



**T.C. İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ**

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİYOKÜTLE TEMELLİ SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ TEDARİK
ZİNCİRİ TASARIMI İÇİN ÇOK AMAÇLI BİR MATEMATİKSEL
PROGRAMLAMA MODELİ UYGULAMASI**

Hatice Güneş YILDIZ

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Berk AYVAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İSTANBUL - 2018**

KABUL VE ONAY SAYFASI

Hatice Güneş YILDIZ tarafından hazırlanan “Biyokütle Temelli Sürdürülebilir Enerji Tedarik Zinciri Tasarımı İçin Çok Amaçlı Bir Matematiksel Programlama Modeli Uygulaması” adlı tez çalışması 10/07/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde başarı ile savunularak, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

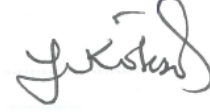
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Berk AYVAZ
İstanbul Ticaret Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mustafa KÖKSAL
İstanbul Ticaret Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman KUŞAKCI
İbn Haldun Üniversitesi



Onay Tarihi : 23.07.2018



Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK
Enstitü Müdürü

**AKADEMİK VE ETİK KURALLARA
UYGUNLUK BEYANI**

İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı beyan ederim.

10.07.2018



Hatice Güneş YILDIZ

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER.....	vii
ÇİZELGELER.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
3. BİYOKÜTLE TEMELLİ ENERJİ TEDARİK ZİNCİRLERİ: KAVRAMSAL VE TEORİK ÇERÇEVE	9
3.1. Biyokütleden Enerji Dönüşüm Süreçleri	11
3.1.1. Termokimyasal Dönüşüm Süreçleri.....	12
3.1.1.1. Doğrudan Yakma (Yanma).....	12
3.1.1.2. Gazlaştırma	12
3.1.1.3. Piroлиз	13
3.1.1.4. Sıvılaştırma / Hidrojenerasyon (HTU).....	13
3.1.2. Biyokimyasal Dönüşüm Süreçleri	13
3.1.2.1. Fermantasyon	14
3.1.2.2. Anaerobik Sindirim.....	14
3.1.3. Mekanik Ekstraksiyon	18
3.2. Biyokütle Temelli Enerji Tedarik Zincirleri.....	19
3.2.1. Biyokütle Temelli Enerji Tedarik Zincirlerinde Ana Operasyonlar.....	20
3.2.1.1. Biyokütle Hasadı ve Toplanması.....	20
3.2.1.2. Biyokütle Ön İşleme	21
3.2.1.3. Biyokütle Depolama	22
3.2.1.4. Biyokütle Taşımacılığı.....	23
3.2.2. Biyokütle Temelli Enerji Tedarik Zincirlerinde Karar Verme	25
3.2.2.1. Stratejik Kararlar	25
3.2.2.2. Taktiksel Kararlar	26

3.2.3. Biyokütle Temelli Enerji Tedarik Zincirlerinde Belirsizlik ve Sürdürülebilirlik Kavramı	27
3.2.3.1. Biyokütle Tedariki Belirsizlikleri.....	27
3.2.3.2. Taşımacılık ve Lojistik Belirsizlikleri	27
3.2.3.3. Üretim ve İşletme Belirsizlikleri	28
3.2.3.4. Talep ve Fiyat Belirsizlikleri	28
3.2.3.5. Diğer Belirsizlikler.....	28
3.2.3.6. Sürdürülebilirlik.....	29
4. METODOLOJİ	31
4.1. Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama.....	31
4.2. Çok Amaçlı Karma Tamsayı Doğrusal Programlama.....	32
4.3. Hedef Programlama	33
4.3.1. Ağırlıklı Hedef Programlama.....	34
4.3.2. Minmax Hedef Programlama.....	35
4.3.3. Öncelikli Hedef Programlama	36
5. PROBLEMİN TANIMI ve MODELİN FORMÜLASYONU	37
5.1. Problemin Tanımı	37
5.2. Model Varsayımları	38
5.3. Model Gösterimi	39
5.4. Model Formülasyonu.....	41
5.4.1. Amaç Fonksiyonu.....	41
5.4.1.1. Ekonomik Amaç Fonksiyonu.....	42
5.4.1.2. Çevresel Amaç Minimizasyonu	44
5.4.1.3. Sosyal Amaç Fonksiyonu.....	44
5.4.2. Kısıtlar	45
5.4.2.1. Biyokütle Tedarik Kısıtları	45
5.4.2.2. Akış Koruma Kısıtları	45
5.4.2.3. Kapasite Kısıtları.....	46
5.4.2.4. Üretim Kısıtları	46
5.4.2.5. Gübre Dağıtım Kısıtları.....	47
5.4.2.6. Sindirici Katı Madde Oranı	47
5.4.2.7. Negatif Olmama ve Tam Sayı Kısıtları.....	47
5.4.3. Çözüm Prosedürü	48

6. UYGULAMA.....	50
6.1. Uygulama Verileri	51
6.1.1. Biyokütle Kaynakları	51
6.1.2. Taşımacılık.....	52
6.1.3. Biyokütle Depoları ve Biyogaz Tesisleri	53
6.1.4. Ekonomik Parametreler	53
6.2. Problemin Çözüm Yaklaşımı.....	54
6.2.1. Hedef Programlama Yaklaşımı	54
6.2.1.1. Sonuçlar ve Analizler	57
6.2.1.2. Duyarlılık Analizi.....	62
7. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	68
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ.....	82

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİYOKÜTLE TEMELLİ SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ TEDARİK ZİNCİRİ TASARIMI İÇİN ÇOK AMAÇLI BİR MATEMATİKSEL PROGRAMLAMA MODELİ UYGULAMASI

Hatice Güneş YILDIZ

İstanbul Ticaret Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Berk AYVAZ

2018, 82 sayfa

Fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması, çevresel etkilerin hafifletilmesi ve sürdürülebilir ekonomik büyüme yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının en umut verici unsurları arasındadır. Biyokütle, toplumsal refah için kritik olan sürdürülebilir enerji sistemleri oluşturma potansiyeline sahip önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyoenerji üretimi için biyokütlenin kullanılması, artan enerji taleplerini karşılamak, sera gazı emisyonlarını ve iklim değişikliğini azaltmak için faydalı bir alternatiftir. Böyle bir enerji kaynağının tedarik zinciri, son kullanıcı pazarlarına rekabetçi bir nihai ürün sağlamaya yardımcı olmak açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada, mevcut kısıtlamaları göz önünde bulundurarak ekonomik, çevresel ve sosyal performansları optimize etmek amacıyla biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zinciri için çok amaçlı karma tam sayılı doğrusal programlama (MILP) modeli önerilmiştir. Önerilen modelleme yaklaşımının performansı İstanbul'da gerçek bir uygulama çalışması yapılarak gösterilmiştir. Ayrıca tüm tedarik zincirinin etkin bir şekilde yönetilmesi için öngörü sağlama amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle, biyogaz, çok amaçlı optimizasyon, sürdürülebilirlik, tedarik zinciri ağı tasarımı

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

A MULTI-OBJECTIVE MATHEMATICAL PROGRAMMING MODEL APPLICATION TO BIOMASS-BASED SUSTAINABLE ENERGY SUPPLY CHAIN DESIGN

Hatice Güneş YILDIZ

**İstanbul Commerce University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Industrial Engineering**

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Berk AYVAZ

2018, 82 pages

Reducing dependence on fossil fuels, alleviating environmental impacts and ensuring sustainable economic growth are among the most promising aspects of utilizing renewable energy resources. Biomass is a major renewable energy resource that has the potential for creating sustainable energy systems that are critical in terms of social welfare. Utilization of biomass for bioenergy production is an efficient alternative for meeting rising energy demands, reducing greenhouse gas emissions and thus alleviating climate change. A supply chain for such an energy source is crucial for assisting deliverance of a competitive end product to end-user markets. Considering the existing constraints, a multi-objective mixed integer linear programming (MILP) model for biomass based sustainability energy supply chain was proposed in this study for economic, environmental and social performances optimization. Performance of the proposed modelling approach was demonstrated with a real life application study realized in İstanbul. Moreover sensitivity analyses were conducted which would serve as a foresight for efficient management of the supply chain as a whole.

Keywords: Biomass, biogas, multi-objective optimization, supply chain network design, sustainability

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamın ilk aőamasından son aőamasına kadarki bütün sürecinde sabırla dinleyen, güven aőılayan, yardımlarını ve deneyimlerini esirgemeyen, bilgi ve önerilerini benimle paylaşan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Berk AYVAZ'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmamın birçok aşamasında kıymetli bilgilerinden faydalandığım hocam Arő. Görv. Emel őeyma KÜçÜKAőCI'ya teşekkür ederim.

Uzun soluklu tez yazım aşamasında yanımda bulunan ve sıkıntıya düőtüğüm anlarda bana moral ve motivasyon kaynağı olan arkadaşlarım Ayőe Nur SAĞIN, Ayça AYTOGAN ve Merve AKTAő'a teşekkür ederim.

Son olarak da sadece bu tezin yazımında değil, hayatımın her anında bana destek veren, yanımda olan, sabır gösteren, her zaman daha iyisini yapabilmem için teşvik eden biricik anneme ve babama, çok değerli kardeőlerime sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Hatice Güneş YILDIZ
İSTANBUL, 2018

ŞEKİLLER

	Sayfa
Şekil 3.1. Biyoyakıtların sınıflandırılması	10
Şekil 3.2. Biyokütlenin enerjiye dönüşüm yolları	12
Şekil 3.3. Anaerobik sindirim aşamaları	15
Şekil 3.4. Tipik bir biyogaz tesisinin akış diyagramı.....	17
Şekil 5.1. Biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zinciri ağının genel yapısı	37
Şekil 6.1. Uygulama bölgesi haritası.....	51
Şekil 6.2. Tedarik bölgeleri ve depolar arasında biyokütle akışı	59
Şekil 6.3. Depolar, tesis ve talep noktası arasında biyokütle ile sindirim artığı akışı	60
Şekil 6.4. Yıllık maliyet bileşenleri.....	61
Şekil 6.5. Biyokütle kullanılabilirliği değişiminin maliyet bileşenlerine etkisi	65

ÇİZELGELER

	Sayfa
Çizelge 6.1. Atık biyoküte özellikleri	52
Çizelge 6.2. Hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri.....	56
Çizelge 6.3. Karar değişkenlerinin optimal değerleri	58
Çizelge 6.4. Hesaplanan maliyet bileşenleri	60
Çizelge 6.5. Optimal sonuçların sapma miktarları	61
Çizelge 6.6. Biyokütle kullanılabilirliğinin duyarlılık analizi sonuçları	62
Çizelge 6.7. Biyokütle kullanılabilirliğinin tedarik zinciri maliyetine etkisi.	64
Çizelge 6.8. Elektrik satış fiyatının duyarlılık analizi sonuçları.....	65
Çizelge 6.9. Ağırlık katsayılarının duyarlılık analizi sonuçları.....	66



SİMGELER VE KISALTMALAR

CHP	Kombine Isı ve Güç
CO ₂	Karbondiyoksit
GA	Genetik Algoritma
GAMS	General Algebraic Modeling System
GHG	Sera Gazı
GIS	Coğrafi Bilgi Sistemi
GP	Hedef Programlama
HRT	Hidrolik Bekletme Süresi
HTU	Hidrojenasyon
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
kWh	Kilowatt saat
MILP	Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
MILNP	Karma Tamsayı Doğrusal Olmayan Programlama
NPV	Net Bugünkü Değer
OLR	Organik Yükleme Hızı
SMILP	Stokastik Karma Tamsayı Programlama
SQP	Kuadratik Programlama

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında yaşam standartlarının iyileştirilmesi, gelişen teknoloji ve nüfusun çoğalmasına paralel olarak artan enerji ihtiyacı ile birlikte çevresel, sosyal ve ekonomik sorunlar büyük bir problem haline gelmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre küresel enerji talebinin 2040 yılına kadar 2015 yılı enerji talebinden üçte birlik bir oranla daha yüksek olacağı beklenmektedir (IEA, 2014).

Yenilenemez enerji kaynağı olarak adlandırılan petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar küresel enerji talebinin % 88'lik büyük bir kısmını karşılamaktadır (Othman vd., 2017). Ancak 1973 Petrol Krizi sonrasında bu enerji kaynaklarına karşı bir güven sorunu ortaya çıkmıştır. Petrol ambargosu kısa vadeli bir olay olsa da bazı sonuçları kendini uzun vadede göstermiştir. Bu kriz sonrasında endüstrileşmiş ülkeler alternatif enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Aynı zamanda yükselen fosil yakıt (petrol, doğal gaz) fiyatları, sınırlı sayıda ülkeden ithal edilen enerjiye bağımlılık ve fosil yakıtların yoğun bir şekilde sera gazı etkisi yaratması da bu arayışı hızlandırmıştır. Bu süreç içerisinde yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmaya başlamıştır (Nematollahi vd., 2016). Artan enerji talebini karşılamak, sera gazı emisyonlarıyla ilgili ulusal düzenlemelere uymak ve fosil yakıtların kullanımını sınırlandırmak için yenilenebilir enerji kullanım oranının 2040 yılına kadar %13,5'den %30'a yükselmesi beklenmektedir (IEA, 2014).

Geleceğin anahtarı olarak kabul edilen yenilenebilir enerji medeniyetin başlangıcından beri insanlar için büyük bir önem taşımaktadır. Bunun ana nedeni, yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlara kıyasla birçok avantajı olduğu gerçeğidir (Kahraman vd., 2009). Yenilenebilir enerji kaynakları ulusal güvenlik, çevre kalitesi ve ekonomik verimliliği tehdit etmeden sürdürülebilir bir şekilde enerji taleplerini karşılama potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları başlıca hidroelektrik, biyokütle, jeotermal, güneş ve rüzgâr enerjisi olarak sınıflandırılmaktadır (Evrendilek vd., 2003).

Biyokütle çeşitli dönüşüm teknolojileri aracılığıyla biyoyakıt, biyoenerji, biyokimyasal ve katma değeri yüksek diğer biyoürünlerin üretimi için potansiyel yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak tanımlanmaktadır (Ng vd., 2015). Yenilenebilir hammadde kaynaklarından üretilen biyoenerji, ekonomik büyümeyi, enerji güvenliğini ve kaynak sürdürülebilirliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu avantajlara rağmen fosil yakıtlardan enerji üretimi ile rekabet edebilmesi için uzun vadeli çok dönemli bir stratejik planlama yapılması gerekmektedir. Araştırmacılar daha çok biyokütelleri biyoenerji haline dönüştüren teknolojilere odaklanmıştır ancak müşteri tatminini artıracak rekabet gücü yüksek bir nihai ürün sunabilmek için güçlü, güvenilir ve sürdürülebilir bir biyokütle tedarik zinciri ağı tasarımı geliştirilmelidir.

Biyokütle tedarik zincirinin planlanması için en iyi strateji parametrelerin tam bilgisidir (Awudu ve Zhang, 2012) fakat temel zorluk çeşitli belirsizliklerin varlığından kaynaklanmaktadır. Belirsizlikler bunlarla sınırlı olmamakla birlikte; öngörülemeyen hava koşulları, biyokütlenin taşınması ve depolanması, biyoyakıt talebi, hammadde ve ürün fiyatları, üretim teknolojileri, biyoyakıt ile ilgili politikaları içermektedir (Bairamzadeh vd., 2018). Biyokütle tedarik zincirlerinin planlamasında bir diğer zorluk, tedarik zincirinin sürdürülebilirliğini bir optimizasyon çerçevesinde entegre etmek amacıyla ekonomik, sosyal ve çevresel çatışan hedefleri arasında bir denge sağlamaya çalışmaktan kaynaklanmaktadır.

Temiz enerji kaynağı olan biyoenerji birçok avantajına rağmen, biyokütle tedarik zinciri yönetimi ile ilgili çeşitli zorlukların varlığı ve genel eksiklikler nedeniyle ticari seviyelerde kullanılamamaktadır (Sansaniwal vd., 2017). Bu nedenle, artan enerji talebini sürdürülebilir şekilde karşılamak amacıyla, biyokütle enerjisi bakımından son derece zengin kaynaklara sahip olan Türkiye’de fosil kaynaklı enerji kullanımından kaynaklanan sorunlarla mücadele edebilmek için gerçek hayat varsayımlarına ve kısıtlamalarına tabi olan biyokütle temelli enerji tedarik zincirinde bir karar alma modeli geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, biyoenerji üretiminin optimal planlamasını tasarlamak için ilgili tüm süreçlerde toplam maliyeti ve çevresel etkiyi minimize etmenin yanı

sıra sosyal etkiyi maksimize eden en uygun tedarik zinciri konfigürasyonu sunmaktır. Bu amaçla; depo ve tesis sayısı, kapasitesi, yeri dahil olmak üzere tasarlanan ağın düğümleri arasında biyokütle ve nihai ürün akış miktarını belirleyen anaerobik sindirim temelli biyoenerji dönüştürme işleminin altyapısı için karar vermeyi sağlayan çok amaçlı karma tam sayılı doğrusal programlama (MILP) modeli önerilmiştir. Çok amaçlı yapıdan dolayı çelişen hedeflerle başa çıkmak için, çok kriterli karar verme yöntemlerinin en önemlilerinden biri olan hedef programlama (GP) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, amaçlar için hedef değerlerden istenmeyen sapmaları en aza indiren çözümler sunarak karşılan sorunları daha gerçekçi bir yaklaşımla ele almaktadır.

Çalışmanın katkısı, stratejik tedarik zinciri kararlarını optimize etmek için biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zincirinin tüm unsurlarını tek bir çerçevede bütünleştiren bir matematiksel programlama modelinin geliştirilmesine dayanmaktadır. Bu çalışmanın yürütülmesi atıkların çevresel yönden zararlı olacak şekilde atıl halde depolanması yerine enerji üretimi ve kompost olarak değerlendirilmesine, ülkemizdeki mevcut enerji açığının kapatılmasına, gübre ihtiyacında dışa bağımlılığın azalmasına ve bölge ekonomisinin arttırılmasına katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde, biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zinciri ağı tasarımına odaklanarak ilgili literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Üçüncü bölümde, biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zincirlerine genel bakış sunarak ilgili kavramlar hakkında bilgiler verilmektedir. Dördüncü bölümde, modelde kullanılan matematiksel programlama yöntemleri açıklanmıştır. Beşinci bölümde, problemin tanımı yapıp önerilen matematiksel model açıklanmıştır. Altıncı bölümde model gerçek dünya problemi üzerine bir örnek çalışmaya uygulanmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar ve önerilen modelin doğrulanması sunulmuştur. Son olarak yedinci bölümde, çalışma tamamen sonuçlandırılıp gelecekteki bazı araştırma yönleri için tavsiyelerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Son zamanlarda, araştırmacılar biyokütle temelli enerji tedarik zinciri tasarımı için matematiksel modellerin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. İncelenen literatürde araştırma çalışmalarının çoğunluğu tedarik zinciri ağı optimizasyonu için sadece toplam maliyet minimizasyonu ya da kar maksimizasyonu yapan karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modelleri geliştirmek üzerine yoğunlaşmıştır. Bunun dışında tedarik zinciri ağı optimizasyonunda yaygın olarak, karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama (MILNP) modelleri, stokastik karma tamsayılı programlamanın (SMILP) yanı sıra coğrafi bilgi sistemi (GIS) temelli modeller ve simülasyon modelleri geliştirilmiştir. Literatür taraması, biyokütle temelli enerji tedarik zinciri modellerinin geliştirilmesi konusunda çok sayıda araştırmanın yapıldığını göstermektedir. Bunlardan bazıları burada gözden geçirilmiştir.

Biyokütle temelli enerji tedarik zincirlerinde karar vermede giriş bölümünde belirtildiği gibi belirsizlik önemli bir rol oynamaktadır. İncelenen çalışmalarda belirsizlikler senaryolar oluşturularak dikkate alınmıştır. Çoğunlukla verim, talep ve fiyat gibi çeşitli belirsizliklerin tedarik zinciri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ekşioğlu vd. (2009), etanol üretmek amacıyla mısır ve odunsu atık biyokütle kaynağı kullanan biyokütle temelli biyorafineri tedarik zinciri tasarımı için çok dönemli MILP modeli formüle etmiştir. Ayrıca mevcut biyokütle seçeneklerini göz önüne alarak senaryo analizi yapmıştır. Huang vd. (2005), atık biyokütle tedarikinden nihai kullanıcılara kadar tedarik zincirinin tüm aşamalarında maliyeti en aza indirecek şekilde çok aşamalı bir model geliştirmiştir. Nakliye maliyeti, rafineri kapasitesi ve hammadde kullanılabilirliği dahil olmak üzere üç parametreyi göz önünde bulundurarak duyarlılık analizi yapmıştır. Kim vd. (2011), hızlı piroliz ve fisher trops yöntemiyle lignoselülozik biyokütle türlerinin biyoyakıtla dönüştürüldüğü bir sistem için toplam tedarik zinciri maliyetini maksimize eden MILP modeli formüle etmiştir. An vd. (2011), nihai ürün olarak etanol üretilmesi planlanan lignoselülozik biyokütle temelli biyoyakıt tedarik zincirinin toplam kârını maksimize etmek için matematiksel bir model

geliştirmiştir. Biyokütle fiyatı ve verimi ile etanol fiyatı ve talebi gibi belirsizliklerin tedarik zinciri performansı üzerindeki etkisini incelemiştir.

Biyokütle miktarını sınırlayan hava durumu belirsizliğinin etkisini Sharma vd. (2013), aylık zaman aralıklarını kullanarak bir yıllık planlama dönemi boyunca enerji tedarik zinciri maliyetini en aza indirgeyecek bir senaryo optimizasyon modeli tasarlayarak incelemiştir. Leilei Zhang ve Hu (2013), biyokütle kaynağı olarak mısır atıklarının kullanıldığı bir tedarik zinciri ağının maliyetini minimize eden iki ayrı MILP model oluşturmuştur. Bu modelleri yıllık ve dönemsel (aylık) temelde ele almıştır. Dönemsel modelde biyoyakıt talebinin duyarlılığını göz önünde bulundurmıştır. Zhang vd. (2013), lignoselülozik ham maddeden biyoetanol üretimini ticarileştirmeyi amaçlamıştır. Bunun için toplam tedarik zinciri maliyetini en aza indirecek MILP modeli önermiştir. Hasat yöntemleri, biyorafineri lokasyonları ve lignoselülozik biyokütle verimi ve biyoetanol talebinin tedarik zinciri üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Paulo vd. (2015), orman atıklarından biyoenerji üreten bir biyoenerji tedarik zinciri ağı tasarımı için MILP modeli geliştirmiştir. Tedarik zinciri ağı üzerindeki etkisini anlamak için biyokütle bulunabilirliği, taşımacılık, üretim ve yatırım maliyetleri üzerine bir duyarlılık analizi yapmıştır. Duarte vd. (2016), Coffee Cut Stem (Coffee-CS) olarak bilinen tarımsal kalıntıdan sürdürülebilir biyoyakıt tedarik zinciri tasarımı için maksimum fayda sağlamayı amaçlayan MILP modeli önermiştir. CO₂ fiyatının tedarik zinciri üzerindeki etkisini duyarlılık analizi yaparak değerlendirmiştir. Sharifzadeh vd. (2015), biyokütle verimi ve yakıt talebi belirsizlikleri altında toplam tedarik zinciri net bugünkü değerini optimize eden MILP modeli önermiştir. Bairamzadeh vd. (2018), biyokütle dönüşüm teknolojisi, biyokütle verimi ve yakıt talebi gibi farklı belirsizliklere bağlı olarak biyoyakıt tedarik zinciri ağınının toplam maliyeti minimize etmeyi amaçlayan MILP modeli önermiştir. Yılmaz Balaman ve Selim (2015), anaerobik sindirime dayalı biyoenerji tedarik zincirleri tasarlamak için çok periyotlu bir MILP modeli önermiştir. Duyalılık analizinde yıllık işletme maliyeti ve tesislerde sadece hayvansal atık biyokütle kullanımının etkisini incelemiştir. Jensen vd. (2017), saman, şeker pancarı ve gübrenin birlikte anaerobik sindirimi ile biyogaz üreten ve nihai ürün olarak kojenerasyon sisteminde doğal gaz, ısı ve elektrik elde eden

bir biyokütle tedarik zincirinde toplam maliyeti minimize eden bir MILP modeli formüle etmiştir. Fiyat, talep ve sübvansiyonlar için duyarlılık analizi yapmıştır. Zhang vd. (2017) ham madde olarak orman biyokütlesinin kullanıldığı ve toplam sistem maliyetinin minimize edilmesinin amaçlandığı bir tedarik zinciri ağı tasarlamak için MILP modeli formüle etmeye odaklanmıştır. Önerdiği çalışmada, Coğrafi Bilgi Sistemi (GIS) temelli yaklaşım ile tesis lokasyonlarını önceden belirleyip optimizasyon modelleme yöntemi için girdi olarak kullanmıştır. Etanol talebi ve biyokütle kullanılabilirliği belirsizliklerinin duyarlılığını incelemiştir.

