



T.C.

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORMAN ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİ TEMELLİ BİR ENDÜSTRİYEL
SİMBİYOZ AĞI İÇİN DETERMİNİSTİK VE STOKASTİK
MODELLER**

Murat YEŞİLKAYA

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Danışman

Doç. Dr. Gülesin Sena DAŞ

KIRIKKALE-2021



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORMAN ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİ TEMELLİ BİR ENDÜSTRİYEL
SİMBİYOZ AĞI İÇİN DETERMİNİSTİK VE STOKASTİK
MODELLER**

Murat YEŞİLKAYA

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Danışman

Doç. Dr. Gülesin Sena DAŞ

KIRIKKALE-2021

ONAY SAYFASI

Murat YEŞİLKAYA tarafından hazırlanan “ORMAN ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİ TEMELLİ BİR ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ AĞI İÇİN DETERMİNİSTİK VE STOKASTİK MODELLER” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Gülesin Sena DAŞ

İmza.....

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Burak BİRGÖREN

İmza.....

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ayyüce AYDEMİR KARADAĞ

İmza.....

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Salih TEKİN

İmza.....

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, TOBB Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Adnan AKTEPE

İmza.....

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 07/09/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Murat YEŞİLKAYA

28 / 09 / 2021

ÖZET

ORMAN ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİ TEMELLİ BİR ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ AĞI İÇİN DETERMİNİSTİK VE STOKASTİK MODELLER

Murat YEŞİLKAYA

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Gülesin Sena DAŞ

Eylül 2021, 171 sayfa

Küreselleşen dünyada artan nüfus ve çevre kirliliği nedeniyle, doğal kaynakların tasarruf edilmesi ve sürdürülebilirlik kritik bir konu haline gelmiştir. Bu kapsamda kaynak sürdürülebilirliğini ve temiz üretim yaklaşımını teşvik eden endüstriyel simbiyoz (ES) kavramı popülerlik kazanmıştır. ES, işletmelerin birbirlerinin atık malzeme, enerji ve yan ürünlerinin tekrar kullanımını teşvik ederek hammadde tasarrufu ve enerji verimliliği sağlamayı hedefleyen bir yaklaşımdır.

Bu tez çalışmasının amacı; temiz üretim ve sürdürülebilir kaynak yönetimini destekleyen orman endüstrisi temelli bir ES ağı tasarlamaktır. ES ağları işletmelerin gönüllü işbirliğine dayandığı için işletmeler kar elde ettikleri sürece bu ağda kalacaklardır. Bu amaçla, ES uygulamalarının sıklıkla tercih edildiği orman endüstrisi bir ES ağı tasarlanmıştır. Orman endüstrisinde faaliyet gösteren kereste, kontrplak, yongalevha, liflevha, kağıt ve pelet tesisleri gibi işletmeleri barındıran bu ES ağı bir eko-endüstriyel park (EEP) bünyesinde konumlandırılmıştır. EEP’de faaliyet gösteren işletmelerin konumu ALDEP algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Bu teorik EEP’deki işletmelerin kuracağı ES ağı yaşam döngüsü analizi kullanılarak elde edilmiştir. Sonrasında bu ağ çok amaçlı çok dönemli deterministik bir model kullanılarak analiz edilmiştir. Geliştirilen model hem ağırlıklı toplam hem de ϵ -kısıt yöntemleri çözülmüştür. Modelde malzeme değişiminin mevcut olmadığı ilk döneme

kıyasla, sonraki dönemlerde beklendiği gibi ES ağına dahil olan işletmelerin üretim maliyetleri ve emisyonları azalmıştır. Buna ek olarak ağda önemli miktarda su, atık ve yan ürün değişimi gözlenmiştir.

İşletmelerin faaliyet alanlarındaki son ürünleri üretmeleri esnasında ortaya çıkan yan ürünlerin değiş tokuşuna dayalı bu ES ağı son ürün talebinden etkilenmektedir. ES ağının sürdürülebilirliğine dayalı bu durumun incelenmesi amacıyla talebinin stokastik olduğu iki aşamalı stokastik bir model önerilmiştir. Son ürün talebindeki dalgalanmanın etkisini görmek için ise farklı değişim katsayısı değerleri ($c_v=0,2$, $c_v=0,1$ ve $c_v=0,01$) kullanılmıştır. Model örneklem yakınsama algoritması ile çözülmüş ve tüm c_v değerleri için çok küçük bir (%0,04'ün altında) optimalite boşluğuna ulaşılmıştır. c_v değeri arttıkça hem işletmelerin karlılığı azalmış hem de değiş tokuş edilen yan ürün miktarı ile yan ürün stok miktarı da azalmıştır. Stokastik talep durumunda, ağdaki işletmelerin kârındaki düşüşe rağmen ağın sürdürülebilir olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

Endüstriyel simbiyoz, Matematiksel modelleme, Çok amaçlı optimizasyon, İki aşamalı stokastik programlama, Orman ürünleri endüstrisi, Eko-endüstriyel park, Yaşam döngüsü analizi

ABSTRACT

DETERMINISTIC AND STOCHASTIC MODELS FOR AN INDUSTRIAL SYMBIOSIS NETWORK BASED ON FOREST PRODUCTS INDUSTRY

Murat YEŞİLKAYA

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Industrial Engineering, Ph.D. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gülesin Sena DAŞ

September 2021, 171 pages

Due to the increasing population and environmental pollution in the globalizing world, saving natural resources and sustainability has become a critical issue. In this context, the concept of industrial symbiosis (IS), which promotes resource sustainability and cleaner production approach, has gained popularity. IS aims to provide raw material savings and energy efficiency by enabling the reuse of waste materials, energy and by-products.

The aim of this thesis is to design a forest industry based IS network that supports cleaner production and sustainable resource management. Since IS networks are based on the voluntary cooperation of businesses, companies would stay in these networks as long as they make profit. For this purpose, a forest industry-based ES network is designed, where ES applications are frequently preferred. This ES network, which includes enterprises operating in the forest industry such as sawmill, plywood, particleboard, fiberboard, paper and pellet plants, is located within an eco-industrial park (EEP). The location of plants operating within an eco-industrial park (EIP) is determined using the ALDEP algorithm. The IS network in this theoretical EIP is established using life cycle analysis. Afterwards this network is analyzed using a multi-objective multi-period deterministic model. The developed model is solved by both weighted-sum and ϵ -constraint methods. Compared to the first period when there was no material exchange, the production costs and emissions of the companies

included in the IS network decreased in the following periods as expected. In addition, significant exchange of water, waste and by-products are observed in the network.

This IS network, which is based on the exchange of by-products that arise during the production of the final products of the companies, is affected by the demand for the final product. In order to examine this situation based on the sustainability of the network, a two-stage stochastic model with stochastic demand is proposed. Different coefficients of variation ($c_v=0.2$, $c_v=0.1$ and $c_v=0.01$) are used to see the effect of fluctuation in the final product demand. The model is solved with the sample average approximation algorithm and a very small optimality gap (less than 0.04%) is reached for all c_v values. As the c_v value increased, both the profitability of the companies decreased, and the amount of exchanged by-products and by-product stocks also decreased. In case of stochastic demand, it has been seen that the network is sustainable despite the decrease in the profit of the companies in the network.

Key Words:

Industrial symbiosis, Mathematical models, Multi-objective optimization, Two-stage stochastic programming, Forest products industry, Eco-industrial park, Life cycle assessment

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarımın tüm sürecinde yakın ilgi ve desteğini gördüğüm, emeğini her daim üzerimde hissettiğim tez konumun belirlenmesinde ve yürütülmesinde tüm imkanları sağlayarak bana destek olan ve tezimin bilimsel danışmanlığını üstlenen değerli hocam Doç. Dr. Gülesin Sena DAŞ'a teşekkür eder ve minnet duygularımı sunarım. Tez çalışmamda bana yardımlarını esirgemeyen sayın hocalarım Prof. Dr. Burak BİRGÖREN ve Prof. Dr. A. Kürşad TÜRKER'e teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışma sürecimde tez komisyonlarında ve jürilerinde yer alan değerli hocalarıma da katkıları için teşekkür ederim.

Bugüne kadar her türlü konuda maddi ve manevi desteği sağlayan ve her zaman yanımda olan aileme ve eşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora programı kapsamında 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı, 120M223 hibe numarası ile desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bu çalışmanın, ileride bu konuda yapılacak olan çalışmalara ışık tutması ve ilgililenenlere yol gösterici olmasını dilerim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM I	1
1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II.....	7
2. ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ KAVRAMI VE UYGULAMALARI	7
2. 1. Giriş.....	7
2. 2. Endüstriyel Simbiyoz (ES) Kavramı	10
2.2.1. Endüstriyel Ekoloji (EE)	10
2.2.2. Endüstriyel Simbiyoz	12
2.2.3. ES'nin Gelişimi	18
2.2.4. Eko-Endüstriyel Park	20
2.3. EEP'ler ve Endüstriyel Simbiyoz Uygulamaları	22
2.3.1. Türkiye'de ES	27
2.4. ES Ağları İçin Matematiksel Modeller	29
2.4.1. ES Ağları İçin Tek Amaçlı Modeller	33
2.4.2. ES Ağları İçin Çok Amaçlı Programlama Modeller	36
2.4.3. ES Ağları için Stokastik Modeller	40
2.4.4. ES Ağları İçin İki Seviyeli Modeller.....	41
2.4.5. ES Ağları İçin Gürbüz (Robust) Modeller	43
2.4.6. ES Ağları İçin Doğrusal Olmayan Modeller	44
2.5. Sonuçlar	45
BÖLÜM III.....	46
3. ORMAN ENDÜSTRİSİNDE ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ UYGULAMALARI	46
3.1. Orman Ürünleri Endüstrisi.....	46

3.2. Literatürde Orman Ürünleri Endüstrisinde ES Öneren Çalışmalar.....	48
3.2.1. Orman Ürünleri Endüstrisinde ES Akışları.....	53
3. 3. Sonuçlar	61
BÖLÜM IV	62
4. ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ AĞLARI İÇİN ÇOK AMAÇLI ÇOK DÖNEMLİ BİR MODEL ÖNERİSİ	62
4.1. Giriş	62
4.2. Orman Endüstrisinde Yaşam Döngüsü Analizi (YDA)	65
4.2.1. Orman Endüstrisi Temelli Bir Eko-Endüstriyel Park İçin YDA.....	68
4.3. Tasarlanan Orman Endüstrisi Temelli EEP ve ES Ağı.....	73
4.3.1. Tasarlanan Eko-Endüstriyel Parktaki İşletmelerin Yerleşim Planı	74
4.4. Tasarlanan ES Ağı için Geliştirilen Çok Amaçlı Çok Dönemli Model	80
4.4.1. Çok amaçlı optimizasyon	88
4.4.2. Model Çözüm Sonuçları.....	93
4.5. Sonuçlar	101
BÖLÜM V	103
5. ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ AĞLARI İÇİN ÇOK DÖNEMLİ İKİ AŞAMALI STOKASTİK MODEL ÖNERİSİ	103
5.1. Giriş	103
5.2. Önerilen Endüstriyel Simbiyoz Ağı.....	104
5.2.1. İşletmelerin Talepleri	107
5.3. Stokastik Programlama	108
5.3.1. Stokastik Programlama Modelleri.....	109
5.3.2. İki Aşamalı Stokastik Doğrusal Programlama İçin Teorik Yapısı	110
5.4. Geliştirilen İki Aşamalı Stokastik Model.....	112
5.4.1. Deterministik Model	113
5.4.2. Önerilen İki Aşamalı Stokastik Model.....	115
5.4.3. Örneklem Ortalama Yakınsaması (Sample Average Approximation SAA)....	117

5.4.4. Latin hiperküp örnekleme-Latin hypercube sampling (LHS)	120
5.5. Uygulama ve Çözüm Sonuçları	122
5.5.1. Modelin farklı varyasyon katsayıları (cv) için test edilmesi	128
5.5.2. Sonuçların İşletmeler Bazında İncelenmesi	130
5.6. Sonuçlar	138
BÖLÜM VI	141
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	141
6.1. Gelecek Çalışmalar	143
KAYNAKÇA	144
ÖZGEÇMİŞ.....	170

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
No	No
Çizelge 2.1. Endüstriyel simbiyoz kavramı gelişimi ve değişimi	15
Çizelge 2.2. Dünyadaki endüstriyel simbiyoz uygulama ve teorik çalışmalar	26
Çizelge 2.3. Türkiye’deki ES Projeleri.....	28
Çizelge 2.4. ES ağları için önerilen matematiksel modeller.....	32
Çizelge 2.5. ES ağları için matematiksel modellerin yayınlandığı dergileri	33
Çizelge 2.6. ES ağları için literatürdeki tek amaçlı modeller	34
Çizelge 2.7. ES ağları için literatürdeki çok amaçlı optimizasyon modelleri.....	36
Çizelge 2.8. Endüstriyel simbiyoz ağları için literatürdeki stokastik modeller	40
Çizelge 2.9. ES ağlarında iki seviyeli programlama modeller	42
Çizelge 2.10. ES ağları için literatürdeki gürbüz modeller	43
Çizelge 2.11. ES ağları için literatürdeki doğrusal olmayan modeller	44
Çizelge 3.1. ES çalışmalarının yayınlanan dergilere göre dağılımı.....	49
Çizelge 3.2. Orman endüstrisinde endüstriyel simbiyoz uygulamaları	52
Çizelge 4.1. Farklı ısı kaynaklarının değerleri.....	69
Çizelge 4.2. Orman endüstrisinde YDA kullanarak endüstriyel simbiyozun analizi	70
Çizelge 4.3. YDA’daki tesislerin girdi-çıkış verileri.....	71
Çizelge 4.4. YDA’daki diğer tesislerinin girdi-çıkış verileri.....	72
Çizelge 4.5 Malzeme, enerji ve atık maliyetleri	72
Çizelge 4.6. Son ürün talepleri	73
Çizelge 4.7. Tesisler arası mesafe matrisi (km).....	79
Çizelge 4.8. Tek amaçlı modellerin sonucu.....	93
Çizelge 4.9. Kereste fabrikası için sonuçlar	94
Çizelge 4.10. Kontrplak fabrikası için sonuçlar	94
Çizelge 4.11. Yongalevha tesisi için sonuçlar	95
Çizelge 4.12. Liflevha tesisi için sonuçlar	95
Çizelge 4.13. Kağıt ve kağıt hamuru tesisi için sonuçlar	96
Çizelge 4.14. Pelet tesisi için sonuçlar	96
Çizelge 4.15. Su arıtma tesisi için sonuçlar	97
Çizelge 4.16. Organik gübre tesisi için sonuçlar	97
Çizelge 4.17. EEP içinde ve dışından sağlanan değişimlerin yüzdesi (yıllık).....	98

Çizelge 4.18. Tasarlanan endüstriyel simbiyoz ağındaki tesisler arasındaki akışlar	99
Çizelge 4.19. Ağırlıklı toplam yöntemi baskın olmayan sonuçlar	100
Çizelge 4.20. ε -kısıt yöntemiyle elde edilen baskın olmayan sonuçlar	100
Çizelge 5.1. Ağdaki işletmeler arasındaki ilişkiler	105
Çizelge 5.2. Hammadde ile üretim için maliyetler ve ağırlık	105
Çizelge 5.3. Yan ürün ile üretim için maliyetler ve ağırlık	106
Çizelge 5.4. İşletmelerin talep ortalamaları ve standart sapmaları ($cv = 0,1$)	108
Çizelge 5.5. $M=5$ için elde edilen sonuçlar	122
Çizelge 5.6. $M=10$ için elde edilen sonuçlar	123
Çizelge 5.7. $M=15$ için elde edilen sonuçlar	123
Çizelge 5.8. Modellerin boyutları ve çözüm süreleri	124
Çizelge 5.9. Farklı N ve M değerleri için istatistiksel alt ve üst sınır değerleri	125
Çizelge 5.10. Ortalama optimalite boşluk ve güven aralığı.	126
Çizelge 5.11. Farklı cv değerleri için elde edilen sonuçlar	129
Çizelge 5.12. İşletmelerin periyotlara göre üretim ile ilgili sonuçları ($cv=0,01$)	131
Çizelge 5.13 İşletmelerin periyotlara göre üretim ile ilgili modelin sonuçları ($cv=0,1$) ...	132
Çizelge 5.14. İşletmelerin periyotlara göre üretim ile ilgili sonuçları ($cv=0,2$)	133
Çizelge 5.15. ES ağındaki tesisler arasındaki akışlar	138

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
Şekil 1.1. Tezin içeriği ve yapısı	6
Şekil 2.1. Doğrusal ve döngüsel sistem	8
Şekil 2.2. Döngüsel ekonomi ve ilişkileri.....	9
Şekil 2.3. Endüstriyel Ekolojinin üç düzeyde ayrımı	11
Şekil 2.4. Endüstriyel ekoloji uygulama sınıfları	12
Şekil 2.5. Aynı bölgede ES ağlarındaki malzeme akışları.....	17
Şekil 2.6. Tipik bir endüstriyel simbiyoz ağı.....	18
Şekil 2.7. ES araştırması için bilimsel temeller	19
Şekil 2.8. Eko endüstriyel parkların konsepti	21
Şekil 2.9. Kalundborg atık su simbiyozu.....	23
Şekil 2.10. Endüstriyel simbiyozun gelişimi için önemli projeler.....	24
Şekil 2.11. Dünyadaki endüstriyel simbiyoz örnekleri.....	24
Şekil 2.12. Endüstriyel simbiyoz yoluyla çevresel etkileri.....	30
Şekil 2.13. Endüstriyel simbiyoz optimizasyon çalışmaları amaçları	30
Şekil 2.14 Simbiyoz tipine göre ES ağı matematiksel modellerin amaçları.....	31
Şekil 3.1. Orman endüstrisinde oluşan bazı atık ve yan ürünler	49
Şekil 3.2 Avusturalya Styria ES ağındaki akışlar	53
Şekil 3.3. Finlandiya orman endüstrisinde malzeme ve enerji akışı.....	54
Şekil 3.4. Finlandiya Uimaharju parkı ES ağı	54
Şekil 3.5. İsveç'teki ES ağında yan ürün değişimi	55
Şekil 3.6. Çin'deki Guitang ES ağı akışları.....	56
Şekil 3.7. İsveç'te orman endüstrisinde ES ağı akışlar.....	56
Şekil 3.8. İlk Finlandiya'da Kymi parkı.....	57
Şekil 3.9. Finlandiya Kymi EEP'deki ES ağı akışı	58
Şekil 3.10. Çin REDA parkındaki endüstriyel simbiyoz ağı	58
Şekil 3.11. Almanya'daki ahşap malzeme temelli ES	59
Şekil 3.12. Brezilya, Lages bölgesinde ES ağı	59
Şekil 3.13. Brezilya, Lages orman endüstrisinde model	60
Şekil 4.1. Yan ürün akışı ilgili işlemler ve malzeme akışları	63
Şekil 4.2. Yaşam döngüsü analizi aşamaları	65

Şekil 4.3. Yaşam döngüsü analizi değerlendirmesi	66
Şekil 4.4. Malzemelerin yaşam döngüsü aşamaları	67
Şekil 4.5. Sistematik yerleşim planı aşamaları	75
Şekil 4.6. Tasarlanan EEP için aktivite ilişki grafiği	76
Şekil 4.7. Tasarlanan EEP için ilişki diyagramı	77
Şekil 4.8. ALDEP tarafından belirlenmiş ızgara görünümü (a) ve son düzen (b)	78
Şekil 4.9. ES ağını optimize etmek için ağ tasarımı ve akış verileri	79
Şekil 4.10. Örnek pareto Eğrisi	89
Şekil 4.11. İdeal (Z^*), ütöpik (Z^{**}) ve nadir (Z^{nad}) amaç vektörleri	90
Şekil 4.12. Ağırlıklı toplam ve ε -kısıt elde edilen sonuçların karşılaştırılması	101
Şekil 5.1. İşletmelerdeki girdi ve çıktılar	105
Şekil 5.2. Orman endüstrisindeki endüstriyel simbiyoz ağı modeli	107
Şekil 5.3. Normal dağılıma sahip Latin hiperküp ve Monte Carlo örneklemeleri	121
Şekil 5.4. R kodu ekran görüntüsü	122
Şekil 5.5. $M=15$ için N örneklem sayısının artmasıyla elde edilen amaç fonksiyonları ...	124
Şekil 5.6. Farklı M ve N değerleri için alt ve üst sınırlar	127
Şekil 5.7. Ortalama optimalite boşluğunun yüzde değişimi ve standart sapma değişimi .	127
Şekil 5.8. Farklı cv değerleri için boşluk miktarı ve yüzdesi	130
Şekil 5.9. Farklı cv değerler için işletmelerin ürettiği son ürün miktarları ve karları	134
Şekil 5.10. Farklı cv değerler için kullanılan hammadde ve yan ürün miktarları	134
Şekil 5.11. Farklı cv değerler için yan ürün stok miktarları	135
Şekil 5.12. Farklı cv değerleri için ikinci dönemdeki işletmeler arası yan ürün akışları ..	136
Şekil 5.13. Farklı cv değerleri için üçüncü dönemdeki işletmeler arası yan ürün akışları	137
Şekil 5.14. Farklı cv değerleri için dördüncü dönemdeki işletmeler arası yan ürün akışı	138

KISALTMALAR DİZİNİ

AHP	:	Analitik Hiyerarşi Prosesi
ALDEP	:	Automated Layout Design Program
ANP	:	Analitik Ağ Süreci
BEBKA	:	Bursa, Eskişehir, Bilecik Kalkınma Ajansı
<i>cv</i>	:	Değişim Katsayısı
EB	:	Endüstri Bölgesi
EE	:	Endüstriyel Ekoloji
EEA	:	Avrupa Çevre Ajansı- European Environment Agency
EEP	:	Eko-endüstriyel Park
ES	:	Endüstriyel Simbiyoz
EUR-ISA	:	Avrupa Endüstriyel Simbiyoz Derneği
FAO	:	Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
FISSAC	:	Sürdürülebilir Yapılar İçin ES Teşvik Edilmesi Projesi
KIC	:	Kwinana Endüstri Kurulu
KKT	:	Karush–Kuhn–Tucker
KOSGEB	:	Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeleri Geliştirme ve Destekleme İdaresi
YDA	:	Life Cycle Assessment- Yaşam Döngüsü Analizi
LHS	:	Latin Hiperküp Örnekleme-Latin Hypercube Sampling
MCS	:	Monte Carlo Simülasyonu
MDF	:	Orta Yoğunlukta Liflevha
MILP	:	Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
MOMILP	:	Çok dönemli karma tamsayılı doğrusal programlama
NISP	:	İngiltere Ulusal Endüstriyel Simbiyoz Programı
NLP	:	Doğrusal Olmayan Programlama
OSB	:	Organize Sanayi Bölgesi
SAA	:	Örneklem Ortalama Yakınsama - Sampling Average Approximation
SLP	:	Sistemik Yerleşim Planı- Systematic Layout Planning
SymNet	:	Karadeniz Havzasında Çevrenin Korunması ve Sürdürülebilir Kalkınma için Endüstriyel Simbiyoz Ağı
TTGV	:	Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı
TÜBİTAK	:	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

BÖLÜM I

1. GİRİŞ

Son yıllarda dünya nüfusundaki artış ve teknolojik gelişmeler hızlı kentleşme ve sanayileşmeye yol açmıştır. Bu hızlı değişimlere bağlı olarak çevre sorunları günümüzde giderek artan bir endişeyi de beraberinde getirmektedir. Özellikle çevresel açıdan sürdürülebilirlik ve kaynak kullanımı üzerine olumsuz etkiler yaratmaktadır. Büyük miktarlarda malzeme ve enerji tüketmeye başlayan ülkelerin ortaya çıkardıkları atık miktarı da önemli ölçüde artmıştır (Satterthwaite, 2008; Grimm vd., 2008). Dünya Bankası verilerine göre, Dünya’da 2040 yılına kadar fosil enerjinin %80’inin kullanılacağı (Shell, 2014) ve 2025 yılına kadar atık üretiminin ikiye katlanacağı öngörülmektedir (World Bank, 2012). Bunun yanı sıra Avrupa ülkeleri her yıl, potansiyel olarak geri dönüştürülebilecek veya yeniden kullanılabilir atıkları bertaraf ederek yaklaşık 600 milyon ton değerli malzemeyi kaybetmektedir (European Commission, 2016). Avrupa Birliği Atık Veri Merkezi’ne göre (2016), ortaya çıkan atıkların yaklaşık %60’dan fazlası geri dönüştürülebilecek özelliktedir. Amerika ve birçok Avrupa ülkesinin yanı sıra hem düşük hem de yüksek gelirli ülkeler bu atıkları bertaraf etmek için düzenli depolama alanlarını yoğun bir şekilde kullanmaktadır (EPA, 2014; EUROSTAT, 2014). Fakat bu depolama alanları metan gazı emisyonlarından, hava, su, topraktaki kimyasal ve mikrobiyolojik kirleticilere kadar birçok çevresel sorunu ortaya çıkarmaktadır. (Kjeldsen vd., 2002). Dolayısıyla atıkları bertaraf için kullanılan depolama alanları da çevresel sürdürülebilirlik sorunlarına çözüm olmamıştır.

Küresel sürdürülebilirlik için yeni ekonomik modellerin temelinde döngüsel ekonomi kavramı yatmaktadır. Döngüsel ekonomi sınırlı kaynakların ekonomi içinde mümkün olduğunca uzun süre tutulması ve geri dönüşümle tekrar kullanılması gerektiğini savunmuştur (George, vd., 2015). Döngüsel ekonomi modelindeki kaynak yönetimi ve sürdürülebilirlik çabalarının temelinde Endüstriyel Ekoloji (EE) vardır.

EE kavramından önce, endüstriyel metabolizma kavramı ortaya atılmıştır. Ayres (1989) endüstriyel metabolizmayı, endüstride kullanılan malzeme, enerji ve diğer etmenlerin son ürüne ve atığa dönüştürülme sürecini doğal organizmaların yaşam şekillerine benzeterek endüstrinin metabolizması olarak tanımlamıştır. Daha sonra Frosch ve Gallopoulos (1989) ise endüstriyel metabolizma tanımından yola çıkarak endüstriyel ekoloji kavramını ortaya koymuştur. Bu tanıma göre, endüstriyel işletmeler üretim süreçlerinde biyolojik ekosisteme benzer şekilde hareket etmelidirler; EE'nin temelini oluşturur.

Endüstriyel Ekoloji (EE), sürdürülebilir kalkınma ve kaynak kullanımı destekleyen ve endüstri-doğa ilişkilerinden esinlenen bir çevre yönetim modelidir. (Frosch ve Gallopoulos 1989; O'Rourke vd., 1996). Endüstriyel simbiyoz ise EE'nin bir alt bölümü olup, işletmeler arası seviyede gerçekleşir. Avrupa Komisyonu, ES'i döngüsel ekonomiyi kolaylaştırmak için potansiyel bir bileşen olarak belirlemiştir. Aslında Avrupa uyum politikalarında ve yenilik programlarında, ES'nin fosil yakıt ve doğal kaynakların tüketilmesiyle ilgili sorunların çözümünde kilit bir rol oynayacağı vurgulanmıştır (Iacondini vd., 2015).

ES terimi doğadaki simbiyotik yaşamın birbirinden bağımsız hareket eden endüstriyel işletmelere uyarlanması olarak tanımlanabilir. ES hammaddenin, enerjinin, suyun ve/veya yan ürünlerin fiziksel olarak işletmeler arası değişimiyle meydana gelir (Chertow, 2000). ES ağları, kapalı ve sürdürülebilir yaşam döngüleri aracılığıyla kaynakları, varlıkları ve hizmetleri değiş tokuş eder (Cecelja vd., 2014). Bu sistemin temel taşları, sisteme dahil olacak işletmelerin fiziki yakınlığı, farklı endüstriler arasındaki işbirliği ve sinerjidir. ES bireysel olarak elde edilebilecek faydaların toplamından daha büyük bir fayda edebilmesi için kaynak akışlarını optimize etmeye çalışan bir işbirliği modeline dayanır.

ES, endüstriyel işletmelerin çift taraflı fayda sağlayacakları kazan-kazan (win-win) yaklaşımına benzer bir şekilde işbirliği ağını geliştirir. Bu uygulamalar, işletmelere atık ve yan ürünlerin (enerji, su, lojistik) tekrar kullanımı ile hammadde ve enerji verimliliği sağlayarak ekonomik getiriler de sunar. Ayrıca çevre kirliliğinin azaltılmasında da önemli rol oynar. Böylece son yıllarda kontrol edilmesi güçleşen

sürdürülebilir kaynak kullanımı geliştirilerek hem ekonomik hem de sosyal faydalar sağlanacaktır.

EE ve ES kavramları klasik endüstriyel parkları daha sürdürülebilir ve daha çevreci parklara dönüştürmek için de yenilikçi yollar sunmaktadır. Böylece Eko-endüstriyel park (EEP) kavramı ortaya çıkmıştır. EEP'ler endüstriyel simbiyoz fikrini uygulamanın en yaygın yoludur. Lowe, (1997) göre EEP, enerji, su ve malzemelerin değişimi yoluyla gelişmiş çevresel ve ekonomik fayda arayan üretim ve hizmet işletmelerinden oluşan bir sanayi parkı olarak ifade edilir. EEP'leri geliştirmede amaç, ağa dahil olacak üye işletmelerin ekonomik faydalarını arttırırken çevresel faydalarını da en aza indirmektir. Bu yaklaşım kapsamında park altyapısının ve tesislerinin stratejik tasarımı, çevresel zararların önlenmesi, enerji tasarrufu ve katılımcılar arası işbirliği yer alır. İşbirliği yoluyla, bu işletmeler topluluğu bir endüstriyel ekosistem haline gelir.

Danimarka'daki Kalundborg EEP'i, bu kavramın pratikte uygulanabilirliğinin bir kanıtıdır. Bu anlamda, Kalundborg dünya çapında ES sistemlerinin gelişimi için itici bir güç olmuştur. Bu parkta, işletmeler arasında endüstriyel yan ürün veya atık alışverişi, kendiliğinden ortaya çıkmıştır (Desrochers, 2001; Desrochers 2004; Kaiser, 1999). Kalundborg EEP'deki başlıca çevresel faydalar, yılda 50 bin tonluk fosil yakıt tasarrufu, 200 bin tonluk depolama sahasına atılmayan atık ve 150 bin tonluk önlenen sera gazı emisyonlarıdır (Jacobsen, 2006).

ES'nin uygulandığı en önemli sektörlerinden biri de orman ürünleri endüstrisidir. Sektördeki ana hammadde olan odun doğal bir kaynak olduğundan üretim sürecinde oluşan atık ve yan ürünler birçok sektörde enerji veya yan ürün olarak kullanılabilir (Paixao vd., 2017). Son yıllarda odun yan ürünlerinin veya atıklarının verimli kullanımı sınırlı orman kaynakları ile çevresel ve kırsal ekonomiye ilişkin ilgili faydalar göz önüne alındığında artan bir ilgi görmektedir (Pokharel vd., 2017). Küresel pazarda, düşük değerli odun atıkları biyoenerji veya katma değerli diğer ahşap mühendislik levha ürünleri üretiminde kullanılabilir (Jahan ve Roohnia 2010). Bu durum orman ürünleri endüstrisinde ES sinerjilerini ortaya çıkartmıştır. Orman endüstrisindeki ilk ES örneği, 1990'ların sonlarında

Avustralya'nın Styria bölgesindeki bir sanayi parkıdır. Orman endüstrisi temelli diğer EEP'ler ise Finlandiya'daki Uimaharju ve Kymi ile Çin'de Guitang parklarıdır.

Orman endüstrisinde ahşap malzemenin mobilya, kereste gibi orman ürünleri endüstrilerinde işlenmesi sürecinde yonga, atık odun, odun tozu, kabuk gibi birçok yan ürün/atık malzeme ortaya çıkar. Bu yan ürünler farklı veya benzer sektörlerde enerji kaynağı ya da hammaddeye alternatif bir ürün olarak değerlendirilebilir. Örneğin, mobilya endüstrisinde 1 ton ahşabın işlenmesi sürecinde, hammaddenin yaklaşık yarısı (0,5 ton) atık odun ortaya çıkmaktadır. (Kauppi, vd., 2018). Bu yüksek atık miktarı ile sürdürülebilir orman yönetimini sağlamak mümkün değildir. Dolayısıyla orman endüstrisinde atıkların/yan ürünlerin geri dönüşümü ve tekrar kullanımı gibi temiz üretim ilkelerini benimseyen ES uygulamalarının yapılması önem arz etmektedir.

ES ağlarında endüstriyel işletmeler arasında materyal, yan ürün, su ve enerji alışverişi nedeniyle karmaşık akışlar mevcuttur. Bu karmaşık akışların değerlendirilmesini kolaylaştıran optimizasyon modellerinin kullanılması kaçınılmazdır (Karlsson ve Wolf, 2008).

Bu tez çalışmasının amacı; temiz üretim ve sürdürülebilir kaynak yönetimini destekleyen orman endüstrisi temelli bir ES ağı tasarlayarak ağdaki katılımcı işletmelerinin ekonomik çıkarlarını ön planda tutan, fakat aynı zamanda çevreci olan matematiksel modeller geliştirmektir. Çalışma kapsamında, kurgulanan ES ağını barındıran teorik bir EEP tasarlanmıştır. Bu parkta bulunacak ES ağını kurmak için yaşam döngüsü analizi (Life Cycle Assessment, YDA) yönteminden faydalanılmıştır. YDA'dan elde edilen veriler, simbiyoz ağında gözlemlenebilecek olası yan ürünlerin, atıkların ve enerjinin miktarını ve türünü belirlemede kullanılmıştır. Daha sonra, EEP'deki işletmelerin yerleşimlerinin belirlenmesi için bir tesis tasarımı algoritması olan ALDEP algoritması kullanılmıştır. Sonrasında ise bu tasarlanan EEP'deki işletmelerin faydalarını ön planda tutan matematiksel deterministik ve stokastik modeller geliştirilmiştir.

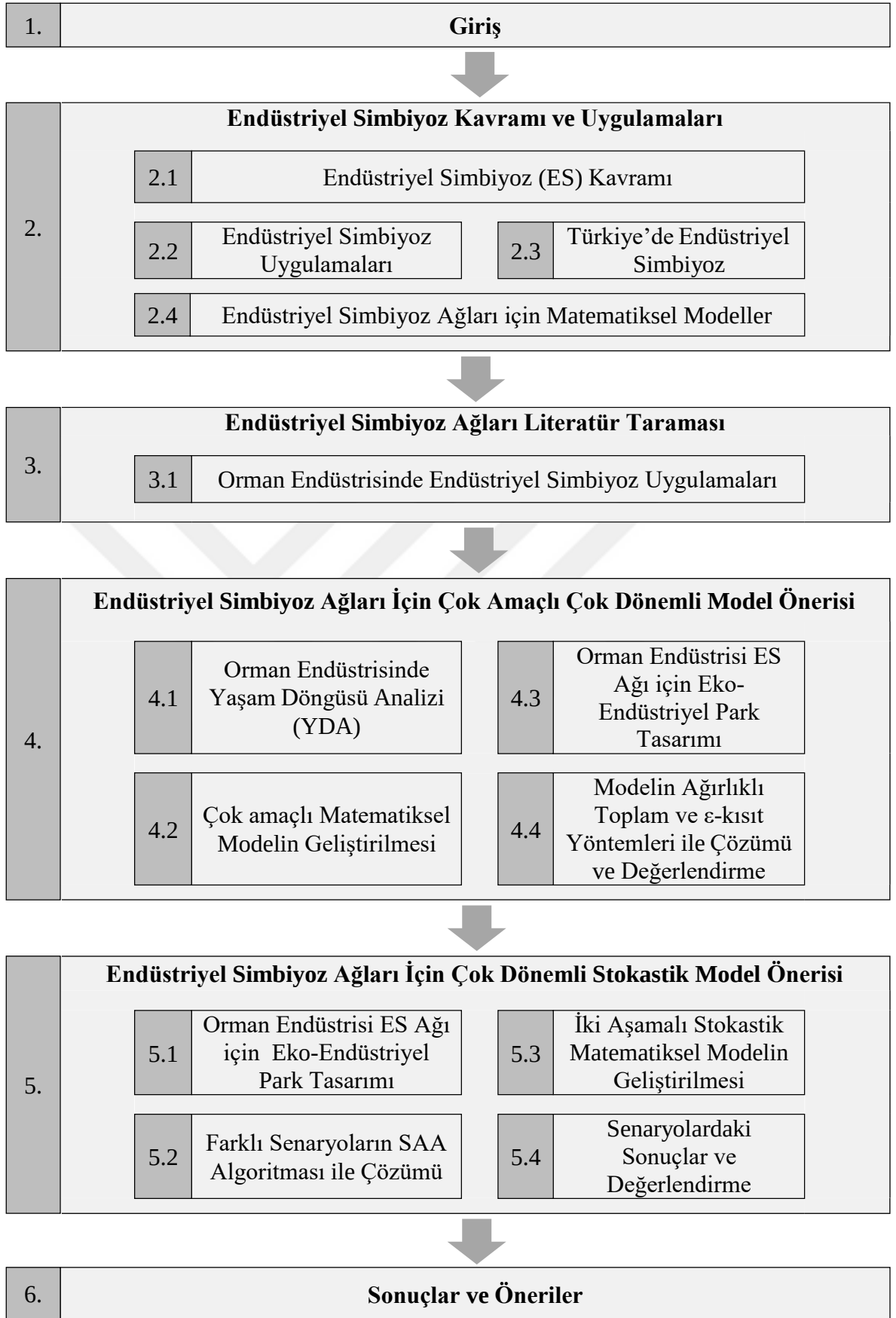
Geliştirilen deterministik model, ES'nin doğası gereği hem çevresel hem de ekonomik hedefleri dikkate aldığından çok amaçlı olarak kurgulanmıştır. Modelin amacı, EEP'deki işletmelerin toplam üretim maliyetini en azlarken ve CO₂ emisyonlarını da

en aza indirmektir. Çok amaçlı çok dönemli bu model ağırlıklı toplam ve ε -kısıt yöntemleri ile çözülmüştür.

Geliştirilen stokastik modelde ise ES ağındaki işletmelerin son ürün taleplerindeki belirsizliklerin, ağdaki işletmelerin karlılığına ve ES ağının sürdürülebilirliğine olan katkısının incelenmesi hedeflenmiştir. Bu maksatla amaç fonksiyonu karın ençoklanması olan iki aşamalı stokastik bir model önerilmiştir. Model farklı talep senaryo değerleri için örneklem yakınsaması algoritması ile çözülmüş ve sonuçlar tartışılmıştır.

Bu kapsamda sunulan tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Şekil 1.1’de bölümler ve bölümlerin içeriği detaylı gösterilmiştir.

Giriş bölümünün ardından, ES kavramı ile Dünya’daki ve Türkiye’deki uygulamalar ayrıntılı bir şekilde Bölüm 2’de sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde, ES ağları için önerilen matematiksel modeller sunulmuş ve literatürdeki açıklar ortaya konmuştur. Bölüm 3’te ise tezin uygulama alanı olan orman ürünleri endüstrisindeki ES uygulamaları ile ilgili literatür taraması sunulmuştur. Bölüm 4’te, orman ürünleri endüstrisi temelli bir EEP’deki işletmeler arasındaki bir ES ağı için önerilen çok amaçlı, çok dönemli matematiksel model sunulmuştur. Bölüm 5’te, ise bir önceki bölümde kurgulanan ES ağının yönetimi için stokastik bir model önerilmiştir. Talebin stokastik olduğu bu modelin çözülmesi için iki aşamalı stokastik programlama modeli kullanılmıştır. Son olarak, Bölüm 6’da bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışmalar paylaşılmıştır.



Şekil 1.1. Tezin içeriği ve yapısı

BÖLÜM II

2. ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ KAVRAMI VE UYGULAMALARI

Bu bölümün amacı, ES üzerine genel bir tartışma sunmaktır. Bu kapsamda ES'nin Dünya'daki ve Türkiye'deki uygulamalarına yer verilmiştir. Son kısımda ise ES'nin geliştirilmesi ve analizi için kullanılan yöntemlerle ilgili literatür detaylı olarak sunulmuştur.

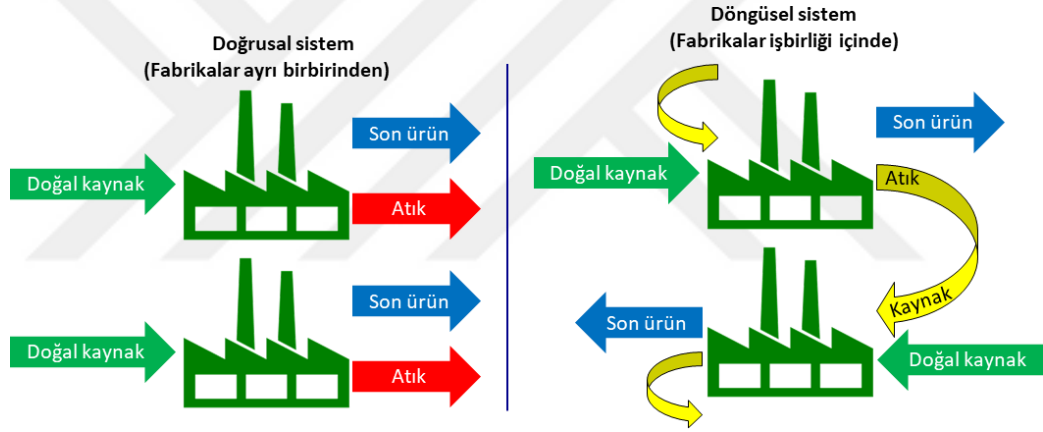
2. 1. Giriş

Ülkeler ekonomilerinde kıt kaynakları verimli bir şekilde kullanmak, dolayısıyla verimlilik artışı sağlamak için sürdürülebilir bir kaynak yönetimi üzerine çalışmaktadırlar. Doğal kaynak kullanımında verimlilik, atıkların azaltılması/yeniden kullanımı ve çevre zararlarının azaltılmasıyla sürdürülebilir kalkınma hamlesiyle gerçekleşebilir. Sürdürülebilir kalkınma çevresel bütünlük, sosyal eşitlik ve ekonomik verimliliği dengelemeye odaklanan politik ve yönetim stratejilerinin bütünüdür (Brundtland, 1987). Brezilya'da 1992 yılındaki Dünya Çevre Kongresi'nden bu yana sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması için çok çeşitli politik, bilimsel, iş temelli ve bireysel girişimler olmuştur (Grosskurth ve Rotmans, 2005). Bu girişimler, çevrenin korunması, atıkların azaltılması, doğal kaynak kullanımında verimlilik ve temiz üretim gibi konuların iyileştirilmesini sağlayan çevre yönetim modelleridir.

Sürdürülebilir kalkınma fikri doğrusal ekonomi yaklaşımı ile gerçekleşmesi mümkün değildir. Doğrusal ekonomi modelinde “al-yap-at” (take-make-dispose) düşüncesi hakimdir. Yani model kaynakların verimli kullanımından ziyade tüketime yöneliktir. Doğrusal yaklaşımının hakim olduğu ekonomilerde doğal kaynakların hızla tüketilmesi, küresel çevre sorunları gibi pek çok olumsuz durumu ortaya çıkmıştır. Sürdürülebilir kalkınmanın tam anlamında gerçekleşmesi için ülkeler doğrusal ekonomi düşüncesinden döngüsel ekonomi düşüncesine geçmelidirler. Döngüsel

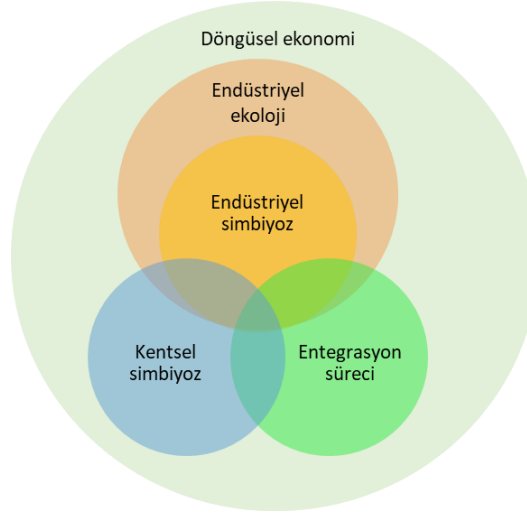
ekonomi modelinde ise, azaltmak-yeniden kullanım-geri dönüşüm (reduce- reuse-recycle) düşüncesi hakimdir (Kirchherr vd., 2017). Döngüsel ekonomi; kaynak kullanımında verimlilik, atıkların azaltılması, yeniden kullanılması ve geri dönüşüm gibi yollarla sürdürülebilir kalkınmaya hizmet etmektedir (Polverini ve Miretti, 2019).

Avrupa Çevre Ajansı, kaynak-yoğun endüstrilerde atık emisyonlarının ve birincil kaynak kullanımının azaltılmasını, sürdürülebilir kalkınmayı hızlandırmanın kritik yollarından biri olarak önermektedir (EEA, 2016). Bu anlamda Endüstriyel Ekoloji (EE) doğrusal sistem düşüncesini döngüsel sistem düşüncesine dönüştürerek endüstriyel sistemlerde israfın nasıl azaltılacağına döngüsel bir bakış açısı sunmaktadır. Şekil 2.1’de doğrusal ve döngüsel sistemlerin işleyişi ve potansiyel akışlar verilmiştir.



Şekil 2.1. Doğrusal ve döngüsel sistem (Kim vd., 2018)

Şekil 2.2’de döngüsel ekonomi ile ilişkili çeşitli çevre yönetim yaklaşımları verilmiştir. Şekilde de gösterilen EE ve ES kavramları üretim aşamalarında endüstriyel süreçlere daha fazla odaklanılmasına, geleneksel olarak ayrılan varlıkların ve işletmelerin kaynakların paylaşımında kendi aralarında iş birliği yapmalarına olanak sağlar (Neves vd., 2020).



Şekil 2.2. Döngüsel ekonomi ve ilişkileri (Van Fan, vd., 2021)

Endüstriyel ekosistem düşüncesini ilk olarak Frosch ve Gallopoulos (1989) tarafından ortaya atılmıştır. Geleneksel endüstriyel işletmeler bireysel olarak üretim sürecinde hammaddeleri alıp süreç sonunda satılacak son ürünler ve bertaraf edilecek atıklar üretilir. Bunun aksine endüstriyel ekosistemde ise, üretim sürecinde tüm malzeme ve enerjilerin nasıl verimli bir şekilde kullanılması gerektiği ve oluşacak atıkların tekrar nasıl değerlendirileceği planlanır.

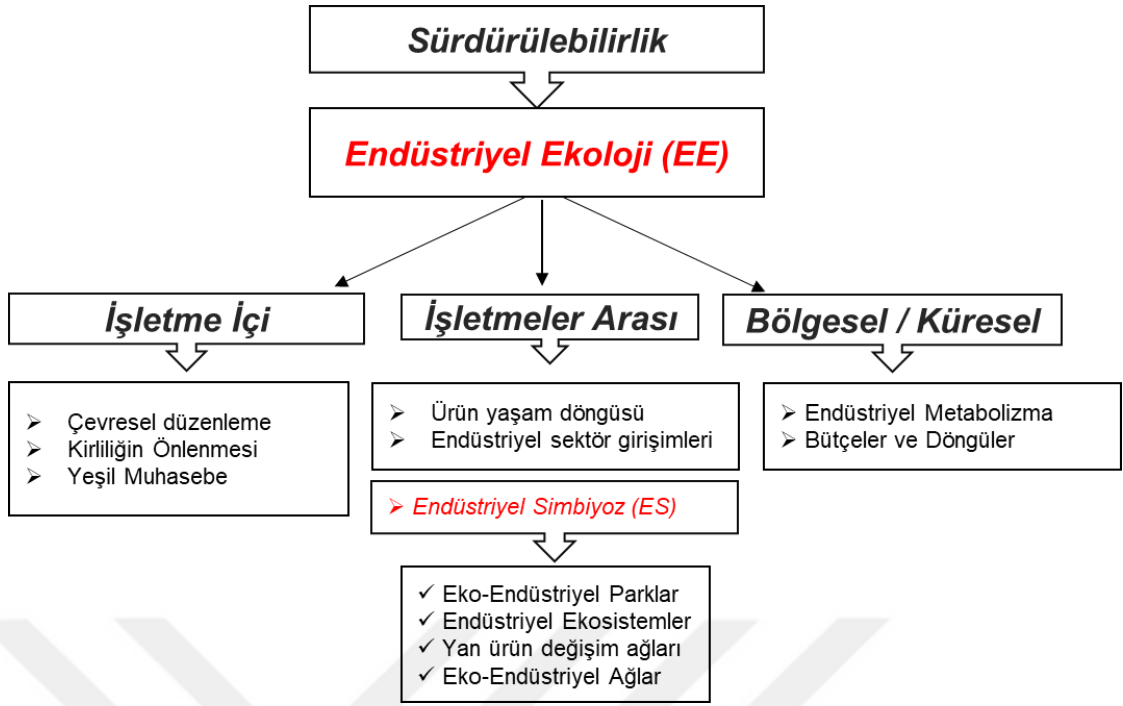
“Simbiyoz” bilindiği gibi bir biyoloji terimi olup iki canlının tek bir canlı gibi birbirlerinden faydalananarak bir arada yaşamalarını ifade etmektedir. ES terimi ise doğadaki simbiyotik yaşamın birbirinden bağımsız hareket eden endüstriyel işletmelere uyarlanması olarak tanımlanabilir. ES üretim maliyetlerini optimize etmek ve çevreyi iyileştirmek için ağdaki bazı işletmeler tarafından üretilen yan ürünlerin ve atıkların diğer işletmeler tarafından hammadde olarak kullanılabileceği yoluyla gönüllü bir işbirliğidir. Bu işbirliğine malzemenin dışında, bilgi, kamu hizmetleri, alt yapı enerji gibi diğer paylaşımlar da dahil edilebilir (Petríková vd., 2016). ES metodolojisi, ekolojik ve sosyal faydalar sağlarken ekonomik kazançlar sağlama kabiliyeti nedeniyle de sürdürülebilir üretimi iyileştirmenin bir yolu olarak ün kazanmıştır (Chertow, 2007). ES ile beraber anılan diğer kavramlar ise; endüstriyel ekoloji ve eko-endüstriyel parklardır. Bir sonraki bölümde bu kavramlar tanıtılacaktır.

2. 2. Endüstriyel Simbiyoz (ES) Kavramı

2.2.1. Endüstriyel Ekoloji (EE)

Doğal ekosistemde canlıların tüketebileceği hiçbir şey yok olmaz ancak canlılar tarafından tekrar kullanılır. Frosch ve Gallopoulos, (1989) ise endüstriyel sistemlerde geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi uygulamalarla doğal ekosistem gibi çalışabileceğini iddia etmiş ve EE kavramını ortaya atmıştır. Geleneksel endüstriyel sistemlerde, işletmeler hammadde tüketir, son ürün ve atık üretir, atıklar bertaraf edilir. EE'nin fikri ise, atık, yan ürün ve enerjiyi yeniden kullanarak işlenmemiş malzeme ve enerji girdilerini azaltmak, böylece emisyonları ve atık oluşumunu azaltmaktır (Korhonen ve Snäkin, 2003). Li (2018) EE olmadan ES'nin var olamayacağını belirtmiştir.

