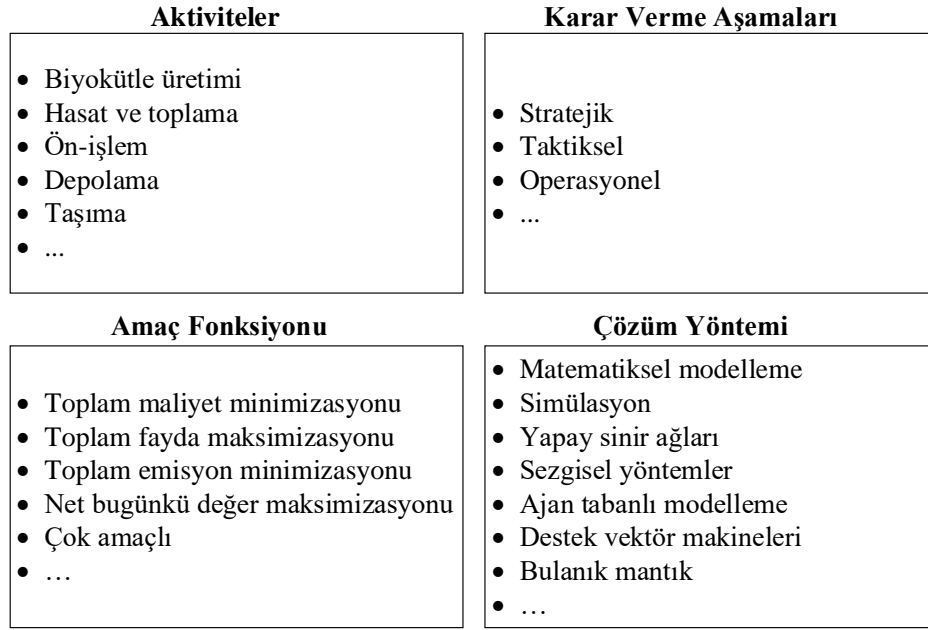
Biyokütle tedarik zinciri tasarlanırken alınması gereken kararlar etki düzeyleri, karmaşıklıkları ve zaman aralıklarına göre temel olarak üç ana gruba ayrılabilir. Stratejik, taktiksel ve operasyonel kararları içeren karar aşamaları ve biyokütle tedarik zincirinde alınması gereken temel kararlar Tablo 2.2’de verilmiştir.

**Tablo 2.2:** Biyokütle tedarik zincirinde karar verme aşamaları (De Meyer ve diğ. 2014; Zandiatashbar ve diğ. 2018).

<b>Stratejik (yıllık)</b>	<b>Taktiksel (aylık)</b>	<b>Operasyonel (günlük)</b>
Tesis büyüklüğü Tesis yeri Kullanılan teknoloji ve tipi Biyokütle temini Biyokütleyi tesisler arasında paylaşırma	Envanter planlama Toplanacak biyokütle miktarı Biyokütle toplama zamanları Stok kontrolü Taşıma yöntemi Parti büyüklüğü	Günlük stok kontrolü Rotalama Çizelgeleme

Stratejik kararlar, etkileri genellikle bir yıl veya daha uzun bir süreyi kapsadıkları için uzun vadelidir. Tedarik zincirinin yapılandırılmasının nasıl olacağına, kaynakların nasıl tahsis edileceğine ve farklı aşamalarda hangi işlemlerin gerçekleştirileceğine karar verilir. Bu kararlar genellikle en yüksek yönetim kademelerinde alınır ve daha yüksek risk seviyelerine sahiptir. Bununla birlikte, etkili stratejik kararlar sayesinde tedarik zincirindeki tüm paydaşlar yüksek getirilere sahip olabilirler. Taktiksel kararlar ise etkileri bir aydan bir yıla kadar olan dönemi kapsayan, orta seviyeli faaliyetleri ilgilendiren kararlardır. Stratejik kararların etkisi altında, verimliliği artırmak, maliyetleri kontrol etmek ve riskleri en aza indirmek için gerçekleştirilirler. Operasyonel kararlar ise haftalık veya günlük olarak alınan kısa vadeli kararlardır. Ürün veya hizmetlerin verimli bir şekilde üretilmesi ve etkin bir biçimde tedarik zincirinde dönüşüme uğraması ile ilgilendir. Stratejik ve taktiksel kısıtlar altında, operasyonel seviyedeki amaç; belirsizliğin azaltılmasını sağlamak ve kısa vadeli faaliyetlerde faydayı maksimize etmektir (Yılmaz Balaman ve Selim 2015). Biyokütle tedarik zincirinin performansının en iyilenmesi için verilen tüm kararların optimize edilmesi gerekmektedir. Bu şekilde bütünsel bir yaklaşım ile sağlam ve güvenilir bir ağ tasarımı gerçekleştirilebilir.

Genel olarak, biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımında verilmesi gereken kararlar Şekil 2.2'deki gösterildiği gibi dört ana başlıkta incelenebilir. Ağ tasarımı gerçekleştirilirken veya karar destek sistemi geliştirilirken öncelikle ağda bulunacak aşamalar yani aktiviteler belirlenmelidir. Daha sonra çözüm yönteminin ne olacağı, modelde kullanılacak amaç fonksiyonun türü ve çalışmanın kapsayacağı süre yani planlama ufku belirlenmelidir.



**Şekil 2.2:** Biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımında verilmesi gereken kararlar.

Biyokütle tedarik zinciri hakkında daha detaylı bilgi almak isteyen okuyucular Malladi ve Sowlati (2018), Yılmaz Balaman (2018), Zandiatashbar ve diğ. (2018), De Meyer ve diğ. (2014) ve Yılmaz Balaman (2014)'ın çalışmalarını inceleyebilirler.

## 2.1 Bölüm Özeti

Bu bölümde ilk olarak biyokütle tedarik zincirinde kullanılan temel kavramlar açıklanmış, genel hatları ile biyokütlenin tanımı yapılmış, temel biyokütle kaynaklarından bahsedilmiştir. Daha sonra çeşitli biyokütle kaynaklarından biyoenerji elde etmek için kullanılan çevrim yöntemleri açıklanmış, kökenleri ve çevrim teknolojilerine göre farklı biyoyakıt türleri incelenmiştir. Son olarak temel biyokütle tedarik zincirinde bulunan işlemler araştırılmış, bu işlemler genel akış şemasında gösterilmiş, sistem tasarlanırken verilmesi gereken kararlar etki düzeyleri, risk seviyeleri ve zaman aralıklarına göre gruplandırılmıştır.

Bir sonraki bölümde biyokütle tedarik zinciri tasarımı alanında daha önce yapılmış olan çalışmalar incelenmiş ve literatür taraması sonucunda elde edilen çıkarımlar, gözlemlenen eksiklikler ve gelecek çalışmalarda kullanılabilecek yaklaşımlar açıklanmıştır.

## 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 3.1 Giriş

Biyokütle tedarik zincirini konu alan çalışmalarda karar vericilerin, tedarik sisteminin oluşturulması ve etkin bir biçimde yönetilmesinde oldukça karmaşık problemlerle karşı karşıya kaldıkları gözlemlenmiştir. Son yıllarda, söz konusu problemlerin çözümü için farklı çözüm yaklaşımları önerilerek literatür genişletilmiştir. Konuyla ilgili çözüm yaklaşımları daha çok MM'ye odaklansa da son zamanlarda hızlı bir gelişim gösteren yapay zekâ tabanlı yöntemler karar verme süreçlerinde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Bu bölümde biyokütle tedarik zinciri tasarımı ve yönetimini konu alan çalışmalar incelenmiştir. Bu kapsamda, biyokütle kaynaklı tedarik zincirlerini optimize etmek için çeşitli çözüm yöntemlerini kullanan 2010-2022 yılları arasında yayımlanmış başlıca çalışmalar incelenmiştir.

Biyokütle tedarik zinciri tasarımı ve yönetimi problemleri son yıllarda birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir ve bu konuda yapılmış çok sayıda derleme çalışması bulunmaktadır. Bu çalışmalar iki ana gruba ayrılarak sınıflandırılabilir.

Birinci grup; problem çözümünde özellikle MM yöntemlerini kullanarak, tedarik zinciri operasyonları, karar seviyeleri ve sürdürülebilirlik boyutlarına odaklanmaktadır. Biyokütle tedarik zinciri ana operasyonlarının açıklandığı öncü çalışmalardan olan Gold ve Seuring (2011), biyoenerji üretimi için sistem yönetimi ile ilgili çalışmalara odaklanmışlardır. Biyokütle tedarik zincirlerindeki belirsizlik ve sürdürülebilirlik konularının ayrıntılı olarak ele alındığı derleme çalışması Awudu ve Zhang (2012) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada analitik yaklaşımlar ve simülasyon yöntemleri dikkate alınarak modelleme belirsizliklerinden bahsedilmiştir. Sharma ve diğ. (2013) biyoyakıt sistemlerini, çözümde kullanılan modelleme yaklaşımlarını (doğrusal programlama, stokastik programlama, hibrit modelleme), hammadde türlerini, karar seviyelerini, tedarik zinciri konfigürasyonlarını, performans ölçütlerini ve elde edilen biyoyakıt türlerini kullanarak analiz etmişlerdir. Ağ tasarımı ve modelleme konularına ek olarak, enerji talepleri, enerji hedefleri ve

çevrim yöntemleri kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır. Yılmaz ve Selim (2013), biyoenerji tedarik zincirlerini, teknoloji seviyesi ve süreç seçimi, kapasite planlaması ve ağ yapısının belirlenmesi konularına odaklanarak gözden geçirmişlerdir. De Meyer ve diğ. (2014), sistem tasarımı ve yönetimi için çözüm yaklaşımları olarak MM, ÇKKV ve sezgisel yöntemleri dikkate alan bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. İncelenen çalışmalar, karar seviyeleri, optimizasyon yöntemleri, karar değişkenleri ve amaç fonksiyonları açısından gözden geçirilmiştir. Mafakheri ve Nasiri (2014) tarafından yapılan derleme çalışmasında modeller, zincirdeki adımlar dikkate alınarak biyokütle üretimi ve hasattan biyoenerjiye çevrime kadar incelenmiştir. Wolfsmayr ve Rauch (2014) orman kaynaklı biyokütle sistemlerine odaklanmış ve çalışmaları taşıma biçimleri, depolama türleri ve modelleme yaklaşımları gibi temel konuları dikkate alarak incelemişlerdir. Yue ve diğ. (2014), biyoenerji sistemlerini modellemek ve optimize etmek için temel problemleri ve zorlukları inceleyen kapsamlı bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada biyokütle hammaddelerinden biyoenerji ürünlerine kadar uzanan enerji dönüşüm yöntemleri ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Yılmaz Balaman ve Selim (2015) tarafından yapılan diğer bir literatür araştırmasında, problem çözümünde dikkate alınması gereken karar düzeyleri, belirsizlik ve MM yaklaşımları incelenmiştir. Biyoenerji üretim sistemleri tasarımında kullanılan matematiksel modeller Wang ve diğ. (2015) tarafından araştırılmıştır. Çalışma enerji bitkilerinin üretimi, biyorafinerilerin tasarımı ve biyoenerji tedarik lojistiğine odaklanmıştır. Ghaderi ve diğ. (2016) konu ile ilgili çalışmaları çözüm yaklaşımlarına (MM, ÇKKV, sezgisel yöntemler), problemde yer alan belirsizliklere, sürdürülebilirlik kavramına, modellerin özelliklerine ve uygulama bölgelerine göre sınıflandırmışlardır. Hong ve diğ. (2016), biyokütle tedarik zincirlerinde karşılaşılan problemleri ve verilen kararları sürdürülebilirlik açısından sistematik olarak incelemişlerdir. Çalışmada problemlere uygulanan optimizasyon yöntemleri; MM, sezgisel yöntemler, hibrit modeller ve bilgi teknolojileri olarak sınıflandırılmıştır. Ba ve diğ. (2016), sistem tasarımında kullanılan modelleri ve karar seviyelerini yöneylem araştırması perspektifini kullanarak analiz etmişlerdir. Araştırmacılar, belirsizliklerin modele dâhil edilmesinin önemini altını çizmiş ve disiplinler arası çalışmaların literatüre katkı sağlayacağı sonucuna varmışlardır. Mirkouei ve diğ. (2017), orman kaynaklı biyokütle sistemlerinin optimizasyonunu konu alan güncel çalışmaları teknolojik açıdan incelemişlerdir. Çalışmanın bulguları yeni çevrim teknolojilerinin

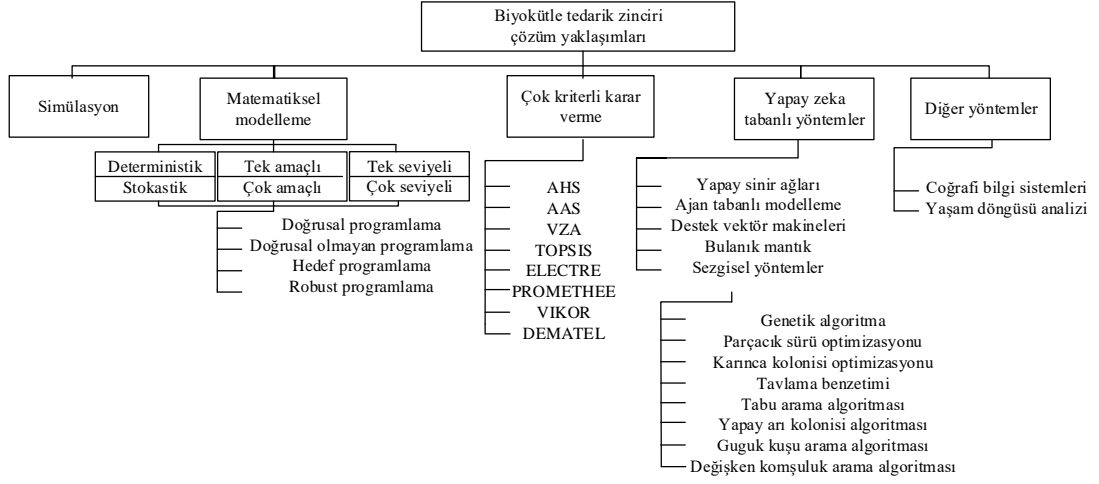
geliştirilmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Karar verme seviyelerini ve çözüm yaklaşımlarını (MM ve simülasyon) içeren ve sürdürülebilirliğe odaklanan başka bir derleme Pérez ve diğ. (2017) tarafından yapılmıştır. Zandiatashbar ve diğ. (2018), biyokütle tedarik zincirlerindeki ana süreçleri tanımlamış ve bunları optimize etmek için kullanılan MM, sezgisel yöntemler, ÇKKV, CBS ve simülasyon uygulamalarını araştırmışlardır. Malladi ve Sowlati (2018), biyokütle lojistik operasyonlarının önemli özelliklerini, çözüm için kullanılan matematiksel modelleri gözden geçirmiş ve ilgili konudaki yeni gelişmeleri incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kısa vadeli kararları içeren biyokütle lojistik operasyonlarının gelişmeye oldukça açık olduğu belirlenmiştir. Nunes ve diğ. (2020), biyokütle tedarik sistemlerindeki araştırmaları tedarik zinciri performansları, konfigürasyonları, boyutlandırılmaları ve çizelgelendirilmelerini dikkate alarak incelemişlerdir. Zahraee ve diğ. (2020), biyoenerji zincirlerinin modellenmesi ve optimizasyonuna odaklanmış, simülasyon, MM, ÇKKV ve sezgisel yöntemler gibi çözüm yaklaşımlarını içeren çalışmaları derlemişlerdir. Çalışmada ağ tasarımındaki karar seviyeleri, sürdürülebilirlik optimizasyonu, finansal, sosyal ve politik yönler de dikkate alınmıştır. Son yıllarda çözüm yöntemlerinden, doğrusal olmayan programlama ve sezgisel yöntemlere ilginin arttığı belirtilmiştir. Daha yakın zamanlarda, Albashabsheh ve Stamm (2021) biyokütle kaynaklarına uygulanan ön işlem yöntemlerine odaklanmışlar ve tedarik ağlarının yönetilmesinde MM, simülasyon ve CBS kullanımını araştırmışlardır. Hammadde kaynağı olarak dallı darı ve mısır saplarını içeren çalışma sonucunda hareketli ön işlem ünitelerinin yaygınlaşması ve çiftçilerin ekim kararlarının incelenmesi gerektiği belirtilmiştir. Son olarak Lo ve diğ. (2021), matematiksel modelleri problem çözümünde kullanan çalışmaları, biyokütle mevcudiyeti, kalite, nakliye maliyeti, talep, fiyatlar ve ücretler gibi ağ tasarımındaki belirsizlikleri dikkate alarak incelemişlerdir.

İkinci grupta yer alan derleme çalışmalarında, biyokütle tedarik zincirlerinin tasarım ve yönetiminde matematiksel modellerin dışında bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemeler sonucunda sıklıkla kullanılan yaşam döngüsü analizi (YDA), yapay zekâ, CBS, sezgisel yöntemler gibi diğer yaklaşımlara odaklanılmıştır. Artan hesaplama gücü sayesinde nispeten kısa sürede, birden fazla değişken içeren, karmaşık ve doğrusal olmayan problemlerin çözümü mümkün hale gelmektedir. Söz konusu yaklaşımlar çözümde ortaya çıkabilen insan kaynaklı hataların azalmasını

sağlayabilmekte ve karar verme süreçlerini kısaltabilmektedir. Bu yöntemlerin çoğu, çözüm performansını iyileştirmek için geri bildirim mekanizmasına sahiptir. Bu şekilde elde edilen bilgiler kolayca çözüme dâhil edebilir ve çözüm güncellenebilir (Yanase ve Triantaphyllou 2019). Söz konusu yaklaşımlar, biyokütle tedarik zincirlerinin makul bir süre içinde verimli bir şekilde tasarlanması ve yönetilmesinde etkin bir rol oynayabilir. Mevcut literatürde, biyoenerji sistemlerinin tasarımı ve yönetimi konusunu ele alan, matematiksel programlama dışında modelleme yaklaşımlarına odaklanan başlıca beş çalışma bulunmaktadır. Bu literatür taramalarının kapsamı birbirinden ve yapılan tez çalışmasından oldukça farklı olmasına rağmen, tümü biyoenerji sistemlerindeki matematiksel modelleri göz ardı ederek diğer çözüm yaklaşımları açısından mevcut literatürü gözden geçirmektedir. Castillo-Villar (2014), biyokütle tedarik zincirlerinin tasarımında kullanılan sezgisel yöntemleri araştırmıştır. Çalışmanın bulguları biyoenerji ağ tasarımı ve planlaması için genetik algoritmanın en yaygın kullanılan sezgisel çözüm yöntemi olduğunu ortaya koymuştur. Sistem tasarımı ve yönetiminde YDA ve CBS kullanımına odaklanan Hiloidhari ve diğ. (2017), gelecek yıllardaki biyokütle potansiyelinin tahmini, lojistik planlaması, tesis tasarımı, karar verme süreçlerinde belirsizliklerin çözüme dâhil edilmesi ve çevresel performans değerlendirme konularını incelemişlerdir. Aalto ve diğ. (2019), hesaplama yöntemlerine odaklanmış ve biyokütle tedarik sistemi literatürünü YDA, CBS ve simülasyon yöntemlerinin kullanımını açısından incelemişlerdir. Orman kaynaklı biyoenerji sistemlerini ele alan ve veri analizi yöntemlerini kullanan çalışmalar Zhang ve diğ. (2020) tarafından incelenmiştir. İlgili çalışmalar üretim, hasat ve toplama gibi biyokütle tedarik zinciri süreçlerine göre analiz edilmiştir. Son olarak, Liao ve Yao (2021), biyoenerji ağ tasarımı ve yönetiminin çeşitli aşmalarında kullanılan yapay zekâ tabanlı yaklaşımları araştırmışlardır. Çalışmada yapay zekâ yöntemleri; sembolik yapay zekâ, makine öğrenmesi, sezgiseller, hibrit ve diğer yaklaşımlar olarak gruplanmıştır. Son yıllarda ilgili konuda yapılan çalışma sayısının arttığı, yapay zekâ tabanlı yaklaşımların yapılandırılmış ve ulaşılabilir veriye ihtiyaç duyduğu, çeşitli analitik yaklaşımların çözüme dâhil edilmesinin iyi sonuçlar verebileceği belirtilmiştir.

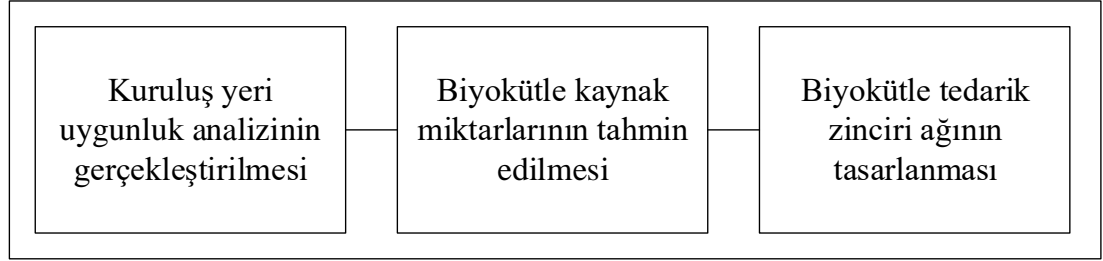
Çalışmalardan elde edilen bilgilere göre biyokütle tedarik zinciri çözüm yaklaşımları Şekil 3.1’de gösterildiği üzere gruplandırılabilir.





**Şekil 3.1:** Biyokütle tedarik zinciri çözüm yaklaşımları.

Bu çalışmada biyokütle tedarik zincirlerini optimize etmeyi konu alan başlıca araştırma çalışmaları, çözüm sürecindeki temel işlemler kullanılarak incelenmiştir. Biyokütle kaynaklı tedarik sistemlerinin tasarımında bulunan temel işlemler Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.2:** Biyokütle tedarik zinciri tasarımında bulunan temel işlemler.

Biyokütle tedarik zinciri ile ilgili derlemeler incelendiğinde temel işlemlerin bir bütün olarak ele alındığı çalışma sayısının oldukça az olduğu gözlemlenmiştir. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla tezin ana çerçevesinin üç temel biyoenerji sistemi tasarım aşamasını (kuruluş yeri uygunluk analizi, biyokütle kaynak miktarlarının tahmini, biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımı) da içermesi amaçlanmıştır. Bu noktadan yola çıkarak sistem tasarımındaki her bir işlem için literatür taraması gerçekleştirilmiştir.

### 3.1.1 Kuruluş Yeri Uygunluk Analizi

Biyoenerji sistemlerinin tasarlanması ve yönetilmesi sürecinde biyokütle kaynaklarının depolanması, ön işlem merkezlerinin yerleştirilmesi, çevrim tesislerinin veya biyorafinerilerin kuruluşu için uygun alanların belirlenmesi gerekmektedir. Bu sayede, kuruluş yeri için daha düşük maliyetli, daha uygun muhtemel bölgeler belirlenerek ağ tasarımının ve planlamasının etkin bir biçimde yapılması sağlanabilir. Bu bölümde, biyoenerji sistemlerinin tasarımında ve planlanmasında kullanılan tesis, depo ve ön işlem merkezlerinin konumlandırılmasında, kuruluş yeri uygunluk analizinde yararlanılan çözüm yöntemleri, bu konuda 2010 yılından sonra yayımlanmış başlıca araştırma çalışmaları kullanılarak incelenmiştir. Konu ile ilgili çalışmalar Web of Science ve Google Scholar veri tabanlarından “biomass”, “geographic” ve “location” arama sözcükleri kullanılarak elde edilmiştir. Arama sonucunda analitik ve sistematik yöntemleri içeren 55 adet çalışma detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen çalışmalar Tablo 3.1’de uygulama alanı, hammadde kaynakları, kuruluş yeri türü, değerlendirmede kullanılan kriterler ve çözüm yöntemlerine göre listelenmiştir.

**Tablo 3.1:** Kuruluş yeri uygunluk analizini konu alan çalışmalar.

Çalışma	Uygulama Alanı	Hammadde Kaynakları	Kuruluş Yeri Türü	Seçim Kriterleri	Çözüm Yöntemi
Parker ve diğ. (2010)	Batı Eyaletleri, Amerika Birleşik Devletleri	Tarımsal ürünler Tarımsal atıklar Orman kalıntıları Organik çöpler Enerji bitkileri	Çevrim tesisleri	Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Biyokütle potansiyeli Taşıma maliyeti	CBS + MM
Chiew ve diğ. (2011)	Selangor, Malezya	Tarımsal ürünler	Çevrim tesisleri	Rakım Taşıma maliyeti Biyokütle potansiyeli	CBS + Simülasyon
Zhang ve diğ. (2011)	Yukarı Michigan, Amerika Birleşik Devletleri	Orman kalıntıları	Çevrim tesisleri	Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Biyokütle potansiyeli Taşıma maliyeti	CBS
Sultana ve Kumar (2012)	Alberta, Kanada	Tarımsal atıklar	Ön işlem tesisleri	Karayollarına uzaklık Çevrim tesislerine uzaklık Eğim Enerji nakil hatlarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Havaalanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Endüstriyel alanlara uzaklık Parklara uzaklık Taşıma maliyeti	CBS + ÇKKV (AHS)
Yu ve diğ. (2012a)	Zhanjiang, Çin	Tarımsal ürünler	Depolama tesisleri + Çevrim tesisleri	Karayollarına uzaklık Biyokütle potansiyeli Taşıma maliyeti	CBS + MM
Yu ve diğ. (2012b)	Zhanjiang, Çin	Tarımsal ürünler	Depolama tesisleri + Çevrim tesisleri	Karayollarına uzaklık Biyokütle potansiyeli Taşıma maliyeti	CBS + MM

**Tablo 3.1:** Kuruluş yeri uygunluk analizini konu alan çalışmalar (devam).

Çalışma	Uygulama Alanı	Hammadde Kaynakları	Kuruluş Yeri Türü	Seçim Kriterleri	Çözüm Yöntemi
Niblick ve diğ. (2013)	Pittsburgh	Tarımsal ürünler	Biyokütle üretim alanları	Eğim Su kaynaklarına uzaklık Ormanlara uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Tarımsal alanlara uzaklık	CBS
Kuhmaier ve diğ. (2014)	Styria, Avusturya	Orman kalıntıları	Çevrim tesisleri	Karayollarına uzaklık Ormanlara uzaklık İklim Eğim Su kaynaklarına uzaklık Endüstriyel alanlara uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Hastanelere uzaklık	CBS + ÇKKV (Bulanık AHS)
Silva ve diğ. (2014)	Entre-Douro-e-Minho, Portekiz	Hayvansal atıklar	Çevrim tesisleri	Koruma alanlarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Eğim Endüstriyel alanlara uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Elektrik ağına uzaklık Tarımsal alanlara uzaklık	CBS + ÇKKV (ELECTRE- TRI)
Sultana ve Kumar (2014)	Alberta, Kanada	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri	Karayollarına uzaklık Çevrim tesislerine uzaklık Eğim Enerji nakil hatlarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Havaalanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Endüstriyel alanlara uzaklık Parklara uzaklık Taşıma maliyeti	CBS + ÇKKV (AHS)
Biberacher ve diğ. (2015)	Pakistan	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri	Biyokütle potansiyeli Taşıma maliyeti	CBS + MM
Boruff ve diğ. (2015)	Batı Avustralya	Mikroalgler	Çevrim tesisleri	Eğim Toprak yapısı Su kaynaklarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Güneşlenme miktarı Kıyılara uzaklık İşgücüne uzaklık Karayollarına uzaklık	CBS
Bravo-Fritz ve diğ. (2015)	Şili	Mikroalgler	Çevrim tesisleri	Güneşlenme miktarı Kıyılara uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Tarımsal alanlara uzaklık Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Eğim Termoelektrik santrallere uzaklık	CBS
Comber ve diğ. (2015)	East Midlands, Birleşik Krallık	Tarımsal atıklar Organik çöpler Hayvansal atıklar	Çevrim tesisleri	Taşıma maliyeti	CBS + MM
Delivand ve diğ. (2015)	Apulia, Basilicata, Campania, İtalya	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri	Endüstriyel alanlara uzaklık Eğim Karayollarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Biyokütle potansiyeli Yerleşim yerlerine uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Ormanlara uzaklık Arkeolojik alanlara uzaklık Kıyılara uzaklık	CBS + ÇKKV (AHS)

**Tablo 3.1:** Kuruluş yeri uygunluk analizini konu alan çalışmalar (devam).

Çalışma	Uygulama Alanı	Hammadde Kaynakları	Kuruluş Yeri Türü	Seçim Kriterleri	Çözüm Yöntemi
Dimitrova ve diğ. (2015)	Lubelskie, Polonya	Orman kalıntıları	Çevrim tesisleri	Biyokütle potansiyeli Taşıma maliyeti Ormanlara uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Eğitim Enerji nakil hatlarına uzaklık	CBS
Romero ve diğ. (2015)	Madrid, İspanya	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri	Biyokütle potansiyeli Elektrik ağına uzaklık Karayollarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Eğitim Çevrim tesislerine uzaklık	CBS + ÇKKV
Sánchez-García ve diğ. (2015)	Asturias, İspanya	Orman kalıntıları	Çevrim tesisleri	Eğitim Biyokütle potansiyeli Karayollarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık	CBS
Guerrero ve diğ. (2016)	El Oro, Ekvator	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri	Biyokütle potansiyeli Taşıma maliyeti	CBS
Sahoo ve diğ. (2016)	Georgia, Amerika Birleşik Devletleri	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri	Koruma alanlarına uzaklık Tarımsal alanlara uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Eğitim Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Taşıma maliyeti	CBS + Yapay zekâ (Yapay sinir ağları) + MM
Gonzales ve Searcy (2017)	Teksas, Amerika Birleşik Devletleri	Tarımsal atıklar Enerji bitkileri	Depolama tesisleri + Çevrim tesisleri	Taşıma maliyeti Tarımsal alanlara uzaklık Ormanlara uzaklık	CBS + Sezgisel yöntemler
San Martín ve diğ. (2017)	Bask Bölgesi, İspanya	Organik çöpler	Çevrim tesisleri	Taşıma maliyeti Karayollarına uzaklık	CBS + ÇKKV (AHS)
Sharma ve diğ. (2017)	Amerika Birleşik Devletleri	Tarımsal atıklar Enerji bitkileri	Çevrim tesisleri	Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Çevrim tesislerine uzaklık Eğitim Enerji nakil hatlarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Havaalanlarına uzaklık Barajlara uzaklık	CBS + ÇKKV (AHS)
Zhao ve diğ. (2017)	Hubei, Çin	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri + Biyokütle toplama noktaları	Koruma alanlarına uzaklık Havaalanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Tarımsal alanlara uzaklık Karayollarına uzaklık Eğitim Biyokütle potansiyeli	CBS + MM (Antibody Affinity Evaluation algoritması)
Alvarez-de Prado ve diğ. (2018)	İspanya	Tarımsal atıklar Hayvansal atıklar Endüstriyel atıklar	Çevrim tesisleri	Biyokütle potansiyeli Taşıma maliyeti Enerji nakil hatlarına uzaklık Karayollarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık İşsizlik oranı	CBS + MM
Jeong (2018)	Extremadura, İspanya	Genel	Çevrim tesisleri	Taşıma maliyeti Biyokütle potansiyeli Karayollarına uzaklık Yağış miktarı Sıcaklık Biyçeşitlilik Tarımsal alanlara uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Eğitim Toprak yapısı	CBS + ÇKKV (Bulanık DEMATEL)

**Tablo 3.1:** Kuruluş yeri uygunluk analizini konu alan çalışmalar (devam).

Çalışma	Uygulama Alanı	Hammadde Kaynakları	Kuruluş Yeri Türü	Seçim Kriterleri	Çözüm Yöntemi
Jeong ve Ramirez-Gomez (2018)	Hervas, İspanya	Genel	Çevrim tesisleri	Taşıma maliyeti Biyokütle potansiyeli Karayollarına uzaklık Yağış miktarı Tarımsal alanlara uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Eğitim Toprak yapısı	CBS + ÇKKV (Bulanık DEMATEL)
Kim ve diğ. (2018)	Güney Büyük Ovalar, Amerika Birleşik Devletleri	Enerji bitkileri	Depolama tesisleri	Taşıma maliyeti	CBS + Ajan tabanlı simülasyon + MM
Sahoo ve diğ. (2018)	Ohio, Amerika Birleşik Devletleri	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri	Koruma alanlarına uzaklık Tarımsal alanlara uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Maden alanlarına uzaklık Taşkın alanlarına uzaklık Eğitim Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Doğalgaz hatlarına uzaklık	CBS + Yapay zekâ (Yapay sinir ağları) + MM
Santibanez-Aguilar ve diğ. (2018)	Meksika	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri	Biyokütle potansiyeli Eğitim Karayollarına uzaklık Havaalanlarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Enerji nakil hatlarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Doğal afetlere yatkınlık	CBS
Zareei (2018)	İran	Hayvansal atıklar Organik çöpler	Çevrim tesisleri	Ormanlara uzaklık Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Havaalanlarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Taşkın alanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Biyokütle potansiyeli	CBS
Laasasenaho ve diğ. (2019)	Kuudestaan, Finlandiya	Hayvansal atıklar Organik çöpler Arıtma çamuru Torf	Çevrim tesisleri	Taşıma maliyeti	CBS
Lemire ve diğ. (2019)	Quebec, Kanada	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri + Biyokütle toplama noktaları	Biyokütle potansiyeli Karayollarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Havaalanlarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Enerji nakil hatlarına uzaklık Eğitim	CBS + ÇKKV (AHS)
Lopez-Rodriguez ve diğ. (2019)	Badajaz, İspanya	Orman kalıntıları	Biyokütle üretim alanları + Çevrim tesisleri	Biyokütle potansiyeli Karayollarına uzaklık Eğitim Koruma alanlarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık	CBS
Lozano-Garcia ve diğ. (2019)	Meksika	Mikroalgler	Çevrim tesisleri	Arazi kullanımı Eğitim Sıcaklık Buharlaştırma Güneşlenme miktarı Yağış miktarı Su kaynaklarına uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Karayollarına uzaklık Havaalanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık	CBS

**Tablo 3.1:** Kuruluş yeri uygunluk analizini konu alan çalışmalar (devam).

Çalışma	Uygulama Alanı	Hammadde Kaynakları	Kuruluş Yeri Türü	Seçim Kriterleri	Çözüm Yöntemi
Martinkus ve diğ. (2019)	Cascades-to-Pacific, Amerika Birleşik Devletleri	Orman kalıntıları	Çevrim tesisleri	Değişken maliyetler Küresel ısınma potansiyeli Yaratılan iş miktarı Sosyal varlıklar	CBS + ÇKKV + MM
Morato ve diğ. (2019)	Santa Cruz, Bolivya	Tarımsal atıklar	Biyokütle toplama noktaları	Biyokütle potansiyeli Karayollarına uzaklık Çevrim tesislerine uzaklık Eğim Enerji nakil hatlarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Havaalanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık	CBS + ÇKKV (AHS)
Santibanez-Aguilar ve diğ. (2019)	Meksika	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri	Biyokütle potansiyeli Eğim Karayollarına uzaklık Havaalanlarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Enerji nakil hatlarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Doğal afetlere yakınlık	CBS + MM
Danzi ve diğ. (2020)	Sicilya, İtalya	Tarımsal ürünler	Çevrim tesisleri	Biyokütle potansiyeli Endüstriyel alanlara uzaklık Karayollarına uzaklık	CBS + ÇKKV (Sosyal ağ analizi)
Jeong ve Gonzalez-Gomez (2020)	Hervas, İspanya	Genel	Çevrim tesisleri	Taşıma maliyeti Biyokütle potansiyeli Karayollarına uzaklık Yağış miktarı Tarımsal alanlara uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Eğim Toprak yapısı	CBS + ÇKKV (Bulanık DEMATEL)
Kang ve diğ. (2020)	Teksas, Amerika Birleşik Devletleri	Mikroalgler	Çevrim tesisleri	Sıcaklık Rakım Koruma alanlarına uzaklık Karayollarına uzaklık Havaalanlarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Kıyılara uzaklık	CBS + MM
Norstebo ve diğ. (2020)	Ostfold, Norveç	Orman kalıntıları	Bütünleşik biyoekonomik tesisler	Biyokütle potansiyeli Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Eğitim kurumlarına uzaklık	CBS + ÇKKV + MM
Pergola ve diğ. (2020)	Basilicata, İtalya	Orman kalıntıları	Çevrim tesisleri	Taşımanın çevresel etkileri Koruma alanlarına uzaklık Karayollarına uzaklık Elektrik ağına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık	CBS + YDA
Waewsak ve diğ. (2020)	Songkhla, Tayland	Orman kalıntıları	Çevrim tesisleri	Eğim Yükseklik Rüzgâr hızı Su kaynaklarına uzaklık Ormanlara uzaklık Havaalanlarına uzaklık Karayollarına uzaklık Enerji nakil hatlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık	CBS + ÇKKV (AHS)
van Holsbeeck ve Srivastava (2020)	Queensland, Avustralya	Orman kalıntıları	Çevrim tesisleri	Biyokütle potansiyeli Karayollarına uzaklık	CBS