Son yıllarda matematiksel modelleme teknikleri biyokütle temelli enerji tedarik zinciri yönetiminin ekonomik, çevresel ve sosyal faydalarını dikkate alacak şekilde geliştirilmiştir. Tedarik zincirlerinde ekonomik optimizasyonun yanında çevresel ve sosyal değerler yaratmak sürdürülebilir çözümler sağlamaktadır. Hugo ve Pistikopoulos (2005), tedarik zinciri ağını optimize etmek için ekonomik ve çevresel hedefleri dikkate alarak çok amaçlı MILP modeli formüle etmiştir. Giarola vd. (2011), biyokütle temelli bir biyoetanol tedarik zincirinin çevresel ve ekonomik performanslarını eşzamanlı olarak optimize etmek için çok dönemli ve çok amaçlı MILP çerçevesi sunmuştur. Kanzian vd. (2013), odunsu biyokütle kaynağının ham madde olarak seçildiği bir tedarik zincirinin toplam kârının maksimize edilmesi ve CO₂ emisyonlarının en aza indirilmesi için çok amaçlı bir optimizasyon modeli oluşturmuştur. Gelirin tedarik zinciri üzerindeki etkisini belirlemek için duyarlılık analizi yapmıştır. Jonker vd. (2016), 2012-2030 yılları arasında toplam etanol üretim maliyetlerini düşürmeyi ve üretilen etanolün sera gazı emisyon yoğunluğunu sınırlamayı amaçlayan MILP modeli formüle etmiştir. Mirkouei vd. (2017), karma biyokütle temelli enerji tedarik zincirinin üst düzey zorluklarını ele almak için çok amaçlı bir karar verme çerçevesi önermiştir. Orman biyokütlesinin kullanılabilirliği ve mobil biyorafineri maliyetinin tedarik zinciri üzerindeki etkisini incelemek için duyarlılık analizi yapmıştır. Osmani ve Zhang (2017), belirsizlikler altında çok amaçlı ve çok dönemli sürdürülebilir biyoetanol tedarik zincirinin optimizasyonu için MILP modeli önermiştir. Birbiriyle çelişen ekonomik, çevresel ve sosyal amaçların birlikte çözümü için ϵ -constraint yaklaşımını kullanmıştır.

İlgili literatür taramasında biyokütle temelli enerji tedarik zincirini değerlendirmek için matematiksel programlama teknikleri arasında en çok MILP modelinin kullanıldığı görülmektedir. Ancak çoğu araştırmacının aksine Corsano, vd. (2011), şeker kamışından şeker/bitoeanol üretiminin sürdürülebilir tedarik zinciri ağı tasarımı için MINLP modeli önermiştir. Çeşitli parametrelerin sürdürülebilir üretim ve dağıtım üzerindeki etkisini incelemek için senaryo analizi yapmıştır. Čuček vd. (2012), çeşitli biyokütle tipleri, süreçleri ve nihai ürünlerin biyokütle enerji tedarik zincirlerinin optimum tasarımı için MINLP modeli geliştirmiştir. Modelinin amacı, karbon ayak izi ile çevresel etkileri değerlendirirken tedarik zincirinin toplam kârını maksimize etmektir. Marufuzzaman ve Ekşioğlu (2017), mevsimsellikten kaynaklanan biyokütle tedarik zincirindeki tıkanıklığı, dinamik nakliye rotalama ve çok modlu tesisler kullanarak gideren ayrıca toplam maliyeti minimize eden MINLP modeli önermiştir. Önerdiği modelin doğrusal bir yaklaşımını hibrid Benders-based rolling horizon algoritmasını kullanarak çözmüştür. Rentizelas vd. (2009), biyokütle ham maddesi olarak tarım atıkları kullanan biyoenerji dönüşüm tesisi yatırımının net bugünkü değerini (NPV) maksimize eden MINLP modeli geliştirmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak genetik algoritma (GA) ve kuadratik programlama (SQP) kullanmıştır. Chen ve Fan (2012), talep ve tedarik belirsizlikleri altında atık biyokütle temelli biyoetanol tedarik zinciri tasarımına odaklanmıştır. Önerdiği çalışmada tedarik zinciri maliyetini minimize etmek için iki aşamalı SMILP modeli geliştirmiştir. Gonela vd. (2015), ekonomik faydayı çevresel ve sosyal kısıtlamalar altında maksimize etmeyi amaçlayan belirsizlikler altında sürdürülebilir hibrit üretim biyoetanol tedarik zinciri tasarlamak için SMILP modeli önermiştir. Shabani ve Sowlati (2016), bir orman temelli biyokütle tesisinin yıllık gelirini belirsizlikleri dikkate alarak maksimize etmek için hibrid çok aşamalı stokastik programlama ve SMILP önermiştir. Biyokütle kalitesindeki belirsizliği MILP modeli kullanarak, biyokütle mevcudiyetindeki belirsizlik çok aşamalı stokastik optimizasyon modeli kullanarak ele almıştır.

Biyokütle tedarik zincirinde Arena simülasyon yazılımı kullanan Zhang vd. (2012), potansiyel tesis lokasyonlarını GIS'a dayalı belirleyip, orman biyokütle kaynağı maliyeti, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarını hesaba katan bir

tedarik zinciri modeli geliştirmiştir. Windisch vd. (2013), iki farklı ülkenin orman biyokütle tedarik zincirlerinin örgütsel ve yönetsel görevlerindeki her faaliyette kullanılan srelerin hesabını ayırık olay simülasyonu yaparak tahmin etmiştir. Her bir tedarik zincirinde yer alan iş süreçlerini ve paydaşları karşılaştırmak için iş süreci haritalama metodolojisini uygulamıştır.

Özetle, incelenen literatür gözden geçirildiğinde çalışmaların çoğunluğunun çeşitli belirsizlik kaynağı altında benzer biyokütle ham maddesi ile biyoyakıt dönüşümüne odaklandığı görülmektedir. Bu alışma, gıda ve yem güvenliği açısından ham madde kaynağı olarak seçilen hayvansal atıklar ile hal atıklarının enerji üretiminde değerlendirilmesi için tasarlanan bir tedarik zinciri modeli uygulamasının yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi açısından güncel literatüre katkı sağlamaktadır.

3. BİYOKÜTLE TEMELLİ ENERJİ TEDARİK ZİNCİRLERİ: KAVRAMSAL VE TEORİK ÇERÇEVE

Bu bölümde biyokütle temelli enerji tedarik zincirlerine genel bir bakış sunularak biyokütle ve biyoenerji ile ilgili temel kavramlar ve tanımlamalar yapılmıştır. Bölüm 3.1.'de enerji dönüşüm süreçleri verilmektedir. Bunlara ek olarak bölüm 3.2.'de biyokütle temelli enerji tedarik zincirlerinin yapısı, karar seviyeleri, tedarik zinciri performansını etkileyen sürdürülebilirlik ve belirsizlik kavramları açıklanmıştır.

Biyokütle, hem sanayileşmiş hem de gelişmekte olan ülkeler için modern toplumun enerji ihtiyaçlarına katkıda bulunabilecek yüksek potansiyele sahip yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir.

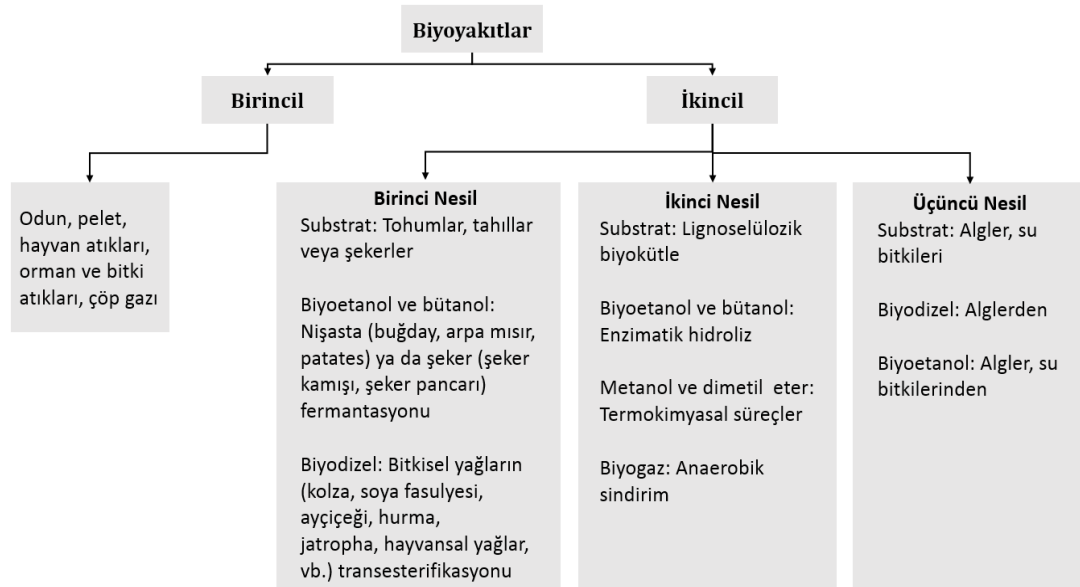
Biyokütle, güneş enerjisini fotosentez yardımıyla depolayan organik maddeler olarak bilinmektedir (Singh vd., 2014). Bitkiler fotosentez süresi boyunca atmosferdeki karbonu organik maddeye dönüştürmektedir. Üretilen organik maddelerin yakılması sonucu karbon atmosfere geri dönmekte ve yakıt olarak kullanılan organik madde ekim ile sürekli olarak yenilenebilmektedir. Böylelikle atmosferdeki karbon salınımının makul bir seviyeye çekilmesi sağlanmaktadır (Karkania vd., 2012).

Biyokütleden doğrudan veya başka bir forma dönüştürülerek elde edilen yakıtlara biyoyakıt denilmektedir. Biyokütle biyoyakıtı dönüştürüldükten sonra ısı ve/veya enerji üretimi için kullanılıyorsa biyoenerji olarak adlandırılır (Melikoglu, 2017). Biyokütleden enerji üretimi için çeşitli biyokütle kaynağı kullanılmaktadır. Kökenine dayalı olarak, biyokütle kaynakları tarımsal ve hayvansal kaynaklar olarak iki ana grup altında sınıflandırılmıştır. Bu kaynaklar şunları içermektedir (Li vd., 2017):

- Odun ve odun atıkları,
- Enerji bitkileri,
- Tarım ürünleri ve atık yan ürünleri,

- Kentsel katı atıklar,
- Hayvan atıkları,
- Su bitkileri ve algler,
- Tarım ve gıda endüstrisinden elde edilen atıklar.

Biyoyakıtlar, birincil ve ikincil biyoyakıt olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Birincil biyoyakıtlar; çim, ağaç yongaları ve odun olmak üzere enerji üretimi için doğrudan yakılarak kullanılan işlenmemiş biyokütle türlerinden oluşmaktadır. Genellikle küçük ve büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda pişirme yakıtı, ısıtma veya elektrik enerjisi ihtiyaçlarını karşılamaktadır. İkincil biyoyakıtlar; katı (kömür) veya sıvı (etanol, biyodizel) veya gaz (biyogaz, hidrojen) formunda üretilen işlenmiş olan birincil biyoyakıtlardır. Ulaşım ve endüstriyel süreçler de dahil olmak üzere birçok uygulama alanı için kullanılmaktadır. İkincil biyoyakıtlar ayrıca, üretimleri için biyokütle kaynağı ve seçilen süreç türüne bağlı olarak birinci, ikinci ve üçüncü nesil biyoyakıtlar olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. Her kategoride farklı biyokütle kaynağından üretilen bir dizi farklı yakıt bulunmaktadır. Şekil 3.1’de bu biyoyakıt türlerinden bazıları gösterilmiştir (Nigam ve Singh, 2011).



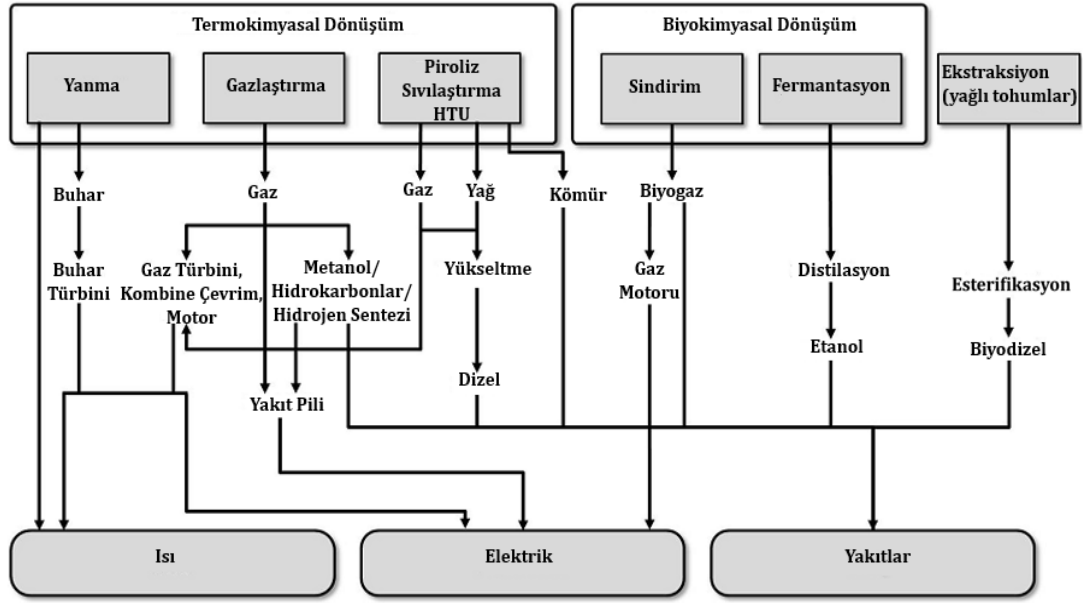
Şekil 3.1. Biyoyakıtların sınıflandırılması (Nigam ve Singh, 2011)

Enerji kaynağı olarak biyokütle kullanımının sağladığı faydalar aşağıda özetlenmiştir (Vávrová vd., 2017; Beis vd., 2002; Zhang vd., 2007; Abbasi vd., 2010; Demirbaş, 2001):

- Biyokütle, enerji üretimi için kullanılan yakıtların çeşitlendirilmesine katkıda bulunan, kolay depolabilir ve taşınabilir yenilenebilir bir enerji kaynağıdır.
- Biyoyakıtlara dönüştürülebilen biyokütle, nihai tüketiciler tarafından kurulan mevcut teknolojilerde ya da elektrik/ısı üreten tesislerde kullanılabilir.
- Biyokütlenin enerji üretimi için kullanımı fosil yakıt bağımlılığının azaltılmasına katkı sağlamaktadır.
- Biyokütle, atmosferdeki karbondioksit dengesini fotosentez işlemiyle nötrleştirme avantajına sahiptir. Biyokütle yakıldığında ya da biyoyakıtlara dönüştürüldükten sonra kullanıldığında atmosfere salınan CO₂ (karbondioksit) fotosentez ile bitkiler tarafından kullanılır ve bu nedenle atmosferdeki karbon seviyesini artırmaz.
- Atık biyokütleden enerji üretimi ile atıkların etkili bir şekilde değerlendirilmesi sağlanmaktadır.
- Biyokütleden enerji üretimi ile yaratılan iş imkânları gelir ve istihdam düzeyinin artmasına yardımcı olmaktadır.

3.1. Biyokütleden Enerji Dönüşüm Süreçleri

Yenilenebilir enerji kaynağı olan biyokütleden bir dizi farklı süreç ve teknoloji kullanılarak elektrik enerjisi, ısı enerjisi ve enerji taşıyıcıları elde edilmektedir. Dönüşüm sürecinin seçimi; biyokütle hammaddesinin türü ve miktarına, son kullanım gereksinimine göre enerjinin istenen formuna, çevresel standartlara, ekonomik koşullara ve projeye özgü faktörlere bağlıdır. Biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesi üç ana süreç kullanılarak gerçekleştirilmektedir: termokimyasal, biyokimyasal ve mekanik ekstraksiyon (McKendry, 2002). Şekil 3.2 biyokütleye uygulanan süreçler ve oluşan ürünleri göstermektedir.



Şekil 3.2. Biyokütlenin enerjiye dönüşüm yolları (Faaij, 2006)

3.1.1. Termokimyasal Dönüşüm Süreçleri

Biyokütlenin termokimyasal dönüşümü için dört ana süreç kullanılmaktadır; yanma, gazlaştırma, piroliz ve sıvılaştırma / hidrojenasyon (HTU).

3.1.1.1. Doğrudan Yakma (Yanma)

Biyokütle içinde depolanan kimyasal enerjinin ısı enerjisi, mekanik güç veya elektrik enerjisine dönüştürülmesi için buhar türbini, fırın, soba, kazan gibi farklı ekipmanlar kullanarak doğrudan havada yakılması işlemidir. Her tür biyokütleyi yakmak mümkündür ancak pratikte yakma prosesi sadece %50'den az bir nem içeriğine sahip biyokütleyle uygulanmaktadır (Kumar vd., 2015).

3.1.1.2. Gazlaştırma

Biyokütlenin yüksek sıcaklıklarda (800-900 °C) kısmi oksidasyonu ile yanıcı bir gaz karışımına dönüştürüldüğü bir süreçtir. Üretilen gaz karışımları, enerji üretimi için yakılan veya ulaşımda kullanılan yakıtların sentezlenmesi için işlenen ara enerji taşıyıcılarıdır (Srirangan vd., 2012).

Biyokütle gazlaştırma, gaz türbinli sistemlerin yardımıyla girdi maliyetini azaltmak ve süreç verimliliğini artırmak için uygulanabilmektedir. Biyokütle, gaz türbinli kombine çevrim sistemlerinde kullanıldığında %50'ye varan dönüşüm verimliliğine ulaşmaktadır (Naqvi vd., 2018).

3.1.1.3. Piroliz

Biyokütlenin oksijensiz bir ortamda ve yüksek sıcaklıkta sıvı (biyo- yağ), katı (odun kömürü) ve gaz formundaki yakıtlara dönüştürüldüğü bir süreçtir (Ni vd., 2006). Piroliz sonucu elde edilen yakıtların oranı sıcaklık ve ısıtma hızına bağlı olarak değişmektedir (van de Kaa vd., 2017).

Düşük sıcaklıklarda ve uzun ısıtma süreleri sonucunda odun kömürü üretimi gerçekleşmektedir. Orta sıcaklıklarda ve kısa ısıtma sürelerinde sıvı formda (biyo-yağ), yüksek sıcaklık ve uzun ısıtma sürelerinde de gaz formunda yakıt elde edilmektedir (Bridgwater, 2012).

3.1.1.4. Sıvılaştırma / Hidrojenerasyon (HTU)

Biyokütlenin düşük sıcaklık ve yüksek basınçta, suda veya uygun bir çözücü içinde küçük moleküllu yapılara dönüştürülmesi sonucu sıvı ürünlerin elde edildiği bir süreçtir. Sıvılaştırma, daha düşük sıcaklık ve daha yüksek basınç kullanılması dışında nihai ürünler açısından piroliz ile benzer özelliklere sahiptir ancak sıvılaştırma reaktörleri ve yakıt besleme sistemleri piroliz ile karşılaştırıldığında daha karmaşık ve daha pahalıdır (Zhang vd., 2010).

Hidrojenerasyon, yüksek basınçta ve ıslak bir ortamda biyokütleyi kısmen oksijenlenmiş hidrokarbonlara dönüştüren bir süreçtir (McKendry, 2002).

3.1.2. Biyokimyasal Dönüşüm Süreçleri

Biyokütlenin biyokimyasal dönüşümü için iki ana süreç kullanılmaktadır; fermentasyon ve anaerobik sindirim.

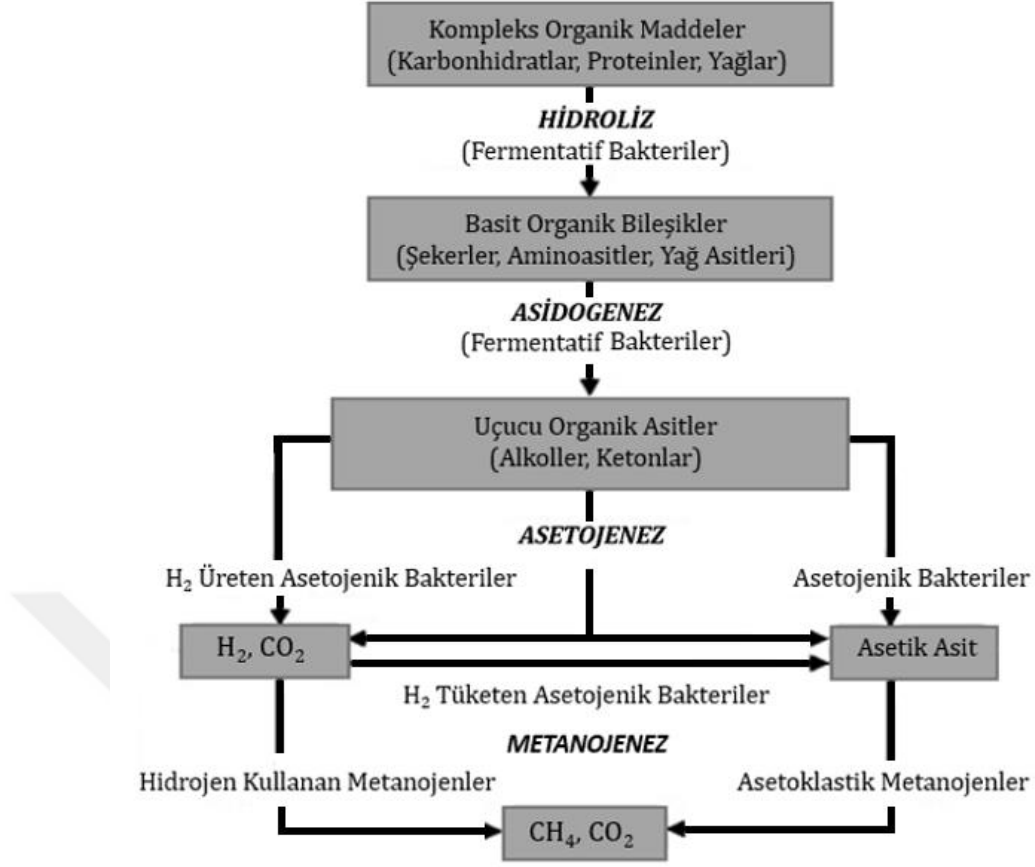
3.1.2.1. Fermantasyon

Medeniyetinin başlangıcından beri insanlar yiyecek (yoğurt) ve içecek (şarap) üretmenin ekonomik ve çevre dostu yöntemlerinden biri olarak fermantasyonu kullanmıştır. Fermantasyon; mısır, buğday, patates, şeker kamışı ve pekmez gibi biyokütle kaynaklarından etanol üretmek için geniş çapta ticari olarak kullanılmaktadır (Ma vd., 2016). Temel olarak sakkarozun hidrolizi ve fermentasyonunu içeren bir biyokimyasal süreçtir. Bu işlemde başlangıçta sakkarozun enzim hidrolizi gerçekleşir. Daha sonra fruktoz ve glukozaya dönüşür. Etanol oluşturma süreci sırasıyla fermantasyon, damıtma ve dehidrasyon şeklindedir (Thomas vd., 2017).