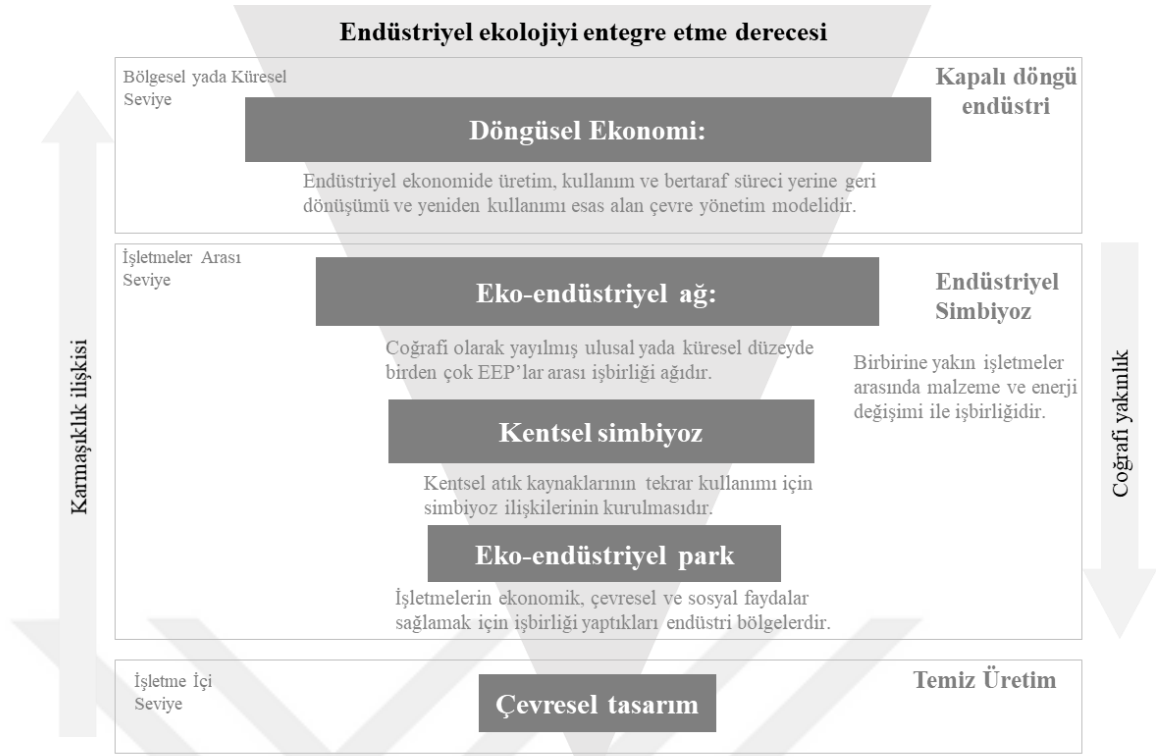
Chertow'e (2000) göre, EE sürdürülebilirliğin bir gereğidir. EE; İşletme içi, işletmeler/tesisler arası ve küresel/bölgesel olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır (Şekil 2.3). Bu sınıflarda EE, oluşumu farklılık arz eder. İşletmeler içi EE; işletmenin kendi içinde sürdürülebilirlik için EE kavramlarını benimsemesini ifade eder. İşletmeler arası EE ise işletmeler arasında EE modelinin uygulamasıdır ki bu ES ve EEP kavramlarını ortaya çıkarmaktadır. Bölgeler arası EE ise; farklı bölgelerde EE fikrinin uygulanmasıdır. Buradan görüleceği üzere EE sadece bir işletme veya bölge için değil tüm yaşamda ve üretim süreçlerinde sürdürülebilirliğin olabileceği fikrini savunur.



Şekil 2.3. Endüstriyel Ekolojinin Üç Düzeyde Ayrımı (Chertow, 2000).

Chertow (2000)'un EE sınıflandırması Bissett, (2014) ve Schulze, (2014) tarafından genişletilmiştir. Bu sınıflandırma Şekil 2.4'de verilmiştir. Buna göre temel EE uygulamaları, işletme seviyesinden başlayarak, temiz üretimin bir parçası olan çevresel tasarımıdır. Daha sonra, ilgili taraflar arasındaki ilişkilerin artmasıyla birlikte, işletmeler arası seviyede ES gözlenir. Bu aşamada karmaşıklık artar. EE'nin işletmeler arası seviyedeki uygulamaları EEP'ler, kent simbiyozu ve eko-endüstriyel ağlardır. Bu üç kavram, temel olarak coğrafi yakınlıkları ile ayırt edilir. EEP'ler sınırlı bir bölgede faaliyet gösterirken, eko endüstriyel ağlar dünya çapına yayılmış işbirliğini içerebilir.

Kent simbiyozu ise konutlar ile endüstriyel işletmeler arasında enerji veya yan ürün alışverişi olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla bir eko-endüstriyel ağdaki karmaşıklık bir EEP'ye göre daha fazladır. EEP'ler yerel bir park yönetimine sahipken ve parkın tüm üyeleri tek bir merkezden yönetilir; diğer bir yandan bir eko-endüstriyel ağın üyeleri ise coğrafi olarak dağınıktır, bu işletmelerin koordine edilmesi zordur. Hatta bu işletmeler birçok farklı eko-endüstriyel ağın üyesi olabilirler. Döngüsel ekonomi ise, EE'nin ulusal, hatta uluslararası veya küresel ölçekte uygulanmasıdır. Bu yapıya endüstriyel ve ticari üyelere (işletmeler) ek olarak, siyasi paydaşların da sürece dahil olmasından dolayı bu yapının koordinasyonu karmaşıktır.



Şekil 2.4. Endüstriyel ekoloji uygulama sınıfları (Bissett, 2014; Schulze, 2014)

2.2.2. Endüstriyel Simbiyoz

ES kavramının doğuşu ilk kez Renner, (1947) tarafından, iki veya daha fazla farklı sektörün bir araya gelmesi ile simbiyotik olarak işgücü ve malzeme alışverişini doğrudan veya dolaylı olarak yapması olarak ifade edilebilir.

Chertow'a (2000) ise ES'yi malzeme, enerji, su ve yan ürünlerin değişimiyle işletmelerin rekabet gücünü geliştirmek için sektörler arası bir iş birliği olarak tanımlar. Bu kapsamda ES'yi EE'nin bir bölümü olarak tanımlanmaktadır. ES sistemin temel taşlarını, ağı dahil olacak işletmelerin konum olarak yakınlığı ile farklı endüstriler arasındaki iş birliği ve sinerjiden oluşmaktadır. Bu işbirliği zincirinin amacı üretim maliyetlerini optimize etmek ve çevreye verilen zararı azaltmak için, işletmeler arasında malzeme/yan ürün, enerji, atık ve su gibi ürünlerin fiziksel değişimini sağlamaktır. Bunlara ek olarak ulaşım, taşıma, alt yapı, çeşitli tesisler, işgücü, uzmanlık gibi kaynaklar da işbirliğine dahil edilir (BEBKA, 2014; Petříková vd., 2016).

ES ile işletmeler birlikte çalışarak, tek başlarına hareket ederek elde edilebilecek bireysel faydaların toplamından daha büyük kolektif fayda elde ederler. Bu tür bir işbirliği, katılımcılar arasındaki sosyal ilişkiler de geliştirebilir. EEP teriminin yaygın olarak değiş tokuş yapan kuruluşları tanımlamak için kullanılmasına rağmen, ES bir EEP'nin katı sınırları içinde gerçekleşmesi gerekmez. Yani bir EEP dışında da bir ES ağı kurulabilir (Chertow 2000).

ES, bir kuruluşun genellikle atık olarak kabul edilen geleneksel üretim süreci çıktılarının tanımlanmasına ve kullanılmasına imkan sağlar. Bu tür atıklar, çoğu zaman farklı bir endüstriyel sektörü temsil eden başka bir kuruluşun üretim sürecinde birincil bir kaynağı (muhtemelen bir ön işlemde sonra) ikame etmek için bir miktar kullanılır (Chertow, 2000). Böyle bir işlem, genellikle endüstriler arasında bir sinerji olarak adlandırılır.

Chertow (2000), ES'yi gerçekleştirmek için beş farklı malzeme değişim taksonomisini önermiştir. Buna göre ES aşağıdaki şekilde gerçekleşebilir;

- Tip 1: atık alışverişi yoluyla
- Tip 2: bir tesis, işletme veya organizasyon içinde
- Tip 3: tanımlanmış bir EEP'de aynı yerde bulunan işletmeler arasında
- Tip 4: aynı yerde bulunmayan yerel işletmeler arasında
- Tip 5: daha geniş bir bölgede "sanal olarak" örgütlenen işletmeler arasında

Tip 1, ES kavramına en uzak yapıdır. Bu tür alışverişlerde malzeme akışları daha gelenekseldir. Örneğin; belediye geri dönüşüm tesisleri ile diğer işletmeler arasında malzeme akışları bu şekildedir. Bu değiş tokuş şekli tipik olarak tek yönlüdür ve genellikle değişime konu olan ürünün yaşamının son aşamasına odaklanır.

Tip 2, esas olarak bir organizasyonun sınırları içinde gerçekleşmektedir. Büyük bir kuruluş içerisinde bulunan birden çok işletme arasındaki işbirliği ile ES gerçekleşmektedir. Bu ağda işletmeler birbirinden bağımsız gibi çalışmaktadır. Bu tip akışlarda satın alma, ürün tasarımı gibi süreçlerin tüm yaşam döngüsü dikkate alınmaktadır.

Tip 3 alışverişler öncelikle bir EEP içinde gerçekleşir, ancak park dışından da sürece dahil olmak mümkündür. Bu tipte bir EEP’de yer alan işletmelerle geri dönüşüm tesisi veya belediye gibi kuruluşlar arasında, enerji, su ve malzeme alışverişi yapılabilir. Ayrıca parkta alt yapı, ulaşım, pazarlama gibi bilgi ve hizmetler paylaşılmaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen ES ağı da Tip 3 sınıflandırmasına girmektedir. Bu tezde ele alınan orman endüstrisi temelli EEP’de orman endüstrisinde faaliyet gösteren işletmelerin yanında bir pelet, bir su arıtma tesisi ve bir organik gübre üretim tesisi bulunmaktadır.

Tip 4, aynı bölgede bulunmayan ancak coğrafi olarak çok uzak da olmayan işletmeler arasındaki ES ağıdır. Kalundborg, Tip 4 alışverişin bir örneğidir, çünkü birincil ortaklar aynı bölgede değildir, birbirlerinin yaklaşık 3 km uzağındadır. Bu alan bir EEP olarak planlanmamasına rağmen, işletmelerin yakınlığı, malzeme, su ve enerji akışları ile ES’ye olanak tanımıştır.

Tip 5, sanal bir EEP’deki yan ürün değişimlerinin tanımlanması, potansiyel işletmelerin belirlenmesi gibi durumlarda ortaya çıkar. Taşınmanın yüksek maliyeti ve kurumsal konumla ilgili kararlara giren kritik kararlar göz önüne alındığında, çok az işletme yalnızca bir ES’nin parçası olmak için yer değiştirir. Bunun bilincinde olarak, Tip 5 modeli, işletmelerin bir arada bulunduğu fiziki bir ortak yerleşim yerine ES sanal bağlantılarla bağlıdır. Bu ağa dahil etmek için boru hatları kullanılabilir. Kalundborg ES ağı bu tipe örnek olabilir.

Çizelge 2.1, son yirmi yılda ES konusunda önde gelen yazarlar tarafından ortaya konulan tanımlar ve bu tanımlarda yıllar içinde yaşanan değişimler görülmektedir. Chertow (2000), Mirata (2004), Zhang vd. (2010), Desrochers ve Leppala (2010), Chertow ve Ehrenfeld (2012); ES ağının birbirine yakın işletmeler arasında olmasının önemli olduğunu savunurken, Lombardi ve Laybourn (2012), coğrafi yakınlığın ES üzerine etkisi olmadığını savunmuştur. Van Berkel vd. (2008), ise ES’ye benzer bir şekilde işletmeler ile konutlar arasında sinerjilerin kurulmasını yani kent simbiyozunu önermişlerdir.

Çizelge 2.1. Endüstriyel simbiyoz kavramı gelişimi ve değişimi

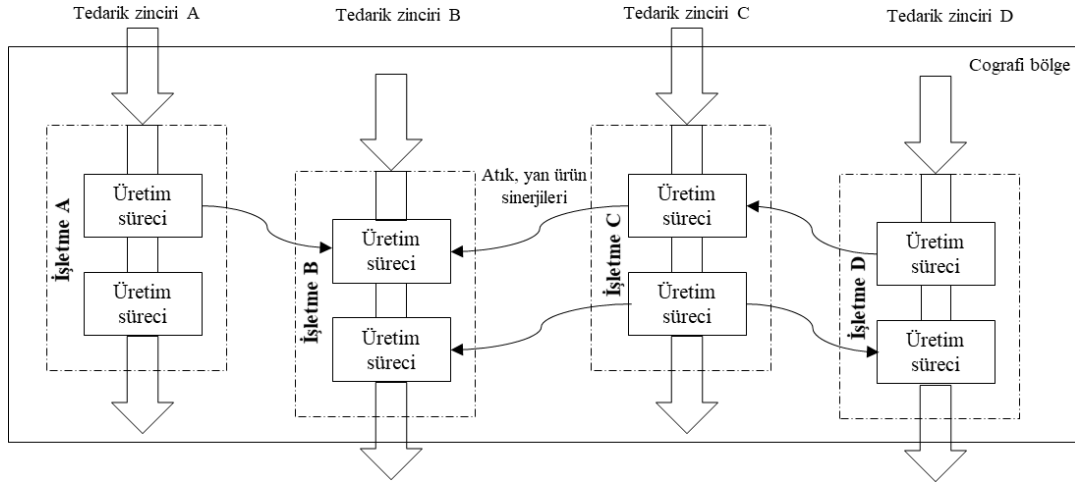
Yıl	Endüstriyel simbiyoz kavramı ve gelişimi
2000	ES; malzeme, enerji, su ve yan ürünlerin değişiminde ortak bir yaklaşımla rekabet gücünü geliştirmek için sektörler arası iş birliğine dayalı ve EE'nin bir bölümü olarak tanımlanmaktadır. Sistemin temel taşlarını, ağa dahil olacak işletmelerin konum olarak yakınlığı, farklı endüstriler arasındaki iş birliği ve sinerji oluşturmaktadır. (Chertow, 2000)
2004	ES, aynı konumda (birbirine yakın) bulunan işletmeler arasında oluşur ve kazanımlar sağlar (Mirata, 2004).
2006	ES, ekonomik ve çevresel faydalar gibi birçok avantaj elde etmek için işletmeler arasında malzeme, enerji, su ve yan ürünlerin değiş tokuşudur (Christensen, 2006). ES faaliyetleri, bilişsel, yapısal, kültürel, politik, mekânsal ve zamansal açısından farklı bağlamlara göre şekillendirilebilir (Boons ve Baas, 2006). ES'yi planlamak için teknik analizlere dayalı yöntem/araç kullanılması gerektiğini savunmuştur (Jacobsen, 2006).
2007	ES, atık ve yan ürünleri değiş tokuş etmek için işletmeleri bir araya getiren biyolojik simbiyotik ağa benzer bir ağıdır (Van Beers vd., 2007).
2008	ES ağındaki katılımcılar birbirlerini aynı şekilde etkilemez. (Baas, 2008). ES ağında birçok faktörü aynı anda planlamak gerektiğinden ağ karmaşık hale gelir ve malzeme ve enerji akışlarının değerlendirilmesini kolaylaştıran optimizasyon modelleri gerekmektedir (Karlsson ve Wolf, 2008). Kent simbiyozu kavramı, ES'nin bir uzantısıdır, yani kentler ile işletmeler arasında simbiyotik (özellikle enerji) ilişki uygulamasıdır (Van Berkel vd., 2008).
2010	ES, aynı konumdaki işletmeler arasında kaynak akışını iş birliği içinde yöneten bir eko-endüstri sistemidir (Zhang vd., 2010). Atık, su ve enerjiyi değiş tokuş etmek için coğrafi olarak yakın olan farklı endüstrilerdeki işletmeler arası ilişkileri geliştirmek için kullanılan bir kavramdır (Desrochers ve Leppala, 2010).
2011	ES ağındaki işletmelerin bilgi gizliliği nedeniyle katılımcılar arasında bilgi tamamen paylaşılmaz, dolayısıyla bu ağı yönetmek için belirsizlikler ve olasılıklar dikkate alınmalıdır (Aviso vd., 2011).
2012	ES, farklı sektörlerden işletmeler arasında karşılıklı olarak atıkları ve yan ürünleri yenilikçi bir şekilde yeniden kullanmak için uygun ilişkiler kurmaktır. Coğrafi yakınlık ES ağı için önemli bir gerekliliktir. (Chertow ve Ehrenfeld, 2012). ES ağı yalnızca atık ve yan ürünler gibi maddi kaynakları değil, aynı zamanda bilgi, uzmanlık ve teknoloji gibi maddi olmayan kaynakların da değişimidir. ES'in sadece coğrafi olarak yakın işletmeler arasında değil, aynı zamanda belirli bir endüstri ağında da olabileceği görülmektedir. Coğrafi yakınlık, ES oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir (Lombardi ve Laybourn, 2012).
2014	ES, sürdürülebilir bir gelir elde etmek için malzeme, enerji, su, yan ürünler, bilgi ve uzmanlık, hizmetler ve altyapı kaynaklarının akışını içeren sosyo-teknik bir süreçtir (Massard vd., 2014). ES kavramı, kapalı döngü tedarik zincirine benzer. (Gonela ve Zhang, 2014).
2015	ES, geleneksel (atık üreten) endüstrilerin kapalı döngü endüstriyel sisteme dönüşümünün bir yoludur (Wen ve Meng, 2015). İşletmelerin çevresel maliyetlerini azaltmak için yan ürün, malzeme ve enerji değiş tokuş sürecidir (Walls ve Paquin, 2015). ES tasarım modeli tipik olarak çok amaçlı bir optimizasyon problemidir (Boix vd., 2015). Yaşam döngüsü analizi ES'yi değerlendirmek için etkili bir yöntemdir (Yu vd., 2015a).
2016	ES, üretim süreçlerinde ekonomik faydalar sağlarken aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği artırmaya amaçlayan döngüsel ekonomi ilkelerini benimsemenin pratik yollarından biridir (Lieder ve Rashid, 2016). ES ağının matematiksel modellerinin temel özelliği doğrusal olmamasıdır (Pan vd. 2016)
2018	ES ağı, endüstriyi daha sürdürülebilir hale getirmeyi ve ekonomik olarak bağımsız endüstriler arasında atık, yan ürün ve hizmetlerin kullanımına dayalı toplu faydalar elde etmeyi amaçlayan iş birliğine dayalı bir tedarik zinciri yönetimi biçimidir (Herczeg, vd., 2018).
2019	ES, basit bir paydaş grubu tarafından iş birliğine dayalı yönetsel kararlar almaktan daha fazlasıdır. İşletmelerin geçmiş kararları, yükümlülükleri ve sorumlulukları ES ağındaki işletmelerin tercihlerini ve motivasyonlarını önemli derecede etkiler (Morales vd., 2019). Ekonomik ve ekolojik özellikleri içeren kapsamlı bir sistemdir (Huang vd., 2019). İşletmeler arasındaki ES ilişkilerini düzenlemek karmaşık bir süreçtir. Bu süreci planlamak için araçlar, teknikler ve işlevler geliştirilmiştir (Yeo vd. 2019).
2020	ES, geleneksel tedarik zincirini simbiyotik tedarikçileri, alıcıları, kaynak veya bilgi paylaşım firmalarını dahil edecek şekilde genişletir (Turken ve Geda, 2020). Kaynak entegrasyon araçlarını (enerji, su, güç, karbon ve atıklar gibi) birlikte değerlendirilmesini ve ES için EEP tasarımı yapılması gerektiğini iddia etmiştir (Lawal vd. 2020).

Jacobsen (2006), ES'yi planlamak için teknik analizlere dayalı bir değerlendirme yöntemi/aracı kullanılması gerektiğini savunmuştur. Karlsson ve Wolf (2008), ise karmaşık olan ES ağları için optimizasyon modellerinin kullanılması gerektiğini vurgulamıştır.

Yeo vd. (2019) ise bu karmaşık ağı planlamak için YDA, sosyal ağ analizi, optimizasyon gibi birçok araç ve yöntem geliştirildiğini vurgulamıştır. En çok kullanılan yöntemlerin; işletmeler ile kişisel görüşmeler, saha araştırmaları veri analizi ve sosyal ağ analizi gibi nitel yöntemler olduğu söylenebilir. Diğer yandan ES ağını planlamak için matematiksel modelleme ve simülasyon gibi araçların çok kullanılmadığı görülmektedir. Aviso vd. (2011) ise ağda oluşan yan ürün veya atık miktarı, işletmelerin ES ağına katılmaya gönüllü olup olmaması gibi birçok belirsizlik olduğunu iddia etmiştir. Lombardi ve Laybourn (2012) ise geleneksel malzeme, yan ürün ve atık değişiminin yanı sıra bilgi, uzmanlık, işgücü gibi fiziksel olmayan kaynakların da ES süreci için önemli olduğunu belirtmiştir.

Gonela ve Zhang, (2014); Ismail ve Zagloel, (2014); Wen ve Meng, (2015), ES ağını kapalı döngü bir tedarik zincirine benzetmiştir. Bu kapalı döngü tedarik zinciri ES ağındaki işletmeler arasındaki malzeme ve bilgi akışı ile ortaya çıkmaktadır (Herczeg vd., 2018). Ancak, geleneksel tedarik zincirlerinden farklı olarak ES ağlarında atık malzemelerin değerlendirmesi, yan ürün değişimi, ekonomik uygulanabilirlik, yasal sorunlar, lojistik, potansiyel malzeme dönüştürme gereksinimleri, risk azaltma gibi konularda ilave araştırma yapılması gerekmektedir (Chertow ve Park, 2016).

ES ağlarında ileri yönlü ve tersine akışlara ek olarak, atıkların ve yan ürünlerin Şekil 2.5'deki oklarla gösterildiği gibi "yatay" bir ürün akışı oluşturduğu görülmektedir. Bu yatay akış birbirine yakın bölgedeki işletmeler arasındaki ES'yi konu olan atık/yan ürün akışlarını ifade eder. Dahası, bu akışlar yan ürün arzına ve talebine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla ES ağları bir tedarik zinciri olarak ele alınmalıdır.



Şekil 2.5. Aynı bölgede ES ağlarındaki malzeme akışları (Herczeg, 2016).

Bütün bu anlatılanların ışığında bir ES modelini oluşturmak için aşağıdaki aşamalar takip edilmelidir (Grant vd. 2010);

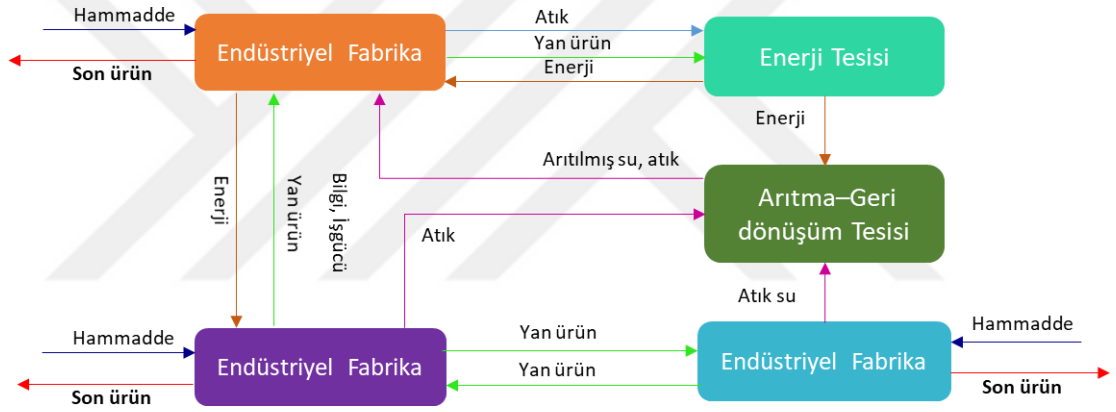
1. Sinerjinin ve potansiyel uygun endüstrilerin *tanımlanması* (örn; alternatif malzemelerin araştırılması, endüstriyel paydaşların belirlenmesi).
2. Sinerjinin fizibilitesinin *değerlendirilmesi* (örn; ekonomik ve çevresel faydaların belirlenmesi, teknoloji hazırlığının test edilmesi, işbirliğinin sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi, maliyetin tahsis edilmesi, risk analizi, yasal sorunların kontrol edilmesi vb.).
3. Sinerjinin *uygulanması ve koordinasyonu* (örn; sözleşme yapma, lojistik seçeneklerin belirlenmesi, gerekli dönüştürme teknolojisini kullanma, vb.).
4. Sinerjiyi *izleme* (örn; sinerji verilerini toplama, bir sinerji veya konfigürasyonun sürdürülebilirliğini yeniden değerlendirme, vb.).

Bu faktörleri dikkate alarak geliştirilen ES ağının başarısını sağlamada dikkate alınması gereken faktörler vardır. Bu faktörler şu şekilde özetlenebilir (Teh vd., 2014);

- (1) hükümet ve sivil toplum kuruluşları tarafından geliştirilen politikalar,
- (2) çevre kanunları ve yönetmelikleri,
- (3) mali yardımlar ve finansman politikaları,
- (4) çevre bilinci ve kapasite geliştirme,
- (5) çevre teknolojisini benimseme,
- (6) yeşil ürünler için araştırma ve geliştirme,
- (7) ES ağındaki güvenilir bilgi,

- (8) endüstriyel işbirliği,
- (9) yeşil ürünler için güçlü bir pazar,
- (10) işbirliği yapan endüstriler arasındaki coğrafi yakınlık,
- (11) çevre sorunları ve
- (12) işbirliği yapan endüstrilerin yapısıdır.

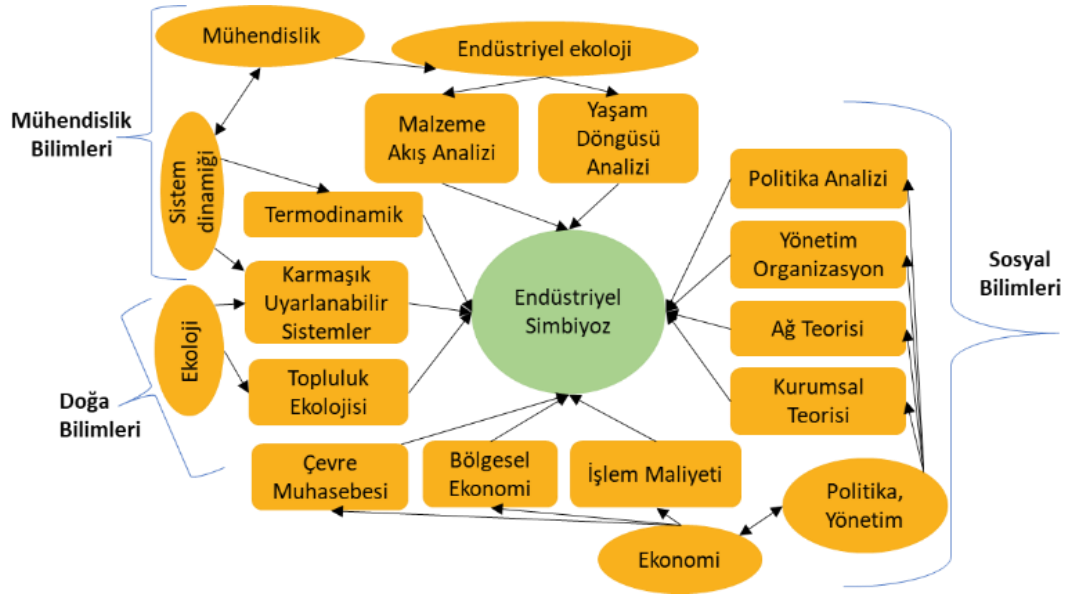
Literatürde ve Bölüm 3’de sunulan uygulamadaki örneklerden yola çıkarak oluşturulan teorik bir ES ağı Şekil 2.6’daki gibi ifade edilebilir. Genelde ES ağında atık/yan ürün üreten bir tesis ve bu atık/yan ürünleri kullanan başka bir tesisin yanında bu tesislerden faydalanan veya onlara hizmet eden geri dönüşüm ve enerji tesisleri bulunur. Böyle bir ağdaki muhtemel sinerjiler yan ürün, atık, enerji, bilgi ve iş birliği olabilir.



Şekil 2.6. Tipik bir endüstriyel simbiyoz ağı

2.2.3. ES’nin Gelişimi

2000’li yılların başından beri ES üzerine yayınlanmış birçok çalışma mevcuttur. Farklı disiplinlerle bu alanda yayınlara rastlamanın sebebi ES’nin sosyal bilimlerden, mühendislik bilimlerine ve doğa bilimlerine kadar birçok alanı kapsayan multidisipliner (disiplinler arası) bir bilimsel çalışma alanı olmasıdır. Şekil 2.7’de ES yaklaşımının doğasında bulunan kavramlar ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 2.7. ES araştırması için bilimsel temeller (Chertow ve Park, 2016).

ES ağlarının çevresel (Mirata ve Emtairah, 2005; Fichtner, v., 2005; Jacobsen, 2006; Daddi vd., 2017; Martin ve Harris, 2018; Martin, 2015; Sokka vd., 2011a; Eckelman ve Chertow, 2013; Wang vd., 2019; Kerdlap, vd., 2020) ekonomik (Jacobsen, 2006; Geng, vd., 2014; Paquin vd., 2015; Guo vd., 2016; Wang vd., 2019) ve sosyal etkisini (Doménech ve Davies, 2009; Behera, vd., 2012; Martin ve Harris, 2018) değerlendiren çalışmaların yanı sıra bu ağlarının nasıl kurulabileceği hakkında nitel analizler yapan (Ashton, 2008; Cimren vd., 2011; Zhang vd., 2013; Chopra ve Khanna, 2014; Shi ve Chertow 2017; Wang vd., 2018) birçok çalışma mevcuttur.

Bunlara ek olarak, son 10 yılda özellikle çevre yönetimi alanında çalışan araştırmacılar tarafından ES alanında yayınlanmış literatür taramalarına da rastlanmıştır (Aissani vd., 2019; Butturi vd., 2019; Yeo vd., 2019; Mallawaarachchi vd., 2020; Neves vd., 2020; Turken ve Geda, 2020; Lawal vd., 2021; Vahidzadeh vd., 2021; Chertow, vd., 2021). Bu çalışmalar daha çok malzeme ve enerji akışlarını planlamak, ES fikirleri önermek ve ES performansını değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

ES ağlarını oluştururken hangi sektörlerin birlikte ele alınabileceği tartışan çalışmalar da (Fraccascia ve Yazan, 2018; Low vd., 2018) mevcuttur. Çünkü farklı sektörlerin üretim süreçleri ve olası iş birlikleri birbirinden oldukça farklıdır (Henriques vd., 2021).

ES ağıları üzerine en fazla çalışma yapılan ülkeler ise Avrupa ülkeleri, Çin ve ABD olduğu görülmüştür. Bununla birlikte ES hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde gözlenmektedir. Bunlar arasında kamu destekli (Yu vd., 2015a; Hilderbrandt vd., 2018) ES'lerin yanında özel sektör destekli (Zhu vd., 2007; Sokka vd., 2011) birçok uygulama da mevcuttur.

ES konusunda yapılan birçok doktora tez çalışmasına da rastlanmıştır (Wolf, 2007; Gonele, 2013; Herczeg, 2016; Valenzuela Venegas, 2019; Neves, 2020; Capelleveen, 2020). Bu çalışmaların çoğu ES kavramlarının tanıtılması, değerlendirilmesi ve çevre yönetimine odaklanmaktadır. Ancak ES ağlarını kapalı döngü bir tedarik zinciri olarak ele alan çalışmalar (Herczeg vd., 2018) yok denecek kadar azdır.

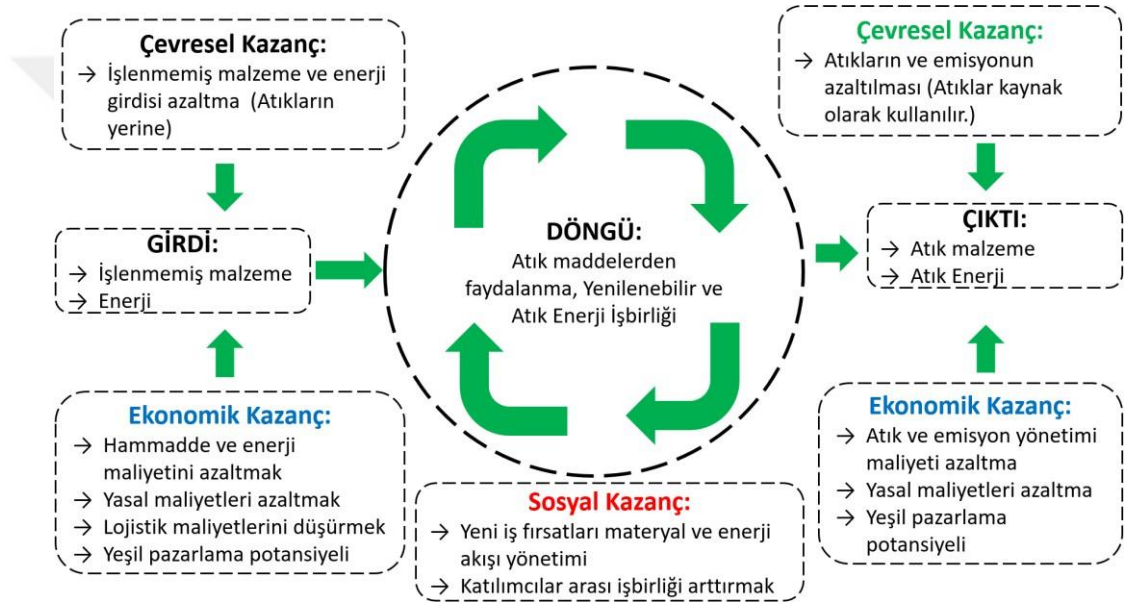
2.2.4. Eko-Endüstriyel Park

Hükümetler ve iş dünyası atıkların geri dönüşümü, kullanımı ve emisyonların azaltılması için çözüm arayışı artan bir ilgi konusudur (Roberts, 2004). Bu kapsamda EEP'ler, sürdürülebilir endüstriyel gelişmeyi teşvik etmek ve EE kavramlarını uygulamak için uygun yapılardır.

Bir EEP ortak bir mülkte bir arada bulunan üretim ve hizmet işletmelerinden oluşan, üretimde atık/yan ürün kullanılarak çevresel etkileri minimize etmek ve kaynakların verimliliğini maksimize etmek için çaba sarf eden bir sanayi kompleksi olarak tanımlanabilir (Fleig, 2000). Bu parka üye işletmeler iş birliği yoluyla çevresel, ekonomik ve sosyal performanslarını artırmaya odaklanırlar. Amaç, her işletmenin bireysel performansını optimize ederek sağlayacağı bireysel faydanın toplamından daha büyük bir fayda sağlamaktır. EEP'nin çalışma yapısı ve sağladığı faydalar Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Şekil 2.8'de görülebileceği üzere EEP'ler çevresel, ekonomik ve sosyal kazançların elde edilmesine imkan sağlar. Çevresel kazançlar atık ve yan ürün kullanılarak malzeme ve enerji girdisin azaltmanın yanında karbon salınımları ve atık oluşumlarının azaltılması olarak söylenebilir. Ekonomik kazanımlar ise, atıkların tekrar kullanımı ile hammadde ve enerji maliyetlerinin azaltılması, aynı bölgedeki işletmelerden malzeme alınmasıyla taşıma maliyetlerinin düşmesi ve parktaki yasal teşviklerle sağlanan faydalar olarak sıralanabilir. Son olarak sosyal kazanımlar ise, ağdaki işletmeler arasında işbirliği kültürünün geliştirilmesi ve yeni iş alanları ve istihdamların yaratılması olarak ifade edilebilir. Ayrıca EEP'ler çevresel faydaları

iyileştirmek için yerel ekonomik aktörlerle örgütler arasında iş birliğine aracılık ederler (Mirata ve Emtairah, 2005).

Lowe'in (2001), temel prensiplerine göre tasarlanmış gerçek bir EEP şu özellikleri taşıması gerekir; en az tek bir yan ürün değişimi veya değişim ağı, geri dönüşüm iş kümesi, çevre teknolojisi işletmelerinde oluşan bir ağ, "yeşil" ürünler üreten işletmeler topluluğu, tek bir çevre teması etrafında tasarlanmış bir endüstriyel parkı, çevre dostu altyapı veya yapıya sahip bir park, karma kullanım için geliştirme (endüstriyel, ticari ve konut).



Şekil 2.8. Eko endüstriyel parkların konsepti (Saikku, 2006).

Bu yaklaşımın bileşenleri arasında park altyapısının ve çevreci yeşil tesislerinin tasarımı (yeni veya yenilenmiş), enerji tasarrufu, temiz üretim, geri dönüşüm ve işletmeler arası işbirliği yer alır (Lowe, 2001).

Bir EEP'nin başarılı bir şekilde geliştirilmesi bir dizi paydaşın aktif katılımı ile gerçekleşebilir (Heeres vd., 2004). Bunlar; yerel, bölgesel ve ulusal devlet kurumlarından kamu sektörü paydaşları, yerel şirketlerin temsilcileri ve EEP'deki potansiyel kiracılar, endüstriyel ve finansal toplulukta liderler, yerel ticaret odası, işçi temsilcileri, eğitim kurumları, projede ihtiyaç duyulan tüm yeteneklere sahip

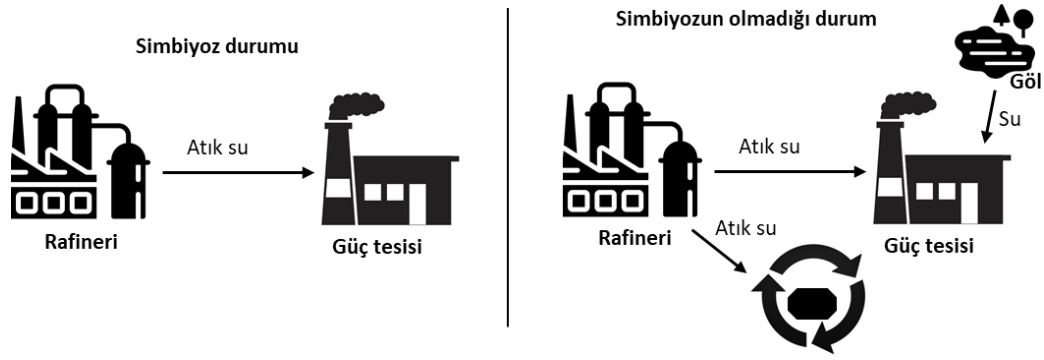
uygulayıcılar, mimarlık, mühendislik, ekoloji, çevre yönetimi ve eğitim ve öğretim kurumları ve toplum ve çevre kuruluşları olarak söylenebilir.

Yukarıda sayılanlara ek olarak olası ES ve EEP uygulamaları hem işletmelere hem de hükümetlere birçok kazanımlar sağlamaktadır. Bu olası kazanımlardan bazıları şöyledir;

- Malzeme, yan ürün, vb. tekrar kullanımı ile sürdürülebilir kaynak kullanımı
- Depolamaya veya bertaraf edilmeye giden atık ve tehlikeli atık miktarında azalma
- Su ve enerji tasarrufu
- CO₂ salınımında azalma
- İşletmeler arasında iş birliği ve sinerji kültürünün yaratılması
- Atık, yan ürün, vb. tekrar kullanımı ile üretim maliyetlerinde düşüş
- Yeni istihdam sağlama
- Çevreci temiz üretimi benimsemiş rekabetçi endüstriyel bölgelerinin kurulması
- Yeni iş kollarının geliştirilmesi
- İşletmeler arasında bilgi paylaşımı

2.3. EEP'ler ve Endüstriyel Simbiyoz Uygulamaları

Bir EEP'de yer alan ilk ve en gelişmiş ES örneği, 1961 yılında Danimarka sahilinde küçük bir sanayi bölgesinde kurulan Kalundborg EEP'sidir. 1989 yılına kadar Kalundborg ES bölgesi Dünya'da çok fazla ilgi uyandırmamıştır. Ancak, bu tarihten sonra bölgenin sürdürülebilirlik ve çevre yönetimi için önemi anlaşılmış ve bölgeye çeşitli ülkelerden ES'yi anlamak için araştırmacılar gönderilmiştir (Grann, 1997). Bu proje ile üye işletmeler arasında atık yönetimiyle sanayi ortaklığı başlatılmış, su kaynaklarını daha etkin kullanmanın yeni yolları aranmış ve maliyet azaltma çabaları geliştirilmiştir (Dunn ve Steinemann, 1998). Yaklaşık 20 farklı yan ürün değişimi, sağlanmıştır (Jacobsen, 2006). Kalundborg'daki küçük bir kısmında (Şekil 2.9'un sol tarafı) güç tesisinde buhar üretimi için rafineriden ortaya çıkan atık su kullanılmaktadır. ES uygulaması olmasaydı (Şekil 2.9'un sağ taraf) güç tesisi atık su yerine gölden taze su kullanacak, rafineride ise suyu arıtmak için arıtma tesisi inşa edecekti.

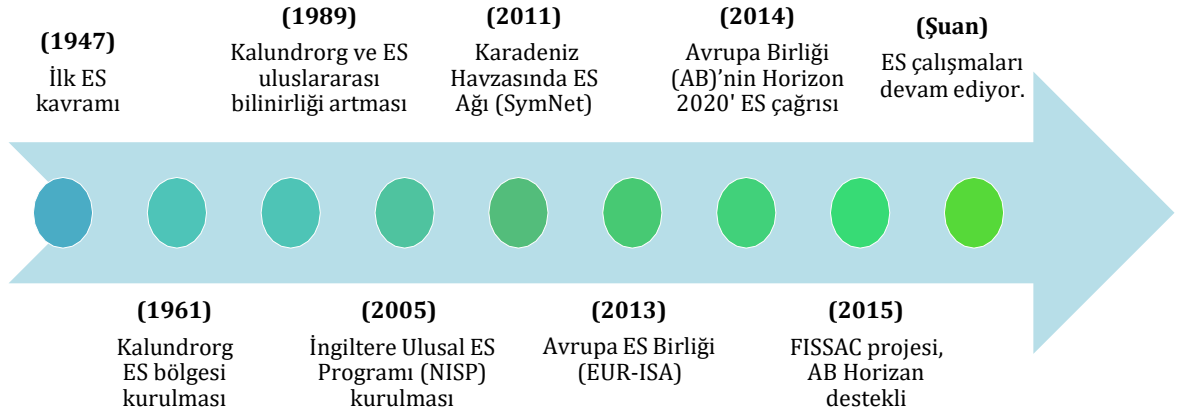


Şekil 2.9. Kalundborg atık su simbiyozu (Hein, vd., 2015)

Diğer önemli bir örnek ise 1991’de Avustralya’da bulunan Kwinana Endüstri Kurulu (KIC)’dur. Bu parkta işletmelerin çevresel ve ekonomik kazanımlar sağlaması için malzeme ve enerji işbirliği için bir ES ağı kurulmuştur. Ağa kimya, petrol, çimento, taş, demir çelik gibi genelde ağır endüstrilerin bulunduğu yaklaşık 100 işletme dahil olmuştur (Van Beers, vd., 2007).

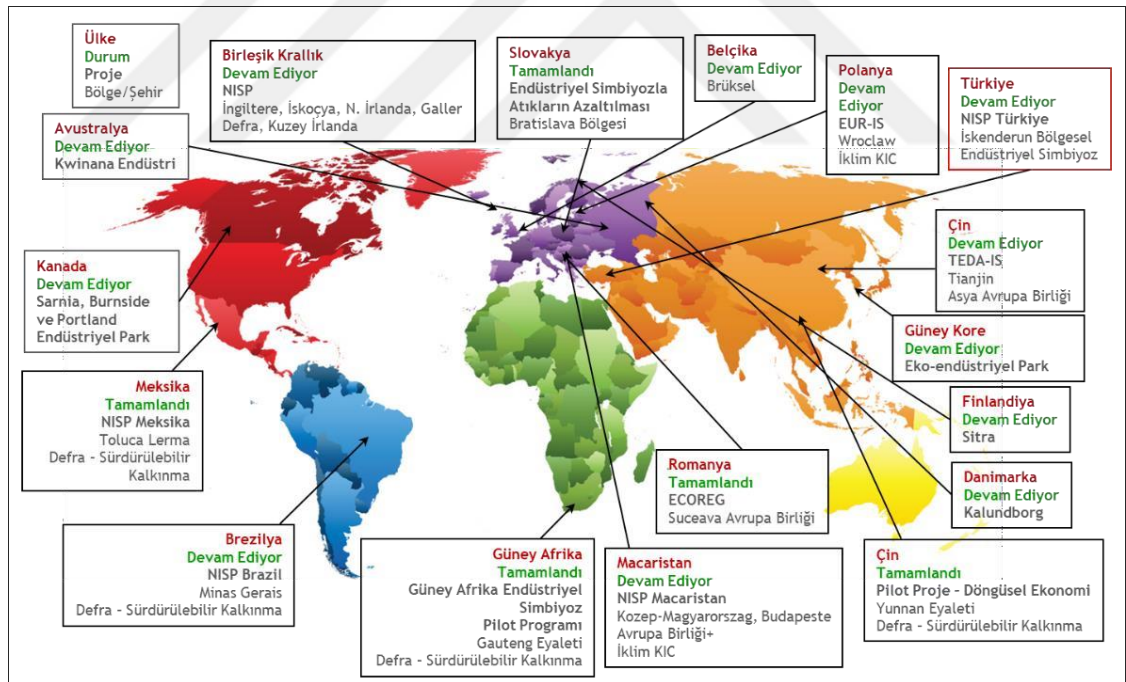
Japonya’da ise, Tokyo Körfezi’nin batısında, yer alan Kawasaki EEP’inde ve ES uygulaması mevcuttur. Yılda yaklaşık 130 milyon \$’lık getiri sağlanan parkta, 9 işletme (kimya, demir-çelik, gıda, petrol, makine), belediye atık toplama, atık su arıtma tesisi ve ticari atık yönetim işletmeleri bulunmaktadır (Van Berkel vd., 2009).

ES uygulamaları 2005 yılında İngiltere Ulusal Endüstriyel Simbiyoz Programı’nın (NISP) başlatılması, 2011 yılında Avrupa Birliği (AB) destekli Türkiye, Romanya, Bulgaristan ve Moldova ülkelerinde Karadeniz Havzasında Çevrenin Korunması ve Sürdürülebilir Kalkınma için ES Ağı (SymNet) projesinin başlatılması ve 2013 yılında Avrupa Endüstriyel Simbiyoz Derneğinin (EUR-ISA) kurulmasıyla ile Avrupa genelinde yaygınlaştırılmıştır (Chertow ve Park, 2016). Son olarak AB Horizon 2020 ES çağrısı ile 2015 yılında Sürdürülebilir Yapılar için Değer Zinciri Üzerinden ES Teşvik Edilmesi (FISSAC) projesi ile Türkiye, İspanya, Belçika, Almanya, İngiltere, İsveç, İtalya, Çekya gibi ülkelerde kamu kurumları ve özel sektör işletmeleri ile ES çalışmaları hala devam etmektedir. ES için önemli projeler Şekil 2.10’da tarihsel sırada verilmiştir.



Şekil 2.10. Endüstriyel simbiyozun gelişimi için önemli projeler

Dünya’da devam eden ve tamamlanan ES projelerine Şekil 2.11’de yer verilmiştir. Görüldüğü gibi Birleşik Krallık’tan Güney Afrika’ya, Türkiye’den Meksika’ya birçok ülkede ES uygulamaları benimsenmiş ve projeler gerçekleştirilmektedir (Laybourn ve Lombardi, 2012).



Şekil 2.11. Dünyadaki endüstriyel simbiyoz örnekleri

ES uygulamaları sağladığı çevresel faydaların yanında ekonomik faydalar da sağlaması özelliğiyle 2000’li yılların sonlarından beri birçok ülke tarafından benimsenmiştir. ES konusunda birçok ülkede teorik ve uygulamalı çalışmalar

yapılmış/ yapılmaya devam etmektedir. Bu çalışmaların özellikle ES fırsatlarını analiz etmek ve geliştirmek için farklı yöntemler kullandığı görülmektedir. Çin, Amerika, İngiltere, Kore, İsveç gibi ülkelerin yanı sıra az gelişmiş ülkelerde de ES uygulamaları görülmektedir.

Çizelge 2.2’de Dünya’daki iyi bilinen ES uygulamaları bir bütün halinde verilmiştir. Bu kapsamda, ES ağına dahil olan sektörler, simbiyozla konu olan yan ürün, enerji, atık vb.’ler, ayrıntılı olarak verilmiştir. ES uygulamalarının gelişmesinde etkili olan faktörlerin en başında ülkelerin çevreci politikaları ve sağladıkları ekonomik teşvikler gelmektedir.

Bu teşvikler su, enerji veya malzeme maliyetlerinde indirimler, vergi muafiyetleri, ağdaki alt yapı ve teknik hizmetlerinden faydalanma olarak söylenebilir. Ayrıca, ES’i destekleyen kuruluşlar genelde kamu çevre örgütleri, uluslararası NISP endüstriyel simbiyoz programı, vakıflar gibi kamu ve özel sektör kuruluşlarıdır.