**Tablo 3.1:** Kuruluş yeri uygunluk analizini konu alan çalışmalar (devam).

Çalışma	Uygulama Alanı	Hammadde Kaynakları	Kuruluş Yeri Türü	Seçim Kriterleri	Çözüm Yöntemi
Ankathi ve diğ. (2021)	Wisconsin, Amerika Birleşik Devletleri	Hayvansal atıklar Organik çöpler	Çevrim tesisleri	Elektrik ağına uzaklık Arazi örtüsü Kamu arazilerine uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Su kaynaklarına uzaklık Karayollarına uzaklık	CBS
Cardoza ve diğ. (2021)	Endülüs, İspanya	Tarımsal atıklar	Çevrim tesisleri	Ormanlara uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Eğitim Endüstriyel alanlara uzaklık	CBS
de Jesus ve diğ. (2021)	Parana, Brezilya	Tarımsal atıklar Hayvansal atıklar	Çevrim tesisleri	Karayollarına uzaklık Enerji nakil hatlarına uzaklık Biyokütle potansiyeli	CBS + ÇKKV (AHS)
Güler ve diğ. (2021)	Türkiye	Tarımsal atıklar Hayvansal atıklar	Çevrim tesisleri	Nüfus yoğunluğu Biyokütle potansiyeli Eğitim Su kaynaklarına uzaklık Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık	CBS + ÇKKV (Bulanık en iyi - en kötü yöntemi)
Laylakar ve diğ. (2021)	Sao Paulo, Brezilya	Tarımsal ürünler	Çevrim tesisleri	Enerji nakil hatlarına uzaklık	CBS + Sezgisel yöntemler (Parçacık sürü optimizasyonu)
Patel ve diğ. (2021)	Alberta, Kanada	Tarımsal atıklar Hayvansal atıklar Organik çöpler	Biyokütle toplama noktaları	Karayollarına uzaklık Biyokütle potansiyeli	CBS
Afkhami ve Zarrinpoor (2022)	Fars, İran	Tarımsal ürünler	Biyokütle üretim alanları	Tarım alanlarına uzaklık Karayollarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Rakım Eğitim Su kaynaklarına uzaklık Ormanlara uzaklık İklim	CBS + ÇKKV (Bulanık en iyi - en kötü yöntemi + TOPSIS + MOORA)
Mao ve diğ. (2022)	Jilin, Çin	Tarımsal atıklar	Biyokütle toplama noktaları	Taşıma maliyeti	MM + Sezgisel (Genetik algoritma)
Martinez-Martinez ve diğ. (2022)	Biobío ve Ñuble, Şili	Genel	Çevrim tesisleri	Ormanlara uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Eğitim	CBS + ÇKKV
Peng ve diğ. (2022)	Yangtze Nehri Deltası, Çin	Genel	Çevrim tesisleri	Biyokütle potansiyeli Nüfus Su kaynaklarına uzaklık Koruma alanlarına uzaklık Yerleşim yerlerine uzaklık Karayollarına uzaklık Tren yollarına uzaklık Elektrik ağına uzaklık Eğitim Rakım	CBS + ÇKKV (AHS)

Parker ve diğ. (2010), çalışmalarında biyokütle potansiyelini belirlemişler, çevrim tesislerinin uygunluk analizini CBS ile yapmışlar ve matematiksel model yardımıyla ağ tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Tek çevrim tesisinin çeşitli kapasitelerdeki kuruluş uygunluğunu farklı senaryolar kullanarak inceleyen Chiew ve diğ. (2011), CBS tabanlı simülasyon yöntemi ile çözüme ulaşmışlardır. Zhang ve diğ. (2011) ise kuruluş yeri seçimi için iki aşamalı bir yaklaşım önermişlerdir. İlk aşamada CBS ile uygun bölgeler saptanmış, sonra biyokütle potansiyeli ve en kısa yol hesaplaması ile en uygun noktalar belirlenmiştir. Sultana ve Kumar (2012)

yaptıkları çalışmada peletleme tesislerinin sayılarını, kapasitelerini ve konumlarını ÇKKV-CBS yaklaşımı ile belirlemişlerdir. Analitik hiyerarşi süreci (AHS) kullanılarak biyoenerji tesislerinin kuruluş yeri seçimi için önemli faktörler saptanmıştır. Mekânsal verilerin yardımı ile yer tahsisi problemine çözüm aranmış ve başlangıç-bitiş yeri maliyet matrisi kullanılarak en uygun rotalar seçilmiştir. CBS ve MM yardımıyla biyokütle depolama ve çevrim tesislerinin yerlerini saptayan Yu ve diğ. (2012a), çalışmalarında taşıma uzaklıklarını düz bir çizgi olarak kabul etmiş ve hesaplamaları bu yöntemle gerçekleştirmişlerdir. Yu ve diğ. (2012b) sonraki çalışmalarında ise aynı bölgede kurulması gereken tesislerin sayılarını ve konumlarını gerçek harita yol uzunluklarını kullanarak belirlemişlerdir. Niblick ve diğ. (2013) biyoetanol üretimi için ayçiçeğinin hangi bölgelere ekilebileceğini CBS ile belirlemişlerdir. Gıda-enerji dengesini kurabilmek adına çözümde tarıma daha az elverişli alanlar kullanılmıştır. Kuruluş yeri seçiminde etkisi olduğu düşünülen kriterlerin katsayıları, Kuhmaier ve diğ. (2014) tarafından, paydaşlar da kararlara dahil edilerek belirlenmiştir. Daha sonra uygunluk analizi CBS ile gerçekleştirilmiş ve orman kaynaklı biyokütle çevrim tesislerinin olası kuruluş noktaları saptanmıştır. Silva ve diğ. (2014) hayvansal atıklarla beslenen biyoenerji sistemindeki çevrim tesislerinin kuruluş yeri analizi için CBS ve ELECTRE-TRI yöntemlerini kullanmışlardır. Yollardaki eğrilik faktörünü dikkate alan ve biyokütle kaynaklarının düz bir çizgi boyunca taşınmayacağını varsayan Sultana ve Kumar (2014), uygulama alanı için çeşitli eğrilik katsayıları belirlemiş ve bu katsayıların kurulacak tesislerin kapasite ve lokasyon kararlarında etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Biyokütle tedarik zincirlerinde tesislerin kuruluş yerlerini belirlemek için ASECO adlı uygulamayı geliştiren Biberacher ve diğ. (2015), çözümde CBS ve MM yöntemlerinden faydalanmışlardır. Öncelikle istatistiksel metotlarla biyokütle potansiyeli tahmin edilmiş daha sonra geliştirilen çerçeve ile problem çözülmüştür. Mikroalglerin biyoenerjide kullanımı için Boruff ve diğ. (2015) çevrim tesisleri için uygun yerleri CBS yaklaşımıyla belirlemişlerdir. Bravo-Fritz ve diğ. (2015) mikroalglerin üretim ve enerjiye dönüştürülmesi süreçleri için kuruluş yeri uygunluk analizini tüm Şili için gerçekleştirmişlerdir. Comber ve diğ. (2015) değiştirilmiş p-medyan yer seçim probleminin çözümü için CBS tabanlı Teitz ve Bart arama sezgiselini önermişlerdir. Delivand ve diğ. (2015) çevrim tesislerinin kuruluş yeri uygunluk analizini CBS ve AHS kullanarak belirlemişler, sonrasında YDA ile gaz emisyon değerleri ve taşıma maliyetlerini hesaplayıp olası ağ senaryolarını



saptamışlardır. Orman kaynaklı biyoenerji sistemlerini inceleyen Dimitrova ve diğ. (2015), ağaçların uzama miktarı ile biyokütle potansiyelini belirlemişlerdir. Çözümde çeşitli katmanlar oluşturularak farklı senaryolar dikkate alınmış ve çevrim tesislerinin kuruluşu için uygun noktalar CBS ile belirlenmiştir. Romero ve diğ. (2015) tritikale bitkisinin atıklarına odaklanmışlar ve uygulama alanında kurulması planlanan çevrim tesislerinin hangi bölgelere kurulabileceğini CBS ve ÇKKV yöntemleri ile belirlemişlerdir. Sánchez-García ve diğ. (2015) kuruluş yeri seçimine ve diğer stratejik kararlara destek olmak için WISDOM-GIS yaklaşımını geliştirerek ağaç işleme tesislerinin talep ve arz dengesini de göz önünde bulundurarak bir çözüm üretmişlerdir. Muz bitkisinin atıklarına odaklanan Guerrero ve diğ. (2016), çevrim tesislerinin kuruluş yerlerini biyokütle potansiyeli ve taşıma maliyetine göre mekânsal olarak belirlemişlerdir. Sahoo ve diğ. (2016) potansiyel biyokütle kaynaklarının değerlendirilmesi, tesis yerleşimi kararları ve nakliye maliyetleri için melez bir CBS-Yapay Sinir Ağları (YSA)-MM yaklaşımı önermişlerdir. Biyokütle kaynağı olarak pamuk saplarının değerlendirildiği çalışmada, kaynak dağılımlarının mekânsal analizi ve tahmini toprak erozyonu, toprak şartlandırma indeksi ve bitki verimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gonzales ve Searcy (2017) biyokütle depolama ve çevrim tesislerinin konumlarını çeşitli senaryolar ve varsayımlar altında (tarımsal alanların 32 km, biyokütle taşıma tesislerinin ise 81 km çapında bulunması) CBS tabanlı bir sezgiselle belirlemişlerdir. Yemek atıklarının geri kazanımı için çevrim tesislerinin kuruluş yerlerini çevresel, ekonomik, teknik ve coğrafi kriterlere göre belirleyen GISWASTE adlı bir uygulama geliştiren San Martin ve diğ. (2017), çözümde CBS ve AHS yöntemlerinden yararlanmışlardır. Sharma ve diğ. (2017) biyorafineri kuruluş yeri uygunluk analizi problemini iki aşamada ele almışlardır. İlk aşamada üç farklı biyokütle kaynağının (dallı darı, miscanthus, mısır sapı) dağılımları mekânsal olarak belirlenmiş, daha sonra da tüm ülkede çevrim tesisi için uygun noktalar (164 adet) CBS ve AHS kullanılarak saptanmıştır. Çeşitli tarımsal ürünlerin saplarının biyoenerji eldesinde kullanıldığı sistemde toplama noktaları ve çevrim tesislerinin uygunluk analizinin gerçekleştirildiği çalışmada Zhao ve diğ. (2017) CBS ve MM kullanarak çözüme ulaşmışlardır. Yapay bağışıklık sistemi algoritması ile problem çözdürülmüş, farklı toplama noktası ve çevrim tesisi sayıları için sonuçlar elde edilmiştir. Alvarez-de Prado ve diğ. (2018) çeşitli biyokütle hammaddelerinin belirli oranlarda karıştırılması yoluyla biyogaz verimi yüksek kümelerden yararlanmışlardır. Söz konusu kümeler biyoenerji potansiyeli şeklinde

incelenip, CBS ve MM yardımıyla gruplara en uygun noktalarda açılacak çevrim tesisleri belirlenmiştir. Jeong (2018) spesifik biyokütle kaynaklarına yönelmeden genel bir inceleme gerçekleştirmiş, uzmanlar ile yaptığı anket çalışması sonucunda kuruluş yeri seçiminde etkili kriterleri belirlemiş, CBS ve ÇKKV ile uygun noktaları saptamıştır. Jeong ve Ramirez-Gomez (2018) kuruluş yeri seçiminde uzun dönem sürdürülebilirliği sağlamak için CBS-ÇKKV yaklaşımını benimsemişlerdir. Kriterlerin ağırlıklandırılması için bulanık DEMATEL yöntemi kullanılmış, CBS ile de kriterlere göre oluşturulan katmanlar analiz edilerek en uygun bölgeler belirlenmiştir. Kim ve diğ. (2018) biyokütle tedarik zincirindeki depolama sistemlerine odaklanmışlardır. Sistemdeki nakliye maliyetlerini azaltmak için iki aşamalı bütünleşik bir yaklaşım önermişlerdir. İlk aşamada, süreç tabanlı bir model olan ALMANAC (Agricultural Land Management Alternative with Numerical Assessment Criteria) ile mahsul verim tahmini yapılmıştır. İkinci aşamada, ajan tabanlı simülasyon ve CBS kullanılarak nakliye maliyetleri belirlenirken, aynı anda depolama tesislerinin optimum yerlerinin bulunması için bir optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Sahoo ve diğ. (2018), biyogaz tesislerinin uygun noktalara konumlandırılmasını sağlamak için melez bir CBS-YSA yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmada buğday ve mısır samanı biyokütle hammaddesi olarak seçilmiştir. Hammaddelerin bulunabilirliği ve sürdürülebilirlik göstergeleri (konum, eğim, eğim uzunluğu, toprak tipi, ürün çevrimi ve verimi) YSA tahmin modelleri ve CBS kullanılarak ölçülmüştür. Çalışmada tesis yerleri yalnızca taşıma miktarının en küçüklenmesini amaçlayan bir model yardımıyla belirlenmiştir. Santibanez-Aguilar ve diğ. (2018), çeşitli tarımsal atıkların enerji üretiminde kullanıldığı sistemde kuruluş yeri analizini CBS kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Seçimde ortaya çıkabilecek belirsizlikleri çeşitli senaryo yaklaşımları ve hammadde kaynaklarının ulaşılabilirliğinin değerlendirilmesi yoluyla çözüme dahil etmişlerdir. Organik çöpler ve hayvansal atıklara odaklanan Zareei (2018), kuruluş yeri uygunluk analizini CBS kullanarak biyokütle potansiyeli ve çeşitli topografik katmanlar ile gerçekleştirmiştir. Farklı biyokütle hammaddelerini çözüme dâhil ettikleri çalışmalarında, Laasasena ve diğ. (2019) CBS ile kuruluş yeri için uygun noktaları saptamışlardır. Lemire ve diğ. (2019) toplanan hammaddelerin direkt biyorafinerilere ulaştırıldığı (merkezi) ve biyokütle kaynaklarının çeşitli depolarda bekletildiği ve ön-işlemlere tabi tutulduğu (merkezi olmayan) enerji sistemlerini karşılaştırmışlardır. Öncelikle CBS ve AHS ile çevrim tesislerinin ve biyokütle toplama noktalarının kuruluşu için uygun noktaları

belirlemişler, daha sonra en kısa yol algoritması ile çeşitli senaryolar için taşıma maliyetlerini hesaplamışlardır. Çalışmada, sıfırdan kurulacak biyorafinerilerin optimize edilmesi şartıyla merkezi sistemin ara depo kurulum maliyetleri gerektirmediği ve daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. López-Rodríguez ve diğ. (2019) orman kaynaklı sistem tasarımı için öncelikle CBS ile ağaçların uzama miktarlarını hesaplamış ve elde edilebilecek biyokütle potansiyelini saptamışlardır. Sonraki aşamada ise çevrim tesislerinin kuruluş yerlerini mekânsal olarak belirlemişlerdir. Lozano-Garcia ve diğ. (2019) mikroalg kaynaklı biyokütle tesis yeri seçimine odaklanmış ve coğrafi veriler yardımıyla problem çözümünü gerçekleştirmişlerdir. Martinkus ve diğ. (2019) biyorafineri yerleşim problemini ekonomik, çevresel ve sosyal yönden ele alarak bir çözüm önerisinde bulunmuşlardır. CBS ve MM ile sabit ve değişken maliyetler ile taşıma maliyetleri değerlendirilirken, yaratılan işgücü miktarı ve küresel ısınmaya etki kriterleri de kullanılarak farklı senaryolar karşılaştırılmıştır. Morato ve diğ. (2019), AHS ve CBS'den yararlanarak tarımsal atıkların depolanabileceği 7 adet biyokütle toplama noktası belirlemişlerdir. Santibanez-Aguilar ve diğ. (2019) agave, pirinç, şeker kamışı, arpa, mısır, sorgum, buğday, pıkan ceviz atıkları ile beslenen biyoenerji sistem tasarımı için öncelikle hammadde potansiyelini belirlemişler, daha sonra CBS ile çevrim tesislerinin kurulabileceği uygun noktaları saptamış ve matematiksel model yardımıyla sistemi tasarlamışlardır. Danzi ve diğ. (2020) problem çözümünün ilk aşamasında hint inciri bitkisinin uygulama alanındaki potansiyelini hesaplamışlar, sonraki aşamada ise çevrim tesislerinin hangi bölgelere konumlandırılacağını CBS ve sosyal ağ analizi yöntemlerini kullanarak belirlemişlerdir. Kuruluş yeri uygunluk analizi için daha önce geliştirdikleri bütünleşik yöntemi web tabanlı bir yaklaşım haline getiren Jeong ve Gonzalez-Gomez (2020), CBS ve ÇKKV ile çözüme ulaşmıştır. Kang ve diğ. (2020) mikroalg beslemeli enerji ağ tasarımı için bütünleşik bir CBS-MM yöntemi geliştirmişlerdir. Çözüme çeşitli mikroalg türleri dâhil edilmiş ve örnek bir uygulama yapılmıştır. Biyoenerji tesislerini; geri dönüşüm, deniz endüstrisi ve tarım ile ilgili tesisleri de içeren bir küme olarak ele alan Norstebo ve diğ. (2020), kuruluş yeri analizinde CBS-ÇKKV-MM melez yaklaşımını önermişlerdir. Pergola ve diğ. (2020) biyokütle kaynaklarının lojistiğinin çevresel etkilerini YDA ile hesaplamış ve söz konusu kriteri tesis kuruluş yeri seçimine ilave ederek literatüre katkı sunmuşlardır. Waewsak ve diğ. (2020) güneş, rüzgâr ve biyokütleyi enerji dönüşümde kullanan melez yenilebilir enerji santrallerinin yer

seçimi için CBS ve AHS içeren bir yaklaşım önermişlerdir. Orman kaynaklı biyokütle tedarik zincirleri için biyokütle mevcudiyeti, tesis kuruluş yeri uygunluğu ve taktiksel kararlar için tesis analizi van Holsbeeck ve Srivastava (2020) tarafından CBS kullanılarak araştırılmıştır. Ankathi ve diğ. (2021) organik çöpler ve hayvansal atıklarla beslenen biyoenerji sistemi tasarımı için MM ve CBS tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Çeşitli senaryolara göre havasız ortamda bozundurma tesislerinin kuruluş yerlerini ve kapasitelerini belirleyerek ekonomik analizler gerçekleştirmişlerdir. Cardoza ve diğ. (2021) zeytin atıkları kaynaklı dört farklı biyokütle hammaddesi (zeytin yaprakları, dalları, çekirdekleri, posası) kullanan biyorafineri kuruluş yeri uygunluk analizini ormanları, koruma alanlarını ve eğimi dikkate alarak zeytin ekilen bölgelerden en fazla 30 km uzaklıkta olmak ve endüstriyel alanlar üzerine kurulmak şartıyla gerçekleştirmişlerdir. De Jesus ve diğ. (2021) çevrim tesislerinin kuruluş yeri uygunluk analizini CBS ve AHS kullanarak saptamışlardır. Söz konusu analizde tarım kooperatifleri ile stratejik ortaklıkla ilgili kriterin (biyokütle potansiyeli) bulunması çalışmanın özgün noktasıdır. Güler ve diğ. (2021) biyokütle çevrim tesislerinin kuruluş yeri seçimi için bulanık mantık, en iyi-en kötü yöntemi (BWM) ve CBS içeren bütünleşik bir yaklaşım önermişlerdir. Laylakar ve diğ. (2021) enerjide meydana gelen dalgalanmalardan daha az etkilenmek için yüksek enerji talebine sahip bölgelere nispeten küçük kapasiteli (<5MW) yardımcı biyokütle çevrim tesislerinin kuruluş yeri uygunluk analizini gerçekleştirmişlerdir. İki aşamalı yaklaşımda öncelikle CBS kullanılarak uygun noktalar belirlenmiş, daha sonra parçacık sürü algoritması ile kurulan tesislerin elektrik giderlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Patel ve diğ. (2021) biyokütle toplama noktalarının optimizasyonu için CBS tabanlı bir yöntem önermişlerdir. İlk aşamada biyokütle hammaddelerinin tahmini nüfus ve üretim/atık miktarı kullanılarak gerçekleştirilmiş daha sonra uygun noktalar saptanmıştır. Afkhami ve Zarrinpoor (2022) Jatropha bitkisinin ekimi için uygun alanları CBS-ÇKKV bütünleşik yaklaşımı ile belirlemişlerdir. Çalışmada alt kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi için bulanık BWM, aday bölgelerin sıralanması için ise MOORA ve TOPSIS yöntemleri kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Mao ve diğ. (2022) çeşitli tarımsal atıkların saplarının taşınmasına ve depolama noktaları için uygun yerlerin belirlenmesine odaklanmışlardır. MM yardımıyla uygun depolama bölgelerini belirlemişlerdir. Martinez-Martinez ve diğ. (2022) yenilenebilir enerji kurulu gücünün geliştirilebilmesi için biyokütle, güneş, rüzgâr ve hidroelektrik

santrallerinin yapımına uygun bölgeleri belirlemişlerdir. Peng ve diğ. (2022) düşük karbon salımlı enerji santrallerinin bütünleşik kuruluş yeri uygunluk analizini CBS-AHS ile yapmışlardır. Bu noktada çalışmanın literatürden farkı biyokütle, rüzgâr, güneş, hidroelektrik, nükleer, güneş ve doğalgaz kaynaklarını bütünleştirerek tesis kuruluş yeri potansiyelini araştırmasıdır.

### 3.1.2 Biyokütle Kaynak Miktarlarının Tahmini

Enerji üretiminde kullanılacak biyokütle kaynaklarının dağılım ve miktarlarının etkin bir şekilde belirlenmesi ve söz konusu kaynaklar kullanılarak elde edilebilecek enerji potansiyelinin hesaplanması stratejik karar verme sürecinde oldukça önemlidir. Bu nedenle, çalışmalarda genellikle planlamanın etkinliği için önceki dönem verilerinden yararlanılmaktadır. Kaynakların yanlış saptanması ağ tasarımının sonraki aşamalarında verilecek kararları etkileyeceği ve ilerleyen seviyelerde olası hataların sonuçları daha fazla hissedileceği için etkin bir tahmin çalışması yürütülmesi gerekmektedir. Bu bölümde, biyokütle tedarik zinciri tasarımı ve yönetiminde biyoenerji üretiminde kullanılan kaynakların gelecek dönemlerdeki miktar ve dağılımlarının belirlendiği 2010 yılından sonra yayımlanmış başlıca araştırma çalışmaları çeşitli özelliklerine göre incelenmiştir. Literatürde biyokütle kaynaklarının tahminini içeren çalışma sayısı az olduğu için biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımını içermeyen çalışmalar da incelenmiş ve listeye dahil edilmiştir. Konu ile ilgili çalışmalar Web of Science ve Google Scholar veri tabanlarından “biomass”, “source”, “potential” ve “forecast” arama sözcükleri kullanılarak elde edilmiştir. Arama sonucunda analitik ve sistematik hesaplama yöntemleri içeren 24 adet çalışma detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen çalışmalar Tablo 3.2’de uygulama alanı, hammadde kaynakları, planlama dönemi ve çözüm yöntemlerine göre listelenmiştir.

**Tablo 3.2:** Biyokütle kaynak miktarı tahminini konu alan çalışmalar.

Çalışma	Uygulama Alanı	Hammadde Kaynakları	Planlama Dönemi	Çözüm Yöntemi
Dymond ve diğ. (2010)	Kanada	Orman Kalıntıları	2005-2020 (Yıllık)	Simülasyon
Jiang ve diğ. (2012)	Çin	Tarımsal atıklar	Anlık	CBS + İstatistiksel
Onurbaş Avcıoğlu ve Türker (2012)	Türkiye	Hayvansal atıklar	Anlık	İstatistiksel
Günlü ve diğ. (2014)	Büyükdüz, Karabük	Enerji ormanları	Anlık	CBS + İstatistiksel
Hiloidhari ve diğ. (2014)	Hindistan	Tarımsal atıklar	Anlık	İstatistiksel

**Tablo 3.2:** Biyokütle kaynak miktarı tahminini konu alan çalışmalar (devam).

Çalışma	Uygulama Alanı	Hammadde Kaynakları	Planlama Dönemi	Çözüm Yöntemi
Meadows ve diğ. (2014)	Sunshine Coast, Avustralya	Enerji ormanları	2013-2034 (Yıllık)	İstatistiksel
Welfle ve diğ. (2014)	Birleşik Krallık	Tarımsal atıklar Orman kalıntıları Enerji bitkileri Endüstriyel atıklar Hayvansal atıklar	2015-2020- 2030-2050	İstatistiksel (Biyokütle kaynak modeli)
Deng ve diğ. (2015)	55 Ülke	Tarımsal atıklar Tarımsal ürünler Enerji bitkileri Orman kalıntıları	2020-2070	MM
Özcan ve diğ. (2015)	Türkiye	Hayvansal atıklar Endüstriyel atıklar Organik çöpler	2013-2017 (Yıllık)	İstatistiksel
Sakaguchi ve Tabata (2015)	Awaji Adası, Japonya	Tarımsal atıklar Tarımsal ürünler Orman kalıntıları Enerji ormanları	2050	CBS + İstatistiksel
Chen (2016)	Çin	Tarımsal atıklar Tarımsal ürünler Enerji bitkileri	Anlık	MM
Thran ve diğ. (2016)	Almanya	Tarımsal atıklar Tarımsal ürünler Enerji bitkileri Orman kalıntıları Hayvansal atıklar	2030-2050	CBS + İstatistiksel + Simülasyon
Mantziaris ve diğ. (2017)	Karditsa, Yunanistan	Enerji bitkileri	Anlık	İstatistiksel
Welfle (2017)	Brezilya	Tarımsal atıklar Orman kalıntıları Enerji bitkileri Endüstriyel atıklar	2015-2020- 2030	İstatistiksel (Biyokütle kaynak modeli)
Avcıoğlu ve diğ. (2019)	Türkiye	Tarımsal atıklar	Anlık	MM + İstatistiksel
Wietschel ve diğ. (2019)	Avrupa Birliği	Tarımsal atıklar	2030	CBS + İstatistiksel
Arroyo ve Miguel (2020)	Ekvator	-	2030	Sistem dinamikleri
Flores Hernández ve diğ. (2020)	Meksika	Orman kalıntıları	2013-2023 (Yıllık)	CBS + İstatistiksel (Holt-Winters, Regresyon analizi)
Mansaray ve diğ. (2020)	Tongxiang, Çin	Tarımsal atıklar Tarımsal ürünler	2016 (Aylık)	CBS + Yapay zekâ
Cudjoe ve diğ. (2021)	Akra ve Kumasi, Gana	Organik çöpler	2020-2039 (Yıllık)	MM
Luciano ve diğ. (2021)	Sao Paulo, Brezilya	Tarımsal ürünler	Anlık	CBS + Yapay zekâ (Rastgele ormanlar)
Duczowska ve diğ. (2022)	Opolskie, Polonya	Tarımsal atıklar	Anlık	İstatistiksel
Şenocak ve Güner Gören (2022)	Acipayam, Türkiye	Tarımsal atıklar Hayvansal atıklar	2020-2022 (Yıllık)	CBS + Yapay zekâ (DVR)
Yuan ve diğ. (2022)	Sarıdeniz, Çin	Mikroalgler	Anlık	CBS

Biyokütle potansiyelini ve kaynakların dağılımını araştıran çalışmalardan Dymond ve diğ. (2010) orman kalıntılarına yönelmişler ve Kanada'da 60. kuzey enleminin altında kalan ormanlık alanları incelemişlerdir. 2005-2020 yıllarında hasat sonrası kalan orman miktarlarını, cansız ağaçları da dikkate alarak Monte Carlo simülasyonu kullanarak tahmin etmişlerdir. Jiang ve diğ. (2012), biyokütle kaynakları, ekonomik durum, çevre ve teknolojiyi dikkate alan CBS tabanlı bir yaklaşımla tarımsal atıklardan elde edilebilecek enerji miktarını belirlemişlerdir. 2000–2009 yılları arasında tarımsal ürünlerin, atıklara oranı hesaplanmış ardından da mekânsal analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, ileriye dönük hesaplamalar

kullanılmadan günümüz projeksiyonu ve dağılımı (anlık hesaplama) verilmiştir. Biyoenerji tahminini konu alan bir diğer başarılı çalışma Onurbaş Avcioğlu ve Türker (2012) tarafından Türkiye'nin biyogaz potansiyelinin tahmin edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Tüm iller için hayvansal atık bazlı biyogaz potansiyeli, mevcudiyet ve kuru madde kaybı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Günlü ve diğ. (2014), uzaktan algılama ve istatistiksel yöntemleri kullanarak orman kaynaklı biyokütle potansiyeline odaklanmıştır. Problemi çözmek için uydu görüntüleri ve regresyon yöntemi kullanılmıştır. Hiloidhari ve diğ. (2014), çeşitli tarımsal atıklardan elde edilebilecek enerji potansiyelini istatistiksel yöntemler yardımıyla belirlemişlerdir. Uygulama alanı için enerji verimliliği en yüksek kaynakların pirinç, şeker kamışı, buğday ve pamuk olduğu belirlenmiştir. Meadows ve diğ. (2014) enerji ormanlarından gelecek yıllarda elde edilebilecek biyokütle miktarını; orman ekim miktarı, biyokütle verimi, çeşitli ağaç türleri ve geçmiş dönem üretim verilerini kullanarak tahmin etmişlerdir. Welfle ve diğ. (2014) biyokütle potansiyelini belirlemek için iklimi, gıda ürünlerini ve ekime uygun arazileri dikkate alan biyokütle kaynak modelini önermişlerdir. Çalışma sonucunda, en iyi senaryo varsayımında, 2050 yılında biyokütle kaynaklı enerjinin, kullanılan enerjinin %44'ü olacağı tahmin edilmiştir. Deng ve diğ. (2015) çeşitli senaryolar altında (kötü, orta, iyi), arazi kullanımı, ürün verimi ve gıda talebi gibi faktörleri kullanarak toplam 55 ülkeyi kapsayan biyoyakıt potansiyelini tahmin etmişlerdir. Çalışmada çeşitli enerji bitkileri, tarım atıkları ve orman kalıntıları biyokütle kaynağı olarak ele alınmıştır. Özcan ve diğ. (2015) katı atıklar, enerji bitkileri, hayvan atıkları ve atık su çamuru dahil olmak üzere çeşitli biyokütle kaynaklarından Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi potansiyelini saptamışlardır. Çalışmada İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. ve Türkiye İstatistik Kurumu gibi farklı veri kaynaklarından yararlanılmıştır. Sakaguchi ve Tabata (2015), tarımsal atıklar, tarımsal ürünler, orman kalıntıları ve enerji ormanlarını hammadde olarak kullanarak CBS ve istatistiksel yöntemler yardımıyla 2050 yılındaki biyokütle enerjisi potansiyelini belirlemişlerdir. Çalışmada farklı senaryolar dikkate alınarak, biyokütlenin yanı sıra rüzgâr ve güneş enerjisi kullanılarak gelecekte ne kadar elektrik enerjisi üretilebileceği araştırılmıştır. Chen (2016), 2001-2010 yılları arasındaki ekili alan miktarı ve üretim düzeyi verilerini girdi olarak kullanan matematiksel bir modelden yararlanarak tarımsal atık, tarımsal ürün ve enerji bitkilerinden elde edilebilecek biyokütle potansiyelini tahmin etmiştir. Çalışmaya

göre elde edilebilecek biyokütlenin en büyük oranını pirinç kalıntıları oluştururken, onu mısır ve buğday kalıntıları izlemiştir. Thrän ve diğ. (2016), ulusal biyoenerji sistemi ile ulusal arazi kullanım sistemi arasındaki bağlantıyı dikkate alarak biyoenerji stratejilerini belirlemek için istatistiksel metotlar, CBS ve simülasyonu içeren bütünleşik bir modelleme yaklaşımı önermişlerdir. Mantziaris ve diğ. (2017) belirli kısıtlamalar altında Yunanistan'da çeşitli enerji bitkilerinin (arundo, miscanthus, kavak) ne ölçüde geleneksel yakıtların yerini alabileceğini ve bunun için ne yapılması gerektiğini araştırmışlardır. Welfle (2017) biyokütle kaynak modelini kullanarak üç farklı senaryoyu (mevcut politika, yenilenebilir enerjiye odaklanma, %100 yenilenebilir enerji hedefi) dikkate alarak gelecek yıllardaki biyokütle potansiyelini tahmin etmiştir. Nüfus, kullanılan arazi alanı, farklı enerji bitkileri için verim değerleri, enerji bitkilerinin ekim alanları tarımsal atık miktarları ve orman alanları tahmin çalışmasında girdi olarak kullanılmıştır. Avcıoğlu ve diğ. (2019) Türkiye'nin mevcut tarımsal biyoenerji potansiyelini MM kullanarak araştırmıştır. Çalışmada, farklı ülkelerin istatistiksel verileri dikkate alınarak çeşitli tarımsal atıkların özellikleri (artık-ürün oranı, nem içeriği, alt ısıl değeri ve enerji değeri) belirlenmiştir. Wietschel ve diğ. (2019) buğday, arpa, mısır ve kolza (kanola) atıklarının gelecek yıllardaki durumunu araştırmışlardır. Ürün verimi, ekilebilir arazi alanı, atık-ürün miktarı oranı ve sürdürülebilir hasat miktarının göz önüne alındığı çalışmada gelecekte mısır atıklarının oranının %20 artacağı belirlenmiştir. CBS elde edilen sonuçların görselleştirilmesinde kullanılmıştır. Arroyo ve Miguel (2020) üç farklı senaryoya göre (mevcut politika, ulusal politika, uluslararası politika) sistem dinamikleri yaklaşımını kullanarak gelecek yıllardaki ekonomik durumu, CO<sub>2</sub> salınımını, nüfusu ve enerji talebini hesaplamışlardır. Flores Hernández ve diğ. (2020), orman kalıntılarında elde edilen biyokütleyi kısa vadede tahmin edebilmek için iki farklı senaryoya dayalı bir model sunmuşlardır. Birinci senaryoda koşulların normal düzeyde devam edeceği varsayılırken, ikinci senaryoda biyokütle kaynaklı enerji için kullanılan ormanlık alanların sürdürülebilir şekilde artırılacağı varsayılmıştır. Biyokütle enerji potansiyelinin araştırılmasında, toprak bozulması, arazi eğimi ve mekanizasyon seviyesi gibi faktörler dikkate alınarak sayısal modelleme, Holt-Winters üstel düzeltme ve regresyon analizi kullanılmıştır. Mansaray ve diğ. (2020), yapay zekâ ve uzaktan algılama yöntemleriyle pirinç bitkisi kullanılarak elde edilebilecek kuru biyokütle miktarını hesaplamışlardır. Rassal ormanlar, destek vektör makineleri, karar ağaçları ve k-en yakın komşu algoritması



yöntemleri sonucunda elde edilen değerler karşılaştırılmış, uygulama alanı ve hammaddesi için en düşük hataya sahip yöntemin karar ağaçları olduğu belirlenmiştir. Cudjoe ve diğ. (2021) organik çöplerden elde edilebilecek enerji potansiyelini nüfus artış hızı ve ekonomik gelişme miktarını kullanarak belirlemişlerdir. Duyarlılık analizinde gıda atıklarının miktarında, kişi başı atık üretim oranında, nüfus artış hızında, gayri safi yurtiçi hasılda, iskonto oranında, kapasitede, metan üretiminde, elektrik üretim ve atık toplama etkinliğinde meydana gelen değişimlerin ekonomik etkileri incelenmiştir. Luciano ve diğ. (2021) şeker kamışı üretim verimini uydu görüntüleri, meteorolojik veriler ve tarımsal verileri kullanarak tahmin etmişlerdir. Çalışmada, problemin çözümü için uzaktan algılama ve rastgele ormanlar yöntemleri kullanılmıştır. Duczkowska ve diğ. (2022) merkezi ısıtma sistemleri için biyokütle kaynaklarının potansiyelini araştırmışlardır. Söz konusu çalışmada geçmiş dönem verileri ve Delphi yöntemi kullanılarak çiftçilerle yapılan görüşmeler sonucunda elde edilen bilgilerden yararlanılmıştır. Buğday, arpa, yulaf, çavdar ve tritikale saplarından elde edilebilecek enerji miktarı hesaplandıktan sonra minimum yayılan ağaç algoritmasıyla çeşitli senaryolar kullanılarak taşıma sistemi tasarlanmıştır. Şenocak ve Güner Gören (2022) hayvansal ve tarımsal atıkların gelecek yıllardaki tahminini yapay zekâ tabanlı CBS yaklaşımı ile gerçekleştirmişlerdir. Ürün verimi ve tarımsal alan miktarı kullanılarak elde edilebilecek biyokütle kaynaklı enerji miktarı çeşitli senaryolar altında değerlendirilmiştir. Yuan ve diğ. (2022) sarıdenizdeki *Ulva prolifera* mikroalglerinin tahminlerini, görüntü işleme yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. 2015 yılından 2021 yılına kadar benzer günlerde alınan çeşitli ölçümlerden faydalanarak elde edilebilecek en yüksek biyokütle miktarını belirlemişlerdir.