3.1.2.2. Anaerobik Sindirim

Anaerobik sindirim, biyokütle ham maddelerinin oksijensiz bir ortamda mikroorganizmalar tarafından parçalanarak biyogaza (% 50-80 oranında metan ve % 30-50 oranında karbon dioksit) dönüştürüldüğü bir süreçtir (Grando vd., 2017).

Anaerobik sindirim süreci hidroliz, asidogenez, asetojeniz ve metanojeniz olmak üzere dört ardışık aşama ile karakterize edilir (Madsen vd., 2011). Şekil 3.3 anaerobik sindirimde yer alan aşamalara genel bir bakış sunmaktadır.



Şekil 3.3. Anaerobik sindirim aşamaları (Moraes vd., 2015)

Anaerobik sindirim herhangi bir ön işlem gerektirmeden ıslak biyokütlenin (% 40'ın altında kuru madde) işlenmesi için güvenilir bir süreçtir (Appels vd., 2011; Akbi vd., 2017). Anaerobik sindirim, besleme stoğunun toplam katı içeriğine ıslak ve kuru anaerobik sindirim olarak kategorize edilir. Kuru anaerobik sindirimde sindirilecek besleme stoklarının katı içeriği %15 ile %40 arasında değişmektedir (Li vd., 2011). Islak anaerobik sindirimde sindirilecek besleme stoklarının katı içeriği ise %15'in altında olmaktadır (Brown vd., 2012).

Anaerobik sindirim için seçilen biyokütle kaynakları karıştırılarak önceden belirlenen miktarda sindirici adı verilen bir reaktöre beslenmektedir. Belirli bir süre sonra sindirici içerisinde çeşitli mikroorganizmalar tarafından biyogaz oluşumu sağlanmaktadır. Sindiricilerin biyogaz üretim miktarı ve kalitesini sıcaklık, pH, karbon/azot (C/N) oranı, hidrolik bekletme süresi (HRT) ve organik yükleme hızı (OLR) gibi faktörler etkilemektedir.

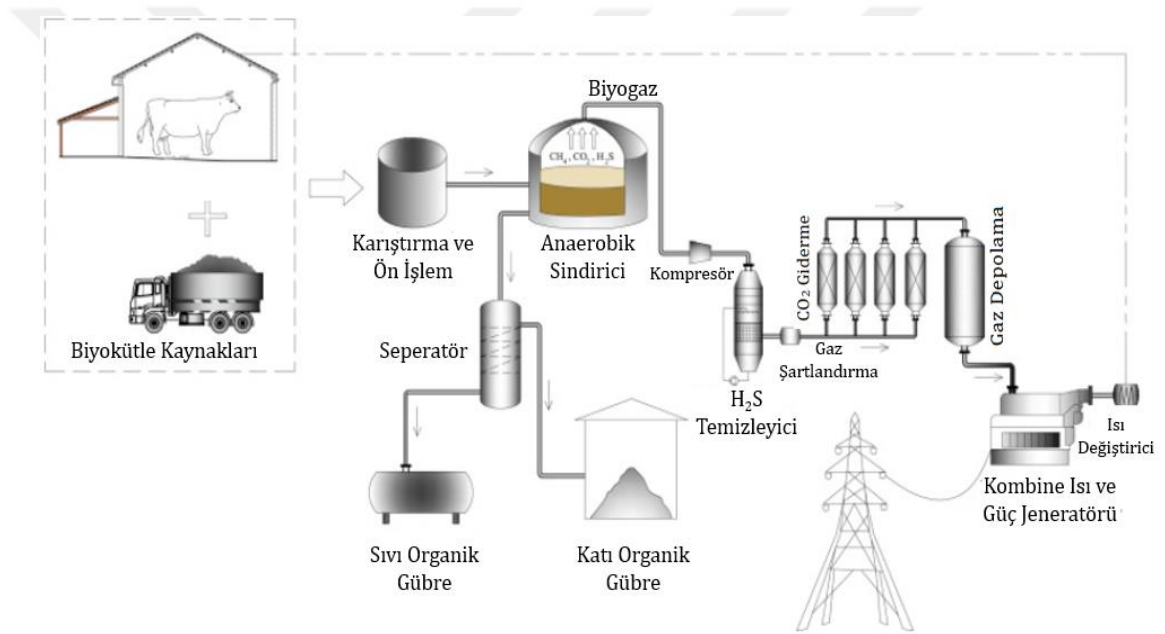
- Sıcaklık: Anaerobik sindirimde uygulanan iki farklı sıcaklık seviyesi kullanılmaktadır. Bunlar mezofilik ve termofilik sıcaklıklardır. Mezofilik anaerobik sindirim optimal olarak 35 ile 40°C arasında, termofilik anaerobik sindirim optimal olarak 55 ile 70 °C arasında gerçekleşmektedir (Choong vd., 2018).
- pH: Anerobik sindirim gelişimini ve nihai ürünleri doğrudan etkileyen önemli bir performans parametresidir. Anerobik sindirim için en uygun pH değeri 6.8 ile 7.4 arasındadır (Mao vd., 2015).
- Karbon/Azot (C/N) Oranı: Organik maddelerde bulunan karbon ve azot miktarı arasındaki ilişkiyi temsil eder ve anaerobik sindirim sürecinin kontrol edilmesinde önemli bir rol oynar. Optimal düzeyde anaerobik sindirim için C/N oranının 25/1 ile 30/1 arasında olması gerekmektedir (Wang vd., 2012).
- Hidrolik Bekletme Süresi (HRT) ve Organik Yükleme Hızı (OLR): Anaerobik sindirim sistemi gelişimini ve nihai ürünlerin etkileyen bir başka önemli kontrol parametresidir. HRT, organik maddenin sindirici içerisinde bekletildiği süre olarak tanımlanmaktadır. OLR, belirli bir zamanda birim sindirici hacmi başına organik madde miktarıdır. Standart değerler organik madde türü ve sindiriciler için farklılık göstermektedir.

Biyogaz; kombine ısı ve güç (CHP) üretimi, ulaştırma yakıtı ve doğal gaz gibi son kullanım uygulamaları potansiyeline sahip yenilenebilir enerji taşıyıcısıdır (Surendra vd., 2014). Kombine ısı ve güç (CHP) olarak bilinen kojenerasyon, tek bir yakıt kaynağından elektrik ve ısı enerjisi üretmek için kullanılan yüksek verimli bir sistemdir (Ren vd., 2008). Kojenerasyon sistemi çoğunlukla biyogazın enerjiye dönüştürülmesinde kullanılmaktadır (Yağlı vd., 2016).

Kojenerasyon sistemlerinde, yakıtlar toplamda %90'a varan bir verimlilikle ısı ve elektrik enerjisine dönüşmektedir (Navarro vd., 2018). Elektrik üretim sürecinde ortaya çıkan ısının geri kazanımı sistemin yüksek verimlilik ile çalışması

sağlanmaktadır (Nelson vd., 2018). Kojenerasyon sistemlerinde üretilen elektrik enerjisi genellikle ulusal elektrik şebekesine beslenmektedir. Üretilen ısı ise tesiste duyulur veya gizli ısı olarak depolanmakta (Vögelin vd., 2017) ya da bölge ısıtma sistemi aracılığı ile tüketicilere dağıtılmaktadır (Holm-Nielsen vd., 2009).

Anaerobik sindiriminden elde edilen bir diğer ürün sindirim artığı olarak adlandırılan organik gübredir. Sindirim artığı, tarım alanlarında yüksek kaliteli sıvı organik gübre olarak ya da bir seperatörden geçirilerek katı ve sıvı organik gübre olarak kullanılabilir. Şekil 3.4'te biyokütle tedarikinden nihai ürün üretimine kadar bir biyogaz tesisinin akışı ve bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Tipik bir biyogaz tesisinin akış diyagramı (Neshat vd., 2017)

Şekil 3.4'te gösterilen akış diyagramındaki her bir bileşen aşağıda açıklanmıştır:

- Çeşitli biyokütle kaynaklarının tedarik edilmesi,
- Tedarik edilen biyokütle kaynaklarının sindiriciye beslenmeden önce homojen hale getirilmesi için ön işlem tankı,
- Anaerobik sindirimin gerçekleştiği sindirici,

- Üretilen biyogazın içeriğindeki safsızlıkları uzaklaştırmak için temizleme cihazlarından oluşan şartlandırma hattı,
- Sindirilmiş biyokütleyi katı ve sıvı faza ayırmak için seperatör,
- Sindirim artığı organik gübreleri depolamak için katı – sıvı gübre deposu,
- Elektrik ve ısı enerjisi üretmek için kojenerasyon sistemi.

Anaerobik sindirim yoluyla biyogaz üretiminin sunduğu bazı avantajlar şunlardır (Edwards vd., 2015; Ward vd., 2008; Bharathiraja vd., 2018; Grando vd.,2017; Hamawand, 2015; Maghanaki vd., 2013):

- Anaerobik sindirimde organik atıkların işlenmesi ile hem yenilenebilir enerji üretimi hem de atık yönetimi sağlanmaktadır.
- Biyogaz üretiminin kapalı bir ortamda yapılması zararlı bir gaz olan metanın atmosfere karışmasını engeller ve ardından biyogazın yakılması ile karbon nötr enerji kaynağı üretilir
- Isı ve elektrik enerjisi için alternatif kaynak olan biyogaz, azaltılmış seviyelerde sera gazı sağlayarak ormanların ve biyoçeşitliliğin korunmasına yardımcı olur.
- Biyogaz kullanımı petrol bağımlılığını azaltarak ve çevreye daha az zarar vererek enerji sağlayarak sürdürülebilir bir toplum yaratmaya teşvik eder.
- Anaerobik sindirim artığı organik gübre tarım endüstrisinde mineral gübre kullanımının azaltılmasına veya ikame edilmesine katkıda bulunur.
- Kırsal alanlarda sosyal ve ekonomik gelişim düzeyinin artırılmasına katkıda bulunur.

3.1.3. Mekanik Ekstraksiyon

Pamuk, yerfıstığı ve kolza tohumu gibi çeşitli yağlı tohumlu biyokütle kaynaklarının yağının çıkarılması için kullanılan bir dönüştürme işlemidir. Süreç sonunda elde edilen mekanik ekstraksiyon kalıntısı hayvan yemi olarak kullanılabilir. Kolza tohumunun alkol ile reaksiyona sokulduğu

esterifikasyon olarak adlandırılan işlem sonucunda biyodizel elde edilmektedir (McKendry, 2002).

3.2. Biyokütle Temelli Enerji Tedarik Zincirleri

Tedarik zinciri; tedarikçi, üretici, dağıtıcı, perakendeci gibi çeşitli ticari kuruluşların bir araya gelerek hammaddenin tedarik edilmesinden nihai ürünlerin müşterilere teslim edilmesine kadar ilgili tüm faaliyetlerin gerçekleşmesinin sağlandığı bütünlük bir ağıdır (Beamon ve Benita, 1998). Tedarik zinciri ağı tedarikçiler, üreticiler, dağıtıcılar, üçüncü parti lojistik sağlayıcıları, perakendeciler ve müşteriler olmak üzere birden fazla bileşenden oluşmaktadır (Min ve Zhou, 2002).

Geleneksel olarak tedarik zinciri boyunca üreticiler, toptancılar ve perakendeciler kendi kârlarını maksimize etmeye çalışan ayrı ticari kuruluşlardır, ancak bu hedef bir bütün olarak ele alındığında sistem için kâr üreteceği bilinmektedir (Fahimnia vd., 2013). Bu bileşenlerin tek bir tedarik zincirine entegre edilebildiği bir mekanizmaya ihtiyaç vardır ve tedarik zinciri yönetimi böyle bir entegrasyonun gerçekleştirilebileceği bir stratejidir.

1990'ların başında ortaya çıkan tedarik zinciri yönetimi kavramı, tedarik zincirinin bir bütün olarak beklenmedik/istenmeyen olaylarının ağ yoluyla yayılmasını azaltmak (Azaron vd., 2008) ve rekabet gücünü arttırmak amacıyla tüm bileşenler arasında malzeme, bilgi ve nakit akışlarını koordine etmeyi ve entegre etmeyi içermektedir (Stadtler, 2005).

Biyokütle tedarikçileri, biyokütle depoları, ön işleme tesisleri, dönüştürme tesisleri ve taşıma modu olmak üzere beş ana bileşenden oluşan biyokütle temelli enerji tedarik zinciri, biyokütlenin hasat edilmesinden dönüşüm tesislerine taşınmasına kadar birçok farklı süreçten meydana gelmektedir (Sharma vd., 2013). Biyokütle temelli enerji tedarik zinciri geleneksel tedarik zincirlerinden birçok açıdan farklılık gösterir. Bunlar arasında, taşıma ve depolama faaliyetleri üzerinde etkileri olan tarımsal biyokütlenin mevsimsel kullanılabilirliği, talep

değişimleri ve biyokütle materyallerinin değişkenliği yer almaktadır. Bu nedenle, biyokütle temelli enerji tedarik zinciri yönetiminin ana hedefleri, tedarik zinciri boyunca maliyetleri ve çevresel etkileri minimize edip sürekli hammadde tedariki sağlamaktır (Mafakheri ve Nasiri, 2014). Optimum biyokütle temelli enerji tedarik zinciri konfigürasyonu aşağıdaki kararları içermektedir (Papapostolou vd., 2011).

- Biyokütle ham maddelerin seçimi ve yerli tarım ya da ithalat,
- Depolama ve taşıma nakliye maliyetlerini azaltmak için ön işleme tesisi,
- Dönüşüm tesisinin yeri, kapasitesi ve süreç seçimi,
- Biyokütle depolarının yeri ve kapasitesi,
- İç talebin kendi üretiminden memnuniyet,
- Taşıma ağı tasarımı.

3.2.1. Biyokütle Temelli Enerji Tedarik Zincirlerinde Ana Operasyonlar

Bir biyokütle temelli enerji tedarik zincirinin çeşitli durumlarında karar problemleriyle başa çıkmak için geliştirilen modeller biyokütle hasadı ve toplanması, biyokütle ön işleme, biyokütle depolama ve biyokütle taşımacılığı olmak üzere çeşitli ana operasyonlar ile koordine edilmektedir. Aşağıda bu ana operasyonlar genel olarak açıklanmıştır.

3.2.1.1. Biyokütle Hasadı ve Toplanması

Biyokütle kaynaklarının çoğu ekilen, yetiştirilen ve hasat edilen bir büyüme döngüsünden geçen bitkisel maddelerdir. Bitkisel biyokütle kaynaklarının tarlalardan toplanması ve uzaklaştırılması için hasat edilmesi gerekmektedir.

Toplama yöntemi, verimlilik ve maliyet açısından depolama ve taşımayı etkilemektedir. Biyokütle toplama faaliyetleri başlıca balyalama, kuru doğrama, ıslak doğrama, çok geçişli hasat, tek geçişli hasat ve tüm ürün hasadından oluşmaktadır.

Mahsul atıkları tarımsal ürünlerin hasatından sonra toplanmaktadır. Birkaç yıl içinde büyüyen orman atıklarının mevsimsel kullanılabilirliği mahsul atıkları ile karşılaştırıldığında daha fazladır. Orman atıkları genellikle tüm yıl boyunca kullanılabilir. Bununla birlikte toplama verimi farklı aylarda değişebilir.

Enerji bitkilerinin verimini hasat sıklığı ve zamanlaması etkilemektedir. Bundan dolayı enerji bitkisinin tedarik miktarını ve kalitesini garanti altına almak için dikkatli bir planlama ve çizelgeleme yapılması gereklidir.

Bitkisel biyokütlenin mevsimsel kullanılabilirliği tedarik edilmesini etkilemektedir ancak yakıt talebi tüm yıl boyunca devam etmektedir. Bu nedenle biyorafinerilerde üretimin sürekliliğini sağlamak için biyokütle depolamasını yönetmek gereklidir (Yue vd., 2014; Atashbar vd., 2016).

3.2.1.2. Biyokütle Ön İşleme

Ön işleme; ham biyokütlenin dönüşüm verimliliğini artırmak, daha uzun süre depolanmasını sağlamak, taşıma faaliyetleri ile nakliye faaliyetlerini kolaylaştırmak ve tedarik zincirinin ilgili maliyetlerini azaltmak açısından daha yüksek değerli malzemeye dönüştürülmesi işlemidir (Mafakheri ve Nasiri, 2014).

Boyut küçültme, kurutma, torrefaction ve peletleme yaygın olarak kullanılan ön işleme tekniklerinden bazılarıdır. Boyut küçültme ve peletleme bir sonraki ön işlem süreci veya gazlaştırma için uygun bir parçacık boyutu elde etmek yapılan bir işlemdir (Widjaya vd., 2018).

Kurutma, biyokütlenin bozulmadan uzun süre depolanabilmesi ile birlikte çeşitli dönüşüm sürecini olumsuz etkileyen nem içeriğini azaltmak için uygulanır. Genel olarak biyokütle, elektrikli kurutucular ve güneşte kurutma yolu ile kurutulur (Sansaniwal vd., 2017).

Torrefaction, oksijen yokluğunda atmosfer basıncında 200 ile 300 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen termal ön işleme teknolojisidir. Bu işlem sonucunda

çok düşük nem içeriğine sahip ham biyokütle ile kıyaslandığında yüksek kalorifik değere sahip katı bir ürün üretilir (Uslu vd., 2008).

Peletleme, biyokütlenin silindirik parçalarını üretmek için yüksek basınç altında biyokütlenin kurutulması ve preslenmesi işlemidir. Peletler odun yongalarına göre daha küçük bir hacme ve daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olduğundan depolamak, taşımak ve enerjiye dönüştürmek için daha etkilidir (Uslu vd., 2008). Tüm biyokütle kaynaklarının bir ön muameleye tabi tutulması gerekmemektedir.

3.2.1.3. Biyokütle Depolama

Birçok biyokütle kaynağı mevsimsel kullanılabilirlik ile karakterize edilir ancak biyokütle kaynakları dönüşüm tesisleri için yıl boyunca gereklidir. Bu nedenle, dönüşüm tesislerinde üretim yapabilmesi için gerekli besleme stoğukunu istikrarlı olarak sağlayacak şekilde biyokütlenin depolanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Biyokütle tedarik zincirlerinde depolama ile ilgili tipik kararlar biyokütle depolarının türü ve konumundan oluşmaktadır. Depoların türünün seçimi esas olarak iklim ve biyokütle kaynaklarının ön işlemine bağlıdır. Hava koşulları yağışlı olan ülkelerde kapalı depolara ihtiyaç duyulmaktadır. Ön işlemden geçen biyokütle kaynakları hava koşullarını tolere edebiliyorsa hem açık hem de kapalı depolarda tutulabilir. Bununla birlikte ön işlemden geçen biyokütle kaynakları hava koşullarından olumsuz şekilde etkileniyorsa kapalı depolarda tutulmalıdır (Gold ve Seuring, 2011).

Biyokütle depoları için uygun bir yer seçimi biyokütle kaynağının türü ve taşıma modlarından etkilenmektedir. Biyokütle kaynaklarının sahada depolanması toplam taşıma maliyetlerini düşürmektedir. Biyokütle depoları dönüşüm tesisleri yanında yer alabilir, bu da mevsimsel kullanılabilirliğe bağlı olarak biyokütle artıklarının toplam depolama maliyetinin düşürülmesini sağlar. Ara depolama yerleri mesafe ve kapasite kararları göz önünde bulundurularak biyokütle

tedarik bölgeleri ve dönüşüm tesisleri arasında kullanılabilir (Mafakheri ve Nasiri, 2014) ancak böyle bir durum toplam taşıma maliyetlerini artırabilir.

3.2.1.4. Biyokütle Taşımacılığı

Taşıma, kullanılan model veya analiz yaklaşımı ne olursa olsun tedarik zincirlerinin temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Biyokütle temelli enerji tedarik zincirlerinde, biyokütle kaynaklarının ve nihai ürünlerin başlangıç bölgelerinden varış yerlerine olan hareketinin optimize edilmesi, tedarik zincirinin toplam maliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Taşımanın temel ekonomik değişkeni hız ve mesafeye bağlı olarak değişen seyahat süresidir. Mesafe, gidilen yolların yanı sıra işlenmiş arazi oranı ve biyokütle verimi ile de ilişkilidir. Gerçek mesafe gidilecek güzergâhların optimizasyonu ile azaltılabilmektedir. Hız; yol özellikleri ve altyapısı, taşıma modu (karayolu, demiryolu, su yolu, boru hattı) ile personel ve taşıtların programlamasından etkilenmektedir.

Biyokütlenin hacmi ve kütesinin yanı sıra taşıyıcının kapasitesi de taşımanın bir diğer önemli değişkenidir. Biyokütlenin yığın yoğunluğunu artırarak taşıma kapasitesini maksimize etmek, taşıma yükünün kullanımını optimize etmenin yanı sıra taşıma maliyetlerinin, ilgili çevresel emisyonların ve sosyal yüklerin azaltılmasını sağlamaktadır (Gold ve Seuring, 2011).

Biyokütle ve nihai ürünleri taşımak için taşıma modları arasında baskın olarak karayolu taşımacılığı kullanılmaktadır. Karayolu taşımacılığında yaygın olarak tek bir taşıma moduyla nihai varış noktasına taşıma yapılabilirken demiryolu ve su yolu taşımacılığında genellikle seyahatin en azından bir ucunda karayolu taşımacılığı gerekmektedir. Karayolu taşımacılığı, ulaşım kolaylığı, operasyonel esneklik, geniş ulaşım ağı ve hızlı taşıma özellikleriyle en popüler taşıma modudur (Reis vd., 2013). Kısa mesafeler için en ucuz taşıma modudur, ancak mesafe arttıkça diğer modlardan daha pahalı olmaktadır.

Demiryolu taşımacılığı, yüksek yatırım maliyeti gerektirmesine rağmen karayolu taşımacılığına kıyasla daha güvenilir ve sürdürülebilir bir taşıma modudur. Uzun mesafe taşımaları için gecikmeler kaçınılmaz olmakla birlikte demiryolu taşımacılığı öngörülemez olaylardan ve olumsuz hava şartlarından kaynaklanan gecikmelerden daha az etkilenmektedir. Demiryolu taşımacılığı uzun mesafeli taşımacılık için fiyat avantajı sağlamaktadır (Zhang vd., 2017). Bu nedenle, uzun mesafeli ve büyük hacimli gönderiler için tercih edilen bir taşıma modudur.