Çizelge 2.2. Dünyadaki endüstriyel simbiyoz uygulama ve teorik çalışmalar

Endüstriyel simbiyoz projesi-Ülke	ES ağındaki sektörler	Simbiyoz konu olan yan ürün, enerji, su	Katılan işletme sayısı
Kalundborg, Danimarka Grann, H. (1997); Ehrenfeld ve Gertler (1997); Jacobsen (2006); Domenech ve Davies, (2011); Kuznetsova vd., (2017)	Kömürle çalışan enerji santrali, ilaç, alçı levha, petrol arıtma, balık yetiştiriciliği, Kimya Su yönetimi	Su, atık su, kükürt, buhar, çamur, uçucu kül, maya ve organik atıklar	11/18
Kwinana, Avustralya (Bossilkov, vd., 2005; van Beers vd., 2007)	Madencilik, demir-çelik, çimento, Kimya, Petrol, tarım, enerji, Kamu yönetimi, su yönetimi	Uçucu kül, alçıtaşı, enerji, gaz atıkları, atık su	35
Humber bölgesi İngiltere Mirata, (2004); Velenturf, (2016)	Petrol, madencilik, demir-çelik mobilya, gıda, paketlenme, kimya, balık işleme, tarım, biyodizel, enerji ve su yönetimi	Alçıtaşı, atıklar, bitkisel yağ atıkları, atık odun, çamur, buhar, çelik tozu KOBİ'lerde bilgi işbirliği	9
Styria -Avusturya Schwarz ve Steininger (1997); Zhang vd., (2013)	Tarım, gıda, kağıt, plastik, orman endüstrisi, inşaat, seramik, taş, kimya, enerji, demir-çelik, petrol, enerji ve su , kamu yönetimi	Uçucu kül, kağıt, atık odun tekstil atığı, petrol posa atığı	50
Nanjangud- Güney Hindistan Bain vd. (2010)	Tekstil, Orman ürünleri, mermer, gıda, kağıt, şeker rafinerisi alkol, kimya	Çamur, odun atıkları, posa, Kül, Kimyasal atıkları,	42
Uimaharju Industrial Park Finlandiya Saikku (2006)	Kağıt, kereste, güç, ısı, atık su	Atık ısı, buhar, güç, atık odun kül, kağıt kimyasal atıkları	6
İskenderun- Türkiye Alkaya vd. (2014)	Meyve suyu, Çimento, Orman, Yem, biyogaz, Gübre, Demir-çelik, Soda, tekstil, tarım, Yol inşaatı	Atık yağ, ısı, orman atıkları, atık demir, cüruf, pamuk atıkları, bitkisel posa, atık kireç	27
Guitang Group, Çin Zhu vd. (2007); Fang vd., (2007); Guo vd. (2017); Zhang vd., (2013), Shi ve Chertow (2017), Wang vd., (2018)	Şeker rafinasyonu, kağıt, Şeker kamışı, gübre	Şeker pancarı posası, atık kimyasallar, kül, atık su, atık çamur, alkol vb.	4
Ulsan, South Güney Kore Behera vd. (2012); Park vd. (2008)	Arıtma, kağıt, kimya, petrokimya, demir-çelik, alüminyum, çöp yakma fırını	İşgücü desteği, finansal destek işbirliği, Buhar, su, atık kimyasal, atık metal, enerji	41
Sarnia-Lambton Kanada Bansal ve Mcknight, (2009)	Petrol, kimya, enerji, alçı, tarım, kağıt	Buhar, plastik, alçı taşı, atık kimyasallar	-
Çin Tianjin Shi vd., (2010); Zhang vd., (2013); Dong, vd. (2014); Yu vd., (2015a); Yu vd., (2015b); Wang vd., (2017)	Su, Enerji, İnşaat, İmalat, Tarım, Demir çelik, otomotiv, alüminyum, kimya, geri dönüşüm tesisi, İdari ve destek hizmetleri	Su, buhar demir alüminyum atıkları, çamur, cüruf, mühendislik iş birliği, atık odun diğer atık yan ürün ve atık enerji	35
Brezilya Santos ve Magrini, (2018)	Tarım, seramik, demir-çelik, yapı, çimento, orman ürünleri, Şeker rafinerisi, su	Beton, çimento, metal atıkları, atık yağ, balmumu, atık odun, kül, kimyasal, posa, buhar	-
Relvao Eco Ind. Park Portekiz Costa ve Ferrao (2010)	Su, Tarım, Atık, üretim	Atık metal, plastik, taş, yağ, çamur, toprak	15
Guayama, Puerto Rico, USA Chertow ve Lombardi, (2005); Chertow vd., (2008)	Kömürle çalışan enerji santrali, kamu atık su arıtma tesisi, petrokimya rafinerisi ve atık arıtma ilaç firmaları, yol yapımı ve atık su arıtma tesisi	Su, yağ, atık kimyasal	3
Landskrona İsveç Mirata ve Emtairah, (2005)	Cam, Matbaa, enerji, tarım, demir-çelik, kimya, geri dönüşüm tesisleri	Atık su, etanol, atık ısı, plastik, katı atık, bitkisel atık, organik atık, çelik tozu, işgücü	23
Kawasaki, Japonya Berkel vd., (2009a); Geng vd., (2010); Dong vd., (2013); Cerceau vd., (2014); Dong vd., (2014); Ohnishi vd., (2017)	Çimento, çelik, kağıt, geri dönüşüm tesisi, maden	Atık elektronik ürünler, cam, plastik atıkları, uçucu kül, atık kağıt	5
İtalya, Taronta Notarnicola vd., (2014); Notarnicola vd., (2016)	Çelikhane, rafineri, çimento, gıda, inşaat ve inşaat malzemeleri, üretim endüstrileri, tarım, elektrik santralleri	Çelik fabrikası cürufu, uçucu kül, seramik atıkları, çamur, atık enerji	15
İspanya Galiçya Cerceau vd. (2014)	Limanda bulunan endüstriyel işletmeler	Liman atıkları	2
Fransa Bichraoui, vd., (2013); Morales ve Diemer, (2019).	Tarım, kağıt, Demir, çimento,	Atık kimyasal, Metal cürufu buhar, ısı, atık enerji	-
Türkiye (Bu çalışma)	Orman ürünleri, enerji, su, kimya, gübre	Odun atıkları, enerji, su, kül, çamur	10/5

2.3.1. Türkiye’de ES

Türkiye’de ilk ES projesi, 2010 yılında başlatılan “İskenderun Körfezi Endüstriyel Simbiyoz Projesi” dir. Bu kapsamda işletmeler arası bir ES ağı geliştirilmesi planlanmıştır. Analizler sonunda 28 sektörden 51 üye işletme tespit edilmiştir. Fakat, İskenderun Körfezi bölgesinde gerçekleştirilen proje için sadece 32 işletme ES üyelik ve veri tabanı sistemine bilgi sağlamıştır. Üye işletmeler, çoğunlukla Adana, Mersin, Osmaniye ve Hatay’da faaliyet göstermektedir. Oluşturulan veri tabanındaki bu işletmelerin temel sektörleri ise; plastik, tekstil, gıda, enerji, inşaat, kimya, demir-çelik, gübre ve kâğıt sanayi olarak sıralanabilir (Alkaya vd., 2012; URL 2017). Proje sonunda yılda 330 bin ton katı atık kazanımı, 34 milyon kWh enerji üretimi / tasarrufu ve buna bağlı 37 bin ton CO₂ azaltımı ve 6.500 m³ su tasarrufu sağlanmıştır. Buna ek olarak 21 kişilik yeni istihdam, 10 adet yeni ürün ve 6 adet yeni girişim ile sosyal faydalar da sağlanmıştır. Bu sayede projeye katılan işletmelere toplam 6,4 milyon \$ ekonomik fayda sağlayacağı ortaya konulmuştur (Alkaya vd., 2012). Türkiye’de yapılan ES projeleri Çizelge 2.3’de sunulmuştur.

Türkiye’de bu ulusal çalışmalara ek olarak, 2011 yılında Karadeniz Havzası için ES Projesi (SymNet) ile Karadeniz Havzasında bulunan (Bulgaristan, Romanya, Türkiye ve Moldova) ülkeler ile Avrupa Komisyonu tarafından desteklenen bir proje de yapılmıştır. Projenin amacı ekonomik ve sosyal kalkınmayı arttırırken, iklim değişikliğine cevaben çevresel bozulmayı en aza indirmek için yenilikçi bir yaklaşım olarak ES sistemini kurmaktır.

Bir diğer uluslararası ES projesi ise 2015 yılında başlatılan ve Avrupa Birliği tarafından desteklenen FISSAC projesidir. 9 ülkeden (8 AB üyesi ve Türkiye), inşaat işletmeleri, kamu kurumları, enerji kuruluşları, geri dönüşüm işletmeleri ve kâr amacı gütmeyen araştırma kuruluşları gibi 16 ortakdan oluşan projenin amacı, inşaat sektöründe kullanılan malzemelerin sürdürülebilirliğini sağlayacak yeni malzemeleri (Örneğin: yeni eko-çimento ve yeşil beton, yenilikçi seramik karolar ve kauçuk-ahşap plastik kompozitler) geliştirmesidir.

Çizelge 2.3. Türkiye’deki ES Projeleri

Proje	Bölge-Ülke	Proje Süresi	Destekleyen Kurumlar	Amaç ve Sektörler
İskenderun Körfezi’nde ES (Alkaya vd., 2012)	Hatay, Adana, Mersin, Osmaniye	2010-2014	T.C. Kalkınma Bakanlığı, TTGV	Bölgedeki işletmeler arasında ES olanaklarının belirlenmiştir. Plastik, Tekstil, Gıda, Enerji, İnşaat, Kimya, Demir-çelik, Gübre ve Kâğıt gibi sektörlerinde uygulamalar yapılmıştır. Sonuçta ekonomik ve çevresel kazançlar sağlanmıştır.
Karadeniz Havzasında ES Ağı–SYMNET (URL 2019)	Türkiye, Bulgaristan, Romanya, Moldova.	2011-2013	Avrupa Komisyonu, Diğer Kamu Kurumları, İşletmeler	Bu bölgedeki ülkelerin ekonomik ve sosyal kalkınmayı artırırken, çevresel zararları en aza indirmek için bilgi ve iş birliği sağlamak. Endüstriyel üretim, lojistik, turizm ve enerji sektörleri
OSTİM Organize Sanayi Bölgesinde ES Olanaklarının Belirlenmesi Projesi (Demirer, 2014)	Ankara	2014-2015	KOSGEB, ODTÜ, OSTİM	Atık değişimi bazlı ES olanağı olarak belirlenmiştir. İnşaat malzemeleri sektörü ön fizibilitesi yapılmıştır.
Gaziantep ES Projesi (Demirer, 2015)	Gaziantep	2015-2016	İpek Yolu Kalkınma Ajansı, Sanayi Odası	Tekstil, Gıda, Plastik, Deri ve Metal ürünleri sektörleri ES olanakları olarak belirlenmiştir.
Antalya OSB ES ve Eko Verimlilik Projesi (Anahtar, 2017)	Antalya	2015-2017	Antalya OSB, TTGV	İşletmeler arası ortaklık anlayışının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Proje sonunda maden, kimya ve gıda sektörleri ile ilgili fizibilite yapılmıştır.
Trakya ES Programı (Trakya Kalkınma Ajansı, 2017)	Edirne, Tekirdağ, Kırklareli	2014-2023	Trakya Kalkınma Ajansı, TTGV	Bölgede ES olanakları ve sektör bazlı atıkların miktarları belirlenmiştir. Gıda, Tekstil, Ağaç ve Madencilik sektörleri belirlenmiş ve bu sektördeki işletmeler ile görüşülmüş fizibilite raporları hazırlanmıştır. Çalışmalar hala devam etmektedir.
Bursa, Eskişehir, Bilecik ES Programı (BEBKA, 2014; BEBKA, 2019)	Bursa, Eskişehir, Bilecik	2014-2023	BEBKA, TTGV	Gıda, makine imalatı, metal ve madencilik sektörleri ES olanakları olarak belirlenmiştir. Bölgedeki yan ürün olarak kullanılabilecek atıklar belirlenmiştir. Ayrıca proje kapsamında proje pazarı gerçekleştirilmiş gıda, maden, inşaat vb. sektörlerde 32 proje desteklenmiş ve hayata geçirilmiştir. Çalışmalar hala devam etmektedir.
Sürdürülebilir Yapılar İçin ES Projesi-FISSAC (FISSAC, 2019)	Türkiye, İspanya, Belçika, Almanya, İngiltere, İsveç, İtalya, Çekya, Macaristan,	2015-2020	Avrupa Birliği’nin Horizon 2020, Diğer Kamu Kurumları, İşletmeler vb.	İnşaat sektöründeki malzemelerin sıfır atık yaklaşımı ile yenilikçi bir ES modeline dayalı yeni malzemelerin geliştirilmesi. ES konu olan malzemeler, çimento, seramik, taş gibi madenlerin yanında cam ve plastik atıklarıdır. YDA ve Coğrafi bilgi sistemi yaklaşımını temel alan atık ve yan ürün veri yönetimi araçlarının yazılım platformunun oluşturulması. Çalışmalar hala devam etmektedir.

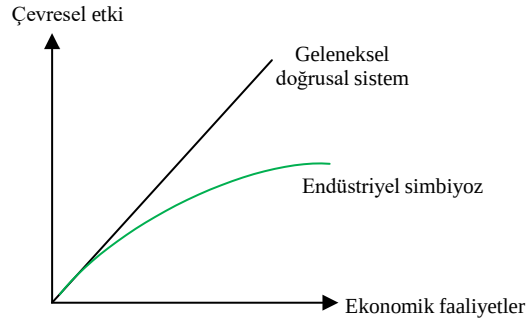
Bu ES projelerine ek olarak bir başka çalışmada Gebze Organize Sanayi Bölgesi'nin EE ve EEP uygulama potansiyeli ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu bölgede bulunan işletmelere uygulanan anket sonucuna göre, işletmeler atıkların değerlendirilmesi ve dönüştürülmesine olumlu baktığı fakat, fakat geleneksel üretim faaliyetlerini koruma eğiliminde olduğu belirlenmiştir (Şenlier ve Albayrak, 2011).

Türkiye'de Sanayi, Bilim ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen üç Endüstriyel Bölge (EB) projesi bulunmaktadır. Bu bölgeler Ceyhan Enerji İhtisas EB (Adana), Karapınar Enerji İhtisas EB (Konya) ve Filyos EB (Zonguldak) dir. Fakat bu çalışmada öneri aşamasında kalmış hala uygulamaya konulmamıştır (Güder, 2013). Son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar olsa da bu projelerin çoğu teoride kalmıştır.

2.4. ES Ağları İçin Matematiksel Modeller

ES ağlarının tasarlanması ve analizinde kullanılan çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler değerlendirme/analiz ve optimizasyon olmak üzere iki temel yöntemdir (Van Fan, vd., 2021). Değerlendirme / analiz yöntemi, esas olarak sistem performansını ölçme ve potansiyel iyileştirmeler için istenmeyen sonuçları belirleyen yöntemlerdir. Optimizasyon ise, farklı önceliklere ve kısıtlamalara göre tanımlanmış bir amaç fonksiyonu ile optimal bir tasarıma ulaşmaya odaklanır.

Geleneksel olarak, endüstriyel ekolojistler, ES planlamak için malzeme, su ve enerji vb. değerlendirme yöntemini kullanırlar (Jacobsen, 2006). Bununla birlikte, sistemler daha karmaşık hale geldiğinde, malzeme ve enerji akışlarının değerlendirilmesini kolaylaştıran optimizasyon modelleri gerekmektedir (Karlsson ve Wolf, 2008). Bir EEP'de kaynak ağını kurmak, farklı ilgi alanlarına sahip bir grup karar vericinin çeşitli tasarım kriterlerinin optimizasyonunu içeren karmaşık bir karar verme sürecidir (Leong vd., 2017). Bu kapsamda matematiksel modellerin kullanılması ile işletmelerin ekonomik beklentileri karşılanırken çevresel yan etkiler de azaltılabilir. ES, Şekil 2.12'de görüldüğü üzere ekonomik faaliyetlerin toplam çevresel etkisini azaltmayı amaçlar ve muhtemelen de azaltır (Boix vd. ,2015).



Şekil 2.12. Endüstriyel simbiyoz yoluyla çevresel etkileri (Boix vd. ,2015)

Literatürdeki ES optimizasyon çalışmalarının amaçları incelendiğinde 4 farklı amaç göze çarpar. Şekil 2.13’de bu amaçlar sunulmuştur. Bu amaçlar ekonomik, çevresel, sosyal ve kaynak sürdürülebilirliği olmak üzere dört grupta incelenebilir.



Şekil 2.13. Endüstriyel simbiyoz optimizasyon çalışmaları amaçları

Ekonomik amaçlar genel olarak bu ES ağını kurmak için yatırım gereken maliyeti, yönetim, tasarım ve taşıma maliyeti, yan ürün/atıkların bertaraf maliyeti ve işletme maliyetleri en azlanmaya çalışılırken yan ürün ve atık gelirleri en çoklanmaya çalışılır. Bu ekonomik amaçlar bazı modellerde karın maksimize edilmesi bazı modellerde ise maliyetin minimize edilmesi şeklinde kurgulanmıştır.

Çevresel amaçlar ise, doğal kaynak (malzeme, taze su, enerji) tüketiminin en aza indirilmesi, atık (atık su, endüstriyel atık, buhar, ısı) ve yan ürün kullanımının artırılması (ikincil endüstriyel malzeme) ve karbon emisyonlarının en aza indirilmesi olarak söylenebilir.

Kaynak sürdürülebilirliği ile ilgili amaçları ise ES ağında işletmeler arasında malzeme, enerji ve su gibi akışların gerçekleşmesi üzerine kuruludur. Bunlara ek olarak yeni işgücü yaratmak (Medina-González, vd. 2017; Afshari vd., 2020), bilgi işbirliği (Afshari vd., 2020) ve sinerji yaratma (Kantor vd., 2020) gibi sosyal amaçlar da mevcuttur. Aslında çoğu çalışmada bu sosyal amaçlar belirtilmese de ES'nin tanımı gereği bahsedilen sinerji ve iş birlikleri çoğu zaman kendiliğinden ortaya çıkmaktadır.

ES literatüründe alışverişi yapılan kaynaklar su, enerji, malzeme ve yan ürün olmak üzere üç kategoriye ayrılmıştır. Literatürde bu üç kategorideki akışların olduğu modellerde kullanılan amaçlar Şekil 2.14'de verilmiştir. Malzeme ve yan ürün paylaşımı yapılan çalışmaların amaçları genelde kaynak verimliliği, yan ürün kullanımı artırma ve atık azaltma olarak sıralanabilir. Enerji simbiyozunu hedefleyen çalışmalarda ise enerji verimliliğini artırma, temiz enerji kaynakları sağlama, maliyetleri ve emisyonları azaltma ön plandadır. Su simbiyozunu hedefleyen çalışmalar ise, atık su (arıtılmış su) kullanımı ile taze kullanımı tasarrufu, şebeke ağı kurulum ve işletme maliyetlerini azaltma sıklıkla rastlanan amaçlardır.

I. Malzeme ve Yan ürün	II. Enerji	III. Su
• Kaynak kullanımı tasarrufu • Atık azaltma • Atık ve yan ürün simbiyozu artırma • Kaynak verimliliği ile karbon emisyonu azaltma • Kaynak sinerji olanakları geliştirme	• Enerji verimliliği • Fosil yakıt kullanımı azaltma • Temiz enerji kullanımı • Karbon salınımı azaltma • Enerji maliyetlerini azaltma	• Taze su kullanımı azaltma • Atık su kullanımı • Su maliyetleri azaltma • Yatırım maliyetleri (su şebekesi kurulum) azaltma • İşletme maliyeti azaltma

Şekil 2.14 Simbiyoz tipine göre ES ağı matematiksel modellerin amaçları

Literatürdeki ES ağları yönetimi ve planlaması için önerilen matematiksel modeller Çizelge 2.4'de verilmiştir. Bu teknikler tek amaçlı doğrusal programlama modeller, çok amaçlı doğrusal modeller, stokastik modeller, iki seviyeli (bilevel) modeller, doğrusal olmayan modeller ve gürbüz (robust) modeller olarak gruplandırılmıştır. Bu modeller bir sonraki bölümde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Çizelge 2.4. ES ağları için önerilen matematiksel modeller

Model		Yayın
Tek amaçlı modeller	Doğrusal	Qing-fu vd. (2010), Mamoune ve Yassine (2011), Zhou vd. (2012), Aviso vd.,(2015), Jamal ve Montemanni (2018)
	Karma tamsayılı	Karlsson ve Wolf (2008), Cimren vd. (2011), Meneghetti ve Nardin (2012), Gonela vd.,(2014), Bungener vd. (2016), Bütün vd.,(2019), Castiglione ve Alfier (2019), Kantor vd.,(2020), Curri vd. (2021) ,
	Bulanık	Aviso vd. (2010a)
Çok amaçlı modeller		Boix vd.,(2012), Gu vd.,(2013a), Gu vd.,(2013b), Montastruc, vd.,(2013), Hein vd.,(2015), Afshari vd.,(2016), Ren vd.,(2016), Maille ve Frayret (2016), Shukery vd.,(2016), Afshari vd.,(2017), Leong vd.,(2017), Tiu vd.,(2017), Zhang vd.,(2016), Afshari vd.,(2018a), Afshari vd.,(2018b), Vimal vd.,(2019), Suciu vd. (2019), Afshari vd., (2020), Venegas vd.,(2020), Cao vd. (2020) , Yeşilkaya vd. (2020)
Stokastik modeller		Gonela vd. (2015), González vd. (2017), Afshari vd. (2018b)
İki seviyeli (bilevel) modeller		Aviso, vd (2010b), Tan, vd. (2011), Ramos, vd. (2016) Aguilar vd. (2017a) , Aguilar vd. (2017b)
Doğrusal olmayan modeller		Lovelady ve El-Halwagi (2009), Xu vd., (2014), Pan vd., (2016), Tornos vd., (2017), Ramin vd. (2021)
Robust modeller		Aviso (2014), Kolluri vd.,. (2016), Wang vd., (2018)

Bu yayınların basıldığı dergiler incelendiğinde (Çizelge 2.5) 52 makalenin 21 farklı dergide basıldığı görülmüştür. 12 dergi birden fazla ilgili makale içerirken, 9 derginin her biri tek bir makale içermektedir. Dergilerin çoğunluğu Çevre ve Enerji Yönetimi alanıyla ilgilidir. Yalnızca 3 dergi imalat ve yöneylem araştırması alanlarında (Computers & Industrial Engineering, RAIRO Operations Research, Journal of Manufacturing Technology Management) yayın yapmaktadır.

Çizelge 2.5. ES ağları için matematiksel modellerin yayınlandığı dergileri

Dergi	Adet	Yüzde
Journal of Cleaner Production	10	19,23
Proceedings of International Conference	7	13,46
Clean Technologies and Environmental Policy	3	5,77
Process Safety and Environmental Protection	4	7,69
Journal of Industrial Ecology	3	5,77
Frontiers in Energy Research	3	5,77
Resources, Conservation and Recycling	3	5,77
Applied Energy	2	3,85
Chemical Engineering Transactions	2	3,85
Computers & Industrial Engineering	2	3,85
Science of the Total Environment	2	3,85
Energy Procedia	2	3,85
Computers and Chemical Engineering	1	1,92
Energies	1	1,92
Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B	1	1,92
Journal of Manufacturing Technology Management	1	1,92
Energy Conversion and Management	1	1,92
Environmental Science and Pollution Research	1	1,92
Environmental Progress & Sustainable Energy	1	1,92
Process Integration and Optimization for Sustainability	1	1,92
RAIRO Operations Research	1	1,92
Toplam	52	100

2.4.1. ES Ağları İçin Tek Amaçlı Modeller

ES ağları için geliştirilmiş tek amaçlı modeller Çizelge 2.6’da verilmiştir. Karlsson ve Wolf (2008) bildiğimiz kadarıyla literatürde ES ağları için optimizasyon modeli geliştiren ilk çalışmadır. Bu çalışmada, karma tamsayı doğrusal bir model ile orman endüstrisi temelli bir ES ağı analiz edilmiştir. Fakat çalışmada önerilen matematiksel model verilmemiştir.

Diğer çalışmalarda bir bütün halde incelendiğinde, modellerin ekonomik amaç fonksiyonları, üretim maliyetler, dağıtım maliyetleri simbiyoz ağı kurulum maliyetler, emisyon maliyetlerinin en azlanmasıdır. Kaynak sürdürülebilirliği ilgili hedefler ise, atık kullanımının ençoklanması, taze su kullanımının en azlanmasıdır. Çevresel hedefler ise karbon emisyonlarının azaltılması ve atıkların azaltılmasıdır.

Çizelge 2.6. ES ağları için literatürdeki tek amaçlı modeller

Yazarlar	Sektör	Amaç fonksiyonu	Çözüm metot	Simbiyoz		Katılımcılar			Veri	
				Enerji	Su	Malzeme, Yan ürün	EEP	Şehir	Bireysel	Gerçek Test
Karlsson ve Wolf (2008)	Kağıt, kereste, Biyoyakıt, ısı	Min maliyet	Karma tamsayı programlama	✓	✓				✓	✓
Aviso vd. (2010b)	Su	Min taze su kullanımı, maliyet	Bulanık mantık		✓		✓			✓
Qing-fu vd. (2010)	Teorik	Maks atık simbiyozu	Model çözülmemiştir			✓			✓	-
Cimren vd. (2011)	Metal, lastik, kömür vb.	Min maliyet ve emisyon	Karma tamsayı programlama	✓		✓			✓	✓
Mamoune ve Yassine (2011)	Teorik	Maks simbiyoz	-	✓	✓	✓				-
Meneghetti ve Nardin	Enerji	Min maliyet	GAMS	✓			✓			✓
Zhou vd. (2012)	Kömür-Kimya	Ekonomik, çevresel, verimliliği	Senaryo optimizasyon, AHP	✓		✓	✓			✓
Gonela vd.,(2014)	Biyoetanol, tarım, çimento, alkol vb.	Maks gelir	GAMS	✓		✓			✓	✓
Aviso vd.,(2015)	Su, Kimya, Plastik	Min maliyet	P-graph model		✓					✓
Bungener vd. (2016)	Buhar	Min işletme ve yatırım maliyeti	Simülasyon	✓					✓	✓
Jamal ve Montemanni (2018)	Teorik	Maks kar	CPLEX			✓	✓			✓
Bütün vd.,(2019)	Kimya, Çimento, Süt, Kağıt	Min maliyet, Çizelgeleme	ε-kısıt	✓		✓			✓	✓
Castiglione ve Alfier (2019)	Teorik	Maks gelir, Ekonomik, çevresel ve sosyal hedeflerin, Çizelgeleme	Model çözülmemiştir			✓	✓			-
Kantor vd.,(2020)	Teorik	Maks Ekonomik, çevresel ve sosyal hedeflerin, Çizelgeleme	Karma tamsayı programlama	✓	✓	✓	✓			✓
Curri vd. (2021)	Teorik	Min atık	Doğrusal programlama			✓	✓			✓

Aviso vd., (2010b) EEP bulunan tesislerin taze su ve atık su kullanımını optimize için bulanık bir doğrusal programlama modeli sunmaktadır. İki farklı model geliştirmişlerdir. Bunlardan biri taze suyun kullanımını enazlamayı diğeri ise su şebekesi yönetim maliyetinin en azlanmayı hedeflemektedir. Yine, Aviso vd., (2015) su simbiyoz ağında taze su kullanımı ve yatırım maliyetlerini ön planda tutan bir doğrusal programlama modeli önermişlerdir.

Qing-fu vd., (2010) iki işletme arasında endüstriyel atıkların değişimi ile kurulan ES ağında atıklardan elde edilen faydayı ençoklamak için model geliştirilmiştir.

Mamoune ve Yassine (2011) ise teorik bir materyal ve enerji simbiyoz ağı için doğrusal bir model önermiştir. Önerilen amaç fonksiyonu ile en üst düzeye çıkarmak, işletmeler arasındaki mesafeleri azaltmak, arıtma maliyetlerini azaltmak ve malzeme kullanımını azaltmaktır.

Cimren vd. (2011), ise ES ağı tasarımı için ağıdaki işletmelerin toplam maliyeti ve çevresel etkileri en aza indirirken yan ürün ve enerji akışlarını belirlemeyi hedefleyen bir model önermişler. Sonuç olarak işletme maliyetlerinde %26, emisyonlarda %30 ve atıkların kazanımında %37 azalma olduğu bildirilmiştir.

Meneghetti ve Nardin (2012) enerji simbiyozu (ısı, güç, güneş enerjisi) için tesis tasarımı maliyetlerini ön planda tutan doğrusal programlama modeli geliştirmiştir.

Zhou vd. (2012) Çin’de ağırlıklı olarak kömür-kimya endüstrilerin bulunduğu bir EEP’de enerji ve malzeme simbiyoz ağı için farklı senaryolar altında işletmelerin ekonomik çıkarlarını ön planda tutan bir model önermişlerdir.

Gonela vd., (2014) biyoenerji temelli bir ES ağında biyoetanol üretim maliyetinin düşürülmesi için bir model geliştirmiştir. Önerilen modelin verimliliği ve etkililiği teorik bir ağda denenmiş ve farklı sektörlerde (çimento, tarım, vb.) faaliyet gösteren oyuncuların karlılığında önemli bir artış olduğunu görülmüştür. Bungener vd. (2016) işletmeler arasında atık buharın alışverişinin olduğu bir ağda işletme ve yatırım maliyetinin en azlandığı bir model önermişlerdir.

Jamal ve Montemanni (2018) ise ES’nin işletmelere sağladığı ekonomik ve çevresel kazanımların yanında kar da sağladığını savunmaktadır. Bu çalışma işletmeleri ağda kalmaya ikna etmek için ES’den elde edilen karı eşit bir şekilde dağıtan ve maksimize eden bir doğrusal programlama modeli sunulmuştur.

Castiglione ve Alfier (2019) ise teorik bir EEP’deki ES ağındaki işlemlerin hem ekonomik hem çevresel maliyetlerini en aza indiren bir model önermiştir.

Bütün vd., (2019) enerji ve malzeme simbiyozu için tesislerin konumunu dikkate alan bir doğrusal programlama modeli önermiştir. Amaç toplam maliyetlerin en aza indirilmesidir. Model teorik bir vaka için çözülmüş ve maliyet %20 azalmıştır.

Kantor vd., (2020) teorik bir simbiyoz ağında yatırım, işletme ve çevresel maliyetleri en aza indiren bir doğrusal model önermiştir.

Curri vd. (2021) ise, teorik bir EEP’de ortaya çıkan geri dönüştürülmemiş atık miktarını en aza indirmek (atık simbiyozu) için bir doğrusal programlama modeli önermiştir.

2.4.2. ES Ağları İçin Çok Amaçlı Programlama Modeller

Çok amaçlı modelleri, birden çok amacın aynı anda en iyilenmesinin istendiği durumda kullanılırlar. Literatürdeki ES ağları için önerilen çok amaçlı optimizasyon çalışmaları Çizelge 2.7’de verilmiştir. Geliştirilen çok amaçlı optimizasyon modelleri, tek bir çalışma hariç (Afshari vd., 2020) ekonomik ve çevresel olmak üzere iki farklı amaç fonksiyonu içermektedir.

Çizelge 2.7. ES ağları için literatürdeki çok amaçlı optimizasyon modelleri

Yazarlar	Amaç fonksiyonu		Çözüm metot	Sektör	Simbiyoz			Katılımcılar		Model		Veri	
	Ekonomik	Çevresel			Enerji	Su	Malzeme, Yan ürün	EEP	Şehir	Bireysel	Kesin	Senzisel	Gerçek Test
Boix vd., (2012)	Min su maliyeti	Min taze su	ε-kısıt	Su		✓		✓			✓		✓
Gu vd., (2013a)	Maks kar	Maks simbiyoz	Model	Teorik	✓		✓	✓			-	-	-
Gu vd., (2013b)	Maks kar	Min karbon vergisi	Genetik	Teorik	✓		✓	✓			✓		✓
Montastruc, vd., (2013)	Min su maliyeti	Min taze su, artılan su debisi ve bağlantı sayısı	TOPSIS, ε-kısıt	Su		✓		✓			✓		✓
Hein vd., (2015)	Min yatırım maliyeti, Maks kar	Maks simbiyoz	Genetik algoritma	İlaç, petrol, biokütle	✓		✓	✓			✓		✓
Afshari vd., (2016)	Min maliyet	Maks enerji simbiyoz	Ağırlıklı toplam	Enerji	✓			✓	✓	✓			✓
Ren vd., (2016)	Maks kar	Maks sürdürülebilir	FSU, Ağırlıklı toplam	Enerji	✓			✓			✓		✓
Maille ve Frayret (2016)	Min maliyet	Min su kullanımı	Simülasyon	Su ve diğer endüstriyel		✓		✓	✓	✓			✓
Shukery vd., (2016)	Min maliyet	Min atık	Bulanık mantık	Bitkisel yağ, biyoenerji, tarm	✓		✓	✓			✓		✓
Afshari vd., (2017)	Min maliyet (stokastik-deterministik)	Min karbon vergisi (stokastik-deterministik)	Ağırlıklı toplam SAA	Enerji	✓			✓			✓	✓	✓
Leong vd., (2017)	Maks kar	Min çevresel etki	AHP, Ağırlıklı toplam	Su		✓		✓			✓		✓
Tiu vd., (2017)	Min maliyet	Min taze su kullanımı	Hedef programlama, ağırlıklı toplam	Su		✓		✓			✓		✓
Zhang vd., (2017)	Min maliyet	Min CO ₂ emisyonu	Ağırlıklı toplam	Enerji	✓			✓	✓	✓			✓
Afshari vd., (2018a)	Min maliyet (Stokastik-deterministik)	Min karbon vergisi (Stokastik-deterministik)	Ağırlıklı toplam, Robust model	Enerji	✓			✓	✓	✓	✓		✓
Afshari vd., (2018b)	Min maliyet	Min karbon vergisi	Ağırlıklı toplam	Enerji	✓			✓	✓	✓	✓		✓
Vimal vd., (2019)	Maks kar	Min CO ₂ emisyon	Ağırlıklı toplam	Şeker, kağıt, çimento, kireç	✓		✓		✓	✓			✓
Suci vd., (2019)	Min maliyet	Min CO ₂ emisyon	ε-kısıt	Enerji	✓				✓	✓	✓		✓
Afshari vd., (2020)	Min maliyet, maks işgücü yaratma*	Min emisyon ve enerji,	Ağırlıklı toplam, ε-kısıt, ANP	Enerji	✓			✓	✓	✓	✓		✓
Venegas vd., (2020)	Min maliyet	Maks simbiyoz, Maks esneklik	Ağırlıklı toplam, hedef programlama	Su, petrol, enerji, vb. birçok sektör	✓	✓	✓	✓			✓		✓
Cao vd. (2020)	Min yatırım maliyeti	Min emisyon, min enerji	NSGA-III algoritması	Enerji, petrol, kimya Orman endüstrisi, enerji, su	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Bu çalışma	Min maliyet	Min CO ₂ emisyonu, Maks simbiyoz	Ağırlıklı toplam, ε-kısıt		✓	✓	✓	✓			✓		✓

Çalışmaların uygulandığı sektörler incelendiğinde ise çalışmaların yaklaşık %75'i tek bir sektöre (enerji veya su veya teorik) odaklanmaktadır. Modellerin ekonomiyle ilgili amaç fonksiyonları, sabit maliyetlerin, simbiyoz maliyetlerinin, dağıtım maliyetlerinin, satın alma maliyetlerinin ve karbon emisyonu maliyetinin toplamını en aza indirilmesi veya toplam karın maksimize edilmesidir. Öte yandan, çevresel amaç fonksiyonları ise toplam çevresel etkiyi en aza indirmek (en az taze su tüketimi, en az karbon emisyonu, maksimum sürdürülebilirlik) veya malzeme, enerji su değişimini en üst düzeye çıkarmaktır. Ayrıca, ES ağları için yapılan çok amaçlı çalışmaların içinde sadece Afshari vd., (2020) ağıın işgücü yaratma amacını dikkate almaktadır. Genel olarak, ϵ -kısıt yöntemi, ağırlıklı toplam yöntemi ve hedef programlama kullanılmış olup sadece dört çalışmada meta sezgisel algoritmalar (Genetik algoritma, Parçacık sürü optimizasyonu algoritması, NSGA-III algoritması) geliştirmiştir. Çalışmalarda kullanılan veriler incelendiğinde ise gerçek verilerle yapılmış çalışmaların (Vimal vd., 2019; Suci vd., 2019; Venegas vd., 2020; Cao vd., 2020) nispeten az olduğu görülmüştür.

Çizelge 2.7'deki çalışmalar incelendiğinde fazla enerji simbiyozuna odaklandığı görülmektedir. Beş çalışma su simbiyozuna dört çalışma enerji, malzeme ve yan ürün simbiyozuna odaklanmıştır. Tüm akışlara (Su, enerji, malzeme ve yan ürün) odaklanan sadece iki çalışma (Venegas vd., 2020; Cao vd., 2020) bulunmuştur.

Boix vd., (2012) EEP'deki bir endüstriyel su şebekesi için, tatlı su ve arıtılmış su akış hızları ile şebeke bağlantılarının sayısının en aza indirildiği çok amaçlı bir model geliştirilmiştir. Montastruc, vd., (2013) ise, Boix vd., (2012) tarafından önerilen modeli ağıdaki bağlantı sayısını arttırılarak genişletilmiştir. Bu modelin amaçları, tatlı su tüketimi, arıtılan su debisi ve su ağı bağlantı sayısının en aza indirilmesidir. Önerilen TOPSIS temelli ϵ -kısıt yöntemi ile çözülmüştür.

Gu vd., (2013a; 2013b), bir EEP'de malzeme değişimi/enerji akışlarını tasarlamak ve optimize etmek için iki farklı çok amaçlı model önermişlerdir. Bu çalışmalarının birinde (Gu vd., 2013a) işlemler arasındaki malzeme ve enerji değişimini ençoklayarak işletmelerin ekonomik ve çevresel faydalarını ön planda tutan çok amaçlı bir model önerilmiştir. Diğer bir çalışmada (Gu vd., 2013b) ise, parktaki toplam değiş

tokuş edilen akış miktarını ve ekonomik faydayı maksimize eden dinamik çok amaçlı bir model önermişlerdir. Bu model genetik algoritma ile çözmüştür.

Hein vd., (2015) ES ağ tasarımı için çok amaçlı bir model geliştirmiştir. Modelin amaçları ağ tasarımı maliyetlerini en azlarken, ağdaki değişilen yan ürün miktarının ve karın en büyüklenmesidir. Model teorik bir EEP'de uygulanmış ve Genetik Algoritma ile çözülmüştür.

Maille ve Frayret (2016) Kalundborg EEP verileri kullanılarak yan ürün akışları, sinerjileri ve yatırım kararlarını planlamak için çok amaçlı bir model geliştirmişlerdir. Modelin amaçları toplam maliyetin ve su tüketimin en azlanmasıdır. Geliştirilen model öncelikli hedef programlama (lexicographic) ile çözülmüştür.

Leong vd.,(2017) bir EEP'deki su simbiyozu için AHP ile entegre çok amaçlı bir model önermiştir. Tiu ve Cruz (2017)'da bir EEP'nin su ağı simbiyozu için ağırlıklı hedef programlama kullanarak çok amaçlı bir model geliştirmişlerdir. Modelde, atık su, tatlı su, su arıtma ve işlem maliyetlerini içeren toplam maliyet ve su tüketimi ve kalitesi ile ilgili çevresel amaç fonksiyonlarının en azlanması hedeflenmiştir.

Afshari vd. (2016) EEP'deki işletmeler arasındaki enerjiyi simbiyozu için çok amaçlı karma tamsayılı bir model önermiştir. Modelin amaçları, maliyetleri minimize etmek ve enerji simbiyozunu maksimize etmek için enerji tedarikçileri ve kullanıcılar arasındaki ağı planlamaktır. Model teorik verilerle çözülmüştür. Bu model daha sonra aynı yazarlar tarafından (Afshari vd., 2017) bu model genişletilmiştir. Deterministik model kaynak hazırlık maliyeti, yan ürün talebi ve karbon vergisinin belirsiz olduğu stokastik model ile karşılaştırılmıştır. Stokastik amaç fonksiyonu SAA ile çözülmüştür.

Afshari vd., (2018a), çalışmasında Afshari vd., (2016) tarafından önerilen ve sadece endüstriyel paydaşların olduğu vakaya farklı paydaşlar (konut, ev ve kırsal alanlar) dahil etmişlerdir. Afshari vd., (2018b) diğer bir çalışmasında ise enerji alıcısının bakış açısından maliyeti en aza indirmek ve çevresel faydaları arttırmak için yeni bir model geliştirmiştir. Bu çalışmada sunulan diğer bir modelde ise EEP'deki tüm paydaşların (alıcı, satıcı, yönetici, hükümet) maliyetlerini azaltan ve çevresel faydalarını iyileştiren

çok amaçlı bir model geliştirilmiştir. Bu model ağırlık toplam yöntemi ile çözülmüştür. Afshari vd., (2020) ES ağının ekonomik (toplam maliyetler), çevresel (enerji tasarrufu ve karbon emisyonu) ve sosyal (yeni işgücü yaratma) amaçlarını optimize etmek için çok amaçlı bir model önerilmiştir. Model, Analitik ağ süreci (ANP), ağırlıklı toplam ve ϵ -kısıt yöntemi ile model çözülmüştür. Çalışma ES ağlarında sosyal hedefleri dikkate alan çalışma olması açısından farklı ve önemli bir bakış açısı sunmuştur. Görüldüğü üzere aynı araştırmacılar tarafından ES ağının farklı özelliklerini ve yönlerini dikkate alan birçok optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Ren vd., (2016) ağırlıklı olarak kimya tesislerinin bulunduğu bir EEP’de hem karlılığı hem de sürdürülebilirliği ençoklayan çok amaçlı model önerilmiştir. Modeli çözmek için çok amaçlı Parçacık Sürüşü Algoritması önerilmiştir.

Shukery vd., (2016) Malezya’da palmye yağı endüstrisinin merkezinde olduğu organik gübre, biyogaz, biyodizel, tarım, pelet, ahşap levha ve kağıt endüstrilerini içeren bir EEP tasarlanmıştır. Önerilen model parktaki enerji ve yan ürün simbiyoz ağındaki işletmelerin maliyetlerini ve atık oluşumunu en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Zhang vd., (2017) EEP'deki atık ısı geri kazanımı için tek amaçlı ve çok amaçlı iki farklı model önermiştir. Modelin amaçları toplam enerji ve işlem maliyetleri ile atık ısıdan kaynaklanan karbon salınımının en azlanmasıdır.

Suciu vd. (2019) yerleşim yerlerine yakın endüstriyel tesislerden çıkan potansiyel atık ısısın geri kazanımı ile konutlarda kullanılmasını teşvik eden çok amaçlı bir model geliştirmiştir. Modelin amaçları, işletme maliyetleri, yatırım maliyetleri ve karbon salınımının azaltılmasıdır. Önerilen model ϵ -kısıt yöntemi ile çözülmüş ve enerji maliyetinde %48, karbon emisyonunda ise %100’e varan tasarruf sağlanmıştır.

Vimal vd., (2019) ise, şeker, çimento, kağıt ve kireç endüstrileri barındıran bir ES ağında kaynak değişimi için çok amaçlı bir model önermişlerdir. Model ağdaki işletmelerin hem çevresel (karbon emisyonu) hem de ekonomik faydalarını ön planda tutmaktadır. Model ağırlık toplam yöntemi ile çözülmüştür.

Venegas vd., (2020) Danimarka'da Kalundborg ve Güney Kore'de Ulsan EEP örnekleri için ES ağı tasarımı üzerine çalışmışlardır. Önerilen model ağdaki işletmelerin yatırım ve taşıma maliyetlerini en azlamayı, yan ürün, enerji ve su değişimini en çoklamayı hedeflemektedir. Model ağırlıklı hedef programlama yöntemi ile çözülmüştür.

Cao vd. (2020) genellikle enerji tesislerinin bulunduğu teorik bir ES ağının çevresel ve ekonomik performansını optimize etmek için çok amaçlı bir model önermişlerdir. Modelin enerjiyle (enerji en azlanması ve kaynakların daha az kullanılması ile enerji en azlanması), emisyonlarla (doğrudan emisyon, enerji tasarrufundan emisyon, kaynak emisyonu en azlanması) ve yatırım maliyetleri ile ilgili olmak üzere toplamda beş farklı amacı vardır. Model, NSGA-III algoritması ile çözülmüştür.

2.4.3. ES Ağları için Stokastik Modeller

Bu kısımda ES ağları için önerilen stokastik modeller tanıtılmıştır. Çizelge 2.8'de listelenen bu çalışmalar, ES ağları için önerilen stokastik modellerin ne kadar az olduğunu göstermektedir. Enerji sektörüne odaklanmış bu çalışmalarda belirsiz talep, kalite ve fiyat durumunda ağın karlılığını incelemişlerdir. Modellerin çözümü için örneklem yakınsama yaklaşımı ve robust model kullanıldığı söylenebilir.

Çizelge 2.8. Endüstriyel simbiyoz ağları için literatürdeki stokastik modeller

Yazarlar	Belirsizlik parametresi	Model	Sektör	Amaç			ES ağı		Çok dönemli
				Eko	Çev	Sos	Yan ürün	Enerji	
Gonela vd. (2015)	Talep, Fiyat, Verim	MILP (SAA)	Biyo etanol	✓			✓	✓	✓
González vd. (2017)	Kalite	MOMILP (SAA)	Biyo enerji	✓	✓	✓		✓	✓
Afshari vd. (2018)	Talep	MOMILP (Robust)	Enerji	✓	✓			✓	

Gonela vd. (2015), ES bazlı bir biyoetanol tedarik zinciri ağı tasarlamak için karma tamsayılı stokastik bir model önermiştir. Önerilen modelde biyoetanol fiyatı, biyoetanol talebi ve biyokütle verimi parametrelerinin belirsiz olduğu kabul edilmiştir. Modelin çözümünde, stokastik programlama problemlerinin etkin çözümü sağlayan örneklem yakınsaması yaklaşımı (SAA) algoritması kullanılmıştır.

Medina-González, vd. (2017) bir biyo kütle üretimi ES ağı için çevresel, ekonomik ve sosyal amaç fonksiyonları içeren çok amaçlı çok dönemli karma tamsayılı bir model geliştirmiştir. İlk olarak deterministik model ϵ -kısıt yöntemi ile çözülmüştür. Daha sonra ise biokütlenin kalitesi belirsiz kabul edilerek problem stokastik olarak modellemiş ve SAA algoritması ile çözülmüştür.

Afshari vd., (2018) ise ES ağlarında enerji değişimi ve kentsel simbiyozu için çok amaçlı bir model geliştirmişlerdir. Modelin amacı enerji tedarikçileri ve kullanıcıları arasındaki toplam maliyeti ve çevresel etkiyi en aza indirmektir. Önerilen modelde talep belirsizlikleri dikkate alınmıştır. Model üç enerji tedarikçisi, altı enerji alıcısı ve üç yerleşim alanı içeren bir vakada denenmiştir. Sonuçlar, yerleşim alanlarının simbiyozu dahil edilmesinin bir EEP'deki tüm paydaşlar için çevresel ve ekonomik faydaları artıracağını göstermektedir.

ES ağları için yan ürün, enerji, su ve atık akışlarını dikkate alan stokastik modeller literatürde bildiğimiz kadarıyla yoktur.

2.4.4. ES Ağları İçin İki Seviyeli Modeller

ES ağları için önerilmiş az sayıda iki seviyeli programlama modeline ilişkin bilgiler Çizelge 2.9'da sunulmuştur. İki seviyeli programlama problemleri, lider ve takipçi olarak adlandırılan iki hiyerarşik seviyeyi tarif eden optimizasyon problemleridir. Her seviyedeki paydaşlar kendi amaçlarını optimize etmeye çalışırlar. İki seviyeli programlamada amaç bireysel faydalarını ençoklamaya çalışan lider ve takipçiyi memnun eden uygun bir çözüm noktasının bulunmasıdır. Bu iki oyuncudan lider, kararını açıklamada önceliğe sahiptir ve uygun bir çözüm noktası seçer. Bu çözüm noktası, takipçinin amaç fonksiyonunu alt seviyede modele ekleyerek çözülür. Takipçi, elde ettiği optimal çözümler setinden bir çözüm seçer ve lidere iletir. Bu şekilde taraflar en uygun çözümü ararlar (Bard, 1998).

ES ağları için önerilen iki seviyeli programlama modellerinde lider genellikle park yöneticisi olurken takipçi ise ES ağındaki işletmeler olmaktadır. Bu çalışmalarda lider yani park yönetimi çevresel etkileri en aza indirmeyi ve yan ürün kullanımı arttırmayı amaçlarken, takipçiler yani ağındaki işletmeler bu üst amaçlar varlığında maliyetlerini

düşürmeyi amaçlamaktadırlar. Modellerin çözümünde doğrusal olmayan programlama, bulanık mantık ve Karush-Kuhn-Tucker (KKT) yaklaşımı kullanılmıştır. Çizelge 2.9'daki özetlenen bu çalışmaların hepsinde test verisi kullanılmıştır.

Çizelge 2.9. ES ağlarında iki seviyeli programlama modeller

Kaynak	Amaç Fonksiyonu		Simbiyoz		
	Lider	Takipçi	Enerji	Su	Materyal, Yan ürün
Aviso, vd (2010)	Min taze su kullanımı	Min maliyet		✓	
Tan, vd. (2011)	Min taze su kullanımı	Min maliyet		✓	
Ramos, vd. (2016)	Min taze su kullanımı ve maliyet	Min taze su kullanımı ve maliyet		✓	
Aguilar vd. (2017a)	Min karbon salınımı	Min maliyet	✓		✓
Aguilar vd. (2017b)	Min çevresel zarar	Maks kar	✓		✓

Aviso vd., (2010) tarafından önerilen modelde park yönetimi tatlı su tüketimini en aza indirmeyi hedeflerken, takipçi işletmeler ise üretim maliyetlerini enazlamaya çalışmaktadırlar. Tan, vd. (2011) ise önerdiği iki seviyeli model ile tatlı su kullanımını en aza indirmenin yanı sıra atık suların da tekrar kullanımını en üst düzeye çıkarmayı amaçlamıştır. Ramos, vd. (2016) ise çok liderli bir oyun modeli geliştirilmiş ve uygulamıştır. İki seviyeli modeli tek seviyeli hale dönüştürmek için Karush-Kuhn-Tucker (KKT) yaklaşımı kullanılmıştır.

Aguilar vd. (2017a) biyodizel, çimento ve pirinç atıklarından enerji üretimi yapan üç tesis için bir EEP tasarlamışlardır. Tasarlanan park içerisinde ısı ve atık malzeme değişimi yapılmaktadır. Bu süreci planlamak için iki seviyeli bulanık programlama kullanmıştır. Modeldeki lider park yönetimi olup CO₂ salınımını en aza indirmeyi amaçlarken, takipçi tesisler ise üretim maliyetlerini enazlamayı amaçlamaktadırlar.

Aguilar vd. (2017b) ise, bir biyodizel tesisi, iki tane kimya tesisi, bir atık su arıtma tesisi ve şeker fabrikasının bulunduğu bir EEP planlanmıştır. Tesisler arasındaki su ve malzeme akışını planlamak için iki seviyeli bulanık programlama kullanılmıştır. Modelde lider olarak tanımlanan park yönetiminin amacı karbon salınımını ve atık su miktarını azaltmak iken, takipçi olan işletmelerin amacı ise maliyetlerini düşürmektir.

2.4.5. ES Ağları İçin Gürbüz (Robust) Modeller

Gülbüz optimizasyon problemlerinde amaç, bir modelin en kötü durum performansını optimize etmektir (Snyder, 2006). EEP ve ES ağları için yapılan gülbüz modeller de önerilmiştir. Ancak Çizelge 2.10’da görüleceği gibi sadece üç çalışma bulunmuştur. Bu çalışmaların biri tarım ve sanayi sektörlerin entegre halde bulunduğu bir EEP’deki ES ağı yönetimine, diğer ikisi ise EEP’deki su ağlarının yönetimi üzerine odaklanmıştır.