### **3.1.3 Biyokütle Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı**

Çeşitli biyokütle kaynaklarını, çevrim metotlarını, teknoloji seviyelerini ve farklı çözüm yöntemlerini kullanarak biyoenerji elde etmek mümkündür. Asıl önemli olan sistemi oluşturan tüm bileşenlerin saptanması, sayılarının belirlenmesi ve taşımaların en düşük maliyetle, istenilen hizmet düzeyinde, çevreye mümkün olan en az zarar verilerek gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Bu noktada, biyokütle kaynaklı enerji sistemlerinin ağ tasarımının istenilen amaçlar doğrultusunda (minimum

maliyet, maksimum fayda, minimum emisyon değeri, maksimum sosyal etki, minimum net bugünkü değer, vb.) en verimli şekilde yapılması gerekmektedir. Bu bölümde, biyokütle tedarik sisteminin ağ tasarımı için önerilen çözüm yöntemleri ve konu hakkında yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu kapsamda konu ile ilgili 2010 yılından sonra yayımlanmış başlıca araştırma çalışmaları incelenmiştir. Çalışmalar Web of Science ve Google Scholar veri tabanlarından “biomass”, “supply”, “geographic” ve “design” arama sözcükleri kullanılarak elde edilmiştir. Arama sonucunda analitik ve sistematik yöntemleri içeren 29 adet çalışma detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen çalışmalar Tablo 3.3’te uygulama alanı, çözümde kullanılan hammadde kaynakları, amaç fonksiyonu, karar düzeyi, çözüm yöntemi ve duyarlılık analizine göre listelenmiştir.

**Tablo 3.3:** Biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımı konu alan çalışmalar.

Çalışma	Uygulama Alanı	Hammadde Kaynakları	Amaç Fonksiyonu	Karar Düzeyi	Çözüm Yöntemi	Duyarlılık Analizi
Yu ve diğ. (2012a)	Zhanjiang, Çin	Tarımsal ürünler	Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri	Stratejik	CBS + MM	-
Yu ve diğ. (2012b)	Zhanjiang, Çin	Tarımsal ürünler	Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri	Stratejik	CBS + MM	-
Osmani ve Zhang (2014)	Ortabatı Amerika Birleşik Devletleri	Tarımsal atıklar Orman kalıntıları	Çevrim tesisi maliyetleri Ürün satışı Elektrik satışı Alkol satışı Biyokütle alım maliyeti Taşıma maliyeti Depolama maliyeti Sera gazı emisyonları	Stratejik	MM	Karbon salınımı fiyatı Biyoetanol vergi indirimi
Hoefnagels ve diğ. (2014)	Ortabatı ve Güneydoğu Amerika Birleşik Devletleri	Tarımsal atıklar Orman kalıntıları Enerji bitkileri	Biyokütle alım maliyeti Taşıma maliyeti Depolama maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri	Stratejik	CBS + MM	Yakıt fiyatı
Hu ve diğ. (2015)	Illinois, Amerika Birleşik Devletleri	Enerji bitkileri	Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Ön-işlem maliyetleri Biyokütle alım maliyeti	Stratejik	CBS + MM	Biyokütle tedarik yerleri Ön-işlem ve depolama merkezleri Biyorafineriler
Vukašinović ve Gordić (2016)	Ivanjica, Sırbistan	Orman kalıntıları	Ürün satışı Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Depolama maliyeti	Stratejik	CBS + MM	Elektrik satış fiyatı Pelet satış fiyatı
Zhang ve diğ. (2016)	Kuzey Michigan, Amerika Birleşik Devletleri	Orman ürünleri	Taşıma maliyeti Depolama maliyeti Enerji maliyeti Emisyon maliyeti	Stratejik	CBS + MM + Simülasyon	Tek-çok yerleşim yeri

**Tablo 3.3:** Biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımı konu alan çalışmalar (devam).

Çalışma	Uygulama Alanı	Hammadde Kaynakları	Amaç Fonksiyonu	Karar Düzeyi	Çözüm Yöntemi	Duyarlılık Analizi
Zhao ve Li (2016)	Çin	Tarımsal atıklar	Taşıma maliyeti Depolama maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri CO <sub>2</sub> salınımı	Stratejik	MM	-
Gonzales ve Searcy (2017)	Teksas ve Amerika Birleşik Devletleri	Enerji bitkileri Tarımsal atıklar	Taşıma maliyeti	Stratejik	CBS + Simülasyon + Sezgiseller	Biyokütle potansiyeli
Hu ve diğ. (2017)	Illinois, Amerika Birleşik Devletleri	Enerji bitkileri	Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Ön-işlem maliyetleri Biyokütle alım maliyeti	Stratejik	CBS + MM + Simülasyon	Biyokütle verimi Biyokütle üretim alanı kullanım oranı Taşıma maliyeti Ön-işlem teknolojisi Lojistik kayıpları
Zhang ve diğ. (2017)	Kuzey Michigan, Amerika Birleşik Devletleri	Orman ürünleri	Taşıma maliyeti Depolama maliyeti Enerji maliyeti Emisyon maliyeti	Stratejik	CBS + MM	Tek-çok yerleşim yeri Biyokütle bulunabilirliği
He-Lambert ve diğ. (2018)	Tennessee, Amerika Birleşik Devletleri	Enerji bitkileri	Ürün satışı Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Biyokütle alım maliyeti Depolama maliyeti	Stratejik, Taktiksel	CBS + MM	-
Ng ve diğ. (2018)	Wisconsin, Amerika Birleşik Devletleri	Tarımsal atıklar	Ürün satışı Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Biyokütle alım maliyeti Depolama maliyeti Net enerji girdisi	Stratejik	CBS + MM	Ön-işlem
Schröder ve diğ. (2018)	Almanya	Tarımsal atıklar Hayvansal atıklar Organik çöpler	Ürün satışı Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Biyokütle alım maliyeti	Stratejik	CBS + MM	Biyokütle bulunabilirliği Yatırım oranı Taşıma maliyeti
Valenti ve diğ. (2018)	Katanya, İtalya	Hayvansal atıklar Tarımsal ürünler Organik çöpler	Taşıma maliyeti	Stratejik	CBS	-
Jeong ve diğ. (2019)	Kuzey Büyük Ovalar, Amerika Birleşik Devletleri	Enerji bitkileri	Ürün satışı Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Biyokütle alım maliyeti	Stratejik	CBS + MM	Taşıma maliyeti Biyokütle verimi
Lemire ve diğ. (2019)	Quebec, Kanada	Tarımsal atıklar	Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Depolama maliyeti	Stratejik	CBS + ÇKKV (AHS)	Depo kapasitesi Çevrim tesisi konumu
Razm ve diğ. (2019)	İran ve Ermenistan	Tarımsal atıklar Orman kalıntıları	Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri CO <sub>2</sub> salınımı Yaratılan iş olanakları	Stratejik, Taktiksel	CBS + YDA + MM	Toplam maliyet CO <sub>2</sub> salınımı Yaratılan iş olanakları
Schröder ve diğ. (2019)	Cariboo, Kanada	Orman kalıntıları	Ürün satışı Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Biyokütle alım maliyeti	Stratejik	CBS + Sezgiseller + MM	Yatırım geri dönüş oranı

**Tablo 3.3:** Biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımı konu alan çalışmalar (devam).

Çalışma	Uygulama Alanı	Hammadde Kaynakları	Amaç Fonksiyonu	Karar Düzeyi	Çözüm Yöntemi	Duyarlılık Analizi
Santibanez-Aguilar ve diğ. (2019)	Meksika	Tarımsal atıklar	Ürün satışı Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Biyokütle alım maliyeti	Stratejik, Taktiksel	CBS + MM	-
Gital Durmaz ve Bilgen (2020)	İzmir	Hayvansal atıklar	Ürün satışı Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Çevrim tesisleri ile biyokütle kaynağı arasındaki toplam mesafe	Stratejik, Taktiksel	CBS + MM	Biyokütle alım maliyeti Maksimum mesafe
Kang ve diğ. (2020)	Teksas, Amerika Birleşik Devletleri	Mikroalgler	Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Karbon yakalama maliyeti Ürün satışı	Stratejik, Taktiksel	CBS + MM	Biyokütle talebi Biyokütle depolama
Mahjoub ve Sahebi (2020)	İran	Tarımsal atıklar Hayvansal atıklar Enerji bitkileri Mikroalgler	Üretilen enerji miktarı Çevrim tesisi maliyetleri Biyokütle alım maliyeti Taşıma maliyeti Depolama maliyeti CO <sub>2</sub> salınımı Su tüketimi	Stratejik, Taktiksel	CBS + ÇKKV (AHS) + MM	Su tüketimi Üretilen enerji miktarı
Mahjoub ve diğ. (2020)	İran	Tarımsal atıklar Hayvansal atıklar Enerji bitkileri Mikroalgler	Üretilen enerji miktarı Çevrim tesisi maliyetleri Biyokütle alım maliyeti Taşıma maliyeti Depolama maliyeti	Stratejik, Taktiksel	MM	Biyokütle alım maliyeti Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri
Lan ve diğ. (2021)	Güneydoğu Amerika Birleşik Devletleri	Orman kalıntıları Enerji bitkileri	Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri	Stratejik	CBS + MM + Simülasyon	Depo kapasitesi Çevrim tesisi kapasitesi Biyokütle karışım oranı
Kang ve diğ. (2022)	Teksas, Amerika Birleşik Devletleri; Kuzey Avustralya; La Guajira, Kolombiya	Mikroalgler	Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Karbon yakalama maliyeti Ürün satışı	Stratejik, Taktiksel	CBS + MM	Karbon yakalama maliyeti
Mao ve diğ. (2022)	Jilin, Çin	Tarımsal atıklar	Taşıma maliyeti CO <sub>2</sub> salınımı	Stratejik	MM + Sezgiseller (Genetik algoritma)	-
Santibanez-Aguilar ve diğ. (2022)	Meksika	Tarımsal atıklar Tarımsal ürünler Enerji bitkileri	Yıllık net kar CO <sub>2</sub> salınımı Sosyal amaç fonksiyonu	Stratejik	MM	Yıllık net kar CO <sub>2</sub> salınımı Sosyal amaç fonksiyonu
Wu ve diğ. (2022)	Dezhou, Çin	Tarımsal atıklar	Biyokütle alım maliyeti Ön-işlem maliyeti Taşıma maliyeti Çevrim tesisi maliyetleri Yükleme maliyeti	Stratejik	CBS + MM	Biyokütle alım maliyeti Taşıma maliyeti Biyokütle talebi

CBS ve MM kullanarak biyoenerji ağı tasarlayan Yu ve diğ. (2012a) ilk çalışmalarında taşıma uzaklıklarını düz bir çizgi olarak kabul etmiş sonraki çalışmalarında ise gerçek harita yol uzunluklarını kullanarak tasarlamışlardır. (Yu ve diğ. 2012b). Osmani ve Zhang (2014) iki hammadde kaynağı ile beslenen biyokütle ağ tasarımı için belirsizlikleri dikkate alan stokastik bir model önermişlerdir. Çalışmada dört eyaletin bütünleşik biyoenerji stratejisi belirlemesinin, ayrı ayrı strateji belirlemelerinden daha avantajlı olduğu saptanmıştır. Birden fazla taşıma yönteminin dikkate alındığı okyanus aşırı taşımanın da söz konusu olduğu bir biyokütle ağ tasarımı Hoefnagels ve diğ. (2014) tarafından önerilmiştir. Hu ve diğ. (2015) CyberGIS-BioScope adını verdikleri grafiksel kullanıcı arayüzü bulunan CBS tabanlı karar destek platformunu geliştirmişlerdir. Biyoenerji tedarik ağının kullanıcı dostu bir biçimde tasarlanabildiği sistemde, çeşitli senaryolara göre elde edilebilecek sonuçlar araştırılabilmektedir. Vukašinović ve Gordić (2016), bütünleşik CBS-MM kullanarak orman kalıntıları tabanlı biyokütle potansiyelini, depolama noktaları ve biyokütle çevrim tesisleri için uygun yerleri belirlemişlerdir. Zhang ve diğ. (2016) biyoyakıt tedarik zinciri tasarımı için CBS, simülasyon ve optimizasyon temelli bir bütünleşik yaklaşım önermişlerdir. Öncelikle tesis yerleşimine uygun bölgeler, biyokütle elde edilebilecek alanlar ve taşıma uzaklıkları CBS kullanılarak belirlenmiş, daha sonra yıllık maliyetler, malzeme akışları ve olası tesis yerleşimleri simülasyon ve MM kullanılarak hesaplanmıştır. Zhao ve Li (2016) tek bir çevrim tesisi bulunan biyoenerji ağının tasarımı için iki aşamalı bir MM önermişlerdir. Çözüme emisyonlar, taşıma ve kuruluş maliyetleri de dâhil edilmiştir. Otsu bitkileri inceleyen Gonzales ve Searcy (2017), biyorafinerilerin ve ön-işlem tesislerinin kuruluş yeri seçimi için CBS tabanlı bir sezgisel yöntem önermiştir. Çalışmada, simülasyon yöntemiyle biyokütle potansiyelleri saptanmış sonrasında farklı senaryolar için konum tahsisleri yapılmıştır. Hu ve diğ. (2017), daha önce kendileri tarafından geliştirilen, biyokütle tedarik zinciri karar destek platformu CyberGIS-BioScope'u bir adım ileriye taşımışlardır. Bu çalışmada, araştırmacılar öncelikle duyarlılık analizine ve belirsizliğin çözüme dâhil edilmesine odaklanmıştır. Bu kapsamda platforma duyarlılık analizi ve belirsizlik modülü eklenmiş ve çözüm için çeşitli senaryolar oluşturulmuştur. Biyoyakıt tedarik zinciri tasarımı için optimizasyonu da içeren CBS tabanlı bir diğer çalışma Zhang ve diğ. (2017) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Taşıma sistemi tasarımı ve tesis yer seçim kararları talep ve arz belirsizlikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiş ve biyoetanol

üretiminde orman tabanlı biyokütleden yararlanılmıştır. İlk aşamada CBS kullanılarak biyoetanol tesislerinin kurulması için uygun alanlar belirlenmiş, daha sonra ise karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ile tedarik zinciri ağı tasarlanmıştır. Çözümde hammadde, depolama, enerji ve emisyon maliyetlerinden oluşan toplam sistem maliyetinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. He-Lambert ve diğ. (2018) CBS ve MM'den oluşan iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir. İlk aşamada biyokütle kaynakları dikkate alınarak uygun tesis yerleşim alanları belirlenmiş, sonraki aşamada ise ön-işlem merkezlerinin yerleri toplam mesafeyi kısaltacak şekilde konumlandırılmıştır. Hammadde kaynağı olarak dallı darı seçilmiştir. Ng ve diğ. (2018) mısır sapları ile beslenen biyoetanol tedarik sistemini CBS ve MM kullanarak tasarlamışlardır. Kaynak bulunabilirliği, depoların konumları, tesis yerleşimine uygun yerler ve taşıma kanalları CBS ile belirlenmiş, daha sonra çok dönemli bir MM ile ağ tasarlanmıştır. CBS, kesin doğrusal olmayan bir program (exact non-linear programming) ve evrimsel strateji (ES) sezgiseli içeren entegre bir biyorafineri planlama yaklaşımı Schröder ve diğ. (2018) tarafından önerilmiştir. Bütünleşik çözüm yaklaşımı, yatırım getirisi de dikkate alınarak Almanya'daki bir biyokütle fabrikasının yer seçim ve ölçeklendirilmesi problemine uygulanmıştır. Öncelikle CORINE veritabanından çekilen veriler CBS ile işlenmiş ve biyokütle hammaddelerinin dağılımı ve miktarları belirlenmiştir. Daha sonra tesis yer seçimi önerilen özgün evrimsel algoritma tabanlı MM yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Valenti ve diğ. (2018) uygulama alanında yaygın olan çeşitli biyokütle kaynaklarını kullanarak kurulabilecek çevrim tesislerinin yerlerini ve kapasitelerini belirlemişlerdir. Jeong ve diğ. (2019) ağ tasarımı için entegre bir CBS-MM yaklaşımı sunmuşlardır. Ketencik bitkisinin bulunabilirliği, biyodizel ve yan ürün talebi ve olası biyoenerji tesisi lokasyonları CBS yardımıyla değerlendirilmiştir. Karma tamsayılı bir model kullanılarak tesislerin yerleşim yerleri, sayıları ve kapasiteleri belirlenmiştir. Lemire ve diğ. (2019) CBS tabanlı bir ağ tasarımı gerçekleştirmişler ve biyokütle kaynaklarının depolarda saklanması veya direkt çevrim tesislerine gitmesi senaryolarını araştırmışlardır. İran-Ermenistan biyoenerji ağını Razm ve diğ. (2019) yeniden tasarlamışlardır. Çalışmada var olan çevrim tesislerinin işlemlere devam etmesi veya yeni tesislerin açılması kararları çok amaçlı bir MM yardımıyla verilmiştir. Ekonomik, çevresel ve sosyal amaç fonksiyonları bulunan model  $\epsilon$ -constraint yöntemiyle çözülmüş, çevresel etkiler ise YDA ile belirlenmiştir. Santibanez-Aguilar ve diğ. (2019) çeşitli tarımsal atıklarla beslenen

biyoenerji tedarik sistemi tasarımı için üç aşamalı bir yaklaşım önermişlerdir. Öncelikle kuruluş yeri için uygun noktalar CBS ile belirlenmiş, doğrusal olmayan bir MM ile ağ tasarımı gerçekleştirilmiş, proses optimizasyonu ile de çevrim süreci iyileştirilmiştir. Schröder ve diğ. (2019) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, birden fazla orman tabanlı biyokütle kaynağı ile beslenen bir enerji ağının eşzamanlı olarak planlanması için bütünlük bir CBS-ES-MM algoritması geliştirilmiştir. Problem üretim sistemi, pazar kısıtları, topografya ve kapasite kısıtları dikkate alınarak stratejik olarak ele alınmıştır. Gital Durmaz ve Bilgen (2020) kümes hayvanlarının atıkları ile beslenen biyogaz üretim sistemi ağ tasarımı CBS-ÇKKV-MM yaklaşımı ile gerçekleştirmişlerdir. Biyogaz tesislerinin kurulması için uygun yerler CBS tabanlı AHS metodu kullanılarak, kapasite planlama ve taşıma miktarları ise çok amaçlı bir MM yardımıyla belirlenmiştir. Kang ve diğ. (2020), mikroalg bazlı ağ tasarımı için üç aşamalı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. İlk aşamada, mekânsal yerleşim, kuruluş ve işletme maliyetleri ile çeşitli tesis kapasiteleri değerlendirilmiş, daha sonra dönüşüm tesisleri için uygun lokasyonlar CBS ile belirlenmiş, son olarak bir MM kullanılarak taktiksel ve stratejik kararlar alınmıştır. Mahjoub ve Sahebi (2020) su-enerji bağlantısını tartışmaya açtığı çalışmanın çözümünde melez bir CBS-MM yaklaşımı önermişlerdir. Hammadde olarak jatropha, tarımsal atıklar, hayvan gübresi ve mikroalgler seçilmiş, kaynakların üretimi için aday bölgeler CBS kullanılarak belirlenmiştir. Maliyeti, enerji üretimini, su tüketimini ve çevresel etkileri dikkate alan çok amaçlı bir MM ile ağ tasarlanmıştır. Mahjoub ve diğ. (2020) ise benzer problemi CO<sub>2</sub> salınımı ve su tüketimi amaç fonksiyonlarını hesaba katmadan, toplam enerji üretimini ve toplam maliyetlerini dikkate alarak çok amaçlı MM'i  $\epsilon$ -constraint yöntemiyle çözmüşlerdir. Lan ve diğ. (2021), çeşitli biyokütle kaynaklarının farklı oranlarda karıştırılmasının, farklı ön-işlem seçeneklerinin ve biyokütle depolama kapasitelerinin ağ tasarımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada BioFLAME adlı CBS tabanlı karar destek sistemi; biyokütle miktarının, kaynakların dağılımının belirlenmesinde ve tesislerin kuruluş yeri uygunluk analizinin gerçekleştirilmesinde, ForSEAM adlı MM orman kalıntılarının taşıma maliyetinin hesaplanmasında, Aspen simülasyon paketi ise çevrimin modellenmesi ve farklı senaryoların test edilmesinde kullanılmıştır. Kang ve diğ. (2022) üç farklı uygulama alanı için mikroalg tabanlı biyokütle tedarik zincirini karma tamsayılı kesirli programlama kullanarak tasarlamışlardır. Öncelikle mikroalglerin yetiştirilebilmesi için uygun noktalar CBS ile belirlenmiş sonrasında farklı çevrim

yöntemlerini içeren ağ tasarımı gerçekleştirilmiştir. Mao ve diğ. (2022) ağ tasarım problemini biyokütle toplama, depolama ve taşıma olarak üç aşamada ele almışlardır. Çözümde taşıma maliyetlerini ve karbon salınımını azaltmayı amaçlayan çok amaçlı bir MM kullanmışlar ve genetik algoritmadan yararlanmışlardır. Sosyal, ekonomik ve çevresel faktörleri dikkate alan, farklı hammadde kaynaklarından yararlanan biyoenerji tedarik sistemi Santibanez-Aguilar ve diğ. (2022) tarafından tasarlanmıştır. Sosyal amaç fonksiyonu çeşitli demografik kriterleri dikkate almakta ve çevrim tesislerinin kuruluş yerine odaklanmaktadır. Tarımsal atıklara odaklanan, biyokütle alım maliyetini, taşıma maliyetini ve biyokütle talebindeki değişiklikleri dikkate alan bir tedarik zinciri Wu ve diğ. (2022) tarafından oluşturulmuştur.

### **3.2 Literatür Taraması Sonucunda Elde Edilen Bulgular**

Biyoenerji tedarik sistemlerindeki temel işlemlere odaklanan çalışma kapsamında, konu ile ilgili yapılan literatür taraması sonucunda elde edilen bulgular kuruluş yeri uygunluk analizi, biyokütle kaynak miktarı tahmini ve biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımı başlıkları altında özetlenmiştir.

#### Kuruluş yeri uygunluk analizi:

- CBS'nin biyokütle kaynaklarının miktarının saptanmasında ve mekânsal dağılımının yapılmasında, arazi örtüsünün ve biyokütle potansiyelinin hesaplanmasında, çevrim tesislerinin, ön-işlem tesislerinin, depoların kurulması için uygun bölgelerin belirlenmesinde sıklıkla kullanıldığı ve etkin sonuçlar alındığı gözlemlenmiştir.
- Uygulama alanının mekânsal olarak analizinin eğim, gerçek yol verileri, rakım, çeşitli önemli noktalara uzaklık gibi kesin bilgileri içermesi nedeniyle verilecek kararların etkinliği açısından oldukça önemli olduğu belirlenmiştir.
- Kuruluş yeri uygunluk analizinde kullanılan kriterler incelendiğinde kendisine en yüksek kullanım alanı bulan seçim kriterinin karayollarına uzaklık olduğu belirlenirken (42 çalışma), onu eğim (30 çalışma), biyokütle potansiyeli (29 çalışma), yerleşim yerlerine



uzaklık (28 çalışma), su kaynaklarına uzaklık (27 çalışma), koruma alanlarına uzaklık (25 çalışma) ve taşıma maliyetinin (21 çalışma) izlediği saptanmıştır.

- Çalışmaların büyük bir kısmında olası tesis yerlerinin değerlendirilmesinde ÇKKV yöntemleriyle birlikte CBS kullanıldığı gözlemlenmiştir (22 çalışma). Bu sayede tesis yer seçimi problemleri için en uygun noktaların belirlenmesi aşamasında karar verme sürecinin daha etkin bir biçimde yönetilmesi amaçlanmıştır.
- Literatür incelendiğinde etkili bir karar verme yaklaşımı olan ve paket programlarla desteklenebilmesi nedeniyle çözüm kolaylığı da sunan AHS yönteminin çoğu çalışmada kullanıldığı (11 çalışma) saptanmıştır.
- Karmaşık faktörler arasındaki ilişkileri, sebep ve sonuç modelinin gözlemlenebildiği yapısal bir model haline getirerek sistemin daha kolay incelenebilmesini sağlaması ve bu sayede kriter ağırlıklarını belirlemeye olanak vermesi nedeniyle karar verme sürecinin daha güvenilir olmasını sağlayabilen DEMATEL kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaların oldukça az olduğu (3 çalışma: Jeong 2018; Jeong ve Ramirez-Gomez 2018; Jeong ve Gonzalez-Gomez 2020) belirlenmiştir.
- İki çalışmada ise ÇKKV metotlarından BWM yönteminin kullanıldığı saptanmıştır (Güler ve diğ. 2021; Afkhami ve Zarrinpoor 2022).

#### Biyokütle kaynak miktarlarının tahmini:

- Hammadde tahmininin Türkiye'de sadece birkaç vaka çalışmasına uygulandığı belirlenmiştir (5 çalışma: Onurbaş Avcıoğlu ve Türker 2012; Günlü ve diğ. 2014; Özcan ve diğ. 2015; Avcıoğlu ve diğ. 2019; Şenocak ve Güner Gören 2022).
- Uygulama alanı olarak ise köylerden, ülkelere hatta kıtalara kadar farklı bölgelerin seçilebildiği ve problemin yapısına göre uygun yöntemlerin belirlendiği saptanmıştır.

- Literatürde bu alandaki bir diğer önemli boşluk, biyoenerji potansiyeli için güvenilir, analitik ve esnek tahmin yöntemlerine duyulan ihtiyaçtır.
- İncelenen çalışmalarda tahmin için çoğunlukla istatistiksel yaklaşımların kullanılmış olduğu (14 çalışma) bunu CBS (10 çalışma) ve MM'nin (4 çalışma: Deng ve diğ. 2015; Chen 2016; Avcıoğlu ve diğ. 2019; Cudjoe ve diğ. 2021) izlediği gözlemlenmiştir. Yapay zekâ tabanlı yöntemlerin (3 çalışma: Mansaray ve diğ. 2020; Luciano ve diğ. 2021; Şenocak ve Güner Gören 2022) ve simülasyonun (1 çalışma: Dymond ve diğ. 2010) oldukça az kullanıldığı belirlenmiştir. Kaynakların tahmin edilmesi aşamasında yapay zekâ ve simülasyon yaklaşımları kullanılarak, gerçek sistemin modellenmesi yoluyla, belirsizlikleri de dikkate alarak oldukça iyi sonuçlar elde edilebileceği gözlemlenmiştir.
- Literatürde belirlenen bir diğer eksiklik ise yapay zekâ tabanlı bir tahmin yöntemi olan DVR'nin çözüm yaklaşımı olarak kullanılmamış olmasıdır. Az sayıda veri kullanılarak kısa sürede etkin sonuçlar üretebilen bu tahmin yönteminin, özellikle biyokütle kaynaklarının tahmininde kullanımının biyoenerji sistem tasarımında iyi sonuçlar verebileceği düşünülmektedir.

#### Biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımı:

- Amaç fonksiyonunda çoğunlukla taşıma maliyetinin (33 çalışma), çevrim tesisi maliyetlerinin (26 çalışma), biyokütle alım maliyetinin (16 çalışma) ve depolama maliyetlerinin (11 çalışma) bulunduğu, nadiren CO<sub>2</sub> salınımı, emisyon maliyeti, karbon yakalama maliyeti gibi çevresel amaç fonksiyonlarına (10 çalışma) da yer verildiği gözlemlenmiştir. Sürdürülebilirliğin üçüncü boyutu olan sosyal etkileri dikkate alan çalışma sayısının ise oldukça az olduğu (2 çalışma: Razm ve diğ. 2019; Santibanez-Aguilar ve diğ. 2022) belirlenmiştir.
- Literatürde kullanılan hammadde kaynaklarının genellikle tek tipte olduğu (19 çalışma), birden fazla kaynağı birleştiren çalışmaların daha

az sayıda (10 çalışma) bulunduğu saptanmıştır. Birden fazla biyokütle kaynağından enerji üretiminde bütünleşik olarak yararlanılmasının ağ tasarımının esnekliği ve enerji ihtiyacının kesintisiz karşılanması açısından önemli olduğu gözlemlenmiştir.

- Çözüm yaklaşımı olarak sıklıkla MM'nin CBS ile birlikte kullanıldığı (21 çalışma), bu sayede etkin karar verme sürecine mekânsal verilerin dâhil edildiği gözlemlenmiştir.
- ATM yönteminin özellikle çiftçi ve biyoenerji üreticileri arasında biyokütle alım fiyatı konusunda uzlaşma sürecine odaklandığı, söz konusu tarafların sıklıkla ajanlar biçiminde temsil edildiği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak metodun simülasyon yöntemi ile birleştirilmesi sonucunda uzun yılları kapsayan stratejik kararların alınmasında etkili bir biçimde kullanıldığı belirlenmiştir. Ayrıca ajanların otonom karar vermeleri ve etkileşimleri sonucunda gerçek dünyaya yakın sonuçların elde edilebildiği görülmüştür.
- Literatürde biyokütle sistem tasarımında ATM yöntemini kullanan çalışma sayısı incelendiğinde, yöntemin birçok noktadan geliştirmelere açık olduğu saptanmıştır. Yaklaşımın, farklı tipte ajanlarla kullanımı, değişik karar düzeylerinde yararlanılması, çeşitli yöntemlerle birlikte kullanılması sonucunda daha etkin bir tedarik sistemi oluşturulabileceği öngörülmüştür. Ayrıca, sıklıkla alıcı-satıcı ilişkisinin analizinde kullanılan ATM yönteminin tüm tedarik zincirini kapsayacak şekilde düzenlenmesi ile daha geniş bir uygulama alanında düzenli bilgiye ulaşmanın önünü açacağı ve daha yapılandırılmış kararların hızlı bir biçimde alınmasını sağlayabileceği düşünülmektedir.
- Karar düzeyleri açısından, çalışmaların büyük çoğunluğu hammadde temini ve tahsisi, biyoenerji tesislerinin kuruluş yeri seçimi, üretim teknolojisinin seçimi, vb. gibi stratejik kararlara odaklanmıştır. Stratejik kararlar büyük ölçekli problemlerde tedarik zinciri bileşenlerinin uzun vadeli çevresel etkilerini değerlendirmede oldukça etkili olabilir. Bununla birlikte, malzeme akışları, ihtiyaçları zamanında karşılama ve verimliliğe etkileri yüksek olan ve tedarik

sisteminin maliyetleri ve hizmet düzeyinde farklılıklara neden olan operasyonel kararlar çalışmaların çoğunda ele alınmamıştır. Bu nedenle, biyokütle tedarik zincirlerinin planlanma aşamasında tüm karar seviyelerinin dikkate alınması olumlu sonuçlar doğurabilir. Yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanılması, birden çok karar seviyesinin dikkate alındığı karmaşık problemlerin üstesinden gelmek için faydalı olabilir.

Literatürden elde edilen çıkarımlar göz önüne alındığında tedarik zinciri bileşenleri arasındaki ilişkileri analiz etmek, mekânsal bilgileri görselleştirmek, sistem davranışının zaman içindeki değişimini takip etmek, tedarik sisteminin verimli ve gerçekçi bir şekilde modellenmesine yardımcı olabilir. Tedarik zincirini oluşturan bileşenlerin konfigürasyonunun doğru bir biçimde belirlenmesi, belirsizliklerin çözüm metodolojisine dâhil edilmesi ve coğrafi verilerin kullanılması tedarik zincirinin rekabet gücünü olumlu yönde etkilemektedir. Günümüzde, hesaplama gücünün ve sorunların karmaşıklığının artmasıyla, biyokütle tedarik zincirlerini optimize etmek için yapay zekâ tabanlı yaklaşımlara olan ilginin artma eğiliminde olacağı düşünülmektedir.

Bu noktalardan hareketle, yapılan çalışmada öncelikle biyokütle kaynaklarının tahmini yani gelecekte ortaya çıkabilecek atık miktarları DVR yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. DVR yönteminin kullanılmasında yöntemin hem uygulama alanına ve verilere uygunluğu, hem de farklı problemlere nispeten kolay adaptasyon sağlaması etkili olmuştur. Daha sonra çevrim tesislerinin uygunluk analizi topografik özelliklerin dikkate alınmasını sağlamak ve karar süreci için etkin ve sistematik bir çözüm yaklaşımı geliştirmek için CBS tabanlı DEMATEL yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Söz konusu uygunluk analizine göre aday çevrim tesislerinin konumları belirlenmiştir. Daha sonra aday çevrim tesislerinin sayısı ve büyüklüğü, çevrimde kullanılan hammadde miktarları, elde edilen elektrik enerjisi, üretilen gübre miktarı, toplam sistem gelirleri, giderleri ve taşıma ağı önerilen MM ile belirlenmiştir. Biyokütle tedarik zinciri gibi uzun yıllar bir bütün halinde çalışması gereken sistemlerde, kararların açık ve tüm sistem bileşenlerinin fayda sağlayabileceği biçimde alınması oldukça önemlidir. Bu nedenle, yapılan çalışmada, söz konusu yapılandırılmış, etkin ve hızlı bilgi paylaşımı için tedarik zinciri ağ

tasarımı probleminde karşılaşılabilecek farklı senaryoların değerlendirilmesinde ATM yöntemi karar destek sistemi olarak kullanılmıştır.