Suyolu taşımacılığı; okyanuslar, denizler, göller ve nehirlerde yapılan taşımayı içermektedir. Yüksek yatırım maliyeti gerektirmesine rağmen diğer taşıma modları içinde birim taşıma maliyeti en düşük olanıdır. Uzak mesafelere yapılan uluslararası taşımalar su yolu taşımacılığı ile gerçekleştirilmektedir. Suyolu taşımacılığı büyük hacimli gönderiler için en uygun taşıma modu olmakla birlikte diğer taşıma modlarına göre taşıma süresi oldukça uzundur.

Boru hattı taşımacılığı; ham petrol, rafine edilmiş petrol, doğal gaz ve su gibi likit ya da gaz halinde olan ürünlerin taşınması için kullanılmaktadır. Biyokütle kaynaklarının sulu bir temelde boru hattı ile taşınması biyokütle temelli enerji tesislerinin daha yüksek kapasitelere ulaşmasını sağlayan alternatif bir yaklaşımdır. Bu ulaşım şekli sadece ölçek ekonomilerinden fayda sağlamakla kalmaz aynı zamanda biyokütlenin karayolu taşımacılığı nedeni ile artan endişeleri ve trafik sorunlarını da hafifletmektedir (Vaezi vd., 2014).

Katı-sıvı karışımı üzerine yürütülen ilk sistematik araştırma 1906 yılında küçük boyuttaki hatlar ile başlamış, 1960'lı yıllarda çeşitli katı maddenin hidrolik olarak taşınması için kısa ve uzun katı-sıvı karışım boru hatları inşa edilmiştir. Boru hattı taşımacılığının teknik ve ekonomik avantajları çeşitli sektörlerde uzun mesafe taşımacılık için karayolu, demiryolu ve su yolu gibi geleneksel ulaşım modlarının boru hattı taşımacılığı ile değiştirilmesine teşvik etmiştir. Başlıca avantajları arasında boru hattı ve ilgili ekipmanın yapımında ölçek ekonomilerinin faydaları, büyük taşıma hacmi, sürekli çalışma, hava, yol ve arazi

koşullarından bağımsızlık, taşıyıcı sınıfının tekrar kullanılması ve birden fazla şirket arasında paylaşma imkânı yer almaktadır (Vaezi ve Kumar, 2015).

Yüklerin içinde bulunduğu taşıma ünitesinden (konteyner vb.) aktarılmadan, yalnızca taşıma ünitelerinin aktarılması ile iki veya daha fazla nakil modunu birleştiren intermodal taşımacılık, büyük hacimli ve yüksek yoğunluklu biyokütle taşımacılığı için iyi bir çözüm sunmaktadır. Intermodal taşımacılığın kullanımında artışlar olmasına rağmen biyokütle kaynaklarının taşınmasında konteynerlerin mevcut payı sınırlıdır. Konteynerler biyokütle kaynakları için çok pahalı olup yüksek yatırım maliyetlerine neden olmaktadır. Bu durumdan kaçınmak için konteyner kiralayarak biyokütle kaynaklarının taşımacılığı yapılmaktadır (Lautala vd.,2015).

Özetle, biyokütle temelli enerji tedarik zincirlerinde taşıma aşamasında, seyahat mesafeleri, biyokütle kaynaklarının özellikleri ve yerel altyapıya bağlı olarak çeşitli taşıma modlarının seçimi ile tedarik zincirinin maliyeti ve çevresel etkisinde tasarruf sağlamak mümkündür.

3.2.2. Biyokütle Temelli Enerji Tedarik Zincirlerinde Karar Verme

Karar seviyeleri, tedarik zincirlerinde esas olarak, zaman açısından verilecek kararın kapsamı veya etkisi ile sınıflandırılmaktadır. Tedarik zinciri yönetiminde üç temel karar alma süreci vardır: stratejik, taktiksel ve operasyonel kararlar. Karar seviyeleri arasındaki ayırım planlama ufkuyla dayanmaktadır (Sahebi vd., 2014).

3.2.2.1. Stratejik Kararlar

Stratejik kararlar etkileri uzun vadede olup, genellikle 5 veya daha fazla yıllık uzun bir planlama ufku içerir. Uzun bir planlama ufku için alınan kararlar olduğundan değiştirilmesi zor ve risklidir. Biyokütle temelli enerji tedarik zincirlerinde genel stratejik kararlar şunlardır (Sharma vd., 2013):

- Biyokütle kaynaklarının seçimi,
- Enerji dönüşüm süreçlerinin ve teknolojilerinin seçimi,
- Enerji üretim tesislerinin yeri ve kapasitesi,
- Biyokütle depolarının yeri ve kapasitesi,
- Ön işleme tesislerinin yeri ve kapasitesi,
- Ağ tasarımı,
- Arz ve talep sözleşmeleri,
- Ekonomik, çevresel ve sosyal sürdürülebilirliğin sağlanması.

3.2.2.2. Taktiksel Kararlar

Taktiksel kararlar stratejik hedeflere ulaşmak için gerekli olan, genellikle aylık olarak alınan orta vadeli kararları alma sürecidir. Taktiksel kararlar stratejik kararların alınması ve yürütülmesi için planlanmaktadır. Biyokütle temelli enerji tedarik zincirlerinde genel taktiksel kararlar şunlardır (Awudu ve Zhang, 2012):

- Üretim çizelgeleme,
- Biyokütle kaynaklarının mevcudiyeti ve anlık üretim planının genel stratejisine dayalı olarak nihai ürün için envanter planlaması,
- Taşıma modu seçimi,
- Son kullanıcı gereksinimlerini karşılamak için malzeme, bilgi ve diğer kaynakların verimli akışını sağlamak için lojistik yönetimi.

3.2.2.3. Operasyonel Kararlar

Operasyonel kararlar tesislerin sürekli işleyişini ve tedarik zincirindeki diğer süreçleri sağlayan günlük ve/veya haftalık kısa vadeli kararlardır. Ana hatları verilen taktiksel kararlara ulaşmada yardımcı olmaktadır.

Taktiksel ve operasyonel kararları birbirinden ayırmak için kesin görev sırasının ve/veya başlangıç zamanlarının tanımlanıp tanımlanmadığına bakmak gerekir. Eğer tanımlanmışsa operasyonel düzeyde karar alınmıştır. Biyokütle temelli enerji tedarik zincirlerinde genel taktiksel kararlar şunlardır (Ba vd., 2016):

- Günlük hasat operasyonlarının zamanlaması,
- Detaylı retim yönetimi ve izelgeleme,
- Günlük ve / veya haftalık envanter inceleme,
- Günlük filo yönetimi.

3.2.3. Biyokütle Temelli Enerji Tedarik Zincirlerinde Belirsizlik ve Sürdürülebilirlik Kavramı

Biyokütle temelli enerji tedarik zincirinin doğası gereği tüm aşamalarında belirsizlikler bulunmaktadır. Belirsizlikler tedarik zincirlerinde en etkili performansı belirlemek için karar verme süreçlerine dahil edilmelidir. Biyokütle temelli enerji tedarik zincirlerindeki başlıca belirsizlikler bunlarla sınırlı olmamak kaydıyla; biyokütle tedarikinde belirsizlik, taşımacılık ve lojistik belirsizlikleri, üretim ve işletme belirsizlikleri, talep ve fiyat belirsizlikleri ve diğer belirsizliklerdir (Awudu ve Zhang, 2012):

3.2.3.1. Biyokütle Tedariki Belirsizlikleri

Tedarik belirsizlikleri ham madde verimi, türü ve kalitesi ile karakterize edilir. Biyokütle tedariki konusundaki belirsizlikler hammadde yetersizliği, hasat teknolojisindeki değişiklikler, alternatif yakıt seçeneklerinin çevresel ve ekonomik uygulanabilirliği, piyasa koşullarından kaynaklanan güvenilmez tedarik kaynakları ve ekilebilir arazinin bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Emniyet stokları, çoklu tedarikçiler ve ileriye dönük hammadde alımları tedarik belirsizliklerini aşmak için uygulanan bazı yöntemlerdir.

3.2.3.2. Taşımacılık ve Lojistik Belirsizlikleri

Taşımacılık ve lojistik belirsizlikleri, hem biyokütle kaynaklarının hem de bitmiş ürünlerin zamanında ve uygun maliyetli bir Şekilde teslim edilmemesi, yüksek depo maliyetleri, filo planlamasında gecikmeler ve navlun maliyetinde artışa neden olabilmektedir. rn ve hizmetlerin etkili bir Şekilde sağlanması için taşımacılık ve lojistik belirsizliklerinin dikkate alınması gerekir.

3.2.3.3. Üretim ve İşletme Belirsizlikleri

Üretim ve operasyon belirsizlikleri planlanan üretim miktarının üretilmemesine neden olur. Bu belirsizliklerin bir kısmı hammadde tedariki, makine arızaları, teslimat süresi kısıtlamaları ve stok kararlarındaki gecikmeler ile ilgilidir. Bu tür belirsizlikler göz ardı edilerek karar alındığında tedarik zincirlerinin performansı olumsuz olarak etkilenmektedir.

3.2.3.4. Talep ve Fiyat Belirsizlikleri

Talep belirsizliği, talebin miktar ve zamanlamasında öngörülemeyen değişiklikleri ifade eder. Fiyat belirsizliği, bir ürünün fiyatının değişebileceği ihtimali olarak tanımlanır.

Biyokütle temelli enerji tedarik zincirlerinde talep ve fiyat belirsizlikleri, bunlarla sınırlı olmamakla birlikte hammadde maliyeti, vergi sübvansiyonları, karbon ticareti ve hükümet politikaları hakkındaki belirsizlikleri içerir. Talep ve fiyat belirsizliklerinin karar alma sürecine dahil edilmesi yatırımcılar için kâr elde etme beklentisini azaltabilir.

3.2.3.5. Diğer Belirsizlikler

Diğer belirsizlik türleri genel anlamda sürdürülebilirlik ile hükümet ve düzenleyici politikalar belirsizliklerini içermektedir. Sürdürülebilirlik belirsizlikleri, biyoenerjinin ekonomik ve sosyal yönleri arasındaki farkı kapatmaktır. Kaynakların kullanılmasında sosyal ve çevresel politikaların dikkate alınmaması sürdürülebilirlik kavramına zarar vermektedir. Tedarik zincirlerine sürdürülebilirlik belirsizlikleri entegre edilip sera gazı emisyonlarını değerlendirmek için kullanılabilir.

3.2.3.6. Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilir kalkınma ilk kez 1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu'nca hazırlanan Brundtland Raporu'nda “bugünün ihtiyaçlarını gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden karşılayan kalkınma” olarak tanımlanmıştır (Seuring, 2013). Sürdürülebilirlik ise planlanan sürdürülebilir kalkınmaya ulaşılmasını sağlayan bir süreç ve mekanizma olarak ifade edilmektedir (Sartori vd., 2011).

Sürdürülebilirlik çevresel, ekonomik ve sosyal hedeflerin dikkate alındığı üç boyutlu bir yapı ile karakterize edilmektedir (Fischer vd., 2007). Bu yapılar bütünsel bir sürdürülebilir kalkınmaya ulaşmak için uyumlu hale getirilmelidir. Sürdürülebilirliğin üç boyutlu yapısı aşağıdaki gibidir (Olawumi ve Chan, 2018):

- Çevresel sürdürülebilirlik, insan faaliyetlerinin yeryüzünde egemen olan ekosistemin (enerji, toprak ve su vb.) taşıma kapasitesi içinde sınırlandırılması ve insan hayatının (hava kalitesi, insan sağlığı) kalitesine vurgu yapılması ile ilgilidir.
- Ekonomik sürdürülebilirlik, operasyonel kârı artırmak ve piyasa değerini en üst düzeye çıkarmak için kaynakların verimli kullanımını dikkate alır.
- Sosyal sürdürülebilirlik; halkın toplumsal refahına, bir bireyin ihtiyacını grup ihtiyacı ile dengelemeye (eşitlik), toplumsal farkındalığa ve bağlılığa, yerel işçilerin ve firmaların katılımı ve kullanımına odaklanmaktadır.

Tedarik zincirlerinin tüm aşamaları sürdürülebilirliğin ekonomik, çevresel ve sosyal yönleri ile ilişkilidir. Küreselleşen dünyanın artan rekabet koşullarında, hammadde tedarikçilerinden nihai kullanıcılar müşterilere kadar tüm ağ bileşenlerinin stratejik yönetimi tedarik zinciri ağı tasarımı ve yönetiminin odak noktasıdır dolayısıyla tedarik zinciri ağı tasarımı ve yönetimi organizasyonların sürdürülebilirlik performansını değerlendirmek için etkili bir yöntemdir. (Bastas ve Liyanage, 2018).

Sürdürülebilir bir tedarik zinciri ağı tasarımı, tedarik zinciri boyunca kuruluşlar arası malzeme, bilgi ve nakit akışlarının yönetimine sürdürülebilirliğin üç boyutlu hedeflerinin entegre edilmesiyle gerçekleştirilir.



4. METODOLOJİ

Tedarik zincirlerinde stratejik, taktiksel ve operasyonel düzeyde kararları yönetmek için optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Literatür taramasında görüldüğü üzere biyokütle tedarik zincirlerini optimize etmek için çoğunlukla matematiksel programlama modeli geliştirilmiştir ancak simülasyonu tercih eden araştırmalar da mevcuttur.

Matematiksel programlama, bir dizi kısıt altında bir veya daha fazla değişkenin belirlenen amacını optimize etmek için geliştirilmiş bir yöntemdir (Atashbar vd., 2016). Amaç fonksiyonu, kısıtlar ve değişkenlerin özelliklerine bağlı olarak kullanılan modelleme yaklaşımı değişmektedir.

Bu bölümde sadece önerilen modelin yapısına bağlı olarak kullanılan matematiksel programlama modelleri incelenmiştir.

4.1. Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama

Gerçek dünya problemlerini çözmek amacıyla bir takım teknikler geliştirilmiştir. Doğrusal programlama, bu problemlerin matematiksel olarak ifade edildiği bir optimizasyon tekniğidir. Bir doğrusal programlama modeli en basit şekilde (Borgonovo vd., 2018)

$$\text{Maksimum } Z = cx$$

$$\text{kısıtlar } Ax \leq b \tag{4.1}$$

$$x \geq 0$$

olarak ifade edilmektedir. Modelde, c : n boyutlu satır vektörünü, x : karar değişkenlerinin n boyutlu sütun vektörünü, A : $m \times n$ matrisini, b : m boyutlu sütun vektörünü göstermektedir.

Bazı doğrusal programlama modellerinde sonuçların tamsayı çıkmaması problemin gerçek dünya problemlerine uygunluğunu bozmaktadır. Karma tam

sayılı doğrusal programlama günümüzde yaygın olarak kullanılan bir doğrusal programlama modelidir. Model, karar değişkenlerinin bir kısmının sürekli, bir kısmının ise kesikli değerler almasını sağlamaktadır. Karma tam sayılı doğrusal programlama modelinin gösterimi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Jünger vd., 50 Years IP).

$$\begin{aligned} \text{Maksimum } Z &= cx + hy \\ \text{kısıtlar } Ax + Gy &\leq b \\ x &\geq 0 \text{ ve tamsayı} \\ y &\geq 0 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Burada ise, h : p boyutlu satır vektörünü, G : $m \times p$ matrisini, y : tamsayılı değişkenlerin p boyutlu sütun vektörünü göstermektedir.

4.2. Çok Amaçlı Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama

Klasik doğrusal programlama modelleri tek bir amaç fonksiyonunun optimizasyonu ile karakterize edilmektedir. Gerçek dünya problemleri söz konusu olduğunda çok sayıda amaca sahip durumlar ortaya çıkmaktadır. Çok amaçlı programlama, çok sayıda amacın aynı zamanda gerçekleşmesinin sağlandığı matematiksel bir programlama modelidir. Çok amaçlı programlama modelinin genel matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir (Klamroth vd., 2004):

$$\begin{aligned} \text{Maksimum } Z_1 &= f_1(x) \\ \text{Maksimum } Z_k &= f_k(x) \\ \text{kısıtlar } x &\in S \end{aligned} \tag{4.3}$$

Burada $S \subseteq R^n$ uygulanabilir çözümler kümesi ve $f_i(x)$, $i = 1, \dots, k$ gerçekte değerli fonksiyonları göstermektedir. (4.1.) numaralı denklemin çok amaçlı doğrusal programlama modeli için gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$f_i(x) = c^i x \quad \forall i=1, \dots, k$$

$$S = \left\{ \begin{array}{l} x \in \mathbb{R}^n : Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

Burada; $C = (c^i)_{i=1}^k$: $k \times n$ matrisini, A : $m \times n$ matrisini, b : m boyutlu sütun vektörünü göstermektedir. Böylece çok amaçlı doğrusal programlama

$$\begin{array}{ll} \text{Maksimum } Z = Cx & \\ \text{kısıtlar} \quad Ax \leq b & \\ \quad \quad \quad x \geq 0 & \end{array} \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir. Benzer şekilde (4.1.) numaralı denklemin bazı değişkenlerin tamsayı olmasının istendiği çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli için gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$f_i(x) = c^i x \quad \forall i=1, \dots, k$$

$$S = \left\{ \begin{array}{l} x \in \mathbb{R}^n : Ax \leq b \\ x \geq 0 \text{ ve tamsayı} \end{array} \right\} \quad (4.6)$$

Buradan çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{array}{ll} \text{Maksimum } Z = Cx & \\ \text{kısıtlar} \quad Ax \leq b & \\ \quad \quad \quad x \geq 0 \text{ ve tamsayı} & \end{array} \quad (4.7)$$

4.3. Hedef Programlama

Çok amaçlı programlama modellerinde birbiyle çelişen çoklu amaçları optimum kılan tek bir çözüm bulmak imkansız olabilmektedir. Bu gibi durumlarda optimum çözüm yerine çatışan hedefler arasında mümkün olan en iyi uzlaşmayı sağlayan çözüm teknikleri geliştirilmiştir. Çok amaçlı matematiksel programlama

modellerinin çözümünde kullanılmak üzere geliştirilmiş çözüm tekniklerinden bazıları şunlardır: ağırlıklandırma yaklaşımı, çok amaçlı ayrışım yaklaşımı, hedef programlama yaklaşımı ve ε -constraint yaklaşımıdır. Bu çalışmada, aşağıdaki paragrafta açıklanan hedef programlama yaklaşımı kullanılmıştır.

Hedef programlama (GP), ilk olarak 1955 yılında Charnes, Cooper ve Ferguson tarafından geliştirilen ve 1961 yılında Charnes ve Cooper tarafından daha açık bir şekilde tanımlanan çok amaçlı bir programlama tekniğidir (Tamiz vd., 1998). Hedef programlama, yaygın olarak kullanılan çok amaçlı karar verme yaklaşımıdır. Muazzam popüleritesinin ana nedeni, çeşitli kriterleri, eksik bilgileri ve birçok karar değişkenini ve kısıtlarını içeren karar problemlerini çözmeyi mümkün kılan esnekliğidir. Hedef programlama modellerinde hedeflerin ve hedeflerin başarılmaması arasındaki sapmalar en aza indirilir, yani, istenmeyen sapma değişkenlerinin belirli bir fonksiyonu en aza indirilir (Rodr 2002), GP modelleri üç genel yaklaşımla çözülür: ağırlıklı hedef programlama, öncelikli hedef programlama ve minmax hedef programlama (Jones ve Tamiz, 2010). Bir hedef programlama modelinin genel formülasyonu aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimum} \sum_{i=1}^p (d_i^+ + d_i^-) \\
 & \text{kısıtlar} \quad f_i(x) + d_i^+ + d_i^- = g_i \quad i=1, \dots, p \\
 & \quad \quad \quad x \in D \\
 & \quad \quad \quad d_i^+ + d_i^- \geq 0 \quad i=1, \dots, p
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Burada d_i^+, d_i^- sırasıyla hedeften pozitif ve negatif yönde sapmaları temsil etmektedir (Jayaraman vd., 2015).

4.3.1. Ağırlıklı Hedef Programlama

Amaç fonksiyonlarının ağırlıklandırılması önem dereceleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Ağırlıklandırılmış hedef programlamada tek bir amaç fonksiyonu çeşitli hedefleri temsil eden fonksiyonların ağırlıklı toplamı olarak oluşturulur

(Verma vd., 2009). Ağırlıklı hedef programlama genelleştirilmiş biçiminde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimum} &= \sum_{i=1}^p (w_i^+ d_i^+ + w_i^- d_i^-) \\
 \text{kısıtlar} \quad Z_i(x) + d_i^+ - d_i^- &= G_i \quad i=1, \dots, p \\
 x &\in X \\
 x, d_i^+, d_i^- &\geq 0
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Burada d_i^+, d_i^- sırasıyla hedeften pozitif ve negatif yönde sapmaları, w_i^+, w_i^- sırasıyla pozitif ve negatif sapmalara karşılık gelen pozitif sayısal ağırlıkları temsil etmektedir.

4.3.2. Minmax Hedef Programlama

Bu yaklaşımda hedeften maksimum sapma minimize edilmektedir. Farklı hedeflerin başarıları arasında en dengeli çözümü temsil eden optimal bir çözüm sunmaktadır (Yaghoobi ve Tamiz, 2007). Minmax hedef programlama genel olarak aşağıdaki gibi formüle edilir (Verma vd., 2009):

$$\begin{aligned}
 \text{Minimum} \quad \lambda_i \quad \lambda_i &\geq 0 \\
 Z_i(x) + d_i^- - d_i^+ &= G_i \\
 \lambda_i &\geq d_i^- - d_i^+ \\
 \lambda_i &\geq d_i^+ - d_i^- \\
 x &\in X \\
 x, d_i^+, d_i^- &\geq 0
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Burada d_i^+, d_i^- sırasıyla hedeften pozitif ve negatif yönde sapmaları ifade etmektedir. Eğer pozitif sapmanın d_i^+ herhangi bir değeri için (>0), negatif sapma d_i^- "0" değerini alıyorsa; amaç fonksiyonu $Z_i(x)$ değeri, hedef değerden daha büyük olur. Benzer şekilde, eğer negatif sapmanın d_i^- herhangi bir değeri için (>0) pozitif sapma d_i^+ "0" değerini alıyorsa; amaç fonksiyonu $Z_i(x)$ değeri,

hedef değerden daha küçük olur. λ_i maksimum sapmayı göstermektedir. Bu yaklaşımda, maksimum sapma λ_i minimize edilir. Bu yüzden minmax hedef programlama olarak adlandırılır.