Çizelge 2.10. ES ağları için literatürdeki gülbüz modeller

Yazarlar	Sektör	Amaç		Simbiyoz		
		Eko	Çev	Enerji	Su	Malzeme Yan ürün
Aviso (2014)	Su		✓		✓	
Kolluri vd. (2016)	Su	✓	✓		✓	
Wang vd., (2018)	Tarım ve sanayi sektörleri	✓	✓	✓		✓

Aviso (2014) önerdiği modelde bir EEP’deki su değişimi ağına dahil olan ve birbirinden bağımsız olarak çalışan birden çok tesis bulunmaktadır. Bu tesisler birbirleri hakkında tam bilgiye sahip değildir. Bu nedenle, gelecekteki birden fazla olası senaryoyu öngörerek etkili bir şekilde çalışabilen ve işletmelerin çıkarlarını ön planda tutan optimum ağ tasarımı için gülbüz bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir.

Kolluri vd. (2016) ise bir EEP’deki verimli kaynak kullanımı için üç farklı gülbüz optimizasyon modeli geliştirmiştir. İlk modelin, amaç fonksiyonu EEP’nin toplam enerji kullanımını en azlamaktır. İkinci modelin amacı, ağıdaki katılımcıların genel memnuniyet derecesini en üst düzeye çıkarmaktır. Son model ise, hem tatlı su tüketimini ve artırılmış su akış hızını en azlamaya çalışan çok amaçlı bir optimizasyon modelidir. Modeli çözmek için ϵ -kısıt yöntemini kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre su ve enerji kullanımında azalma sağlamıştır.

Wang vd. (2018), bir EEP’deki simbiyoz ağını optimize etmek için bir gülbüz model geliştirilmiştir. Önerilen modelin amacı, tarım ve sanayi işletmelerinin bulunduğu Guigang EEP’deki yan ürün akışını optimize etmektir.

2.4.6. ES Ağları İçin Doğrusal Olmayan Modeller

Amaç fonksiyonu ve/veya kısıtları doğrusal olmayan modellere doğrusal olmayan programlama modelleri denir. Literatürde ES ağları için önerilen beş çalışmada doğrusal olmayan modellere rastlanmıştır. Çizelge 2.11’de sunulan bu çalışmalar genelde su ağlarının planlamasına odaklanmıştır.

Çizelge 2.11. ES ağları için literatürdeki doğrusal olmayan modeller

Yazarlar	Model	Amaç	Sektör	Simbiyoz			
				Enerji	Su	Malzeme	Yan ürün
Lovelady ve El-Halwagi (2009)	Karma tamsayı	Taze ve atık su planlanması, maliyet min	Su		✓		
Xu vd. (2014)	Denge modeli	Maks kar, min emisyon, ES ağı planlama	Teorik				✓
Pan vd. (2016)	Karma tamsayı	EEP’deki ES ağı planlama	Gaz, Enerji	✓	✓		✓
Tornos vd. (2017)	Karma tamsayı	Min maliyet, ES ağı planlama	Buhar	✓			
Ramin vd. (2021)	Çok amaçlı	Min maliyet, min taze su kullanımı	Su		✓		

Lovelady ve El-Halwagi (2009), tarafından geliştirilen karma tamsayı modelin amacı yıllık işletme, taze su kullanımı ve atık su arıtma maliyetlerini en aza indirmektir. Model amaç fonksiyonundaki işletme maliyetinden dolayı doğrusal değildir.

Xu vd. (2014) ise ES ağı optimizasyonu için doğrusal olmayan bir model önermiştir. Amaç endüstriyel üreticiler ve endüstriyel tüketicilerin, ekonomik karların en çoklamanın yanı sıra emisyonların en azlanmasıdır. Modelin çözümünde KKT yaklaşımı kullanılmıştır.

Pan vd. (2016), bir EEP’deki malzeme, enerji ve su akışlarını optimize eden doğrusal olmayan bir model önermişlerdir. Model petrol, biyogaz, ilaç ve kimya gibi işletmelerin bulunduğu bir EEP’de uygulanmış ve doğrusallaştırılmış versiyonu GAMS ile çözülmüştür.

Tornos vd. (2017) gaz tesisleri arasındaki bir ES ağı için karma tamsayı doğrusal olmayan bir model geliştirmişlerdir. GAMS ile çözülen modelin amacı ağıdaki işletmelerin atık ve yan ürün değişimi ile maliyetlerinin en azlanmasıdır.

Son olarak, Ramin vd. (2021) Kenya’da bir sanayi parkındaki su şebekesinin tasarımını hedefleyen çok amaçlı doğrusal olmayan bir model geliştirmiştir. Modelin amaçları su şebekesi maliyetinin ve tatlı su kullanımının en azlanmasıdır. ε-kısıt tekniğini

kullanarak çözülen model sayesinde yaklaşık %25 tatlı su tasarrufu ve %15 maliyet tasarrufu sağlanmıştır.

2.5. Sonuçlar

Son yıllarda ES ağlarını planlamak ve kurgulamak için sıklıkla matematiksel modellerin geliştirildiği görülmektedir. Aslında bu karmaşık ağı yönetmek için optimizasyon tekniklerinin kullanılması bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu matematiksel modeller genellikle ağdaki işletmelerin çevresel ve ekonomik amaçlarını iyileştirmek için kurgulanmıştır. Bu modeller çoğunlukla enerji ve su simbiyozuna odaklanmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bu ağı planlamak için geliştirilen matematiksel modellerin ağdaki işletmelere ve hükümetlere önemli kazanımlar sağladığı görülmektedir. Bu kazanımların başında atıkların azaltılması, doğal kaynak kullanımında verimlilik, enerji kullanımında verimlilik, su kaynaklarının korunması gibi çevresel kazanımlar gelmektedir. Ayrıca ES ağı işbirliğinden kaynaklı üretim maliyetlerinin azaltılması ve teşviklerle sağlanan ekonomik faydaların yanında yeni iş kollarının geliştirilmesiyle sosyal faydalarda sağlanmıştır.

Yapılan literatür araştırmasında ES üzerine geliştirilen matematiksel modellerin genelde enerji ve su simbiyozu üzerine kurgulandığı görülmüştür. Fakat ES ağı planlaması için temel amaç, mümkün olduğu kadar ekolojik olarak bir EEP elde etmek için tüm bu bileşenleri aynı anda optimize etmektir. Orman endüstrisi temelli ES ağları literatürü incelendiğinde ise nitel tekniklere dayalı yapılan çalışmalarda simbiyozla konu olan değişimler genelde, malzeme, enerji ve su olmak üzere tüm bileşenlerini içerisine almaktadır. Dolayısıyla orman endüstrisi temelli ES ağları için geliştirilecek matematiksel modellerinde tüm bileşenleri içine alacak şekilde kurgulanması gerekmektedir. Fakat, ES uygulamasının önemli olduğu orman endüstrisinde ES ağları için önerilen matematiksel modellerin olmaması önemli bir eksiklik olarak karşımıza çıkmıştır. Bu çalışmada bu boşluğun doldurulabilmesi için deterministik ve stokastik modeller önerilmiştir.

BÖLÜM III

3. ORMAN ENDÜSTRİSİNDE ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ UYGULAMALARI

Bu tez kapsamında orman endüstrisi temelli bir ES ağı tasarlanmıştır. Dolayısıyla tezin bu bölümünde ilk olarak orman ürünleri endüstrisi tanıtılıp daha sonra literatürdeki orman endüstri temelli ES uygulamaları paylaşılmış ve sektöre özgü çıkarımlar yapılmıştır.

3.1. Orman Ürünleri Endüstrisi

Orman ürünleri endüstrisi üretim süreçlerinde odun hammaddesini çeşitli mekanik (biçme, kesme, bükme, yongalama, soyma, vb.) veya kimyasal (liflendirme, pişirme vb.) yollarla son ürün veya yarı mamul üreten entegre nitelikte bir üretim endüstrisidir. BM Gıda ve Tarım Örgütü (FAO, 1982) orman ürünleri endüstrisi temel olarak şu şekilde sınıflandırmıştır;

- Yuvarlak odun (kereste, kaplama vb.),
- Ahşap esaslı paneller (kontrplak, parke, yongalevha, liflevha vb.),
- Kağıt ve karton (kağıt hamuru, gazete, baskı, yazı kağıtları vb.).

Ayrıca bu sınıflandırmaya mobilya endüstrisi ve biyoyakıt endüstrisini de dahil edebiliriz. (D'Amours, vd., 2008; Shahi ve Pulkki 2013).

FAO, (2020)'e göre Dünya'daki orman ürünleri endüstrisi yaklaşık 600 milyar \$ ekonomik büyüklüğe sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca sektördeki istihdam ise doğrudan veya dolaylı olarak yaklaşık 1,2 milyar civarlarındadır. Geçtiğimiz yıl küresel orman endüstrisi yatırımları ise 15 milyar \$ civarındadır. Geçtiğimiz yıl orman ürünleri endüstrisi ihracatı toplam 130 milyar \$ olup, ilk sırada yer alan ülkeler ise; Çin, Kanada, Almanya, Rusya, ABD ve Avusturya gibi gelişmiş ülkelerdir (ITC,

2020). Dünya genelinde orman varlığı yüksek bu ülkelerin orman ürünleri endüstrisinde de ilk sıralarda yer almaları bir tesadüf değildir.

Türkiye’de ise orman endüstrisinin büyüklüğü ise yaklaşık 27 milyar dolar değerindedir ve sektörde yaklaşık 1 milyon kişiye istihdam imkânı sağlanmaktadır (OGM, 2020). Türkiye’nin yıllık odun üretimi 26 milyon m³, tüketimi ise 33 milyon m³’den fazla olup, tüketilen odunun yaklaşık %75’i endüstriyel odun geri kalanı ise yakacak odun niteliğindedir (OGM, 2020). Türkiye’de orman ürünleri endüstrisinde faaliyet gösteren işletmelerden en büyük 500 sanayi kuruluşu içerisinde yer alan 10 işletme bulunduğu Türkiye’deki orman ürünleri endüstrisinin ekonomik önemini göstermektedir (YOMSAD, 2020). Bu işletmelerin birçoğu Dünya standartlarında büyük ölçekli entegre ahşap levha üreten tesisler arasında yer almaktadır. Türkiye toplam ahşap levha üretiminde yaklaşık 14 milyon m³ ile Dünya’da önemli ülkelerden biridir (FAO, 2020). Ayrıca liflevha üretiminde (4,8 milyon m³) Avrupa’da ilk sırada, Dünya’da ise Çin ve Brezilya’dan sonra üçüncü, yongalevha üretiminde (4,4 milyon m³) ise Avrupa’da 4. Dünya’da ise 5. sırada gelmektedir. (FAO, 2020). Türkiye Ahşap Levha Üreticileri Derneği verilerine göre, ülkemiz ahşap levha üretiminin sektör büyüklüğü 10 milyar \$, yıllık ihracatı 3 milyar \$ ve 500 bin kişiye istihdam sağlayarak ülke ekonomisine ve orman endüstrisine önemli katkılar sağlamaktadır (YOMSAD, 2020).

Sektörde elde edilen bu ürünler diğer endüstriler için hammadde veya yarı mamul olarak kullanılabilir. Dolayısıyla orman ürünleri endüstrisi kendi içinde veya diğer sektörlerle alışveriş halindedir. Doğal bir kaynak olan, ana hammadde odunun akışı, ormanlarda ağaçların hasat edilmesi ve fabrikalara/tesislerine taşınması ile başlar; kereste, ahşap levha, kağıt ve kağıt hamuru, mobilya olarak son ürüne dönüşmesiyle son bulur (Carlsson, ve Rönnqvist, 2005). Orman ürünleri endüstrisi yenilenebilir bir hammadde olan odun kullandığı için son yıllarda sektöre yönelik küresel talebin artması çevresel kaygılara yol açmıştır. Bu durum orman ürünleri endüstrisini daha sürdürülebilir ve çevre dostu üretim anlayışının benimsenmesini zorunlu kılmıştır.

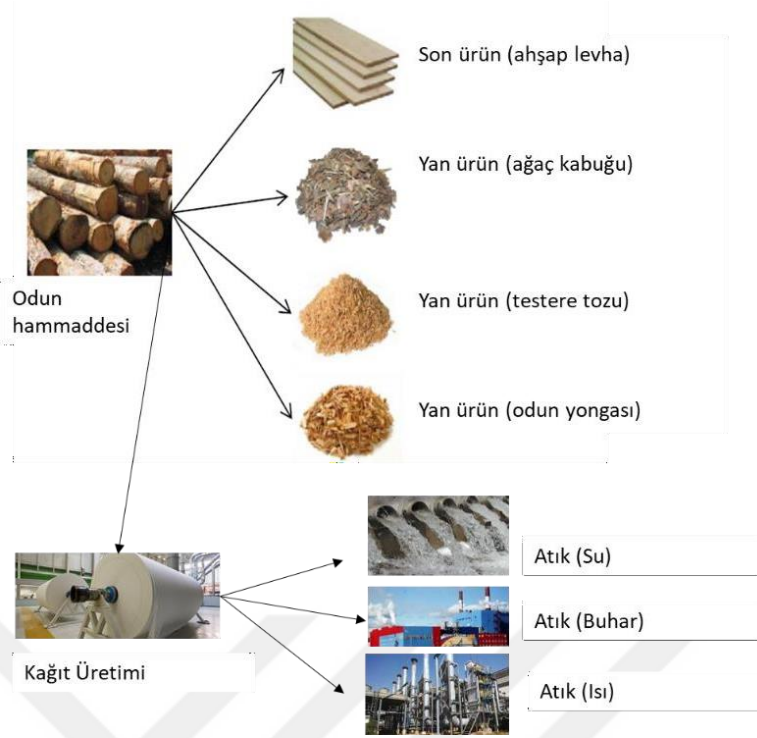
Sınırlı orman kaynaklarını verimli bir şekilde kullanmak ve geri dönüşümü iyileştirmek toplumun genel çıkarıdır (Long vd., 2018). Dolayısıyla ahşabın ve yan ürünlerinin etkin kullanımı, sınırlı doğal kaynaklar nedeniyle son yıllarda artan ilgi

görmüştür (Pokharel vd., 2017). Örneğin mobilya üretiminde 1 m³ ahşap işlendikten sonra yaklaşık 0,5 m³ ahşap atık olarak ortaya çıkar (Kauppi, vd., 2018). Küresel pazarda, genelde odun atıkları yakılarak değerlendirilir ve basit bir şekilde biyoenerji elde edilir (Cansado vd., 2018). Fakat bu şekilde katma değerli bir ürün olarak değerlendirilmeyen atıklar orman ürünleri endüstrisinin gelişimine ve çevre koruma politikalarına uygun değildir (Wang vd. 2010). Son yıllarda odun işleyen tesislerin amacı, odun atıklarını yakarak enerji üretmek değil bu tür atıkları katma değerli ürünler üretmek için hammadde olarak kullanmaktır. Özellikle son yarım asırda gelişen ahşap levha endüstrisi (yongalevha, liflevha, vb.) orman ürünleri atıklarını odun hammaddesine alternatif olarak kullanarak katma değerli son ürünler üretmektedirler (Jahan-Latibari ve Roohnia, 2010).

Orman endüstrisi atıkları katma değerli ürünlere dönüştürülebildiği halde bu atıkların geri dönüşümü ve yeniden kullanımı için entegre modern sistemler çok fazla gelişmemiştir. Dünya'nın ciddi bir odun arzı sıkıntısı ile karşı karşıya kaldığı son dönemlerde (Pokharel, vd., 2017), sektör için ekonomik değeri olan atık ve yan ürünlerin verimli bir şekilde değerlendirilmesini sağlayan ES modelleri orman endüstrisi için çok önemli bir uygulama alanıdır.

3.2. Literatürde Orman Ürünleri Endüstrisinde ES Öneren Çalışmalar

Orman ürünleri endüstrisi, endüstriyel simbiyozun en sık uygulandığı sektörlerden biridir. Sektörde hem hammadde hem de yakıt olarak ağırlıklı olarak yenilenebilir kaynaklar kullanılır (Murphy vd., 2015). Ahşabın işlenmesi sonucu ortaya çıkan atıklar (ağaç kabuğu, kül, atık su, enerji vb.) ve yan ürünler (yonga, talaş, odun tozu, vb.), orman ürünleri sanayinin yanı sıra kimya, çimento, enerji ve tarım gibi diğer sanayi dallarında da kullanılabilir. Şekil 3.1'de orman endüstrisinde oluşan bazı atık ve yan ürünlerin görselleri verilmiştir. Odun hammaddesinin çeşitli üretim süreçlerinde çeşitli yan ürünler ve son ürünler oluşur. Özellikle kağıt endüstrisinde yoğun atık su, buhar ve ısı oluşur.



Şekil 3.1. Orman endüstrisinde oluşan bazı atık ve yan ürünler

“Orman ürünleri”, “orman endüstrisi”, “odun ürünleri”, “endüstriyel simbiyoz”, eko-endüstriyel park” anahtar kelimelerini kullanarak yapılan literatür taramasında, orman ürünlerinde ES alanında yapılan 23 çalışmaya rastlanmıştır. Çizelge 3.1’de bu çalışmaların yayınlandığı dergiler incelendiğinde görüleceği genel olarak çevre yönetimi alanında yayın yapan dergilerde ES çalışmalarının yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmaların yaklaşık yarısı Journal of Cleaner Production (6 makale) ve Journal of Industrial Ecology (6 makale) dergilerinde yayınlanmıştır. Bu dergilerde literatürde en çok ES alanında yayın yapan dergilerdir.

Çizelge 3.1. ES çalışmalarının yayınlanan dergilere göre dağılımı.

Dergi	Adet	Yüzde
Journal of Cleaner Production	6	26,09
Journal of Industrial Ecology	5	21,74
Journal of Environmental Management	2	8,70
Progress in Industrial Ecology	2	8,70
Ecological Economics	2	8,70
Eco-Management and Auditing	1	4,35
Geoforum	1	4,35
Sustainable Development	1	4,35
Resources, Conservation and Recycling	1	4,35
Science of The Total Environment	1	4,35
Computers & Industrial Engineering	1	4,35
Toplam	23	100

Yayınlanan çalışmalar ile ilgili detaylı bilgiler Çizelge 3.2'de sunulmuştur. ES çalışmalarının yapıldığı bölgeler incelendiğinde, Kuzey Avrupa ülkeleri (Wernick vd., 1997; Korhonen, 2000; Korhonen vd., 2001; Korhonen ve Niutanen, 2003; Mirata, 2004; Illsley vd., 2007; Wolf ve Petersson, 2007; Karlsson ve Wolf, 2008; Sokka vd., 2011a; Pakarinen vd., 2010; Sokka vd., 2011b; Rosa ve Beloborodko, 2015) yüksek orman varlığı ile ön plana çıkmaktadır. Toplam yüzölçümünün %72'si (URL, 2019b) ormanlarla kaplı olan Finlandiya bölgesinde orman endüstrisindeki ES uygulamalarının yaklaşık %30'u yapılmıştır (Korhonen, 2000; Korhonen vd., 2001; Korhonen ve Niutanen, 2003; Sokka vd., 2011a; Pakarinen vd., 2010; Sokka vd., 2011b).

Çalışmalardaki ES uygulamaları incelendiğinde sadece %39'u gerçek bir eko endüstriyel parkta (9 makale) bulunmaktadır. Orman endüstrisi temelli EEP'ler ise; Avusturalya'da Styria EEP'si, Finlandiya'da Uimaharju ve Kymi EEP'si, Çin'de Guitang EEP'si, Kore'de Ulsan EEP'si, Tayvan'da REDA EEP'si ve Letonya'da Linhai EEP'dir. Yukarıda sayılanların dışındaki çalışmaların hepsi işletmeler arasında oluşturulan ES ağlarıdır. Yani bir EEP'de değil bireysel olarak farklı konumda bulunan işletmeler arasındaki işbirliğidir.

Bu çalışmaların yaklaşık yarısında (Wernick vd., 1997; Korhonen, 2000; Korhonen vd., 2001; Korhonen ve Niutanen, 2003; Jackson, 2005; Illsley vd., 2007; Wolf ve Petersson, 2007; Karlsson ve Wolf, 2008; Rosa ve Beloborodko, 2015; Wahrlich ve Simioni, 2019; da Silva vd., 2020) ES ağı sadece orman ürünleri endüstrisinde faaliyet gösteren işletmeler arasında kurulmuştur. Bu ağlar genel olarak kereste, kontrplak, mobilya ve ahşap panel gibi fabrikalarından çıkan odun yongası, kabuk vb. yan ürünlerin biyoyakıt olarak kullanılması için malzeme alışverişi amacıyla kurulmuştur. Kimya, tarım, gübre, çimento, demir ve çelik gibi çeşitli sektörlerden işletmelerinde bulunduğu ES ağları da (Schwarz ve Steininger, 1997; Mirata, 2004; Zhu vd., 2007; Park vd., 2008; Sokka vd., 2011a; Pakarinen vd., 2010; Sokka vd., 2011b; Yu vd., 2015b; Li, Pan vd., 2015; Hildebrandt vd., 2019) mevcuttur. Bu çalışmalar, atıkların ve yan ürünlerin yüksek değişkenliği nedeniyle sürdürülebilir bir ES ağının oluşturulma olasılığının daha yüksek olduğunu savunmaktadır. Örneğin, kağıt ve kağıt hamuru tesisinden elde edilen buhar ve atık su, kimyasal tesisler ve/veya çelik endüstrisi tarafından kullanılmaktadır. Kağıt tesisinden gelen kimyasal atıklar

kimyasal tesislerde yan ürün olarak kullanılabilmekte, odun kabukları ve odun yongaları tarımsal amaçlarla veya çimento fabrikaları tarafından kullanılmaktadır. ES ağlarında yan ürün veya enerji değişiminin yanı sıra, teknik bilgi (Mirata, 2004; Korhonen, 2000) ve işgücü (Rosa ve Beloborodko, 2015; Jackson, 2005) değişimi de gözlenmiştir.

Çizelge 3.2’de özetlenen ES çalışmalarının temel amacı, sürdürülebilir kaynak kullanımı ve işbirliği yoluyla çevresel etkiyi en aza indirirken, işletmelerin veya ağdaki diğer kuruluşların ekonomik faydalarını en üst düzeye çıkarmaktır. Bu hedeflere ek olarak yan ürün değişimi (Illsley vd., 2007), enerji tasarrufu (Mirata, 2004; Li, Pan, vd., 2015) ve işgücü iş birliğini (Jackson, 2005) hedefleyen çalışmalarda mevcuttur.

Literatürde orman ürünlerinde ES çalışmalarını analiz etmek için kullanılan yöntemler incelendiğinde, ES ağlarını analiz için YDA kullanan bir dizi çalışma bulunmaktadır (Sokka vd., 2011b; Li, Pan, vd., 2015; Rosa ve Beloborodko, 2015; Hildebrandt vd., 2019). Atık, yan ürün, enerji ve bilgi alışverişinin, ES ağına dahil olan şirketler arasında karmaşık bir kapalı döngü tedarik zinciri oluşturduğu bilinmektedir. (İsmail ve Zagloel, 2014; Herczeg vd., 2018). Bu nedenle, bu ağın iyi bir şekilde planlanması için optimizasyon tekniklerinin kullanılması kaçınılmazdır (Wolf ve Karlsson, 2008). ES çalışmalarını analiz etmek için matematiksel model (Karlsson ve Wolf, 2008) kullanan tek bir çalışmaya rastlanmıştır.

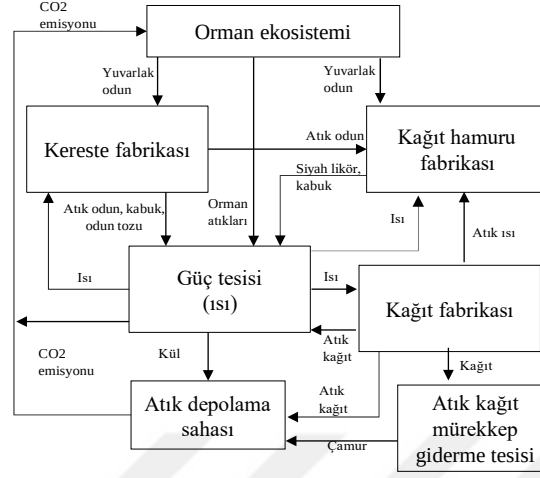
Karlsson ve Wolf (2008), orman endüstrisi işletmeleri içeren bir ES ağında işletmelerin üretim maliyetini en aza indirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada matematiksel model verilmemiştir. Sunulan çalışmada ekonomik faydaları analiz etmek için matematiksel model bir paket programı kullanılarak çözülmüştür. Bu nedenle, orman endüstrisine dayalı olarak tasarlanmış ES ağları yok denecek kadar azdır.

Çizelge 3.2. Orman endüstrisinde endüstriyel simbiyoz uygulamaları

Yazarlar*	Ülke	Simbiyoz			Sektörler						Gerçek EEP	Teorik EEP	Ağ Teorik ES (bireysel)	Amaçlar			Metot		
		Yan ürün	Enerji	İşbirliği	Kağıt	Kereste	Ahşap levha	Mobilya	Biyoyakıt	Diğer*				Eko	Çev.	Sos.	Optimizasyon	YDA	Değerlendirme
Schwarz ve Steininger (1997)	Avusturalya	C,E	X,Z		✓					✓	Styria			✓	✓				✓
Wernick vd., (1998)	İngiltere	A	X		✓	✓		✓	✓				✓	✓	✓		✓		✓
Korhonen (2000)	Finlandiya	A		K	✓								✓		✓				✓
Korhonen vd., (2001)	Finlandiya	B,C,D,E	X,Y		✓	✓			✓				✓	✓	✓				✓
Korhonen ve Niutanen (2003)	Finlandiya	B,C,D,E	X,,Y		✓	✓							✓	✓	✓		✓		✓
Mirata (2004)	Finlandiya	A,B,C,E	Y,Z					✓		✓			✓	✓	✓				✓
Jackson (2005)	Kolombiya			L		✓							✓	✓	✓	✓			✓
Korhonen ve Snakin (2005)	Finlandiya	B,C,D,E	X, Y, T		✓	✓			✓	✓	Uimaharju			✓	✓				✓
Ilsley vd., (2007)	İngiltere		X						✓				✓	✓	✓	✓			✓
Wolf ve Petersson (2007)	İsveç	B,C,D	X,Y,Z		✓	✓	✓		✓				✓	✓	✓				✓
Zhu vd., (2007)	Çin	E			✓					✓	Guitang			✓	✓				✓
Karlsson ve Wolf, (2008)	İsveç	B,C,D	Z,Y		✓	✓			✓				✓	✓	✓				✓
Park vd., (2008)	Kore		Y,T		✓					✓	Ulsan			✓	✓				✓
Sokka vd., (2010)	Finlandiya	E	X,Y		✓					✓	Kymi			✓	✓		✓		✓
Pakarinen vd., (2010)	Finlandiya	B,C,D,E	Y,T		✓	✓				✓	Kymi			✓	✓				✓
Sokka vd., (2011)	Finlandiya	E	X,Y		✓					✓	Kymi				✓		✓		✓
Yu vd., (2014)	Çin	C,E	T,Z		✓					✓	REDA			✓	✓				✓
Lie vd., (2015)	Tayvan	E	X,Y,T		✓					✓	Linhai			✓	✓	✓	✓		✓
Rosa ve Beloborodko, (2015)	Letonya	B,C,D		L		✓	✓	✓					✓	✓	✓		✓		✓
Hildebrandt vd., (2018)	Almanya	B;C,E	X		✓	✓	✓	✓		✓			✓		✓		✓		✓
Wahrlich ve Simioni (2019)	Brezilya	B,C,D,E	X		✓	✓	✓		✓				✓	✓	✓	✓			✓
Da Silva, vd., (2020)	Portekiz, İspanya	B,C,D,E	X		✓		✓		✓				✓	✓	✓				✓
Bu çalışma	Türkiye	A, B,C,D,E	X,Y,T		✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

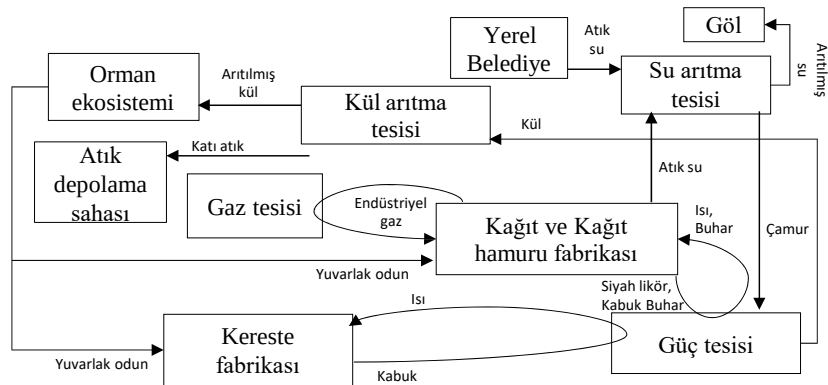
* Diğer sektörler (Kimya, Şeker, Tekstil, Çimento, Enerji, Tarım, Gıda, Demir-çelik, Gübre vb.), A: Atık Malzeme, B: Odun tozu C: Odun yongası, D: Kabuk, E: Kimyasal atık (Çamur, CO₂, Cüruf, Kül vb.)
X: Isı, Y: Buhar, Z: Elektrik, T: Atık su, K: Know-How, Bilgi, L: İşgücü

ES ağı mümkündür. Korhonen ve Ville Niutanen (2003)'e Korhonen vd (2001)'den önerilen model genişletilerek malzeme, enerji ve karbon için ES ağı verilmiştir.



Şekil 3.3. Finlandiya orman endüstrisinde malzeme ve enerji akışı (Korhonen ve Niutanen, 2003)

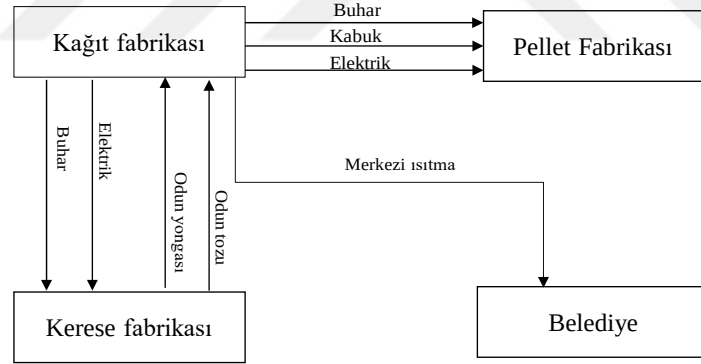
Korhonen ve Snäkin, (2005) Finlandiya'nın batısında yer alan orman ürünleri endüstrisi temelli Uimaharju EEP'sini analiz etmiştir. Kağıt ve kağıt hamuru, kereste, kontrplak fabrikaları, su arıtma tesisi, gaz tesisi, kül arıtma tesisi, enerji ve ısı santralleri bulunmaktadır (Şekil 3.4). Bu ağıdaki katılımcılar arasında atık kül, atık su, atık buhar ve ısı, odun yongası, kabuk ve kimyasalların değişimi ile sağlanmıştır. Bu parktaki ES'nin malzeme ve enerji değişimini artırdığı ve CO₂ emisyonlarını azalttığı bildirilmiştir.



Şekil 3.4. Finlandiya Uimaharju parkı ES ağı (Korhonen ve Snäkin, 2005)

Wolf ve Peterson (2007) ise İsveç orman endüstrisindeki mevcut malzeme ve enerji alışverişlerinin bir değerlendirmesini yapmıştır. Çalışma için 63 kereste fabrikası, 13 selüloz fabrikası, 21 kağıt tesisi, 25 entegre selüloz ve kağıt tesisi ve 26 biyoyakıt üreticisi ile görüşülmüş ve mevcut akışlar belirlenmiştir. Sonuçlar, işletmelerin üçte birinden fazlasının birbirine yakın işletmelerle malzeme veya enerji alışverişi yaptığını işaret etmiştir.

Çalışmada ayrıca Sundsvall-Timrå ve Mönsterås şehirleri için ES önerisinde bulunulmuştur. Södra grup şirketi bünyesinde bulunan işletmeler arasında Mönsterås için önerilen ES'deki akışlar Şekil 3.5'de verilmiştir. Ağda, kağıt, kereste ve biyoyakıt (pelet) üretim tesisleri ile yerel bir belediye arasında simbiyoz gerçekleştirilmiştir. Kağıt ve kereste fabrikalarından çıkan odun yongası ile ağaç kabuğu gibi yan ürünler biyoyakıt tesisine gönderilmiştir. Biyoyakıt tesisi ise bu yan ürünleri kullanarak elde ettiği ısıyı bu tesislere geri göndermiştir. Bunlara ek olarak tesis binası ve personel paylaşımı da gerçekleşmiştir. Kağıt tesisinden gelen buhar ve atık ısı ise kereste fabrikası ve yerel belediye tarafından kullanılmıştır.



Şekil 3.5. İsveç'teki ES ağında yan ürün değişimi (Wolf ve Peterson, 2007)

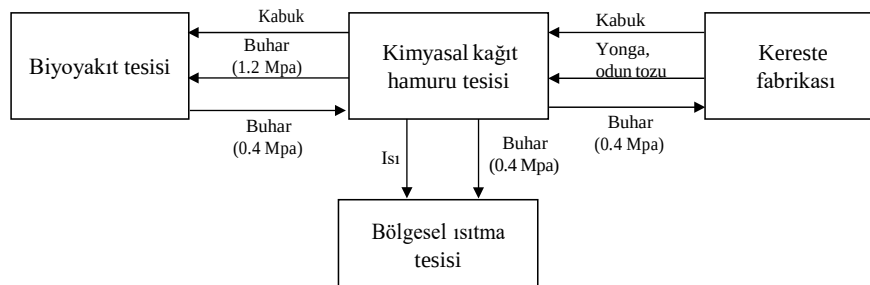
Zhu vd. (2007) ise Çin'in en büyük şeker üreticilerinden biri olan Guitang Grubu için tasarlanan ES ağını incelemiştir. Çin hükümeti tarafından desteklenmekte olan bu EEP'de simbiyoz bir şirket bünyesindeki farklı fabrikalar arasında gerçekleşmektedir. Ana faaliyet konusu şeker üretimi olan şirket, üretim esnasında oluşan yan ürün olan şeker şurubundan alkol üretimi için bir alkol üretim tesisi ve yan ürün olan şeker kamışı posasından kağıt üretimi için de kağıt üretim tesisi yatırımları yapmıştır. Ayrıca şirket bünyesinde ES olanaklarını arttırmak için enerji, gübre, çimento ve geri

Şekil 3.6, Çin'deki Guitang ES ağı akışlarını gösteren bir süreç diyagramıdır. Diyagram, üç ana birimle oluşmaktadır: Kazan dairesi, Temizleyici ve Kıyı gölü. Akışlar aşağıdaki gibidir:

- Kazan dairesi** (Kazanlar Bölgesi):
 - Atık posa (Atık posa) girişi alır.
 - Baca gazı (Baca gazı) **Temizleyici**ye gönderir.
 - Sıcak Kül (Sıcak Kül) **Kıyı gölü**ne gönderir.
- Temizleyici** (Temizleyici):
 - Atık su (Atık su) girişi alır.
 - Temiz hava emisyonu (Temiz hava emisyonu) çıkışı verir.
 - Kül (Kül) **Kıyı gölü**ne gönderir.
- Kıyı gölü** (Kıyı gölü):
 - Temiz su (Temiz su) çıkışı verir.
 - Soğuk kül (Soğuk kül) çıkışı verir.

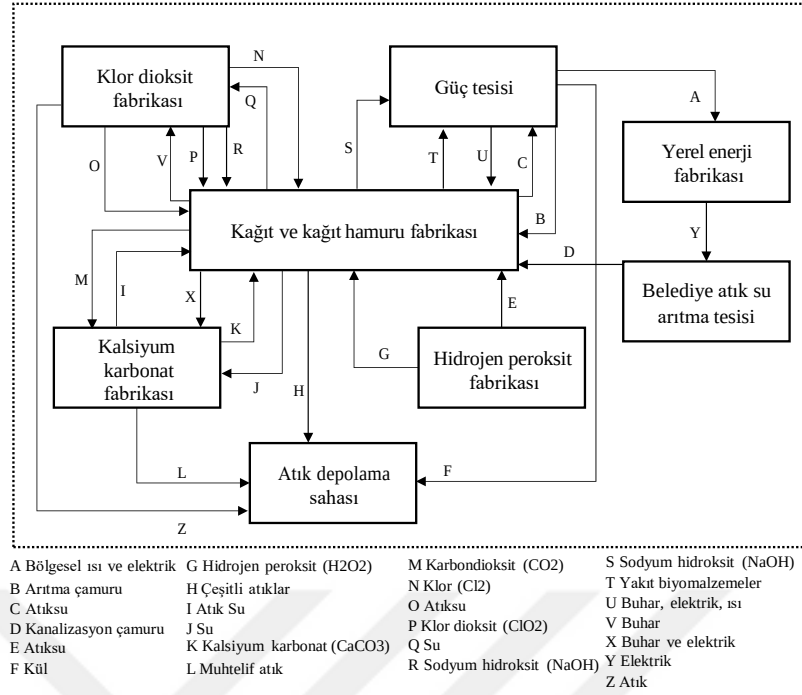
Şekil 3.6. Çin'deki Guitang ES ağı akışları (Zhu vd., 2007)

Karlsson ve Wolf (2008), İsveç’te bir kağıt üretim tesisi, bir kereste fabrikası, bir biyoyakıt tesisi ve bölgesel ısıtma tesisi arasında bir ES ağı tasarlanmıştır. Bu işletmeler arasındaki akışlar karma tamsayılı bir matematiksel model ile değerlendirilmiş ve MIND adlı paket programı ile çözülmüştür. Bu çalışmanın sonuçları bağımsız çalışan işletmelerin ES ağına dahil olmasıyla işletmeler için ekonomik kazanımların mümkün olduğunu göstermiştir. İşletmeler arasında yan ürün, atık ve enerji akışları Şekil 3.7’de görülmektedir.



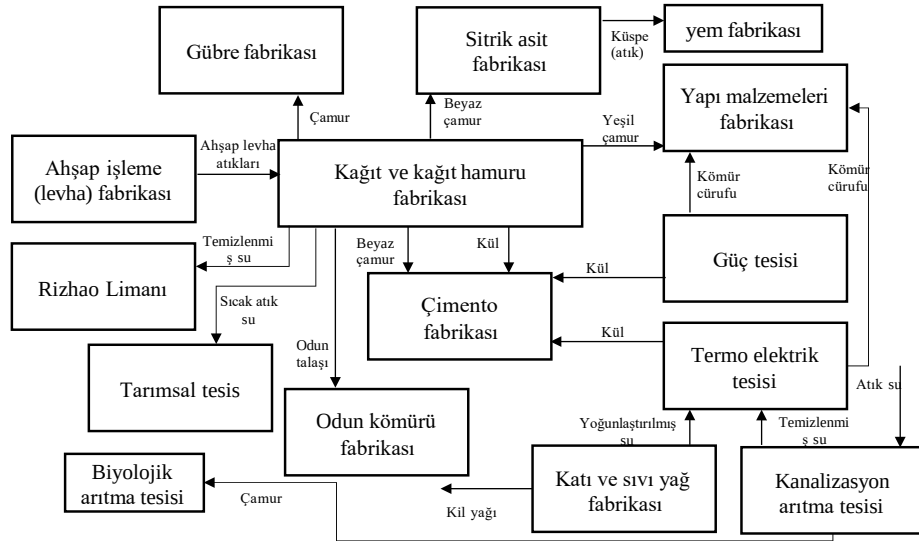
Şekil 3.7. İsveç'te orman endüstrisinde ES ağı akışlar (Karlsson ve Wolf, 2008)

Sokka vd., (2011a) ve Sokka vd., (2011b) çalışmalarında Finlandiya'daki Kymi EEP'de entegre kağıt ve kağıt hamuru tesisine ek olarak, bu tesisle işbirliği içinde çalışan ve tamamen kimyasal ürün üreten üç kimya tesisi bulunmaktadır. Ayrıca enerji üretim tesisi, su arıtma tesisi ve atık depolama alanı gibi tesislerde bulunmaktadır. Ağdaki akışlar Şekil 3.9'da verilmiştir. İşletmelerin bu ES ağına dahil olması enerji ve malzeme verimliliğinin arttığı buna ek olarak emisyonların azaldığı görülmüştür.



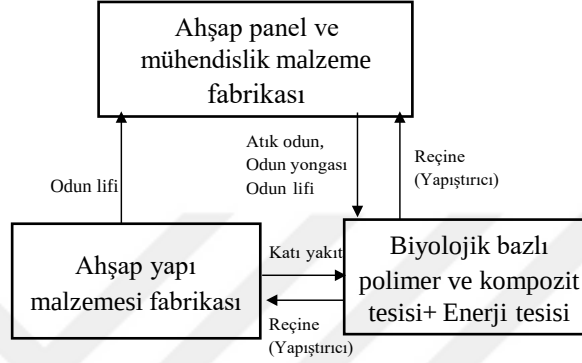
Şekil 3.9. Finlandiya Kymi EEP'deki ES ağı akışı (Sokka vd., 2011a)

Yu vd. (2015a, 2015b) çalışmalarında 1991 yılında kurulan ve Çin'de bulunan bir Rizhao sanayi parkındaki ES ağını incelemiştir. Tahıl yağı ve gıda, makine, kağıt hamuru ve kağıt, tekstil içeren 31 işletme arasında kurulan simbiyoz performansı sayesinde bu ağa hazır giyim, şarap rafinasyonu ve biyokimyasal endüstri de katılmıştır (Şekil 3.10). devlet destekli bu ES ağında işletmelere sağlanan ekonomik teşvikler (vergi, malzeme fiyatı indirimleri, vb.), işletmelerin ES ağını katılmalarında itici bir güç olmuştur.



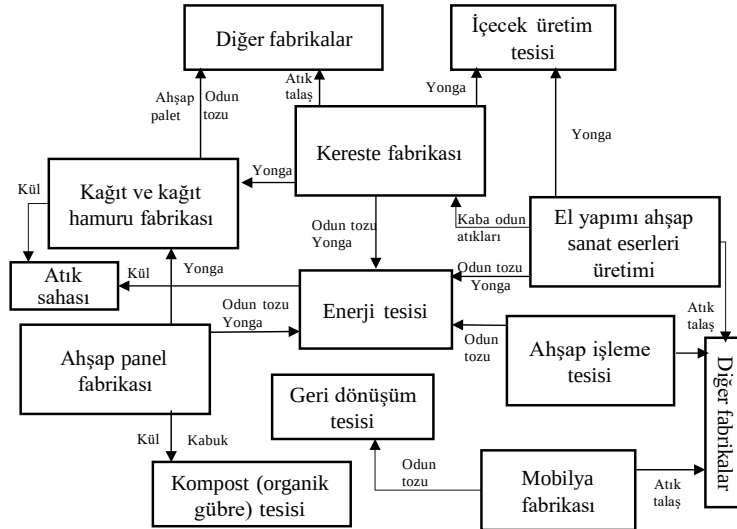
Şekil 3.10. Çin REDA parkındaki endüstriyel simbiyoz ağı (Yu vd., 2015a)

Hildebrandt vd., (2018) Alman hükümeti tarafından biyoekonomi bölgeleri için sağlanan stratejik finansal desteklerle kurulan pilot bir ES ağını incelemiştir. Şekil 3.11’de görülen ahşap malzeme temelli bu ağı değerlendirmek için yaşam döngüsü analizi (YDA) kullanılmıştır. Sonuçlar, doğal kaynak kullanan endüstrilerin bulunduğu ES ağında fosil kaynak kullanan işletmelere oranla daha iyi performans gösterdiğini ve çevresel etkileri %130’a kadar azalttığını göstermiştir.



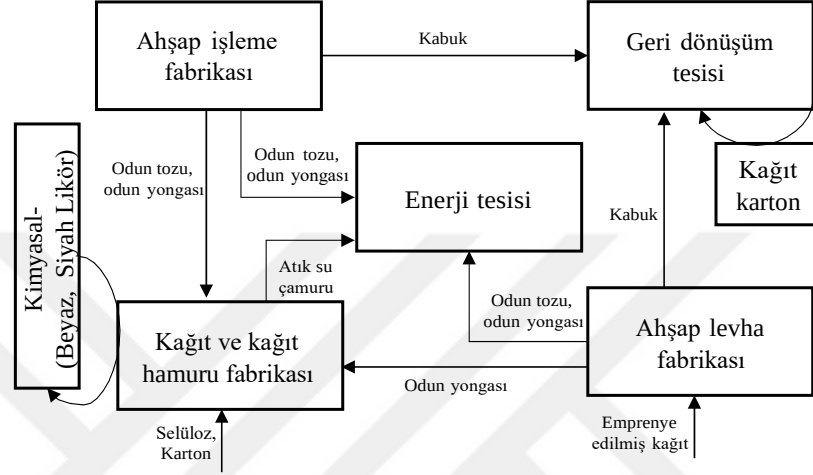
Şekil 3.11. Almanya’daki ahşap malzeme temelli ES (Hildebrandt vd., 2018)

Wahrlich ve Simioni (2019) Brezilya'nın güneyindeki Lages bölgesinde ahşap işleme sürecinde çıkan atıkların kullanımı için orman endüstrisi temelli bir ES ağı önermiştir. Önerilen akışlar Şekil 3.12’de görülmektedir. Çalışmanın amacı orman ürünleri sektöründe ES seviyesini belirlemek (düşük veya yüksek), katılımcılar için ES faydalarını belirlemek ve ES’nin nasıl ekosisteme dönüşeceğini tartışmaktır.



Şekil 3.12. Brezilya, Lages bölgesinde ES ağı (Wahrlich ve Simioni, 2019)

da Silva vd. (2020), ise Wahrlich ve Simioni, (2019) tarafından önerilen orman ürünleri temelli ES ağını genişletmiş ve orman endüstrisinde hammadde kullanımını ve atık oluşumunu azaltmayı teşvik eden bir döngüsel ekonomi modeli önermiştir. Ahşap işleme fabrikası, kağıt tesisi, enerji tesisi ve geri dönüşüm tesisi bulunan bu ağda hammadde kullanımı %83 enerjiye dönüşümü %91 oranında olmuştur. Parkta tüketilen enerjinin %83'ü ise atıklardan elde edilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Brezilya, Lages orman endüstrisinde model (da Silva vd., 2020)

Literatürde orman endüstrisi özelinde yapılmış endüstriyel simbiyoz ve eko-endüstriyel park çalışmaları bir bütün olarak incelendiğinde ağda; Ahşap işleyen, Kimyasal üreten veya tüketen, Enerji üreten ve Atık depolayan veya dönüştüren tesisler olduğu görülmüştür. Bu tesisler aşağıda listelenmiştir. Dolayısıyla, ES tasarımı bu tesisler arasındaki etkileşimden faydalanılabilir.

- I. Ahşap işleyen üretim tesisleri
 - a. Kereste Fabrikası
 - b. Ahşap levha (Yongalevha, Liflevha) tesisi
 - c. Kontrplak Fabrikası
- II. Kimya üreten ve kimyasal hammadde kullanan tesisleri
 - a. Kağıt ve kağıt hamuru tesisi
 - b. Kalsiyum karbonat tesisi
 - c. Klor dioksit tesisi
 - d. Üre ve Fenol Formaldehit Tesisi
 - e. Kimyasal geri dönüşüm tesisi
 - f. Çimento fabrikası

- III. Enerji üreten tesisler
 - a. Pellet tesisi
 - b. Biyo yakıt tesisi
 - c. Enerji Santrali
 - d. Bölgesel (Konut vb.) enerji
- IV. Atık depolayan veya geri dönüştüren tesisler
 - a. Atık depolama Sahası
 - b. Atık su arıtma tesisi
 - c. Organik gübre tesisi

Bu tez çalışmasında ise literatürdeki bu çıkarımlar dikkate alınarak kereste, kontrplak, yongalevha, liflevha, kağıt ve kağıt hamuru, pelet, organik gübre ve su arıtma tesisinin olduğu bir ES tasarlanmıştır. Bu tesislerden oluşan bir ES ağında, atık su, enerji, odun yongası, atık odun ve kabuk üretim süreçlerinde ortaya çıkmakta ve farklı tesislerde tekrar kullanılmaktadır. EEP’de oluşturulan bu ES ağı ile ilgili detaylı bilgi bir sonraki bölümde verilmiştir.

3. 3. Sonuçlar

Orman endüstrisi sektörü ES’nin önemli ve stratejik uygulama alanlarının biri olarak görülmektedir. Sektör doğal kaynak kullanımının yoğun olması ve ortaya çıkan atık/yan ürünlerin tekrar kullanılabilme özelliği sebebiyle ön plana çıkmaktadır. Farklı ülkelerdeki Uimaharju, Guitang, Ulsan, Kymi gibi orman ürünleri endüstrisi temelli EEP’ler sektörlerdeki potansiyele işaret etmektedir.

Orman endüstrisi temelli EEP’ler de sektörden veya farklı sektörlerle işbirliği mümkündür. ES ağlarının destekleneceği EEP’ler tasarlamak önemlidir. Zira, birçok ülkede hükümetler temiz ve sürdürülebilir üretimi desteklemektedir. Dahası EEP’lerde faaliyet gösteren işletmelere vergi muafiyeti, girdi ve enerji fiyatlarında indirim gibi birçok teşvik sağlanmaktadır. Bu tezin amacı ülkemizdeki ES uygulamalarına örnek olabilecek orman ürünleri endüstrisi temelli bir EEP tasarlamaktır. Bu parkta oluşturulacak ES ağının ekonomik ve çevresel faydalarının analiz edilmesi hem işletmelere hem de hükümetlere yol gösterici olacaktır.

BÖLÜM IV

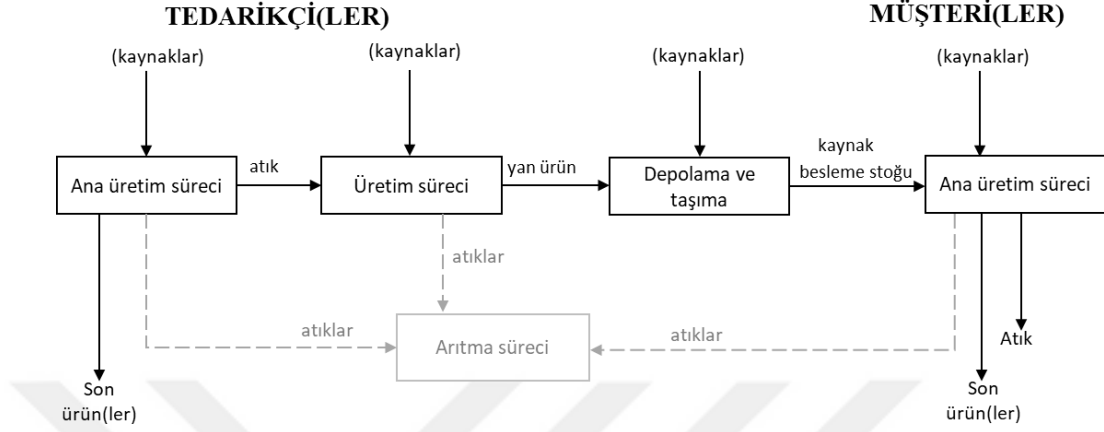
4. ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ AĞLARI İÇİN ÇOK AMAÇLI ÇOK DÖNEMLİ BİR MODEL ÖNERİSİ

Bu bölümde, kereste, yongalevha, liflevha, kağıt ve pelet tesisleri gibi orman ürünleri endüstrisinde faaliyet gösteren işletmeler arasındaki kurulan bir ES ağını tanıtmaktadır. Tasarlanan ağda bir organik gübre tesisi ve bir su arıtma tesisi de bulunmaktadır. ES ağını kurmak için YDA yönteminden faydalanılmış ve simbiyoz ağında gözlemlenebilecek olası yan ürünler ve atıkların türü tespit edilmiştir. Daha sonra, bu tesislerin bir EEP’de konumlandığı varsayılarak parktaki tesislerin konumları ALDEP algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Tasarlanan bu ES ağında paydaşların elde ettiği ekonomik ve çevresel faydalar geliştiren çok amaçlı çok dönemli matematiksel model kullanılarak analiz edilmiştir.