### **3.3 Bölüm Özeti**

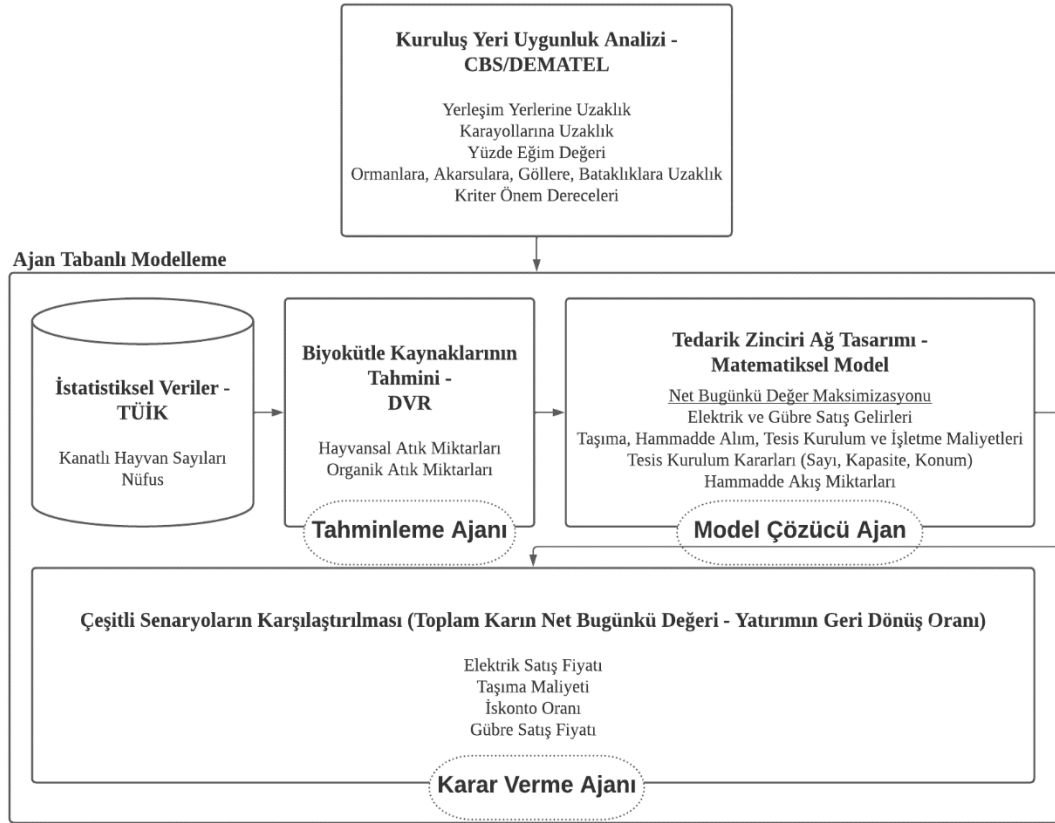
Bu bölümde biyokütle tedarik zincirinin farklı aşamalarına odaklanan çalışmalar gruplandırılmış ve detaylı olarak incelenmiştir. Araştırma çalışmalarının kümelenmesinde biyokütle tedarik zincirinde bulunan temel işlemler dikkate alınmış, çalışmalar kuruluş yeri uygunluk analizi, biyokütle kaynak miktarlarının tahmini ve tedarik zinciri ağ tasarımı konularına göre araştırılmıştır. Konu ile ilgili çalışmalar; uygulama alanı, hammadde kaynakları, planlama dönemi, çözüm yöntemi, kuruluş yeri türü, seçim kriterleri, amaç fonksiyonu, karar düzeyi ve duyarlılık analizine göre incelenmiştir. Literatürde var olan eksiklikler belirlenmiş, söz konusu boşlukların nasıl giderilebileceği belirtilmiş ve çözümde kullanılması gereken yöntemler açıklanmıştır.

Sonraki bölümde yapılan tez çalışmasında biyokütle tedarik zinciri için bir karar destek sistemi tasarımında kullanılan yöntemler açıklanmış, söz konusu yöntemlerin kullanım alanları, avantajları ve dezavantajları belirtilmiştir.

## 4. YÖNTEM

Bu bölümde biyokütle tedarik zinciri tasarımı için önerilen bütünleşik yaklaşımı oluşturan yöntemler detaylı biçimde açıklanmıştır. Yapılan tez çalışmasında biyokütle tedarik zinciri tasarımı için bütünleşik bir CBS-ÇKKV-DVR-MM-ATM yaklaşımı önerilmiştir. Enerji sistemi tasarımında biyokütle kaynağı olarak hayvansal atıklar ve organik çöpler kullanılmıştır. Çalışmada hammadde kaynağı olarak hayvansal atıklar ve organik çöplerin kullanılmasının amacı; günlük olarak sürekli elde edilebilmeleri, farklı kaynakların kullanımıyla olası darboğazların önlenmesi, tarımsal atıklar gibi mevsimsellik içermemeleri, dönemsel depolama gerektirmemeleri ve mevcut biyokütle potansiyellerinin yüksek olmasıdır. Bütünleşik yaklaşımın ilk aşamasında, çevrim tesislerinin kuruluş yeri uygunluk analizi CBS tabanlı ÇKKV yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Mekânsal analizde, ormanlara uzaklık, su kaynaklarına uzaklık, bataklıklara uzaklık, karayollarına uzaklık, yerleşim noktalarına uzaklık ve eğim gibi çeşitli kriterler değerlendirilmiş ve bu aşamanın sonucunda aday çevrim tesislerinin konumları belirlenmiştir. Elde edilen noktalar daha sonra matematiksel modelde girdi olarak değerlendirilmiştir. Gelecekte ortaya çıkabilecek atık miktarlarının belirlenmesi için kullanılan yapay zekâ tabanlı DVR yöntemi ve çevrim tesislerinin sayısının ve büyüklüğünün, çevrimde kullanılan hammadde miktarlarının, elde edilen elektrik enerjisinin, üretilen gübre miktarının, toplam sistem gelirlerinin, giderlerinin ve taşıma ağının belirlendiği MM, çeşitli ajanlar kullanılarak Java programlama diline gömülmüştür. Önerilen bütünleşik DVR-MM yaklaşımı ATM kullanılarak çözdürülmüş, amaç fonksiyonundaki parametre değerlerinin değiştirilmesi ile oluşturulan farklı senaryolar çeşitli ajanlar yardımıyla modellenmiş, en iyi durum karın net bugünkü değeri ve yatırımın geri dönüş oranı (YGDO) performans ölçütleri kullanılarak belirlenmiştir.

Önerilen bütünleşik yaklaşımın şekilsel gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir.



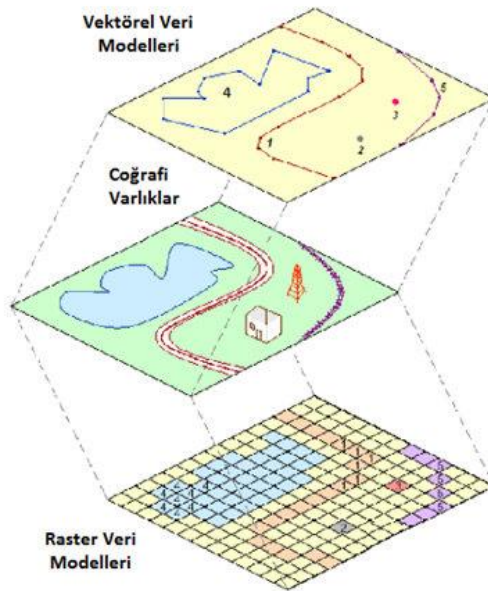
Şekil 4.1: Önerilen bütünleşik yaklaşımın adımları.

#### 4.1 Coğrafi Bilgi Sistemleri

CBS, kullanıcılarının mekânsal ve coğrafi verileri toplamasına, analiz etmesine ve yönetmesine olanak tanıyan bir sistem olarak tanımlanabilir. Son zamanlarda yazılım teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, mekânsal analiz, biyokütle tedarik zincirlerinin tasarlanması ve yönetilmesinde önem kazanmıştır. CBS literatürde, nüfusu, biyokütle hammadde bulunabilirliğini, kaynakların dağılımını ve ulaşım ağına erişilebilirliği tahmin etmek için kullanılmaktadır (Jeong ve diğ. 2019). Bunlara ek olarak, sonuçların görselleştirilmesinin yanı sıra, tedarik zincirlerinin tasarımında karşılaşılan yer tahsisi problemlerinin çözümünde de sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle büyük veri setlerini içeren ve ülke veya kıta gibi geniş alanları kapsayan çalışmalar için CBS, mekânsal verilere tutarlı ve makul bir sürede ulaşmak için güçlü bir araç olarak kabul edilmektedir (Brahma ve diğ. 2016).

Coğrafi bilgiler başlıca konum, öznitelik ve topolojik verileri içermektedir (Töreayen ve diğ. 2010). CBS verileri ise vektörel ve raster olarak ikiye ayrılmaktadır. Vektörel veriler koordinat değerlerinden oluşmakta, kesin bilgiler içermekte ve genellikle daha büyük depolama alanına ihtiyaç duymaktadırlar. Bu veriler kendi içinde noktasal (point), çizgisel (line) ve alansal (polygon) olarak üç gruba ayrılmaktadır. Noktasal veriler tek bir koordinat çiftine sahip olan ve bu şekilde temsil edilen bilgileri içerirler. Buna örnek olarak dağların zirveleri ve göllerin en derin noktaları verilebilir. Çizgisel veriler ise koordinat çiftlerinin oluşturduğu süregelen serileri temsil etmektedir. Akarsular, karayolları ve il sınırları çizgisel verileri açıklamada kullanılabilir. Alansal veriler ise birden çok noktasal verinin bir düzlem oluşturacak şekilde bir araya gelmesi ile veya çizgisel verilerin oluşturduğu kapalı şeklin alanı şeklinde ifade edilebilir. Tarlalar, göller, il yüzölçümleri alansal verilerdendir. Raster veriler ise hücrelerle (piksel) ifade edilirler, bu nedenle hassas ölçümlerde bir miktar hata payına sahip olurlar. Vektör verilere göre daha fazla bilgi depolayabilirler. Uydu görüntüleri ve taranan fotoğraflar raster veriler sınıfına örnek gösterilebilir.

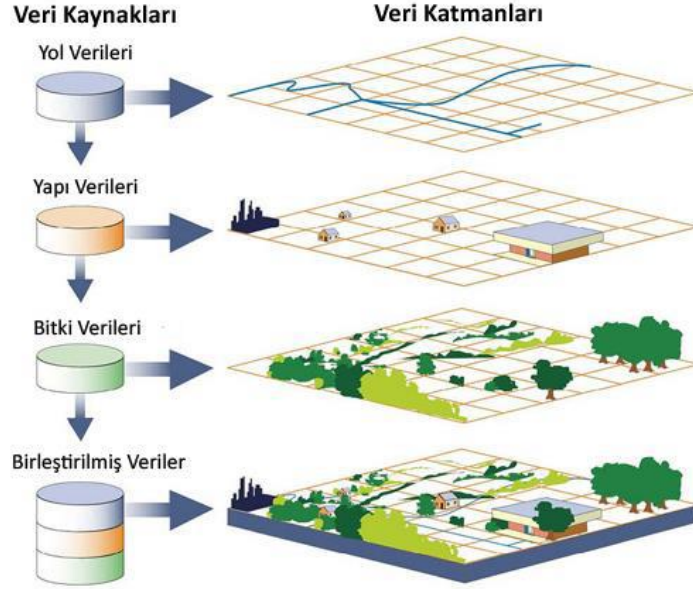
Vektörel ve raster veri türlerinin şekilsel olarak gösterimi Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2: Vektörel ve raster veriler (CBS Akademi 2016).



Katmanlı bir yapı gösteren CBS, farklı verilerin mekânsal olarak analizini ve söz konusu bilgilerin bütünleştirilmesini mümkün kılmaktadır. CBS, bu sayede farklı noktasal, çizgisel, alansal ve raster verilerin aynı düzlemde ifade edilebilmesine ve çeşitli analizlerin yapılabilmesine olanak tanımaktadır. Farklı veri katmanlarının bütünleştirilmesi ve elde edilen görünüm Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3: Veri katmanları (Erdoğan 2017).

Günümüzde CBS tabanlı yaklaşımlar otomobillerde ve yaya ulaşımında kullanılan yer bulma uygulamalarından şehirlerin peyzaj çalışmalarını içeren veritabanlarına kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlardan birisi de uzaktan algılama yöntemiyle tarım ve arazi örtüsünün incelenmesine olanak sağlayan ve çalışmalarda sıklıkla kullanılan CORINE (Coordination of Information on the Environment - Çevresel Bilginin Koordinasyonu) veritabanıdır.

#### 4.1.1 CORINE Arazi Sınıflandırma Sistemi

Avrupa Birliğine üye ülkeler için ortak bir arazi sınıflandırma sistemi oluşturmak için ortaya atılan bir sistem olan CORINE projesi 1985 yılında Avrupa Çevre Komisyonu tarafından kabul edilmiştir ve kullanılmaya başlanmıştır (Koca ve diğ. 2015). Daha sonra 1994 yılında ülkemizin de içinde bulunduğu 39 ülkenin arazi bilgilerini toplama yetkisi Avrupa Çevre Ajansına devredilmiştir.

Bu projenin amacı ülkeler bazında toprak kullanımının belirlenmesi, arazi örtüsünde meydana gelen değişikliklerin izlenmesi ve daha hızlı önlem alınabilmesidir. İlk önce on yıl arayla oluşturulması planlanan veritabanı (1990 ve 2000) 2000 yılından sonra altı yıl arayla oluşturulmakta (2006, 2012 ve 2018) ve toplam 5,8 milyon km<sup>2</sup>'lik bir alanı kapsamaktadır (T. C. Tarım ve Orman Bakanlığı 2015). Proje kapsamında arazi örtüsü üç farklı ayrıntı düzeyinde toplam 44 sınıflandırma türüne ayrılmıştır. Bu arazi sınıflandırma türleri Şekil 4.4'te verilmiştir.

Düzyen 1	Düzyen 2	Düzyen 3
1. Yapay Yüzeyler	1.1. Şehir Yapısı	1.1.1. Devamlı şehir yapısı
		1.1.2. Devamlı olmayan şehir yapısı
	1.2. Endüstriyel, ticari ve taşıma birimleri	1.2.1. Endüstriyel veya ticari birimler
		1.2.2. Karayolu ve demiryolları ve ilgili alanlar
		1.2.3. Limanlar
		1.2.4. Hava alanları
	1.3. Maden, boşaltım ve inşaat alanları	1.3.1. Maden çıkarm alanları
		1.3.2. Boşaltım alanları
		1.3.3. İnşaat sahaları
	1.4. Tarım dışı yapay yeşil alanlar	1.4.1. Yeşil yerleşim alanları
1.4.2. Spor ve dinlenme alanları		
2. Tarım Alanları	2.1. Tarıma uygun alanlar	2.1.1. Sulanmayan tarımsal araziler
		2.1.2. Sürekli sulanan araziler
		2.1.3. Çeltik tarlaları
	2.2. Sürekli ürünler	2.2.1. Bağlar
		2.2.2. Meyve bahçeleri
	2.3. Meralar	2.2.3. Zeytin bahçeleri
		2.3.1. Meralar
	2.4. Heterojen tarımsal alanlar	2.4.1. Sürekli ürünlerle birlikte bulunan senelik ürünler
		2.4.2. Karışık tarım alanları
		2.4.3. Doğal bitki örtüsü ile birlikte bulunan tarım alanları
2.4.4. Orman tarımı arazileri		
3. Orman ve Yarı Doğal Alanlar	3.1. Ormanlar	3.1.1. Geniş yapraklı ormanlar
		3.1.2. Kozalaklı ağaç ormanlar
		3.1.3. Karışık ormanlar
	3.2. Funda ve/veya otsu bitkilerin birleşimi	3.2.1. Doğal çayırliklar
		3.2.2. Fundalıklar
		3.2.3. Sklerofil bitki örtüsü
		3.2.4. Geçici orman- çalılık
	3.3. Bitki örtüsü az ya da hiç olmayan açık alanlar	3.3.1. Sahiller, kumsallar ve kum düzlükleri
		3.3.2. Çıplak kayalık
		3.3.3. Seyrek bitkili alanlar
4. Islak Alanlar	3.3.4. Yanmış alanlar	
	3.3.5. Buzullar ve kalıcı kar	
	4.1. İç ıslak alanlar	4.1.1. İç bataklıklar
4.2. Kıyıya yakın ıslak alanlar	4.1.2. Turbalıklar	
	4.2.1. Tuz bataklığı	
	4.2.2. Tuzlalar	
5. Su Toplulukları	5.1. İçsel sular	4.2.3. Gel-git olayı ile oluşan düzlükler
		5.1.1. Su yolları
	5.2. Deniz suları	5.1.2. Su kütleleri
5.2.1. Kıyı lagünleri		
5.2.2. Haliçler (Nehir ağızları)		
		5.2.3. Deniz ve okyanus

Şekil 4.4: CORINE arazi sınıfları (Ateşoğlu 2016).

## 4.2 DEMATEL Yöntemi

DEMATEL, Gabus ve Fontela tarafından 1972-1976 yılları arasında Cenevre Battelle Memorial Enstitüsü Bilim ve İnsan İlişkileri bölümünde geliştirilmiş bir karar verme yöntemidir (Gabus ve Fontela 1972). Söz konusu yaklaşım karmaşık faktörler arasındaki ilişkileri, sebep ve sonuçların gözlemlenebildiği yapısal bir model haline getirerek sistemin daha kolay incelenmesini, dolayısıyla karar verme sürecinin daha güvenilir olmasını sağlamaktadır (Şenocak 2016). Çizge teorisinden geliştirilen yaklaşım, kriterlerin arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılmasına ve daha net bir biçimde açıklanabilmesine olanak vermektedir (Falatoonitoosi ve diğ. 2013). DEMATEL metodu kriterlerin birbirleriyle olan ilişkilerini, kriterlerin karşılıklı etkileme-etkilenme düzeylerini, kriterlerin önem derecelerini belirlemek, kriterleri birtakım özelliklerine göre önceliklendirmek için literatürde sağlık sektöründe hizmet kalitesini etkileyen faktörlerin ayrıntılı olarak incelenmesi (Gupta ve diğ. 2022), elektrikli otobüs şarj istasyonlarının kuruluş yeri seçimini etkileyen faktörlerin analizi (Sang ve diğ. 2022) ve otomobil koltuklarının müşteri odaklı olarak tasarlanması (Karasan ve diğ. 2022) gibi farklı alanlarda sıklıkla kullanılmakta ve başarılı sonuçlar alınmaktadır.

DEMATEL yönteminin temel adımları aşağıda verilmiştir.

### Adım 1. Doğrudan ilişki matrisinin oluşturulması

Yöntemin ilk adımında kriterler arasındaki ilişkilerin hesaplanabilmesi için önceden belirlenen bir ölçek kullanılarak ikili karşılaştırmalar yapılır. Satır ve sütunlarda yer alan kriterler doğrudan ilişki düzeylerine göre puanlanır ve Eşitlik (4.1)'de gösterilen doğrudan ilişki matrisi oluşturulur.

$$D = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

### Adım 2. Normalize edilmiş doğrudan ilişki matrisinin oluşturulması

Problemlerde çeşitli kriterler farklı ölçeklerle ifade edilebilirler. Farklı ölçü birimlerinin aynı biçime dönüştürülmesi sağlıklı bir karar verme süreci için oldukça

önemlidir. Farklı değerlerin aynı düzlemde ifade edilebilmesini sağlayan normalizasyon işlemi aşağıda gösterilmiştir. Öncelikle matristeki her satır ve sütun toplamının en büyük değeri Eşitlik (4.2) yardımıyla bulunur (Arslankaya ve Göraltay 2019). Daha sonra tüm matris elemanları elde edilen  $s$  değerine bölünür ve normalize edilmiş doğrudan ilişki matrisi elde edilir.

$$s = \max \left( \max \sum_{j=1}^n x_{ij}, \sum_{i=1}^n x_{ij} \right)$$

$$N = \begin{pmatrix} 0 & d_{12}/s & \dots & d_{1n}/s \\ d_{21}/s & 0 & \dots & d_{2n}/s \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1}/s & d_{n2}/s & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

### Adım 3. Toplam ilişki matrisinin oluşturulması

Toplam ilişki matrisi oluşturulurken ilk olarak Adım 2’de elde edilen normalize doğrudan ilişki matrisi birim matristen çıkarılır. Daha sonra tersi alınır ve doğrudan ilişki matrisi ile çarpılır. Eşitlik (4.3) kullanılarak toplam ilişki matrisi oluşturulur.

$$T = X + X^2 + X^3 + \dots = \sum_{i=1}^{\infty} X^i = X(I - X)^{-1}$$

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \dots & t_{nn} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

### Adım 4. Kriterler arasındaki ilişkilerin tespit edilmesi

Bu adımda etkileyen ve etkilenen (gönderici ve alıcı) kriterlerin hangileri olduğu belirlenir. İlk olarak toplam ilişki matrisindeki satır ve sütun toplamları hesaplanır. Satırlar toplamı  $D_i$  sütunlar toplamı ise  $R_j$  ile ifade edilir ve sırasıyla Eşitlik (4.4) ve Eşitlik (4.5) kullanılarak hesaplanır (Arslankaya ve Göraltay 2019).  $D_i$   $i$ .kriter tarafından diğer kriterlere gönderilen direkt ve dolaylı etkilerin toplamını,  $R_j$  ise  $j$ .kriter gelen dolaylı ve direkt etkilerin toplamını göstermektedir.  $(D_i + R_j)$  değeri gönderilen ve alınan etki toplamını yani kriterin önem derecesini,  $(D_i - R_j)$

değeri ise sisteme yapılan net etkiyi belirtmektedir (Çınar 2013; Eroğlu 2014). ( $D_i - R_j$ ) değeri pozitif ise kriterin etkileyen grupta, negatif ise etkilenen grupta olduğu sonucu çıkarılır (Arslankaya ve Göraltay 2019).

$$D_i = \left[ \sum_{j=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1} \quad (4.4)$$

$$R_j = \left[ \sum_{i=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1} \quad (4.5)$$

### Adım 5. Kriter ağırlıklarının belirlenmesi

Kriter ağırlıkları Eşitlik (4.6)'da gösterildiği üzere ( $D_i + R_j$ ) ve ( $D_i - R_j$ ) değerlerinin karelerinin toplamının karekökü alınarak daha sonra ise Eşitlik (4.7)'de gösterildiği şekilde ağırlıkların ağırlık toplamına bölünmesi ile belirlenir (Arslankaya ve Göraltay 2019).

$$w_i = \sqrt{(D_i + R_j)^2 + (D_i - R_j)^2} \quad (4.6)$$

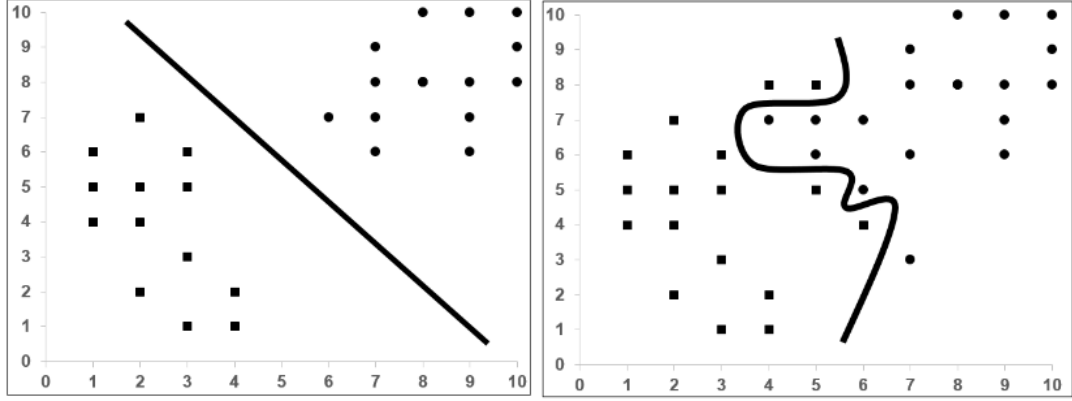
$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.7)$$

### 4.3 Destek Vektör Regresyonu

Destek vektör makineleri Vapnik tarafından geliştirilen (Vapnik 1995), sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılabilen, çekirdek (kernel) fonksiyonu içeren bir makine öğrenme algoritmasıdır (Amasyalı ve El-Gohary 2018). Yöntem optimizasyon temelli olup farklı veri sınıflarının birbirinden ayrılması problemi sonucunda ortaya çıkmıştır. Şekil 4.5'te gösterildiği üzere farklı veri sınıfları doğrusal veya doğrusal olmayan düzlemler yardımıyla birbirlerinden ayrılabilirler.

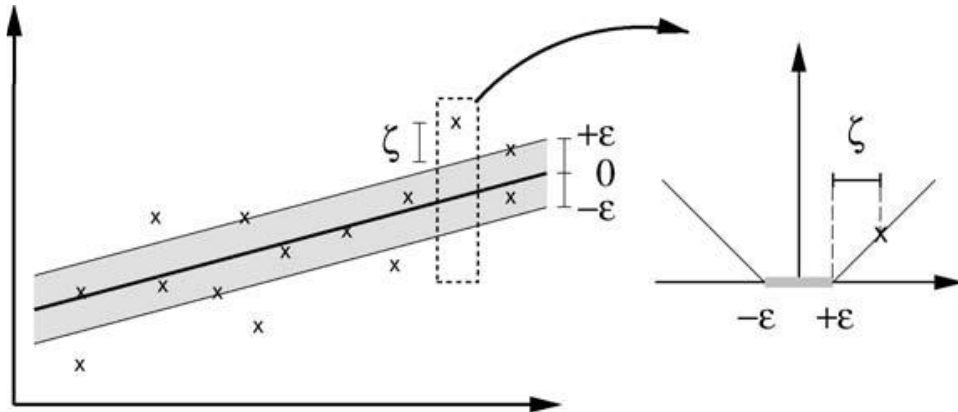
Sınıflandırma kısmında, algoritma veri türlerini mümkün olduğunca büyük bir aralıkla ayırmaya çalışırken, regresyon kısmında ise veri sınıflarını en küçük aralıkta toplamaya çalışmaktadır. Veri setleri her zaman doğrusal olarak ayrışmamaktadır. Bu nedenle doğrusal olmayan problem yüksek boyutlu bir uzaya

yansıtılarak problem için en uygun fonksiyon belirlenir ve çekirdek fonksiyonlarıyla tekrar doğrusal olarak ifade edilir. Çekirdek fonksiyonları doğrusal, kuadratik, kübik ve radyal tabanlı olabilmektedir.



Şekil 4.5: Destek vektör makinelerinde veri setlerinin birbirinden ayrılması (Acı ve diğ. 2017).

Gelecek zaman dilimlerinde ortaya çıkması muhtemel değerlerin tahmin edilmesine olanak sağlayan bir yöntem olan destek vektör regresyonu ise Smola ve Schölkopf (2002) tarafından geliştirilmiştir. Yaklaşımında, iki veya daha fazla veri setinin uç noktaları destek vektörleri olarak adlandırılmıştır. Söz konusu vektörlerin ortasından geçen ve veri setlerini temsil eden regresyon doğrusu veya eğrisi belirlenmeye çalışılmaktadır. Doğrusal olarak ayrılabilen verilerden oluşan destek vektör regresyonunun genel grafiği ve kayıp fonksiyonları Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Doğrusal destek vektör regresyonu için kayıp fonksiyonu (Schölkopf ve Smola 2002).

Yöntem kullanılarak bağımlı değişken  $y_i$ 'lerden maksimum uzaklıktaki  $\epsilon$  değerine sahip  $f(x)$  regresyon doğrusunun bulunması amaçlanır (Yüce 2021). Çözümde regresyon doğrusu,  $+\epsilon$  ve  $-\epsilon$  değerlerinin oluşturduğu tüpün içinde kalan

hatalar önemsenmez ve bu tüpün dışında kalan sapmaların olmaması amaçlanır. Çözüm değerlerinin eldesi için tüpün dışında kalan hata değerlerinin uzaklıklarını kontrol eden  $\zeta$  kayıp fonksiyonları tanımlanır ve problem gevşetilir. Bu sayede regresyon doğrusunun belirlenmesinde tüpün dışında kalan değerlerin tüpe olan uzaklıklarını belirten  $\xi_i^+$  ve  $\xi_i^-$  kayıp fonksiyonunun önemi ortaya çıkmaktadır.

Çözümde kullanılan optimizasyon modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Yüce 2021).

Amaç fonksiyonu:

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i^+ + \xi_i^-) \quad (4.8)$$

Kısıtlar:

$$y_i - (wx_i + b) \leq \varepsilon + \xi_i^+ \quad (4.9)$$

$$(wx_i + b) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^- \quad (4.10)$$

$$\xi_i^+, \xi_i^- \geq 0 \quad (4.11)$$

Yöntemde amaç fonksiyonunda yer alan  $C$  ceza katsayısını belirtmektedir ve hata miktarı ile fonksiyon değeri arasında dengeyi kurmaktadır.

Algoritma olasılıksal sonuçlar üretmemeye dezavantajına karşın; hata teriminin ( $\varepsilon$ ) önceden belirlenebilmesi, nispeten az miktarda girdi verisiyle tutarlı sonuçlar elde edilebilmesi, çok sayıda bağımsız veri seti ile etkin sonuçların elde edilebilmesi, doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümünde kullanılabilmesi gibi avantajlara sahiptir. Yöntem hakkında daha fazla bilgiye ulaşmak için Schölkopf ve Smola (2002), Smola ve Schölkopf (2004) ve Yüce (2021)'nin çalışmaları incelenebilir.

Yöntem literatürde kendisine uluslararası havaalanlarında taşınan yük miktarlarının tahmini (Yang ve diğ. 2022), göllerde zaman içinde meydana gelmesi beklenen su seviyesi değişimlerinin izlenmesi (Jayanthi ve diğ. 2022) ve güneş hücresi tarlalarında üretilebilecek elektrik enerjisinin belirlenmesi (Krechowicz ve diğ. 2022) gibi birçok farklı alanda kullanım alanı bulmaktadır.

#### 4.4 Matematiksel Modelleme

Matematiksel modelleme, çeşitli karar verme problemlerinin çözümü için gerçek olayın veya sistemin amaç fonksiyonu, karar değişkenleri, kısıtlar gibi matematiksel ifadelerle modellenmesidir. Çalışmada yararlanılan doğrusal programlama ise doğrusal bir amaç fonksiyonunun en büyüklenmesi veya en küçüklenmesi amacıyla karar değişkenlerinin en uygun değerlerinin, kısıtların tümünün sağlandığı ve işaret kısıtlamalarının dikkate alındığı durumda belirlenmesini içermektedir (Winston 2004).

Doğrusal programlamada amaç fonksiyonu, kısıtlar ve işaret kısıtlamaları aşağıdaki biçimde ifade edilebilir (Başkaya 2011).

Amaç fonksiyonu:

$$Z = [c_1, c_2, \dots, c_n]_{1 \times n} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \rightarrow \text{Maksimum veya Minimum} \quad (4.12)$$

Kısıtlar:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}_{n \times 1} (<, \leq, =, \geq, >) \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (4.13)$$

İşaret kısıtlamaları:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \geq 0 \quad (4.14)$$

Eşitlik (4.8), (4.9) ve (4.10)'da matris biçiminde gösterilen notasyonlar daha basit bir biçimde Eşitlik (4.11)'deki biçimde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} Z &= c^T x_i \rightarrow \text{Maksimum veya Minimum} & i &= 1, 2, \dots, n \\ Ax_i (<, \leq, =, \geq, >) b_i & & i &= 1, 2, \dots, n \\ x_i &\geq 0 & i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4.15)$$



Doğrusal programlama günümüzde hidrojen üretimi sonucunda oluşan ürünler ve doğal gaz için hidrojen tedarik zincirinin tasarlanmasında (Yoon ve diğ. 2022), hammadde olarak çelik bobinlerin bulunduğu depo yerleşiminin belirlenmesinde (Edis ve diğ. 2022), otomobil firması için tedarik lojistiğinin optimize edilmesinde (Baller ve diğ. 2022) ve daha birçok farklı alanda etkin olarak kullanılmakta ve başarılı sonuçlar elde edilmektedir.

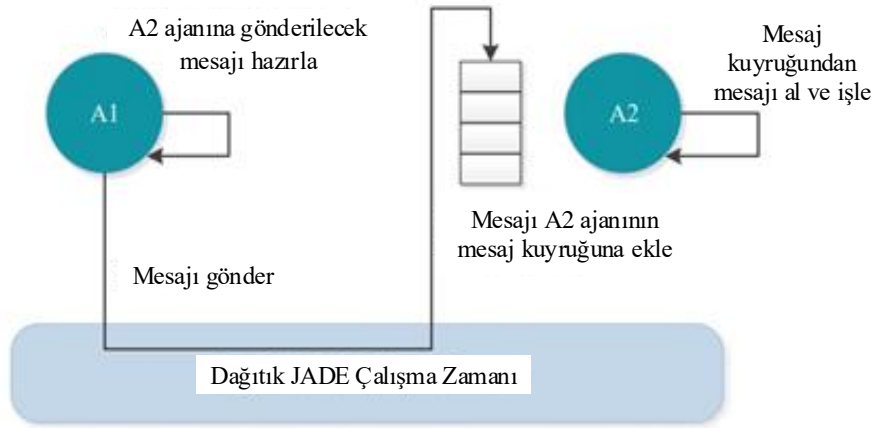
#### **4.5 Ajan (Etmen) Tabanlı Modelleme**

ATM, belirli görevleri başarmak için ortaklaşa çalışan otonom ajanlardan oluşan merkezi olmayan bir sistemi ifade etmektedir (Durfee ve diğ. 1989; Ghadimi ve diğ. 2018). Ajanlar gerçek dünyadaki insanları, durumları, problemleri yansıtmak için kullanılan nesnelere olarak tasarlanırlar ve karar verme süreçlerinde koordinasyon içinde çalışırlar. Ajanlar, tek bir ajanın tamamlamakta zorlanacağı karmaşık bir problemin çözümü için tümleşik olarak kullanılabilen gibi problemin iş parçalarına bölünmesi ve ajanların uzmanlıklarına göre paylaştırılması yoluyla ayrık olarak da kullanılabilir. Her iki durumda da işin tamamlanma süresi nispi olarak düşürülebilir. Ajanlar arasındaki etkileşim, tedarik zincirindeki belirsizliği ve dinamik durumu etkin bir şekilde simüle etmeye yardımcı olmaktadır. Bu özelliği ile ATM, analitik yöntemlerin bazen eksik kalabildiği, üretim sistemlerinin davranış ve dinamiklerinin gerçekçi bir şekilde gözlemlenebildiği kavramsal bir model sunmaktadır (Shen ve Norrie 1999). ATM, nesne yönelimli yapısı sayesinde karmaşık ve büyük ölçekli sistemlerin modellenmesini sağlarken, talep, maliyet ve kapasite gibi dinamik değişkenleri ifade etmede diğer modelleme mimarilerine göre daha fazla esneklik gösterebilmektedir (Lee ve Kim 2008). Ajanlar arasında etkileşim önceden belirlenmiş bir dilde gerçekleştirilmektedir. Uygulamalarda kullanılan başlıca iki adet iletişim dili bulunmaktadır: Bunların birincisi çok ajanlı sistemlerin standardizasyonu için çalışan bir organizasyon olan FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) tarafından önerilen ACL (Agent Communication Language) diğeri ise Maryland Üniversitesi tarafından geliştirilen KQML (Knowledge Query and Manipulation Language)'dir. Benzer biçimde ATM'nin gerçekleştirilebileceği birçok platform bulunmaktadır. Bunlardan en yaygınları Java tabanlı açık kaynak kodlu bir platform olan JADE (Java Agent DEvelopment

Framework), Northwestern Üniversitesi tarafından geliştirilen ve ücretsiz olarak sunulan NetLogo ve çeşitli benzetim çalışmalarının da yapılabildiği ücretli bir simülasyon yazılımı olan AnyLogic'tir. NetLogo ve AnyLogic yazılımlarının daha çok simülasyon çalışmalarında kullanılması, ele alınan problemdeki verilerin yıllık ve nispeten az miktarda olması, MM'nin çözüme entegre edilmesi gerekliliği nedenleriyle bu çalışmada Java tabanlı bir ATM geliştirme platformu olan JADE seçilmiştir.