4.3.3. Öncelikli Hedef Programlama

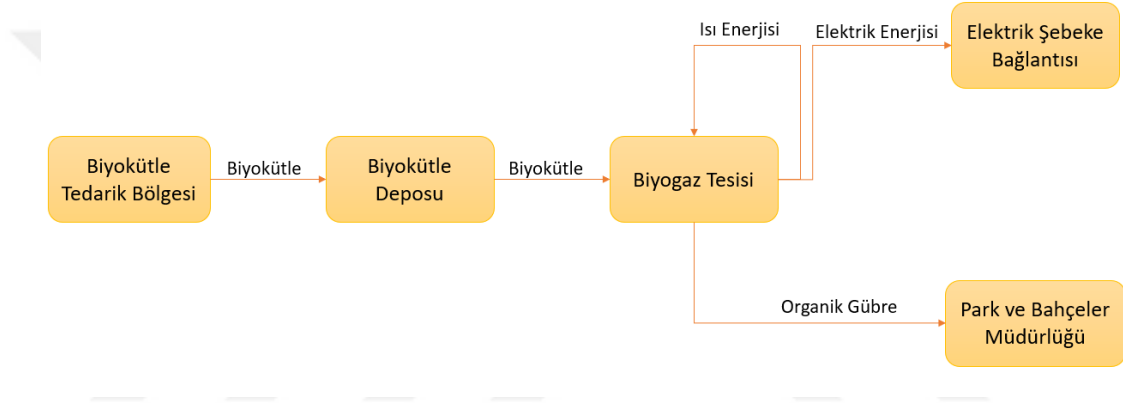
Modelde belirlenen öncelik düzeyinin Q sayısına denk gelen düzenli bir vektörden oluşmaktadır. Bu vektördeki her bileşen ilgili öncelik seviyesine göre yerleştirilmiş hedefin istenmeyen sapma değişkenlerini temsil etmektedir. Öncelikli hedef programlama modelinin gösterimi aşağıdaki gibidir (Liao, 2009):

$$\begin{aligned}
 \text{Minimum} &= \left[\begin{array}{c} \sum_{i \in h_1} (\alpha_i d_{ij}^- + \beta_i d_{ij}^+), \dots, \sum_{i \in h_r} (\alpha_i d_{ij}^- + \beta_i d_{ij}^+), \dots, \\ \sum_{i \in h_Q} (\alpha_i d_{ij}^- + \beta_i d_{ij}^+) \end{array} \right] \\
 \text{kısıtlar } f_i(X) + d_{ij}^- - d_{ij}^+ &= g_i \quad i=1, \dots, n \quad i \in h_r \\
 r &= 1, \dots, Q \\
 d_{ij}^+, d_{ij}^- &\geq 0, \quad \forall i, \forall j \\
 i &= 1, \dots, n \\
 X &\in F
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Burada h_r r. öncelik seviyesinde yer alan hedefler kümesini ve α_i, β_i sırasıyla pozitif ve negatif saptamalara karşılık gelen pozitif sayısal ağırlıkları temsil etmektedir.

5. PROBLEMİN TANIMI ve MODELİN FORMÜLASYONU

Bu çalışma, sürdürülebilirliğin üç boyutunu göz önünde bulundurarak biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zinciri ağı tasarımı ve yönetimi için çok amaçlı MILP modeli önermektedir. Ele alınan tedarik zinciri; hammadde tedarikçileri, biyokütle depoları, biyogaz tesisleri ve talep noktalarından oluşmaktadır. Şekil 5.1 modelde kullanılan tedarik zinciri ağına genel bir bakış sunmaktadır.



Şekil 5.1. Biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zinciri ağının genel yapısı

5.1. Problemin Tanımı

Biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zinciri, tedarikçilerden talep noktalarına kadar olan süreçleri kapsamaktadır. Ele alınan tedarik zincirinde sığır gübresi, yumurta tavuğu gübresi, etlik tavuk gübresi ve hal atıkları modelin girdisidir. Çiftliklerden ve hallerden toplanan atıklar biyokütle depolarından biyogaz tesislerine taşınarak anaerobik sindirim süreci boyunca biyogaz ve besin değeri yüksek gübre üreten bir sindiriciye beslenir. Atıkların beraber anaerobik sindirimi, biyogaz verimini arttırarak enerji satışında artış, organik atık yönetiminde tasarruflar, gübreleme ve fosil yakıt kullanımından kaynaklı sera gazı emisyonlarının azaltılması ile ilgili önemli avantajlar sağlar. Üretilen biyogaz kojenerasyon (CHP) ünitesinde ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülür.

Elektrik enerjisi ulusal elektrik şebekesine beslenir. Atık ısı ise tesis tarafından proses ısı olarak kullanılır. Sindirim işlemi artığı gübre seperatöre gönderilerek katı ve sıvı organik gübre formuna dönüştürülür. Katı organik gübre park ve bahçelerde değerlendirilmek üzere belediyelere satılarak değerlendirilir. Sindirim artığı sıvı organik gübre sindiricinin su ihtiyacının bir kısmının giderilmesinde kullanılır. Biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zinciri organik atık arıtımı, yenilenebilir enerji üretimi ve geri dönüşümü eş zamanlı olarak sağlaması ile birbirine bağlı entegre bir sistemi temsil etmektedir. Söz konusu tedarik zincirini optimize edecek model, tedarik zinciri boyunca ekonomik ve çevresel etkiyi minimize ederken aynı zamanda sosyal etkiyi de maksimize eden uygun sistem konfigürasyonunu belirleyecek şekilde yapılandırılmıştır. Modelde aşağıdakilere tekabül eden kararları vermek amaçlanmaktadır:

1. Biyokütle kaynaklarının temini,
2. Tesis ve depolara taşınan biyokütle miktarı,
3. Tesislerin sayısı, kapasitesi ve yerleri,
4. Depoların sayısı, kapasitesi ve yerleri,
5. Her tesisde üretilen biyogaz ve elektrik miktarı,
6. Sindiriciye eklenecek su miktarı,
7. Talep noktalarına taşınan gübre miktarı.

5.2. Model Varsayımları

Biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zinciri ağı tasarımı için önerilen matematiksel modelin geliştirilmesinde aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır.

- Biyogaz üretimi ıslak anaerobik sindirimle gerçekleştirilir. Bu nedenle besleme stoğu karışımının toplam katı içeriğini ayarlamak için sindiriciye su eklenir.
- Biyoenerji üretmek için hayvansal atıklar ve hal atıkları olmak üzere iki tür biyokütle kaynağı kullanılır.

- Sindirim işlemi artığı organik katı gübre park ve bahçelerde değerlendirilmesi için belediyelere satılır.
- Üretilen elektrik enerjisi ulusal elektrik şebekesine beslenir.
- Tüm tesis ve depoların kapasiteleri sınırlıdır.
- Hal atıkları boyut küçültme işleminden geçerek depolanır.
- Hal atıkları, katı hayvansal atıklar ve sıvı/yarı katı hayvansal atıklar farklı şekillerde depolanır.
- Bu çalışma İstanbul ilinde belirlenen biyokütle kaynaklarının en yoğun olduğu 12 ilçesi temel alınarak yapılmıştır.
- Amaç fonksiyonun katsayıları deterministiktir ve önceden bilinir.
- Modelin çözümleri toplam biyokütle kaynaklarının %10'u temel alınarak yapılmıştır.

5.3. Model Gösterimi

Model indisleri, parametreleri ve karar değişkenlerinin gösterimleri aşağıda sunulmuştur. Değişkenler ve indisler küçük harfler ile parametreler ise büyük harfler ile başlayacak şekilde kullanılmıştır.

İNDİSLER

t	tesis lokasyonları
d	depolama lokasyonları
r	tedarik bölgeleri
b	biyokütle türleri
k	tesis kapasitesi
c	depolama kapasitesi
i	talep noktaları

PARAMETRELER

TBkap _{tk}	t. tesis lokasyonundaki k. kapasite seviyeli tesis için biyokütle işleme kapasitesi (ton)
TEKap _{tk}	t. tesis lokasyonundaki k. kapasite seviyeli tesis için elektrik üretim kapasitesi (kWe)
DBKap _{dc}	d. depolama lokasyonundaki c. kapasite seviyeli deponun biyokütle depolama kapasitesi (ton)
AB _{rb}	r. tedarik bölgesinde mevcut olan b. atık biyokütlenin miktarı (ton)
BDO _b	b. biyokütlenin biyogaza dönüşüm potansiyeli (m ³ /ton UK)
MO	biyogazın metan oranı (%)
BMI	biyogazın metan birim enerji içeriği (kWh/m ³)
BEV	kojenerasyon ünitesinde biyogazın elektriğe dönüşüm verimliliği (%)
GDO _b	b. biyokütlenin gübre dönüşüm oranı (%)
TK _b	b. biyokütlenin katı madde oranı (%)
UKM _b	b. biyokütlenin uçucu katı madde oranı (%)
KEU	elektrik üretimine bağlı sera gazı emisyonu (kg CO ₂ eşdeğer/kWh)
KET	biyokütle taşımacılığına bağlı sera gazı emisyonu (kg CO ₂ eşdeğer/ton)
KEI	bir konutun yıllık elektrik ihtiyacı
M _{rd}	r. tedarik bölgesi ile d. depolama lokasyonu arasındaki mesafe (km)
M _{dt}	d. depolama lokasyonu ile t. tesis lokasyonu arasındaki mesafe (km)
M _{ti}	t. tesis lokasyonu ile i. talep noktası arasındaki mesafe (km)
YMal _{tk}	k. kapasite seviyeli t. tesis lokasyonundaki tesisin yatırım maliyeti (€/kwh)
DYMal _{dc}	c. kapasite seviyeli d. depolama lokasyonundaki deponun yatırım maliyeti (€/ton)
BTMal _b	b. biyokütlenin birim taşıma maliyeti (€/ton-km)
GTMal	sindirim artığı organik katı gübrenin birim taşıma maliyeti (€/ton-km)
EF	elektrik enerjisinin fiyatı (€/kWh)
GF	katı organik gübrenin fiyatı (€/ton)
SF	suyun fiyatı (€/ton)
BMal _b	b. biyokütlenin satın alma maliyeti (€)
IO	işletme maliyetleri için önceden belirlenmiş yatırım maliyeti yüzdesi (%)
SKO	seperatörde katı organik gübre dönüşüm oranı (%)

SSO	seperatörde sıvı organik gübre dönüşüm oranı (%)
Df	indirim faktörü (%)
MinTK	sindiricide biyokütle bulamacının minimum toplam katı içeriği (%)
MaksTK	sindiricide biyokütle bulamacının maksimum toplam katı içeriği (%)

KARAR DEĞİŞKENLERİ

y_{tk}	t. tesis lokasyonunda k. kapasite seviyeli tesis açılacaksa 1; aksi halde 0
x_{dc}	d. depolama lokasyonunda c. kapasite seviyeli depo açılacaksa 1; aksi halde 0
bt_{rdb}	r. tedarik bölgesinden d. depolama lokasyonuna taşınan b. biyokütle miktarı (ton)
bd_{dtb}	d. depolama lokasyonundan t. tesis lokasyonuna taşınan b. biyokütle miktarı (ton)
g_{ti}	t. tesis lokasyonundan i. tedarik bölgesine taşınan organik katı gübre miktarı (ton)
$atikt_t$	t. tesis lokasyonunda sindirim artığı sıvı organik gübre miktarı (ton)
$urbiyo_t$	t. tesis lokasyonundaki üretilen biyogaz miktarı (m^3)
$urelkt_t$	t. tesis lokasyonundaki üretilen elektrik miktarı (kWh)
s_t	t. tesisteki su kullanım miktarı (ton)

5.4. Model Formülasyonu

Bu bölümde önerilen matematiksel programlama modelinin amaç fonksiyonları ve kısıtları dahil olmak üzere formülasyonu açıklanmaktadır.

5.4.1. Amaç Fonksiyonu

Anaerobik sindirime dayalı biyokütlenin enerji tedarik zincirlerine tasarımı için çok amaçlı bir model önerilmiştir. Daha önce belirtildiği üzere önerilen model sürdürülebilirliğin üç boyutu olan çevresel, ekonomik ve sosyal amaçları içermektedir. Amaçlar:

- 1) Toplam maliyetin minimize edilmesi,
- 2) Tedarik zincirindeki nakliye ve üretime ilişkin GHG emisyonlarının (CO₂ eşdeğer) minimize edilmesi,
- 3) İnsanların temiz ve yerli enerji kullanımının maksimize edilmesidir.

5.4.1.1. Ekonomik Amaç Fonksiyonu

Modelin ekonomik amacı, sürdürülebilir biyokütle temelli enerji tedarik zinciri ağının toplam maliyetini minimize etmektir. Maliyet nihai ürünlerin satılmasıyla elde edilen toplam tedarik zinciri gelirinin toplam tedarik zinciri maliyetlerinden çıkarılmasıyla elde edilmektedir. Ekonomik amaç fonksiyonu beş bileşen içermektedir. Aşağıdaki denklem ekonomik amaç fonksiyonunu ve bu bileşenleri göstermektedir.

Z_1 Min Toplam Maliyet= Yatırım Maliyetleri + İşletme Maliyetleri + Ulaşım Maliyetleri + Biyokütle Satın Alma Maliyetleri - Toplam Gelir

- *Toplam Gelir*

Toplam gelir (Denklem (5.1)) tesislerde üretilen elektrik enerjisinin ulusal şebekeye satışı ve katı organik gübrenin belediyelere satışından elde edilen gelir olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır.

$$\text{Toplam Gelir} = EF \cdot \sum_t urelk_t + GF \cdot \sum_t \sum_i g_{ti} \quad (5.1)$$

- *Yatırım Maliyetleri*

Toplam yatırım maliyetleri (Denklem (5.2)) depoların ve tesislerin yatırım maliyeti olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Birinci ve ikinci yatırım maliyeti bileşeni sırasıyla depoların ve tesislerin yatırım maliyetlerini temsil etmektedir.

$$\text{Yatırım Maliyetleri} = Df \cdot \sum_d \sum_c DYMal_{dc} \cdot x_{dc} + Df \cdot \sum_t \sum_k YMal_{tk} \cdot y_{tk} \quad (5.2)$$

- *İşletme Maliyetleri*

Toplam işletme maliyetleri (Denklem (5.3)) depoların işletme maliyeti, tesislerin işletme maliyeti ve su maliyetinden oluşmaktadır. İşletme maliyetleri yatırım maliyetinin önceden belirlenen bir yüzdesi olarak alınmıştır.

$$\text{İşletme Maliyetleri} = IO \cdot \sum_d \sum_c DYMal_{dc} \cdot x_{dc} + IO \cdot \sum_t \sum_k YMal_{tk} \cdot y_{tk} + \sum_t s_t \cdot SF \quad (5.3)$$

- *Ulaşım Maliyetleri*

Toplam ulaşım maliyetleri (Denklem (5.4)) biyokütle kaynak alanlarından depolara, depolardan tesislere taşınan biyokütle ve biyogaz tesislerinden talep noktalarına taşınan katı organik gübrenin ulaşım maliyeti olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır.

Ulaşım Maliyetleri =

$$\sum_b BTMal_b \cdot \left(\left(\sum_r \sum_d bt_{rdb} \cdot Ma_{rd} \right) + \left(\sum_d \sum_t bd_{dtb} \cdot Mb_{dt} \right) \right) + \left(\sum_t \sum_i g_{ti} \cdot GTMal_{ti} \cdot Me_{ti} \right) \quad (5.4)$$

- *Biyokütle Satın Alma Maliyetleri*

Biyokütle satın alma maliyetleri (Denklem (5.5)) tedarik bölgelerinden gönderilen biyokütle miktarları ve alınan maliyetlerinden oluşmaktadır.

$$\text{Biyokütle Satın Alma Maliyetleri} = \sum_r \sum_d \sum_b BMal_b \cdot bt_{rdb} \quad (5.5)$$

5.4.1.2. Çevresel Amaç Minimizasyonu

Modelin çevresel amacı, sürdürülebilir biyokütle temelli enerji tedarik zinciri ağının sera gazı (CO₂) emisyonlarının minimize edilmesidir. İki bileşen içermektedir: biyokütle taşınması ve biyoenerji üretiminin sera gazı emisyonları.

Z₂ Min CO₂ Emisyonu= Biyoenerji Üretiminin Sera Gazı Emisyonları + Biyokütle Taşınmasının Sera Gazı Emisyonları

- *Biyoenerji Üretiminin Sera Gazı Emisyonları*

Biyoenerji üretiminin sera gazı emisyonları (Denklem (5.6)) biyoenerji üretimi yapılan biyogaz tesislerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını temsil etmektedir.

$$KEU \cdot \sum_t c_{ikelk}_t \quad (5.6)$$

- *Biyokütle Taşınmasının Sera Gazı Emisyonları*

Biyokütle taşınmasının sera gazı emisyonları (Denklem (5.7)) biyokütlenin tedarik merkezlerinden depolara ve depolardan biyogaz tesislerine taşınmasıyla ilgili CO₂ emisyonlarını olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır.

$$KET \cdot \left(\sum_r \sum_d \sum_b bt_{rdb} + \sum_d \sum_t \sum_b bd_{dtb} \right) \quad (5.7)$$

5.4.1.3. Sosyal Amaç Fonksiyonu

Modelin sosyal amacında, ISO 26000 Sosyal Sorumluluk Yönetim Standartının yedi temel maddesinden biri olana çevrenin yüksek önemi dikkate alınmıştır. Böylece sosyal amaç, temiz ve yerli enerji ihtiyacına katkı sağlayacak şekilde konutların elektrik enerjisi ihtiyacının biyoenerjiden karşılanmasının maksimize edilmesi olmuştur.

Z₃ Maks Biyoenerji Kullanımı= Biyoenerji Kullanan Toplam Konut Sayısı

- *Biyoenerji Kullanan Toplam Konut Sayısı*

Biyoenerji kullanan toplam konut sayısı (Denklem (5.8)) üretilen elektrik miktarıyla ilişkili olarak hesaplanmaktadır.

$$\sum_t \frac{urelk_t}{KEI} \quad (5.8)$$

5.4.2. Kısıtlar

Denklem (5.9)-(5.22) modelin kısıtlarını temsil etmektedir.

5.4.2.1. Biyokütle Tedarik Kısıtları

Denklem (5.9) bir tedarik bölgesinden gelen biyokütle miktarının, o bölgede bulunan mevcut biyokütle miktarını aşmamasını sağlamaktadır.

$$\sum_d bt_{rdb} \leq AB_{rb} \quad \forall r, \forall b \quad (5.9)$$

5.4.2.2. Akış Koruma Kısıtları

Denklem (5.10) biyokütle tedarik bölgelerinden depolara gönderilen biyokütle miktarının, depolardan tesislere gönderilen biyokütle miktarına eşit olmasını sağlayan kısıtlamayı temsil etmektedir.

$$\sum_r bt_{rdb} = \sum_t bd_{dtb} \quad \forall b, \forall d \quad (5.10)$$

5.4.2.3. Kapasite Kısıtları

Denklem (5.11) biyokütle tedarik bölgelerinden depolara gönderilen biyokütle miktarının depoların toplam kapasitesinden daha fazla olmamasını sağlamaktadır.

$$\sum_r \sum_b bt_{rdb} \leq \sum_c DBKap_{dc} \cdot x_{dc} \quad \forall d \quad (5.11)$$

Denklem (5.12) depolardan tesislere gönderilen biyokütle miktarının tesislerin toplam kapasitesinden daha fazla olmamasını sağlamaktadır.

$$\sum_d \sum_b bd_{dtb} \leq \sum_k TBKap_{tk} \cdot y_{tk} \quad \forall t \quad (5.12)$$

5.4.2.4. Üretim Kısıtları

Denklem (5.13) tesislerde üretilen biyogaz miktarını, denklem (5.14) ise üretilen biyogazın elektriğe dönüşüm miktarını hesaplamaktadır.

$$\sum_d \sum_b bd_{dtb} \cdot BDO_b \cdot UKM_b \cdot TK_b = urbiyo_t \quad \forall t \quad (5.13)$$

$$urbiyo_t \cdot BMI \cdot BEV \cdot MO = urelk_t \quad \forall t \quad (5.14)$$

Denklem (5.15) tesislerde elektrik enerjisi üretiminin, tesislerin elektrik enerjisi üretimi için teknik kapasite sınırını aşmamasını sağlamaktadır.

$$urelk_t \leq \sum_k TEKap_{tk} \cdot y_{tk} \quad \forall t \quad (5.15)$$

5.4.2.5. Gübre Dağıtım Kısıtları

Denklem (5.16) tesislerde üretilen katı organik gübre miktarını hesaplamaktadır.

Denklem (5.17) tesislerde üretilen sıvı organik gübre miktarını hesaplamaktadır.

$$SKO \cdot \sum_d \sum_b bd_{dtb} \cdot GDO_b = \sum_i g_{ti} \quad \forall t \quad (5.16)$$

$$SSO \cdot \sum_d \sum_b bd_{dtb} \cdot GDO_b = atik_t \quad \forall t \quad (5.17)$$

5.4.2.6. Sindirici Katı Madde Oranı

Denklem (5.18) çözeltilerin karıştırılması formülünü göstermektedir. Burada m_n , çözünenin kütlesidir ve $\%_n$ kütle konsantrasyonudur. Bir çözeltiye saf çözücü (su) eklenirse $\%_n$, $\%0$ olarak alınır. Bu formülden yola çıkarak sindiricilerde biyokütle bulamacının ıslak sindirimi için toplam katı içeriğinin teknik sınırlar içerisinde olmasını sağlayan Denklem (5.19) ve (5.20) türetilmiştir. Ayrıca her iki kısıt sindiriciye eklenen su miktarını da hesaplamaktadır.

$$(m_1 \cdot \%_1) + (m_2 \cdot \%_2) + (m_n \cdot \%_n) = \%_{son} (m_1 + m_2 + m_n) \quad (5.18)$$

$$\left(\sum_d \sum_b TK_b \cdot bd_{dtb} \right) + (\%0 \cdot s_t) \leq MaksTK \cdot \left(\sum_d \sum_b bd_{dtb} + s_t \right) \quad \forall t \quad (5.19)$$

$$\left(\sum_d \sum_b TK_b \cdot bd_{dtb} \right) + (\%0 \cdot s_t) \geq MinTK \cdot \left(\sum_d \sum_b bd_{dtb} + s_t \right) \quad \forall t \quad (5.20)$$

5.4.2.7. Negatif Olmama ve Tam Sayı Kısıtları

Denklem (5.21) ikili tam sayılı karar değişkenlerini, denklem (5.22) negatif olmayan karar değişkenlerini göstermektedir.

$$y_{ik}, x_{dc} \in \{0,1\} \quad \forall d, \forall t, \forall k, \forall c \quad (5.21)$$

$$bt_{rdb}, bd_{ddb}, g_{ii}, urbiyo_t, urelk_t, s_t, atik_t \geq 0 \quad \forall r, \forall d, \forall b, \forall d, \forall t, \forall i \quad (5.22)$$

5.4.3. Çözüm Prosedürü

Çok amaçlı biyokütle tabanlı sürdürülebilir enerji tedarik zinciri tasarımı ve yönetimi için hedef programlama yöntemi kullanılmış ve hedef programlama algoritması olarak ağırlıklandırma yöntemi uygulanmıştır. Bu çalışmanın 5.4.1. bölümünde gösterilen üç amacının birlikte ele alındığı yeni amaç fonksiyonunun formülasyonu aşağıdaki gibidir:

$$\text{Min } Z = w_1 \cdot d_1^+ + w_2 \cdot d_2^+ + w_3 \cdot d_3^- \quad (5.23)$$

Burada w_1, w_2, w_3 amaç fonksiyonunun ağırlıklandırmalarıdır. Belirtilen üç ağırlık birbirine eşit olarak alınmıştır. d_1^+, d_2^+, d_3^+ ve d_1^-, d_2^-, d_3^- hedeflerin sapma değişkenleridir. d_1^+, d_2^+, d_3^+ hedeften pozitif yönde sapmayı, d_1^-, d_2^-, d_3^- hedeften negatif yönde sapmayı temsil etmektedir.