4.1. Giriş

ES, sistem bileşenleri ve çevresi arasındaki etkileşimden kaynaklanan karmaşık sistemler olarak tanımlanır (Albino vd., 2016). Bu karmaşıklık, sistemdeki işletmelerin sayısı, sektör çeşitliliği, farklı büyüklükteki işletmelerin dağılımı ve etkileşimler gibi bir dizi sistem parametresi ile ilgilidir (Wallner, 1999). Bu karmaşıklık malzeme ve enerji akışlarının değerlendirilmesini kolaylaştıran optimizasyon modellerin kullanılmasını gerektirir (Karlsson ve Wolf, 2008). Bu noktada, ağdaki karar vericiler (alıcılar veya tedarikçiler), bu akışların sürdürülebilir üretim için yeterli olup olmadığına karar vermek için potansiyel yan ürün, atık ve enerji akışını analiz etmelidir. Bir tedarikçi ile alıcı arasındaki malzeme akışları Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Tedarikçiler son ürünleri üretirken, üretim sırasında ortaya çıkan yan ürünler ve atıklar ağdaki alıcılar tarafından kullanılabilir. Yan ürün seviyeleri üretim planlarına göre tahmin edilebilir; kıtlık ve fazlalık stoklarla hafifletilebilir (Herczeg vd., 2013). Üretim nedeniyle yan ürün kalitesindeki ve miktarındaki değişiklikler bu

alışverişleri daha da karmaşık hale getirebilir. Bu nedenle, matematiksel modelleme ve simülasyon gibi analitik araçların kullanımı, ES ağlarındaki karar vericileri desteklemek için hayati önem taşımaktadır.



Şekil 4.1. Yan ürün akışı ilgili işlemler ve malzeme akışları (Herczeg vd, 2013).

ES ağlarını değerlendirmek ve planlamak için, YDA, malzeme akışı analizi, sosyal ağ analizi, ajan tabanlı modelleme, matematiksel programlama, coğrafi bilgi sistemleri, gibi farklı araçlar kullanılmaktadır (Rosa ve Beloborodko, 2015).

Tezin bu bölümünün amacı, bir ES sistemin potansiyel ekonomik ve çevresel faydalarını analiz ederek hükümetlerin sürdürülebilir üretim politikaları ve işletmelerin iş stratejilerini belirleyebilmelerini sağlamaktır. Bu amaçla, ES'nin işletmelere ve çevreye olası faydalarını ve katkılarını analiz etmek için çok amaçlı çok dönemli bir model önerilmiştir. Önerilen model, çoğunlukla ES için gönüllü olan orman endüstrisi işletmelerine ev sahipliği yapan bir EEP'de bulunan teorik bir ES ağında test edilmiştir. Gerçekçi bir EEP tasarlamak için, ağdaki her bir işletmenin ürünlerine ve atıklarına göre potansiyeli YDA kullanılarak değerlendirilmiştir.

Literatürde, orman endüstrisine dayalı ES ağlarını tasarlamak için YDA kullanan bir dizi çalışma (Sokka vd., 2011b; Li vd, 2015; Rosa ve Beloborodko, 2015; Hildebrandt vd., 2019) mevcuttur. Ancak bilginiz dahilince, orman ürünlerinde ES çalışmalarını analiz etmek için kullanılan yöntemler incelendiğinde, matematiksel model kullanan tek bir çalışmaya rastlanmıştır (Karlsson ve Wolf, 2008). Bu çalışmada ise önerilen matematiksel model sunulmamış sadece bir paket programı ile elde edilen sonuçlar

tartışılmıştır. Atık, yan ürün, enerji ve bilgi alışverişinin, ES ağına dahil olan işletmeler arasında karmaşık bir kapalı döngü tedarik zinciri oluşturduğu bilinmektedir (İsmail ve Zagloel, 2014; İsmail, 2018; Herczeg vd., 2018). Bununla birlikte, işletmeler arasındaki çeşitli akış türlerindeki çeşitlilikten dolayı ES modellerinin karmaşıklığı, katılımcıların kararlarını desteklemek için matematiksel modeller gibi analitik araçların kullanılmasını gerektğini ön plana çıkarmaktadır. Bu anlamda, bu çalışma orman endüstrisi sektörüne odaklanan bir EEP’de yer alan bir ES ağını tasarlamak için YDA ve matematiksel modellemeyi bir arada kullanan ilk çalışmalardan biridir.

Tasarlanan EEP'nin ana oyuncularını kereste, kontrplak, liflevha, yongalevha ve kağıt tesisleridir. Diğer oyuncular ise pelet tesisi, su arıtma tesisi ve organik gübre tesisi. ES ağını kurmak için, her bir tesisin girdi ve çıktıları yani yan ürünler, atıklar, emisyonlar vb. belirlemek için YDA kullanılmıştır. YDA'nın farklı ES tasarımlarını analiz etmek ve karşılaştırmak için son derece yararlı bir araç olduğu bilinmektedir (Singh vd., 2007; Yu vd., 2015b). YDA’dan elde edilen veriler kullanılarak, EEP'deki tesislerin yeri, katılımcı işletmeler arasındaki potansiyel yan ürün, enerji, su ve atık akışları dikkate alan ALDEP (Automated Layout DEsign Program) algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Önerilen ağdaki işletmelere ES’nin katkısını belirlemek için ise çok amaçlı çok dönemli bir model geliştirilmiştir.

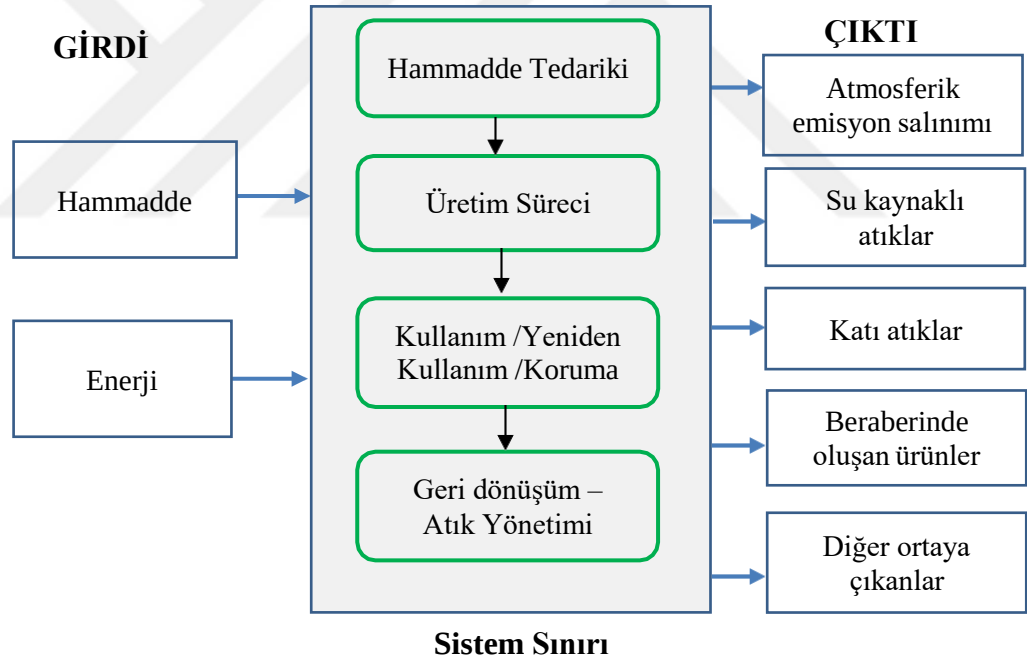
EEP tasarımı tipik olarak ekonomik, çevresel ve sosyal çok amaçlı bir problem olsa da (Boix vd., 2015; Zhang vd., 2016; Afshari vd., 2018), EEP tasarımındaki çok amaçlı modeller sınırlı sayıdadır (Boix vd., 2015). ES için yapılan matematiksel modeller incelendiğinde, modellerin çoğunun katılımcıların ekonomik faydasını en üst düzeye çıkarmak için tek amaçlı yapıda olduğu görülmektedir (Chae vd., 2010; Meneghetti ve Nardin, 2012). Bu çalışmada önerilen modelde, ilk amaç fonksiyonu parktaki işletmelerin üretim maliyetini (malzeme, enerji, nakliye, bertaraf maliyeti) en aza indirmeye çalışırken, diğer amaç fonksiyonunun ise üretim ve taşıma kaynaklı CO₂ emisyonunu en aza indirmeye çalışmaktadır.

Bu bölümün ana hatları şöyledir: ilk olarak orman endüstrisinde faaliyet gösteren işletmelere arasındaki akışları belirlemek için kullanılan YDA yöntemi tanıtılmıştır. Daha sonra EEP tasarlanmış ve işletmelere arası uzaklıkların ve yerleşim planının belirlenmesi için ALDEP algoritması kullanılmıştır. Son olarak tasarlanan ES ağını

analiz etmek için kullanılan çok amaçlı çok dönemli matematiksel model sunulmuş ve modelin sonuçları tartışılmıştır.

4.2. Orman Endüstrisinde Yaşam Döngüsü Analizi (YDA)

YDA, bir ürün veya hizmetin çevresel etkilerini, yaşam döngüsünün çeşitli aşamalarında yer alan hammadde, yan ürün, enerji gibi tüm girdi ve çıktı verilerini kullanarak değerlendirmek ve analiz etmek için kullanılan bir araçtır (ISO, 2006; Singh vd., 2007). Farklı aşamalardan oluşan bu yapı bir sistem olarak ele alındığında muhtemel girdi ve çıktıları Şekil 4.2’de verilmiştir. YDA göre, bir hammaddenin yaşam döngüsü tüm üretim süreci öncesi, üretim sürecini ve üretim süreci sonrasını içerisine alır. Yani YDA, hammaddenin tedarikinden, üretim süreci sonunda oluşan atıkların değerlendirilmesini kadar geçen süreçlerdeki çevresel etkileri analiz eder.



Şekil 4.2. Yaşam döngüsü analizi aşamaları (USEPA, 2006)

YDA, ürün, süreç veya hizmetle ilişkili çevresel etkileri değerlendirmek için aşağıdaki işlemlerden yararlanan tekniktir (SAIC, 2006);

- Üretimde kullanılan tüm malzemeler ve doğal kaynaklardan oluşacak çevresel zararlar ve emisyonlar belirlenir.

- Üretim sürecinde ve süreç sonunda yine tüm malzemelerin (enerji, su, hammadde gibi) girdi/çıktı analizi yapılır.
- Elde edilen analiz sonuçları planlı olarak değerlendirilir ve işletme yöneticilerine en uygun üretim süreci veya malzeme seçimi için bilgi vermek amacıyla sonuçlar yorumlanır.

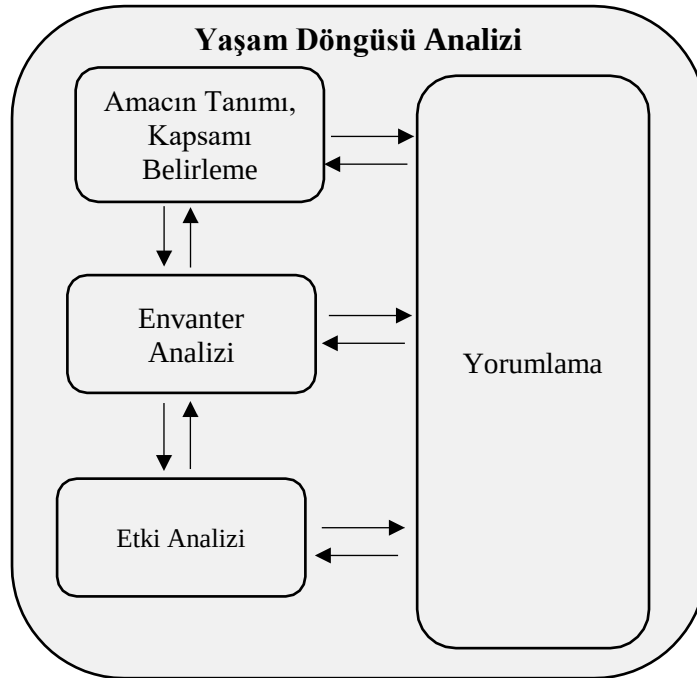
YDA süreci sistematik, aşamalı bir yaklaşımdır ve Şekil 4.3’de görüldüğü gibi dört aşamadan oluşur; Amacın tanımı ve kapsamı belirleme, Envanter analizi, Etki analizi ve Yorumlama (USEPA, 2006).

1. *Amacın Tanımı ve Kapsamının Belirlemesi*: çalışma konusu olan ürünü, süreci veya faaliyeti tanımlanır ve nasıl yol/yöntem inceleneceği açıklanır. Değerlendirmenin yapılacağı işkolu ve çevresel etki türleri belirlenir.

2. *Envanter Analizi*: yaşam döngüsü sürecinde oluşacak girdi/çıktılar; enerji, su ve malzeme kullanımını ve çevresel salımlar (örneğin, hava emisyonları, katı atık bertarafı, atık su deşarjları) belirlenir ve ölçülür.

3. *Etki Analizi*: bir önceki aşamada tespit edilen enerji, su ve malzeme kullanımından kaynaklı çevresel zararların insanlığa ve ekolojiye etkilerini analiz edilir.

4. *Yorumlama*: yukarıdaki aşamalar bütünlük halinde incelenerek en uygun ürün/hizmet ya da üretim süreci planlanır.



Şekil 4.3. Yaşam döngüsü analizi değerlendirmesi (USEPA, 2006)

Son yıllarda birçok araştırmacı, ES girişimlerinin çevresel faydalarının nasıl ölçüleceği sorusunu gündeme getirmiştir (Geng vd., 2009; Park vd. 2010; Yuan vd., 2006; Zhu vd., 2010). YDA, bu amaca ulaşmak için en önemli araçlardan biri olarak kabul edilmektedir (Soratana ve Landis, 2011; Sokka vd., 2011a; Mattila vd., 2012; Eckelman ve Chertow, 2013; Yu vd., 2015; Daddi vd., 2017; Martin, 2015; Scheepens vd., 2016; Martin, 2018; Aissani vd., 2019; Hildebrandt vd., 2019). Dahası, ES'yi değerlendirmek için en etkili yöntemdir (Yu vd., 2015a). Bir malzemenin yaşam döngüsü aşamaları Şekil 4.4'de görüldüğü gibi, hammadde edinimi, malzeme üretimi, üretim, taşıma, kurulum, kullanım/yeniden kullanım/bakım, atık yönetimi ve geri dönüşümdür. Dolayısıyla ES ile YDA yakın ilişkilidir. ES ağlarında YDA bir araç olarak kullanılması kaynak tüketiminde verimlilik, emisyonların azaltılması ve atıkların azaltılmasında gibi çevresel konularda katkı sağlamaktadır (Neves vd., 2019).



Şekil 4.4. Malzemelerin yaşam döngüsü aşamaları (URL, 2021)

Bununla birlikte, ES'nin çevresel etkilerini incelemek için YDA'nın kullanılması belirli konuları ortaya çıkartır. ES çalışmalarında kullanılan YDA araştırma konularına göre beş gruba ayırmaktadır (Mattila vd., 2012); (1) analiz, (2) iyileştirme, (3) mevcut sistemlerin geliştirilmesi, (4) yeni eko-endüstriyel park tasarımı ve (5) döngüsel ekonomilerin yeniden yapılandırılması.

Bu çalışmada, yeni bir EEP tasarlayabilmesi için orman ürünleri sektöründeki potansiyel çıktıları analiz etmek amacıyla YDA kullanılmıştır. Bu analiz bir sonraki bölümde sunulmuştur.

4.2.1. Orman Endüstrisi Temelli Bir Eko-Endüstriyel Park İçin YDA

Bir EEP, enerji, su ve malzemeler de dahil olmak üzere kaynak sürdürülebilirliği ve ekonomik fayda sağlamak için bir araya gelmiş üretim ve hizmet işletmeleri topluluğu olarak ifade edilebilir (Chertow, 2000). EEP'ler, ES kavramını uygulamak için pratik bir yöntemdir ve bu yöntem dünya çapında giderek yaygınlaşmaktadır (Zhang vd., 2010).

Bu çalışmada tasarlanan ES ağı da bir EEP içerisinde bulunmaktadır. ES ağında, faaliyet alanlarındaki son ürünlerini üretmek için hammadde, buna karşın yan ürün, su, enerji tüketen, yan ürün ve atık su, çamur, kül ve CO₂ emisyonu gibi atıklar üreten on işletme bulunmaktadır. Bu işletmelerin üretimde kullanacağı kimyasal hammaddelerin park dışındaki tedarikçilerden temin edileceğini varsayılmıştır. İşletmelerde kullanılacak ısı enerjisinin odun peletinden ya da akaryakıttan (fuel-oil) elde edileceği öngörülmektedir.

Ağda iki kereste fabrikası olduğu varsayılmaktadır. Kereste fabrikalarında ortaya çıkan yan ürünler ve atıklar pelet tesisi ve diğer işletmeler tarafından kullanılabilir. Kereste fabrikaları kereste üretmek için hammadde olarak tomruk (kabuklu ve kabuksuz) kullanmaktadır. Kereste fabrikası için hammadde, yan ürün, enerji gibi girdi çıktı verileri Mansson, (2004) ve Korhonen vd., (2001)'in çalışmalarından derlenmiştir.

Ağda iki kontrplak fabrikası olduğu varsayılmaktadır. Bu kontrplak fabrikalarında hammadde olarak tomruk kullanılabilir. Üretim sırasında ortaya çıkan odun yongası, atık odun, parktaki yongalevha ve liflevha tesislerinde yan ürün olarak kullanılacaktır. Kontrplak fabrikası verileri Tucker vd., (2009)'ın çalışmasından derlenmiştir.

Yongalevha üretim tesisinde temel olarak tomruk, yan ürün olarak ise yonga ve atık odun kullanılır. Yongalevha tesisine ait verileri Rivela vd., (2006) ve Tucker vd., (2009)'ın çalışmalarından derlenmiştir. Bu tesisten üretim sürecinde ortaya çıkan ağaç kabuğu, odun tozu ve atık odun pelet tesisinde kullanılabilir.

Orta yoğunluktaki liflevha (Medium Density Liflevha, MDF) üretim tesisi, liflevha üretmek için tomruk ve yan ürün olarak yonga ve atık odun kullanmaktadır. Liflevha

tesisi verileri (Wilson, 2010; Dayanıklıoğlu, 2004; Piekarski vd., 2017) 'den elde edilmiştir. Bu tesiste ortaya çıkan atık su park içerisindeki su arıtma tesisine gönderilecektir.

Kâğıt ve kâğıt hamuru tesisinde kraft kâğıt üretmek için de odun yongası ve tomruk kullanılır. Ortaya çıkan atık su ise su arıtma tesisine gönderilebilir. Buna karşılık arıtılmış su da kullanılabilir. Bu tesise ait veriler Avşar ve Demirer, (2008) ve Klugman vd., (2007) çalışmalarından derlenmiştir.

Ağda orman endüstrisinde faaliyet gösteren işletmeler dışında pelet tesisi, su arıtma tesisi ve organik gübre tesisleri de mevcuttur.

Farklı ısı kaynaklardan elde edilen ısı miktarı, salınan emisyon ve kül oluşumu ile birlikte birim fiyatları yaklaşık olarak Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ahşap pelet sıkıştırılmış odun yongası ve diğer endüstriyel odun atıklardan üretilir. Isı üretmek için pelet kullanıldığında, 1 ton peletten 5.700 kWh ısı elde edilmektedir. Pelet fiyatı ortalama 120 \$/ton'dur. Her ton pelet kullanıldığında 340 kg CO₂ emisyonu salınımı olmaktadır. Peletin kül içeriği ton pelet başına 15 kg'dır. Öte yandan atık odun ısı üretmek için kullanıldığında, sadece 1.650 kWh ısı üretilir. Atık odunun ortalama fiyatı 45 \$/ton'dur. Isı elde etmek için her ton atık kullanıldığında 46 kg CO₂ emisyonu salınımı olmaktadır. Atık odunun kül içeriği ton odun başına 80 kg'dır. Isı üretmek için fuel-oil kullanıldığında 1 ton fuel-oil'den 12490 kWh ısı elde edilir. Fuel-oil'in fiyatı 720 \$/ton'dur. Emisyon salınımı 4.275 kg olup, kül oluşmaz. Pelet tesisi için kullanılan veriler Karlsson ve Wolf, (2008), Çelik, (2011) ve Francescato vd., (2008) çalışmalardan derlenmiştir. Isı enerjisi elde etmek için odun veya fuel-oil yerine pelet kullanmak işletmelere hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlar (Francescato vd., 2008).

Çizelge 4.1. Farklı ısı kaynaklarının değerleri

Değerler	Pelet	Odun	Fuel-oil
Elde edilen Isı (ton/kWh)	5.700	1.650	12.490
Salınan CO ₂ emisyonu (ton/kg)	340	46	4.275
Kül oluşumu (ton/kg)	15	80	-
Fiyatı (ton/ \$)	120	45	720

Parkta yer alan su arıtma tesisi ise, kontrplak, liflevha ve kağıt ve kağıt hamuru tesislerinden elde edilen atık suyun yeniden kullanılmasını sağlamaktadır. Arıtılmış su, park içindeki tesislerde kullanılmaktadır. Atıksu arıtma işlemleri sırasında, lif çamuru da ortaya çıkar. Su arıtma tesisi ile ilgili veriler Kamble vd., (2018) ve Yazar, (2019)'ın çalışmalarından derlenmiştir.

Organik gübre tesisi ise, turf hammaddesinin yanında, kül, lif çamuru, katı atık ve ağaç kabuğu gibi düşük maliyetli atıklardan gübre üretmektedir. Bu atıklar EEP içindeki fabrikaların çoğu tarafından üretilmektedir. Eğer kül ve lif çamuru gübre tesisi tarafından kullanılmayacaksa bertaraf edilmektedir. Gübre tesisi ile ilgili veriler Martin (2018) 'in çalışmasından derlenmiştir.

EEP'deki tesislerin girdi ve çıktı verileri Çizelge 4.2'de özetlenmiştir. Örneğin, kereste fabrikası tomruk ve enerji (peletten ısı) kullanılmaktadır. Son ürün olarak; kereste, yan ürün ve atık olarak; odun yongası, atık odun ve kabuk, yakacak odun ve odun tozu üretir. Liflevha tesisi girdi; hammadde olarak tomruk ve yan ürün olarak yonga ve atık odun, enerji/su olarak arıtılmış su ve geri dönüştürülmüş buhar kullanılmaktadır. Yan ürün olarak, kabuk, atık toz ve atık buhar ortaya çıkar.

Çizelge 4.2. Orman endüstrisinde YDA kullanarak endüstriyel simbiyozun analizi

Tesisler	Çıktı			Girdi		
	Son ürün	Yan ürün		Hammadde	Yan ürün	
		Malzeme	Enerji, Su		Malzeme	Enerji, Su
Kereste A	Kereste	Yonga, Atık odun	Kabuk, Yakacak odun, Odun tozu	Tomruk	-	Isı (Pelet)
Kereste B	Kereste	Yonga, Atık odun	Yakacak Odun, Odun Tozu	Tomruk	-	Isı (Pelet)
Kontrplak A	Kontrplak	Yonga, Atık odun	Kabuk, Yakacak Odun, Odun Tozu, Atık su	Tomruk	-	Isı (Pelet)
Kontrplak B	Kontrplak	Yonga, Atık odun	Odun Tozu, Atık Su	Tomruk	-	Isı (Pelet)
Yongalevha	Yongalevha	-	Kabuk, Atık toz, Atık buhar	Tomruk	Yonga, Atık odun	Arıtılmış su, Buhar
Liflevha	MDF	-	Kabuk, Odun tozu, Atık su, Atık buhar	Tomruk	Yonga, Atık odun	Arıtılmış su, Buhar, Isı (Pelet)
Kağıt	Kraft kağıt	-	Kabuk, Atık su, Atık buhar	Tomruk	Yonga	Arıtılmış su, Buhar, Isı (Pelet)
Pelet Enerji	Pelet (Isı)	Kül	-	-	Kabuk, Yakacak odun, Odun tozu	-
Su arıtma	Arıtılmış su	Arıtılmış Su	-	-	-	Atık su
Organik gübre	Gübre toprak	-	-	Turf	Kabuk, Kül, Lif Çamuru	-

EEP su arıtma tesisi dışındaki her tesis bir son ürün üretir. Çizelge 4.3 EEP'deki tesisler tarafından 1 ton son ürün üretilmesi için gerekli girdiler ve çıktılara ilişkin verileri gösterilmektedir. Örneğin, kereste fabrikası 1 ton kereste üretmek için 1,6 ton tomruk işlemelidir. Bu işlem 85 kWh enerji ve 568 kWh ısı gerektirir. Sonuç olarak, 0,15 ton odun yongası, 0,12 ton atık odun, 0,108 ton kabuk, 0,06 ton yakıt odunu ve 0,138 ton odun tozu ortaya çıkar. Üretim sürecinde hammadde veya yan ürünler girdi malzemesi olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, girdi olarak kullanılan yan ürün miktarı, kullanılan hammaddenin belirli bir yüzdesinden fazla olamaz. Bu değer yonga levha tesisi için %30, liflevha tesisi için %35 ve kağıt ve kağıt hamuru tesisi için %30 olarak belirlenmiştir. Her fabrikanın CO₂ emisyonu verileri Lun vd., (2016) ve Sahoo vd., (2019) 'dan elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. YDA'daki tesislerin girdi-çıkıtı verileri

Parametreler		Tesisler				
		Kereste	Kontrplak	Yongalevha	Liflevha	Kağıt
Girdi	Tomruk (ton)	1,6	2,1	1,35	1,5	1,9
	Yonga (ton)	-	-	maks %30	maks %35	maks %30
	Atık odun (ton)	-	-			-
	Elektrik (kWh)	85	127	106	415	2.900
	Isı (kWh)	568	740	315	800	-
	Su (ton)	-	0,34	0,02	1,4	5,5
	Buhar (ton)	-	-	0,015	0,52	2,3
	Kimyasal (kg)	-	71	73	90	150
Çıktı	Son ürün (m3)	1	1	1	1	-
	Son ürün (ton)	-	-	-	-	1
	Yonga (ton)	0,150	0,400	-	-	-
	Atık odun (ton)	0,120	0,110	-		-
	Yakıt odun (ton)	0,060	0,060	-		-
	Kabuk (ton)	0,108	0,040	0,120	0,250	0,250
	Odun tozu (ton)	0,138	0,110	0,123	0,125	-
	Atık su (ton)	-	0,320	-	1	4,1
	Atık buhar (ton)	-	-	0,010	0,500	2,1
	CO ₂ emisyon (ton)	0,100	0,750	0,400	0,780	0,500

Pelet tesisi, su arıtma tesisi ve organik gübre tesisine ait verileri Çizelge 4.4'de özetlenmiştir. Örneğin, pelet tesisinde 1,1 ton yakıt odun, ağaç kabuğu veya odun tozu girdi olarak kullanıldığında 1 ton pelet üretilir. 1 ton peletten 5.700 kWh ısı elde edilir. Ayrıca 0,015 ton kül ve 50 kg CO₂ emisyonu ortaya çıkar.

Çizelge 4.4. YDA'daki diğer tesislerinin girdi-çıkıtları verileri

Parametreler	Tesisler		
	Pelet	Su	Organik gübre
Yakıt odun, Kabuk, Odun tozu (ton)	1,1	-	-
Elektrik (kWh)	230	1,5	10,5
Atık su (ton)	-	1,36	-
Turf (toprak) (ton)	-	-	0,55
Girdi Kabuk (ton)	-	-	0,08
Lif çamuru (ton)	-	-	0,18
Kül(ton)	-	-	0,05
Katı atık (ton)	-	-	0,05
Kum, Kireç, Gübre (ton)	-	-	0,19
Son ürün (ton)	1	1	1
Isı (kWh)	5.700	-	-
Çıktı Kül (ton)	0,015	-	-
Lif çamuru (ton)	-	0,12	-
CO ₂ emisyon (kg)	50	60	15

Ağdaki hammadde, yan ürün ve atıklara ait maliyetler ile üretim süreçlerinde karşılaşılan maliyetler Çizelge 4.5’de sunulmuştur. Bu maliyet verileri Türkiye’de faaliyet gösterecek işletmeler için çeşitli kamu kuruluşları verileri ve çeşitli akademik çalışmalardan derlenmiştir. Tüm maliyet rakamları dolar (\$) cinsinden verilmiştir.

Çizelge 4.5 Malzeme, enerji ve atık maliyetleri

Parametreler	Maliyet-Birim	Referans
Yonga	62 \$/ton	(OGM, 2019)
Atık odun	46 \$/ton	(OGM, 2019)
Yakıt odun	32 \$/ton	(Francescato vd., 2008)
Kabuk	5 \$/ton	(OGM, 2019)
Odun tozu	15 \$/ton	(Francescato vd., 2008)
Lif çamuru, Kül, Atık Su	Ücretsiz	-
Atık buhar	4 \$/ton	(Karlsson and Wolf, 2008)
CO ₂ vergisi	20,5 \$/ton	(EUA, 2018)
Taşıma maliyeti	0,031 \$/ton km	(Hoefnagels vd., 2014)
Tomruk	150 \$ /ton	(OGM, 2019)
Taze su (tesisler için)	1,92 \$/ton	(ISKI, 2019)
Arıtılmış su	0,08 \$/ton	(ISKI, 2019)
Isı (Peletten)	0,024 \$/ kWh	(Francescato vd., 2008)
Isı (Fuel-oilden)	0,067 \$/ kWh	(Francescato vd., 2008)
Buhar (Doğalgazdan)	14 \$/ton	(Karlsson ve Wolf, 2008)
Pelet (parktan)	120 \$/ton	(Francescato vd., 2008)
Elektrik enerjisi	0,11	(European statistics, 2018)
Taşımada CO ₂ emisyonu	0,012 kg/km	(EQUA, 2015)
Bertaraf maliyeti	25 \$/ton	(Hope vd., 2017)

Kurgulanan EEP’deki işletmelerin son ürün talepleri bu modelde deterministik olarak kabul edilmiş ve Çizelge 4.6’da verilmiştir. Bu ağ teorik kurgulandığı için talep değerleri Türkiye’de faaliyet gösteren çeşitli orman ürünleri fabrikaları ile görüşülüp

belirlenmiştir. Model çok dönemli olarak kurgulanmış ve dönemlik talep değerleri sabit kabul edilmiştir. Talep değerleri yıllık olarak verilmiş ve 1 yılın 4 dönem olduğu varsayılmıştır. Örneğin Kereste A fabrikası için dönemlik talep 125.000 m³'dür. Ayrıca ağ içerisinde yer alan atık su arıtma tesisinin kapasitesi ağdaki tüm atık suyu arıtacak şekilde sınırsız kabul edilmiştir.

Çizelge 4.6. Son ürün talepleri

Tesisler	Son ürün	Talep
Kereste A	Kereste	500.000 m ³ /yıl
Kereste B	Kereste	300.000 m ³ /yıl
Kontrplak A	Kontrplak	150.000 m ³ /yıl
Kontrplak B	Kontrplak	100.000 m ³ /yıl
Yongalevha	Yongalevha	800.000 m ³ /yıl
Liflevha	MDF	600.000 m ³ /yıl
Kağıt ve Kağıt Hamuru	Kraft kağıt	80.000 ton/yıl

4.3. Tasarlanan Orman Endüstrisi Temelli EEP ve ES Ağı

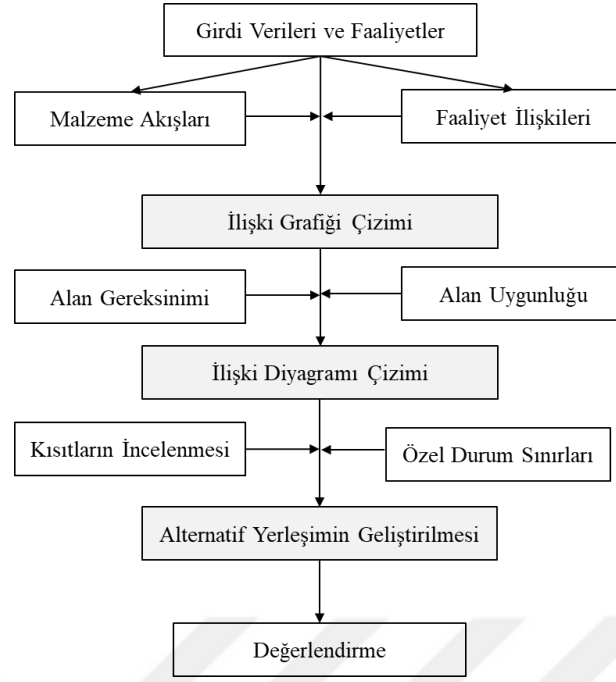
Tasarlanan ağda, farklı son ürün, yan ürün ve kül, lif çamuru ve CO₂ üreten ve enerji, hammadde ve yan ürün tüketen on işletme bulunmaktadır. EEP tasarımı yapılırken Lowe (2001)'in prensiplerine ek olarak aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır;

1. Ağdaki işletmeler bir EEP bulunur ve ES yapmaya gönüllüdürler.
2. Her tesis, tek bir tedarikçiden elde edilen tek tip hammadde kullanır.
3. Her tesis, diğer tesisler tarafından kullanılacak belirli miktarda yan ürün ve / veya atık üretir. Yan ürünler hammadde yerine EEP'deki tesisler tarafından veya pelet tesisi tarafından kullanılabilir.
4. Her işletme sadece tek tip son ürün üretir ve bu ürüne olan talep belli ve sabittir.
5. İşgücü maliyetleri, bakım maliyetleri ve amortismanlar gibi diğer giderler dikkate alınmamıştır.
6. Yan ürünler ve atıklar herhangi bir ön işlem yapılmadan tekrar kullanılabilir. EEP'de satılamayan yan ürünler (atık odun, yongalar, yakacak odun) EEP dışında satılabilir. EEP dışındaki işletmelere olan uzaklığın 200 km olduğu varsayılmaktadır.
7. Analiz süresi bir yıl olarak seçilmiştir. Bu süre dört döneme eşittir.

8. t . periyottaki üretilen yan ürün, $(t + 1)$ periyotta kullanılabilir. Aynı şekilde bir periyotta ortaya çıkan kül ve lif çamuru da bir sonraki periyotta kullanılabilir veya bertaraf edilebilir.
9. Herhangi bir dönemde son ürün talebinden fazla üretim yapılırsa üretilen miktarın tamamı aynı dönemde satılabilir.
10. Hammadde ve yan ürünlerin birim satış fiyatları, birim enerji maliyetleri ve fabrikalar arasındaki nakliye maliyetleri bilinmektedir.
11. Çamur ve kül gibi atıklar organik gübre tesisi tarafından kullanılabilir veya bertaraf edilebilir.
12. EEP'deki işletmelere verilen teşvikler kapsamında, elektrik ve yan ürünler (talaşlar, atık odunlar, vb.) EEP'deki işletmelere satıldığında maliyetleri %20 oranında düşürülür (Aguilar vd., 2017).
13. Atık su ücreti, su arıtma tesisi işleten EEP bölgelerinden alınmamaktadır (Law, 2017). Tasarlanan EEP'deki işletmeler, su ücretinin yaklaşık %50'si olan atık su ücretinden muaftır. İşletmelerden çıkan atık su arıtılır ve arıtılmış su park içindeki fabrikalarda kullanılacaktır.
14. Hammadde ve yan ürünlerin işletmelere taşınması ile ilgili taşıma maliyetleri alıcı tarafından karşılanacaktır.
15. Yongalevha, liflevha ve kâğıt tesisleri yan ürünler kullandıklarında, %10 enerji tasarrufu sağlayacak ve CO₂ emisyonlarının %10 daha düşük olduğu kabul edilecektir.

4.3.1. Tasarlanan Eko-Endüstriyel Parktaki İşletmelerin Yerleşim Planı

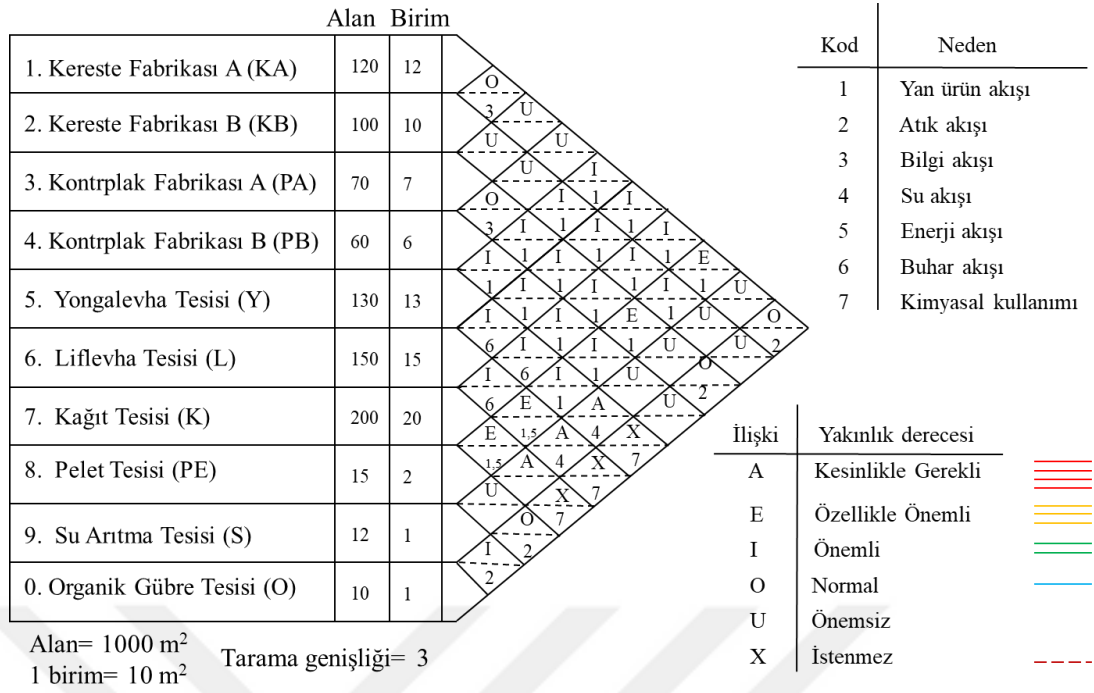
Tesisler arasındaki potansiyel malzeme, enerji vb. akışlarını göz önünde bulundurarak, tesislerin EEP'deki yerini belirlemek için sistematik bir yaklaşım kullanılmıştır. Çünkü taşıma maliyetleri ve CO₂ emisyon miktarları, tesisler arasındaki mesafeler belirlendiğinde hesaplanabilir. Bu amaçla Muther (1973)'in Sistematik Yerleşim Planı (Systematic Layout Planning, SLP) yöntemini kullanılmıştır. SLP algoritmasındaki ana adımlar, Şekil 4.5'de verilmiştir. Algoritmaya göre ilk olarak malzeme akışları belirlenir ve aktivite ilişkileri belirlenir. Daha sonra alan gereksinimlerini göre ilişki diyagramı çizilir. Son olarak bu diyagramlar ve kısıtlar göz önünde tutularak alternatif yerleşim planı oluşturulur (Singh ve Yılma, 2013).



Şekil 4.5. Sistematik yerleşim planı aşamaları (Muther, 1973)

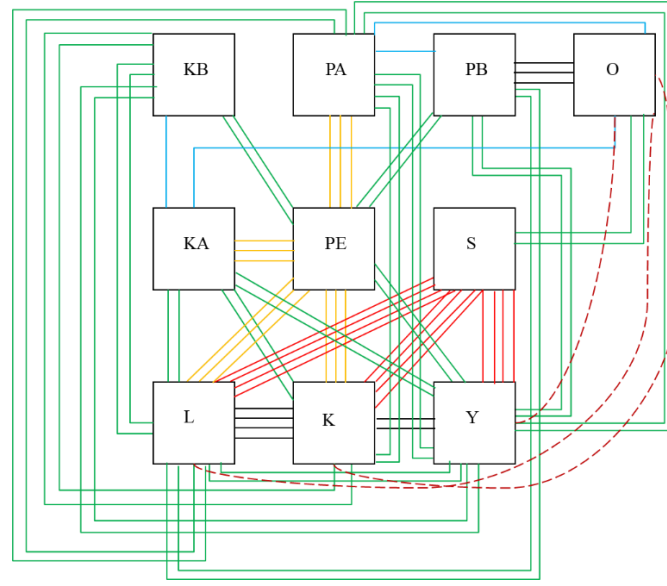
Nihai tesis yer seçimi için eniyileme ve sezgisel olmak üzere birçok algoritma vardır (Singh ve Sharma, 2006). Sezgisel tesis tasarım algoritmaları Kuruluş, Geliştirme ve Hibrit algoritmalar olarak üç ana grup altında incelenir (Ak, 2009). Bu tez çalışmasında bir EEP ilk defa kurulacağı için Kuruluş algoritması kullanılmıştır. Kuruluş algoritmaları herhangi bir başlangıç çözümü olmayan tasarımlar için tüm tesisleri amaçlar doğrultusunda tek tek analiz edip sıfırdan bir yerleşim planı oluşturur. Bu algoritmalarda en uygun çözümü bulmak için birçok farklı senaryo çözümleri üretilir. Tesis tasarımı için literatürdeki bazı kuruluş algoritmaları ALDEP, Vip-Planopt, LAYOPT, CORELAP ve PLANET sayılabilir. Bu çalışmada ALDEP algoritması kullanılmıştır.

İlk olarak Şekil 4.6’da sunulan aktivite ilişki grafiğini elde etmek için işletmeler arasındaki akışlar değerlendirilmiştir. Aktivite ilişki grafiği, ilişki grafiğindeki sesli harf derecelendirmeleri ile fabrika alanları arasında istenen yakınlığın grafiksel olarak görselleştirilmesini sağlar (Muther ve Hales, 2015). Bu grafik, ilişki derecesini gösteren harfler kullanarak fabrikalar arasındaki ilişkileri özetlenmektedir. Bu grafikte, yakınlığın nedenlerini de sunuyoruz. Örneğin, su arıtma tesisi ile organik gübre tesisleri arasındaki ilişki önemli (I) olarak tanımlanmaktadır, çünkü organik gübre tesisinden su arıtma tesisine bir atık su akışı (2. neden) beklenmektedir.



Şekil 4.6. Tasarlanan EEP için aktivite ilişki grafiği

Daha sonra, aktivite grafiğindeki çizelgeden yakınlık ilişkileri kullanılarak ilişki diyagramı oluşturulur. Bu ilişki diyagramı Şekil 4.7'de verilmiştir. İlişki diyagramı aslında ilişkileri değerlendirilen farklı işletmelerin blok diyagramıdır. İşletmeler, bir dizi çizgi ile birbirine bağlı olarak gösterilmiştir. Çizgi sayısı işletmeler arasındaki ilişkilerin önemini temsil eder. Aktivite ilişki diyagramına göre Kesinlikle Önemli (A) yakınlık derecesine sahip, kağıt ve kağıt hamuru tesisi, yongalevha tesisi ve su arıtma tesisi gibi bazı tesisler birbirine gerçekten yakın olmalıdır. Buna göre bu tesisler arasındaki ilişki 4 çizgi kullanılarak gösterilmiştir. Sonrasında, Şekil 4.6'da verilen tesislerin alan gereksinimlerini dikkate alınarak belirlenir.



Şekil 4.7. Tasarlanan EEP için ilişki diyagramı.

ALDEP algoritması, Seehof ve Evans (1966) tarafından sunulmuş ve IBM tarafından geliştirilmiştir. Bir kuruluş algoritması olan ALDEP ile öncesinde herhangi bir düzen olmadan sıfırdan tesis tasarım üretir (Francis vd., 1992; Meller ve Gau, 1996). ALDEP tesislerin yerleşimi için birçok farklı senaryoyu dikkate alan planlar oluşturur ve bu planları kendi içinde analiz eder. Bu planlardan en uygununun seçimini karar vericiye bırakır.

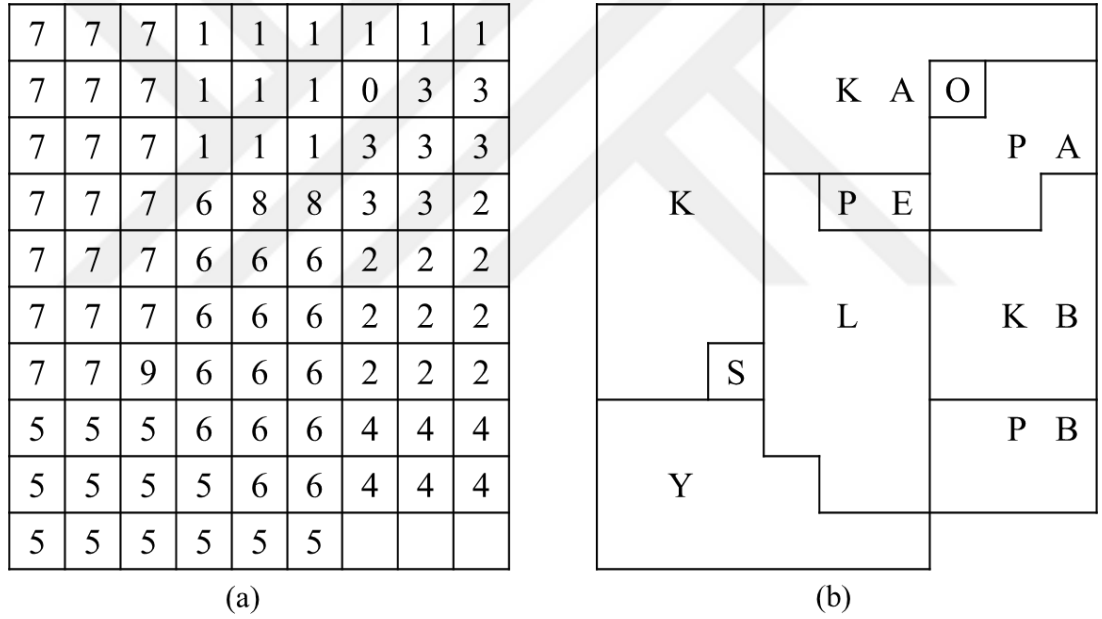
Her işletmenin alanını ve işletmeler arasındaki ilişkiyi, etkinlik ilişki şeması ve tarama genişliğine (sweep with) temel alınarak tasarım yapılır. Kullanıcı tarafından belirlenen toplam tarama genişliği, işletme için gerekli birim alan genişliğini temsil eder. Belirlenen tarama genişliği en küçük tesisin alanından küçük olmalıdır.

ALDEP algoritmasının adımları şöyledir (Seehof ve Evans, 1966);

- Konumu yerleştirilecek ilk işletme (A) yakınlık derecesine sahip işletmeler arasından rastgele seçilir.
- İlk işletme yerleştirildikten sonra, bu yerleştirilen fabrika ile ilişki derecelerine göre diğer fabrikalar sırasıyla seçilir ve yerleştirilir.
- Asgari düzeyde kabul edilebilir ilişkiye sahip herhangi bir tesis yoksa, seçim rastgele yapılır.
- Tarama genişliği dikkate alınarak işletmeler yukarıdan aşağıya ve soldan sağa doğru yerleştirmeye başlanır. Alan sınıra ulaşıldığında, aynı şekilde algoritma yerleştirmeye devam eder.

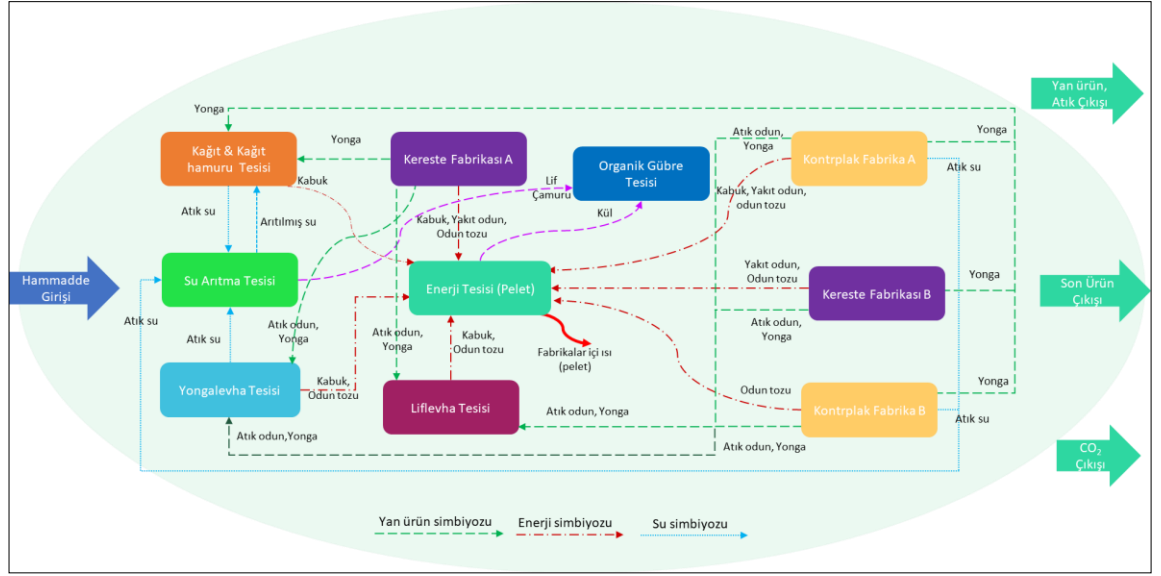
- Bir sonraki tesis bir önceki tesisin bittiği yerde başlar.
- Tüm tesisler yerleştirildiğinde algoritma durur. Yerleşim karar verici için uygun değilse algoritma tekrar başa döner ve yeni yerleşim yapılır.

Bu tasarım için önce kağıt ve kağıt hamuru tesisi seçilmiş ve yerleştirilmiştir. Daha sonra bu tesis ile en yüksek yakınlık derecesine (A) sahip su arıtma tesisi bu fabrikanın yakınına konumlandırılmıştır. Daha sonra ise yongalevha tesisi, su arıtma tesisi ile yüksek yakınlık derecesine sahip olması nedeniyle yerleştirilir. Tesislerin geri kalanı aynı şekilde yerleştirilmiştir. Tasarımda tarama genişliğini 3 olarak belirlenmiştir. Adım adım her bir hücrenin 10000 m²'yi temsil ettiği varsayımıyla Şekil 4.8a'da gösterilen düzen (ızgara görünümü) elde edilmiştir. Nihai yerleşim ise Şekil 4.8b'de sunulmuştur.