#### 4.5.1 Java Agent DEvelopment Framework (JADE)

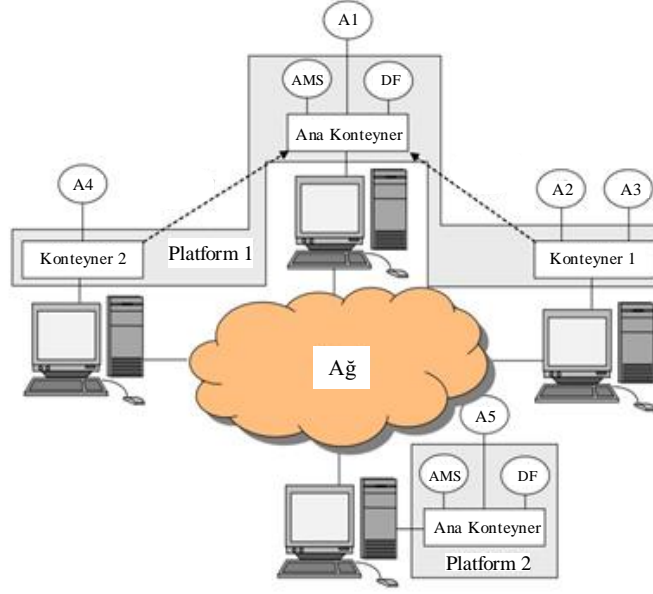
JADE, TILAB tarafından geliştirilmiştir. Ajanlar arası iletişim FIPA ACL kurallarına göre sağlanmaktadır ve platform çeşitli Java paketlerinden oluşmaktadır. JADE'de ajanlar oluşturulup geliştirilirken programcının kullanabileceği çeşitli sınıf kütüphaneleri tanımlanmıştır. Ayrıca ajanların hareketlerinin yönetilip, izlenebileceği bir grafik ara yüzü de bulunmaktadır (Bellifemine ve diğ. 2010).



Şekil 4.7: JADE haberleşme mimarisi (Caire 2009; Özbey 2014).

JADE'de yeni bir ajan oluşturulurken jade.core.Agent sınıfına ait bir nesne yaratılır ve setup() metodu ile ajanın yapacağı işlem belirtilir. Ajanlar çeşitli platformlarda ve konteynerlerde bulunabilirler. Farklı platformlarda yer alan ajanlar arasında haberleşme ağ yardımıyla gerçekleştirilir. Yaratılan ajan, AMS (Agent Management System-Ajan Yönetim Sistemi) isimli tüm platformu yönetmekle görevli bir ajanın, DF (Directory Facilitator-Sarı Sayfalar Servisi) isimli sisteme ajanı kaydetme ve servisleri tanımlama ajanının, RMA (Remote Monitoring Agent-

Uzaktan İzleme Ajanı) isimli sistem ara yüzünden sorumlu ajanın ve ACC (Agent Communication Channel-Mesaj İletim Sistemi) platform içinde mesaj iletimi yapısını kuran bileşenin bulunduğu ana konteynere eklenir (Bellifemine ve diğ. 2007).



Şekil 4.8: JADE konteyner ve platform yapısı (Caire 2009).

Ajanların yapmaları istenilen görevler jade.core.Behaviours.Behaviour sınıfındaki önceden tanımlanmış çeşitli davranışlar kullanılarak sisteme tanıtılır. Davranışlar ajanlara addBehaviour() metodu ile aktarılır ve yapılması istenilen görev kodlarla belirtilir (Bellifemine ve diğ. 2007).

#### 4.6 Bölüm Özeti

Bu bölümde biyokütle tedarik zinciri için karar destek sistemi tasarımında kullanılan bütünleşik yaklaşımı oluşturan yöntemler açıklanmıştır. Önerilen yaklaşımda kullanılan CBS, DEMATEL, DVR, MM ve ATM yöntemleri kullanım aşamalarına göre sıralanmış ve yöntemler hakkında bilgi verilmiştir.

Sonraki bölümde tesis yeri uygunluk analizinde kullanılan CBS ve DEMATEL yaklaşımının, biyokütle kaynak miktarlarının tahmininde kullanılan DVR yönteminin ve tedarik sisteminin tasarlanmasında kullanılan doğrusal

programlama modelinin ele alınan probleme uygulanması açıklanmıştır. Ayrıca önerilen karar destek sisteminde yaratılan ajanların ve karar destek sistemini oluşturan bileşenlerin söz konusu problem çözümünde kullanımı detaylı olarak anlatılmıştır.

## 5. UYGULAMA

Bu bölümde hayvansal atıklar ve organik çöplerle beslenen biyokütle tedarik zinciri için bir karar destek sistemi önerilmiştir. Denizli ili tarımsal ve hayvansal faaliyetlerin yoğunluğu ve nispeten yoğun insan popülasyonu nedeniyle uygulama alanı olarak seçilmiştir.

Çalışmada karar destek sisteminin tasarımından önce biyokütle çevrim tesislerinin yerleşimi için uygun noktalar mekânsal analiz ve ÇKKV yöntemi ile belirlenmiştir. Sonrasında hammadde kaynaklarının gelecek yıllardaki miktarları yapay zekâ tabanlı bir yöntem ile belirlenmiş ve elde edilen çıktılar matematiksel modelde girdi olarak kullanılarak biyokütle ağ tasarımı gerçekleştirilmiştir. Modelde meydana gelebilecek değişiklikler parametrelerin farklı değerleri için değerlendirilmiş, olası senaryolar arasından en uygun olanı seçilmiş ve diğer senaryolar iki değerlendirme kriterine göre en iyiden en kötüye doğru sıralanmıştır. Tahmin işlemi, model çözümü, en uygun senaryonun belirlenmesi ve senaryoların sıralanması çeşitli ajanlar kullanılarak ATM yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir.

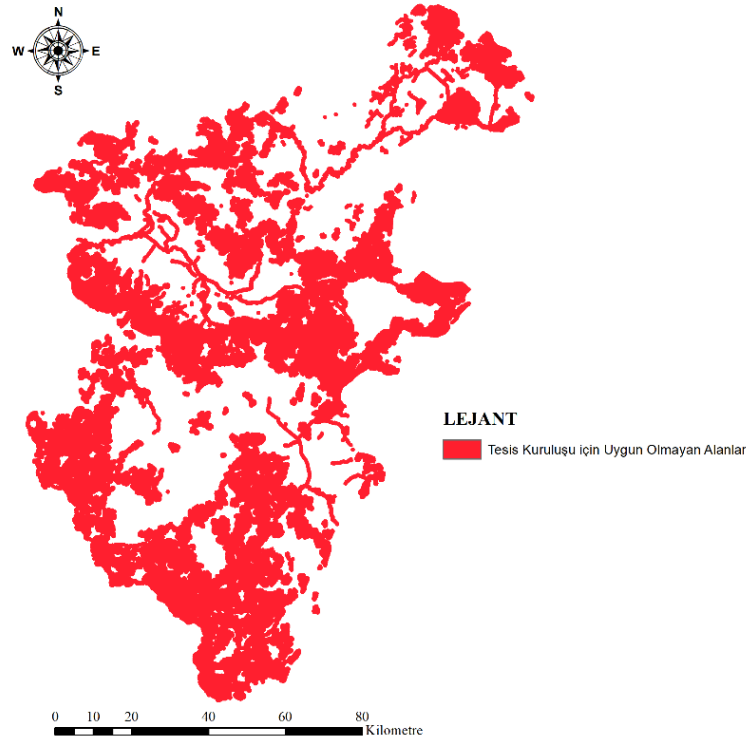
Önerilen bütünleşik yaklaşımda paranın zaman değerinin dikkate alınmasının yanı sıra YGDO da karar destek sistemine dâhil edilmiş ve farklı değerlendirme yöntemleri ile daha verimli seçimlerin yapılabilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca ATM yaklaşımının kullanımı ile karar verme sürecinin daha bütünleşik, etkin ve yapılandırılmış olması sağlanmıştır. Bu sayede nispeten kısa sürede, bütünleşik bir biçimde tahminlerin yapılması, modelin çözdürülmesi ve senaryoların değerlendirilmesi sistem bileşenleri arasındaki iletişim de geliştirilerek sağlanmıştır.

### 5.1 Kuruluş Yeri Uygunluk Analizi

Denizli ilinde kurulabilecek çevrim tesislerinin kuruluş yerleri için uygunluk analizleri mekânsal verilerden faydalanılarak CBS ve DEMATEL yöntemleri ile MS Excel ve ArcGIS 10.6.1 uygulamaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tesis kuruluş yeri için elverişli olan arazilerin dağılımı; yüzdelik eğim miktarı, karayolları,

kentsel/kırsal yerleşim alanları, ormanlık arazilerin dağılımı, bataklıklar, akarsular ve göller dikkate alınarak belirlenmiştir. Söz konusu kriterler, literatürdeki makaleler ve uygulama alanının topografik yapısı kullanılarak belirlenmiştir. Mekânsal analizde kullanılan veriler CORINE 2018 projesi, Open Street Map sitesi ve NASA Shuttle Radar Topography Mission görüntüleri kullanılarak oluşturulmuştur.

Kuruluş yeri seçimi için uygunluk tespitinde öncelikle ormanlık alanlar, bataklıklar, akarsular ve göllere olan uzaklıkların en az 500 m olması amaçlanmıştır ve söz konusu bölgeler mekânsal analizden çıkarılmıştır. Bu sayede istenmeyen olası tehlikeli durumlardan, ormanlar akarsular ve göller gibi coğrafi değerlerin etkilenmemesi ve kurulacak tesisin zemininin daha sağlam olması amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar görsel olarak Şekil 5.1’de ifade edilmiştir.



**Şekil 5.1:** Tesis kuruluşu için uygun olmayan alanlar.

Daha sonra literatürdeki çalışmalardan yararlanarak kuruluş yeri seçiminde öneme sahip kriterler; yüzde olarak eğim değeri, yerleşim merkezlerine uzaklık ve karayollarına olan uzaklık olarak belirlenmiştir. Belirlenen kriterlerin ağırlıklandırılması DEMATEL yöntemi kullanılarak literatürdeki makaleler ve uzman görüşlerinden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Yöntemde kullanılan

değerlendirme ölçeği, matrisi ve yöntem sonucunda elde edilen kriter ağırlık değerleri sırasıyla Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'te verilmiştir.

**Tablo 5.1:** DEMATEL yöntemi değerlendirme ölçeği.

Sayı	Tanım
0	Etkisi yok
1	Az seviyede etkisi var
2	Orta seviyede etkisi var
3	Yüksek seviyede etkisi var
4	Çok yüksek seviyede etkisi var

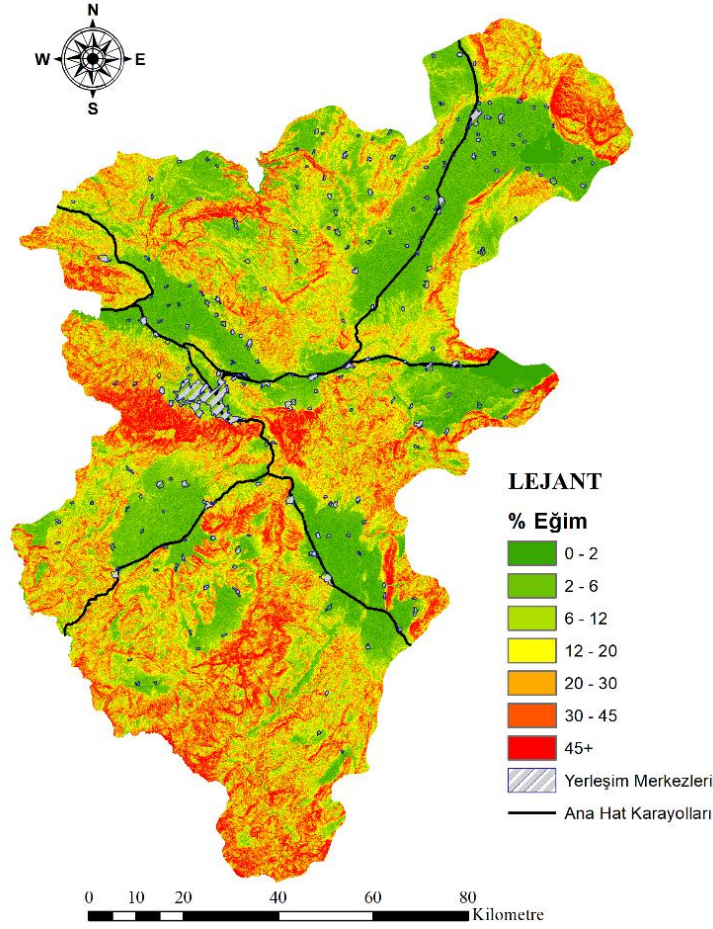
**Tablo 5.2:** Değerlendirme matrisi.

	Yerleşim Yerlerine Uzaklık	Karayollarına Uzaklık	Eğim
Yerleşim Yerlerine Uzaklık	0	2	2
Karayollarına Uzaklık	3	0	4
Eğim	1	2	0

**Tablo 5.3:** DEMATEL yöntemi sonucu elde edilen kriter ağırlık değerleri.

Kriterler	Ağırlık Derecesi
Yerleşim Yerlerine Uzaklık	0,2909
Karayollarına Uzaklık	0,3767
Eğim	0,3324

Kuruluş yeri seçiminde etkisi bulunan kriterlerin ağırlıkları belirlendikten sonra ArcGIS 10.6.1 programının Spatial Analyst eklentisi kullanılarak çeşitli mekânsal değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Kriterlerin alabileceği farklı faktör seviyelerine ilişkin değerlerin incelendiği çalışma sonucunda kuruluş yeri için uygun noktalar belirlenmiştir. Bu noktada her kriter için farklı puan değerlerine sahip faktör seviyeleri belirlenmiştir. Örneğin eğim kriteri için 0-2 derece arası değerler en yüksek puana sahipken, 2-6 derece arası değerler sonraki en yüksek puana sahiptir. Bunları 6-12 derece arasındaki değerler, 12-20 derece arasındaki değerler, 20-30 derece arasındaki değerler, 30-45 derece arasındaki değerler ve 45+ değerler izlemektedirler. Değerlendirmelerde ana hat karayollarına yakınlık ve eğimin düşük seviyede olması istenilen durumlar iken yerleşim yerlerine yakınlık belli bir seviyeye kadar istenilen bir durumdur. Uygunluk değerlendirmesinde kullanılan kriterler ve bazı faktör seviyelerinin Denizli iline uygulanması Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

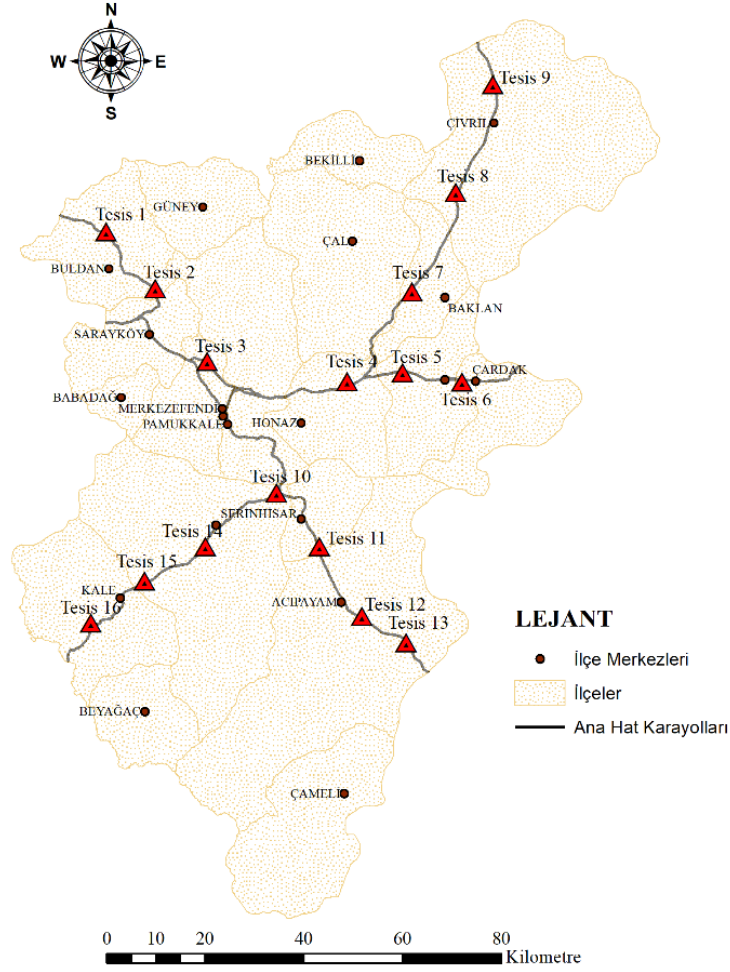


**Şekil 5.2:** Değerlendirmede kullanılan kriterler.

Karayollarına yakın tesislerin nakliye masrafları daha düşük olacağı için tercih edilmektedir. Eğimin artması tesis kuruluş maliyetlerinin artmasına neden olduğu için düşük eğime sahip alanlar kuruluş yeri seçiminde daha önceliklidir. Yerleşim yerlerine yakınlık ise işgücü temini açısından istenilen fakat tesiste meydana gelebilecek kaza riskleri ve depolama nedeniyle ortaya çıkabilecek kokuların insanları rahatsız etmesini önlenmek açısından istenmeyen bir durumdur. Her ne kadar Mekanik Ayırma, Biyokurutma ve Biyometanizasyon Tesisleri ile Fermente Ürün Yönetimi Tebliği (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015) tesis uzaklıklarının yerleşim yerlerine en az 250 m olması gerektiğini belirtse de değişen rüzgâr yönü ve hızıyla birlikte koku problemlerine neden olmamak için uygun uzaklığın yaklaşık 3 km olacağı varsayılmıştır. Tesis kuruluş yeri seçiminde etkisi olduğu düşünülen kriterlerin farklı değerleri kademeli olarak puanlandırılmış ve en uygun alanlar mekânsal olarak saptanmıştır. Daha önceki aşamada DEMATEL yöntemi ile hesaplanan kriterlerin ağırlık değerleri, kriterin alabileceği faktör



seviyelerinin puanlarıyla çarpılmış, benzer şekilde kuruluş yer seçimine uygun olmayan alanlar (500 m tampon bölge ile birlikte ormanlık araziler, akarsular, göller, bataklıklar) da değerlendirmeye dâhil edilmemiştir. Ayrıca potansiyel tesis konumlarının arasında en az 10 km bulunması şartı seçim sürecine eklenmiştir. Yapılan işlemler sonucunda belirlenen aday çevrim tesislerinin numaraları ve konumları harita üzerinde Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3: Potansiyel çevrim tesisleri kuruluş noktaları.

Denizli ili için kuruluş yeri uygunluk analizi çeşitli kriterler ve varsayımlar altında CBS ve DEMATEL yöntemleri ile MS Excel ve ArcGIS 10.6.1 uygulamaları kullanılarak saptanmıştır. Toplam 16 noktanın olası çevrim tesislerinin kuruluşu için elverişli olduğu belirlenmiştir. Değerlendirme sonucunda belirlenen uygun noktalar karar destek sisteminde girdi olarak kullanılmıştır.

## 5.2 Biyokütle Kaynaklarının Tahmini

Çalışmada yıllık kanatlı hayvan sayıları ve nüfus miktarlarını içeren veriler yardımıyla bölgede mevcut olan ve biyoenerji potansiyeli yüksek olan hayvansal atıklar ve organik çöpler DVR yöntemi ile MATLAB 2019b uygulaması kullanılarak tahmin edilmiştir. Hayvansal atıkların tahmininde bölgede sıklıkla hayvansal üretim faaliyetlerinde kullanılan yıllık yumurta ve et tavuğu sayıları, organik çöp miktarının tahmininde ise evsel atıklar kullanıldığı için ilçelerin yıllık nüfus miktarları dikkate alınmıştır. Yapılan tahmin çalışması sonucunda tüm ilçelerden elde edilebilecek çeşitli atıkların yıllık miktarları belirlenmiştir. Çalışmada beş yıllık bir planlama dönemi belirlenmiştir. Söz konusu süre hem stratejik kararların verilebilmesi için yeterli hem de tutarlı tahmin sonuçlarının elde edilebilmesi için uygun olması nedeniyle seçilmiştir.

Denizli ilinin ilçelerine ait 2004-2021 yıllarını kapsayan kanatlı hayvan sayılarını ve 2007-2021 yıllarını kapsayan nüfus miktarlarını içeren veri setleri TÜİK internet sitesinden elde edilmiş ve aşağıdaki tablolarda sunulmuştur.

Çalışmada yararlanılan biyokütle kaynaklarından kanatlı hayvan atıklarının tahmini için yıllık kanatlı hayvan sayıları kullanılmıştır. Tüm ilçelerde bulunan yıllık toplam kanatlı hayvan sayıları adet olarak Tablo 5.4'te verilmiştir.

**Tablo 5.4:** Denizli ilçelerinin kanatlı hayvan sayıları (adet) (TÜİK 2022a).

Yıllar	Acıpayam	Babadağ	Baklan	Bekilli	Beyağaç	Bozkurt	Buldan	Güney	Honaz	Kale
2004	100000	0	7100	4800	21000	28500	47500	45000	873700	17450
2005	37272	450	6500	4000	15000	21000	68500	71000	575000	21500
2006	145995	513	6044	3500	12000	8908	186000	52747	699730	22049
2007	132850	513	5835	3523	9500	9000	242560	53130	630000	22089
2008	235799	515	6121	3000	9800	4566	265650	50700	868000	21748
2009	111500	515	6600	3000	9200	3860	246614	61900	843000	20500
2010	111500	515	6000	3000	9200	4332	255000	61400	958700	21700
2011	50000	530	6000	3000	9310	3865	315000	113100	1061060	22000
2012	60000	500	6000	2900	9250	3500	253500	148200	1060171	21500
2013	62000	480	6120	3000	9275	3493	254500	147950	1030000	21000
2014	62000	560	6121	3750	8125	4098	251500	188288	1087983	21700
2015	73500	1216	5439	3782	7910	3405	319995	637500	1319814	19627
2016	87000	1300	6000	3980	7910	3400	363630	321000	742596	12200
2017	218000	500	6131	4080	7910	3950	367860	321016	1165000	11001
2018	151230	1300	1814	4045	7160	3262	434920	324800	1199356	11000
2019	61686	200	1320	4204	7170	3512	422920	449470	1199356	10000
2020	59491	1177	718	3815	7170	2953	423936	419190	1305266	8398
2021	44107	1200	700	3648	7148	6586	460605	460010	1311570	8451

**Tablo 5.4:** Denizli ilçelerinin kanatlı hayvan sayıları (adet) (TÜİK 2022a) (devam).

Yıllar	Merkezefendi	Pamukkale	Sarayköy	Serinhisar	Tavas	Çal	Çameli	Çardak	Çivril
2004	438900	3950	60000	0	100000	288100	25000	6000	574873
2005	460000	6100	173160	5308	150000	237000	24000	11000	550000
2006	261300	3608	163267	5308	173440	86598	22000	10280	213000
2007	264480	3310	150000	4520	160000	101500	22500	11283	230000
2008	266150	2830	115240	6246	190000	133500	32247	10029	306000
2009	283400	1985	81500	5571	223000	131400	25500	10065	363000
2010	283400	1930	141000	5010	250000	127557	25000	8500	509000
2011	235840	1930	65500	4400	224500	183800	2000	7535	513000
2012	239840	1900	104000	4200	224000	183500	2100	6000	477000
2013	20514	217126	146000	4900	357900	182600	12000	6515	822500
2014	21500	242000	194650	5160	350000	183700	32000	8040	891850
2015	21499	218000	264400	5760	419000	373850	6420	8150	1487214
2016	21500	217500	196380	5100	367000	372930	7000	8200	1516450
2017	25999	159990	229910	5200	384720	419480	12565	4150	1658691
2018	42820	106400	231440	5240	526100	421900	12560	4123	1953000
2019	42800	111000	229950	4670	416300	464300	13500	4123	2142465
2020	42650	127890	224310	6390	493680	465250	13250	4205	2050646
2021	43200	128457	224560	5530	404020	480950	12561	4200	2537641

Denizli'nin ilçelerinde hayvancılık faaliyetleri için sıklıkla yetiştirilen et ve yumurta tavuklarının gelecek yıllardaki miktarları TÜİK verileri kullanılarak DVR yöntemi ile tahmin edilmiştir. Öncelikle ilçeler bazında gelecek beş yıl için kanatlı hayvan sayıları tahmin edilmiş, elde edilen değerler literatürde (Gital Durmaz ve Bilgen 2020) bir adet kanatlı hayvandan elde edilebilecek yıllık atık miktarı olan 0,022 ton ile çarpılarak nihai değerler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.5:** Denizli ilçelerinin kanatlı hayvan kaynaklı atık miktarı tahminleri (ton).

Yıllar	Acıpayam	Babadağ	Baklan	Bekilli	Beyağaç	Bozkurt	Buldan	Güney	Honaz	Kale
2022	937,21	29,76	89,16	79,24	161,74	168,95	10309,33	10916,50	29747,90	222,45
2023	884,97	32,52	85,50	77,40	164,60	202,42	10710,27	11374,20	30549,56	247,21
2024	933,95	35,45	81,84	76,53	168,56	240,29	11111,21	11690,06	31351,21	272,98
2025	1053,33	38,56	78,17	76,52	173,64	282,54	11512,16	11843,91	32152,86	296,45
2026	1203,67	41,86	74,51	77,09	179,82	329,17	11913,10	11815,59	32954,52	315,81

Yıllar	Merkezefendi	Pamukkale	Sarayköy	Serinhisar	Tavas	Çal	Çameli	Çardak	Çivril
2022	847,36	3283,32	4622,66	120,77	11256,52	10758,99	258,21	129,12	57137,46
2023	777,25	3525,39	4478,37	120,75	11745,01	10262,20	254,72	152,97	59637,30
2024	725,62	3685,61	4338,03	120,22	12233,51	9347,49	252,90	157,97	61278,13
2025	696,81	3771,67	4209,79	119,33	12722,00	7963,77	252,67	158,29	61928,97
2026	684,61	3807,77	4100,03	118,28	13210,49	6059,98	253,94	158,30	61458,81

Bölgede yaşayan insanların ortaya çıkardıkları organik çöpler de biyokütle kaynağı olarak literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Elektrik üretiminin yanı sıra atıkların bertaraf edilmesini de içerdği için organik çöplerden enerji eldesi çift yönlü

fayda sağlamaktadır. Organik çöp miktarlarının tahmini için kullanılan ilçelerin yıllık nüfusları Tablo 5.6’da verilmiştir. Denizli’nin 2012 yılında büyükşehir olması nedeniyle Merkez ilçesinin sınırları değiştirilerek Merkezefendi ilçesi olması ve Pamukkale ilçesinin de sınırlarının değiştirilmesi sonucunda nüfusta meydana gelen farklılıkları daha iyi modelleyebilmek adına söz konusu iki ilçenin nüfusları 2013 yılından itibaren değerlendirmeye alınmıştır.

**Tablo 5.6:** Denizli ilçelerinin nüfusları (adet) (TÜİK 2022b).

Yıllar	Acıpayam	Babadağ	Baklan	Bekilli	Bey ağaç	Bozkurt	Buldan	Güney	Honaz	Kale
2007	58687	7950	6913	8691	7122	11834	27380	12422	28941	22542
2008	58560	7844	6679	8322	7304	11747	27194	11889	29146	22006
2009	58355	7707	6359	8330	7241	11548	27430	11717	30931	22044
2010	57533	7583	6265	8165	7181	11738	27092	11487	30530	21840
2011	57173	7418	6121	8027	7083	11924	27135	11206	31731	21406
2012	56330	6848	5964	7838	7020	12353	27484	10999	31470	21333
2013	55971	6707	5934	7751	7116	12279	27558	10796	32324	21293
2014	55722	6623	5800	7512	6922	12352	27455	10697	32282	21133
2015	55406	6611	5816	7164	6713	12597	27359	10399	31779	20667
2016	55279	6498	5632	7045	6611	12715	27335	10197	32136	20465
2017	55384	6495	5532	6824	6549	12736	27248	9896	33456	20262
2018	55648	6522	5654	7065	6903	12788	27241	9975	33184	20393
2019	55351	6445	5524	6826	6397	12671	27179	9802	34343	20310
2020	55359	6438	5503	6660	6320	12148	27223	9746	33765	19978
2021	55141	6404	5387	6464	6263	12192	26781	9506	34103	19396

Yıllar	Merkezefendi	Pamukkale	Sarayköy	Serinhisar	Tavas	Çal	Çameli	Çardak	Çivril
2007	-	-	30028	15371	53475	24157	20953	9372	61301
2008	-	-	30310	15464	51891	23339	20424	9637	61601
2009	-	-	30031	15438	51644	22649	20498	9520	61491
2010	-	-	29854	15226	50703	22249	19999	9454	61815
2011	-	-	29842	15109	49187	21764	19730	9472	61495
2012	-	-	29650	14896	47773	21079	19314	9386	61004
2013	262825	311496	29650	14817	47044	20587	19315	9386	60615
2014	271942	320142	29739	14796	46463	20218	18819	9076	61007
2015	280341	331000	29964	14649	45214	19699	18442	8906	60716
2016	287852	337444	30173	14600	44517	19431	18238	8798	60721
2017	295699	343290	30462	14488	43873	19254	18111	8673	60503
2018	302213	344065	30768	14430	43845	19259	18256	9144	60429
2019	311177	346625	30810	14451	43320	18869	18039	8736	60333
2020	321546	342608	30872	14321	42922	18579	18008	8574	60345
2021	329451	347621	30696	14349	42506	18107	17749	8578	60362

Denizli’nin ilçelerindeki organik çöplerin gelecek yıllardaki miktarları TÜİK verileri kullanılarak DVR yöntemi ile tahmin edilmiştir. Öncelikle ilçeler bazında gelecek beş yılın nüfus tahminleri gerçekleştirilmiş, elde edilen değerler bir kişinin ortaya çıkardığı yıllık organik çöp miktarı olan 0,162863 ton (TÜİK 2020; Kök 2021) ile çarpılarak nihai değerler elde edilmiştir. Söz konusu değer iki yılda bir

hesaplanan Denizli ili için günlük 0,97 kg olarak belirlenen belediye atık miktarının, evsel atıkların organik miktarı olan %46 ve 365 gün ile çarpılması sonucunda elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.7’de gösterilmiştir.

**Tablo 5.7:** Denizli ilçelerinin organik çöp kaynaklı atık miktarı tahminleri (ton).

Yıllar	Acıpayam	Babadağ	Baklan	Bekilli	Beyağaç	Bozkurt	Buldan	Güney	Honaz	Kale
2022	9026,88	1061,68	872,23	1036,46	1024,45	1903,47	4431,48	1550,22	5635,05	3181,58
2023	9056,86	1073,72	855,75	1017,83	1027,29	1806,27	4442,79	1548,59	5687,95	3154,67
2024	9095,46	1089,30	835,33	999,91	1035,94	1681,74	4443,92	1552,68	5740,86	3128,23
2025	9142,69	1105,24	810,28	982,70	1051,16	1527,19	4443,94	1562,87	5793,76	3102,24
2026	9198,53	1118,94	779,90	966,18	1073,71	1339,92	4443,94	1579,53	5846,66	3076,72

Yıllar	Merkezefendi	Pamukkale	Sarayköy	Serinhisar	Tavas	Çal	Çameli	Çardak	Çivril
2022	54475,59	55955,46	4990,55	2354,56	6775,01	2959,83	2908,52	1407,53	9872,24
2023	55724,72	55233,66	4971,02	2368,27	6714,09	2941,60	2909,18	1414,95	9918,82
2024	56973,85	54250,95	4953,70	2382,64	6661,75	2928,91	2914,25	1426,32	9984,58
2025	58222,98	53007,34	4940,59	2395,12	6618,00	2921,79	2923,72	1439,12	10071,68
2026	59472,12	51502,84	4931,88	2404,43	6582,83	2920,21	2937,59	1450,81	10182,29

Denizli ilinin biyokütle kaynaklarının tahmini ilçeler bazında DVR yöntemi ile MATLAB 2019b uygulaması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hayvansal atıklar ve organik çöpler olmak üzere iki farklı biyokütle kaynağı için önümüzdeki beş yılda elde edilebilecek toplam atık miktarları belirlenmiştir. Tahmin yöntemi daha sonraki bölümlerde karar destek sisteminde entegre edilmiş ve ajanlar kullanılarak işlemlerin yapılması sağlanmıştır.

### 5.3 Biyokütle Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı

Bu bölümde daha önceki aşamalarda ilçeler bazında tahmin edilen çeşitli biyokütle kaynaklı atık miktarları ve çevrim tesislerinin kuruluş yeri için aday noktalar kullanılarak birden fazla kaynak tarafından beslenen biyoenerji üretim sistemi ağ tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistemin tasarlanması için bir karma tamsayı programlama modeli kullanılmıştır. Matematiksel model toplam karın net bugünkü değerinin en büyüklenmesini amaçlamaktadır. İki farklı biyokütle hammaddesini dikkate alan modelde, elektrik üretiminden ve gübre satışından elde edilen gelirlere karşın, taşıma, hammadde alım, çevrim tesislerinin kurulum ve işletme maliyetleri bulunmaktadır. Modelde, çevrim tesislerinin açılmasını, hammadde akışlarının belirlenmesini, depolama ve üretim kapasitelerini içeren kısıtlar bulunmaktadır. Çözümde kullanılan model geliştirilirken Gital Durmaz ve

Bilgen (2020) tarafından önerilen çok amaçlı çok dönemli model örnek alınmıştır. Tek hammadde kaynağı için oluşturulmuş olan model birden fazla hammadde kaynağı içermesi yönüyle geliştirilmiştir. Buna ek olarak toplam gelirden ziyade özellikle gelişmekte olan ülkelerde daha da önem kazanan paranın zaman değeri, net bugünkü değer akışları kullanılarak amaç fonksiyonunda yer almış, söz konusu fonksiyona oldukça önemli bir gider kalemi olan taşıma maliyeti de eklenmiştir. Çevrim tesislerinin kurulumu için dikkate alınan kapasite seviyesi üçten beşe çıkarılmıştır. Ayrıca, modelde kullanılan hammadde kaynaklarının gelecek yıllardaki olası miktarları tahmin aşamasında elde edilmiş ve bu şekilde daha tutarlı planlama yapılmasına olanak sağlanmıştır. Kullanılan matematiksel modele ilişkin indisler, parametreler, karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıda verilmiştir.