5.4.2. bölümünde gösterilen kısıtlara ek olarak denk. (5.24)-(5.26) modelin yeni kısıtlarını temsil etmektedir. Yeni kısıtlar, her bir amaç fonksiyonuna sapma değişkenlerinin eklenmesiyle oluşturulmuştur.

Z_1 olarak belirtilen ekonomik amaç fonksiyonunun yeni bir kısıt olarak gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
& \sum_b BTMal_b \cdot \left(\left(\sum_r \sum_d bt_{rdb} \cdot Ma_{rd} \right) + \left(\sum_d \sum_t bd_{dtb} \cdot Mb_{dt} \right) \right) \\
& + \left(\sum_t \sum_i g_{ii} \cdot GTMal_{ii} \cdot Me_{ii} \right) + IO \cdot \sum_d \sum_c DYMAL_{dc} \cdot x_{dc} + IO \cdot \sum_t \sum_k YMal_{tk} \cdot y_{tk} \\
& + \sum_r \sum_d \sum_b BMal_b \cdot bt_{rdb} + \sum_t s_t \cdot SF + Df \cdot \sum_d \sum_c DYMAL_{dc} \cdot x_{dc} \\
& + Df \cdot \sum_t \sum_k YMal_{tk} \cdot y_{tk} - EF \cdot \sum_t urelk_t \\
& - GF \cdot \sum_t \sum_i g_{ii} + d_1^- - d_1^+ = G_1
\end{aligned} \tag{5.24}$$

Z₂ olarak belirtilen çevresel amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi yeni bir kısıt olarak ifade edilmiştir.

$$KEU \cdot \sum_t cikelk_t + KET \cdot \left(\sum_r \sum_d \sum_h bt_{rdh} + \sum_d \sum_t \sum_h bd_{dth} \right) + d_2^- - d_2^+ = G_2 \tag{5.25}$$

Z₃ olarak belirtilen sosyal amaç fonksiyonunun yeni bir kısıta dönüştürüldüğü denklem aşağıda gösterilmiştir.

$$KEU \cdot \sum_t cikelk_t + d_3^- - d_3^+ = G_3 \tag{5.26}$$

6. UYGULAMA

Önerilen modelin performansını değerlendirmek için Türkiye'nin ekonomik ve toplumsal gelişmişlik açısından çevresindeki yerleşim yerlerine egemen, nüfusu en kalabalık şehri olan İstanbul'da sürdürülebilir biyokütle temelli enerji tedarik zinciri ağı tasarımına dayalı bir durum çalışmasının yapılması hedeflenmiştir ve hesaplama sonuçları analiz edilmiştir.

Son yıllarda nüfus artışı ile birlikte çığ gibi büyüyen gıda talebi ortaya çıkan atık miktarında artış yaşanmasına neden olmuştur. Atıkların kontrolsüz bir şekilde düzensiz depolanması, doğal kaynaklara zarar vermekte ve sera gazı emisyonlarına neden olarak gerek çevreyi gerekse insan sağlığını tehdit eden sorunlara yol açmaktadır. Çevre açısından oldukça olumsuz etkileri bulunan bu atıklar, çöp olmak yerine biyoenerji tesislerinde enerji üretimi için atık biyokütle kaynağı olarak değerlendirilebilmektedir.

İstanbul hayvansal atık ve hal atıkları gibi organik atıklar açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Atıkların biyokütle kaynağı olarak değerlendirilmesi ile hem enerji üretimi hem de anaerobik sindirim artışı organik gübre üretimi mümkün olacaktır. Bunu yapmak için, hem ticarileştirmeyi hem de biyoenerji üretiminin sürdürülebilir gelişimini garanti eden kapsamlı bir karar verme aracı gereklidir. Önerilen çalışma, bu sorunları ele almak için sürdürülebilir kalkınmanın üç boyutunun yanı sıra gerçek dünya varsayımlarına ilişkin sürdürülebilir biyokütle temelli enerji tedarik zinciri modeli sunmaktadır. Model İstanbul'un belirli ilçelerine uygulanmaktadır. Bu ilçeler hayvansal atıkların ve hal atıklarının yoğun oluşuna bağlı olarak seçilmiştir. Avrupa yakasında Silivri, Çatalca, Arnavutköy, Büyükçekmece, Başakşehir, Bayrampaşa, Eyüp; Anadolu yakasında Beykoz, Sancaktepe, Şile, Pendik, Tuzla olmak üzere 12 ilçe belirlenmiştir. İstanbul'da önceden belirlenen ilçeler modelde biyokütle tedariki, biyokütle depoları, biyoenerji tesisleri için potansiyel alanlar olarak kabul edilmektedir. Talep noktaları için aday yerler bu ilçelerden ayrı olarak belirlenmiştir. Bu ilçeler içerisinde bazı bölgelerde birden fazla tedarik noktası olması dolayısıyla toplamda 23 tedarik bölgesi bulunmaktadır. Her bir tedarik bölgesi sayılar ile

tesisler, depolar ve talep noktaları için aday ilçeler rakamlar ile ifade edilmektedir. Tesisler için seçilen aday ilçeler 5 tane olmak üzere sırasıyla Silivri, Arnavutköy, Başakşehir, Şile ve Tuzla'dan oluşmaktadır. Aynı şekilde depolar için aday yerler 6 tane olmak üzere sırasıyla Silivri, Arnavutköy, Başakşehir, Şile, Tuzla ve Çatalca olarak belirlenmiştir. Talep noktaları olarak Beyoğlu ve Kadıköy ilçeleri seçilmiştir. İlgili çalışmanın haritası, Şekil 6.1' de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Uygulama bölgesi haritası

6.1. Uygulama Verileri

6.1.1. Biyokütle Kaynakları

Bu çalışmada, biyogaz tesislerinde kullanılmak üzere dört atık biyokütle türü ham madde olarak kabul edilmektedir. Bunlar sığır gübresi, yumurta tavuğu gübresi, etlik tavuk gübresi ve hal atıklarıdır. Yüksek biyogaz verimi elde edebilmek için biyogaz tesislerinde hayvan gübresi ve hal atıkları birlikte anaerobik sindirim süreci ile işlenmektedir. İlçelerin atık biyokütle potansiyelleri ile ilgili veriler Türkiye Cumhuriyeti Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı'ndan

toplanmıştır. Hayvan başına atık miktarı sığırlar için 34 kg/gün (Sözer ve Yaldiz, 2011), tavuklar için ise 0,16 (Hart, 1960) kg/gün temel alınarak hesaplanmıştır. Hal atıklarına ilişkin veriler İstanbul Büyükşehir Belediyesi Hal Müdürlüğü'nden alınmıştır. Çizelge 6.1'de çalışmada ele alınan atık biyokütle özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Atık biyokütle özellikleri

Biyokütle Kaynağı	Toplam Katı (%)	Referans	Uçucu Katı (%)	Referans	Biyogaz Verimi (m ³ /t VS)	Referans
Sığır Gübresi	16.3	(Zhang vd. 2013)	81	(Avcioğlu and Türker, 2012)	340	(Avcioğlu and Türker, 2012)
Tavuk Gübresi (Yumurta)	24.5	(Keskin et al. 2018)	75	(Avcioğlu and Türker, 2012)	450	(Avcioğlu and Türker, 2012)
Tavuk Gübresi (Etlik)	50	(Avcioğlu and Türker, 2012)	65	(Avcioğlu and Türker, 2012)	550	(Avcioğlu and Türker, 2012)
Hal Atıkları	12.7	(Ganesh et al. 2015)	84.9	(Scano et al. 2014)	450	(Ganesh et al. 2015)

6.1.2. Taşımacılık

Ulusal ulaştırma altyapısı biyokütle ve gübre için ulaşım modu olarak seçilen karayolu taşımacılığı için uygundur. Bu çalışmada kullanılan veriler ilçe düzeyinde verilmiştir. İlçelerde belirlenen konumların arasındaki mesafeleri hesaplamak için öklid bağıntısı yöntemi kullanılmıştır.

Biyokütle kaynaklarından sığır gübresi 0.05 €/t, hal atıkları ise 0.03 €/t' ye taşınmaktadır (Poeschl, 2010). Yumurta tavuğu gübresi ve etlik tavuk gübresinin sığır gübresi ile aynı fiyatta taşındığı varsayılmıştır. Taşımacılıktan kaynaklanan sera gazı emisyonu değeri 0.053 kg CO₂ eşdeğer /ton-km olarak alınmıştır (Čuček vd., 2010).

6.1.3. Biyokütle Depoları ve Biyogaz Tesisleri

Biyokütle depoları ve biyogaz tesislerinin potansiyel lokasyonları taşıma maliyetlerini azaltmak için biyokütle tedarik bölgelerine olabildiğince yakın olacak şekilde seçilmiştir. Biyogaz tesislerinde anaerobik sindirim sonucu üretilen biyogaz bu çalışmada sadece elektrik ve ısı enerjisi üretmek için kullanılmıştır. Kojenerasyon sisteminde üretilen elektrik enerjisinin, ulusal elektrik şebekesine yerel elektrik enerjisi talebiyle ilişkilendirilerek tamamen dağıtıldığı varsayılmıştır. Buna karşılık üretilen ısı enerjisinin tesisin çeşitli ısı ihtiyaçlarını karşılamak için değerlendirildiği farz edilmiştir.

Biyogaz tesisleri için 4000 t/ay, 6000 t/ay ve 14000 t/ay olmak üzere üç kapasite seviyesi düşünülmüştür. Her bir kapasite seviyesine karşılık gelen kojenerasyon sistemlerinin elektrik enerjisi üretimi için kurulu kapasitesi 1000 kWe, 2000 kWe ve 3000 kWe'dir. Kojenerasyon sistemlerinin elektrik ve ısı enerjisi verimliliği sırasıyla %41 ve %44 olarak alınmıştır (Lijó vd., 2017). Biyogaz tesislerinde elektrik enerjisi üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonu değeri 0.00023 kg CO₂ eşdeğer/kWh'dır (DECC Karbon Dönüşüm Faktörleri Veri Kümesi, 2017).

6.1.4. Ekonomik Parametreler

Biyogaz tesisleri tarafından üretilen elektrik enerjisinin, ulusal elektrik şebekesine 0.103 €/kWh değerinde bir fiyatla beslenmektedir. Biyokütleye dayalı üretim tesisleri için 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun' da belirtilen elektrik fiyatı modelde ilgili veri olarak kullanılmıştır. Anaerobik sindirim artığı katı organik gübre talep noktalarına 8.4 €/t'a satılmaktadır. İndirim faktörü 0,0824 olarak alınmıştır ve tesislerin ömrü 20 yıl olarak kabul edilmektedir.

Yatırım maliyetleri genellikle farklı tesis boyutlarına göre doğrusal olarak değişmez, bu nedenle tesis kapasitelerine karşılık gelen yatırım maliyetleri arasındaki ilişki Denk. (6.1)' deki gibi ifade edilmektedir (Amigun vd., 2010). Farklı tesis kapasitesi maliyetleri ilgili literatürden 1000 kWe tesis kapasitene karşılık gelen tesis yatırım maliyeti (Kremljak, 2017) temel alınarak tahmin

edilmiştir. Tesis ve depoların yıllık işletme maliyetleri, yatırım maliyetlerinin %10'u olarak alınmıştır.

$$\frac{C_1}{C_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^n \quad (6.1)$$

Burada Q_2 ve C_2 sırasıyla referans alınan tesisin kapasitesi ile yatırım maliyetini, Q_1 ve C_1 ise yeni tesisin kapasitesi ile yatırım maliyetini göstermektedir. n , kapasite maliyet faktörünü belirtmektedir.

Biyokütle kaynaklarından sığır gübresinin satınalma maliyeti 5.5 €/t, yumurta tavuğu gübresi ve etlik tavuk gübresinin satınalma maliyeti ise 6.5 €/t'dur (Chinese vd., 2014). Hal atıklarının satınalma maliyeti bu çalışma için 5 €/t olarak alınmıştır.

6.2. Problemin Çözüm Yaklaşımı

Sürdürülebilir biyokütle temelli enerji tedarik zinciri ağı tasarım modeli çok ürünlü, çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak geliştirilmiştir. Model GAMS optimizasyon programının 25.0.3 sürümünde programlanıp çözülmüştür. Çok amaçlı modelin çözümünde hedef programlama yaklaşımı kullanılmıştır.

6.2.1. Hedef Programlama Yaklaşımı

Bu çalışmanın temel amacı, karar vericinin bir veya birden fazla biyogaz tesisi kurmak için yer ve kapasite seçimi gibi bir dizi kararı almasına yardımcı olmak amacı ile üç kriter arasında uzlaşmaya varılan bir çözüm bulmaktır. Daha önce de belirtildiği gibi, sürdürülebilir biyokütle tabanlı enerji tedarik zincirinin tasarlanması ve optimize edilmesi için hedef programlama çözüm yaklaşımı kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan hedef programlama yaklaşımının amacı, farklı amaç fonksiyonlarının sapmasını en aza indirmektir. Bunu yapabilmek için amaç fonksiyonları kısıtlar haline getirilip, bu kısıtlara sapma değişkenleri eklenmiştir. Sonrasında yeni bir amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Yeni amaç fonksiyonu tüm sapma değişkenlerinin toplamı olarak ifade edilmiştir. Önerilen modelin gösterimi aşağıdaki gibidir:

Amaç: Minimum Maliyet ($Z_1(x)$)

Minimum Karbon Salınım ($Z_2(x)$)

Maksimum Biyoenerji Kullanan Konut Sayısı ($Z_3(x)$)

Kısıt: Akış Kısıtları

Denge Kısıtları

Kapasite Kısıtları

Sindirici Kısıtları

Mantık Kısıtları

Çok amaçlı optimizasyon problemini çözmeden önce bir dizi tek optimizasyon problemi göz önünde bulundurulmuştur. Bunun için ilk adım olarak, üç amaç fonksiyonunun optimizasyon modelleri ayrı ayrı kurularak çözümlere ulaşılmıştır. Bunu yapmaktaki amaç sapmaların minimum düzeyde tutulmasını sağlamaktır. Sonuçlar çizelge 6.2.'de sunulmuştur. Burada $Z_1(x)$ ekonomik amaç fonksiyonunun optimum değerini, $Z_2(x)$ çevresel amaç fonksiyonunun optimum değerini ve $Z_3(x)$ sosyal amaç fonksiyonunun optimum değerini göstermektedir.

Çizelge 6.2. Hesaplanan amaç fonksiyonu değerleri

Amaç Fonksiyonu	Sonuç
$Z_1(x)$	209371.037
$Z_2(x)$	179725.287
$Z_3(x)$	5013

İkinci adım olarak, birim farklılıkları olan her bir amaç ağırlıklandırılarak amaç fonksiyonu üç amacı kapsayacak şekilde tek bir amaç olarak ifade edilmiştir. Burada her üç amaç ağırlıklandırması birbirine eşit olarak alınmıştır.

$$\text{Min } Z = w_1 \cdot d_1^+ + w_2 \cdot d_2^+ + w_3 \cdot d_3^- \quad (6.2)$$

Yeni kısıtlar 5.4.2. bölümünde gösterilen kısıtlara ek olarak, amaç fonksiyonlarının ayrı kısıtlar halinde modelde belirtilmesi ve her bir amaç fonksiyonuna ait sapma değişkenlerinin ilave edilmesi ile oluşturulmuştur.

Z_1 olarak adlandırılan birinci amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi yeni bir kısıta dönüştürülerek modele eklenmiştir.

$$\begin{aligned}
& \sum_b BTMal_b \cdot \left(\left(\sum_r \sum_d bt_{rdb} \cdot Ma_{rd} \right) + \left(\sum_d \sum_t bd_{dtb} \cdot Mb_{dt} \right) \right) \\
& + \left(\sum_t \sum_i g_{ii} \cdot GTMal_{ii} \cdot Me_{ii} \right) + IO \cdot \sum_d \sum_c DYMAL_{dc} \cdot x_{dc} + IO \cdot \sum_t \sum_k YMal_{tk} \cdot y_{tk} \\
& + \sum_r \sum_d \sum_b BMAL_b \cdot bt_{rdb} + \sum_t s_t \cdot SF + Df \cdot \sum_d \sum_c DYMAL_{dc} \cdot x_{dc} \\
& + Df \cdot \sum_t \sum_k YMal_{tk} \cdot y_{tk} - EF \cdot \sum_t urelk_t \\
& -GF \cdot \sum_t \sum_i g_{ii} + d_1^- - d_1^+ = 209371.037
\end{aligned} \tag{6.3}$$

Z₂ olarak adlandırılan ikinci amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi yeni bir kısıta dönüştürülerek modele eklenmiştir.

$$KEU \cdot \sum_t cikelk_t + KET \cdot \left(\sum_r \sum_d \sum_h bt_{rdh} + \sum_d \sum_t \sum_h bd_{dth} \right) + d_2^- - d_2^+ = 179725.287 \tag{6.4}$$

Z₃ olarak adlandırılan üçüncü amaç fonksiyonu da aşağıdaki gibi yeni bir kısıta dönüştürülerek modele eklenmiştir.

$$KEU \cdot \sum_t cikelk_t + d_3^- - d_3^+ = 5013 \tag{6.5}$$

6.2.1.1. Sonuçlar ve Analizler

İstanbul'da sürdürülebilir biyokütle temelli enerji tedarik zinciri tasarımı ve optimizasyonu için önerilen çok amaçlı MILP modeli, GAMS 25.0.3 sürümünde uygulanmıştır ve CPLEX çözücüsünün 12.8 sürümü kullanılarak çözülmüştür. MILP modellerinin çözüm denemeleri Windows 8.1 Pro 64 bit işletim sistemi, 16 GB RAM ve Intel Core i7 6700HQ 2.60 GHz işlemci üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çok amaçlı model 736 sürekli değişken ve 27 kesikli değişkenden oluşmaktadır. Uygulanan modelin optimal çözüm değerinin 171844.181 olduğu belirlenmiştir.

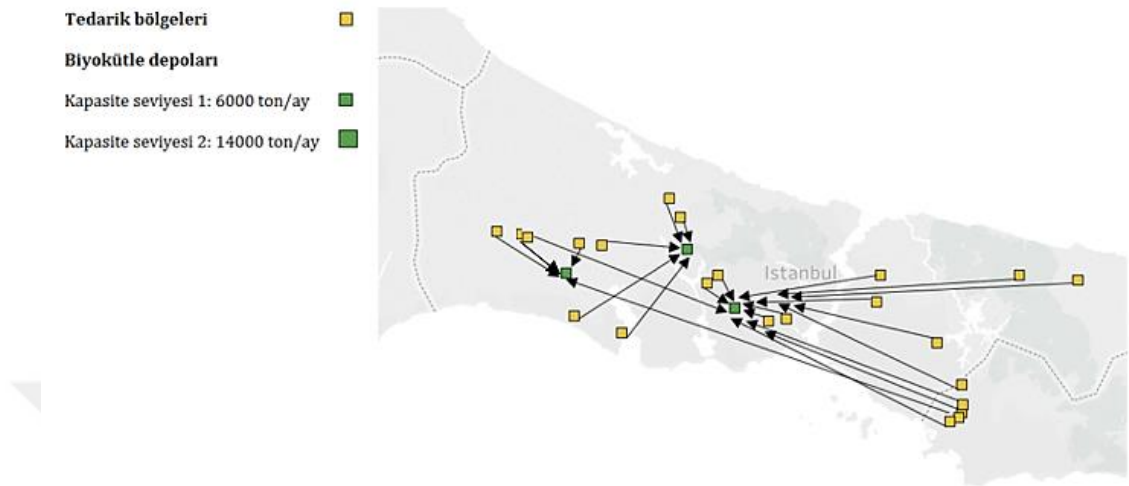
Çizelge 6.3’de önerilen modelde alınan stratejik ve taktiksel düzeyde kararların sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 6.3. Karar değişkenlerinin optimal değerleri

Depo açma, kapasite ve lokasyon kararları	
x_{dc}	$x_{2,1}=1, x_{3,1}=1, x_{6,1}=1$ ve diğer tüm $x_{dc}=0$
Tesis açma, kapasite ve lokasyon kararları	
y_{tk}	$Y_{3,3}=1$ diğer tüm $y_{tk}=0$
Biyokütle tedarik bölgelerinden depolara gönderilen atık biyokütle miktarı (ton/yıl)	
bt_{rdb}	$B_{1,6,1}=23215.387, B_{2,2,1}=28153.326, B_{3,2,1}=23359.343,$ $B_{4,2,1}=3050.378, B_{5,3,1}=7524.183, B_{6,3,1}=11576.048,$ $B_{7,3,1}=8337.038, B_{8,3,1}=1788.281, B_{9,3,1}=11228.568,$ $B_{10,3,1}=4965.241, B_{11,3,1}=3623.720, B_{12,6,2}=5662.406$ $B_{13,2,2}=61.320, B_{14,2,2}=6.716, B_{15,3,2}=17.520,$ $B_{16,3,2}=12.206, B_{17,3,2}=64.240, B_{18,3,2}=90.520,$ $B_{19,3,2}=659.920, B_{20,6,2}=3905.710, B_{21,3,3}=264.552,$ $B_{22,3,4}=1013.900, B_{23,3,4}=1520.800$ ve diğer tüm $bt_{dtp}=0$
Depolardan tesise gönderilen atık biyokütle miktarı (ton/yıl)	
bd_{dtb}	$B_{2,3,1}=54563.047, B_{2,3,2}=68.036, B_{3,3,1}=49043.079,$ $B_{3,3,2}=844.406, B_{3,3,3}=264.552, B_{3,3,4}=2534.700$ $B_{6,3,1}=23215.387, B_{6,3,2}=5662.406, B_{6,3,3}=3905.710$ ve diğer tüm $bt_{dtp}=0$
Tesisten talep noktasına gönderilen gübre miktarı (t/yıl)	
g_{ti}	$g_{3,2}=25009.399$ ve diğer tüm $g_{ti}=0$
Tesiste üretilen elektrik miktarı (kWh)	
$urelkt$	$urelkt=18046830$

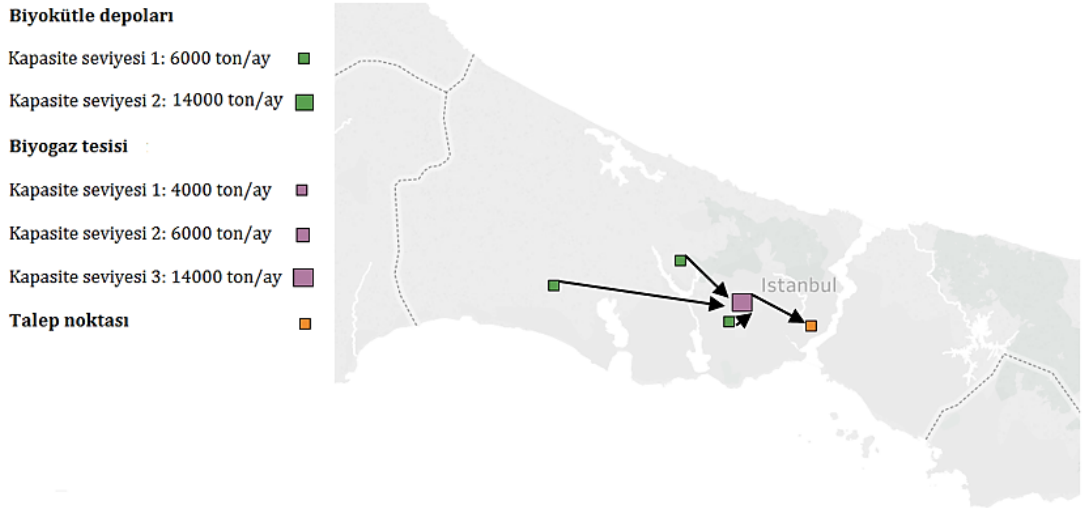
Çizelge 6.3’de görüldüğü gibi ölçek ekonomisinden kaynaklanan ton başına maliyet avantajı sayesinde model; 4000, 6000 ve 14000 ton/ay kapasiteli biyogaz tesisleri içinden 14000t/ay kapasiteli biyogaz tesisini tercih etmektedir. Aday 5 tesis lokasyonu içerisinde sadece Başakşehir’de tesis açılmaktadır. Buna ek olarak, aynı şekilde 3 ayrı ilçede her biri 6000 ton/ay kapasiteli 3 biyokütle

deposu kurulmuştur. Bu depolar için uygun yerler Arnavutköy, Başakşehir ve Çatalca olarak belirlenmiştir. Şekil 6.2 kurulan biyokütle depolarına biyokütle akışını göstermektedir.