Şekil 4.8. ALDEP tarafından belirlenmiş ızgara görünümü (a) ve son düzen (b)

EEP'deki işletmeler arasındaki potansiyel akışlar ise Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Yan ürün ve atık kullanan tesisler YDA'ya göre belirlenmiştir. Şekil 4.8b'deki son tasarım düzeni kullanılarak işletmeler arasındaki mesafeleri hesaplanmıştır. İşletmeler arasında ring yolları olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 4.9. ES ağını optimize etmek için ağ tasarımı ve akış verileri

Çizelge 4.7'de görülen mesafeler, son yerleşim düzeni ve tesislerin kapladığı alan dikkate alınarak hesaplanmıştır. Yakın fiziksel mesafenin, değişim süreçlerinde malzeme kaybını en aza indirdiği, nakliye maliyetlerini ve işletme maliyetlerini azalttığı bilinmektedir (Carr, 1998). Bu tasarım ile işletmeler için ekonomik kazanımlar sağlayabileceğini söylemek mümkündür.

Çizelge 4.7. Tesisler arası mesafe matrisi (km)

	KA	KB	PA	PB	Y	L	K	PE	S	O
KA	-	6,0	5,0	9,0	6,5	4,5	6,0	4,0	5,0	7,0
KB		-	1,0	3,0	10,0	6,0	8,5	2,0	7,0	3,0
PA			-	4,0	7,0	5,0	7,5	3,5	6,0	2,0
PB				-	7,0	9,0	9,0	5,0	8,0	6,5
Y					-	2,0	2,0	6,0	1,0	12,5
L						-	2,0	4,0	1,0	9,0
K							-	6,0	1,0	11,0
PE								-	5,0	5,0
S									-	9,0
O										-

4.4. Tasarlanan ES Ağı için Geliştirilen Çok Amaçlı Çok Dönemli Model

Önerilen model, tasarlanan ES ağında elde edilebilecek ekonomik ve çevresel faydaları analiz etmek için kullanılmıştır. Modelin amacı, EEP'deki işletmelerin toplam üretim maliyetini en azlarken ve CO₂ emisyonlarını da en aza indirmektir. Geliştirilen çok amaçlı matematiksel model için aşağıdaki notasyonlar kullanılmıştır;

Kümeler

I	İşletmeler (tesisler, fabrikalar) kümesi (su, gübre ve pelet tesisi hariç) ($i, j \in I$)
K	yan ürün tipleri kümesi ($k, n \in K$)
T	zaman periyodu kümesi ($t \in T$)

Parametreler

D_{it}	i . işletmenin t . dönemdeki talep miktarı (ton)
$w_{ik}^{rm,bp}$	i . işletmede son ürün üretimde ortaya çıkan k . tip yan ürün miktarının ağırlığı
$w_i^{rm,fp}$	i . işletmede hammaddenin son ürüne dönüşme ağırlığı
$w_{ik}^{bp,fp}$	i . işletmenin k . tip yan ürünün son ürüne dönüşme ağırlığı
w_i^{bp,CO_2}	i . işletmede her ton yan ürün kullanımında salınan CO ₂ emisyon miktarı
w_i^{rm,CO_2}	i . işletmede her ton hammadde kullanımında salınan CO ₂ emisyon miktarı
w^{fert,CO_2}	her ton organik gübre üretiminde salınan CO ₂ emisyon miktarı
w^{tran,CO_2}	her ton malzeme taşımada salınan CO ₂ emisyon miktarı
w^{p,CO_2}	her ton pelet kullanımında salınan CO ₂ emisyon miktarı
w^{fuel,CO_2}	her ton fuel-oil kullanımında salınan CO ₂ emisyon miktarı
w^{pel,CO_2}	her ton pelet üretiminde salınan CO ₂ emisyon miktarı
w^{water,CO_2}	her ton su arıtıldığında salınan CO ₂ emisyon miktarı
w_i^{water}	i . işletmede her ton son ürün üretmek gerekli su miktarı ağırlığı
$w_i^{fp,wwater}$	i . işletmede her ton son ürün üretiminde ortaya çıkan atık su miktarı ağırlığı
$w^{bp,pel}$	yan ürünün pelete dönüşüm ağırlığı
$w_i^{fp,heat}$	i . işletmede her ton son ürün üretmek gerekli ısı miktarı ağırlığı
$w^{pel,heat}$	peletin dönüşüm ağırlığı ısıya dönüşüm ağırlığı
$w_i^{pel,ash}$	i . işletmede her pelet kullanımında ortaya çıkan kül miktarı ağırlığı
$w_i^{fuel,heat}$	fuel-oilin dönüşüm ağırlığı ısıya dönüşüm ağırlığı
$w^{water,tre}$	her ton atık sudan elde edilen temizlenmiş su miktarı ağırlığı
$w^{water,fslu}$	su arıtma tesisinde her ton su arıtıldığında ortaya çıkan lif çamuru miktarı
$w^{fert,ash}$	her ton organik gübre üretimi için gerekli olan kül miktarı
$w^{fert,rm}$	her ton organik gübre üretmek için gereken hammadde miktarı
$w^{fert,bp}$	her ton organik gübre üretmek için gereken yan ürün miktarı
$w^{fert,fsludge}$	her ton organik gübre üretimi için gerekli olan lif çamuru miktarı
$a_i^{e,rm}$	i . işletmede hammadde işleme sürecinde kullanılan elektrik enerjisi miktarı
$a_i^{e,bp}$	i . işletmede yan ürün işleme sürecinde kullanılan elektrik enerjisi miktarı
$a^{e,fert}$	organik gübre tesisinde her ton gübre üretmek için gerekli enerjisi miktarı
$a^{e,pel}$	pelet tesisinde her ton pelet üretmek için gerekli elektrik enerjisi miktarı
$a^{e,water}$	su arıtma tesisinde her ton su arıtmak için gerekli elektrik enerjisi miktarı
C^{rm}	hammadde birim maliyeti
$C_k^{bp,l}$	Park içinden alınan k . tip yan ürün birim maliyeti

$C_k^{bp,O}$	Park dışından alınan k . tip yan ürün birim maliyeti
C^{tran}	her ton malzeme taşıma maliyeti
$C^{e,l}$	park içinde kullanılan elektrik enerjisi birim maliyeti
$C^{fre,water}$	kullanılan taze su birim maliyeti
$C^{tre,water}$	park içinde kullanılan arıtılmış su birim maliyeti
C^{pel}	park içinde üretilen pelet birim maliyeti
C^{fuel}	fuel-oil birim maliyeti
C^{dis}	her ton atık için bertaraf maliyet
$C^{rm,fert}$	organik gübre tesisi için hammadde birim maliyeti
$C^{bp,O,fert}$	organik gübre tesisi için park dışından alınan yan ürün birim maliyeti
D_t^{fert}	organik gübre tesisinin t . dönemdeki talep miktarı
d_{ij}	i . işletme ile j . işletme arası mesafe (km)
d	i . işletme ile park dışındaki tedarikçiler arası mesafe (km)
$d_{i,pel}$	i . işletme ile <i>pelet tesisi</i> arası mesafe (km)
$d_{i,fert}$	i . işletme ile <i>organik gübre tesisi</i> arası mesafe (km)
$d_{fert,water}$	<i>organik gübre tesisi</i> ile <i>su arıtma tesisi</i> arası mesafe (km)
θ_i	i . işletme tarafından hammaddeye oranla en fazla kullanılabilen yan ürün (%)
Karar Değişkenleri	
Q_{it}^{rm}	t . dönemde i . işletmede son ürün üretmek için gerekli hammadde miktarı (ton)
$Q_{jkt}^{bp,l}$	t . dönemde i . işletme tarafından j . işletmeden alınan k . tip yan ürün miktarı (ton)
$Q_{ikt}^{bp,BO}$	t . dönemde i . işletme tarafından park dışından alınan k . tip yan ürün miktarı (ton)
$Q_{ijkt}^{bp,l}$	t . dönemde i . işletme tarafından j . işletmeye satılan k . tip yan ürün miktarı (ton)
$Q_{ikt}^{bp,O}$	t . dönemde i . işletme tarafından park dışına satılan k . tip yan ürün miktarı (ton)
$Q_{ikt}^{bp,B}$	t . dönemde i . işletme tarafından alınan k . tip yan ürün miktarı (ton)
$Q_{ikt}^{bp,pel}$	t . dönemde pelet tesisi tarafından i . işletmeden alınan k . tip yan ürün miktarı (ton)
$Q_{kt}^{bpO,pel}$	t . dönemde pelet tesisi tarafından park dışından alınan k . tip yan ürün miktarı (ton)
Q_{it}^{pel}	t . dönemde pelet tesisi tarafından i . işletmeye satılan pelet miktarı (ton)
$Q_t^{pel,O}$	t . dönemde pelet tesisi tarafından park dışına satılan pelet miktarı (ton)
Q_{it}^{fuel}	t . dönemde i . işletme tarafından alınan fuel-oil miktarı (ton)
$Q_t^{pel,total}$	t . dönemde pelet tesisi tarafından üretilen toplam pelet miktarı (ton)
$Q_t^{fert,total}$	t . dönemde organik gübre tesisi tarafından üretilen toplam gübre miktarı (ton)
$Q_{kt}^{bp,fert}$	t . dönemde organik gübre tesisi tarafından i . işletmeden alınan k . tip yan ürün miktarı (ton)
$Q_{kt}^{bp,O,fert}$	t . dönemde organik gübre tesisi tarafından park dışından alınan k . tip yan ürün miktarı (ton)
$water_t^{tre,total}$	t . dönemde su arıtma tesisi tarafından arıtılan toplam su miktarı (ton)
$water_{it}^{tre}$	t . dönemde su arıtma tesisi tarafından i . işletmeye satılan arıtılmış su miktarı (ton)
$water_{it}^{rwas}$	t . dönemde i . işletme tarafından su arıtma tesisine gönderilen atık su miktarı (ton)
$water_{it}^{fre}$	t . dönemde i . işletme tarafından kullanılan taze su miktarı (ton)
ash_{it}^{fert}	t . dönemde i . işletme tarafından gübre tesisine gönderilen kül miktarı (ton)
$ash_{it}^{O,fert}$	t . dönemde gübre tesisi tarafından park dışından alınan kül miktarı (ton)
ash_{it}^{dis}	t . dönemde i . işletme tarafından bertarafa gönderilen kül miktarı (ton)
$fsludge_t^{fert}$	t . dönemde su arıtma tesisi tarafından gübre tesisine gönderilen lif çamuru miktarı (ton)
$fsludge_t^{O,fert}$	t . dönemde gübre tesisi tarafından park dışından alınan çamur miktarı (ton)
$fsludge_t^{dis}$	t . dönemde i . işletme tarafından bertarafa gönderilen lif çamuru miktarı (ton)
$Q_t^{rm,fert}$	t . dönemde gübre tesisi için gerekli hammadde (turf, kum vb.) miktarı (ton)

Birinci amaç fonksiyonun ilk kısmı Eş. (4.1) kereste, kontrplak, yongalevha, liflevha ve kağıt ve kağıt hamuru tesislerinin toplam üretim maliyetini enazlamayı amaçlar. Eş (4.1a), hammadde için satın alma, nakliye ve enerji maliyetlerini temsil etmektedir. Eş. (4.1b), EEP içinde elde edilen yan ürün için satın alma, nakliye ve enerji maliyetini ifade etmektedir. Eş (4.1c), EEP dışında elde edilen yan ürün için satın alma, nakliye ve enerji maliyetini göstermektedir. Öte yandan, Eş. (4.1d), pelet ve akaryakıt maliyetini temsil etmektedir. Eş (4.1e) taze ve arıtılmış su maliyetini temsil etmektedir. Eş. (4.1f), atık külün bertaraf maliyetini temsil etmektedir. Eş (4.1g), EEP içinde satılan yan ürünlerin satış gelirlerini göstermektedir. Eş. (4.1h) ise EEP dışına satılan yan ürünlerin satış gelirini temsil etmektedir.

$$f_{ECO}^{plants} = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (Q_{it}^{rm} (C_{it}^{rm} + C^{tran} d + C^{e,I} a_i^{e,rm})) \quad (4.1a)$$

$$+ \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} Q_{jikt}^{bp,I} (C_k^{bp,I} + C^{tran} d_{ij} + C^{e,I} a_i^{e,bp}) \quad (4.1b)$$

$$+ \sum_{k \in K} Q_{ikt}^{bp,BO} (C_k^{bp,O} + C^{tran} d + C^{e,I} a_i^{e,bp}) \quad (4.1c)$$

$$+ C^{pel} Q_{it}^{pel} + C^{fuel} Q_{it}^{fuel} \quad (4.1d)$$

$$+ (C^{fre,water} water_{it}^{fre} + C^{tre,water} water_{it}^{tre}) \quad (4.1e)$$

$$+ ash_{it}^{dis} C^{dis} \quad (4.1f)$$

$$- \sum_{j \in I} \sum_{n \in K} (Q_{ijkt}^{bp,I} + Q_{ikt}^{bp,pellet} + Q_{ikt}^{bp,fert}) C_n^{bp,I} \quad (4.1g)$$

$$- \sum_{n \in K} Q_{int}^{bp,O} C_n^{bp,O} \quad (4.1h)$$

Birinci amaç fonksiyonun ikinci kısmı Eş. (4.2), pelet tesisinin toplam üretim maliyetini ifade etmektedir. Burada EEP içinden Eş. (4.2a) ve EEP dışından Eş. (4.2b) elde edilen yan ürün için satın alma, nakliye ve enerji maliyetini göstermektedir.

$$f_{ECO}^{pel} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} Q_{ikt}^{bp,pellet} (C_k^{bp,I} + C^{tran} d_{i,pel} + C^{e,I} a_i^{e,pel}) \quad (4.2a)$$

$$+ \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} Q_{kt}^{bp,O,pellet} (C_k^{bp,O} + C^{tran} d + C^{e,I} a_i^{e,pel}) \quad (4.2b)$$

Birinci amaç fonksiyonun üçüncü kısmı Eş. (4.3), su arıtma tesisiyle ilgili maliyetlerini ifade etmektedir. Atık su arıtma için gerekli enerji ve lif çamuru bertaraf maliyetlerini içermektedir.

$$f_{ECO}^{water} = \sum_{t \in T} (water_t^{treatment} C_{e,l}^{e,water} + fsludge_t^{als} C_{als}^{als}) \quad (4.3)$$

Birinci amaç fonksiyonun son kısmı ise Eş. (4.4), organik gübre tesisinin toplam üretim maliyetlerini temsil etmektedir. Bunlar organik gübre üretmek için EEP'in içinden ve dışından hammadde, yan ürünler ve atıkların satın alınması Eş (4.4a), Eş (4.4b), taşınması ve enerji maliyetlerini Eş (4.4c) içerir.

$$f_{ECO}^{fert} = \sum_{t \in T} Q_t^{fert,total} C_{e,l}^{e,fert} + Q_t^{rm,fert} (C_{rm,fert} + C^{trand}) \quad (4.4a)$$

$$+ (\sum_{t \in T} ash_t^{Ofert} fsludge^{Ofert}) (C_{bp,Ofert} + C^{trand}) \quad (4.4b)$$

$$+ (\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} ash_{it}^{Ofert} fsludge^{fert}) C_{i,fer}^{trand} \quad (4.4c)$$

$$+ (\sum_{i \in I} fsludge^{Ofert}) C_{wat,fer}^{trand}$$

Sonuç olarak, Eş. (4.5)'de gösterilen birinci amaç fonksiyonu elde edilir.

$$f_{ECO} = f_{ECO}^{plants} + f_{ECO}^{pel} + f_{ECO}^{fert} + f_{ECO}^{water} \quad (4.5)$$

İkinci amaç fonksiyonu ise, Eş. (4.6) EEP'deki üretimden kaynaklı CO₂ emisyonunu en aza indirmeyi hedeflemektedir. Eş. (4.6a), hammadde kullanımı ve taşımadan kaynaklanan CO₂ emisyon miktarını ifade ederken, Eş. (4.6b), yan ürünlerin EEP'de kullanımı ve taşınmasından kaynaklanan CO₂ emisyon miktarını ifade etmektedir. Eş. (4.6c), EEP dışından elde edilen yan ürünlerin kullanılması ve taşınmasından kaynaklanan CO₂ emisyon miktarını ifade eder. Eş. (4. 6d), üretim esnasında ısı elde etmek için pelet ve fuel-oil kullanımından kaynaklanan CO₂ emisyonu miktarını göstermektedir. Eş. (4.6e), organik gübre tesisinde gübre üretilmesinden kaynaklanan CO₂ emisyon miktarını, Eş. (4.6f), pelet tesisinde pelet üretilmesinden kaynaklanan

CO₂ emisyonu miktarını, Eş. (4.6g), su arıtma tesisinde suyun arıtılmasından kaynaklanan CO₂ emisyon miktarını ifade etmektedir.

$$f_{CO_2} = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} Q_{it}^{rm} (w_i^{rm,CO_2} + w^{tran,CO_2} d) \quad (4.6a)$$

$$+ \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} Q_{jikt}^{bp,I} (w_{ikt}^{bp,CO_2} + w^{tran,CO_2} d_{ij}) \quad (4.6b)$$

$$+ \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} Q_{ikt}^{bp,BO} (w_i^{bp,CO_2} + w^{tran,CO_2} d) \quad (4.6c)$$

$$+ \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (Q_{it}^{pel} w_{it}^{pel,CO_2} + Q_{it}^{fuel} w_{it}^{fuel,CO_2}) \quad (4.6d)$$

$$+ w^{fert,CO_2} \sum_{t \in T} Q_t^{fert,total} \quad (4.6e)$$

$$+ w^{pelet,CO_2} \sum_{t \in T} Q_t^{fel,total} \quad (4.6f)$$

$$+ w^{water,CO_2} \sum_{t \in T} water_t^{tre,total} \quad (4.6g)$$

İlk kısıt Eş. (4.7) son ürün talebinin karşılaması gerektiğini göstermektedir. Eş. (4.7)'nin sol tarafı üretilen son ürün miktarını göstermektedir. Bilindiği gibi son ürün üretmek için hammadde veya yan ürün kullanılabilir.

$$w_i^{rm,jp} Q_{it}^{rm} + w_i^{vp,jp} \sum_{k \in K} Q_{ikt}^{vp,B} \geq D_{it}, \quad i \in I, t \in T \quad (4.7)$$

Kısıt Eş. (4.8) göre, *i*. tesis yan ürün ihtiyacını EEP içinden ya da EEP dışından karşılayabilir.

$$Q_{ikt}^{bp,B} = Q_{ikt}^{bp,BO} + \sum_{j \in I} Q_{jikt}^{bp,I}, \quad i, j \in I, k \in K, t \in T \quad (4.8)$$

Kısıt Eş. (4.9), yan ürünlerin hammadde kullanımına bağlı olarak ortaya çıktığını göstermektedir. Her tesiste kullanılan hammaddeye göre farklı tipte ve farklı miktarda yan ürün ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan yan ürünler EEP içindeki başka bir *j*. tesise ya da pelet ve gübre tesisine satılması mümkündür. EEP dışındaki bir tesise de satılabilir.

$$w_{ik}^{rm,bp} Q_{it}^{rm} \leq Q_{ik(t+1)}^{bp,O} + Q_{ik(t+1)}^{bp,pellet} + Q_{ik(t+1)}^{bp,fert} + \sum_{j \in I} Q_{ik(t+1)}^{bp,j}, \quad i \in I, k \in K, t \in T \quad (4.9)$$

Kısıt Eş. (4.10), üretimde girdi olarak kullanılan yan ürün miktarının, kullanılan hammadde miktarının yüzde θ_i 'sinden fazla olamayacağını garanti etmektedir. Çünkü her tesis için yan ürün kullanımının bir üst limiti vardır.

$$\sum_{k \in K} Q_{ikt}^{bp,B} \geq \theta_i Q_{it}^{rm}, \quad i \in I, t \in T \quad (4.10)$$

Kısıt Eş. (4.11), tesis i 'nin son ürünü üretmek için ihtiyaç duyduğu ısı enerjisini pelet veya fuel-oilden karşılayabileceğini göstermektedir.

$$w_i^{fuel,neu} (Q_{it}^{rm} + \sum_{k \in K} Q_{ikt}^{bp,B}) \leq w^{fuel,heat} Q_{it}^{fuel} + w^{pel,heat} Q_{it}^{pel}, \quad i \in I, t \in T \quad (4.11)$$

Kısıt Eş. (4.12), üretilecek pelet miktarının pelet talebi karşılaması gerektiğini göstermektedir. Bu kısıtın sol tarafı ise üretilen pelet miktarını ($Q_t^{pel,total}$) göstermektedir. Eş. (4.13) ise bir sonraki dönemde satılacak pelet miktarı (i tesise veya park dışındaki tesislere) üretilen miktardan fazla olamayacağını garanti altına almaktadır.

$$w^{bp,pel} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (Q_{ikt}^{bp,pellet} + Q_{ikt}^{bp,O,pellet}) \geq D_t^{pel}, \quad t \in T \quad (4.12)$$

$$\sum_{i \in I} Q_{i(t+1)}^{pel} + Q_{(t+1)}^{pel,O} \leq Q_t^{pel,total}, \quad t \in T \quad (4.13)$$

Kısıt Eş. (4.14), ısı elde etmek için i . tesiste pelet kullanıldığında ortaya çıkan külün organik gübre tesisi tarafından kullanılabilirliğini veya bertaraf edilmesi gerektiğini ifade etmektedir.

$$w^{pel,ash} Q_{it}^{pel} = ash_{i(t+1)}^{pel,fert} + ash_{i(t+1)}^{pel,ais}, \quad i \in I, t \in T \quad (4.14)$$

Kısıt Eş. (4.15), i . tesiste son ürün üretiminde ortaya çıkan atık su miktarını göstermektedir.

$$w^{fp,wwater} (Q_{it}^{rm} + \sum_{k \in K} Q_{ikt}^{bp,B}) = water_{i(t+1)}^{was}, \quad i \in I, t \in T \quad (4.15)$$

Kısıt Eş. (4.16), park içindeki tesislerde ortaya çıkan atık suyun belirli bir kısmı, su arıtma tesisinde arıtılır. Su arıtma tesisinin kapasitesi işletmelerden gelen suya bağlı olarak sınırsız olarak kabul edilmiştir. Kısıt Eş. (4.17) ise, park içindeki fabrikalar tarafından satın alınan arıtılmış su miktarının toplam arıtılmış su miktarından fazla olamayacağını göstermektedir.

$$w^{waste,tre} \sum_{i \in I} water_{i(t+1)}^{was} = water_{(t+1)}^{tre,total}, \quad t \in T \quad (4.16)$$

$$\sum_{i \in I} water_{i(t+1)}^{tre} \leq water_{(t+1)}^{tre,total}, \quad t \in T \quad (4.17)$$

Kısıt Eş. (4.18) göre her tesis üretim için su ihtiyacını taze su veya arıtılmış sudan karşılayabilir.

$$w_i^{water} (Q_{it}^{rm} + \sum_{k \in K} Q_{ikt}^{bp,B}) \leq water_{it}^{tre} + water_{it}^{fre}, \quad i \in I, t \in T \quad (4.18)$$

Kısıt Eş. (4.19), atık su tesisinde ortaya çıkan lif çamurunun organik gübre tesisinde kullanılabileceğini ya da bertaraf edilmesi gerektiğini ifade etmektedir.

$$w^{water,fsludge} \sum_{i \in I} water_{it}^{was} = fsludge_t^{fert} + fsludge_t^{dis}, \quad t \in T \quad (4.19)$$

Kısıt Eş. (4.20) üretilen organik gübre miktarının gübre talebini karşılaması gerektiğini göstermektedir. Kısıt Eş. (4.21) ise gübre üretmek için gerekli olan hammadde miktarını ifade etmektedir. Kısıt Eş. (4.22), gübre üretim için gerekli olan yan ürün miktarının park içinde veya dışında elde edilebileceğini göstermektedir. Kısıt Eş. (4.23), üretim için gerekli olan çamur miktarının park içinde veya dışında elde edilebildiğini göstermektedir. Son olarak kısıt Eş. (4.24) ise, gübre üretimi için gerekli külün EEP'deki pelet kullanan işletmelerden ya da EEP dışındaki tedarikçilerden elde edilebileceğini göstermektedir.

$$Q_t^{fert,total} \geq D_t^{fert}, \quad t \in T \quad (4.20)$$

$$w^{fert,rm} Q_t^{fert,total} = Q_t^{rm,fert}, \quad t \in T \quad (4.21)$$

$$w^{fert,bp} Q_t^{fert,total} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} Q_{ikt}^{bp,fert} + \sum_{k \in K} Q_{kt}^{bp,Ofert}, \quad t \in T \quad (4.22)$$

$$w^{fert,sludge} Q_t^{fert,total} = fsludge_t^{fert} + fsludge_t^{Ofert}, \quad t \in T \quad (4.23)$$

$$w^{fert,ash} Q_t^{fert,total} = ash_t^{pel,Ofert} + \sum_{i \in I} ash_{it}^{pel,fert}, \quad t \in T \quad (4.24)$$

İlk dönemde aşağıda Eş. (4.25) verilen karar değişkenleri sıfır olarak belirlenmiştir, çünkü tesislerde üretim sonucunda ortaya çıkan yan ürünler, atık, pelet ve arıtma suyu ilk dönemin sonunda ortaya çıkmakta ve ikinci dönem kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} & Q_{jik1}^{vp,i}, Q_{ik1}^{vp,o}, Q_{ik1}^{vp,pellet}, Q_{ik1}^{vp,feri}, Q_{i1}^{pel}, ash_{i1}^{feri}, ash_{i1}^{als}, water_{i1}^{tre}, \\ & water_{i1}^{was}, fsludge_1^{fert}, fsludge_1^{dis} = 0, \quad i, j \in I, k \in K, t \in T \end{aligned} \quad (4.25)$$

Son olarak, kullanılan karar değişkenleri Eş. (4.26)'de sunulmuştur.

$$\begin{aligned} & Q_{it}^{rm}, Q_{jikt}^{bp,I}, Q_{ikt}^{bp,BO}, Q_{ijkt}^{bp,I}, Q_{ikt}^{bp,O}, Q_{ikt}^{bp,B}, Q_{ikt}^{bp,pellet}, Q_{kt}^{bpO,pellet}, Q_{it}^{pel}, \\ & Q_t^{pel,O}, Q_{it}^{fuel}, Q_t^{pel,total}, Q_t^{fert,total}, Q_{kt}^{bp,Ofert}, Q_{ikt}^{bp,fert}, water_t^{tre,total}, \\ & water_{it}^{tre}, water_{it}^{was}, water_{it}^{fre}, ash_{it}^{fert}, ash_{it}^{O,fert}, ash_{it}^{dis}, fsludge_t^{fert}, \\ & fsludge_t^{O,fert}, fsludge_t^{dis}, Q_t^{rm,fert} \geq 0 \quad i, j \in I, k \in K, t \in T. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Tanıtilan model çok dönemli çok amaçlı doğrusal programlama modelidir. Modelin çözümü için literatürdeki çözüm yaklaşımları incelenmiş ve ağırlıklı toplam yöntemini ile ϵ -kısıt yöntemi kullanılmıştır. Bir sonraki bölümde, çok amaçlı optimizasyon ve kullanılan çözüm yöntemlerinden bahsedilmiştir.

4.4.1. Çok amaçlı optimizasyon

Optimizasyon problemleri ele alınan amaç fonksiyonun sayısına göre tek amaçlı optimizasyon problemi ve çok amaçlı optimizasyon olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Tek amaçlı tek bir amaç fonksiyonu içerirken çok amaçlı modeller birden fazla çelişkili amacın eşzamanlı olarak optimize edilmesi gerektiği modellerdir.

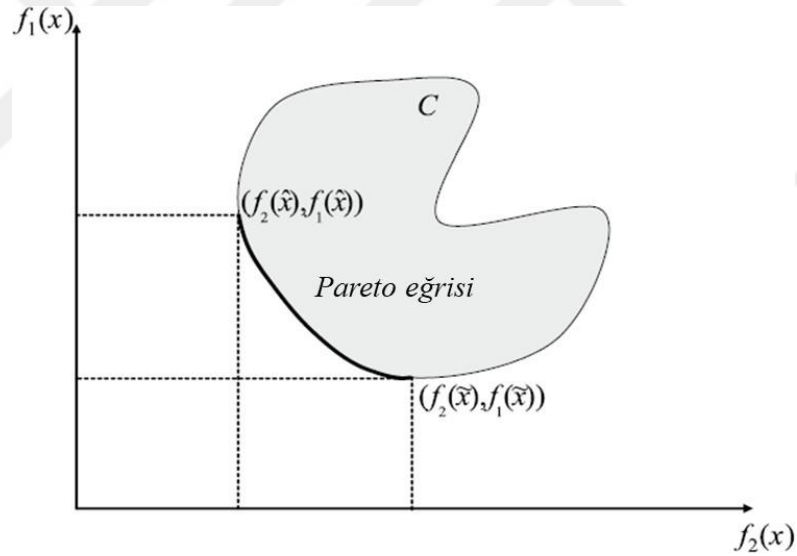
Çok amaçlı optimizasyon problemi, Eş (4.27)'deki matematiksel model olarak ifade edilebilir (Cui vd. 2017);

$$\begin{aligned} f(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T \\ \text{s.t.} \\ g_l(x) &\leq 0, (l = 1, 2, \dots, p) \\ h_k(x) &= 0, (k = 1, 2, \dots, q) \\ x_i^{min} &\leq x_i \leq x_i^{max}, (i = 1, 2, \dots, n) \\ x &= [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \Theta \\ y &= [y_1, y_2, \dots, y_n]^T \in \Psi, \end{aligned} \quad (4.27)$$

burada, m optimize edilecek amaç fonksiyonlarının sayısıdır, p eşitsizlik kısıtları sayısını ve q eşitlik kısıtları sayısını gösterir. Θ , n boyutlu bir arama alanıdır ve karar değişkenleri x_i , bir üst sınır $x^{max} = [x_1^{max}, x_2^{max}, \dots, x_n^{max}]^T$ ve alt sınır $x^{min} = [x_1^{min}, x_2^{min}, \dots, x_n^{min}]^T$ arasında değerler alır. Ψ , amaç fonksiyonlarının m boyutlu vektör uzayıdır ve Θ amaç fonksiyonu $f_j(x)$, ($j = 1, 2, \dots, m$) ile belirlenir.

Çok amaçlı optimizasyon problemleri birden çok amaç içerdiği için her amacı eniyileyen bir çözüm bulmak güçtür. Ele alınan bir amaç fonksiyonunu iyileştiren bir çözüm, başka bir amaç fonksiyonu kötüleştirebilir. Bu nedenle, çok amaçlı bir problem için tüm amaç fonksiyonlarını karşılayan bir optimal çözüm aramak zordur (Marler ve Arora, 2004). Bu durumda, amaç fonksiyonları için bir dizi uzlaşık çözüm bulunur. Koopmans (1951), amaçların birinin diğer amaçların en az bir tanesinde olumsuzluk yaratmadan iyileştirilemediği amaç vektörlerini içeren bu kümeyi Pareto çözüm seti olarak adlandırmıştır.

S kısıt kümesinin elemanı x^* noktasının $f_j(x) \leq f_j(x^*)$ koşulunun sağlanması halinde x^* noktası kesin Pareto optimum veya kesin etkin çözüm olarak adlandırılır. Çok amaçlı bir problem için S kısıt kümesinin bir elemanı olan x^* noktası için $f_j(x) < f_j(x^*)$ olacak şekilde S kısıt kümesinin hiçbir elemanı bulunmaz ise o zaman x^* zayıf Pareto optimum veya zayıf etkin çözüm olarak tanımlanır. Bütün etkin çözümlerin oluşturduğu kümenin görüntüsü Pareto yüzeyi veya eğrisi olarak isimlendirilir. Pareto yüzeyinin şekli farklı amaç fonksiyonları arasında ödünleşme/uzlaşma yapısını göstermektedir. Şekil 4.10'da $f_2(\tilde{x})$, $f_1(\tilde{x})$ ve $f_2(\bar{x})$, $f_1(\bar{x})$ noktaları arasındaki bütün noktalar Pareto eğrisini oluşturmaktadır. Bu noktalar baskın olmayan noktalar olarak adlandırılırlar. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde Pareto yüzeyi birçok durumda verimli bir şekilde hesaplanamayabilir. Tüm bu noktaları tam olarak bulmak teorik olarak mümkün olsa bile, bunlar genellikle üstel boyuttadır ve hesaplanması NP zordur (Caramia ve Dell'Olmo, 2020).



Şekil 4.10. Örnek Pareto Eğrisi (Caramia ve Dell'Olmo, 2020)

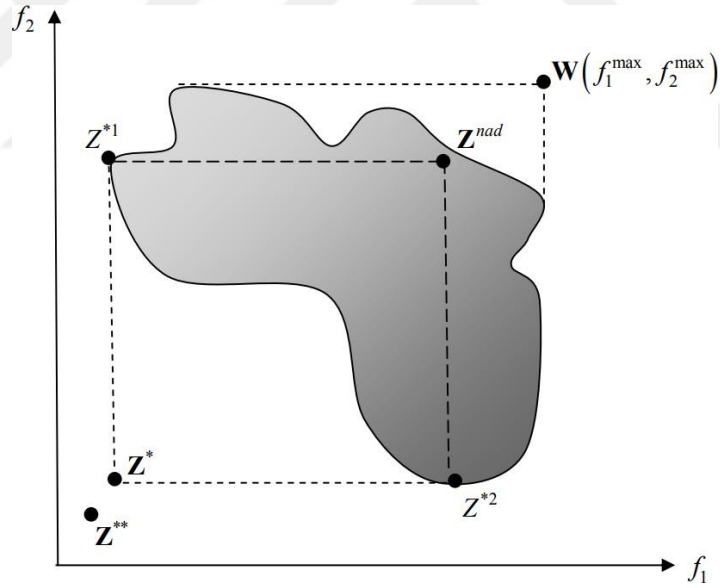
Çok amaçlı optimizasyon algoritmalarında sıklıkla kullanılan bazı tanımlar şunlardır (Deb, 2001);

İdeal Amaç Vektörü: Eş (4.27)'deki çok amaçlı modelde çelişen m amaç fonksiyonunun her biri için farklı bir optimal çözüm vardır. Bireysel optimal amaç değerleriyle oluşturulan bu çözüm vektörüne, ideal amaç vektörü denir. İdeal amaç

vektörü Z^{**} 'in j 'inci bileşeni, Eş (4.27)'deki problemin S kısıt kümesi için minimizasyon çözümüdür (Deb 2001).

Genel olarak ideal amaç vektörü, gerçekte var olmayan bir çözüme karşılık gelir. Bunun nedeni, her bir amaç fonksiyonu için minimum çözümünün aynı çözüm olmasından kaynaklanır. İdeal amaç vektörünün uygun bir çözüme karşılık geldiği tek durum, tüm amaç fonksiyonlarının minimum çözümlerinin aynı olduğu zamandır. Bu durumda, hedefler birbiriyle çelişmez ve herhangi bir amaç fonksiyonunun minimum çözümü çok amaçlı optimizasyon için tek optimal çözüm olacaktır.

Şekil 4.11'de $\min\{f_1, f_2\}$ iki amaçlı bir problemin ideal amaç vektörü Z^* ile gösterilmiştir. Pareto optimal çözümleri bulmaya çalışan çoğu algoritmada, ideal amaç vektörü referans çözüm olarak kullanılır. İdeal amaç vektörüne daha yakın olan çözümlerin daha iyi olduğu Şekil 4.11' de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.11. İdeal (Z^*), ütopik (Z^{**}) ve nadir (Z^{nad}) amaç vektörleri (Deb 2001)

Ütopik Amaç Vektörü: İdeal amaç vektörü, tüm amaç fonksiyonlarının alt sınırının bir dizisini belirtir. Bazı algoritmalar, arama uzayında amaç fonksiyonundan daha iyi çözüm veren çözümlere ulaşmak isterler. Ütopik amaç vektörü, her bir bileşeni ideal amaç vektörünün ilgili elemanından daha küçük değer alan amaç fonksiyonlarının

oluşturduğu vektördür (Türksen, 2011). Ütopik amaç vektörü Şekil 4.11’de Z^{**} ile gösterilmiştir ve $Z^{**} = Z^* - \omega_i$, $\omega_i > 0$, $i = 1, 2 \dots I$ olarak tanımlanır.

Nadir Amaç Vektörü: Tüm uygun arama uzayında her bir amaç fonksiyonunun alt sınırını temsil eden ideal amaç vektörünün aksine, nadir amaç vektörü, Z^{nad} , tüm arama uzayında değil, tüm Pareto optimal kümesindeki her bir amacın üst sınırını temsil eder. Nadir amaç vektörü, arama uzayında mümkün olan en kötü amaç fonksiyon değerleri olan f_j^{max} kullanılarak bulunan W amaç vektörü ile karıştırılmamalıdır (Deb 2001).

İdeal amaç vektörün hesaplanması kolay olmasına rağmen, nadir amaç vektörün pratikte hesaplanması zordur. Pareto optimal bölgesinde bulunan her amaç fonksiyonlarını normalleştirmek için, nadir ve ideal amaç vektörlerinden faydalanılır. Z_j^* ve Z_j^{nad} sırasıyla j . amacın f_j amaç fonksiyonunun ideal amaç vektörü ve nadir amaç vektörü değerleri olarak tanımlandığına göre o zaman normalizasyonda amaç fonksiyon değeri f_j^{norm} Eş (4.28)’deki gibi hesaplanabilir (Deb 2001).

$$f_j^{norm} = \frac{f_j - Z_j^*}{Z_j^{nad} - Z_j^*}, j = 1, 2 \dots, m. \quad (4.28)$$

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde öncelikli amaç, etkin çözümler ve/veya Pareto optimal sonuçları bulmak ve karar vericilere nihai tercih yapabilecekleri bir çözüm kümesi sunmaktır. Bu amaçla literatürde en çok kullanılan yöntemler ağırlıklı toplam ve ε -kısıt yöntemleridir. Bu çalışmada kullanılan yöntemler sonraki bölümde açıklanmıştır.

a) Ağırlıklı Toplam Yöntemi

Bu yöntemde çok amaçlı bir problem, genellikle amaç fonksiyonlarının tek bir amaç fonksiyonuna dönüştürülmesiyle çözülür. Bu yaklaşım ağırlıklı toplam (weighted-sum) veya ölçeklendirme (scalarization) yöntemi olarak bilinir. Bu yaklaşımda, m amaç fonksiyonları ($f_1(x)$, $f_2(x)$, ..., $f_m(x)$), buradaki birden çok amaç fonksiyonunun biri her ağırlık faktörü ile çarpılıp ($\lambda_j : \lambda_j > 0, j = 1, 2, \dots, m$) tek amaç fonksiyonunda birleştirilir ($\lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) + \dots + \lambda_m f_m(x)$), burada

$\sum_{j=1}^m \lambda_j = 1$ 'dir. Böylece Eş (4.29)'daki problem elde edilir (Caramia ve Dell'Olmo, 2020);

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{j=1}^m \lambda_j f_j(x) \\
 & \text{s. t. } \sum_{j=1}^m \lambda_j = 1 \\
 & x \in S,
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

Modelin çözülmesi için λ_j değerleri karar verici tarafından belirlenir. Bu tek amaçlı problemin minimize edilmesi sayesinde orijinal çok amaçlı problem için etkin çözümler, yani Pareto optimal çözümler elde edilir.

b) ε -Kısıt Yöntemi

Çok amaçlı optimizasyon için kullanılan diğer bir çözüm tekniği ise, 1983'te Chankong ve Haimes tarafından önerilen ε -kısıt yöntemidir. ε -kısıt yönteminde, amaç fonksiyonlardan biri birincil amaç fonksiyonu seçilir daha sonra diğer amaç fonksiyonu kısıta dönüştürülerek model eklenir. Matematiksel olarak ifade edilirse, en azlanacak $f_1(x)$ ve $f_2(x)$ amaç fonksiyonlarına sahip bir problem ε -kısıt yöntemiyle Eş (4.30)'daki hale getirilir.

$$\begin{aligned}
 & \min f_2(x) \\
 & \text{s. t. } f_1(x) \leq \varepsilon \\
 & x \in S
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Burada $\varepsilon = f'_1 - \Delta$ olarak belirlenir. Δ, f'_1 değerinin ne kadar azaltılacağını ifade eder. Δ değerinin belirlenmesi önemli bir konudur ve genellikle deneme yanılma yoluyla belirlenir. ε -kısıt yönteminin üstünlüğü konveks olmayan Pareto yüzeylerde etkin noktaların belirlenmesidir. Eksik yönü ise amaç fonksiyonlarının sayısı ikiden fazla olduğu durumda etkin bir yöntem olmayışıdır (Caramia ve Dell'Olmo, 2008).

ε -kısıt yönteminin ağırlıklandırma yöntemine göre birçok avantajı vardır (Mavrotas, 2009). Bazıları şunlardır; ağırlık toplam yöntemi, sadece çözüm uzayının uç (extreme)

noktalarında çözümler bulurken ε -kısıt yöntemi ile çözüm uzayının uç noktaları dışında da etkin çözümler üretilebilir. Ağırlıklı toplam yönteminde amaç fonksiyonlarının normalizasyonla ölçeklendirilmesi gerekirken ε -yönteminde bu işleme gerek yoktur. Ayrıca ε -kısıt yönteminde üretilecek etkin çözüm sayısı ε parametresinin ayarlanmasıyla kontrol edilebilir.

Bir sonraki bölümde, bu iki yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

4.4.2. Model Çözüm Sonuçları

Model çok amaçlı olarak çözülmenden önce, modelin her bir amaç fonksiyonunu tek amaçlı olarak çözülmüş ve sonuçlar Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Tek amaçlı modellerin sonucu

Dikkate alınan amaç	Sonuçlar	
	Maliyet (\$)	CO ₂ salınımı (kg)
ECO (\$)	861.742.000	2.059.672
CO ₂ (kg)	864.965.200	2.039.372

Sonuçlar, ele alınan amaçlar arasında bir ödünleşme olduğunu ortaya koymaktadır. Toplam üretim maliyeti en aza indirildiğinde CO₂ emisyonları beklendiği gibi artmaktadır. Probleme ait baskın olmayan çözümler kümesinin bulunması için ilk etapta, kolay kullanımı nedeniyle ağırlıklı toplam yaklaşımını kullanılmıştır. Problemi ölçeklendirmek için normalizasyon da uygulanmıştır.

4.4.2.1. Amaç fonksiyonu ağırlıklarının eşit kabul edilmesi

Önerilen model ilk olarak, ekonomik ve çevresel amaçlara eşit ağırlıklar verilerek ($\lambda_1 = \lambda_2$) ağırlıklı toplam yöntemi ile çözülmüştür. Bir yıl 4 periyota eşit kabul edilmiştir. Her tesis için kullanılan hammadde miktarı, üretilen ve satılan yan ürün miktarı, üretilen atık miktarı, tüketilen taze su ve arıtılmış su, üretilen atık su miktarları ile enerji üretimi için gerekli fuel-oil ve /veya pelet miktarı önerilen çok amaçlı matematiksel model çözümlerle elde edilmiştir.

Kereste fabrikası A ve Kereste fabrikası B sonuçları Çizelge 4.9’da gösterilmektedir. Bu fabrikalarda ortaya çıkan yan ürünler genellikle EEP’deki diğer tesislere

satılmaktadır. Pelet sadece ilk iki dönemde Kereste fabrikası A tarafından kullanılmıştır. Üretim sürecinde ortaya çıkan kül EEP'deki organik gübre tesisinde tüketilir. Üretim maliyeti ilk dönemde en yüksektir. Öte yandan, ağdaki paylaşım arttıkça, toplam maliyette kademeli bir düşüş gözlenmektedir. Kereste fabrikası B için karbon emisyonları sabit olmasına rağmen, daha düşük fuel-oil tüketimi nedeniyle Kereste Fabrikası A için emisyonlarda bir azalma gözlenmektedir.

Çizelge 4.9. Kereste fabrikası için sonuçlar

Veri	Kereste A				Kereste-B			
	Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3	Periyot-4	Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3	Periyot-4
Hammadde kullanımı (ton)	200.000,0	200.000,0	200.000,0	200.000,0	120.000,0	120.000,0	120.000,0	120.000,0
Ortaya çıkan yan ürün (ton)	72.200,0	72.200,0	72.200,0	72.200,0	35.160,0	35.160,0	35.160,0	35.160,0
Park dışına satılan yan ürün (ton)	33.781,0	33.781,0	25.000,0	0	15.000,0	15.000,0	15.000,0	0
EEP'a satılan yan ürün (ton)	38.419,0	38.418,0	47.200,0	0	20.160,0	20.160,0	20.160,0	0
Pelet kullanımı (ton)	0	0	12.456,1	9.976,4	0	0	0	0
Fuel-oil kullanımı (ton)	5.684,6	5.684,6	0	1.131,7	3.410,7	3.410,7	3.410,7	3.410,7
Ortaya çıkan kül (kg)	0	0	213.000,0	170.596,0	0	0	0	0
EEP'a sağlanan kül (kg)	0	0	213.000,0	170.596,0	0	0	0	0
Maliyet (\$)	47.592.800	45.364.130	42.879.130	43.378.230	28.555.680	27.257.830	27.257.830	27.257.830
CO ₂ emisyon (kg)	149.620.000	149.620.000	129.740.000	133.697.700	89.772.000	89.772.000	89.772.000	89.772.000

Kontrplak fabrikalarının sonuçları incelendiğinde, bu fabrikalarda ortaya çıkan yan ürünlerin yaklaşık %75'inin (Çizelge 4.10) EEP'de tüketildiği görülmektedir. Benzer şekilde ortaya çıkan kül de EEP'de tüketilir. Bu fabrikalar, ilk dönem hariç peletten ısı vermekte ve çok az arıtılmış su kullanmaktadırlar.

Çizelge 4.10. Kontrplak fabrikası için sonuçlar

Veri	Kontrplak-A				Kontrplak-B			
	Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3	Periyot-4	Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3	Periyot-4
Hammadde kullanımı(ton)	78.125,0	78.125,0	78.125,0	78.125,0	52.080,3	52.080,3	52.080,3	52.080,3
Ortaya çıkan yan ürün (ton)	26.789,1	26.789,1	26.789,1	26.789,1	15.380,2	15.380,2	15.380,2	15.380,2
Park dışına satılan yan ürün (ton)	6.328,1	6.328,1	6.328,1	0	2.729,2	2.729,2	2.729,2	0
EEP'a satılan yan ürün (ton)	20.460,9	20.460,9	20.460,9	0	12.651,1	12.651,1	12.651,1	0
Pelet kullanımı (ton)	0	4.824,6	4.824,6	4.824,6	0	3.216,4	3.216,4	3.216,4
Fuel-oil kullanımı (ton)	2.201,8	0	0	0	1.467,8	0	0	0
Ortaya çıkan kül (kg)	0	82.500,0	82.500,0	825.000,0	0	55.000,0	55.000,0	55.000,0
EEP'a sağlanan kül (kg)	0	82.500,0	82.500,0	825.000,0	0	55.000,0	55.000,0	55.000,0
Taze su kullanımı (ton)	12.500,0	12.500,0	12.500,0	0	8.333,3	8.333,3	8.333,3	0
Arıtılmış su kullanımı (ton)	0	0	0	12.500,0	0	0	0	8.333,3
Atık su sağlama (ton)	9.375,0	9.375,0	9.375,0	9.375,0	6.250,0	6.250,0	6.250,0	6.250,0
Maliyet (\$)	18.640.440	16.400.910	16.400.910	16.390.530	12.426.96	10.986.060	10.986.06	10.979.140
CO ₂ emisyon (kg)	37.428.120	29.728.120	29.728.120	29.728.120	24.952.08	19.818.750	19.818.75	19.818.750

Yongalevha tesisinde ortaya çıkan yan ürünler (Çizelge 4.11) genellikle EEP dışındaki işletmelere satılmaktadır. Bu tesiste ilk dönemde yan ürünlerinin hepsini park dışından satın alınır. Sonraki dönemlerde ise, yan ürünlerin yaklaşık %45'i EEP'den satın

alınmıştır. İlk dönem hariç, bu fabrika pelet kullanarak tüm ısı enerjisini elde etmiştir. Bu tesiste genellikle taze su tüketilir. Tesis ES'den faydalanmaya başlar başlamaz (ilk dönemden sonra), bu tesisin maliyeti ve karbon emisyon değerleri eş zamanlı düşmüştür.

Çizelge 4.11. Yongalevha tesisi için sonuçlar

Veri	Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3	Periyot-4
Hammadde kullanımı (ton)	207.900,2	207.900,2	207.900,2	207.900,2
Ortaya çıkan yan ürün (ton)	37.422,0	37.422,0	37.422,0	37.422,0
Park dışına satılan yan ürün (ton)	18.939,7	18.939,7	37.422,0	0
Park dışından alınan yan ürün (ton)	62.370,1	35.025,6	35.025,6	35.025,6
EEP'a satılan yan ürün (ton)	18.482,3	18.482,3	0	0
EEP'den alınan yan ürün (ton)	0	27.344,5	27.344,5	27.344,5
Pelet kullanımı (ton)	0	11.047,9	11.047,9	11.047,9
Fuel-oil kullanımı (ton)	5.041,9	0	0	0
Ortaya çıkan kül (kg)	0	188.918,9	188.918,9	188.918,9
EEP'a sağlanan kül (kg)	0	188.918,9	188.918,9	188.918,9
Taze su kullanımı (ton)	4.054,1	4.054,1	0	4.054,1
Arıtılmış su kullanımı (ton)	0	0	4.054,1	0
Maliyet (\$)	57.414.940	52.276.640	52.272.950	52.267.080
CO ₂ emisyon (kg)	96.521.000	78.825.470	78.825.340	78.825.340

Liflevha tesisi (Çizelge 4.12) yan ürünlerini ilk dönem dışında genellikle EEP'den elde etmiştir. Bu tesis genellikle ısı elde etmek için fuel-oil yerine pelet tüketmektedir. Bu da emisyonlarda önemli bir azalma anlamına gelmektedir. Liflevha tesisi, arıtılmış suyun kullanıldığı tesislerden biridir. Ayrıca bu tesiste ortaya çıkan tüm kül, EEP içinde bulunan organik gübre tesisine satılmaktadır. Ağdaki çoğu tesis gibi, bu tesisin maliyetleri ve karbon emisyonları ilk dönemi takip eden dönemlerde daha düşüktür.