İndisler:

$k$  : Hammadde  
 $j$  : İlçeler  
 $i$  : Tesisler  
 $d$  : Kapasiteler  
 $t$  : Yıllar

Parametreler:

$B_{jkt}$  : Yıllık olarak ilçelerin hammadde miktarları (ton)  
 $EK_{dt}$  : Tesis kapasitesine göre üretilebilecek yıllık en yüksek elektrik kapasitesi (kW)  
 $Bd_{dt}$  : Tesis kapasitesine göre depolanabilecek yıllık en yüksek biyokütle miktarları (ton)  
 $Gd_{dt}$  : Tesis kapasitesine göre depolanabilecek yıllık en yüksek gübre miktarları (ton)  
 $D_{ji}$  : İlçeler ve tesisler arası uzaklık (km)  
 $tmal$  : Birim ağırlık başına (ton) hammadde taşıma maliyeti (€/km)  
 $KM_d$  : Tesis kapasitesine göre kuruluş maliyeti (€)  
 $IM_{dt}$  : Tesis kapasitesine göre yıllık işletme maliyeti (€)  
 $BAM_k$  : Hammaddelere göre biyokütle alım maliyeti (€/ton)  
 $dnbg_k$  : Hammaddelere göre biyogaz dönüşüm oranı (m<sup>3</sup>/ton)  
 $dngu_k$  : Hammaddelere göre gübre dönüşüm oranı (ton)  
 $dnelek$  : Biyogaz-elektrik dönüşüm oranı (kW/m<sup>3</sup>)  
 $elekf$  : Elektrik satış fiyatı (€/kW)  
 $gubref$  : Gübre satış fiyatı (€/ton)  
 $maxdis$  : İlçeler ve tesisler arasındaki maksimum uzaklık (km)

Karar Değişkenleri:

$T_{id}$  : Tesis kapasitesine göre tesisin açılması veya açılmaması (1-0)  
 $X_{jkit}$  : Hammaddelere göre ilçelerden tesislere akış olması veya olmaması (1-0)  
 $Q_{jkit}$  : Yıllık olarak hammaddelere göre ilçelerden tesislere akış miktarı (ton)

- $R_{kit}$  : Yıllık olarak tesiste kullanılan hammadde miktarı (ton)  
 $E_{it}$  : Tesiste üretilen yıllık elektrik miktarı (kW)  
 $G_{kit}$  : Hammadelere göre tesiste üretilen yıllık biyogaz miktarı (m<sup>3</sup>)  
 $F_{kit}$  : Hammadelere göre tesiste üretilen yıllık gübre miktarı (ton)

Amaç Fonksiyonu:

$$\max \text{ NBD Kar} = \sum_{t=0}^N \frac{\text{Yıllık gelir (YGe)} - \text{Yıllık gider (YGi)}}{(1 + \text{iskonto oranı})^N}$$

$$YGe = \sum_i \text{elekf} \times E_{it} + \sum_{k,t} \text{gubref} \times F_{kit} \quad (5.1)$$

$$YGi = \sum_{i,d} KM_d \times T_{id} + \sum_{i,d} IM_{dt} \times T_{id} + \sum_{k,j,i} BAM_k \times Q_{jkit} + \sum_{k,j,i,t} Q_{jkit} \times D_{ji} \times tmal \quad (5.2)$$

Çalışmada amaç fonksiyonunda net bugünkü değer en büyüklenmesi hedeflenmiştir. Elektrik ve gübre satış gelirleri toplam yıllık geliri oluştururken, kuruluş, işletme, hammadde ve taşıma maliyetleri ise giderleri oluşturmaktadır.

Kısıtlar:

Tesis kurulum kısıtları:

$$\sum_d T_{id} \leq 1 \quad \forall i \quad (5.3)$$

$$T_{id} \times Bd_{dt} \leq \sum_{j,k} B_{jkt} \times X_{jkit} \quad \forall i, d, t \quad (5.4)$$

Denklem (5.3) açılan tesisin sadece tek bir kapasitede açılmasını sağlarken, Denklem (5.4) toplam tesis kapasitesinin aşılmamasını garanti etmektedir.

Akış korunum kısıtları:

$$\sum_i X_{jkit} = 1 \quad \forall j, k, t \quad (5.5)$$

$$X_{jkit} \times D_{ji} \leq \text{maxdis} \quad \forall j, k, i, t \quad (5.6)$$

$$X_{jkit} \times B_{jkt} \geq Q_{jkit} \quad \forall j, k, i, t \quad (5.7)$$

$$\sum_j Q_{jkit} \geq R_{kit} \quad \forall k, i, t \quad (5.8)$$

Denklem (5.5) belirli hammaddelerin belirli ilçelerden tek tesise taşınmasını sağlamaktadır. Denklem (5.6) ise ilçelerden hammadde taşınımının sadece tesisle ilçe arasında belirlenmiş mesafenin aşılması koşuluyla olmasını sağlamaktadır. Denklem (5.7)'de ilçelerden hammadde taşıma miktarının ilçenin toplam hammadde kaynağını aşmaması kontrol edilmektedir. Denklem (5.8) ile tesiste kullanılan hammadde miktarının tesise taşınan hammadde miktarını geçmemesi sağlanmaktadır.

Üretim kısıtları:

$$\sum_k R_{kit} \times dnb g_k \times dnelek \leq \sum_d EK_{dt} \times T_{id} \quad \forall i, t \quad (5.9)$$

$$E_{it} = \sum_k R_{kit} \times dnb g_k \times dnelek \quad \forall i, t \quad (5.10)$$

$$G_{kit} = R_{kit} \times dnb g_k \quad \forall k, i, t \quad (5.11)$$

$$F_{kit} = R_{kit} \times dng u_k \quad \forall k, i, t \quad (5.12)$$

Denklem (5.9) tesiste kullanılan çeşitli hammaddeler sonucu elde edilen elektrik miktarının açılmış olan tesisinin kapasitesinden fazla olmamasını sağlamaktadır. Denklem (5.10)'da üretilen elektrik miktarının, tesiste kullanılan hammaddeler sonucunda elde edilen biyogaz miktarı ve elektrik dönüşüm katsayısı sonucu ulaşılan değer olması kontrol edilmektedir. Denklem (5.11) tesis kapasitesine ve biyogaz dönüşüm sabitine göre biyogaz üretim miktarını, Denklem (5.12) ise tesis kapasitesine ve gübre dönüşüm sabitine göre gübre üretim miktarını denetlemektedir.

Kapasite kısıtları:

$$\sum_j Q_{jkit} - R_{kit} \leq \sum_d Bd_{dt} \times T_{id} \quad \forall k, i, t \quad (5.13)$$

$$F_{kit} \leq \sum_d Gd_{dt} \times T_{id} \quad \forall k, i, t \quad (5.14)$$

Denklem (5.13) açılan tesise kapasitesinden daha fazla hammadde akışını önlemek için kullanılmaktadır. Denklem (5.14) ise tesiste gübre depolama kapasitesinden daha fazla gübre üretilmesini engellemektedir.



Yaklaşık 17 yıl önce devreye alınan yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretimini destekleme amacıyla yerli destek kullanımı ve elektrik üretimini arttırmayı hedefleyen 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunun çeşitli yenilenebilir kaynaklar kullanılarak elde edilen elektrik alış fiyatının geçerlilik süresinin dolması nedeniyle 30 Ocak 2021 tarihli 31380 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanan 3453 sayılı Cumhurbaşkanı Kararına istinaden 01.07.2021 tarihinden 31.12.2025 tarihine kadar işletmeye girecek YEK Belgeli yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretim tesisleri için uygulanacak fiyatlar, biyometanizasyon sonucunda elde edilen elektrik için kW başına 0,54TL olarak belirlenmiştir. Alış fiyatının her üç ayda bir Yurtiçi Üretici Fiyat Endeksi (ÜFE), Yurtiçi Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE), Dolar alış kuru ortalaması, Euro alış kuru ortalaması dikkate alınarak ve belirli bir formül kullanılarak güncellenmesine karar verilmiştir. Söz konusu güncellemede biyometanizasyon sonucunda elde edilen elektriğin alış fiyatının en yüksek \$0,086 olacak biçimde sınırlandırılması kararlaştırılmıştır. 2022 yılının ilk iki çeyreğinde işletmeye girecek YEK Belgeli yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretim tesisleri için uygulanacak fiyatlar Tablo 5.8’de gösterildiği gibi belirlenmiştir.

**Tablo 5.8:** Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretim tesisleri için uygulanacak fiyatlar.

Yenilenebilir Enerji Kaynağına Dayalı Üretim Tesis Tipi	2022-1. Çeyrek YEKDEM Fiyat (TL kr/kWh)	2022-1. Çeyrek YEKDEM Yerli Aksam Desteği (TL kr/kWh)	2022-2. Çeyrek YEKDEM Fiyat (TL kr/kWh)	2022-2. Çeyrek YEKDEM Yerli Aksam Desteği (TL kr/kWh)
Hidro	51,44	10,29	71,75	14,35
Rüzgar	41,16	10,29	57,41	14,35
Jeotermal	69,44	10,29	96,86	14,35
Çöp Gazı	41,16	10,29	57,41	14,35
Biyometanizasyon	69,44	10,29	96,86	14,35
Termal Bertaraf	64,30	10,29	89,69	14,35
Güneş	41,16	10,29	57,41	14,35

Modelde kullanılan parametreler uzman görüşleri, literatürdeki çeşitli makaleler (Yalçinkaya 2020; Gital Durmaz ve Bilgen 2020; Akgül ve Ulusam Seçkiner 2019; Öztürk 2017; Yılmaz Balaman ve Selim 2014) ve önceki bölümlerde gerçekleştirilen mekânsal analiz çalışması kullanılarak oluşturulmuş ve Tablo 5.9’da sunulmuştur. Ekonomik analizlerde Euro kuru benimsenmiş ve 19 Mayıs 2022 günü döviz kurları (1€=16,84TL, 1€=\$1,06, \$1=15,92TL) dönüşümlerde esas alınmıştır. Çalışmada kullanılan çeşitli biyogaz tesisi kapasite alternatifleri ise literatür (Gital

Durmaz ve Bilgen 2020) ve uzman görüşleri alınarak oluşturulmuş ve Tablo 5.10’da gösterilmiştir.

**Tablo 5.9:** Modelde kullanılan çeşitli parametreler.

Parametreler	Değerler
Gübre satış fiyatı (€/ton)	200
Çalışma saati (saat/yıl)	7800
Elektrik satış fiyatı (€/kW)	0,0575
Ton başına hammadde taşıma maliyeti (€/km)	0,065
1 m <sup>3</sup> biyogazın elektriğe dönüşüm oranı (kW)	4,7
1 ton kanatlı hayvan atığının biyogaza dönüşüm oranı (m <sup>3</sup> )	78
1 ton organik atığın biyogaza dönüşüm oranı (m <sup>3</sup> )	74,3
Anaerobik çevirim sonucunda biyokütle ağırlığında meydana gelen azalma (%)	60
Biyokütle alış fiyatı (€/ton)	10
İskonto oranı (%)	5,375
Hammadde-tesis arasındaki maksimum uzaklık (km)	50

**Tablo 5.10:** Biyogaz tesisi kapasite alternatifleri.

Tesis Kapasitesi	Biyokütle Depolama Kapasitesi (ton)	Gübre Depolama Kapasitesi (ton)	Kurulum Maliyeti (€/kW)	İşletme Maliyeti (€/kW)
150 kWh	4752	38000	5233,64	785,05
500 kWh	15480	126720	4018,69	602,80
1000 kWh	31680	253440	3504,67	525,70
1500 kWh	47520	380160	3177,57	476,63
2000 kWh	63360	506880	2990,65	448,60

Geliştirilen model 16 GB RAM INTEL i5-10400 CPU 2.90GHz bilgisayarda IBM ILOG CPLEX Optimization Studio kullanılarak çözdürülmüştür. Elde edilen amaç fonksiyonu değeri Tablo 5.11’de verilmiştir.

**Tablo 5.11:** Amaç fonksiyonu değeri.

<b><i>Toplam Gelirin NBDsi</i></b>	€94.610.088
<b><i>Toplam Giderin NBDsi</i></b>	€60.012.393
<b><i>Toplam Karın NBDsi</i></b>	€34.597.695

Belirlenen kısıtlar altında en uygun çözümde beş yılın sonunda toplam karın net bugünkü değeri €34.597.695 olurken, elektrik ve gübre satışından elde edilen toplam gelirin net bugünkü değeri €94.610.088 olarak hesaplanmış buna karşın

taşıma, hammadde, tesis kurulum ve işletme maliyetlerinin net bugünkü değeri € 60.012.393 olarak belirlenmiştir.

Problem çözümüne göre açılması gereken tesisler, kuruluş kapasiteleri, elektrik ve gübre üretim miktarları ile birlikte Tablo 5.12’de verilmiştir.

**Tablo 5.12:** Açılması gereken tesislerin elektrik ve gübre üretim miktarları.

Tesisler	Kapasite	Elektrik Üretim Miktarı (kW)	Hayvansal Atıklar Kullanılarak Üretilen Gübre (ton)	Organik Çöpler Kullanılarak Üretilen Gübre (ton)
1 (Buldan)	1000 kWh	39.000.000	25.030,19	18.395,59
3 (Merkezefendi)	2000 kWh	78.000.000	-	89.344,52
4 (Honaz)	2000 kWh	78.000.000	-	89.344,52
5 (Bozkurt)	500 kWh	19.500.000	6.694,12	15.308,64
9 (Çivril)	2000 kWh	78.000.000	64.137,26	22.013,32
10 (Tavas)	2000 kWh	78.000.000	46.381,27	40.653,52
<b>Toplam</b>		370.500.000	142.242,84	275.060,11

Problem çözümünde; 5 (Bozkurt) konumunda 500 kWh kapasiteye sahip, 1 (Buldan) konumunda 1000 kWh kapasiteye sahip, 3 (Merkezefendi), 4 (Honaz), 9 (Çivril) ve 10 (Tavas) konumlarında 2000 kWh kapasiteye sahip tesisler açılması gerektiği saptanmıştır. Aday tesis konumlarından 2 (Buldan), 6 (Çardak), 7 (Baklan), 8 (Çivril), 11 (Serinhisar), 12 (Acıpayam), 13 (Acıpayam), 14 (Tavas), 15 (Tavas) ve 16 (Kale) çevrim tesisi kurulumu için uygun bulunmamıştır. Gübre üretiminde ise organik çöp kaynaklı atıkların daha fazla kullanıldığı, hayvansal atık kaynaklı hammaddelerin onu izlediği saptanmıştır.

Tedarik zinciri projelerinin karar süreçlerinde yatırımcıların daha net karşılaştırma yapabilmelerine olanak sağlamak için oldukça önemli faktörlerden olan YGDO ve geri ödeme süresi yöntemleri değerlendirme sürecinde sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürdeki uygulamalarda geri ödeme süresinin 3-15 yıl arasında değiştiği gözlemlenirken (Yılmaz Balaman 2014), YGDO’nun da mümkün olduğunca yüksek olması beklenmektedir. Olası yatırımcıların karar süreçlerini hızlandırmak için yıllık net nakit akışları incelenmiş ve projenin geri ödeme süresinin 2,14 yıl olduğu, YGDO’nun ise %117,522 olduğu belirlenmiştir. Söz konusu ölçütler literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında problem çözümünde oldukça iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu değerlere ulaşılmasında gübre satış

fiyatlarındaki artışın ve geliştirilen modelde birden fazla hammadde kaynağı kullanılmasının etkisi oldukça yüksektir.

Denizli ilinin biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımı iki farklı biyokütle kaynağını dikkate alan ve yıllık atık tahmin verilerini içeren MM yardımıyla IBM ILOG CPLEX Optimization Studio kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Beş yıllık planlama dönemi için toplam karın net bugünkü değerinin en büyüklenmesi amaçlanmış, kurulması gereken çevrim tesislerinin kapasiteleri, konumları, kuruluş, işletme maliyetleri, taşınması gereken hammadde miktarları, çevrimde kullanılan hammadde türleri, elektrik ve gübre üretim miktarları belirlenmiştir. Ağ tasarımında kullanılan MM daha sonraki bölümde karar destek sisteminde entegre edilmiş ve çeşitli ajanlar kullanılarak işlemlerin bütünlük bir biçimde yapılması sağlanmıştır.

#### **5.4 Karar Destek Sistemi Tasarımı**

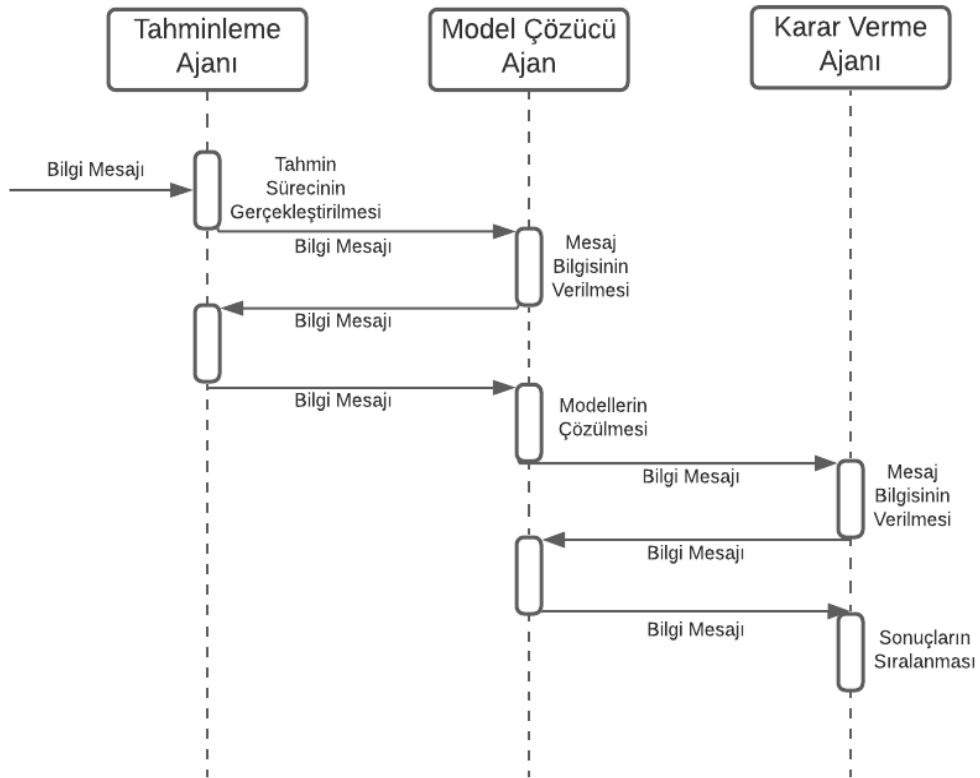
Bu aşamada daha önceki bölümlerde uygulanan yöntemler Java programlama dili kullanılarak birleştirilmiş ve biyokütle tedarik zinciri için ATM tabanlı bir karar destek sistemi geliştirilmiştir. CBS ve DEMATEL yöntemleriyle belirlenen çevrim tesislerinin kuruluşu için uygun noktalar bütünlük sistemde girdi olarak kullanılmıştır. Karar destek sisteminde gelecek yıllardaki hammadde tahminleri ilçeler bazında gerçekleştirilmiş ve ağ tasarım problemi matematiksel modelde kullanılan çeşitli parametrelerin alabileceği farklı değerler için oluşturulan senaryo yaklaşımları kullanılarak değerlendirilmiştir. Tahmin, tedarik zinciri ağ tasarımı ve çeşitli senaryoların değerlendirilmesinde, sistem bileşenlerinin arasındaki iletişimin yapılandırılmasını kolaylaştıran, daha koordineli ve etkin kararlar alınabilmesini ve karmaşık problemlerin hızlı bir biçimde modellenmesini sağlayan ATM yaklaşımı kullanılmıştır. Java programlama dilinde yazılan kodları çalıştırmak için Eclipse çalışma ortamı (JRE - Java Runtime Environment) kullanılmıştır.

Çeşitli ajanlar kullanılarak tahmin değerlerinin belirlendiği, matematiksel modelin çözdürüldüğü ve amaç fonksiyonundaki parametrelerin değiştirilmesi sonucunda oluşturulan farklı senaryoların değerlendirildiği bütünlük çözüm çerçevesi ile paranın zaman değerinin dikkate alınmasının yanı sıra YGDO'nun da çözüme dâhil edilmesi ile daha verimli seçimlerin yapılabilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca, ATM yaklaşımının kullanımı ile karar verme sürecinin daha bütünleşik, etkin ve yapılandırılmış olması sağlanmıştır. Bu sayede nispeten kısa sürede, sistem bileşenleri arasındaki iletişim de geliştirilerek, bütünleşik bir biçimde tahminler yapılmış, model çözdürülmüş ve senaryoların değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

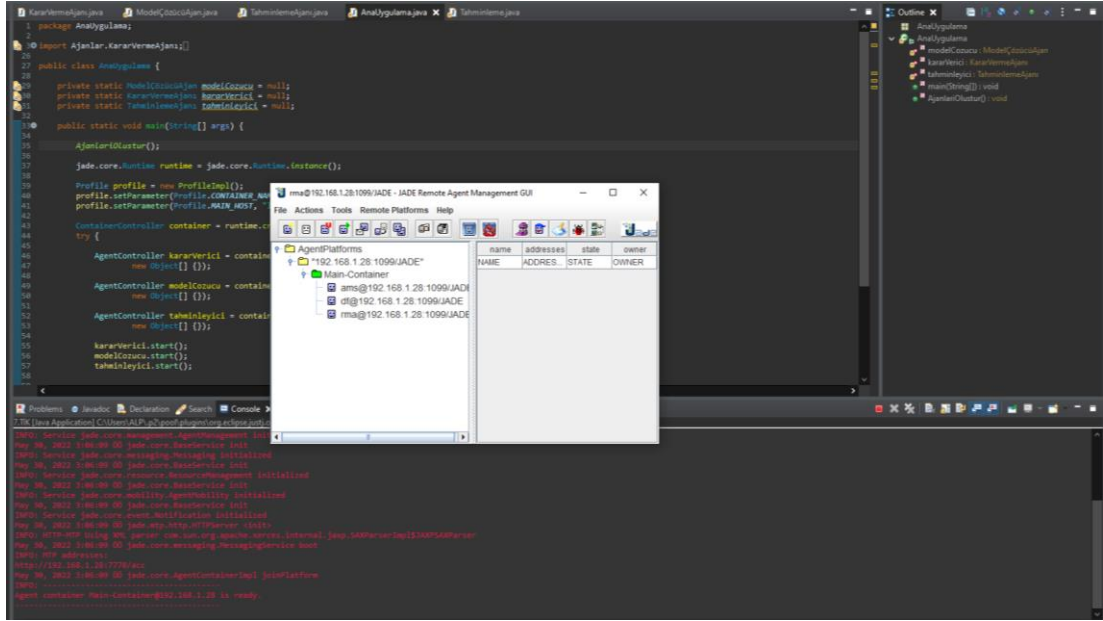
Uygulamada temel Java uygulamasının kodlandığı ana uygulama, sonuç değerlerinin yer aldığı sonuçlar paketi, ajanların yer aldığı ajanlar paketi, tahmin işleminin tanımlandığı tahmin paketi, organik atıklar ve hayvansal atıklar olmak üzere atıkların tahmin fonksiyonlarının yer aldığı atık tahmin paketleri olmak üzere altı adet Java paketi oluşturulmuştur. Tahmin sürecinden sorumlu olan ve elde edilen bilgileri model çözücü ajana gönderme görevi olan tahminleme ajanı, çeşitli faktör seviyelerine göre oluşturulan matematiksel modellerin çözümünden ve sonuçların karar verme ajanına gönderilmesinden sorumlu model çözücü ajan, elde edilen sonuçların karın net bugünkü değeri ve YGDO performans ölçütlerine göre sıralanmasından sorumlu karar verme ajanı olmak üzere üç adet ajan tanımlanmıştır.

Ajanlar arası iletişim şeması Şekil 5.4'te verilmiştir.



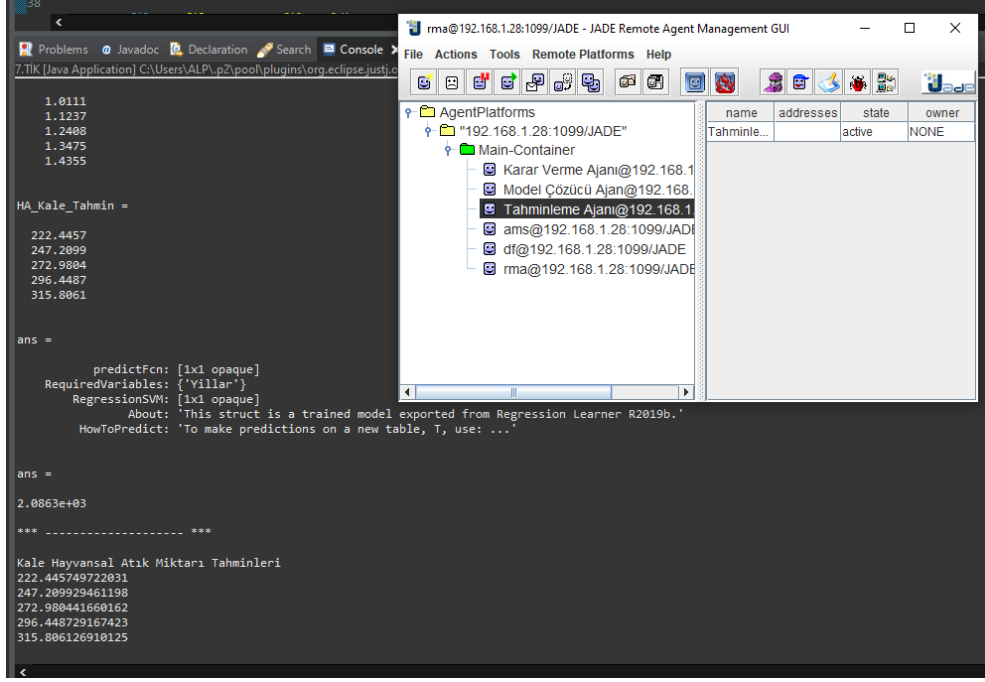
Şekil 5.4: Ajanlar arası iletişim şeması.

ATM yaklaşımının uygulamasında, öncelikle ana uygulama paketinde ajan sınıflarının, JADE arayüzünün, çalışmanın yapılacağı platformun ve ajanların içinde bulunacağı konteynerin sisteme tanıtımı gerçekleştirilmiştir. Söz konusu işlem Eclipse çalıştırma ortamı, JADE çoklu ajan geliştirme platformu ve Java programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulamanın başlatılmasıyla açılan JADE arayüzü ve ana uygulama kodları Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5: JADE arayüzü ve ana uygulama kodları.

Çalışmanın uygulama kısmında ilk olarak daha önceden MATLAB R2019b programı yardımıyla DVR kullanılarak gerçekleştirilen tahmin süreci Java programlama dili kullanılarak JADE çoklu ajan geliştirme platformuna aktarılmış ve sürecin tahminleme ajanı ile kontrol edilmesi sağlanmıştır. Bu noktada DVR kullanılarak, gelecek yıllarda ilçeler bazında elde edilebilecek hayvansal atık ve organik çöp tahminleri için ortalama hata kareleri köküne (root mean square error – RMSE) göre en iyi sonucu veren fonksiyonlar, kütüphaneler ve sınıflar Java çalıştırma ortamı olan Eclipse'e aktarılmış ve bütünleşik modelde kullanılmak üzere tahminleme ajanı oluşturulmuştur. Tahminleme ajanı kullanılarak, farklı atık türleri için ilçeler bazında oluşturulan tahmin paketlerinin içinde yer alan kodlar okunmakta ve tahmin işlemi gerçekleştirilmektedir. Söz konusu ajan aynı zamanda elde edilen tahmin değerlerinin ekrana ve .txt dosyalarına yazdırılmasından sorumludur. Tahmin süreci Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6: Tahmin süreci.

Denizli ilinin 19 ilçesi için beş yıllık hayvansal atık ve organik atık tahminleri elde edildikten sonra tahminleme ajanı model çözücü ajana bilgilendirici bir mesaj gönderir, ajanın çalışmasını ve gelen dosyaları okumasını sağlar. Model çözücü ajan amaç fonksiyonun çeşitli faktör seviyelerine göre (elektrik satış fiyatı: 2022 yılının ilk çeyrek fiyatı, ikinci çeyrek fiyatı ve tavan fiyatı; diğer parametrelerin %15 oranında azaltılması ve artırılması olmak üzere) oluşturulan matematiksel modelleri toplam karın net bugünkü değerinin en büyüklenmesi amacıyla IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Java uygulama programlama arayüzünü (application programming interface – API) kullanarak çözer. Tüm faktör seviyeleri için elde edilen toplam karın net bugünkü değerinin, kuruluş maliyetine bölünmesi ile elde edilen YGDO’yu da hesaplar. Söz konusu ajan elde edilen sonuçların ekrana ve .txt dosyalarına yazdırılmasından sorumludur. Modelleme işlemi bittikten sonra model çözücü ajan karar verici ajana çözüm sonuçlarını da içeren bilgilendirici bir mesaj gönderir. Model çözüm süreci Şekil 5.7’de verilmiştir.

```

Problems Javadoc Declaration Search Console X Debug
7.TIK [Java Application] C:\Users\ALP\p2\pool\plugins\org.eclipse.justi.openjdk.hotspot.jre.full.win32.x86_64_15.0.2.v20210201-0955\jre\bin\javaw.exe

predictFcn: [1x1 opaque]
RequiredVariables: {'Villar'}
RegressionSVM: [1x1 opaque]
  About: 'This struct is a trained model exported from Regression Learner R2019b.'
  HowToPredict: 'To make predictions on a new table, T, use: ...'

ans =

187.4840

*** ----- ***

Çameli Organik Atık Miktarı Tahminleri
2908.51784320094
2909.1840737045
2914.25182763762
2923.72110500029
2937.59190579256
*****
Mesaj Model Çözücü Ajana Ulaştı
Model Çözücü Ajan Çalışıyor
OPL - Development Mode. Use IloOplFactory.setDebugMode(false) to switch to production mode.
-----
M1.dat dosyası okunuyor
Amaç Fonksiyonu Değeri1: 3.4597694E7
Sonuç= 34597694
Kuruluş Maliyeti= 29439250
Yatırımın Geri Dönüş Oranı= 117.522
-----
M2.dat dosyası okunuyor
Amaç Fonksiyonu Değeri2: 2.3291733E7
Sonuç= 23291733
Kuruluş Maliyeti= 29439250
Yatırımın Geri Dönüş Oranı= 79.118
-----
M3.dat dosyası okunuyor
Amaç Fonksiyonu Değeri3: 4.5903112E7
Sonuç= 45903112
Kuruluş Maliyeti= 29439250
Yatırımın Geri Dönüş Oranı= 155.925
-----

```

Şekil 5.7: Model çözüm süreci.

Çalışmanın bu aşamasında amaç fonksiyonunu etkileyecek parametrelerin farklı değerleri kullanılarak çeşitli senaryolar oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan parametreler ve parametrelere ilişkin faktör seviyeleri Tablo 5.13'te, dört parametrenin üçer faktör seviyesine göre oluşturulan çeşitli senaryo yaklaşımları ise Tablo 5.14'te verilmiştir.

Tablo 5.13: Uygulamada kullanılan parametreler ve faktör seviyeleri.

Parametreler	Faktör Seviyeleri		
Elektrik satış fiyatı (€/kWh)	0,0575	0,0412	0,0811
Taşıma maliyeti (€/km)	0,065	0,05525	0,07475
İskonto oranı (%)	5,375	4,56875	6,18125
Gübre satış fiyatı (€/ton)	200	170	230

Tablo 5.14: Uygulamada çeşitli parametre değerlerine göre araştırılan senaryolar.

Kod	Elektrik satış fiyatı (€/kW)	Taşıma maliyeti (€/km)	İskonto oranı (%)	Gübre satış fiyatı (€/ton)
M1	0,0575	0,065	5,375	200
M2	0,0575	0,065	5,375	170
M3	0,0575	0,065	5,375	230
M4	0,0575	0,065	4,56875	200
M5	0,0575	0,065	4,56875	170



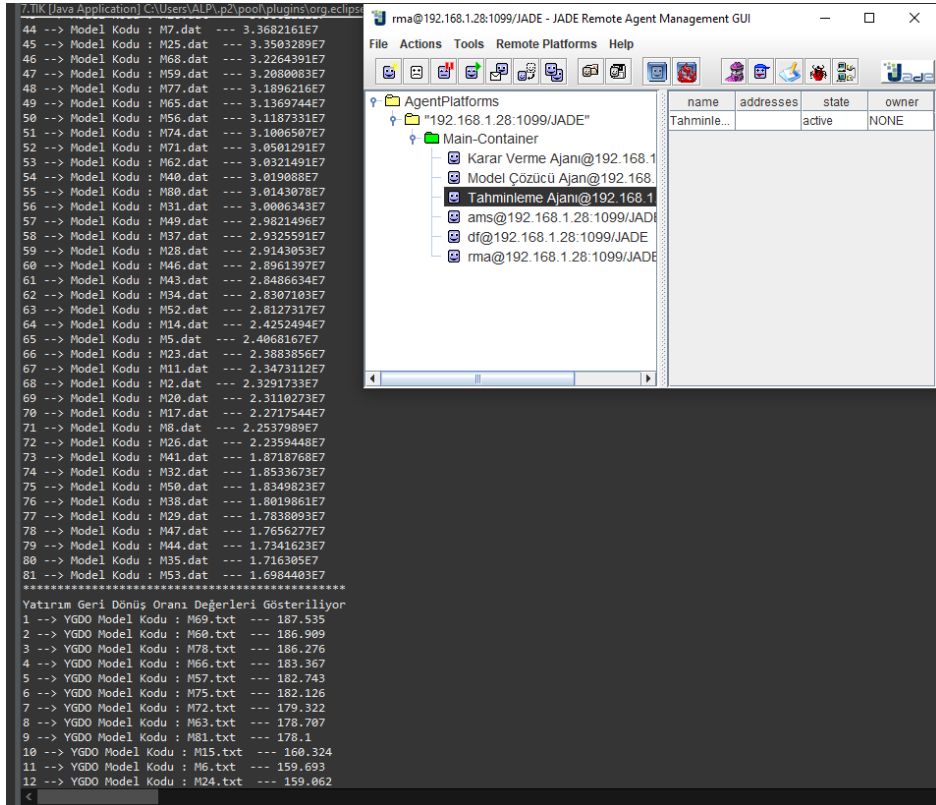
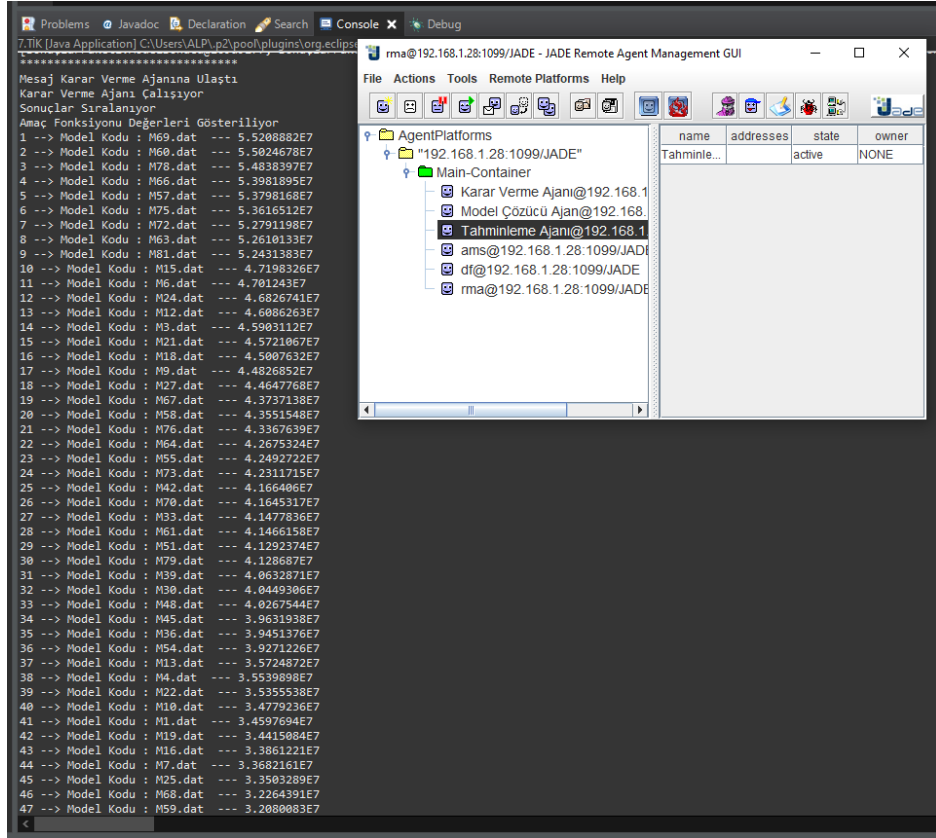
**Tablo 5.14:** Uygulamada çeşitli parametre değerlerine göre araştırılan senaryolar (devam).