Şekil 6.2. Tedarik bölgeleri ve depolar arasında biyokütle akışı

Modelde 2 numaralı Arnavutköy ilçesinde bulunan biyokütle deposundan 54631.083 ton/yıl, 3 numaralı Başakşehir ilçesinde bulunan biyokütle deposundan 52686.737 ton/yıl ve Çatalca ilçesinde bulunan 6 numaralı biyokütle deposundan 32783.503 ton/yıl biyokütle hammaddesi Başakşehir ilçesinde bulunan 3 numaralı biyogaz tesisine gönderilmiştir. Sindirim artığı katı organik gübrenin, uzun mesafe taşımacılığında kaynaklanan maliyet ve çevresel etkilerin önlenmesi amacıyla biyogaz tesisine yakın olacak şekilde sadece Beyoğlu ilçesinde bulunan 2 numaralı talep noktasına gönderildiği görülmektedir. Şekil 6.3 biyokütle depolarından biyogaz tesisine biyokütle akışını ve biyogaz tesisinden talep noktasına sindirim artığı katı organik gübrenin akışını göstermektedir.



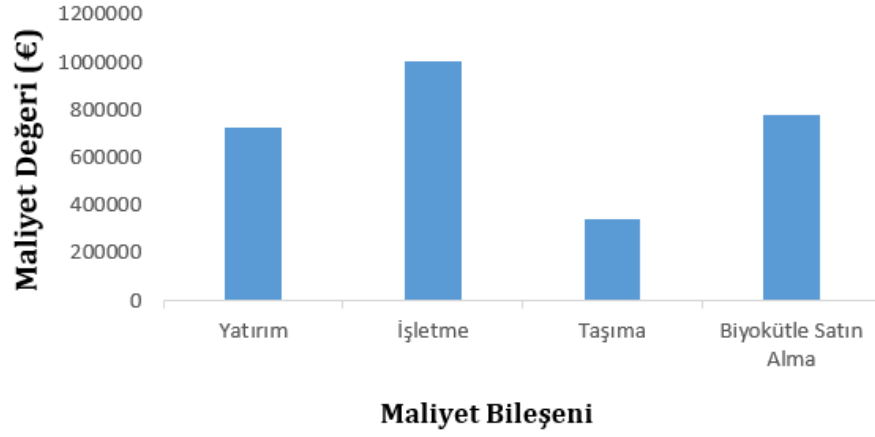
Şekil 6.3. Depolar, tesis ve talep noktası arasında biyokütle ile sindirim artığı akışı

Model, İstanbul Avrupa Yakası'nda bir tesis ve üç depo kurulmasına izin vermektedir. Sonuçlara göre depoların ve tesisin toplam yıllık maliyet bileşenleri Çizelge 6.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. Hesaplanan maliyet bileşenleri

Toplam Tedarik Zinciri Maliyeti	
İndirimli Yatırım Maliyeti	729207.699 (€/yıl)
İşletme Maliyeti	1008759.256 (€/yıl)
Taşıma Maliyeti	338294.120 (€/yıl)
Biyokütle Satın Alma Maliyeti	780035.033 (€/yıl)

Çizelge 6.4'te ve Şekil 6.4'te gösterilen toplam yıllık maliyet bileşenleri arasında en büyük paya sahip olan işletme maliyetidir. Biyokütle satın alma maliyeti ve tesisin yatırım maliyeti toplam yıllık maliyete etki etme büyüklüğüne bağlı olarak ikinci ve üçüncü en büyük maliyet bileşenidir. Son olarak taşıma maliyeti toplam yıllık maliyete bileşenleri içerisinde en düşük paya sahiptir. Bu durumu tesis ve depoların az sayıda ve birbirine olabildiğince yakın olması sağlamıştır.



Şekil 6.4. Yıllık maliyet bileşenleri

Gams 25.0.3 çözücüsü kullanılarak elde edilen verilerden bir diğeri ise hedeften sapma miktarlarıdır. Optimal sonuç modelin üç amaçlı yapısının dengelenişi için bir çözüm sunmaktadır. Buna bağlı olarak tek amaçlı hedefler için uzlaşmacı sonuçlar elde edilip, optimal sonuçlardan sapma miktarları Çizelge 6.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.5. Optimal sonuçların sapma miktarları

Tek Amaçlı Hedeflerin Sapma Miktarları	
$d_1^+ = 36617.616$	$d_1^- = 0$
$d_2^+ = 135226.565$	$d_2^- = 0$
$d_3^+ = 0$	$d_3^- = 0$

Biyogaz tesisi ve biyokütle depolarının kurulması için yatırım maliyeti, işletme maliyeti, taşıma maliyeti ve biyokütle satınalma maliyeti toplamının minimize edilmesi hedefinden 36617.616 miktar sapma gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu değer tek amaçlı modelin optimal sonucunu aşan sapma miktarının 36617.616 olduğunu ifade etmektedir.

Biyogaz tesisi açılışı ve biyokütle kaynakları ile nihai ürünlerin taşınması sırasında ortaya çıkan CO₂ salınımı miktarının minimize edilmesi hedefinden 135226.565 miktar sapsmak gerçekleşmiştir. Bu değer tek amaçlı modelin optimal sonucundan 135226.565 miktar fazla olduğunu ifade etmektedir.

Biyogaz tesisinde elektrik üretimi ile daha fazla konutun yenilenebilir enerji kaynağı kullanmasının maksimize edilmesi hedefinden herhangi bir sapma tespit edilmemiştir. Bu değer tek amaçlı hedefin sonucunun optimal olduğunu ifade etmektedir.

6.2.1.2. Duyarlılık Analizi

Biyokütle temelli enerji tedarik zincirinde alınacak kararlar için önemli olan girdi faktörlerindeki değişmelerin etkisini incelemek için duyarlılık analizi yapılmıştır. Biyokütle kullanılabilirliği, elektrik satış fiyatı ve ağırlık katsayıları değişimlerinin tedarik zinciri faaliyetleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Biyokütle kullanılabilirliğindeki değişiklik, taşımacılıktan ve biyoenerji üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımını, elektrik üretimine bağlı olarak değişen yenilenebilir enerji kullanan konut sayısını ve taşımacılık ile biyokütle satınalmadan kaynaklanan maliyetleri önemli ölçüde etkilemektedir.

Aşağıda biyokütle temelli enerji tedarik zincirinin performansını etkilediği düşünülen biyokütle kullanılabilirliği parametresi göz önüne alınarak, çeşitli karar değişkenleri üzerindeki etkisinin ayrıntılı analizi izah edilmiştir. Çizelge 6.6'da sonuçlar özetlenmektedir.

Çizelge 6.6. Biyokütle kullanılabilirliğinin duyarlılık analizi sonuçları

Artış Miktarı (%)	Biyokütle Deposu	Biyogaz Tesis	Üretilen Elektrik Miktarı (kWh/yıl)	Amaç Fonksiyonu Değeri
20	X1,1, X2,1, X3,1, X6,1	X1,3, X3,3	36093656	179822.517
30	X1,2, X2,2, X3,1, X4,1, X5,1, X6,1	X1,3, X2,3, X4,1, X5,1	54140487	73408.702
40	X1,2, X2,2, X3,2, X4,1, X6,1	X1,3, X2,3, X3,3, X4,2	72187320	172598.589
50	X1,2, X2,2, X3,2, X4,1, X5,2	X1,3, X2,3, X3,3, X4,1, X5,3	90234154	131369.452

Sonuçlar biyokütle kullanılabilirliği %20 olduğunda Silivri, Arnavutköy, Başakşehir ve Çatalca ilçelerinde aylık kapasitesi 6000 ton olan depoların açıldığını ortaya koymaktadır. Tesisler için ise Silivri ve Başakşehir ilçelerinde aylık kapasitesi 14000 ton olacak şekilde tesis açma kararı alınmıştır.

Biyokütle kullanılabilirliği %30 olduğunda Silivri ve Arnavutköy ilçelerinde aylık kapasitesi 14000 ton; Başakşehir, Şile, Tuzla ve Çatalca ilçelerinde aylık kapasitesi 6000 ton olan depoların açıldığı görülmektedir. Tesisler için açma kararı Silivri ve Arnavutköy ilçelerinde aylık kapasitesi 14000 ton; Şile ve Tuzla ilçesinde ise aylık kapasitesi 4000 ton olacak şekilde alınmıştır.

Biyokütle kullanılabilirliği %40 olduğunda Silivri, Arnavutköy ve Başakşehir ilçelerinde aylık kapasitesi 14000 ton; Şile ve Çatalca ilçelerinde aylık kapasitesi 6000 ton olan depolar açılmıştır. Silivri, Arnavutköy ve Başakşehir ilçelerinde aylık kapasitesi 14000 ton; Şile ilçesinde ise aylık kapasitesi 6000 ton olacak tesislerin açılması şeklinde alınmıştır.

Biyokütle kullanılabilirliği %50 olduğunda Silivri, Arnavutköy, Başakşehir ve Tuzla ilçelerinde aylık kapasitesi 14000 ton; Şile ilçesinde aylık kapasitesi 6000 ton olan depolar açılmıştır. Tesisler için de Silivri, Arnavutköy Başakşehir ve Tuzla ilçelerinde aylık kapasitesi 14000 ton; Şile ilçesinde ise aylık kapasitesi 4000 ton olan tesislerin açıldığı görülmektedir.

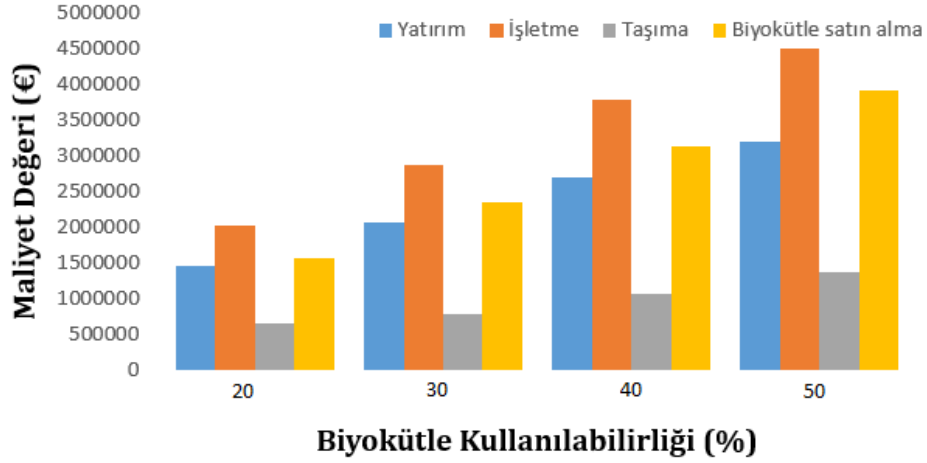
Biyokütle kullanılabilirliğinde artış yaşanması amaç fonksiyonu optimum değeri, biyokütle deposu ile biyogaz tesisinin yeri, sayısı ve kapasitesi üzerinde değişikliklere neden olmuştur. Daha yüksek biyokütle kullanılabilirliği biyokütle depoları ile biyogaz tesislerinin kapasitesi ve sayısını fazlalaştırmıştır. Bununla birlikte biyokütle kullanılabilirliğinin çoğalmasına paralel olarak üretilen elektrik miktarı doğrusal olarak artmıştır. Biyokütle depolarının kapasitesinin yetersizliğinden dolayı %50 değerinden sonra biyokütle akışı sağlanmamıştır.

Çizelge 6.7 ve Şekil 6.5 biyokütle kullanılabilirliğinin her bir maliyet bileşenine etkisini göstermektedir. Sonuçlar toplam tedarik zinciri maliyetinde sırasıyla en

büyük payı işletme maliyetinin sonrasında ise biyokütle satın alma maliyeti, indirimli yatırım maliyeti ve taşıma maliyetinin aldığını ortaya koymaktadır. Biyokütle kullanılabilirliğindeki artış her bir maliyet bileşinin doğrusal olarak artırmıştır. Bu sonuçlara dayanarak biyokütle kullanılabilirliğinin biyokütle temelli tedarik zinciri tasarım kararlarını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.

Çizelge 6.7. Biyokütle kullanılabilirliğinin tedarik zinciri maliyetine etkisi

Toplam Tedarik Zinciri Maliyeti	
%20 Biyokütle Kullanılabilirliği	
İndirimli Yatırım Maliyeti	1453471.398 (€/yıl)
İşletme Maliyeti	2011518.513 (€/yıl)
Taşıma Maliyeti	637120.896 (€/yıl)
Biyokütle Satın Alma Maliyeti	1560070.065 (€/yıl)
%30 Biyokütle Kullanılabilirliği	
İndirimli Yatırım Maliyeti	2061253.798 (€/yıl)
İşletme Maliyeti	2872916.969 (€/yıl)
Taşıma Maliyeti	778182.261 (€/yıl)
Biyokütle Satın Alma Maliyeti	2340105.098 (€/yıl)
%40 Biyokütle Kullanılabilirliği	
İndirimli Yatırım Maliyeti	2698665.014 (€/yıl)
İşletme Maliyeti	3770272.726 (€/yıl)
Taşıma Maliyeti	1067868.564 (€/yıl)
Biyokütle Satın Alma Maliyeti	3120140.13 (€/yıl)
%50 Biyokütle Kullanılabilirliği	
İndirimli Yatırım Maliyeti	3197979.597 (€/yıl)
İşletme Maliyeti	4500035.482 (€/yıl)
Taşıma Maliyeti	1356073.134 (€/yıl)
Biyokütle Satın Alma Maliyeti	3900175.163 (€/yıl)



Şekil 6.5. Biyokütle kullanılabilirliği değişiminin maliyet bileşenlerine etkisi

Bu çalışmada kullanılan elektrik satış fiyatının deterministik girdi parametresi değeri 0.133 €/kWh'dır. Elektrik satış fiyatı değerindeki değişimin etkisini incelemek için duyarlılık analizi yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.8'de sunulmuştur.

Çizelge 6.8. Elektrik satış fiyatının duyarlılık analizi sonuçları

Artış Miktarı (%)	Biyokütle Deposu	Biyogaz Tesisi	Üretilen Elektrik Miktarı (kWh/yıl)	Amaç Fonksiyonu Değeri
10	X2,1, X3,1, X6,1	X3,3	18046830	171844.181
20	X2,1, X3,1, X6,1,	X2,3	18046830	174759.167
30	X2,1, X3,1, X6,1,	X3,3	18046830	174759.167

Elektrik fiyatındaki değişim biyogaz tesisi yeri ve amaç fonksiyonunun optimum değerini değiştirirken, biyokütle deposunun yeri, kapasitesi, sayısı ve üretilen elektrik miktarı üzerinde herhangi bir değişikliğe neden olmamıştır. Biyokütle depoları için yer seçimi her analizde Arnavutköy, Başakşehir ve Silivri olarak aynı kalmıştır. Biyogaz tesisi kapasiteleri her bir analizde aynı kalsa da uygun yerler Arnavutköy ve Başakşehir ilçeleri olarak farklılık göstermiştir. Elektrik fiyatındaki %10'luk bir artış tedarik zincirini kâra geçirmiştir.

Amaç fonksiyonundaki ağırlık katsayılarının değişiminin etkisini incelemek için duyarlılık analizi yapılmıştır. Çizelge 6.9 yapılan duyarlılık analizi sonuçlarını göstermektedir.

Ağırlık katsayılarındaki değişim amaç fonksiyonunun optimum değeri, biyokütle deposu ile biyogaz tesisinin yeri, kapasitesi ve sayısını değiştirirken, üretilen elektrik miktarı üzerinde herhangi bir değişikliğe neden olmamıştır.

Çizelge 6.9. Ağırlık katsayılarının duyarlılık analizi sonuçları

Wekonomik	Wçevre	Wsosyal	Biyokütle Deposu	Biyogaz Tesisi	Üretilen Elektrik Miktarı (kWh/yıl)	Amaç Fonksiyonu Değeri
0.9	0.05	0.05	X2,1, X3,1	X3,3	18046830	37326.569
0.8	0.15	0.05	X2,1, X3,1	X3,3	18046830	48328.825
0.7	0.2	0.1	X2,1, X3,1	X3,3	18046830	52154.930
0.6	0.25	0.15	X2,1, X3,1,	X3,3	18046830	55981.035
0.5	0.4	0.1	X2,1, X3,1,	X3,3	18046830	72399.434
			X6,1			
0.4	0.45	0.15	X2,1, X3,1,	X3,3	18046830	76473.391
			X6,1			
0.3	0.5	0.2	X2,1, X3,1,	X3,3	18046830	78598.567
			X6,1			
0.2	0.6	0.2	X2,1, X3,1,	X2,3	18046830	87509.626
			X6,1			
0.1	0,8	0.1	X1,1, X2,1,	X1,1, X2,1,	18046830	69379.741
			X5,1, X6,1	X5,1		

Toplam tedarik zinciri maliyetinin minimize edilmesi, sera gazı emisyonlarının minimize edilmesi ve biyoenerji kullanan konut sayısının maksimize edilmesinden daha önemli olduğu bir durum için en uygun çözüm tabloda sapmanın en az olduğu $w_{0.9}$, $w_{0.05}$ ve $w_{0.05}$ ağırlık yapısı olarak kabul edilebilir. Bu durumda sera gazı emisyonlarının minimize edilmesi ve biyoenerji kullanan konut sayısının maksimize edilmesi eşit derecede önemlidir. Sonuçlara göre 1. kapasite seviyeli 2 adet biyokütle deposu Arnavutköy ve Başakşehir ilçelerinde, 3. kapasite seviyeli olan 1 adet biyogaz tesisi ise Başakşehir ilçesinde kurulmuştur.

Sera gazı emisyonlarının minimize edilmesi, toplam tedarik zinciri maliyetinin minimize edilmesi ve biyoenerji kullanan konut sayısının maksimize edilmesinden daha önemli ise bu durum için en uygun çözüm ağırlıkların $w_{0.1}$, $w_{0.8}$ ve $w_{0.1}$ olacak şekilde kullanılmalıdır. Burada toplam tedarik zinciri maliyetinin minimize edilmesi ve biyoenerji kullanan konut sayısının maksimize edilmesi eşit derecede önemlidir. Bu çözümün sonuçlarına göre kapasite seviyesi 1 olan 4 adet biyokütle deposu Silivri, Arnavutköy, Tuzla ve Çatalca'da, kapasite seviyesi 1 olan 3 adet biyogaz tesisi ise Silivri, Arnavutköy ve Tuzla'da kurulmuştur.



7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Dünya genelinde enerji gereksinimleri son yıllarda artmaktadır ve günümüzde enerji piyasası birincil enerji talebinin büyük bir kısmını temsil eden fosil yakıtlara dayanmaktadır. Bu fosil yakıtların tüketimi; kaynakların tükenmesi, sera gazı emisyonları ve petrol fiyatlarındaki artışa bağlı olarak sürdürülemez ekonomik ve çevresel durumlara yol açılmasına neden olmaktadır.

Toplumun fosil yakıtlara bağımlılığını azaltmak ve iklim değişikliğini hafifletmek için sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli giderek daha fazla araştırılmaktadır. Biyokütle; enerji ihtiyacının karşılanması, küresel ısınma ve iklim değişiklikleriyle mücadele etme potansiyeline sahip yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Biyokütlenin en önemli avantajları çeşitliliği nedeniyle dünya çapında mevcut olması ve farklı enerji formlarına dönüştürülmesidir. Bununla birlikte yüksek lojistik maliyetleri biyokütlenin ticarileşmesini önlemektedir.

Artan enerji talebini karşılamak, çevresel etkileri hafifletmek ve sosyal faydayı maksimize etmek için sürdürülebilir biyokütle temelli enerji tedarik zinciri ağı tasarımı önemli bir çözümdür. Biyokütlenin tedarik edilmesinden katma değerli nihai ürünlere dönüştürülmesine kadar olan süreci optimize eden operasyonel bir karar alma yöntemidir.

Bu tez çalışması, biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zincirinin tasarlanması ve yönetilmesi ile ilgili bir araştırma çabası sunmaktadır. Bu tedarik zincirini tasarlamak ve yönetmek için kullanılacak bir matematiksel model geliştirilmiştir. Model biyokütle alımından biyoenerji üretimine kadar tüm tedarik zinciri ağını kapsamaktadır. Önerilen modelin amacı, tüm tedarik zinciri ağının ekonomik, çevresel ve sosyal etkilerini optimize etmektir.

Ülkemiz tarım ve hayvancılık bakımından bölge ülkeleri arasında önemli bir yere sahiptir. Artan insan nüfusu ile birlikte büyüyen hayvancılık ve gıda endüstrisi, çevresel sorunlar oluşturan yüksek miktarda atığın oluşmasına neden olmaktadır. Ülkemizde, son yıllarda kümes ve çiftlik hayvanlarından kaynaklanan

hayvansal atıklar çevreyi son derece olumsuz etkileyen problemler arasında yer almaktadır.

Mevcut atıkların işlenmemiş halde doğaya ve çevreye olan zararı çok büyüktür. Bu atıkların birlikte anaerobik sindirimi ülkemiz için önemli bir atık bertaraf etme yöntemidir. Hayvansal atıklar ve meyve-sebze atıklarının (hal atıkları) geri dönüştürülmesi ile hem çevre kirliliğini önlemek açısından doğaya katkıda bulunup yenilenebilir enerji üretimi, hem de toprağa bitkiler için son derece gerekli olan besin elementleri açısından zengin organik gübre üretimi sağlanır.

Atıkların biyogaz tesislerinde işlenmesi sonucu oluşan elektrik, ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin yaygınlaşması için destek ve teşvik mekanizması ile devlet alım garantisi altındadır. Bu destek ve teşvik mekanizmasının başında ise sabit fiyat garantisi gelmektedir. Biyokütle enerjisinden elektrik üretimi tesisleri ürettikleri elektriği ulusal şebekeye vermeleri halinde 13,3 ABD Doları cent/kWh olan fiyattan 10 yıl süre ile yararlanabilmektedir.