Çizelge 4.12. Liflevha tesisi için sonuçlar

Veri	Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3	Periyot-4
Hammadde kullanımı (ton)	165.837,5	165.837,5	165.837,5	165.837,5
Ortaya çıkan yan ürün (ton)	41.956,9	41.956,9	41.956,9	41.956,9
Park dışına satılan yan ürün (ton)	13.764,5	13.764,5	26.062,4	0
Park dışından alınan yan ürün (ton)	58.043,1	0	0	0
EEP'a satılan yan ürün (ton)	28.192,4	28.192,4	15.894,4	0
EEP'den alınan yan ürün (ton)	0	58.043,1	58.043,1	58.043,1
Pelet kullanımı (ton)	0	10.911,2	18.455,0	20.934,8
Fuel-oil kullanımı (ton)	9.553,9	4.574,4	1.131,7	0
Ortaya çıkan kül (kg)	0	186.581,0	315.581,0	357.985,0
EEP'a sağlanan kül (kg)	0	186.581,0	315.581,0	357.985,0
Taze su kullanımı (ton)	208.209,0	208.209,0	137.093,1	153.872,4
Arıtılmış su kullanımı (ton)	0	0	711.15,8	54.336,5
Atık su sağlama (ton)	147.761,2	147.761,2	147.761,2	147.761,2
Maliyet (\$)	55.030.300	45.163.640	43.384.730	42.827.120
CO ₂ emisyon (kg)	148.472.100	130.922.600	118.882.600	114.924.900

Kağıt ve kağıt hamuru tesisi (Çizelge 4.13) taze su tüketiminin nispeten yüksek olduğu bir üretim tesisidir. Bu nedenle, bu tesiste yüksek miktarda atık su üretilir, ancak beklendiği gibi çok fazla arıtılmış su tüketmemektedir. Öte yandan, bu tesiste ortaya çıkan tüm yan ürünler EEP içinde satılmaktadır. Bu tesisin maliyetlerinde küçük bir düşüş gözlenmesine rağmen, karbon emisyonlarında değişiklik olmamıştır. Çünkü tüm dönemlerde yan ürünleri park dışından satın almıştır. Dolayısıyla taşıma ve üretimden kaynaklı karbon emisyonları değişmemiştir.

Çizelge 4.13. Kağıt ve kağıt hamuru tesisi için sonuçlar

Veri	Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3	Periyot-4
Hammadde kullanımı (ton)	29.027,6	29.027,6	29.027,6	29.027,6
Ortaya çıkan yan ürün (ton)	3.820,0	3.820,0	3.820,0	3.820,0
Park dışından alınan yan ürün (ton)	8.708,3	8.708,3	8.708,3	8.708,3
EEP'a satılan yan ürün (ton)	3.820,0	3.820,0	3.820,0	0
Taze su kullanımı (ton)	109.245,3	34.075,4	109.245,3	109.245,0
Arıtılmış su kullanımı (ton)	0	75.169,9	0	0
Atık su sağlama (ton)	90.566,0	90.566,0	90.566,0	90.566,0
Maliyet (\$)	12.289.080	12.209.500	12.271.890	12.271.890
CO ₂ emisyon (kg)	9.328.012	9.328.012	9.328.012	9.328.012

Elde edilen sonuçlar pelet tesisinin (Çizelge 4.14), ilk dönem hariç, üretim için gerekli yan ürünlerin hepsini EEP'den elde edilebileceğini göstermektedir. Bu nedenle ikinci dönemden itibaren maliyet düşmüş, ancak pelet üretimi arttığından emisyonlar da artmıştır.

Çizelge 4.14. Pelet tesisi için sonuçlar

Veri	Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3	Periyot-4
EEP dışından alınan yan ürün (ton)	32.998,8	0	0	0
EEP'den alınan yan ürün (ton)	0	54.998,1	54.998,1	32.998,8
Pelet üretimi (ton)	30.000,0	50.000,0	50.000,0	30.000,0
Maliyet (\$)	2.019.199	1.267.084	1.267.084	759.604
CO ₂ emisyon (kg)	1.500.000	2.503.123	2503..123	1.501.624

Atık su EEP içindeki tesislerden elde edildiği için su arıtma tesisi faaliyete ikinci dönemde başlamıştır. Çizelge 4.15'de görüldüğü gibi, bu tesis her periyotta önemli miktarda atık su arıtmakta ve bu arıtılan su parkta tamamen tüketilmektedir. Bu tesisde ortaya çıkan atık lif çamurunun büyük bir kısmı ise organik gübre tesisinde kullanılmaktadır.

Çizelge 4.15. Su arıtma tesisi için sonuçlar

Veri	Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3	Periyot-4
Artırılmış su üretimi (ton)	-	75.169,9	75.169,9	75.169,9
Lif çamuru sağlama (ton)	-	5.079,1	5.079,1	5.079,1
Park içine sağlanan lif çamuru (ton)	-	4.050,0	4.050,0	4.050,0
Bertaraf edilen lif çamuru (ton)	-	1.029,1	1.029,1	1.029,1
Maliyet (\$)	-	25.253	25.253	25.253
CO ₂ emisyon (kg)	-	4.510.192	4.510.192	4.510.192

Organik gübre tesisi (Çizelge 4.16) EEP içerisine dahil edilerek parktan elde edilebilen ağaç kabuğu, kül, lif çamuru gibi atıklar kullanılmaktadır. Ancak bu girdiler ikinci dönemde kullanılmaya başlanabilir. Bu nedenle bu girdiler ilk dönemde parkın dışında elde edilmektedir. Bu tesis EEP'deki külün yarısından fazlasını da tüketmektedir.

Çizelge 4.16. Organik gübre tesisi için sonuçlar

Veri	Periyot-1	Periyot-2	Periyot-3	Periyot-4
Hammadde kullanımı (ton)	17.775	17.775	17.775	17.775
Park dışından alınan yan ürün (ton)	1.800	0	0	0
EEP'den alınan yan ürün (ton)	0	1.800	1.800	1.800
Parktan kül kullanımı (ton)	0	513	855	855
Park dışından alınan kül (ton)	1.125	612	270	270
Parktan kül sağlama (ton)	4.050	4.050	4.050	4.050
Maliyet (\$)	1.122.188	1.051.948	1.048.802	1.048.802
CO ₂ emisyon (kg)	396.900	381.629	380.808	380.808

EEP içine ve EEP dışına sağlanan atık ve yan ürün miktarları Çizelge 4.17'de sunulmuştur. Örneğin, kereste fabrikası-A, ortaya çıkan yan ürünlerin %20'sini, yongalevha tesisine, %26'sını liflevha tesisine, %11'ini pelet tesisine ve %43'ü ise EEP dışına satmaktadır. EEP parkında üretilen veya ortaya çıkan odun peleti, atık su, artırılmış su ve kül, EEP bünyesindeki tesisler tarafından kullanılmaktadır. Üretilen yan ürünlerin yarısından fazlası ise EEP'de kullanılmaktadır. Öte yandan, yongalevha tesisi, kereste fabrikası-A ve liflevha tesisi, yan ürünlerinin önemli bir kısmını EEP dışına satmaktadır. Dolayısıyla ES ağı bulunduğu bölgedeki diğer işletmelere de katkı sağlamıştır. Atık su, kontrplak A, kontrplak B, yongalevha, liflevha ve kağıt ve kağıt hamuru tesisinde ortaya çıkar. Bu çıkan atık su arıtmakta ve tamamen kağıt ve kağıt hamuru (%44) ve liflevha tesisi (%42) tarafından tüketilmektedir. Lif çamuru ise, sadece su arıtma tesisinde ortaya çıkmakta ve bunun %80'i EEP'de kullanılırken geri kalanı bertaraf edilmektedir. Ancak, üretimin ilk aşamalarında lif çamuru ilk periyodun sonunda üretildiği ve ikinci periyodun başında kullanılabileceği

varsayıldığı için EEP dışından da elde edilmektedir. Kül, pelet kullanmayan kereste fabrikası-B ve kağıt ve kağıt hamuru tesisi dışında tüm tesislerden ortaya çıkmaktadır. Organik gübre tesisi, ortaya çıkan külü tamamen tüketmesine rağmen, yine de EEP dışından kül satın almaktadır. EEP dışından yaklaşık 300 bin ton yan ürün sağlanmıştır. Bu miktarın %50'den fazlası yonga levha tesisi tarafından kullanılmaktadır.

Çizelge 4.17. EEP içinde ve dışından sağlanan değişimlerin yüzdesi (yıllık).

*Tesisler arası akış	KA	KB	PA	PB	Y	L	K	PE	S	O	EEP dışına
KA (yan ürün)					20	26		11			43
KA (kül)										100	
KB (yan ürün)					68	17					15
PA (yan ürün)					11	60		5			24
PA (kül)										100	
PA (atık su)									100		
PB (yan ürün)					18	64					18
PB (kül)										100	
PB (atık su)									100		
Y (yan ürün)								31		2	67
Y (kül)										100	
L (yan ürün)								57			43
L (atık su)									100		
L (kül)										100	
K (yan ürün)								69		31	
K (atık su)									100		
PE (pelet)	17		11	7	26	39					
S (atık su)			7	5	2	42	44				
S (lif çamuru)										86	14
EEP dışına (yan ürün)					57	19	12	11		1	
EEP dışına (lif çamuru)										100	
EEP dışına (kül)										100	

* KA: Kereste -A, KB: Kereste-B, PA: Kontrplak -A, PB: Kontrplak-B, Y: Yongalevha, L: Liflevha, K: Kağıt, PE: Pelet, S: Su Arıtma, O: Organik gübre

Çizelge 4.18, tesisler arasındaki malzeme akışlarının bir özetini sunulmuştur. Mevcut malzeme akışlarına göre, kereste fabrikaları ağdaki yan ürün tedarikçisi gibi davranmaktadır. Kontrplak, yongalevha, liflevha ve kağıt ve kağıt hamuru tesisleri, hem tedarikçi hem de faydalanıcı olarak hareket etmişlerdir. Bu tesisler malzeme değişimini desteklemekte ve EEP'den arıtılmış su, kül ve pelet kullanmaktadır. Öte yandan, pelet tesisi ve su arıtma tesisinin amacı, atık ve yan ürünlerini dönüştürerek

diğer tesislere hizmet vermektir. Gübre tesisi sadece yan ürünleri ve park atıklarını satın almakta, ancak parka kullanılabilir atık veya yan ürünler sağlamamaktadır.

Çizelge 4.18. Tasarlanan endüstriyel simbiyoz ağındaki tesisler arasındaki akışlar

Ağıdaki rolü	Kereste-A	Kereste-B	Kontrplak-A	Kontrplak -B	Yongalevha	Liflevha	Kâğıt	Pelet	Su	Gübre
Yan ürün satıcısı	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗			
Yan ürün alıcısı					↗	↗		↗		↗
Pelet üreticisi								↗		
Pelet kullanıcısı	↗		↗	↗	↗	↗				
Kül sağlayıcı	↗		↗	↗	↗	↗				
Kül kullanıcısı										↗
Arıtılmış su kullanıcısı			↗	↗	↗	↗	↗			
Atık su sağlayıcı			↗	↗		↗	↗			
Atık su arıtıcı									↗	
Lif çamuru sağlayıcı									↗	
Lif çamur kullanıcısı										↗

EEP'deki malzeme değişimleri analiz edildiğinde, ağda elde edilen çevresel faydaların sadece karbon emisyonlarındaki azalma ile sınırlı olmadığı görülmüştür. Tasarlanan ES ağında yaklaşık 400 bin ton yan ürün değiş tokuşu olmuştur. Ağda ısı elde etmek için pelet üretilip tesislerde kullanıldığı için yaklaşık 60 bin ton akaryakıt tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca, 220 bin tondan fazla temiz su tasarrufu sağlanmıştır. Dahası, organik gübre üretimi için kül ve lif çamuru gibi atıklar bertaraf edilmek yerine üretimde kullanılmıştır. Bu bulgular tasarlanan ES'nin beklendiği gibi çalıştığını göstermiştir. Yukarıda sunulan tartışma, amaçlara eşit ağırlık verilerek elde edilen sonuçlara dayanmaktadır.

4.4.2.2. Amaç fonksiyonu ağırlıklarının eşit kabul edilmemesi

Model farklı ağırlıklar için çözüldüğünde, Çizelge 4.19'da sunulan bir dizi baskın olmayan çözüm elde edilir. 39 çözüm elde edilse de bunlardan sadece 4 tanesi baskın olmayan çözümdür. İlk amaç fonksiyonu için ağırlık (λ_1), hem 0,04 hem de 0,05 başlangıç değerine ayarlanır (burada $\lambda_2 = 1 - \lambda_1$). Adım değeri olarak ise yine 0,04 ve 0,05'e değerleri kullanılmıştır. Daha sonra her iki adım değeri de kullanılarak λ_1 artırılır. Bu çözümler, ekonomik ve çevresel hedefler arasındaki etkileşimi göstermektedir. Baskın olmayan çözümler ilk amaç fonksiyonunun ağırlığı daha büyük olduğu durumda elde edilmiştir.

Çizelge 4.19. Ağırlıklı toplam yöntemi baskın olmayan sonuçlar

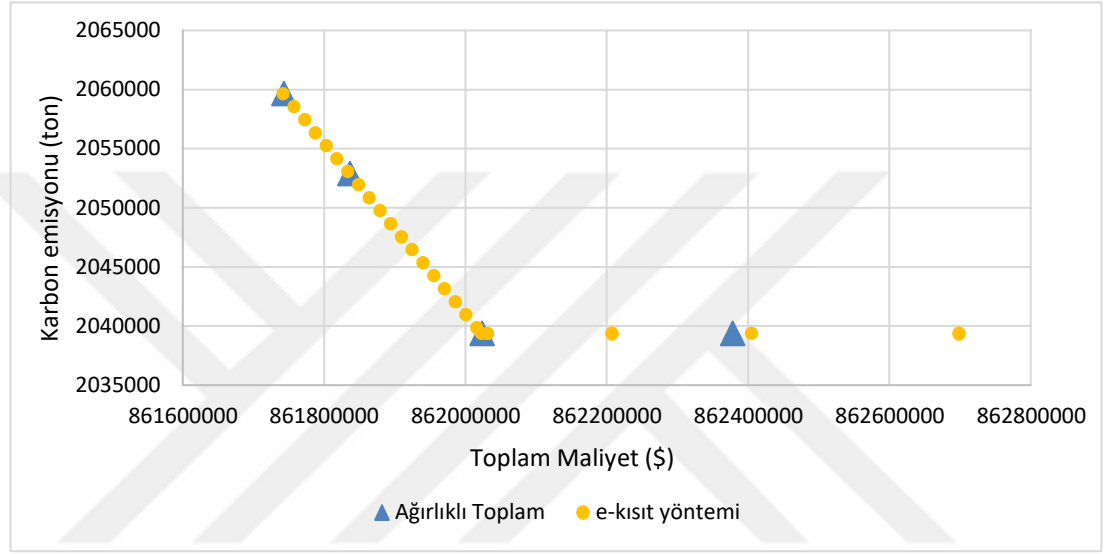
Baskın olmayan çözümler			ECO amaç (λ_1)	CO ₂ amaç (λ_2)
No	λ_1	λ_2	Maliyet (\$)	Emisyon (ton)
1	0,95	0,05	861.743.200	2.059.672
2	0,92	0,08	861.836.300	2.052.907
3	0,90	0,10	862.023.400	2.039.378
4	0,60	0,40	862.378.400	2.039.376

Model ε -kısıt yöntemi ile de çözülmüştür. İdeal amaç vektörü $(f_{ECO}^* ; f_{CO_2}^*) = (861.742.000; 2.039.372)$ ve nadir amaç vektörü $(f_{ECO}^{nad} ; f_{CO_2}^{nad}) = (864.965.200; 2.059.672)$ bulunmuştur. Çizelge 4.20'de elde edilen 26 baskın olmayan çözüm sunulmuştur.

Çizelge 4.20. ε -kısıt yöntemiyle elde edilen baskın olmayan sonuçlar

No	ECO amaç Maliyet (\$)	CO ₂ amaç Emisyon (ton)
1	861.741.967	2.059.672
2	861.757.183	2.058.572
3	861.772.399	2.057.472
4	861.787.616	2.056.372
5	861.802.833	2.055.272
6	861.818.049	2.054.172
7	861.833.349	2.053.072
8	861.848.483	2.051.972
9	861.863.699	2.050.872
10	861.878.916	2.049.772
11	861.894.133	2.048.672
12	861.909.349	2.047.572
13	861.924.566	2.046.472
14	861.939.783	2.045.372
15	861.954.999	2.044.272
16	861.970.216	2.043.172
17	861.985.433	2.042.072
18	862.000.649	2.040.972
19	862.015.866	2.039.872
20	862.022.368	2.039.402
21	862.022.506	2.039.392
22	862.022.644	2.039.382
23	862.031.137	2.039.376
24	862.207.313	2.039.375
25	862.404.730	2.039.374
26	862.698.273	2.039.373

Ağırlıklı toplam ve ε -kısıt yöntemi ile model çözülmüş ve sonuçlar Şekil 4.12’de karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem de problemi makul zamanlarda çözmüştür. ε -kısıt yöntemiyle daha çok baskın olmayan çözüm bulunmuştur. Bu durum karar verici açısından daha çok çözüm anlamına gelmektedir. Karar verici birbirine baskın olmayan bu çözümlerden kendisi için en uygununu seçebilir. Karar vericinin çözümüne göre işletmelerin ES ağında yapacakları paylaşım yeniden hesaplanabilir. Bu durumda işletmelerin ağdaki rolü ve yaptıkları paylaşım değişebilir.



Şekil 4.12. Ağırlıklı toplam ve ε -kısıt yöntemiyle elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Ağırlıklı toplam yaklaşımının doğru ağırlıkları seçme zorluğu gibi dezavantajları nedeniyle, ε -kısıt yaklaşımı daha kullanışlı bir teknik olduğu söylenebilir. Ancak daha geniş bir ağırlık kümesi kullanılarak daha geniş bir baskın olmayan çözüm kümesi elde edilebilir. Ağırlıklı toplam yönteminin kullanılmak istendiği durumda amaç fonksiyonu ağırlıklarının belirlenmesinde AHP gibi sistematik bir yaklaşım kullanılarak karar vericilerin tercihleri daha doğru yansıtılabilir.

4.5. Sonuçlar

Bu kısımda, katılımcı işletmeler arasında ES'nin mevcut olduğu bir EEP tasarlanmıştır. EEP'deki işletmeler arasında ES ağını kurmak için YDA, kullanılarak potansiyel girdi ve çıktılar analiz edilmiştir. Bu bilgiler kullanılarak ALDEP tesis tasarımı algoritması ile EEP'deki tesislerin konumları belirlenmiştir. Sonrasında,

ES'nin üretim maliyetleri ve karbon emisyonları üzerindeki potansiyel etkilerini analiz etmek için çok amaçlı çok dönemli bir matematiksel model önerilmiştir.

Model, çok amaçlı optimizasyon için en yaygın yaklaşımlar olan ağırlıklı toplam ve ε -kısıt yaklaşımları kullanılarak çözülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre ε -kısıt yöntemi ağırlıklı toplam yönteminden daha çok alternatif çözüm bulmuştur. Bu karar verici için önemli bir avantajdır. Çünkü karar verici kendi durumunu yansıtan bir çözümü bu kümeden seçebilir.

Modelde amaç fonksiyonlarının ağırlıkları eşit olarak kabul edilip çözüm elde edildiğinde malzeme değişiminin mevcut olmadığı ilk döneme kıyasla, sonraki dönemlerde işletmelerin üretimden kaynaklanan maliyetleri ve karbon emisyonları azalmıştır. EEP'deki işletmelerin sağladığı çevresel faydalar sadece karbon emisyonlarındaki azalma ile sınırlı değildir. Ağda yaklaşık 400 bin ton yan ürün değişimi, yaklaşık 60 bin ton akaryakıt tasarrufu ve 220 bin tondan fazla temiz su tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca organik gübre üretimi için kül ve lif çamuru gibi atıkları bertaraf edilmek yerine kullanılmıştır. Ağda işletmeler arasında önemli miktarda su, atık ve yan ürün değişimi gözlenmiştir. Bu aslında beklenen bir durumdur ve literatürde tartışılan ES'nin kazanımları ile de uyumludur.

BÖLÜM V

5. ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ AĞLARI İÇİN ÇOK DÖNEMLİ İKİ AŞAMALI STOKASTİK MODEL ÖNERİSİ

Bu bölümde, bir önceki bölümde önerilen ES ağı için stokastik bir model önerilmiştir. Ele alınan ağda kereste, kontrplak, yongalevha ve liflevha tesisleri bulunmaktadır. Önerilen model ES ağındaki paydaşların ekonomik faydalarını ön planda tutan çok dönemli stokastik bir modeldir. Ağdaki işletmelerin son ürün talebi belirsiz olduğundan iki aşamalı stokastik bir model kullanılmıştır. Önerilen stokastik modelin deterministik eşdeğeri farklı değişim katsayısı değerleri (c_v) için örneklem ortalaması yakınsaması algoritması kullanılarak çözülmüştür. Sonuçlar talebin stokastik olduğu durumda da ağdaki işletmelerin karlı kalabileceği ve ES ağının sürdürülebilir olduğunu göstermektedir.

5.1. Giriş

EEP'deki ES ağına dahil olan işletmelerin bilgileri genelde işletme politikaları nedeniyle açık olarak paylaşılmaz (Aviso vd., 2011). Bu nedenle Liao vd. (2007) önerdiği gibi, işletmelerin bilgi alışverişi tamamen şeffaf olmadığından simbiyoz ağlarında akışlar dönemden döneme göre değişkenlik gösterir ve bu ağı modellemek için her dönemdeki değişiklikler ve olası durumlar matematiksel modele dahil edilmelidir. Endüstriyel işletmelerin üretim süreçleri hakkında verdiği kararlar net olarak bilinemediği için işletmeler “kara kutu” olarak modellenmelidir (Keckler ve Allen, 1999; Aviso, 2014). Çünkü ES ağında karar alma sırasında çok sayıda değişken devreye girecektir. Tesisler aynı EEP'de faaliyet göstermesine rağmen birbirinden bağımsız olarak çalıştığı ve diğer katılımcı tesislerin bilgileri tamamen ortaklar tarafından bilinmediği için, birden çok farklı senaryo oluşabilir.

Farklı senaryolarda ağı katılan tesis sayısında artış veya azalış olabileceği gibi her tesisin bu ağdan fayda gördüğü malzeme, yan ürün vb. miktarlarında da değişiklik olabilir. Dolayısıyla farklı senaryolar altında işletmelerin ES ağlarına katılımları tamamen değişir ve bu ağ stokastik bir yapıya dönüşür (Aviso, 2014). Bu durum, ES ağlarının güvenilirliğini ve sürekliliğini etkileyebilir.

Bu belirsizlik kaynaklarından biri de işletmelerin ürettikleri son ürün talebidir. ES ağlarında işletmelerin faaliyet alanındaki son ürün üretimleri esnasında ortaya çıkan atık ve yan ürün alışverişi söz konusu olduğundan bu ağda son ürün talebi ve buna bağlı olarak işletmelerin ürettikleri yan ürün miktarı da belirsizdir.

Bu kapsamda belirsiz talep altında ES ağlarındaki işletmelerin maliyetlerinin (karlılıkları) nasıl etkilendiğini incelemek amacıyla çok dönemli stokastik bir model önerilmiştir. Modelde, gerçek hayattaki gibi taleplerinde değişken olduğu düşünülerek her işletmenin son ürün talebinin stokastik olduğu kabul edilmiştir. Talebin, son ürün stok miktarını ve stok maliyetlerini değiştirdiği bilindiğinden iki aşamalı bir stokastik programlama modeli geliştirilmiştir.

Yapılan literatür taramasında ES ağlarında çok az sayıda stokastik modele (Gonela vd., 2015; González vd., 2017; Afshari vd., 2018) rastlanmıştır. Bu anlamda önerilen modelin literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracağı düşünülmektedir.

5.2. Önerilen Endüstriyel Simbiyoz Ağı

Bir ES ağındaki işletmelerin son ürün taleplerindeki belirsizliklerin, ağdaki işletmelerin ve ES ağının sürdürülebilirliğine olan katkısının incelenmesi için Bölüm 4’de sunulan ağın küçültülmüş hali kullanılmıştır.

Tasarlanan ağda, farklı son ürünler üretmek için enerji, hammadde ve yan ürünler kullanan beş işletme bulunmaktadır. Bu işletmeler kereste, kontrplak, yongalevha, liflevha ve pelet tesisleri gibi orman ürünleri endüstrisinde faaliyet gösteren işletmelerdir. Her bir işletmenin girdi ve çıktı Şekil 5.1’de verilmiştir. Bu işletmelerdeki üretim esnasında işletmelerde farklı yan ürünler ortaya çıkmakta ve bu yan ürünler farklı işletmelerde kullanılabilmektedir.



Şekil 5.1. İşletmelerdeki girdi ve çıktılar

Çizelge 5.1’de orman endüstrisindeki bu işletmelerin ürettikleri son ürünler ve bu esnada ortaya çıkan yan ürünler, kullanabilecekleri hammadde ve yan ürün tipleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Ağdaki işletmeler arasındaki ilişkiler

Tesis	Üretilen son ürün tipi	Üretilen yan ürün tipi	Girdi olarak kullanılan hammadde tipi	Girdi olarak kullanılan yan ürün tipi
Kereste	1-Kereste	A-Atık odun	I-Tomruk	-
Kontrplak	2- Kontrplak	B-Odun yongası	II- Sanayi odunu	-
Yongalevha	3-Yongalevha	C-Odun tozu	III-Lif-yonga odunu	A,B,D
Liflevha	4- MDF	D-Yakıt odun	IV-Lif yonga odunu	A,B
Pelet	5-Pelet	-	V-Diğer odun	B,C,D

Üretimde hammadde ve yan ürün kullanımıyla ilgili veriler ise Çizelge 5.2 ve 5.3’de verilmiştir. Son ürünler, yalnızca ham maddeler kullanılarak veya hammadde ve yan ürünlerin bir karışımı kullanılarak üretilebilir. Hammadde kullanımında Çizelge 5.2’de, örneğin kereste fabrikasında; 0,625 m³ kereste (son ürün) üretmek için 1 ton yuvarlak odun (hammadde) kereste fabrikasında işlenmelidir. Bu işlem 53 kWh enerji gerektirir. Sonuç olarak, 0,375 ton yan ürün (atık odun) ve 0,063 ton CO₂ ortaya çıkar.

Çizelge 5.2. Hammadde ile üretim için maliyetler ve ağırlık

Parametreler	İşletmeler için girdi ve çıktı				
	Kereste	Kontrplak	Yongalevha	Liflevha	Pelet
Hammadde (ton)	1	1	1	1	1
Girdi Enerji (kWh)	53	60	79	277	150
Birim maliyet (\$/ton)	150	120	100	100	70
Son ürün ağırlığı (m ³)	0,625	0,476	0,740	0,667	0,809
Çıktı Yan ürün ağırlığı (ton)	0,375	0,190	0,172	0,290	-
CO ₂ ağırlığı (ton)	0,063	0,357	0,296	0,520	0,045

Yan ürün kullanımında Çizelge 5.3’de, örneğin yongalevha tesisinde; 0,432 m³ yongalevha (son ürün) üretmek için 1 ton yan ürün yongalevha tesisinde işlenmelidir. Yongalevha tesisi Çizelge 5.1’e göre A, B veya D tip yan üründen birini veya birkaçını kullanabilir. Bu işlem 71 kWh enerji gerektirir ve üretimde 0,266 ton CO₂ ortaya çıkar.

Çizelge 5.3. Yan ürün ile üretim için maliyetler ve ağırlık

Parametreler	İşletmeler için girdi ve çıktı				
	Kereste	Kontrplak	Yongalevha	Liflevha	Pellet
Yan ürün (ton)	-	-	1	1	1
Girdi Enerji (kWh)	-	-	71	249	189
Birim maliyet (\$/ton)	46	62	15	32	-
Son ürün ağırlığı (m ³)	-	-	0,432	0,233	0,527
Çıktı CO ₂ ağırlığı (ton)	-	-	0,266	0,468	0,080

Ele alınan bu ES ağında, aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır;

1. Ağdaki işletmeler bir EEP bulunur ve ES yapmaya gönüllüdür.
2. Her işletme, tek bir tedarikçiden elde edilen bir tür hammadde kullanır.
3. Her işletmede üretim esnasında, diğer işletmeler tarafından kullanılabilecek belirli miktarda yan ürün ortaya çıkar. Yan ürünler ve atıklar herhangi bir ön işlem yapılmadan tekrar kullanılabilir. EEP’de satılmayan yan ürünler stoklanabilir.
4. Her işletme sadece bir tür son ürün üretir. Bu ürüne olan talep gerçek hayattaki gibi stokastiktir ve normal dağılmıştır.
5. Bir dönemin son ürün talebi sonraki dönemin üretimiyle karşılanabilir, yada tam tersi de gözlenebilir. Burada stok tutma maliyeti oluşur.
6. İşletmeler gelen tüm talepleri karşılayabilecek kapasiteye sahiptir.
7. Maliyetler hesaplanırken işgücü maliyetleri, bakım maliyetleri ve amortismanlar gibi diğer giderler dikkate alınmamıştır.
8. Girdi ve çıktı verileri, 1 m³ veya 1 ton nihai ürün dikkate alınarak belirlenmiştir.
9. Analiz süresi bir yıl olarak seçilmiştir. Bu süre dört döneme eşittir.
10. Hammadde ve yan ürünlerin birim satış fiyatları, birim enerji maliyetleri ve fabrikalar arasındaki nakliye maliyetleri bilinmektedir. Taşıma maliyetleri alıcı tarafından karşılanır.
11. Ağdaki atık su, çamur ve kül gibi atıklar dikkate alınmamıştır.
12. Teşvikler kapsamında, elektrik ve yan ürün EEP’deki işletmelere satıldığında maliyetleri %20 oranında düşürülür (Aguilar vd., 2017).

kıyaslama amacıyla kullanılmıştır. Tesislerin talepleri 4. Bölümde kullanılan değerler dikkate alınarak derlenmiştir. Kullanılan talep ortalamaları ve standart sapmalar Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4. İşletmelerin talep ortalamaları ve standart sapmaları ($c_v = 0,1$)

Tesisi	Periyotlar	Talep (Ortalama, Standard sapma)
Kereste	1,2,3,4	N(100000,10000)
Kontrplak	1,2,3,4	N(37500,3750)
Yongalevha	1,2,3,4	N(75000, 7500)
Liflevha	1,2,3,4	N(125000,12500)
Pellet	1,2,3,4	N(30000,3000)

5.3. Stokastik Programlama

Bir optimizasyon modelinin çözümü, bazı kısıtlar altında amaç fonksiyonunu optimize eden karar değişkenlerinin belirlenmesidir. Optimizasyon modellerinde kısıtlarda ve amaç fonksiyonlarındaki parametreler kesin olarak biliniyorsa bu modeller deterministik olarak ifade edilir (Marti, 2005).

Geleneksel deterministik optimizasyon modelleri tüm parametrelerin bilindiği durum için formülize edilmesine rağmen, gerçek hayat problemlerinde tüm parametrelerin kesin olarak bilinmesi çok güçtür. Stokastik programlama, bazı veya tüm parametrelerin belirsizlik içerdiği matematiksel modellerdir. Belirsizlik kavramı gerçek hayattaki gibi kesin olarak bilinmeyen veya belirlenmesinin çok zor görüldüğü bazı durumlarda ortaya çıkar (Taha, 2003). Örneğin, bir fabrika kurma sürecinde, talep bilinmeden tesislerin yeri ve kapasitesi ile ilgili kararların alınması gerekir. Bu tip belirsizliklerin modellenmesi için stokastik programlama modelleri kullanılmaktadır. Stokastik programla konusunda birçok önemli çalışmalar (Hillier ve Lieberman 1990; Dantzig ve Madansky, 1961; Kall ve Wallace, 1994) yapılmıştır.

Deterministik modellerin bu belirsizlikleri göz önüne almamasından dolayı gerçek hayat problemlerini doğru bir şekilde yansıtamadığı düşünülmektedir (Dantzig ve Infanger, 2011). Dolayısıyla, stokastik modeller deterministik modellere göre daha iyi sonuç vermekte ve çoğu problemin modellenmesinde tercih edilmektedir (Kolbin, 1977). Stokastik modellerde belirsizliğin üstesinden gelmek için parametrelerin rassal

olduğu, fakat bilinen olasılık dağılımlarıyla tanımlandığı varsayılır (Shapiro, 2012). En az bir tane rastgele parametre içeren modellere stokastik optimizasyon modelleri denir.

Stokastik programlama modelleri geçmişten günümüze; finansal yatırım (Birge ve Louveaux 1997, Sen ve Hagle 1999), kapasite planlama (Chen ve Tirupati, 2002), portföy seçimi (Samuelson, 1975; Çetin, 2004), su yönetimi (Dupačová vd., 1991), tedarik zinciri yönetimi (Santoso vd., 2005) ve havayolu mürettebatı çizelgeleme (Yen ve Birge, 2006) gibi birçok farklı alana uygulanmıştır.

5.3.1. Stokastik Programlama Modelleri

Stokastik programlama problemlerinin çözümleri bilindiği gibi NP-zor problemlerdir (Shapiro, vd, 2014). Bu zorluğu aşmak için problemlerin çözümleri genel olarak stokastik yapıyı deterministik eşdeğeri haline getirerek doğrusal modeller gibi çözmek üzerine kurguludur (Taha, 1997). Stokastik programlamada genelde üç yaklaşım söz konusudur (Mitra, 2006);

- ✓ şans kısıtlı programlama problemleri,
- ✓ recourse (telafili) problemler (dağılım tabanlı ve senaryo tabanlı) ve
- ✓ dağılım (distribution) problemleri (bekle-gör ve beklenen değer).

Şans kısıtlı programlama, stokastik doğrusal programlama problemlerini modellemek ve çözmek için ilk olarak Charnes ve Cooper (1959), Miller ve Wagner (1965) tarafından tanıtılmıştır. Şans kısıtlı problemler belirli olaylar ve koşullardaki belirsizliği modele dahil etmek için olasılıksal kısıtlar ekler. Böylece stokastik model, deterministik programlama modeline dönüşür. Ancak bu yaklaşımla modellenen problemler dışbükey kısıt kümesine sahip olabileceğinden bu problemleri çözmek oldukça zordur (Sen ve Hagle, 1999).

Recourse (telafili) problemlerde, gelecekteki davranışın modellenmesi üzerinde odaklanmaktadır. Bu problemlerde, biri rasgele olay(lar) gerçekleşmeden önce diğeri ise rasgele olayın gerçekleşmesinden sonra olmak üzere en az iki karar alınır. Belirsizlikten önce ve belirsizlik açığa kavuştuktan sonra, alınan kararı düzeltbildiği veya telafi edilebildiği için bu problemler telafi problemleri olarak ifade edilir (Birge ve Louveaux, 1997).

Bir recourse problemi örneği düşünürsek (Mitra, 2006); belirsiz tüketici talebini karşılamak için bir X ürünü üretmemiz gerekmekte ve tüketici talebinin belirsiz olduğunda gerçekleşen X üretiminin daha maliyetli olduğu bilinmektedir. Çünkü artan taleple birlikte arzların daha da azalması nedeniyle üretim maliyetleri artmaktadır. Ayrıca satılmayan (stoklanan) ürünler ek maliyet getireceğinden, fazla üretim yapılmadan üretilen miktarın maksimize edilmesi gerekmektedir. Bir fabrika, tüketici talebinin herhangi bir belirsizliğinin gerçekleşmesinden önce, A miktarında X ürünü üretmeye karar veriyor. Daha sonra gerçekleşen belirsizliği gözlemliyor (tüketici talebi) ve sonuç olarak ek B miktar (recourse action) X ürünü üretiyor. Yani üretilen toplam üretim miktar $A+B$ 'dir. Bu örnekte, birinci aşama kararı, A miktarda X üretmek, ikinci aşama kararı ise, B miktarda X üretmektir. Bu tarz problemleri modellemek için en sık kullanılan yöntemlerden biri de iki aşamalı stokastik modellerdir. Bu yöntem sonraki bölümde anlatılacaktır.

Dağılım problemleri ise; burada dağılım kavramı, stokastik programlamanın çözümü veya amaç fonksiyonu değerinin bir girdi olarak değişkenliğe sahip olmasıdır. Bu dağılım problemi, çıktıdaki değişikliği belirlemek için girdilerin değiştirildiği doğrusal programlama problemlerindeki duyarlılık analizinin eşdeğeri olarak düşünülebilir. Dağıtım problemi, karar vericinin modelin sağlamlığı (robustness) hakkında bilgi sahibi olmasını sağlar. Amaç fonksiyonu dağılımı hesaplayabilmek için Beklen Değer ve İzle-ve-Gör olmak üzere iki yaklaşım vardır (Mitra, 2006).

5.3.2. İki Aşamalı Stokastik Doğrusal Programlama İçin Teorik Yapısı

Stokastik programlama modelleri sağ tarafında rassal değişkenleri içeren optimizasyon problemlerini, teknolojik katsayılarını veya amaç katsayılarını ele almak için geliştirilmiştir (Shapiro ve Homem-de-Mello,1998). Stokastik bir doğrusal programlama modelinin genel gösterimi Eş (5.1)'deki gibidir (Zanjani vd., 2013).

$$\min c^T x \quad (5.1a)$$

$$s. t.$$

$$Ax = b, \quad (5.1b)$$

$$T(\xi)x \geq h^T(\xi), \quad (5.1c)$$

$$x \geq 0, \quad (5.1d)$$

burada $T(\xi)$ ve $h(\xi)$ rassal parametrelerdir. Yukarıdaki modelde, kısıt (5.1b) ve (5.1c) sırasıyla deterministik ve stokastik kısıtlar kümesini temsil eder.

İki aşamalı stokastik modellerde, rassal olayın nasıl sonuçlandığı ile ilgili tam bir bilgiye sahip olunmadan alınan kararlara birinci aşama kararları denir ve genellikle x vektörü ile gösterilir. Daha sonra rassal vektörlerin ξ gerçekleşmesiyle tam bilgiye sahip olunur ve ikinci aşama kararlar ya da diğer bir deyişle düzeltici kararlar (recourse actions) alınır. Bu kararlar ise y vektörü ile gösterilir.

Matematiksel programlamada, bu tip modellere, *iki aşamalı stokastik programlama modeli* olarak Eş (5.2) ile ifade edilir.

$$\min c^T x + E_{\xi}[Q(x, \xi)] \quad (5.2a)$$

s. t.

$$Ax = b, \quad (5.2b)$$

$$x \geq 0, \quad (5.2c)$$

burada $Q(x, \xi) = \min\{q^T(\xi)y \mid Wy = h^T(\xi) - T(\xi)x, y \geq 0\}$, W yardımcı (recourse) matrisi, $q^T(\xi)$, ikinci aşama değişkenlerin ceza maliyetinin vektörüdür, ξ vektörü ise $q^T(\xi)$, $h^T(\xi)$, $T(\xi)$ 'nin bileşenlerinden oluşan rassal bir vektördür. E_{ξ} , ise ξ 'ye göre beklenen değeri ifade eder.

Eş (5.2)'de modeldeki rassal değişkenler sürekli dağılıma sahip olduğu durumda, beklenen değeri $E_{\xi}Q(x, \xi)$, hesaplanması için, ξ olasılık dağılımına göre çözümü zor çoklu integrallerin hesaplanmasını gerektirir (Zanjani vd., 2013). Ancak, stokastik değişkenler vektörünün boyutunun artmasıyla çözüm zorluğu ve zamanı da artar. Zanjani vd., (2013)'e göre, eğer ξ sonlu bir ayrık olasılık dağılıma sahipse $\{(\xi^i, p^i), i, \dots, n\}$, Eş (5.3)'ki model Eş (5.3)'deki gibi standart bir doğrusal program olan *deterministik eşdeğerine* dönüştürülebilir.

$$\min c^T x + \sum_{i=1}^n p^i Q(x, \xi^i) \quad (5.3a)$$

s. t.

$$Ax = b \quad (5.3b)$$

$$x \geq 0, \quad (5.3c)$$

burada $Q(x, \xi^i) = \min\{q^{iT}(\xi)y^i \mid Wy^i = h^{iT}(\xi) - T^i(\xi)x, y \geq 0\}$, gibi ifade edilir. y^i , $q^{iT}(\xi)$, $h^{iT}(\xi)$ ve $T^i(\xi)$, her i . senaryo için y , $q^T(\xi)$, $h^T(\xi)$ ve $T(\xi)$, değerlerini gösterir. Model (5.3) standart paket programları tarafından çözülebilir.

5.4. Geliştirilen İki Aşamalı Stokastik Model

Bu kısımda önerilen model, orman endüstrisindeki ES ağı için deterministik çok amaçlı modelin, tek amaçlı stokastik versiyonudur. Modelde talebi gerçek hayattaki gibi belirsiz olduğu ve normal dağıldığı varsayılmıştır.

Önerilen modelin amacı, ES ağındaki tesislerin toplam üretim maliyetini en aza indirmektir. Modeldeki notasyonlar aşağıda verilmiştir;

Kümeler

I	işletmeler (tesis, fabrika) kümesi ($i, j \in I$)
K	yan ürün tipleri kümesi ($k \in K$)
T	zaman periyodu kümesi ($t \in T$)
S	senaryo kümesi ($s \in S$)

Parametreler

D_{it}	i . işletmenin t . dönemdeki talep miktarı (ton)
D_{its}	s . senaryodaki i . işletmenin t . dönemdeki talep miktarı (ton)
$w_{ik}^{rm,bp}$	i . işletmede son ürün üretimde ortaya çıkan k . tip yan ürün miktarının ağırlığı
w_i^{rm}	i . işletmede hammaddenin son ürüne dönüşme ağırlığı
w_{ik}^{bp}	i . işletmenin k . tip yan ürünün son ürüne dönüşme ağırlığı
$a_i^{e,rm}$	i . işletmede hammadde işleme sürecinde kullanılan elektrik enerjisi miktarı
$a_i^{e,bp}$	i . işletmede yan ürün işleme sürecinde kullanılan elektrik enerjisi miktarı
C_i^{rm}	i . hammadde birim maliyeti
C_k^{bp}	k . tip yan ürün birim maliyeti
p_k^{bp}	k . tip yan ürün satış geliri
p_i^{fp}	k . tip son ürün satış geliri
C^{tran}	her ton malzeme taşıma maliyeti
C^e	enerjisi birim maliyeti
C^{sto}	her ton yan ürün için stok maliyet
h_i	i . işletmenin fazla stok tutma maliyeti (\$)
d_{ij}	i . işletme ile j . işletme arası mesafe (km)
d_i	i . işletme ile park dışındaki tedarikçiler arası mesafe (km)

Karar Değişkenleri

Q_{it}^{rm}	t . dönemde i . işletmede son ürün üretmek için gerekli hammadde miktarı (ton)
$Q_{ijkt}^{bp,sell}$	t . dönemde i . işletme tarafından j . işletmeye gönderilen k . tip yan ürün miktarı (ton)
$Q_{ijkt}^{bp,buy}$	t . dönemde j . işletme tarafından i . işletmeden alınan k . tip yan ürün miktarı (ton)
Q_{ikt}^{bpSto}	t . dönemde i . işletme tarafından stok edilen k . tip yan ürün miktarı (ton)
I_{it}^+	t . dönemde i . işletmenin fazla stok miktarı (inventory) (ton)
I_{it}^-	t . dönemde i . işletmenin eksik stok miktarı (backorder) (ton)

Yardımcı Karar Değişkenleri

I_{its}^+	s . senaryoda t . dönemde i . işletmenin fazla stok miktarı (inventory) (ton)
I_{its}^-	s . senaryoda t . dönemde i . işletmenin eksik stok miktarı (backorder) (ton)

5.4.1. Deterministik Model

Önerilen modelin amaç fonksiyonunun (Eşitlik (5.4)) amacı işletmelerin karının maksimize edilmesidir. Amaç fonksiyonun ilk bölümü (Eş 5.4a) kereste, kontrplak, yongalevha, liflevha ve pelet tesislerinin son ürün satış gelirleri ve yan ürün satış gelirlerini ifade eder. İkinci bölüm ise (Eş 5.4b), işletmelerin hammadde ve yan üründen kaynaklanan; satın alma, taşıma, enerji giderleri ile son ürün stok tutma maliyetini temsil eder.

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (p_i^{fp}(Q_{it}^{fp}) + \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} p_k^{bp} Q_{ijkt}^{bp,sell}) \quad (5.4a)$$

$$\begin{aligned} & - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (Q_{it}^{rm}(C_{it}^{tran} d_i + C^e a_i^{e,rm} + C_i^{rm}) + \sum_{k \in K} C_{ikt}^{sto} Q_{ikt}^{bpSto} \\ & + \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} Q_{ijkt}^{bp,buy} (C_{ij}^{tran} d_j + C_j^e a_{jk}^{e,bp} + C_k^{bp}) + [h_i I_{it}^+]) \end{aligned} \quad (5.4b)$$

Üretilen son ürün miktarı Eş. (5.5)'de gösterilmiştir.

$$Q_{it}^{fp} = w_i^{rm} Q_{it}^{rm} + \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} w_{ik}^{bp} Q_{ijkt}^{bp,buy}, \quad i \in I, t \in T \quad (5.5)$$

Stok kısıtları: Eş. (5.6) son ürün talebinin karşılamasını ile ilgilidir. Model çok dönemli olduğu için bir önceki dönemde üretilen son ürün stoklanarak bir sonraki dönem kullanılabilir. Bir önceki dönemde karşılanmayan son ürün talebi ise bir sonraki dönemde yapılan üretimle karşılanabilir. Fakat bu şekilde dönemler arası stok fazlası ve yok satma durumları ortaya çıkabilir. Burada I_{ij} i . işletmesi j . dönemi stoku olup $I_{ij} = I_{ij}^+ - I_{ij}^-$ eşittir.

$$Q_{i1}^{fp} + I_{i0}^+ + I_{i1}^- - I_{i1}^+ = D_{i1} \quad (5.6)$$

$$Q_{it}^{fp} + I_{i(t-1)}^+ + I_{it}^- - I_{it}^+ - I_{i(t-1)}^- = D_{it} \quad t = 2 \dots T, i \in I$$

Yan ürün üretim kısıtı: Eş. (5.7) üretimde kullanılan hammadde yan ürün elde edileceğini göstermektedir. Her tesiste kullanılan hammaddeye göre farklı tipte ve farklı miktarda yan ürün ortaya çıkmaktadır. Bu kısıtın sol tarafı i . işletme tarafından üretilen yan ürün miktarını temsil eder. Bu yan ürün miktarı j . işletmeye satılabilir veya i . işletme tarafından stoklanabilir.

$$\sum_{k \in K} w_{ik}^{rmdp} Q_{it}^{rm} = \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} Q_{ijk(t+1)}^{vp,seu} + \sum_{k \in K} Q_{ik(t+1)}^{vp,uo}, \quad i \in I, t \in T \quad (5.7)$$

Ayrıca modele orman endüstrisi özelinde kısıtlar Eş. (5.8) ve Eş. (5.9) eklenmiştir. Her işletmenin üretim sürecinde girdi olarak kullanabilecek hammaddenin yan ürün miktarlarına oranı alt sınır $\underline{\theta}_i$ ve üst sınır $\bar{\theta}_i$ kullanılarak modele dahil edilmiştir. Örneğin, yongalevha tesisi yan ürün kullanım oranı en çok %35 olabilir. Hiç yan ürün kullanılmadan da bu ürün üretilir.

$$\sum_{j \in I} \sum_{k \in K} Q_{ijkt}^{bp,buy} \geq \underline{\theta}_i Q_{it}^{rm} \quad i \in I, k \in K, t \in T \quad (5.8)$$

$$\sum_{j \in I} \sum_{k \in K} Q_{ijkt}^{bp,buy} \leq \bar{\theta}_i Q_{it}^{rm} \quad i \in I, k \in K, t \in T \quad (5.9)$$

Bir işletmenin sattığı yan ürün başka bir işletme tarafından alınan yan ürüne eşittir. Bu durum Eş. (5.10)'da gösterilmiştir.

$$Q_{ijkt}^{bp,sell} = Q_{jikt}^{bp,buy} \quad i, j \in I, k \in K, t \in T \quad (5.10)$$

İlk dönemde satılan ve stoklanan yan ürünlerin karar değişkenleri ise modelde Eş (5.11)'de sıfır eşitlenmiştir. İşletmelerde üretim sonucunda ortaya çıkan yan ürünler ilk dönemin sonunda ortaya çıkmakta ve ikinci dönem kullanılmaktadır.

$$I_{i0}^+, Q_{ijk0}^{vp,seu}, Q_{ijk0}^{vp,uo}, Q_{ik0}^{vp,uo} = 0, \quad i, j \in I, k \in K \quad (5.11)$$

Son olarak, karar değişkenlerinin (Eş. 5.12) sıfırdan büyük olma kısıtları eklenmiştir.

$$Q_{it}^{fp}, Q_{ijkt}^{bp,buy}, Q_{ijkt}^{bp,sell}, Q_{ikt}^{bpSto}, Q_{it}^{rm}, I_{it}^+, I_{it}^- \geq 0, i, j \in I, k \in K, t \in T. \quad (5.12)$$

Yukarıda sunulan deterministik modelin talebi normal dağılıma sahip rassal bir değişken içerebilir. Bu durumda modelin amaç fonksiyonunda ve kısıtlarında rassal değişkenler olur ve model stokastik bir yapıya dönüşür. Bu stokastik yapının üstesinden gelmek için iki aşamalı bir stokastik programlama modeli kullanılmıştır.