<b>Kod</b>	<b>Elektrik satış fiyatı (€/kW)</b>	<b>Taşıma maliyeti (€/km)</b>	<b>İskonto oranı (%)</b>	<b>Gübre satış fiyatı (€/ton)</b>
M6	0,0575	0,065	4,56875	230
M7	0,0575	0,065	6,18125	200
M8	0,0575	0,065	6,18125	170
M9	0,0575	0,065	6,18125	230
M10	0,0575	0,05525	5,375	200
M11	0,0575	0,05525	5,375	170
M12	0,0575	0,05525	5,375	230
M13	0,0575	0,05525	4,56875	200
M14	0,0575	0,05525	4,56875	170
M15	0,0575	0,05525	4,56875	230
M16	0,0575	0,05525	6,18125	200
M17	0,0575	0,05525	6,18125	170
M18	0,0575	0,05525	6,18125	230
M19	0,0575	0,07475	5,375	200
M20	0,0575	0,07475	5,375	170
M21	0,0575	0,07475	5,375	230
M22	0,0575	0,07475	4,56875	200
M23	0,0575	0,07475	4,56875	170
M24	0,0575	0,07475	4,56875	230
M25	0,0575	0,07475	6,18125	200
M26	0,0575	0,07475	6,18125	170
M27	0,0575	0,07475	6,18125	230
M28	0,0412	0,065	5,375	200
M29	0,0412	0,065	5,375	170
M30	0,0412	0,065	5,375	230
M31	0,0412	0,065	4,56875	200
M32	0,0412	0,065	4,56875	170
M33	0,0412	0,065	4,56875	230
M34	0,0412	0,065	6,18125	200
M35	0,0412	0,065	6,18125	170
M36	0,0412	0,065	6,18125	230
M37	0,0412	0,05525	5,375	200
M38	0,0412	0,05525	5,375	170
M39	0,0412	0,05525	5,375	230
M40	0,0412	0,05525	4,56875	200
M41	0,0412	0,05525	4,56875	170
M42	0,0412	0,05525	4,56875	230
M43	0,0412	0,05525	6,18125	200
M44	0,0412	0,05525	6,18125	170
M45	0,0412	0,05525	6,18125	230
M46	0,0412	0,07475	5,375	200
M47	0,0412	0,07475	5,375	170
M48	0,0412	0,07475	5,375	230
M49	0,0412	0,07475	4,56875	200
M50	0,0412	0,07475	4,56875	170
M51	0,0412	0,07475	4,56875	230

**Tablo 5.14:** Uygulamada çeşitli parametre değerlerine göre araştırılan senaryolar (devam).

<b>Kod</b>	<b>Elektrik satış fiyatı (€/kW)</b>	<b>Taşıma maliyeti (€/km)</b>	<b>İskonto oranı (%)</b>	<b>Gübre satış fiyatı (€/ton)</b>
M52	0,0412	0,07475	6,18125	200
M53	0,0412	0,07475	6,18125	170
M54	0,0412	0,07475	6,18125	230
M55	0,0811	0,065	5,375	200
M56	0,0811	0,065	5,375	170
M57	0,0811	0,065	5,375	230
M58	0,0811	0,065	4,56875	200
M59	0,0811	0,065	4,56875	170
M60	0,0811	0,065	4,56875	230
M61	0,0811	0,065	6,18125	200
M62	0,0811	0,065	6,18125	170
M63	0,0811	0,065	6,18125	230
M64	0,0811	0,05525	5,375	200
M65	0,0811	0,05525	5,375	170
M66	0,0811	0,05525	5,375	230
M67	0,0811	0,05525	4,56875	200
M68	0,0811	0,05525	4,56875	170
M69	0,0811	0,05525	4,56875	230
M70	0,0811	0,05525	6,18125	200
M71	0,0811	0,05525	6,18125	170
M72	0,0811	0,05525	6,18125	230
M73	0,0811	0,07475	5,375	200
M74	0,0811	0,07475	5,375	170
M75	0,0811	0,07475	5,375	230
M76	0,0811	0,07475	4,56875	200
M77	0,0811	0,07475	4,56875	170
M78	0,0811	0,07475	4,56875	230
M79	0,0811	0,07475	6,18125	200
M80	0,0811	0,07475	6,18125	170
M81	0,0811	0,07475	6,18125	230

Önerilen bütünleşik yaklaşımın son aşamasında karar verici ajan tarafından model sonuçları model çözücü ajandan alınır ve tüm senaryolar iki farklı değerlendirme kriterine göre (toplam karın net bugünkü değeri ve YGDO) en iyiden en kötüye doğru Şekil 5.8’de gösterildiği biçimde sıralanır.



Şekil 5.8: Karar verme süreci.

Biyokütle tedarik zinciri tasarımı için önerilen karar destek sisteminin probleme uygulanması sonucunda elde edilen, çeşitli senaryoların toplam karının net bugünkü değerlerinin ve YGDO'larının sıralamaları Tablo 5.15'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.15:** Uygulama sonucunda net bugünkü değere ve yatırımın geri dönüş oranına göre elde edilen sıralamalar.

NBD Sıra No	Kod	Elektrik satış fiyatı (€/kW)	Taşıma maliyeti (€/km)	İskonto oranı (%)	Gübre satış fiyatı (€/ton)	Amaç Fonksiyonu Değeri (€)	Geri Ödeme Süresi (yıl)	YGDO (%)	YGDO Sıra No
1	M69	0,0811	0,05525	4,56875	230	55.208.882	1,620	187,535	1
2	M60	0,0811	0,065	4,56875	230	55.024.678	1,624	186,909	2
3	M78	0,0811	0,07475	4,56875	230	54.838.397	1,627	186,276	3
4	M66	0,0811	0,05525	5,375	230	53.981.895	1,625	183,367	4
5	M57	0,0811	0,065	5,375	230	53.798.168	1,628	182,743	5
6	M75	0,0811	0,07475	5,375	230	53.616.512	1,632	182,126	6
7	M72	0,0811	0,05525	6,18125	230	52.791.198	1,629	179,322	7
8	M63	0,0811	0,065	6,18125	230	52.610.133	1,633	178,707	8
9	M81	0,0811	0,07475	6,18125	230	52.431.383	1,637	178,100	9
10	M15	0,0575	0,05525	4,56875	230	47.198.326	1,794	160,324	10
11	M6	0,0575	0,065	4,56875	230	47.012.430	1,798	159,693	11
12	M24	0,0575	0,07475	4,56875	230	46.826.741	1,803	159,062	12
13	M12	0,0575	0,05525	5,375	230	46.086.263	1,800	156,547	13
14	M3	0,0575	0,065	5,375	230	45.903.112	1,805	155,925	14
15	M21	0,0575	0,07475	5,375	230	45.721.067	1,809	155,306	15
16	M18	0,0575	0,05525	6,18125	230	45.007.632	1,806	152,883	16
17	M9	0,0575	0,065	6,18125	230	44.826.852	1,811	152,269	17
18	M27	0,0575	0,07475	6,18125	230	44.647.768	1,815	151,661	18
19	M67	0,0811	0,05525	4,56875	200	43.737.138	1,881	148,567	19
20	M58	0,0811	0,065	4,56875	200	43.551.548	1,886	147,937	20
21	M76	0,0811	0,07475	4,56875	200	43.367.639	1,891	147,312	21
22	M64	0,0811	0,05525	5,375	200	42.675.324	1,888	144,961	22
23	M55	0,0811	0,065	5,375	200	42.492.722	1,893	144,340	23
24	M73	0,0811	0,07475	5,375	200	42.311.715	1,898	143,726	24
25	M42	0,0412	0,05525	4,56875	230	41.664.060	1,937	141,526	25

**Tablo 5.15:** Uygulama sonucunda net bugünkü değere ve yatırımın geri dönüş oranına göre elde edilen sıralamalar (devam).

NBD Sıra No	Kod	Elektrik satış fiyatı (€/kW)	Taşıma maliyeti (€/km)	İskonto oranı (%)	Gübre satış fiyatı (€/ton)	Amaç Fonksiyonu Değeri (€)	Geri Ödeme Süresi (yıl)	YGDO (%)	YGDO Sıra No
26	M70	0,0811	0,05525	6,18125	200	41.645.317	1,895	141,462	26
27	M33	0,0412	0,065	4,56875	230	41.477.836	1,942	140,893	27
28	M61	0,0811	0,065	6,18125	200	41.466.158	1,900	140,853	28
29	M51	0,0412	0,07475	4,56875	230	41.292.374	1,948	140,263	29
30	M79	0,0811	0,07475	6,18125	200	41.286.870	1,905	140,244	30
31	M39	0,0412	0,05525	5,375	230	40.632.871	1,944	138,023	31
32	M30	0,0412	0,065	5,375	230	40.449.306	1,950	137,399	32
33	M48	0,0412	0,07475	5,375	230	40.267.544	1,955	136,782	33
34	M45	0,0412	0,05525	6,18125	230	39.631.938	1,952	134,623	34
35	M36	0,0412	0,065	6,18125	230	39.451.376	1,957	134,009	35
36	M54	0,0412	0,07475	6,18125	230	39.271.226	1,962	133,398	36
37	M13	0,0575	0,05525	4,56875	200	35.724.872	2,123	121,351	37
38	M4	0,0575	0,065	4,56875	200	35.539.898	2,130	120,723	38
39	M22	0,0575	0,07475	4,56875	200	35.355.538	2,136	120,097	39
40	M10	0,0575	0,05525	5,375	200	34.779.236	2,133	118,139	40
41	M1	0,0575	0,065	5,375	200	34.597.694	2,140	117,522	41
42	M19	0,0575	0,07475	5,375	200	34.415.084	2,147	116,902	42
43	M16	0,0575	0,05525	6,18125	200	33.861.221	2,144	115,021	43
44	M7	0,0575	0,065	6,18125	200	33.682.161	2,150	114,412	44
45	M25	0,0575	0,07475	6,18125	200	33.503.289	2,157	113,805	45
46	M68	0,0811	0,05525	4,56875	170	32.264.391	2,250	109,597	46
47	M59	0,0811	0,065	4,56875	170	32.080.083	2,257	108,970	47
48	M77	0,0811	0,07475	4,56875	170	31.896.216	2,264	108,346	48
49	M65	0,0811	0,05525	5,375	170	31.369.744	2,262	106,558	49
50	M56	0,0811	0,065	5,375	170	31.187.331	2,270	105,938	50
51	M74	0,0811	0,07475	5,375	170	31.006.507	2,277	105,324	51
52	M71	0,0811	0,05525	6,18125	170	30.501.291	2,275	103,608	52
53	M62	0,0811	0,065	6,18125	170	30.321.491	2,282	102,997	53
54	M40	0,0412	0,05525	4,56875	200	30.190.880	2,333	102,553	54
55	M80	0,0811	0,07475	6,18125	170	30.143.078	2,289	102,391	55

**Tablo 5.15:** Uygulama sonucunda net bugünkü değere ve yatırımın geri dönüş oranına göre elde edilen sıralamalar (devam).

NBD Sıra No	Kod	Elektrik satış fiyatı (€/kW)	Taşıma maliyeti (€/km)	İskonto oranı (%)	Gübre satış fiyatı (€/ton)	Amaç Fonksiyonu Değeri (€)	Geri Ödeme Süresi (yıl)	YGDO (%)	YGDO Sıra No
56	M31	0,0412	0,065	4,56875	200	30.006.343	2,341	101,926	56
57	M49	0,0412	0,07475	4,56875	200	29.821.496	2,348	101,298	57
58	M37	0,0412	0,05525	5,375	200	29.325.591	2,347	99,614	58
59	M28	0,0412	0,065	5,375	200	29.143.053	2,354	98,994	59
60	M46	0,0412	0,07475	5,375	200	28.961.397	2,362	98,377	60
61	M43	0,0412	0,05525	6,18125	200	28.486.634	2,360	96,764	61
62	M34	0,0412	0,065	6,18125	200	28.307.103	2,368	96,154	62
63	M52	0,0412	0,07475	6,18125	200	28.127.317	2,376	95,544	63
64	M14	0,0575	0,05525	4,56875	170	24.252.494	2,607	82,381	64
65	M5	0,0575	0,065	4,56875	170	24.068.167	2,616	81,755	65
66	M23	0,0575	0,07475	4,56875	170	23.883.856	2,626	81,129	66
67	M11	0,0575	0,05525	5,375	170	23.473.112	2,624	79,734	67
68	M2	0,0575	0,065	5,375	170	23.291.733	2,634	79,118	68
69	M20	0,0575	0,07475	5,375	170	23.110.273	2,644	78,502	69
70	M17	0,0575	0,05525	6,18125	170	22.717.544	2,642	77,167	70
71	M8	0,0575	0,065	6,18125	170	22.537.989	2,652	76,558	71
72	M26	0,0575	0,07475	6,18125	170	22.359.448	2,662	75,951	72
73	M41	0,0412	0,05525	4,56875	170	18.718.768	2,922	63,584	73
74	M32	0,0412	0,065	4,56875	170	18.533.673	2,934	62,956	74
75	M50	0,0412	0,07475	4,56875	170	18.349.823	2,946	62,331	75
76	M38	0,0412	0,05525	5,375	170	18.019.861	2,945	61,210	77
77	M29	0,0412	0,065	5,375	170	17.838.093	2,957	60,593	78
78	M47	0,0412	0,07475	5,375	170	17.656.277	2,969	59,975	79
79	M44	0,0412	0,05525	6,18125	170	17.341.623	2,968	58,906	80
80	M35	0,0412	0,065	6,18125	170	17.163.050	2,980	58,300	81
81	M53	0,0412	0,07475	6,18125	170	16.984.403	2,910	61,919	76

Tabloda görüldüğü üzere, hem en yüksek toplam karın net bugünkü değerine hem de en yüksek YDGO'ya sahip faktör seviyesi kombinasyonu elektrik satış fiyatı, gübre satış fiyatının en yüksek, taşıma maliyeti, iskonto oranının en düşük olduğu M69 kodlu senaryodur. Toplam karın net bugünkü değeri ve YDGO kriterlerine göre

senaryolar incelendiğinde ikinci en iyi sonuç elektrik satış fiyatı, gübre satış fiyatının en yüksek, taşıma maliyetinin ikinci seviyede, iskonto oranının en düşük olduğu M60 kodlu durumda elde edilmiştir. En iyi üçüncü değer ise elektrik satış fiyatı, gübre satış fiyatının en yüksek, taşıma maliyeti, iskonto oranının en düşük olduğu M78 kodlu durumda elde edilmiştir. Sonraki en iyi amaç fonksiyonu ve YGDO değeri, M66 kodlu; elektrik satış fiyatı, gübre satış fiyatının en yüksek, taşıma maliyetinin en düşük, iskonto oranının ise ikinci seviyede olduğu senaryodur.

En kötü amaç fonksiyonu değerine bakıldığında ise elektrik satış fiyatı, gübre satış fiyatının en düşük, taşıma maliyeti, iskonto oranının en yüksek olduğu M53 senaryosu karşımıza çıkmaktadır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken söz konusu senaryonun toplam karın net bugünkü değeri kriterine göre en sonda olmasına rağmen YGDO'ya göre 76. sırada yer almasıdır.

Farklı performans ölçütlerine göre sıralamalar dikkate alındığında oluşturulan senaryoların amaç fonksiyonu değerlerinin gübre satış fiyatına oldukça bağımlı olduğu, söz konusu parametreyi sırasıyla elektrik satış fiyatının, iskonto oranının ve taşıma maliyetinin izlediği belirlenmiştir.

Senaryolar geri ödeme sürelerine göre incelendiğinde ise en kısa geri ödeme süresine sahip senaryonun M69 olduğu, bu senaryoyu M60 ve M66 kodlu senaryoların izlediği belirlenmiştir. En iyi 10 geri ödeme süresine sahip senaryonun sıralamaları, en iyi 10 amaç fonksiyonu ve YGDO sıralamaları ile karşılaştırıldığında 4 farklı sıralama değerinin bulunduğu saptanmıştır. Bu farklılığın sebebi net bugünkü değer parametresindeki değişikliklerin yıllık nakit akışlarını etkilemesidir.

Uygulama alanı ve değerlendirilen faktör seviyeleri dikkate alındığında en yüksek amaç fonksiyonu değerine elektrik ve gübre satış fiyatlarının en yüksek, iskonto oranı ve taşıma maliyetinin en düşük olduğu senaryoda ulaşılması beklenen bir durumdur. Ayrıca parametre değerlerinde nispeten küçük değişiklikler yapıldığı için kurulması gereken çevrim tesisi sayısının ve büyüklüklerinin çoğunlukla değişmediği ve bu duruma bağlı olarak amaç fonksiyonu değerinin ve YGDO'nun genellikle paralel seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. Problemin parametre değerlerinin faktör seviyelerinde meydana gelen daha büyük değişimlerde, kurulan tesis sayısının ve kapasitelerinin farklılaşması sonucunda toplam karın net bugünkü

değeri ve YGDO performans ölçütlerine göre senaryo sıralamalarında daha bariz değişikliklerin meydana gelmesi oldukça olasıdır.

### 5.5 Bölüm Özeti

Bu bölümde biyokütle tedarik zinciri için bir karar destek sistemi tasarımı ATM tabanlı bütünleşik bir yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dördüncü bölümde detaylı olarak açıklanan çözüm yaklaşımı Denizli iline uygulanmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışmada, öncelikle CBS ve DEMATEL yöntemleri kullanılarak biyoenerji çevrim tesislerinin kurulması için aday noktalar belirlenmiştir. Kuruluş yeri uygunluk analizi sonucunda saptanan 16 adet uygun nokta sonraki aşamalarda girdi olarak kullanılmıştır. Karar destek sisteminde tahminleme, model çözücü ve karar verme ajanları kullanılarak iki farklı biyokütle kaynağının gelecek beş yıldaki tahminleri belirlenmiş, taşıma, hammadde seçimi, kurulum, kapasite, konum, elektrik ve kompost üretim kararlarını içeren matematiksel modellerin çözümü gerçekleştirilmiş, çeşitli parametre değerlerinin farklı değerleri için oluşturulan 81 adet senaryo toplam karın net bugünkü değeri ve YGDO kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. Toplam karın net bugünkü değeri ve YGDO performans ölçütlerine göre en iyi senaryo; elektrik satış fiyatı ve gübre satış fiyatının en yüksek, taşıma maliyeti ve iskonto oranının ise en düşük olduğu M69 kodlu, projenin geri ödeme süresinin 1,62 yıl olarak hesaplandığı senaryodur.

Sonraki bölümde yapılan tez çalışması sonucunda elde edilen bulgular, literatüre yapılan net katkı ve karar destek sisteminin geliştirilmeye açık yönleri belirtilerek gelecek çalışmalar için öneriler detaylı olarak açıklanmıştır.



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1 Genel Değerlendirme

Dünyanın nüfusunun ve insanların konfor ihtiyaçlarının artması nedeniyle her geçen gün enerji ihtiyacı artmakta, buna paralel olarak yeni enerji kaynakları, çeşitli çevrim yöntemleri, enerji kaynaklarının daha etkin biçimde taşınmasını sağlayan tedarik zinciri tasarımları ortaya çıkmaktadır. Artan enerji ihtiyacının temiz ve sürdürülebilir bir biçimde karşılanabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar fazlalaşmaktadır. Ülkemizde de daha temiz, çevreye karşı zararın minimize edildiği enerji üretimini sağlayabilmek için biyokütle kaynaklarının enerji üretiminde kullanımı artmakta ve her yıl yeni dönüşüm tesisleri devreye alınmaktadır.

Teknolojik gelişmeler ve bilgisayarların hayatımızın her anında sıklıkla kullanılması sonucu daha küçük ve daha hızlı işlemciler, çeşitli yapay zekâ uygulamaları, kendi kendini yönetebilen sistemler hızla gelişim göstermektedir. Bunun sonucunda karmaşık problemlerin hızlı bir biçimde çözülebilmesi, kompleks sistemlerin iç ve dış dinamiklerinin modellenmesi, daha etkin tahmin sonuçlarına ulaşılabilmesi sağlanabilmektedir. Günümüzde yapay zekâ, makine öğrenmesi, dağıtık sistemler bilimin her alanında ön plana çıkmakta ve hızla gelişim göstermektedir.

Yukarıda belirtilen çıkarımlar ışığında, tez çalışmasında, biyokütle tedarik zinciri sistemi tasarımı için yapay zekâ tabanlı bütünlük bir karar destek sistemi önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda çevrim tesislerinin kuruluş yeri için uygunluk analizi, mekânsal verilerin kullanımının yanı sıra uzman görüşleri ile ekonomik, sosyal, çevresel kriterlerin de dikkate alındığı CBS-DEMATEL yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Tedarikçiler arasındaki ilişkilerin oldukça yakın olduğu ve bilgi paylaşımının üst düzeyde olmasının daha da önem kazandığı bir sektör olan enerji sektöründe

yapılandırılmış iletişim ve karar verme süreçlerinin hızlı bir biçimde gerçekleştirilmesini sağlayan ATM yöntemi çalışmada tedarik zinciri ağ tasarımı ve çeşitli senaryoların karşılaştırılmasında karar destek sistemi olarak görev yapmaktadır. JADE platformu ve Java programlama dili kullanılarak oluşturulan ajanlar yardımıyla çeşitli biyokütle kaynaklarının gelecek yıllardaki miktarları yapay zekâ tabanlı bir yöntem olan DVR ile tahmin edilmiştir. Literatürde biyoenerji ağ tasarımı çalışmalarında hammadde tahmininin oldukça nadir olduğu gözlemlenirken DVR yönteminin hiçbir çalışmada kullanılmadığı belirlenmiştir. Bu yönüyle çalışma özgün nitelik taşımaktadır. Literatürden çalışmanın ayrıldığı bir diğer nokta ise çalışmada birden fazla hammaddenin biyoenerji üretiminde kullanıldığı, taşıma, kurulum, işletme ve biyokütle alım maliyetlerinin paranın zaman değerinin de dikkate alınarak hesaplandığı çok dönemli bir MM ile sistem tasarımı gerçekleştirilmiş olması ve modelin farklı ölçütlere göre en karlı parametre seviyelerini ajanlar kullanarak belirlemesidir.

Çalışmada, karar verme sürecindeki belirsizliklerin dikkate alındığı ve nispeten hızlı bir biçimde sonuca ulaşan yapay zekâ tabanlı bir karar destek sistemi önerilmiştir. Önerilen çerçeve farklı problemlere kolaylıkla uygulanabilir, bütünleşik yaklaşımı oluşturan bileşenler farklılaştırılıp çeşitli sorunlara çözüm aranabilir.

## 6.2 Bulgular

Tez çalışması sonucunda elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Ülkemizde ve dünyada artan enerji ihtiyacını karşılamada yenilenebilir enerji kaynaklarının payı her geçen gün artmaktadır.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının tasarımı ve yönetimi için literatürde bütünleşik bir çözüm yaklaşımının eksikliği bulunmaktadır.
- CBS ve ÇKKV tesis kuruluş yeri seçiminde mekânsal analizlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Topografik olarak kesin bilgilerin etkin karar verme metotları ile birleşimi sonucunda oldukça iyi sonuçlar alınabilmektedir.

- Yapay zekâ tabanlı yöntemler tahmin süreçlerinde oldukça tutarlı sonuçlar üretebilmektedir.
- Biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımı net bugünkü değer kullanımını paranın zaman değerinin dikkate alınmasını sağlayıp daha tutarlı kararlar verilebilmesine imkân vermektedir.
- ATM tabanlı karar destek sistemi, ağ tasarımı stratejik kararların yapılandırılmış bir biçimde daha kısa sürede ve etkin bir biçimde alınmasını sağlayabilmektedir.
- Uygulama alanında biyokütle tedarik zinciri ağ tasarımı için çeşitli parametrelerin farklı faktör seviyelerine göre oluşturulan senaryolar sırasıyla gübre satış fiyatına, elektrik satış fiyatına, iskonto oranına ve taşıma maliyetine bağlıdır.

### 6.3 Tezin Literatüre Katkıları

Yapılan çalışmanın literatüre sağlayabileceği katkılar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Biyokütle tedarik zinciri tasarımının ana aşamalarına odaklanan kapsamlı ve detaylı bir literatür taraması yapılmış, literatürdeki eksik noktalar belirlenmiştir.
- Ülkemizin enerjide dışa bağımlılığını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına dayalı sistematik bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir.
- Biyokütle tedarik zincirinin temel süreçlerinden biyokütle kaynaklarının tahminini içeren nadir çalışmalardan, bu süreci yapay zekâ tabanlı bir yöntem olan DVR ile gerçekleştiren ilk çalışmalardandır.
- Biyokütleden enerji eldesinin verimli bir biçimde planlanması sürecinde birden fazla biyokütle kaynağı dikkate alınmıştır. Birden fazla hammadde kullanımı ile sistemin beslenmesinde esneklik sağlanması ve olası risklerin azaltılması amaçlanmıştır.

- Ülkemizde biyokütle tedarik zinciri tasarımında aday çevrim tesislerinin konumlarının belirlenmesinde CBS-DEMATEL yaklaşımını kullanan ilk çalışmalardandır.
- ATM, düzenli bilgiye ulaşma sürecindeki avantajları, stratejik kararların daha yapılandırılmış ve hızlı bir biçimde alınabilmesini sağlaması nedeniyle önerilen karar destek sisteminde yapı taşı olarak kullanılmıştır.
- Biyoenerji sisteminin tasarlanması için çözüm yaklaşımı olarak CBS-DEMATEL ve ATM tabanlı DVR-MM kullanılmıştır. Çalışmanın bu yönüyle literatüre metodolojik olarak katkı sunduğu düşünülmektedir.

#### 6.4 Gelecekte Yapılabilecek Çalışma Önerileri

Bu tez çalışmasının kapsamı dikkate alınarak bu alanda yapılabilecek olan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

- Çevrim tesislerinin uygunluk analizi için farklı ÇKKV yöntemleri kullanılabilir, elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Çeşitli uygulama alanları için verilerin yapısına uygun olarak rastgele ormanlar veya YSA gibi farklı tahmin yöntemleri kullanılabilir.
- Tahminleme ajanı, model çözücü ajan ve karar verme ajanı olarak belirlenen ajanların sayısı artırılabilir veya tedarik zincirindeki çeşitli işlemlere göre biyokütle hammadde seçim ajanı, taşıma ajanı, tesiste dönüşüm ajanı şeklinde değiştirilebilir.
- Matematiksel modelin çözümünde bulanık mantıktan faydalanılabilir. Bu sayede talep dalgalanmaları, fiyat belirsizlikleri ve iskonto oranındaki değişiklikler daha iyi modellenebilir ve kesin olmayan veriler karar sürecine dahil edilebilir.
- Senaryo sayısının fazla olduğu veya sistem karmaşıklığının arttığı problemlerde çözüm için sezgisel bir yöntem karar verme sürecine dahil edilebilir.
- Farklı biyokütle kaynaklarıyla günlük olarak beslenen bir biyoenerji sisteminin gelecek yıllardaki durumu ajan tabanlı simülasyon

yöntemiyle modellenebilir, bu sayede depolama miktarı, gelir ve gider dengeleri simüle edilebilir.

- Önerilen bütünleşik yaklaşım çeşitli yenilenebilir enerji sistemleri ile entegre edilebilir. Bu sayede anlık elektrik ihtiyacının karşılanmasında oldukça yüksek esnekliğe ulaşılabilir ve enerji talebinin karşılanmasında meydana gelebilecek riskler azaltılabilir. Örneğin; uygulama alanında halihazırda kullanılan jeotermal enerji, rüzgâr veya güneş enerjisi ile biyoenerji sistemleri bütünleşik olarak tasarlanabilir.

## 7. KAYNAKLAR

Aalto, M., Raghu, K. C., Korpinen, O. J., Karttunen, K. and Ranta, T., “Modeling of biomass supply system by combining computational methods – A review article”, *Appl. Energy*, 243, 145-154, (2019).

Acı, M., Avcı, M., ve Acı, Ç. “Destek vektör regresyonu yöntemiyle karbon nanotüp benzetim süresinin kısaltılması”, *J. Fac. Eng. Archit. Gazi U.*, 32 (3), 901-907, (2017).

Adams, P., Bridgwater, T., Lea-Langton, A., Ross, A. and Watson, I., “Biomass Conversion Technologies”, (eds: P. Thornley and P. Adams), *Greenhouse gas balances of bioenergy systems*, London: Academic Press, 107-139, (2018).

Aden, A., Ruth, M., Ibsen, K., Jechura, J., Neeves, K., Sheehan, J., Wallace, B., Montague, L., Slayton, A., and Lukas, J. “Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover”, Technical report, NREL/TP-510-32438. National Renewable Energy Laboratory, (2002).

Afkhami, P., and Zarrinpoor, N., “Location assessment of jatropha cultivation for biofuel production in Fars Province, Iran: A hybrid GIS-based fuzzy multi-criteria framework”, *Waste Biomass Valori.*, (Baskıda) (2022).

Ahmadvand, S., Khadivi, M., Arora, R. and Sowlati, T., “Bi-objective optimization of forest-based biomass supply chains for minimization of costs and deviations from safety stock”, *Energy Convers. Manage.* X, 11, 100101, (2021).

Akgül, A. and Ulusam Seçkiner, S., “Optimization of biomass to bioenergy supply chain with tri-generation and district heating and cooling network systems”, *Comput. Ind. Eng.*, 137, 106017, (2019).

Akhtari, S., Sowlati, T. and Day, K., “Optimal flow of regional forest biomass to a district heating system”, *Int. J. Energy Res.*, 38, 954–964, (2014).

Albabsheh, N. T. and Stamm, J. L. H., “Optimization of lignocellulosic biomass-to-biofuel supply chains with densification: Literature review”, *Biomass Bioenerg.*, 144, 105888, (2021).

Allen, J., Browne, M., Hunter, A., Boyd, J. and Palmer, H., “Logistics management and costs of biomass fuel supply”, *Int. J. Phys. Distrib.*, 28 (6), 463-477, (1998).

Alvarez-de Prado, L., De Simón-Martín, M., Díez-Suárez, A.-M., Blanes-Peiró, J. J., and González-Martínez, A., “Optimal sizing and location of co-digestion power plants in Spain through a GIS-based approach”, *Environments*, 5, 137, (2018).

Amasyalı, K., and El-Gohary, N. M., “A review of data-driven building energy consumption prediction studies”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 81, 1192-1205, (2018).

Ankathi, S., Watkins, D., Sreedhara, P., Zuhlke, J., and Shonnard, D. R., “GIS-integrated optimization for locating food waste and manure anaerobic co-digestion facilities”, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 9 (11), 4024-4032, (2021).

Aro, E. M., “From first generation biofuels to advanced solar biofuels”, *Ambio*, 45 (1), 24-31, (2016).

Arroyo M., F. R. and Miguel, L. J., “The Role of Renewable Energies for the Sustainable Energy Governance and Environmental Policies for the Mitigation of Climate Change in Ecuador”, *Energies*, 13, 3883, (2020).

Arslankaya, S., ve Göraltay, K., *Çok kriterli karar verme yöntemlerinde güncel yaklaşımlar*, Ankara: İKSAD Yayınevi, 36-40, (2019).

Ateşoğlu, A., “Havza çalışmalarında kullanılan CORINE 2006 arazi sınıflandırma verilerinin doğruluğunun araştırılması”, *J. Fac. For. İstanbul U.*, 66 (1), 173-183, (2016).

Avcıoğlu, A. O., Dayıoğlu, M. A. and Türker, U., “Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey”, *Renew. Energy*, 138, 610–619, (2019).

Awudu, I. and Zhang, J., “Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 16, 1359-1368, (2012).

Ba, B. H., Prins, C. and Prodhon, C., “Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains: An Operations Research perspective”, *Renew. Energy*, 87, 977-989, (2016).

Baller, R., Fontaine, P., Minner, S., and Lai, Z., “Optimizing automotive inbound logistics: A mixed-integer linear programming approach”, *Transport. Res. E: Logist. Transport. Rev.*, 163, 102734, (2022).

Başkaya, Z., *Bulanık Doğrusal Programlama*, Bursa: Ekin Basım Yayın Dağıtım, (2011).

Bellifemine, F., Caire, G. and Greenwood, D., *Developing Multi-Agent Systems with JADE*, London, UK, John Wiley & Sons Ltd, (2007).

Bellifemine, F., Caire, G., Trucco, T. and Rimassa, G., *JADE Programmer's Guide*, Telecom Italia Lab., (2010).

Biberacher, M., Tum, M., Günther, K. P., Gadocha, S., Zeil, P., Jilani, R., and Mansha, M., “Availability assessment of bioenergy and power plant location optimization: A case study for Pakistan”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 42, 700-711, (2015).

Boruff, B. J., Moheimani, N. R., and Borowitzka, M. A., “Identifying locations for large-scale microalgae cultivation in Western Australia: A GIS approach”, *Appl. Energy*, 149, 379-391, (2015).

Brahma, A., Saikia, K., Hiloidhari, M. and Baruah, D. C., “GIS based planning of a biomethanation power plant in Assam, India”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 62, 596–608, (2016).

Bravo-Fritz, C. P., Saez-Navarrete, C. A., Zeppelin, L. A. H. and Cea, R. G., “Site selection for microalgae farming on an industrial scale in Chile”, *Algal Res.*, 11, 343-349, (2015).

Caire, G., *JADE Tutorial JADE Programming for Beginners*, Telecom Italia Lab., (2009).

Cardoza, D., Romero, I., Martínez, T., Ruiz, E., Gallego, F. J., López-Linares, J. C., Manzanares, P., and Castro, E., “Location of biorefineries based on olive-derived biomass in Andalusia, Spain”, *Energies*, 14, 3052, (2021).

Castillo-Villar, K. K., “Metaheuristic algorithms applied to bioenergy supply chain problems: Theory, review, challenges, and future”, *Energies*, 7, 7640-7672, (2014).

CBS Akademi, “Coğrafi uygulamalarda veri sunum metodolojisi [online]”, (11 June 2020), <https://cbsakademi.ibb.istanbul/cografi-uygulamalarda-veri-sunum-metodolojisi/>, (2016).



Chen, X. “Economic potential of biomass supply from crop residues in China”, *Appl. Energy*, 166, 141–149, (2016).

Chiew, Y. L., Iwata, T. and Shimada, S., “System analysis for effective use of palm oil waste as energy resources”, *Biomass Bioenerg.*, 35 (7), 2925-2935, (2011).

Comber, A., Dickie, J., Jarvis, C., Phillips, M. and Tansey, K., “Locating bioenergy facilities using a modified GIS-based location–allocation–algorithm: Considering the spatial distribution of resource supply”, *Appl. Energy*, 154, 309-316, (2015).

Cudjoe, D., Nketiah, E., Obuobi, B., Adu-Gyamfi, G., Adjei, M., and Zhu, B., “Forecasting the potential and economic feasibility of power generation using biogas from food waste in Ghana: Evidence from Accra and Kumasi”, *Energy*, 226, 120342, (2021).

Çınar, Y., “Kariyer tercihi probleminin yapısal bir modeli ve riske karşı tutumlar: Olasılıklı DEMATEL yöntemi temelli bütünlük bir yaklaşım”, *Sosyoekonomi*, 1, 158-186, (2013).

Danzi, C., Testa, G., Stella, G., Foti, V. T., Timpanaro, G., “Potential and location of an anaerobic digestion plant using prickly pear biomass in semi-arid Mediterranean environment”, *J. Clean. Prod.*, 249, 119396, (2020).