Tez çalışması kapsamında önemli bir atık potansiyeline sahip İstanbul'da hayvansal atıklar ile hal atıklarının biyogazdan elektrik üretiminde değerlendirilmesi incelenmiştir. Bu çalışma atıkların yoğun olduğu ve önceden belirlenen ilçeler temel alınarak yapılmıştır. İlk olarak atıkların sadece %10'unun kullanılması ile elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Böyle bir durumda 5013 konutun bir yıllık elektrik ihtiyacı yenilenebilir enerjiden karşılanabilmektedir. Ayrıca yıllık 25009.399 ton organik gübre üretimi ile suni gübre kullanımının azaltılması sağlanabilmektedir. Biyokütle kullanılabilirliği artırıldığında yenilenebilir enerjiden elektrik ihtiyacı karşılanan konut sayısı ve organik gübre üretimi doğrusal olarak artmıştır. Analizler ancak biyokütle depolarının kapasitesinin az olmasından dolayı %50 biyokütle kullanılabilirliği durumuna kadar yapılabilmektedir.

Elde edilen sonuçlar, İstanbul'da enerji ihtiyaçlarının desteklenmesinde biyokütle temelli sürdürülebilir enerjinin potansiyel rolünü ortaya koymaktadır.

Daha önce belirtildiği gibi kontrolsüz uygulamalar sonucunda çok tehlikeli hale gelen atıkların enerji ve gübre üretiminde kullanılması mutluluk verici bir olaydır. Hayvansal atıklar ile hal atıklarının değerlendirilmesi için yapılan çalışmada; çevresel etkileri en aza indirmek, çalışma konusunda bilinç uyandırmak, enerjide dışa bağımlılığı azaltmak ve enerji güvenliğini sağlamak istenilen hedeflerden bazılarıdır. Bu noktada İstanbul'da gerçek veriler ve hedeflerle hazırlanmış unsurlar eşliğinde yapılan çalışma sonucunda yenilenebilir enerji politikaları ve ekonomik bağımsızlığı artırarak sürdürülebilir kalkınma yolunda daha hızlı ilerlemenin sağlanması planlanmaktadır. Ayrıca bu çalışma, biyokütle temelli sürdürülebilir enerji tedarik zinciri tasarımına ilişkin literatürde gerçek bir uygulama sunarken, aynı zamanda yenilenebilir enerji alanında tedarik zinciri yönetiminin önemli bir rolünü de ortaya çıkarmaktadır.

Gelecek araştırmalar bu çalışmayı çeşitli şekillerde genişletebilir. İlk olarak, biyoenerji üretimini teşvik etmeye yönelik devlet müdahalesi, toplam sera gazı emisyonlarını ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak için iyi bir başlangıç stratejisi olabilir. Tedarik zinciri verimliliğini arttırmak için trijenerasyon sistemi değerlendirilebilir. Biyokütle depolarının ve biyagaz tesislerinin kapasitesi artırılarak hem yıllık enerji üretimi hem de daha fazla atığın değerlendirilmesi sağlanabilir. Tek bir şehre alternatif olarak daha geniş coğrafi alanı kapsayan bir model geliştirilmesine odaklanabilir. Matematiksel programlama yaklaşımları arasında MILP, tedarik zinciri kararlarını optimize etmek için uygulanan yüksek kullanımlı bir yaklaşımdır. Ancak gerçek dünya problemleri her zaman karmaşıktır. Bu da modelleme de çeşitli belirsizliklere yol açmaktadır. Bu nedenle, MILP yaklaşımının kullanılması yeterli olmayabilir. Belirsizlikler stokastik programlama modelleri kullanılarak ele alınabilir. Son olarak, planlama ufkunda tek dönemli model yerine zaman içinde altyapının gelişimini hesaba katan çok dönemli bir model tasarlanabilir.

KAYNAKLAR

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2010). Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 919–937.
- Akbi, A., Saber, M., Aziza, M., & Yassaa, N. (2017). An overview of sustainable bioenergy potential in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72(April 2016), 240–245.
- Amigun, B., & Von Blottnitz, H. (2010). Capacity-cost and location-cost analyses for biogas plants in Africa. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(1), 63–73.
- An, H., Wilhelm, W. E., & Searcy, S. W. (2011). A mathematical model to design a lignocellulosic biofuel supply chain system with a case study based on a region in Central Texas. *Bioresource Technology*, 102(17), 7860–7870.
- Atashbar, N. Z., Labadie, N., & Prins, C. (2016). Modeling and optimization of biomass supply chains: A review and a critical look. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 604–615.
- Avcioğlu, A. O., & Türker, U. (2012). Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1557–1561.
- Awudu, I., & Zhang, J. (2012). Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1359–1368.
- Azaron, A., Brown, K. N., Tarim, S. A., & Modarres, M. (2008). A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics*, 116(1), 129–138.
- Ba, B. H., Prins, C., & Prodron, C. (2016). Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains: An Operations Research perspective. *Renewable Energy*, 87, 977–989.
- Bairamzadeh, S., Saidi-Mehrabad, M., & Pishvaei, M. S. (2018). Modelling different types of uncertainty in biofuel supply network design and planning: A robust optimization approach. *Renewable Energy*, 116, 500–517.
- Bastas, A., & Liyanage, K. (2018). Sustainable supply chain quality management: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 181, 726–744.
- Beamon, & Benita, M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55(3), 281–294.

- Beis, S. H., Onay, Ö., & Koçkar, Ö. M. (2002). Fixed-bed pyrolysis of safflower seed: Influence of pyrolysis parameters on product yields and compositions. *Renewable Energy*, 26(1), 21–32.
- Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., & Iyyappan, J. (2018). Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(August 2017), 570–582.
- Borgonovo, E., Buzzard, G. T., & Wendell, R. E. (2018). A global tolerance approach to sensitivity analysis in linear programming. *European Journal of Operational Research*, 267(1), 321–337.
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94.
- Brown, D., Shi, J., & Li, Y. (2012). Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production. *Bioresource Technology*, 124, 379–386
- Chen, C. W., & Fan, Y. (2012). Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 150–164.
- Chinese, D., Patrizio, P., & Nardin, G. (2014). Effects of changes in Italian bioenergy promotion schemes for agricultural biogas projects: Insights from a regional optimization model. *Energy Policy*, 75, 189–205.
- Choong, Y. Y., Chou, K. W., & Norli, I. (2018). Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(August 2017), 2993–3006.
- Corsano, G., Vecchiotti, A. R., & Montagna, J. M. (2011). Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering detailed plant performance model. *Computers and Chemical Engineering*, 35(8), 1384–1398.
- Čuček, L., Lam, H. L., Klemeš, J. J., Varbanov, P. S., & Kravanja, Z. (2010). Synthesis of regional networks for the supply of energy and bioproducts. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 12(6), 635–645.
- Čuček, L., Varbanov, P. S., Klemeš, J. J., & Kravanja, Z. (2012). Total footprints-based multi-criteria optimisation of regional biomass energy supply chains. *Energy*, 44(1), 135–145.
- Department of Energy & Climate Change (DECC), Government emission conversion factors for greenhouse gas company reporting: Conversion factors 2017.

- Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357–1378.
- Duarte, A., Sarache, W., & Costa, Y. (2016). Biofuel supply chain design from Coffee Cut Stem under environmental analysis. *Energy*, 100, 321–331.
- Edwards, J., Othman, M., & Burn, S. (2015). A review of policy drivers and barriers for the use of anaerobic digestion in Europe, the United States and Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 815–828.
- Eksiöğlü, S. D., Acharya, A., Leightley, L. E., & Arora, S. (2009). Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 57(4), 1342–1352.
- Evrendilek, F., & Ertekin, C. (2003). Assessing the potential of renewable energy sources in Turkey. *Renewable Energy*, 28(15), 2303–2315.
- Faaij, A. (2006). Modern biomass conversion technologies. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change (11).
- Fahimnia, B., Farahani, R. Z., Marian, R., & Luong, L. (2013). A review and critique on integrated production-distribution planning models and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 1–19.
- Fischer, J., Manning, A. D., Steffen, W., Rose, D. B., Daniell, K., Felton, A., ... Wade, A. (2007). Mind the sustainability gap. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(12), 621–624.
- Ganesh, R., Torrijos, M., Sousbie, P., Lugardon, A., Steyer, J. P., & Delgenes, J. P. (2015). Effect of increasing proportions of lignocellulosic cosubstrate on the single-phase and two-phase digestion of readily biodegradable substrate. *Biomass and Bioenergy*, 80, 243–251.
- Giarola, S., Zamboni, A., & Bezzo, F. (2011). Spatially explicit multi-objective optimisation for design and planning of hybrid first and second generation biorefineries. *Computers and Chemical Engineering*, 35(9), 1782–1797.
- Gold, S., & Seuring, S. (2011). Supply chain and logistics issues of bio-energy production. *Journal of Cleaner Production*, 19(1), 32–42.
- Gonela, V., Zhang, J., & Osmani, A. (2015). Computers & Industrial Engineering Stochastic optimization of sustainable industrial symbiosis based hybrid generation bioethanol supply chains q. *Computers & Industrial Engineering*, 87, 40–65.
- Hamawand, I. (2015). Anaerobic digestion process and bio-energy in meat industry: A review and a potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 37–51.

- Hart S. A. (1960). "TÜBİTAK-MAM Kümes ve Ahır Gübrelerinin Geri Kazanılması ve Bertarafı Projesi-Başlangıç Raporu", Mayıs, 2001.
- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478–5484.
- Huang, G. Q., Zhang, X. Y., & Liang, L. (2005). Towards integrated optimal configuration of platform products, manufacturing processes, and supply chains. *Journal of Operations Management*, 23(3–4), 267–290.
- Hugo, A., & Pistikopoulos, E. N. (2005). Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks. *Journal of Cleaner Production*, 13(15), 1428–1448.
- IEA - International Energy Agency, World energy outlook 2014, OECD/IEA, Paris, France (2014).
- Jayaraman, R., La Torre, D., Malik, T., & Pearson, Y. E. (2015). Optimal Work Force Allocation for Energy, Economic and Environmental Sustainability in the United Arab Emirates: A Goal Programming Approach. *Energy Procedia*, 75, 2999–3006.
- Jensen, I. G., Münster, M., & Pisinger, D. (2017). Optimizing the supply chain of biomass and biogas for a single plant considering mass and energy losses. *European Journal of Operational Research*, 262(2), 744–758.
- Jiménez Navarro, J. P., Kavvadias, K. C., Quoilin, S., & Zucker, A. (2018). The joint effect of centralised cogeneration plants and thermal storage on the efficiency and cost of the power system. *Energy*, 149, 535–549.
- Jonker, J. G. G., Junginger, H. M., Versteegen, J. A., Lin, T., Rodríguez, L. F., Ting, K. C., ... van der Hilst, F. (2016). Supply chain optimization of sugarcane first generation and eucalyptus second generation ethanol production in Brazil. *Applied Energy*, 173, 494–510.
- Kahraman, C., Kaya, I., & Cebi, S. (2009). A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process. *Energy*, 34(10), 1603–1616.
- Kanzian, C., Kühmaier, M., Zazgornik, J., & Stampfer, K. (2013). Design of forest energy supply networks using multi-objective optimization. *Biomass and Bioenergy*, 58, 294–302.
- Karkania, V., Fanara, E., & Zabaniotou, A. (2012). Review of sustainable biomass pellets production - A study for agricultural residues pellets' market in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1426–1436.

- Keskin, T., Arslan, K., Karaalp, D., & Azbar, N. (2018). The Determination of the Trace Element Effects on Basal Medium by Using the Statistical Optimization Approach for Biogas Production from Chicken Manure. *Waste and Biomass Valorization*, 1–10.
- Kim, J., Realf, M. J., Lee, J. H., Whittaker, C., & Furtner, L. (2011). Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 853–871.
- Klamroth, K., Tind, J., & Züst, S. (2004). Integer programming duality in multiple objective programming. *Journal of Global Optimization*, 29(1), 1–18.
- Kremljak, Z. (2017). Economy of Biogas Plants, 0136–0143.
- Kumar, A., Kumar, N., Baredar, P., & Shukla, A. (2015). A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 530–539.
- Lautala, P. T., Hilliard, M. R., Webb, E., Busch, I., Richard Hess, J., Roni, M. S., ... Laitinen, T. (2015). Opportunities and Challenges in the Design and Analysis of Biomass Supply Chains. *Environmental Management*, 56(6), 1397–1415.
- Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821–826.
- Li, Y., Zhou, L. W., & Wang, R. Z. (2017). Urban biomass and methods of estimating municipal biomass resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(June 2016), 1017–1030.
- Liao, C. N. (2009). Formulating the multi-segment goal programming. *Computers and Industrial Engineering*, 56(1), 138–141.
- Lijó, L., González-García, S., Bacenetti, J., & Moreira, M. T. (2017). The environmental effect of substituting energy crops for food waste as feedstock for biogas production. *Energy*, 137, 1130–1143.
- Lora Grando, R., de Souza Antune, A. M., da Fonseca, F. V., Sánchez, A., Barrena, R., & Font, X. (2017). Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(February), 44–53.
- Ma, H., Yang, J., Jia, Y., Wang, Q., Tashiro, Y., & Sonomoto, K. (2016). Stillage reflux in food waste ethanol fermentation and its by-product accumulation. *Bioresource Technology*, 209, 254–258.
- Madsen, M., Holm-Nielsen, J. B., & Esbensen, K. H. (2011). Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3141–3155.

- Mafakheri, F., & Nasiri, F. (2014). Modeling of biomass-to-energy supply chain operations: Applications, challenges and research directions. *Energy Policy*, 67, 116–126.
- Maghanaki, M. M., Ghobadian, B., Najafi, G., & Galogah, R. J. (2013). Potential of biogas production in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 702–714.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555.
- Marufuzzaman, M., & Ekşioğlu, S. D. (2017). Managing congestion in supply chains via dynamic freight routing: An application in the biomass supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 99, 54–76.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47–54.
- Melikoglu, M. (2017). Vision 2023: Status quo and future of biomass and coal for sustainable energy generation in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(May 2016), 800–808.
- Min, H., & Zhou, G. (2002). Supply chain modeling: past, present and future. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1–2), 231–249.
- Mirkouei, A., Haapala, K. R., Sessions, J., & Murthy, G. S. (2017). A mixed biomass-based energy supply chain for enhancing economic and environmental sustainability benefits: A multi-criteria decision making framework. *Applied Energy*, 206(August), 1088–1101.
- Moraes, B. S., Zaiat, M., & Bonomi, A. (2015). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 888–903.
- Naqvi, S. R., Jamshaid, S., Naqvi, M., Farooq, W., Niazi, M. B. K., Aman, Z., ... Afzal, W. (2018). Potential of biomass for bioenergy in Pakistan based on present case and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(August 2017), 1247–1258.
- Nelson, J., Johnson, N. G., Doron, P., & Stechel, E. B. (2018). Thermodynamic modeling of solarized microturbine for combined heat and power applications. *Applied Energy*, 212(December 2017), 592–606.
- Nematollahi, O., Hoghooghi, H., Rasti, M., & Sedaghat, A. (2016). Energy demands and renewable energy resources in the Middle East. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1172–1181.

- Neshat, S. A., Mohammadi, M., Najafpour, G. D., & Lahijani, P. (2017). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(July 2016), 308–322.
- Ng, R. T. L., Ng, D. K. S., & Tan, R. R. (2015). Optimal planning, design and synthesis of symbiotic bioenergy parks. *Journal of Cleaner Production*, 87(1), 291–302.
- Ni, M., Leung, D. Y. C., Leung, M. K. H., & Sumathy, K. (2006). An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Processing Technology*, 87(5), 461–472.
- Nigam, P. S., & Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1), 52–68.
- Olawumi, T. O., & Chan, D. W. M. (2018). A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 183, 231–250.
- Osmani, A., & Zhang, J. (2017). Multi-period stochastic optimization of a sustainable multi-feedstock second generation bioethanol supply chain – A logistic case study in Midwestern United States. *Land Use Policy*, 61, 420–450.
- Othman, M. N., Lim, J. S., Theo, W. L., Hashim, H., & Ho, W. S. (2017). Optimisation and targeting of supply-demand of biogas system through gas system cascade analysis (GASCA) framework. *Journal of Cleaner Production*, 146, 101–115.
- Papapostolou, C., Kondili, E., & Kaldellis, J. K. (2011). Development and implementation of an optimisation model for biofuels supply chain. *Energy*, 36(10), 6019–6026.
- Paulo, H., Azcue, X., Barbosa-Póvoa, A. P., & Relvas, S. (2015). Supply chain optimization of residual forestry biomass for bioenergy production: The case study of Portugal. *Biomass and Bioenergy*, 83, 245–256.
- Poeschl, M., Ward, S., & Owende, P. (2010). Prospects for expanded utilization of biogas in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1782–1797.
- Reis, V., Fabian Meier, J., Pace, G., & Palacin, R. (2013). Rail and multi-modal transport. *Research in Transportation Economics*, 41(1), 17–30.
- Ren, H., Gao, W., & Ruan, Y. (2008). Optimal sizing for residential CHP system. *Applied Thermal Engineering*, 28(5–6), 514–523.

- Rentizelas, A. A., Tatsiopoulou, I. P., & Tolis, A. (2009). An optimization model for multi-biomass tri-generation energy supply. *Biomass and Bioenergy*, 33(2), 223–233.
- Rodr, M. V. (2002). Meta-goal programming. *European Journal of Operational Research*, 136, 422–429.
- Sahebi, H., Nickel, S., & Ashayeri, J. (2014). Strategic and tactical mathematical programming models within the crude oil supply chain context-A review. *Computers and Chemical Engineering*, 68, 56–77.
- Sansaniwal, S. K., Rosen, M. A., & Tyagi, S. K. (2017). Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(May), 23–43.
- Sartori, S., Latrónico, F., & Campos, L. M. S. (2011). Sustainability and sustainable development: a taxonomy in the field of literature. *Ambiente & amp*, 17(1), 1809–4422
- Scano, E. A., Asquer, C., Pistis, A., Ortu, L., Demontis, V., & Cocco, D. (2014). Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy Conversion and Management*, 77, 22–30.
- Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, 54(4), 1513–1520.
- Shabani, N., & Sowlati, T. (2016). A hybrid multi-stage stochastic programming-robust optimization model for maximizing the supply chain of a forest-based biomass power plant considering uncertainties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3285–3293.
- Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C. L., Huhnke, R. L., & Khanchi, A. (2013). Scenario optimization modeling approach for design and management of biomass-to-biorefinery supply chain system. *Bioresource Technology*, 150, 163–171.
- Singh, N. B., Kumar, A., & Rai, S. (2014). Potential production of bioenergy from biomass in an Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 65–78.
- Sözer, S., & Yaldiz, O. (2011). “Muz serası atıkları ve sığır gübresi karışımlarından mezofilik fermantasyon sonucu üretilebilecek biyogaz miktarının belirlenmesi üzerine bir araştırma”, *Akdeniz University Journal of the Faculty of Agriculture*, 24: 75–78.
- Srirangan, K., Akawi, L., Moo-Young, M., & Chou, C. P. (2012). Towards sustainable production of clean energy carriers from biomass resources. *Applied Energy*, 100, 172–186.

- Stadtler, H. (2005). Supply chain management and advanced planning - Basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research*, 163(3), 575–588.
- Surendra, K. C., Takara, D., Hashimoto, A. G., & Khanal, S. K. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846–859.
- Tamiz, M., Jones, D., & Romero, C. (1998). Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 111(3), 569–581.
- Thomas, P., Soren, N., Rumjit, N. P., George James, J., & Saravanakumar, M. P. (2017). Biomass resources and potential of anaerobic digestion in Indian scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(May 2016), 718–730.
- Uslu, A., Faaij, A. P. C., & Bergman, P. C. A. (2008). Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, 33(8), 1206–1223.
- Vaezi, M., Katta, A. K., & Kumar, A. (2014). Investigation into the mechanisms of pipeline transport of slurries of wheat straw and corn stover to supply a bio-refinery. *Biosystems Engineering*, 118(1), 52–67.
- Vaezi, M., & Kumar, A. (2015). Pipeline hydraulic transport of biomass materials: A review of experimental programs, empirical correlations, and economic assessments. *Biomass and Bioenergy*, 81, 70–82.
- van de Kaa, G., Kamp, L., & Rezaei, J. (2017). Selection of biomass thermochemical conversion technology in the Netherlands: A best worst method approach. *Journal of Cleaner Production*, 166, 32–39.
- Varli, H., Potans, Y., Determination, S. F., Potential, B., & Do, A. (n.d.). A Study For Determination of Biogas Potential i n Çanakkale, Assets by Animals. *Eastern Geographical Review*, 35, 89–106.
- Vávrová, K., Knápek, J., & Weger, J. (2017). Short-term boosting of biomass energy sources – Determination of biomass potential for prevention of regional crisis situations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 426–436.
- Verma, M. K., Shrivastava, R. K., & Tripathi, R. K. (2009). Evaluation of min-max, weighted and preemptive goal programming techniques with reference to mahanadi reservoir project complex. *Water Resources Management*, 24(2), 299–319.

- Vögelin, P., Koch, B., Georges, G., & Boulouchos, K. (2017). Heuristic approach for the economic optimisation of combined heat and power (CHP) plants: Operating strategy, heat storage and power. *Energy*, *121*, 66–77.
- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2012). Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, *120*, 78–83.
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, *99*(17), 7928–7940.
- Widjaya, E. R., Chen, G., Bowtell, L., & Hills, C. (2018). Gasification of non-woody biomass: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *89*(February), 184–193.
- Windisch, J., Röser, D., Mola-Yudego, B., Sikanen, L., & Asikainen, A. (2013). Business process mapping and discrete-event simulation of two forest biomass supply chains. *Biomass and Bioenergy*, *56*, 370–381.
- Yaghoobi, M. A., & Tamiz, M. (2007). A method for solving fuzzy goal programming problems based on MINMAX approach. *European Journal of Operational Research*, *177*(3), 1580–1590.
- Yağlı, H., Koç, Y., Koç, A., Görgülü, A., & Tandiroğlu, A. (2016). Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine exhaust gas waste heat. *Energy*, *111*, 923–932.
- Yilmaz Balaman, Ş., & Selim, H. (2015). A decision model for cost effective design of biomass based green energy supply chains. *Bioresource Technology*, *191*, 97–109.
- Yue, D., You, F., & Snyder, S. W. (2014). Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers and Chemical Engineering*, *66*, 36–56.
- Zhang, C., Xiao, G., Peng, L., Su, H., & Tan, T. (2013). The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology*, *129*, 170–176.
- Zhang, F., Johnson, D. M., & Johnson, M. A. (2012). Development of a simulation model of biomass supply chain for biofuel production. *Renewable Energy*, *44*, 380–391.
- Zhang, F., Wang, J., Liu, S., Zhang, S., & Sutherland, J. W. (2017). Integrating GIS with optimization method for a biofuel feedstock supply chain. *Biomass and Bioenergy*, *98*, 194–205.

- Zhang, J., Osmani, A., Awudu, I., & Gonela, V. (2013). An integrated optimization model for switchgrass-based bioethanol supply chain. *Applied Energy*, 102, 1205–1217.
- Zhang, L., & Hu, G. (2013). Supply chain design and operational planning models for biomass to drop-in fuel production. *Biomass and Bioenergy*, 58, 238–250.
- Zhang, L., Xu, C. (Charles), & Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 969–982.
- Zhang, Q., Chang, J., Wang, T., & Xu, Y. (2007). Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 87–92.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hatice Güneş YILDIZ
Doğum Yeri ve Yılı : İstanbul, 17.08.1993
Medeni Hali : Bekâr
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : hgunes.yildiz@istanbulticaret.edu.tr



Eğitim Durumu

Lise : Beşiktaş Bingül Erdem Lisesi, 2011
Lisans : Uşak Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Kimya Mühendisliği Bölümü

Yayını

Yıldız, H. G., Ayvaz, B., (2018). Waste biomass based energy supply chain network design. *Journal of International Trade, Logistics and Law*, 4(1), 126–137.