Darr, M. J. and Shah, A., “Biomass storage: an update on industrial solutions for baled biomass feedstocks”, *Biofuels*, 3, 321-332, (2012).

De Jesus, R. H. G., Barros, M. V., Salvador, R., de Souza, J. T., Piekarski, C. M. and de Francisco, A. C., “Forming clusters based on strategic partnerships and circular economy for biogas production: A GIS analysis for optimal location”, *Biomass Bioenerg.*, 150, 106097, (2021).

De Meyer, A., Cattrysse, D., Rasinmäki, J. and Van Orshoven, J., “Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: a review”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 31, 657–670, (2014).

DEK TMK (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi), “Hidrolik ve yenilenebilir enerji çalışma grubu biyokütle enerjisi alt çalışma grubu raporu”, Ankara, (2007).

Delivand, M. K., Cammerino, A. R. B., Garofalo, P. and Monteleone, M., “Optimal locations of bioenergy facilities, biomass spatial availability, logistics costs and GHG (greenhouse gas) emissions: a case study on electricity productions in South Italy”, *J. Clean. Prod.*, 99, 129-139, (2015).

Demirbaş, A. “Political economic and environmental impacts of biofuel: A review”, *Appl. Energy*, 86 (1), 108-117, (2009).

Deng, Y. Y., Koper, M., Haigh, M. and Dornburg, V., “Country-level assessment of long term global bioenergy potential”, *Biomass Bioenerg.*, 74, 253–267, (2015).

Dimitrova, E., Vinklers, J., Chokani, N., Abhari, R. S., “Integrated biomass assessment and optimized power generation”, *Energy Technol.*, 3 (3), 265-278, (2015).

Duczowska, A., Kulinska, E. Plutecki, Z., and Rut, J., “Sustainable agro-biomass market for urban heating using centralized district heating system”, *Energies*, 15 (12), 4268, (2022).

Durfee, E. H., Lesser, V. R., and Corkill, L. L., “Trends in cooperative distributed problem solving”, *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, 1, 63-83, (1989).

Dymond, C. C., Titus, B. D., Stinson, G., and Kurz, W. A., “Future quantities and spatial distribution of harvesting residue and dead wood from natural disturbances in Canada”, *For. Ecol. Manag.*, 260 (2), 181-192, (2010).

EASAC (the European Academies Science Advisory Council), “The current status of biofuels in the European Union, their environmental impacts and future prospects [online]”, (10 March 2022), [https://easac.eu/fileadmin/PDF\\_s/reports\\_statements/Easac\\_12\\_Biofuels\\_Complete.pdf](https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Easac_12_Biofuels_Complete.pdf), (2012).

Edis, E. B., Araz, Ö. U., Eski, Ö., and Edis, R. S., “Storage location assignment of steel coils in a manufacturing company: an integer linear programming model and a greedy randomized adaptive search procedure”, *TOP*, (Baskıda) (2022).

Ekşioğlu, S. D., Acharya, A., Leightley, L. E. and Arora, S. “Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain”, *Comput. Ind. Eng.*, 57, 1342-1352, (2009).

Enström, J., Eriksson, A., Eliasson, L., Larsson, A. and Olsson, L., “Wood chip supply from forest to port of loading – A simulation study, *Biomass Bioenerg.*, 152, 106182, (2021).

Erdoğan, M. A. “Çukurova Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü Coğrafi Bilgi Sistemleri Programı CBS’de Veri/Kaynak Analizi Ders Notları [online]”, (11 June 2020), [https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2017/CSS119/878121946\\_veri\\_kaynak\\_analizi\\_final\\_ders\\_notu.pdf](https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2017/CSS119/878121946_veri_kaynak_analizi_final_ders_notu.pdf), (2017).

Eroğlu, Ö., “Bakım/Onarım Alternatiflerinin Bulanık DEMATEL ve SMAA-2 Yöntemleriyle Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü*, Tedarik ve Lojistik Yönetimi Anabilim Dalı, Ankara, (2014).

Falatoonitoosi, E., Leman, Z., Sorooshian, S. and Salimi, M., “Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory” *Research Journal of Applied Sciences, Eng. Technol.*, 5 (13), 3476-3480, (2013).

Flores Hernandez, U., Jaeger, D. and Samperio, J. I., “Modeling Forest Woody Biomass Availability for Energy Use Based on Short-Term Forecasting Scenarios”, *Waste Biomass Valori.*, 11 (5), 2137–2151, (2020).

Gabus, A. and Fontela, E., “World Problems an Invitation to Further Thought within the Framework of DEMATEL”, Battelle Geneva Research Centre, Switzerland, (1972).

Geng, L., Che, T., Ma, M., Tan, J. and Wang, H., “Corn biomass estimation by integrating remote sensing and long-term observation data based on machine learning techniques”, *Remote Sens.*, 13 (12), 2352, (2021).

Ghaderi, H., Pishvae, M. S., and Moini, A., “Biomass supply chain network design: An optimization-oriented review and analysis”, *Ind. Crop. Prod.*, 94, 972-1000, (2016).

Ghadimi, P., Toosi, F. G., and Heavey, H., “A multi-agent systems approach for sustainable supplier selection and order allocation in a partnership supply chain”, *Eur. J. Oper. Res.*, 269, 286-301, (2018).

Gital Durmaz, Y. and Bilgen, B., “Multi-objective optimization of sustainable biomass supply chain network design”, *Appl. Energy*, 272, 115259, (2020).

Goettsch, D., Castillo-Villar, K. K. and Aranguren, M., “Machine-learning methods to select potential depot locations for the supply chain of biomass co-firing”, *Energies*, 13 (24), 6554, (2020).

Gold, S. and Seuring, S., “Supply chain and logistics issues of bio-energy production”, *J. Clean. Prod.*, 19 (1), 32-42, (2011).

Gonzales, D. S., and Searcy, S. W., “GIS-based allocation of herbaceous biomass in biorefineries and depots”, *Biomass Bioenerg.*, 97, 1-10, (2017).

Guerrero, A. B., Aguado, P. L., Sanchez, J. and Curt, M. D., “GIS-based assessment of banana residual biomass potential for ethanol production and power generation: A case study”, *Waste Biomass Valori.*, 7 (2), 405-415, (2016).

Guler, D., Charisoulis, G., Battenfield, B. P. and Yomralioglu, T., “Suitability modeling and sensitivity analysis for biomass energy facilities in Turkey”, *Clean Technol. Environ. Policy*, 23, 2183-2199, (2021).

Gupta, N., Vrat, P., and Ojha R., “Prioritizing enablers for service quality in healthcare sector – a DEMATEL approach”, *J. Health Organ. Manag.*, 36 (5), 633-649, (2022).

Günlü, A., Ercanlı, I., Başkent, E. Z. and Çakır, G., “Estimating aboveground biomass using Landsat TM imagery: A case study of Anatolian Crimean pine forests in Turkey”, *Ann. For. Res.*, 57 (2), 289–298, (2014).

He-Lambert, L., English, B. C., Lambert, D. M., Shylo, O., Larson, J. A., Yu, T. E., and Wilson, B., “Determining a geographic high resolution supply chain network for a large scale biofuel industry”, *Appl. Energy*, 218, 266-281, (2018).

Hersh, M. A., “The Economics and Politics of Energy Generation”, (ed: P. Kopacek), *Improving Stability in Developing Nations through Automation 2006*, Oxford: Elsevier, 77-82, (2006).

Hiloidhari, M., Das, D. and Baruah, D. C. “Bioenergy potential from crop residue biomass in India”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 32, 504–512, (2014).

Hoefnagels, R., Searcy, E., Cafferty, K., Cornelissen, T., Junginger, M., Jacobson, J., and Faaij, A., “Lignocellulosic feedstock supply systems with intermodal and overseas transportation”, *Biofuel. Bioprod. Bior.*, 8 (6), 794-818, (2014).

Hong, B. H., How, B. S. and Lam, H. L., “Overview of sustainable biomass supply chain: From concept to modelling”, *Clean. Technol. Envir.*, 18, 2173-2194, (2016).

Hu, H., Lin, T., Liu, Y. Y., Wang, S. W., and Rodriguez, L. F., “CyberGIS-BioScope: a cyberinfrastructure-based spatial decision-making environment for biomass-to-biofuel supply chain optimization”, *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, 27 (16), 4437-4450, (2015).

Hu, H., Lin, T., Wang, S. and Rodriguez, L. F., “A cyberGIS approach to uncertainty and sensitivity analysis in biomass supply chain optimization”, *Appl. Energy.*, 203, 26–40, (2017).

IEA Bioenergy, “Large industrial users of energy biomass [online]”, (24 March 2020) <https://www.ieabioenergy.com/publications/large-industrial-users-of-energy-biomass/>, (2013).

IRENA, “Bioenergy data, Installed capacity trends [online]”, (19 February 2022) <https://www.irena.org/bioenergy>, (2022).

Jayanthi, S. L. S. V., Keesara, V. R., and Sridhar, V., “Prediction of future lake water availability using SWAT and Support Vector Regression (SVR)”, *Sustainability*, 14, 6974, (2022).

Jeong, H., Sieverding, H. L., and Stone, J. J., “Biodiesel supply chain optimization modeled with geographical information system (GIS) and mixed-integer linear programming (MILP) for the Northern Great Plains Region”, *Bioenergy Res.*, 12, 229–240, (2019).

Jeong, J. S. and Ramirez-Gomez, A., “Optimizing the location of a biomass plant with a fuzzy-DEcision-MAking Trial and Evaluation Laboratory (F-DEMATEL) and multi-criteria spatial decision assessment for renewable energy management and long-term sustainability”, *J. Clean. Prod.*, 182, 509-520, (2018).

Jeong, J. S., “Biomass feedstock and climate change in agroforestry systems: Participatory location and integration scenario analysis of biomass power facilities”, *Energies*, 11, 1404, (2018).

Jeong, J. S., and Gonzalez-Gomez, D., “A web-based tool framing a collective method for optimizing the location of a renewable energy facility and its possible application to sustainable STEM education”, *J. Clean. Prod.*, 251, 119747, (2020).

Jiang, D., Zhuang, D., Fu, J., Huang, Y. and Wen, K., “Bioenergy potential from crop residues in China: Availability and distribution”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16 (3), 1377–1382, (2012).

Kang, S., Heo, S., Realff, M. J., and Lee, J. H., “Three-stage design of high-resolution microalgae-based biofuel supply chain using geographic information system”, *Appl. Energy*, 265, 114773, (2020).

Kang, S., Realff, M. J., Yuan, Y. H., Chance, R., and Lee, J. H., “Global evaluation of economics of microalgae-based biofuel supply chain using GIS-based framework”, *Korean J. Chem. Eng.*, 39 (6), 1524-1541, (2022).

Karadağ, A., “Biyoyakıtlara ve biyokütle giriş [online]”, (10 March 2022), [https://cdn.bartın.edu.tr/biyoteknoloji/86babca0507e88ae8f7ecb1dea802c6b/sunum1-biyoyakıtlara-giris-ve-biyokutle\\_F2Bfnlp.pdf](https://cdn.bartın.edu.tr/biyoteknoloji/86babca0507e88ae8f7ecb1dea802c6b/sunum1-biyoyakıtlara-giris-ve-biyokutle_F2Bfnlp.pdf), (2017).

Karasan, A., Ilbahar, E., Cebi, S., and Kahraman, C., “Customer-oriented product design using an integrated neutrosophic AHP & DEMATEL & QFD methodology”, *Appl. Soft Comput.*, 118, 108445, (2022).

Kim, S., Kim, S. and Kiniry, J. R., “Two-phase simulation-based location-allocation optimization of biomass storage distribution”, *Simul. Modell. Pract. Th.*, 86, 155–168, (2018).

Koca, Y. K., Doran, İ. ve Kılıç, T., “Arazi Sınıflandırma Yöntemi Corine’e Eleştirel Bir Yaklaşım”, *TÜCAUM V. Coğrafya Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 71-80, (2008).

Kök, F., “Organik atıkların yönetimi, geri dönüşümü ve uygulamaları”, *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4 (2), 99-108, (2021).

Krechowicz, M., Krechowicz, A., Lichołai, L., Pawelec, A., Piotrowski, J. Z., and Stępień, A., “Reduction of the risk of inaccurate prediction of electricity generation from PV farms using machine learning”, *Energies*, 15, 4006, (2022).

Kuhmaier, M., Kanzian, C., and Stampfer, K., “Identification of potential energy wood terminal locations using a spatial multicriteria decision analysis”, *Biomass Bioenerg.*, 66, 337-347, (2014).

Laasasenaho, K., Lensu, A., Lauhanen, R., and Rintala, C., “GIS-data related route optimization, hierarchical clustering, location optimization, and kernel density methods are useful for promoting distributed bioenergy plant planning in rural areas”, *Sustain. Energy Tech. Assess.*, 32, 47-57, (2019).

Lan, K., Ou, L. W., Park, S., Kelley, S. S., English, B. C., Yu, T. E., Larson, J., and Yao, Y., “Techno-Economic Analysis of decentralized preprocessing systems for fast pyrolysis biorefineries with blended feedstocks in the southeastern United States”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 143, 110881, (2021).

Laylakar, M., Major, L. V. L., Belati, E. A., Falcao, D. M., Heymann, F. and Melo, J. D., “Spatial-economic framework to estimate small biomass plant remuneration in reactive power markets”, *Sustain. Energy Grids Netw.*, 28, 100556, (2021).

Lee, C. H., and Kim, C. O., “Multi-agent systems applications in manufacturing systems and supply chain management: A review paper”, *Int. J. Prod. Res.*, 46(1), 233-65, (2008).

Lemire, P. O., Delcroix, B., Audy, J. F., Labelle, F., Mangin, P., and Barnabe, S., “GIS method to design and assess the transportation performance of a decentralized biorefinery supply system and comparison with a centralized system: case study in southern Quebec, Canada”, *Biofuel. Bioprod. Bior.*, 13 (3), 552-567, (2019).

Liao, M. and Yao, Y., “Applications of artificial intelligence-based modeling for bioenergy systems: A review”, *GCB-Bioenerg.*, 13, 774-802, (2021).

Lo, S. L. Y., How, B. S., Leong, W. D., Teng, S. Y., Rhamdhani, M. A., and Sunarso, J., “Techno-economic analysis for biomass supply chain: A state-of-the-art review”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 135, 110164, (2021).

López-Rodríguez, F., García Sanz-Calcedo, J., and Moral-García, F. J., “Spatial analysis of residual biomass and location of future storage centers in the southwest of Europe”, *Energies*, 12, 1978, (2019).

Lozano-Garcia, D. F., Cuellar-Bermudez, S. P., del Rio-Hinojosa, E., Betancourt, F., Aleman-Nava, G. S. and Parra-Saldivar, R., “Potential land microalgae cultivation in Mexico: From food production to biofuels”, *Algal Res.*, 39, 101459, (2019).

Luciano, A. C. D., Picoli, M. C. A., Duft, D. G., Rocha, J. V., Leal, M. R. L. V., and le Maire, G., “Empirical model for forecasting sugarcane yield on a local scale in Brazil using Landsat imagery and random forest algorithm”, *Comput. Electron. Agric.*, 184, 106063, (2021).

- Mafakheri, F. and Nasiri, F., “Modelling of biomass-to-energy supply chain operations: Applications, challenges and research directions”, *Energy Policy*, 67, 116-126, (2014).
- Mahjoub, N., and Sahebi, H., “The water-energy nexus at the hybrid bioenergy supply chain: A sustainable network design model”, *Ecol. Indic.*, 119, 106799, (2020).
- Mahjoub, N., Sahebi, H., Mazdeh, M., and Teymouri, A., “Optimal design of the second and third generation biofuel supply network by a multi-objective model”, *J. Clean. Prod.*, 256, 120355, (2020).
- Malladi, K. T. and Sowlati, T., “Biomass logistics: A review of important features, optimization modeling and the new trends”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 94, 587-599, (2018).
- Mansaray, L. R., Kanu, A. S., Yang, L., Huang, J. and Wang, F., “Evaluation of machine learning models for rice dry biomass estimation and mapping using quad-source optical imagery”, *GISci. Remote Sens.*, 57 (6), 785-796, (2020).
- Mantziaris, S., Iliopoulos, C., Theodorakopoulou, I. and Petropoulou, E., “Perennial energy crops vs. durum wheat in low input lands: Economic analysis of a Greek case study”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 80, 789–800, (2017).
- Mao, J., Sun, Q., Ma, C., and Tang, M., “Site selection of straw collection and storage facilities considering carbon emission reduction”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, (Baskıda) (2022).
- Martinez-Martinez, Y., Dewulf, J., and Casas-Ledon, Y., “GIS-based site suitability analysis and ecosystem services approach for supporting renewable energy development in south-central Chile”, *Renew. Energy*, 182, 363-376, (2022).
- Martinkus, N., Latta, G., Rijkhoff, S. A. M., Mueller, D., Hoard, S., Sasatani, D., Pierobon, F., and Wolcott, M., “A multi-criteria decision support tool for biorefinery siting: Using economic, environmental, and social metrics for a refined siting analysis”, *Biomass Bioenerg.*, 128, 105330, (2019).
- Meadows, J., Coote, D. and Brown, M., “The potential supply of biomass for energy from hardwood plantations in the Sunshine Coast Council Region of South-East Queensland, Australia”, *Small-Scale For.*, 13 (4), 461–481, (2014).



- Miranda-Ackerman, M. A., Azzaro-Pantel, C and Aguilar-Lasserre, A. A., “A green supply chain network design framework for the processed food industry: Application to the orange juice agrofood cluster”, *Comput. Ind. Eng.*, 109, 369-389, (2017).
- Mirkouei, A., Haapala, K. R., Sessions, J. and Murthy, G. S., “A review and future directions in techno-economic modeling and optimization of upstream forest biomass to bio-oil supply chains”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 67, 15–35, (2017).
- Morato, T., Vaezi, M. and Kumar, A., “Developing a framework to optimally locate biomass collection points to improve the biomass-based energy facilities locating procedure – A case study for Bolivia”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 107, 183-199, (2019).
- Ng, R. T. L., Kurniawan, D., Wang, H., Mariska, B., Wu, W., and Maravelias, C. T., “Integrated framework for designing spatially explicit biofuel supply chains”, *Appl. Energy*, 216, 116-131, (2018).
- Niblick, B., Monnell, J. D., Zhao, X., and Landis, A. E., “Using geographic information systems to assess potential biofuel crop production on urban marginal lands”, *Appl. Energy*, 103, 234–242, (2013).
- Norstebo, V., Krogli, S. O., Debella-Gilo, M., Perez-Valdes, G. A., Uggen, K. T., Dramstad, W. E., “Identifying suitable bioeconomic cluster sites-combining GIS-MCDA and operational research methods”, *Environ. Model. Assess.*, 25 (5), 689-703, (2020).
- Nunes, L. J. R., Causer, T. P. and Ciolkosz, D., “Biomass for energy: A review on supply chain management models”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 120, 109658, (2020).
- Olgun, H., “Biyokütle Enerji Teknolojileri”, Exploitation of Agricultural Residues in Turkey, Final Workshop, Ankara, 25 Kasım 2005.
- Onurbaş Avcioğlu, A. and Türker, U., “Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16 (3), 1557–1561, (2012).
- Osmani, A., and Zhang, J., “Economic and environmental optimization of a large scale sustainable dual feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain in a stochastic environment”, *Appl. Energy*, 114, 572-587, (2014).

Özbeý, M., “Koalisyon Kurulumu ile Görev Paylaşımı için Bir Çoklu Etmen Tabanlı Yürütme Ortamı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2014).

Özcan, M., Öztürk, S. and Oğuz, Y., “Potential evaluation of biomass-based energy sources for Turkey”, *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, 18 (2), 178–184, (2015).

Öztürk, M., “Hayvan Gübresinden ve Atıklardan Kompost Üretimi [online]”, (21 December 2020), [http://www.cevresehirkutuphanesi.com/assets/files/slider\\_pdf/Hk8jV030DWQe.pdf](http://www.cevresehirkutuphanesi.com/assets/files/slider_pdf/Hk8jV030DWQe.pdf), (2017).

Parker, N., Tittmann, P., Hart, Q., Nelson, R., Skog, K., Schmidt, A., Gray, E., and Jenkins, B., “Development of a biorefinery optimized biofuel supply curve for the Western United States”, *Biomass Bioenerg.*, 34, 1597-1607, (2010).

Patel, P., Vaezi, M., Sebastian, R. M., and Kumar, A., “The development of a GIS-based framework to locate biomass and municipal solid waste collection points for an optimal waste conversion facility”, *Trans. ASABE*, 64 (5), 1671-1691, (2021).

Peng, Y., Azadi, H., Yang, L., Scheffran, J., and Jiang, P., “Assessing the siting potential of low-carbon energy power plants in the Yangtze River Delta: A GIS-based approach”, *Energies*, 15, 2167, (2022).

Pérez, A. T. E., Camargo, M., Rincón, P. C. N. and Marchant, M. A., “Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: A bibliographic analysis”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 69, 350-359, (2017).

Pergola, M., Rita, A., Tortora, A., Castellaneta, M., Borghetti, M., De Franchi, A. S., Lapolla, A., Moretti, N., Pecora, G., Pierangeli, D., Todaro, L. and Ripullone, F., “Identification of suitable areas for biomass power plant construction through environmental impact assessment of forest harvesting residues transportation”, *Energies*, 13, 2699, (2020).

Razm, S., Nickel, S., and Sahebi, H., “A multi-objective mathematical model to redesign of global sustainable bioenergy supply network”, *Comput. Chem. Eng.*, 128, 1-20, (2019).

Rentizelas, A. A., “Biomass supply chains”, (ed: L. Rosendahl), *Biomass combustion science, Technology and engineering*, Sawston, UK: Woodhead Publishing Series in Energy, 9-35, (2013).

Romero, L., Romero, M. S., Cuadrado, M. L., Fernandez, J., “Location of bioelectricity plants in the Madrid community based on triticale crop: A multicriteria methodology”, *Math. Probl. Eng.*, 2015, 483151, (2015).

Sahoo, K., Hawkins, G. L., Yao, X. A., Samples, K. and Mani, S., “GIS-based biomass assessment and supply logistics system for a sustainable biorefinery: A case study with cotton stalks in the Southeastern US”, *Appl. Energy*, 182, 260–273, (2016).

Sahoo, K., Mani, S., Das, L. and Bettinger, P., “GIS-based assessment of sustainable crop residues for optimal siting of biogas plants”, *Biomass Bioenerg.*, 110, 63–74, (2018).

Sakaguchi, T. And Tabata, T., “100% electric power potential of PV, wind power, and biomass energy in Awaji island Japan”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 51, 1156-1165, (2015).

San Martin, D. S., Orive, M., Martinez, E., Inarra, B., Ramos, S., Gonzalez, N., de Salas, A. G., Vazquez, L., and Zufia, J., “Decision making supporting tool combining AHP method with GIS for implementing food waste valorisation strategies”, *Waste Biomass Valori.*, 8 (5), 1555-1567, (2017).

Sánchez-García, S., Canga, E., Tolosana, E., and Majada, J., “A spatial analysis of woodfuel based on WISDOM GIS methodology: Multiscale approach in Northern Spain”, *Appl. Energy*, 144, 193–203, (2015).

Sang, X., Yu, X., Chang, C-T., and Liu, X., “Electric bus charging station site selection based on the combined DEMATEL and PROMETHEE-PT framework”, *Comput. Ind. Eng.*, 168, 108116, (2022).

Santibanez-Aguilar, J. E., Flores-Tlacuahuac, A., Betancourt-Galvan, F., Lozano-Garcia, D. F., Lozano, F. J., “Facilities location for residual biomass production system using geographic information system under uncertainty”, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 6 (3), 3331-3348, (2018).

Santibanez-Aguilar, J. E., Flores-Tlacuahuac, A., Lozano-Garcia, D. F., and Lozano, F. J., “Novel approach for weighting in the geographic information system focused on a multistakeholder problem: Case for the residual biomass processing system”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 58 (51), 23249-23260, (2019).

Santibanez-Aguilar, J. E., Lozano-Garcia, D. F., Lozano, F. J., and Flores-Tlacuahuac, A., “Sequential use of geographic information system and mathematical programming for optimal planning for energy production systems from residual biomass”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 58 (35), 15818-15837, (2019).

Santibanez-Aguilar, J. E., Quiroz-Ramirez, J. J., Sanchez-Ramirez, E., Segovia-Hernandez, J. G., Flores-Tlacuahuac, A., and Ponce-Ortega, J. M., “Marginalization index as social measure for Acetone-Butanol-Ethanol supply chain planning”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 154, 111816, (2022).

Schölkopf, B. and Smola A. J., *Learning with Kernels*, Cambridge: MIT Press, (2002).

Schröder, T., Lauven, L. P., and Geldermann, J., “Improving biorefinery planning: Integration of spatial data using exact optimization nested in an evolutionary strategy”, *Eur. J. Oper. Res.*, 264, 1005–1019, (2018).

Schröder, T., Lauven, L. P., Sowlati, T., and Geldermann, J., “Strategic planning of a multi-product wood-biorefinery production system”, *J. Clean. Prod.*, 211, 1502-1516, (2019).

Searcy, E., Hess, J. R., Tumuluru, J. S., Ovard, L., Muth, D. J., Trømborg, E., Wild, M., Deutmeyer, M., Nikolaisen, L., Ranta, T. and Hoefnagels, R., “Optimization of Biomass Transport and Logistics”, (eds: M. Junginger, C. Goh and A. Faaij), *International Bioenergy Trade. Lecture Notes in Energy*, Amsterdam: Springer, 103-123, (2014).

Senocak, A. A. and Guner Goren, H., “Forecasting the biomass-based energy potential using artificial intelligence and geographic information systems: A case study”, *Eng. Sci. Technol. Int J.*, 26, 100992, (2022).

Sharma, B., Birrell, S. and Miguez, F. E., “Spatial modeling framework for bioethanol plant siting and biofuel production potential in the U.S”, *Appl. Energy*, 191, 75-86, (2017).

Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C. L., and Khanchi, A., “Biomass supply chain design and analysis: basis, overview, modeling, challenges, and future”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 24, 608–627, (2013).

Shen, W., and Norrie, D. H., “Agent-based systems for intelligent manufacturing: A state of the art survey”, *Knowl. Inf. Syst.*, 1, 129–56, (1999).

Silva, S., Alcada-Almeida, L., and Dias, L. C., “Biogas plants site selection integrating Multicriteria Decision Aid methods and GIS techniques: A case study in a Portuguese region”, *Biomass Bioenerg.*, 71, 58-68, (2014).

Simon, F., Girard, A., Krotki, M. and Ordoñez, J., “Modelling and simulation of the wood biomass supply from the sustainable management of natural forests”, *J. Clean. Prod.*, 282, 124487, (2021).

Smola A. J. and Schölkopf, B., “A tutorial on support vector regression”, *Stat. Comput.*, 14, 199-222, (2004).

Sultana, A. and Kumar, A., “Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system”, *Appl. Energy*, 94, 192–201, (2012).

Sultana, A., and Kumar, A., “Development of tortuosity factor for assessment of lignocellulosic biomass delivery cost to a biorefinery”, *Appl. Energy*, 119, 288-295, (2014).

Şenocak, A. A., “Bulanık ortamda sürdürülebilir tedarikçi seçimi problemi için çok kriterli karar verme ve doğrusal programlamaya dayalı bir uygulama”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2016).

Thrän, D., Schaldach, R., Millinger, M., Wolf, V., Arendt, O., Ponitka, J., Gärtner, S., Rettenmaier, N., Hennenberg, K. and Schüngel, J., “The milestones modeling framework: An integrated analysis of national bioenergy strategies and their global environmental impacts”, *Environ. Model. Softw.*, 86, 14–29, (2016).

Töreyen, G., Özdemir, İ. ve Kurt, T., *ArcGIS 10 Desktop Uygulama Dokümanı*, Ankara: İşlem Coğrafi Bilgi Sistemleri Mühendislik ve Eğitim Ltd. Şti., (2010).

TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu), “Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları [Online]”, (16 October 2022), <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr>, (2022b).

TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu), “Belediye Atık İstatistikleri [Online]”, (16 October 2022), <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=119&locale=tr>, (2020).

TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu), “Hayvancılık İstatistikleri [Online]”, (16 October 2022), <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=101&locale=tr>, (2022a).

Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, “Mekanik Ayırma, Biyokurutma ve Biyometanizasyon Tesisleri ile Fermente Ürün Yönetimi Tebliği [online]”, (21 December 2020), <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/10/20151010-3.htm>, (2015).

Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası [online]”, (19 February 2022), <https://bepa.enerji.gov.tr/>, (2022).

Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı, “Corine Projesi [online]”, (11 June 2020), <https://corine.tarimorman.gov.tr/corineportal/index.html>, (2015).

Valenti, F., Porto, S. M. C., Dale, B. E. and Liao, W., “Spatial analysis of feedstock supply and logistics to establish regional biogas power generation: A case study in the region of Sicily”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 97, 50-63, (2018).

van Holsbeeck, S. and Srivastava, S. K., “Feasibility of locating biomass-to-bioenergy conversion facilities using spatial information technologies: A case study on forest biomass in Queensland, Australia”, *Biomass Bioenerg.*, 139, 105620, (2020).

Vapnik V., *The Nature of Statistical Learning Theory*, New York: Springer, (1995).

Vukašinović, V. and Gordić, D., “Optimization and GIS-based combined approach for the determination of the most cost-effective investments in biomass sector”, *Appl. Energy*, 178, 250-259, (2016).

Waewsak, J., Ali, S., Natee, W., Kongruang, C., Chancham, C. and Gagnon, Y., “Assessment of hybrid, firm renewable energy-based power plants: Application in the southernmost region of Thailand”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 130, 109953, (2020).

Wang, L., Agyemang, S. A., Amini, H. and Shahbazi, A., “Mathematical modeling of production and biorefinery of energy crops”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 530, 530-544, (2015).

Welfle, A., “Balancing growing global bioenergy resource demands-Brazil’s biomass potential and the availability of resource for trade”, *Biomass Bioenerg.*, 105, 83-95, (2017).

Welfle, A., Gilbert, P., Thornley, P., “Securing a bioenergy future without imports”, *Energy Policy*, 68, 1–14, (2014).

Wietschel, L., Thorenz, A. and Tuma, A., “Spatially explicit forecast of feedstock potentials for second generation bioconversion industry from the EU agricultural sector until the year 2030”, *J. Clean. Prod.*, 209, 1533-1544, (2019).

Winston, W. L., *Operations Research: Applications and Algorithms*, London: Thomson Learning, (2004).

Wolfsmayr, U. J. and Rauch, P., “The primary forest fuel supply chain: A literature review”, *Biomass Bioenerg.*, 60, 203–221, (2014).

Wu, J., Zhang, J., Yi, W., Cai, H., Li, Y. and Su, Z., “Agri-biomass supply chain optimization in north China: Model development and application”, *Energy*, 239 (Part D), 122374, (2022).

Yalçinkaya, S., “A spatial modeling approach for siting, sizing and economic assessment of centralized biogas plants in organic waste management”, *J. Clean. Prod.*, 255, 120040, (2020).

Yanase, Y. and Triantaphyllou, E., “A systematic survey of computer-aided diagnosis in medicine: Past and present developments”, *Expert Syst. Appl.*, 138, 1-25, (2019).

Yang, C.-H., Shao, J.-C., Liu, Y.-H., Jou, P.-H., and Lin, Y.-D., “Application of fuzzy-based support vector regression to forecast of international airport freight volumes”, *Mathematics*, 10, 2399, (2022).

Yılmaz Balaman, Ş. and Selim, H., “Biomass to Energy Supply Chain Network Design: An Overview of Models, Solution Approaches and Applications” (eds: S. D. Ekşioğlu, S. Rebennack and P. M. Pardalos), *Handbook of Bioenergy*, Cham: Springer International Publishing, 1-35, (2015).

Yılmaz Balaman, Ş., “A fuzzy goal programming based decision support system for design and management of biomass to energy supply chains”, Ph.D Thesis, *Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Industrial Engineering, Izmir, (2014).

Yılmaz Balaman, Ş., and Selim, H., “A network design model for biomass to energy supply chains with anaerobic digestion systems”, *Appl. Energy*, 130, 289-304, (2014).

Yılmaz Balaman, Ş., Decision-Making for Biomass-Based Production Chains: The Basic Concepts and Methodologies, London: Academic Press, (2018).

Yılmaz, Ş. and Selim, H., “A review on the methods for biomass to energy conversion systems design”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 25, 420-430, (2013).

Yoon, H-J., Seo, S-K., and Lee, C-J., “Multi-period optimization of hydrogen supply chain utilizing natural gas pipelines and byproduct hydrogen”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 157, 112083, (2022).

Yu, H. D., Wang, Q. H., Ileleji, K. E., Yu, C. J., Luo, Z. Y., Cen, K. F., and Gore, J., “Design and analysis of geographic distribution of biomass power plant and satellite storages in China. Part 2: Straight-line delivery”, *Biomass Bioenerg.*, 46, 773-784, (2012a).

Yu, H. D., Wang, Q. H., Ileleji, K. E., Yu, C. J., Luo, Z. Y., Cen, K. F., and Gore, J., “Design and analysis of geographic distribution of biomass power plant and satellite storages in China. Part 2: Road delivery”, *Biomass Bioenerg.*, 46, 785-792, (2012b).

Yuan, C., Xiao, J., Zhang, X., Zhou, J., and Wang, Z., “A new assessment of the algal biomass of green tide in the Yellow Sea”, *Mar. Pollut. Bull.*, 174, 113253, (2022).

Yue, D., You, F. and Snyder, S. W., “Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges”, *Comput. Chem. Eng.*, 66, 36-56, (2014).

Yüce, T., “Makine öğrenmesi algoritmaları ile detay üretim alanları için iş merkezi kırılımında üretim süresi tahminleme”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri*, Ankara, (2021).

Zahraee, S. M., Shiwakoti, N. and Stasinopoulos, P., “Biomass supply chain environmental and socio-economic analysis: 40-Years comprehensive review of methods, decision issues, sustainability challenges, and the way forward”, *Biomass Bioenerg.*, 142, 105777, (2020).

Zandiatashbar, N. Z., Labadie, N. and Prins, C., “Modelling and optimisation of biomass supply chains: A review”, *Int. J. Prod. Res.*, 56 (10), 3482–3506, (2018).



Zareei, S., “Evaluation of biogas potential from livestock manures and rural wastes using GIS in Iran”, *Renew. Energy*, 118, 351-356, (2018).

Zhang, F., Johnson, D. M. and Sutherland, J. W., “A GIS-based method for identifying the optimal location for a facility to convert forest biomass to biofuel”, *Biomass Bioenerg.*, 35 (9), 3951-3961, (2011).

Zhang, F., Johnson, D., Johnson, M., Watkins, D., Froese, R. and Wang, J., “Decision support system integrating GIS with simulation and optimisation for a biofuel supply chain”, *Renew. Energy*, 85, 740-748, (2016).

Zhang, F., Wang, J., Liu, S., Zhang, S. and Sutherland, J. W., “Integrating GIS with optimization method for a biofuel feedstock supply chain”, *Biomass Bioenerg.*, 98, 194-205, (2017).

Zhang, X., Wang, J., Vance, J., Wang, Y., Wu, J. and Hartley, D., “Data analytics for enhancement of forest and biomass supply chain management”, *Curr. For. Rep.*, 6, 129-142, (2020).

Zhao, X. G. and Li, A., “A multi-objective sustainable location model for biomass power plants: Case of China”, *Energy*, 112, 1184-1193, (2016).

Zhao, X., Ma, X. Y., Wang, K., Long, Y. Q., Zhang, D. J., and Xiao, Z. C., “A spatially explicit optimization model for agricultural straw-based power plant site selection: A Case study in Hubei Province, China”, *Sustainability*, 9 (5), 832, (2017).