5.4.2. Önerilen İki Aşamalı Stokastik Model

a) İlk aşama model (First stage)

Yukarıda verilen deterministik modelin iki aşamalı stokastik programlama modelindeki ilk aşama model Eşitlik (5.13)'de sunulmuştur;

$$\begin{aligned} \max \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (p_i^{fp}(Q_{it}^{fp}) + \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} p_k^{bp} Q_{ijkt}^{bp,sell}) \\ - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (Q_{it}^{rm}(C_{it}^{tran} d_i + C_i^e a_i^{e,rm} + C_i^{rm}) + \sum_{k \in K} C_{ikt}^{sto} Q_{ikt}^{bpSto}) \\ + \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} Q_{ijkt}^{bp,buy} (C_{ij}^{tran} d_j + C_{ij}^e a_{jk}^{e,bp} + C_k^{bp}) + E_{\xi} [Q(Q_{it}^{fp}, \xi)] \\ s. t. \\ Q_{i1}^{fp} + I_{i0}^+ + I_{i1}^- - I_{i1}^+ = D_{i1} \\ Q_{it}^{fp} + I_{i(t-1)}^+ + I_{it}^- - I_{it}^+ - I_{i(t-1)}^- = D_{it} \quad t = 2 \dots T, i \in I \\ \sum_{k \in K} w_{ik}^{rmBp} Q_{it}^{rm} = \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} Q_{ijk(t+1)}^{bp,sell} + \sum_{k \in K} Q_{ik(t+1)}^{bpSto}, \quad i \in I, t \in T \\ \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} Q_{ijkt}^{bp,buy} \geq \theta Q_{it}^{rm} \quad i \in I, k \in K, t \in T \\ \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} Q_{ijkt}^{bp,buy} \leq \theta Q_{it}^{rm} \quad i \in I, k \in K, t \in T \\ Q_{ijkt}^{bp,sell} = Q_{jikt}^{bp,buy} \quad i, j \in I, k \in K, t \in T \\ Q_{it}^{fp} = w_i^{rm} Q_{it}^{rm} + \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} w_{ik}^{bp} Q_{ijkt}^{bp,buy}, \quad i \in I, t \in T \\ I_{i0}^+, Q_{ijk0}^{bp,sell}, Q_{ijk0}^{bp,buy}, Q_{ik0}^{bpSto} = 0, \quad i, j \in I, k \in K \\ Q_{it}^{fp}, Q_{ijkt}^{bp,buy}, Q_{ijkt}^{bp,sell}, Q_{ikt}^{bpSto}, Q_{it}^{rm}, I_{it}^+, I_{it}^- \geq 0, \quad i, j \in I, k \in K, t \in T \end{aligned} \quad (5.13)$$

Burada $Q(Q_{it}^{fp}, \xi)$ iki aşama modelin Eş. (5.14)'in optimal çözümüdür.

b) İkinci aşama model (Second stage)

İkinci aşamada ise ilk aşamadan gelen karar değişkenleri ile ikinci aşama problemi çözülür ve modelin (Eş. 5.14) nihai sonucu bulunur. İkinci aşamada ilk aşamaya göre çok daha küçük bir model çözülür. İkinci aşama karar değişkenleri (I_{it}^+, I_{it}^-) stok değişkenleridir.

$$\begin{aligned} \min Q(Q_{it}^{fp}, \xi) &= [h_i I_{it}^+] \\ \text{s. t.} \\ Q_{i1}^{fp} + I_{i0}^+ + I_{i1}^- - I_{i1}^+ &= D_{i1}(\xi), \\ Q_{it}^{fp} + I_{i(t-1)}^+ + I_{it}^- - I_{it}^+ &= D_{it}(\xi) \quad t = 2 \dots T, i \in I \\ I_{it}^+, I_{it}^- &\geq 0, \quad i \in I, t \in T \end{aligned} \tag{5.14}$$

burada ξ rassal vektörü farklı senaryolardaki belirsiz getiridir, $Q(Q_{it}^{fp}, \xi)$ 'nin optimal değeri ise ilk aşamadaki karar değişkenlerinin fonksiyonudur. Modelin ilk aşamasında her bir dönem ne kadar son ürün (Q_{it}^{fp}) üretmesi gerektiği belirlenir. İkinci aşamasında ise ilk aşamadaki karara bağlı olarak ne kadar stok maliyeti oluşacağı belirlenir. Modelin amacı hem üretimden kaynaklı maliyetleri enazlamak hem de gelecekte oluşacak stok maliyetlerini enazlamaktır.

c) İki Aşamalı Modelin Deterministik Eşdeğeri

İki aşamalı stokastik model aşağıdaki gibi deterministik hale getirilir. Artık bu doğrusal model kolaylıkla çözülebilir (Eş. (5.15a)- (5.15fg)).

$$\begin{aligned} \max \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (p_i^{fp}(Q_{it}^{fp}) + \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} p_k^{bp} Q_{ijkt}^{bp, sell}) \\ - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (Q_{it}^{rm}(C_{it}^{tran} d_i + C_i^e a_i^{e, rm} + C_i^{rm}) + \sum_{k \in K} C_{kt}^{sto} Q_{ikt}^{bp, sto} \\ + \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} Q_{ijkt}^{bp, buy} (C_{ij}^{tran} d_j + C_j^e a_j^{e, bp} + C_k^{bp})) + \frac{1}{S} \sum_{l=1}^S [h_i I_{its}^+] \end{aligned} \tag{5.15a}$$

s. t.

$$Q_{i1}^{fp} + I_{i0s}^+ + I_{i1s}^- - I_{i1s}^+ = D_{i1s} \quad (5.15b)$$

$$Q_{it}^{fp} + I_{i(t-1)s}^+ + I_{its}^- - I_{its}^+ = D_{its} \quad t = 2 \dots T, i \in I, s = 1, \dots, S$$

$$\sum_{k \in K} w_{ik}^{rmBp} Q_{it}^{rm} = \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} Q_{ijk(t+1)}^{bp,sell} + \sum_{k \in K} Q_{ik(t+1)}^{bpSto}, \quad i \in I, t \in T \quad (5.15c)$$

$$Q_{ijkt}^{bp,sent} = Q_{ijkt}^{bp,buy} \quad i, j \in I, k \in K, t \in T \quad (5.15d)$$

$$Q_{it}^{fp} = w_i^{rm} Q_{it}^{rm} + \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} w_{ik}^{bp} Q_{ijkt}^{bp,buy}, \quad i \in I, t \in T \quad (5.15e)$$

$$I_{i0s}^+, Q_{ijk0}^{bp,sell}, Q_{ijk0}^{bp,buy}, Q_{ik0}^{bpSto} = 0, \quad i, j \in I, k \in K, s = 1, \dots, S \quad (5.15f)$$

$$Q_{ijkt}^{bp,buy}, Q_{ijkt}^{bp,sell}, Q_{ikt}^{bpSto}, Q_{it}^{rm}, I_{its}^+, I_{its}^- \geq 0, \quad i, j \in I, k \in K, t \in T, s \in S. \quad (5.15g)$$

Geliştirilen modelin çözülmesi için Örneklem Ortalama Yakınsaması yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem sonraki kısımda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

5.4.3. Örneklem Ortalama Yakınsaması (Sample Average Approximation SAA)

Stokastik programlama modellerinin çözümündeki temel güçlük amaç fonksiyonun beklenen değerini hesaplamaktır (Santosa vd., 2005). Bu güçlüğü aşmak için kullanılan yöntemlerden biri de SAA yaklaşımıdır. SAA, stokastik programlama modelindeki amaç fonksiyonun beklenen değerini, bir grup senaryo için çözerek bu değeri yaklaşık olarak elde eden Monte Carlo simülasyonu temelli bir örneklem yöntemidir (Patil ve Ukkusuri, 2011). Amacı, modelin farklı sayıda senaryo içeren örneklemlemlerle büyüklükleri ile birçok kez çözülmesiyle optimuma yaklaşık bir çözüm bulunmasıdır. Örneklem büyüklüğü belli noktaya kadar ulaştığında problem optimum çözüme yaklaşır (Kleywegt vd., 2001).

SAA özellikle büyük ölçekli ve yüksek senaryo sayısına sahip stokastik programlama modellerini çözmek için yoğun olarak kullanılan bir yöntemdir. (Shapiro ve De Mello, 1998; Mak vd., 1999). Bu yöntem, stokastik sırt çantası problemlerini (Kleywegt vd., 2001; Claro ve Sousa, 2010), lojistik ve tedarik zinciri yönetimi (Santoso vd., 2005; Schütz, vd., 2009; Patil ve Ukkusuri, 2011; Long vd., 2015; Trochu vd., 2019), üretim planlama (Zanjani vd., 2013; Kafali vd., 2019), orman endüstrisi yönetimi (Vila vd., 2009; Bagaram ve Tóth, 2020), yatırım problemlerini (Pagnoncelli vd., 2009) ve atık yönetimi (Ayvaz vd., 2015; Emelogu vd., 2016; Trochu, vd., 2019) gibi problemleri çözmek için kullanılmıştır.

Bu yöntemde, ξ rassal vektörünün her bir örnekleme için N senaryo üretilir. Burada $\xi^1, \dots, \xi^N$ değerleri, talep değerleri ve olayın beklenen değeri $E[Q(x, \xi)] = \sum_{i=1}^n p^i q^{iT}(\xi^i) x^i$ 'dir. Beklenen değer, örneklem ortalama fonksiyonu $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q^{iT}(\xi^i) x^i$ ile yaklaşık olarak hesaplanır. Diğer bir ifadeyle, Eş. (5.4)'deki *model örneklem ortalama yaklaşımıyla* Eş (5.16) gibi yaklaştırılır.

$$\min c^T x + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q(x, \xi_j^i) \quad (5.16a)$$

s. t.

$$Ax = b, \quad (5.16b)$$

$$x \geq 0 \quad (5.16c)$$

SAA algoritması aday çözümlerin alt ve üst sınırlarını belirleyerek optimum amaç fonksiyonu değerinin ne kadar yaklaştığını hesaplar (Zanjani vd., 2013). Bu alt sınır ve üst sınır arasındaki fark optimalite boşluğunu ifade eder ve bu boşluk ne kadar küçükse problem o kadar optimuma yakınsar (Santoso vd., 2005). Burada problemin güvenilirliğini ölçmek için optimalite boşluğuna karşılık gelen istatistiksel güven aralığı kullanılır (Mak vd., 1999).

SAA algoritmasının adımları şöyledir (Santoso vd., 2005; Schütz, vd., 2009; Zanjani vd., 2013);

Adım 1: Rassal ξ vektörü için N boyutunda M bağımsız örneklem kümesi $(\xi_j^1, \xi_j^2, \dots, \xi_j^N), j = 1, 2, \dots, M$ oluşturulur. Her bir örneklem için Eş (5.17)'deki model çözülür.

$$\min \{c^T x + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q(x, \xi_j^i)\} \quad (5.17)$$

Burada her bir $(\hat{x}_N^1, \dots, \hat{x}_N^M)$ çözüm değeri için $(Z_N^1, \dots, Z_N^M)$ amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 2: Amaç fonksiyonunun beklenen değerinin $E[Z_N] \leq Z^*$ şeklinde olduğunu ispatlanmıştır (Mak vd., 1999). Burada. $\underline{Z}_{N,M}$ optimal Z^* değerinin istatistiksel **alt sınırıdır**. Bu adımda alt sınır $\underline{Z}_{N,M}$ aşağıdaki Eş (5.18) gibi hesaplanır.

$$\underline{Z}_{N,M} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M Z_N^j \quad (5.18)$$

Bu eşitlikten elde edilen değerin varyansı ise Eş. (5.19) ile hesaplanır.

$$\sigma_{\underline{Z}_{N,M}}^2 := \frac{1}{M(M-1)} \sum_{j=1}^M (Z_N^j - \underline{Z}_{N,M})^2 \quad (5.19)$$

Adım 3: İlk adımda (Adım 1) elde edilenler aday çözümlerin arasından modelin ilk aşamasında değeri belirlenen karar değişkeni ($\bar{x}$) seçilip, $\bar{x} \in x$ değeri belirlenir. İlk aşamada bulunan karar değişkeni ikinci aşama için sabit kabul edilir ve ilk aşamadaki örneklem büyüklüğü (N) çok daha büyük olarak seçilen ve N' ile ifade edilen bir örneklem büyüklüğü için modelin çözümündeki amaç fonksiyonu Eşitlik (5.20) ile hesaplanır.

$$Z_{N^F}(\bar{x}) := c^T \bar{x} + \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N^F} Q(\bar{x}, \xi_j^i) \quad (5.20)$$

Burada $\bar{x}$ gerçek problem için uygun bir çözümdür. $\bar{x}$ değeri belirlenirken bulunan amaç fonksiyonu değerlerinden en iyisinin seçilmesi daha uygundur (Santoso vd., 2005). Burada $Z_{N^F}(\bar{x}) \geq Z^*$ dir. Böylece $Z_{N^F}(\bar{x})$ değeri Z^* 'nin bir **üst sınırıdır**. Bu üst sınırın varyansı Eşitlik (5.21) ile hesaplanabilir.

$$\sigma_{N^F}^2(\bar{x}) := \frac{1}{(N'-1)N'} \sum_{i=1}^{N^F} (c^T \bar{x} + Q(\bar{x}, \xi_j^i) - Z_{N^F}(\bar{x}))^2 \quad (5.21)$$

Adım 4: Tüm $j = 1, \dots, M$ ve $\bar{x}$ aday çözümü için $gap_{N,M,N^F}(\bar{x})$ optimalite boşluk değeri Eşitlik (5.22) ile hesaplanır.

$$gap_{N,M,N^F}(\bar{x}) = Z_{N^F}(\bar{x}) - \underline{Z}_{N,M} \quad (5.22)$$

Hesaplanan boşluğun varyansı Eşitlik (5.23) ile hesaplanır.

$$\sigma_{gap}^2 = \sigma_{N^F}^2(\bar{x}) + \sigma_{\underline{Z}_{N,M}}^2 \quad (5.23)$$

Eğer hesaplanan boşluk uygun değilse, örneklem büyüklüğü N değeri değiştirilir ve adımlar tekrar edilir. Normal dağılımda optimal boşluğun güven aralığı eşitlik (5.24) ile hesaplanabilir (Schütz, vd., 2009).

$$Z_{N^F}(\bar{x}) - \underline{Z}_{N,M} + z_\alpha(\sigma_{N^F}^2(\bar{x}) + \sigma_{\underline{Z}_{N,M}}^2)^{0.5} \quad (5.24)$$

Burada $z_\alpha := \Phi^{-1}(1 - \alpha)$ ile $\Phi(z)$ standart normal dağılımın kümülatif dağılım fonksiyonudur. SAA algoritması kullanarak stokastik bir optimizasyon problemini çözme adımlarını aşağıda bir bütün halde verilmiştir (Fan, 2016).

Algoritma: Örneklem Ortalama Yakınsama (SAA) algoritması

- 1: Başla
 - 2: Örneklem büyüklüğü N ve N' belirle;
 - 3: yineleme (iterasyon) sayısı M belirle.
 - 4: **for** $j = 1, \dots, M$ **and** $i = 1, \dots, N$ **do**
 - 5: Rassal örneklem oluştur $\xi^1, \dots, \xi^N$;
 - 6: SAA problemini (5.17) optimaie çözün ve Z_N^j , ve $\bar{x}_N$ değerini kaydet;
 - 7: Rassal örneklem oluştur $\xi^1, \dots, \xi^{N^F}$;
 - 8: Eşitlik (5.20) kullanarak $Z_{N^F}(\bar{x})$ değerini hesaplayın;
 - 9: **end for**
 - 10: Eşitlik (5.18) kullanarak $\underline{Z}_{N,M}$ değerini hesaplayın;
 - 11: **for** $j = 1, \dots, M$ **do**
 - 12: $gap_{N,M,N^F}(\bar{x})$ değeri tahmini optimallik boşluğu Eşitlik (5.22) hesaplayın;
 - 13: **end for**
 - 14: **return** En küçük tahmini optimalite boşluğa sahip aday çözümü döndür.
-

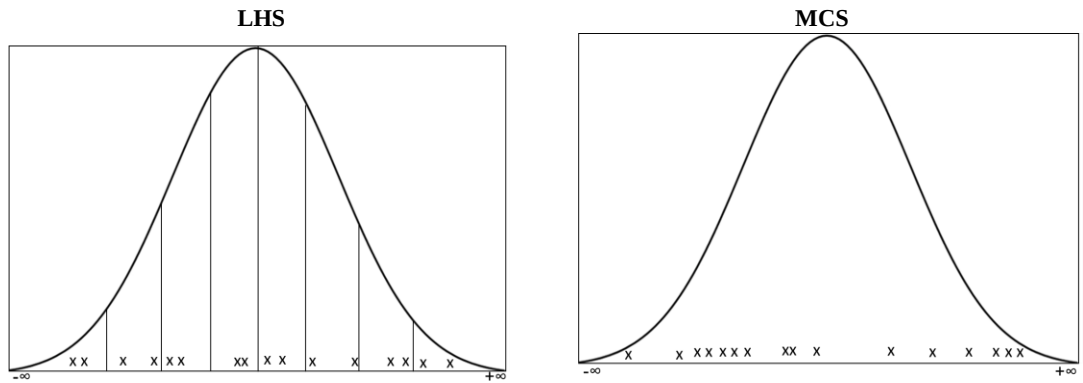
5.4.4. Latin hiperküp örnekleme-Latin hypercube sampling (LHS)

Latin Hiperküp Örnekleme (LHS), Monte Carlo Simülasyonu (MCS) tabanlı belirsizlik niceleme ve güvenilirlik analizi için en yaygın kullanılan rastgele örnekleme yöntemlerinden biridir. McKay, vd. (1979), bilgisayar deneylerinde basit rastgele örneklem üretmeye bir alternatif olarak LHS önermiştir. LHS, belli bir olasılık

dağılımı ve olasılık yoğunluk fonksiyonu için rassal örnekler üreten bir örneklem yöntemidir.

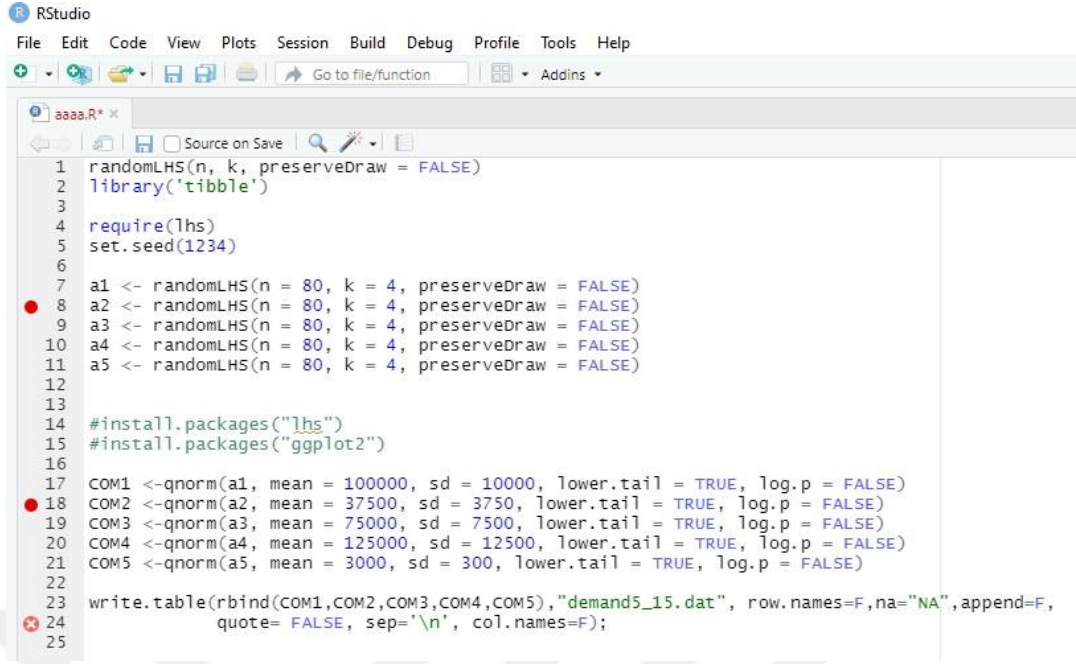
LHS yöntemi olasılık dağılımına (normal dağılım) uygun rassal sayılar üretebilmek için, her biri eşit olasılığa sahip birbiri ile örtüşmeyen olasılık yoğunluk fonksiyonunun örneklem sayısı kadar eşit alana böler. Rassal sayı üretim sürecinde bu alanlardan biri rasgele seçilir ve bir defa seçilen alan tekrar seçilmez. Daha sonra hangi alan seçilmişse bu alandan rastgele bir nokta seçilir. Uniform dağılıma ait ve seçilen bölgenin sınırları içinde üretilen rassal sayı, birikimli dağılım fonksiyonunun tersinde yerine konularak rassal örneklem bulunur (Davey, 2008).

Şekil 5.3’de LHS ve MCS yöntemiyle normal dağılımdan rassal sayı üretimleri görülmektedir. Burada MCS tüm örneklem alanından rassal seçim yapar, seçilen alan tekrar seçilebilir. Yani seçilen noktalar bir bölgede toplanabilir. LHS’de ise, tüm örneklem alanı örneklem sayına göre eşit parçalara ayrılır. Bu parçalardan seçim yapılırken seçilen bir alan tekrar seçilmez. LHS daha fazla alanı tarar ve MCS’den daha hızlı sonuç verir (Davey, 2008). LHS yönteminin ana avantajı, hesaplama maliyetinin MCS tekniğinden çok daha az olmasıdır (McKay vd., 1979), bu avantajda araştırmacılar için çok önemlidir. LHS ile veri üretme işleminin detaylı adımları Hamda vd., (2015)’in çalışmasından incelenebilir.



Şekil 5.3. Normal dağılıma sahip Latin hiperküp ve Monte Carlo simülasyonu örneklemeleri (Davey, 2008).

Bu tez çalışmasında stokastik talep değerlerini elde etmek için LHS yöntemi kullanılmıştır. LHS ile veri üretmek için R programında yazılan Şekil 5.4’de verilen kod kullanılmıştır.



```
1 randomLHS(n, k, preserveDraw = FALSE)
2 library('tibble')
3
4 require(lhs)
5 set.seed(1234)
6
7 a1 <- randomLHS(n = 80, k = 4, preserveDraw = FALSE)
8 a2 <- randomLHS(n = 80, k = 4, preserveDraw = FALSE)
9 a3 <- randomLHS(n = 80, k = 4, preserveDraw = FALSE)
10 a4 <- randomLHS(n = 80, k = 4, preserveDraw = FALSE)
11 a5 <- randomLHS(n = 80, k = 4, preserveDraw = FALSE)
12
13
14 #install.packages("lhs")
15 #install.packages("ggplot2")
16
17 COM1 <- qnorm(a1, mean = 100000, sd = 10000, lower.tail = TRUE, log.p = FALSE)
18 COM2 <- qnorm(a2, mean = 37500, sd = 3750, lower.tail = TRUE, log.p = FALSE)
19 COM3 <- qnorm(a3, mean = 75000, sd = 7500, lower.tail = TRUE, log.p = FALSE)
20 COM4 <- qnorm(a4, mean = 125000, sd = 12500, lower.tail = TRUE, log.p = FALSE)
21 COM5 <- qnorm(a5, mean = 3000, sd = 300, lower.tail = TRUE, log.p = FALSE)
22
23 write.table(rbind(COM1,COM2,COM3,COM4,COM5),"demand5_15.dat", row.names=F, na="NA", append=F,
24             quote= FALSE, sep='\n', col.names=F);
25
```

Şekil 5.4. R kodu ekran görüntüsü

5.5. Uygulama ve Çözüm Sonuçları

Model CPLEX Studio 12.6.2 kullanılarak 8 GB RAM ve 2.40 GHz işlemci ile Intel Core i5 bir bilgisayar ile çözülmüştür. Senaryolardaki verileri üretmek için ise R programı kullanılmıştır.

İki aşamalı stokastik modelin deterministik eşdeğeri SAA algoritması ile çözülmüştür. Bu amaçla N büyüklüğündeki her bir örneklem (senaryo) farklı M yineleme değeri için çözülmüştür. N değerleri 10, 20, 40, 60 ve 80 olarak, M değerleri ise 5, 10, 15 olarak seçilmiştir. SAA algoritmasında N' değeri ise 1000 seçilmiştir. İlk olarak model belirlenen örneklem ve yineleme değerleri için $c_v = 0,1$ değeri ile çözülmüştür. Çizelge 5.5, 5.6, 5.7'de farklı N ve M değerleri için elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 5.5. M=5 için elde edilen sonuçlar

M	N=10	N=20	N=40	N=60	N=80
1.	139.727.000	139.162.000	139.549.000	139.140.000	139.220.000
2.	140.177.000	139.413.000	138.873.000	139.335.000	139.277.000
3.	140.116.000	139.744.000	139.447.000	139.098.000	138.710.000
4.	138.948.000	139.378.000	139.184.000	139.491.000	139.222.000
5.	141.877.000	139.578.000	138.600.000	139.329.000	139.279.000

Çizelge 5.6. M=10 için elde edilen sonuçlar

M	N=10	N=20	N=40	N=60	N=80
1.	139.476.000	139.262.000	138.600.000	139.771.000	139.124.000
2.	141.227.000	138.490.000	139.282.000	139.057.000	139.116.000
3.	140.545.000	138.622.000	139.185.000	138.851.000	139.156.000
4.	141.533.000	138.763.000	138.838.000	138.923.000	139.266.000
5.	140.083.000	139.564.000	140.016.000	138.864.000	139.060.000
6.	139.369.000	140.309.000	139.195.000	139.148.000	139.133.000
7.	139.987.000	139.052.000	139.549.000	139.033.000	139.040.000
8.	140.387.000	139.046.000	138.898.000	138.889.000	139.168.000
9.	140.930.000	139.318.000	139.313.000	139.060.000	139.105.000
10.	139.583.000	138.750.000	139.497.000	139.188.000	138.999.000

Çizelge 5.7. M=15 için elde edilen sonuçlar

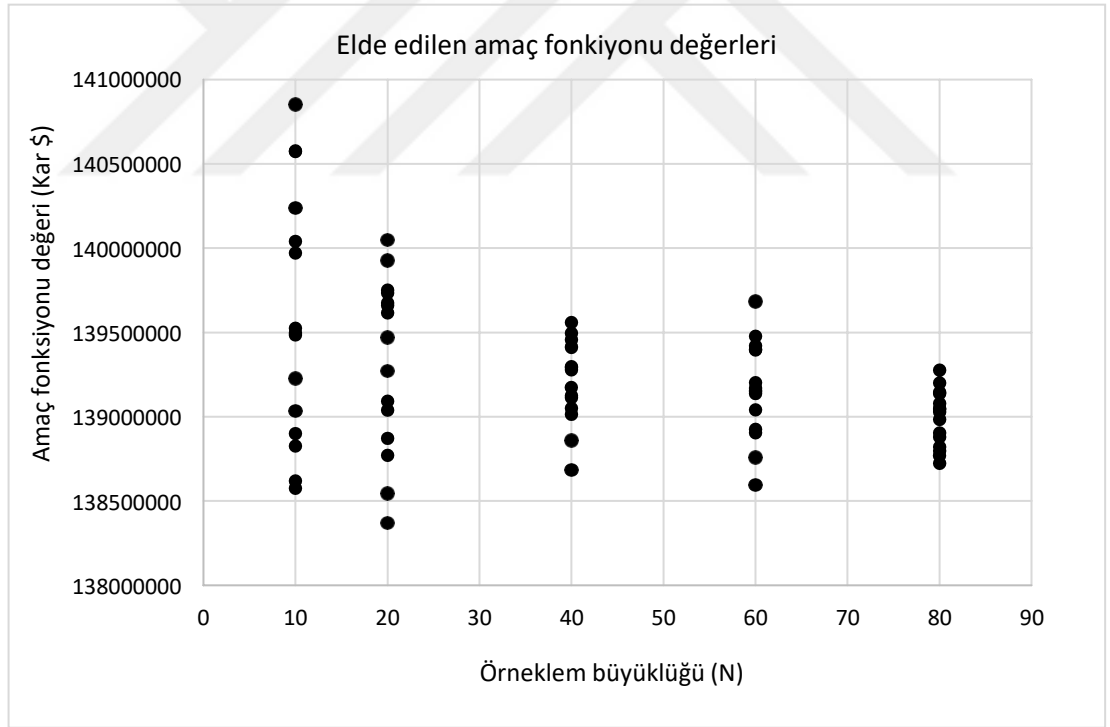
M	N=10	N=20	N=40	N=60	N=80
1.	140.041.000	139.272.000	139.126.000	139.041.000	139.146.000
2.	138.902.000	139.617.000	139.416.000	139.139.000	138.725.000
3.	139.973.000	139.752.000	139.560.000	139.401.000	138.822.000
4.	140.577.000	139.093.000	139.015.000	139.478.000	138.906.000
5.	138.576.000	138.873.000	139.413.000	139.204.000	138.798.000
6.	138.621.000	139.471.000	138.685.000	138.595.000	139.079.000
7.	139.497.000	138.772.000	139.298.000	139.396.000	138.984.000
8.	140.239.000	138.546.000	139.114.000	139.151.000	139.050.000
9.	140.574.000	138.370.000	139.279.000	139.421.000	139.139.000
10.	138.827.000	139.926.000	139.458.000	139.171.000	139.278.000
11.	139.526.000	139.735.000	139.292.000	138.926.000	139.201.000
12.	139.036.000	140.048.000	139.174.000	139.684.000	139.046.000
13.	139.487.000	139.040.000	138.859.000	138.759.000	138.770.000
14.	139.228.000	139.660.000	139.496.000	138.906.000	139.028.000
15.	140.853.000	139.676.000	139.051.000	139.158.000	138.880.000

Modellerin farklı örneklem büyüklüğündeki çözüm süreleri, kısıt sayıları ve karar değişkenleri Çizelge 5.8’de verilmiştir. Örneğin stokastik modelin herhangi bir 10 senaryodaki problemin çözüm süresi 0,01 saniye, karar değişkeni sayısı 1.039 adet ve kısıt sayısı ise 233 adettir. Ayrıca sadece ikinci aşama problemin 1.000 örneklem sayısı ile çözümü ise 0,06 saniye, 40.000 karar değişkeni ve 20.000 bin kısıt vardır.

Çizelge 5.8. Modellerin boyutları ve çözüm süreleri

Örneklem büyüklüğü	Kısıt sayısı	Karar değişkeni sayısı	Çözüm süresi (saniye)
10	233	1.039	0,01
20	436	1.832	0,01
40	836	3.472	0,02
60	1.236	5.112	0,03
80	1.636	6.752	0,03

Çizelge 5.7’den elde edilen değerler Şekil 5.6’da grafik olarak ayrıca sunulmuştur. Bu şekilde $M=15$ değeri ve $N = 10, 20, 40, 60$ ve 80 değerleri için amaç fonksiyonu değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi örneklemdeki senaryo sayısının artmasıyla elde edilen amaç fonksiyonları arasındaki fark azalmaktadır. Şekil 5.5’de gösterildiği gibi, örneklem büyüklüğü küçük olduğunda, amaç fonksiyonu değerinin varyansı büyüktür. Elde edilen varyansı düşürmek için örneklem boyutunu arttırmanın iyi sonuç verdiği görülmüştür.



Şekil 5.5. $M=15$ için N örneklem sayısının artmasıyla elde edilen amaç fonksiyonları

SAA algoritmasının 2. adımdaki istatistiksel alt sınır değerleri ve 3. adımdaki istatistiksel üst sınır değerleri her bir M ve N değeri dikkate alınarak hesaplanmış ve Çizelge 5.9’da verilmiştir. Ayrıca tabloda alt sınır ve üst sınır değerlerinin varyans ve standart sapma değerleri de SAA algoritmasındaki ilgili adımlara göre hesaplanmıştır.

Çizelge 5.9'daki birinci ve ikinci sütunlar sırasıyla tekrar sayısını (M) ve her örneklemdaki senaryo sayısını (N) göstermektedir. Üçüncü, dördüncü ve beşinci sütunlar amaç fonksiyonun üst sınır değerlerinin ortalaması, varyansını ve standart sapmasını gösterirken; altıncı, yedinci ve sekizinci sütunlar ise alt sınır değerlerini göstermektedir. Çizelgenin en sağdaki sütunları ise elde edilen en iyi ve en kötü amaç fonksiyonu değerlerini göstermektedir.

Çizelge 5.9 analiz edildiğinde, örneklem boyutundaki (M) ve tekrar sayısındaki (N) artışla birlikte üst sınır değerinde bir azalma görülmektedir. Benzer şekilde standart sapma değeri de düşmektedir. Diğer yandan alt sınır değeri giderek artmaktadır. En iyi çözüm değeri alt sınır ile üst sınır arasındaki farkın en az olduğu durumda yani M=15 ve N=80 için elde edilmiştir. Bu durumda amaç fonksiyonu değeri 139.278.000\$ olarak hesaplanmıştır. En iyi amaç fonksiyonu değerleri incelendiğinde tekrar sayısının (M) artışının çok etkisinin olmadığı görülebilir. Öte yandan, örneklem büyüklüğündeki (N) artış amaç fonksiyonu değerinde önemli bir iyileşme sağlarken, M'deki artışın etkisinin sınırlı olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.9. Farklı N ve M değerleri için elde edilen, istatistiksel alt ve üst sınır değerleri

M	N	Üst sınır			Alt sınır			Amaç fonksiyonu	
		Ortalama	Varyans	S. Sapma	Ortalama	Varyans	S. Sapma	En iyi değer	En kötü değer
5	10	140.169.000	1.151.585.500.000	1.073.119,5	138.523.300	230.317.100.000	479.913,6	141.877.000	138.948.000
	20	139.455.000	48.048.000.000	219.198,5	138.915.700	9.609.600.000	98.028,6	139.744.000	139.162.000
	40	139.130.600	156.478.300.000	395.573,4	138.795.010	31.295.660.000	76.905,8	139.549.000	138.600.000
	60	139.278.600	25.665.300.000	160.203,9	139.012.800	5.133.060.000	71.645,4	139.491.000	139.098.000
	80	139.141.600	59.025.300.000	242.951,2	138.986.240	11.805.060.000	108.651,1	139.279.000	138.710.000
10	10	140.312.000	560.839.555.556	748.892,2	138.329.300	56.083.955.556	236.820,5	141.533.000	139.369.000
	20	139.117.600	287.724.488.889	536.399,6	137.250.200	28.772.448.889	169.624,4	140.309.000	138.490.000
	40	139.237.300	162.660.455.556	403.311,9	138.961.320	16.266.045.556	127.538,4	140.016.000	138.600.000
	60	139.078.400	73.012.044.444	270.207,4	138.846.600	7.301.204.444	85.447,1	139.771.000	138.851.000
	80	139.116.700	5.541.566.667	74.441,7	139.017.230	554.156.667	23.540,5	139.266.000	138.999.000
15	10	139.597.133	556.578.980.952	746.042,2	138.605.200	37.105.265.397	192.627,3	140.853.000	138.576.000
	20	139.323.400	267.368.828.571	517.077,2	138.778.670	17.824.588.571	133.508,8	140.048.000	138.370.000
	40	139.215.733	60.562.923.810	246.095,4	138.983.940	4.037.528.254	63.541,5	139.560.000	138.685.000
	60	139.162.000	83.827.142.857	289.529,2	138.997.220	5.588.476.190	74.756,1	139.684.000	138.595.000
	80	138.990.133	28.071.980.952	167.547,0	138.941.390	1.871.465.397	43.260,4	139.278.000	138.725.000

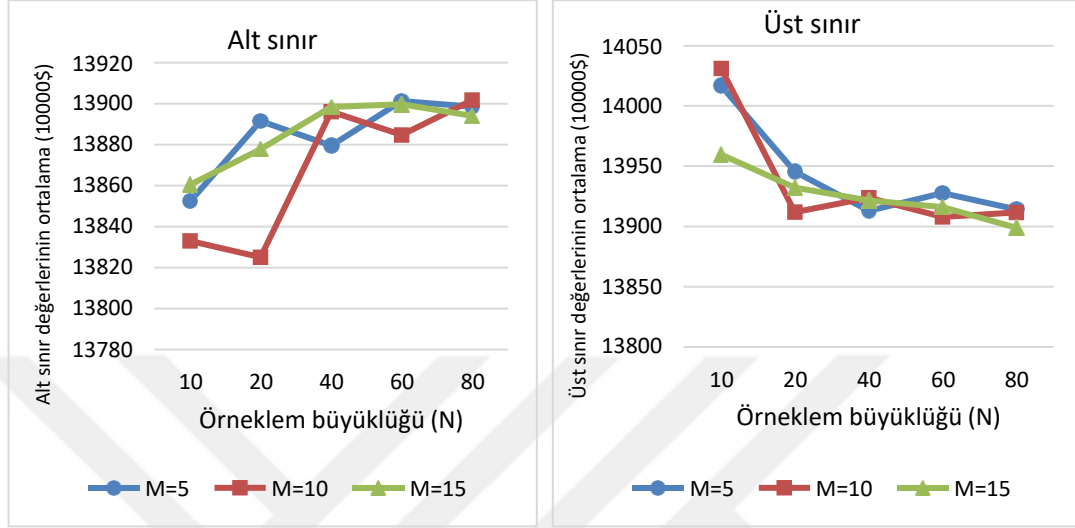
Çizelge 5.10'da ise elde edilen optimalite boşluğu, boşluğun % miktarı ile boşluğun standart sapması ve varyansı hesaplanmıştır. Ayrıca Çizelge 5.10'da her bir tekrardaki optimalite boşluk için %90 güven aralığında maksimum ve minimum güven seviyeleri verilmiştir. SAA algoritmasında yineleme sayısını ve her bir örneklemden senaryo sayısı arttırıldığında, optimalite boşluğu için güven aralığının daraldığı görülmektedir. Dolayısıyla, tekrar sayısını ve örnek boyutunu artırmak problemin optimal çözümüne yaklaştırmaktadır. Tüm senaryolar için elde edilen boşluk oranları %2'nin altındadır. M'nin 15 ve senaryo sayısı N'nin 80 olduğu durumda en küçük boşluk elde edilmiştir. Bu boşluk %0,035 kadardır. Optimalite boşluğunun çok küçük olması ve boşluk yüzdesinin sıfıra yakın bir değer alması, optimal çözüme çok yaklaştığını göstermektedir.

Bu sonuçlara dayanarak amaç fonksiyonunun alt ve üst sınırlarını belirlemek için örnekleme 80 senaryonun kullanılmasının yeterli olduğu görülmüştür. 15 tekrar ve 80 senaryo için %90'luk bir güven seviyesinde, boşluğun maksimum değeri %0,217'dir. SAA yaklaşımı ile %90 anlamlılık derecesinde sonuçların kabul edilebilir olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.10. Ortalama optimalite boşluk ve güven aralığı.

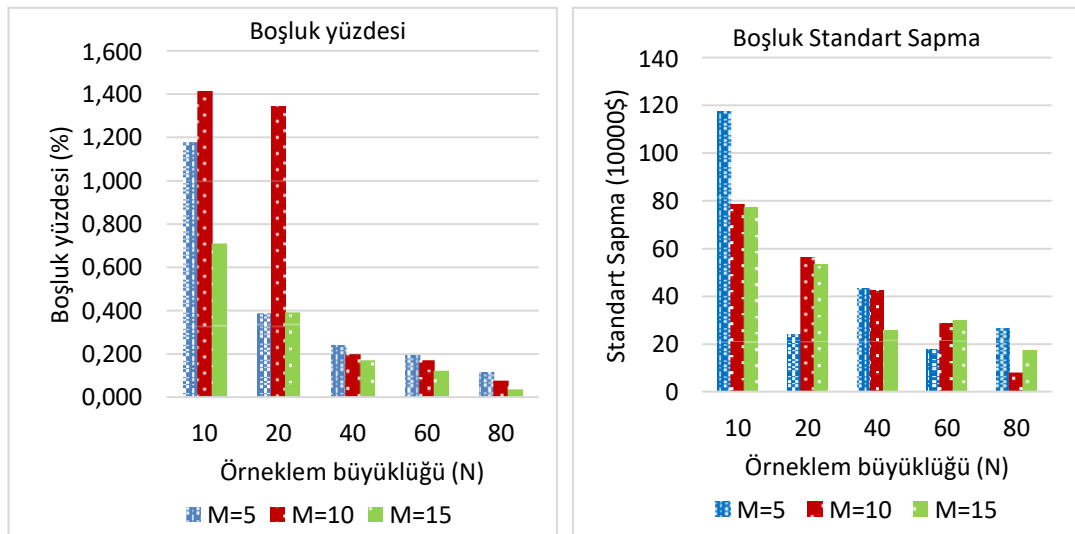
M	N	Ortalama Optimalite Boşluk				%90 güven aralığı			
		Boşluk	%	Varyans	S. Sapma	Maks	%	Min	%
5	10	1.645.700	1,174	1.381.902.600.000	1.175.543,5	3.367.871,3	2,403	-76.471,3	-0,055
	20	539.300	0,387	57.657.600.000	240.120,0	891.075,8	0,639	187.524,2	0,134
	40	335.590	0,241	187.773.960.000	433.328,9	970.416,9	0,697	-299.236,9	-0,215
	60	265.800	0,191	30.798.360.000	175.494,6	522.899,6	0,375	8.700,4	0,006
	80	155.360	0,112	70.830.360.000	266.139,7	545.254,7	0,392	-234.534,7	-0,169
10	10	1.982.700	1,413	616.923.511.111	785.444,8	3.133.376,6	2,233	832.023,4	0,593
	20	1.867.400	1,342	316.496.937.778	562.580,6	2.691.580,6	1,935	1.043.219,4	0,750
	40	275.980	0,198	178.926.501.111	422.997,0	895.670,7	0,643	-343.710,7	-0,247
	60	231.800	0,167	80.313.248.889	283.395,9	646.975,0	0,465	-183.375,0	-0,132
	80	99.470	0,072	6.095.723.333	78.075,1	213.850,0	0,154	-14.910,0	-0,011
15	10	991.933	0,711	593.684.246.349	770.509,1	2.120.729,1	1,519	-136.862,5	-0,098
	20	544.730	0,391	285.193.417.143	534.035,0	1.327.091,3	0,953	-237.631,3	-0,171
	40	231.793	0,166	64.600.452.063	254.166,2	604.146,8	0,434	-140.560,1	-0,101
	60	164.780	0,118	89.415.619.048	299.024,4	602.850,8	0,433	-273.290,8	-0,196
	80	48.743	0,035	29.943.446.349	173.041,7	302.249,5	0,217	-204.762,8	-0,147

Şekil 5.6’da farklı M ve N değerleri için hesaplanan ortalama alt ve üst sınır değerlerini verilmiştir. Tekrar sayısındaki artış, üst sınır için daha küçük ve alt sınır için ise daha büyük değerler elde edilmesine neden olmuştur. N’deki artışında benzer bir etkisi olmuştur.



Şekil 5.6. Farklı M ve N değerleri için alt ve üst sınırlar

Ortalama optimalite boşluğunun yüzde değişim grafiği Şekil 5.7’de (sol taraf) gösterilmektedir. Buna göre M ve N değerinin artmasıyla boşluk oranında ciddi bir azalma görülmüştür. Ortalama optimalite boşluğunun standart sapmasının değişim grafiği de Şekil 5.7’de (sağ taraf) gösterilmektedir. Burada M ve N değerinin arttırılması standart sapma değerini düşürmektedir.



Şekil 5.7. Ortalama optimalite boşluğunun yüzde değişimi ve standart sapmasının değişimi

5.5.1. Modelin farklı varyasyon katsayıları (c_v) için test edilmesi

Önceki bölümde sunulan sonuçlar $c_v = 0,1$ ile üretilen talep değerlerine aittir. Modelin farklı talep senaryolarındaki durumunu analiz etmek için model $c_v = 0,01$ ve $c_v = 0,2$ değeri ile de çözülmüştür. Bilindiği üzere c_v değerinin sıfıra yaklaşması bizi deterministik talep değerlerine yaklaştırır. Yani standart sapma değerinin küçülmesiyle elde edilen talep değerleri arasındaki fark azalır. Fakat c_v 'nin değerinin artması talep değerleri arasındaki farkları artırır. Bu çalışmada farklı talep senaryolarını temsilen üç farklı c_v değeri kullanılmış ve sonuçlar işletmeler bazında karşılaştırılmıştır.

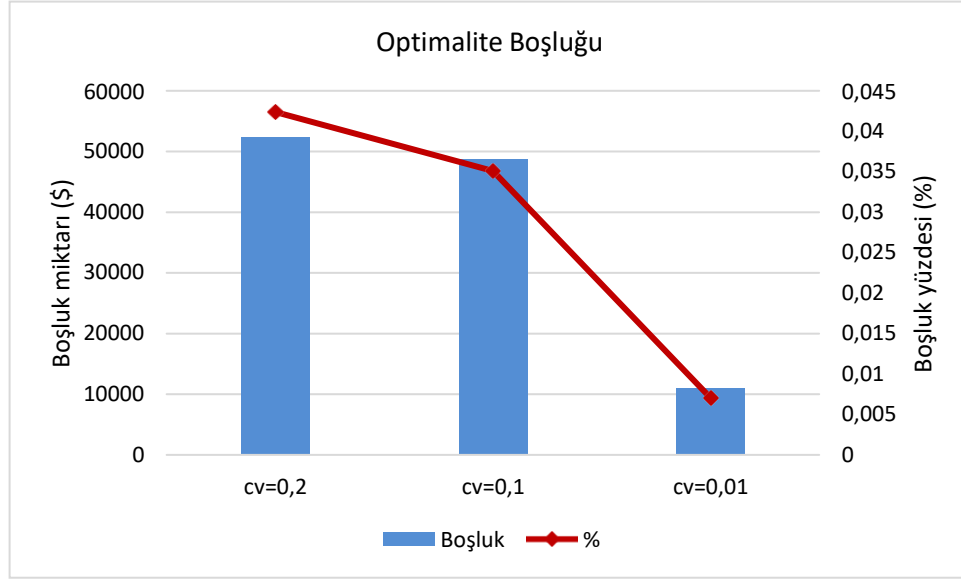
Bu çalışmada $c_v = 0,1$ senaryosu için en iyi sonuçlara $N=80$ ve $M=15$ değerinde ulaşılmıştır. Dolayısıyla $c_v = 0,01$ ve $c_v = 0,2$ değerleri için de model sadece $N=80$ ve $M=15$ değerleri ile model çözülmüştür. Farklı c_v değerleri ile elde edilen sonuçlara ait en iyi ve en kötü değerler ile üst sınır, alt sınır ve boşluk değerleri Çizelge 5.11'de verilmiştir. Çözüm sonuçlarından da görüleceği üzere c_v değeri azaldıkça amaç fonksiyonu iyileşmektedir. Benzer şekilde c_v değeri arttıkça yani talep belirsizliği arttıkça amaç fonksiyonu değeri kötüleşmektedir. Çünkü son ürün talebindeki dalgalanma arttığından belirsizliğe bağlı maliyetlerde artmaktadır. Bu durum işletmelerin elde ettiği geliri düşürdüğü için amaç fonksiyonu değeri de düşmektedir.

c_v değeri azaldıkça boşluk oranı da azaltmaktadır. Çünkü c_v değerinin düşmesi ile talebin varyansı azalmakta ve deterministik senaryoya yaklaşmaktadır. c_v değeri azalmasıyla amaç fonksiyonu değerlerinde dalgalanma azalmakta ve amaç fonksiyonu değerleri birbirine yaklaşmaktadır. Deterministik duruma en yakın senaryoda boşluk oranı %0,007 gibi çok küçük bir değerdir.

Çizelge 5.11. Farklı c_v değerleri için elde edilen sonuçlar

M	N=80		
	$c_v=0,2$	$c_v= 0,1$	$c_v=0,01$
1	123.348.000	139.146.000	154.772.000
2	123.365.000	138.725.000	154.764.000
3	123.434.000	138.822.000	154.770.000
4	123.526.000	138.906.000	154.752.000
5	123.212.000	138.798.000	154.764.000
6	123.287.000	139.079.000	154.742.000
7	123.628.000	138.984.000	154.735.000
8	123.561.000	139.050.000	154.774.000
9	123.438.000	139.139.000	154.738.000
10	123.578.000	139.278.000	154.747.000
11	122.907.000	139.201.000	154.751.000
12	123.089.000	139.046.000	154.761.000
13	123.590.000	138.770.000	154.763.000
14	123.473.000	139.028.000	154.736.000
15	122.782.000	138.880.000	154.754.000
En iyi değer	123.628.000	139.278.000	154.774.000
En kötü değer	122.782.000	138.725.000	154.735.000
Üst sınır	123.347.867	138.990.133	154.754.867
Üst sınır standart sapma	253.892,8	167.547,0	13.217,2
Alt sınır	123.295.600	138.941.390	154.743.973
Alt sınır standart sapma	65.554,8	43.260,4	3.412,7
Boşluk	52.266,7	48.743,3	10.893,7
Boşluk %	0,042	0,035	0,007
Boşluk standart sapma	262.219,4	173.041,7	13.650,7

Farklı c_v değeri için (N=80 ve M=15 değerleri ile) elde edilen çözüm sonuçlarına göre boşluk miktarları ve yüzdeleri Şekil 5.8’de verilmiştir. Görüleceği üzere c_v değeri düştükçe boşluk oranı da düşmektedir. Özellikle $c_v = 0,01$ değerinde boşluk oranı sıfıra çok yakın bir değer almıştır. Bunun nedeni c_v değerinin sıfıra yaklaşmasıyla talep değerlerinin deterministik duruma yaklaşmasıdır. $c_v = 0,01$ değerini için optimalite boşluğu %0,007 gibi çok düşük bir değer almıştır.



Şekil 5.8. Farklı c_v değerleri için boşluk miktarı ve yüzdesi

5.5.2. Sonuçların İşletmeler Bazında İncelenmesi

Bu bölümde iki aşamalı stokastik programlama modelinin $c_v = 0,01$, $c_v = 0,1$, $c_v = 0,2$ değerleri ile çözümünde bulunan en iyi çözüm sonuçları işletmeler bazında analiz edilmiştir.

Çizelge 5.12’de $c_v = 0,01$ değeri için her işletme için periyotlara göre üretilen son ürün, kullanılan hammadde, ortaya çıkan ve kullanılan yan ürün miktarları ile toplam üretim maliyetleri ve toplam kar değerleri sunulmuştur.

Çizelge 5.12. İşletmelerin periyotlara göre üretim ile ilgili sonuçları ($c_v=0,01$)

İşletme	Periyot	Üretilen son ürün (m ³)	Ortaya Çıkan Yan ürün (ton)	Kullanılan Hammadde (ton)	Kullanılan Yan ürün (ton)	Yan ürün stok (ton)	Toplam Maliyet (\$)	Kar (\$)
Kereste	1	98.108,3	58.864,9	156.973,0	-	0	25.340.200	2.130.130
	2	98.085,8	58.851,4	156.937,0	-	0	25.334.400	4.837.430
	3	97.775,5	58.665,4	156.441,0	-	0	25.254.200	4.830.070
	4	98.463,0	59.077,9	157.541,0	-	47.301,1	26.614.300	1.478.050
Kontrplak	1	37.377,8	14.919,7	78.524,9	-	0	10.381.000	17.594.600
	2	37.277,4	14.879,7	78.314,0	-	0	10.353.100	12.938.400
	3	37.399,1	14.928,2	78.569,5	-	0	10.386.900	12.975.100
	4	37.962,0	15.152,9	79.752,0	-	0	10.543.200	13.159.500
Yongalevha	1	74.131,7	13.361,0	77.680,2	31.893,4	0	10.388.600	5.920.360
	2	73.966,5	14.371,1	83.553,0	23.251,6	13.361,1	11.012.900	5.259.710
	3	74.123,4	16.320,9	94.889,1	7.481,8	14.371,1	12.066.400	4.240.770
	4	74.707,0	17.032,9	99.028,3	2.731,9	16.320,9	12.485.300	3.950.250
Liflevha	1	123.940,0	53.699,3	185.170,0	1.851,7	0	25.306.500	13.734.500
	2	123.780,0	50.209,7	173.137,0	35.613,4	13.885,1	25.900.500	14.364.300
	3	123.767,0	48.607,8	167.613,0	51.369,7	11.150,1	26.042.800	14.193.700
	4	124.673,0	53.331,0	183.900,0	8.633,0	10.124,1	25.699.000	14.804.300
Pelet	1	29.837,4	-	563,2	55.752,9	-	1.218.780	2.361.710
	2	29.747,6	-	1.116,0	54.733,7	-	1.247.250	2.322.460
	3	29.769,6	-	1.660,9	53.939,3	-	1.280.820	2.291.530
	4	29.928,2	-	2.200,4	53.411,9	-	1.319.490	2.271.890

Çizelge 5.13’de ise $c_v = 0,1$ değeri için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlar bir önceki $c_v = 0,01$ değeri ile karşılaştırıldığında ağıdaki tüm işletmelerin ürettiği son ürünlerinin değerleri düştüğü ve dolayısıyla işletmelerin karlılığının da düştüğü görülmüştür. Ortaya çıkan yan ürün miktarı, kullanılan hammadde miktarı ve toplam maliyet de üretilen son ürün miktarına bağlı olarak düşmüştür. İşletmeler arasındaki yan ürün akışları, son ürün miktarının düşmesinden dolayı düşmüştür. Fakat aynı işletmeler arasında yan ürün akışları devam etmiştir.

Çizelge 5.13 İşletmelerin periyotlara göre üretim ile ilgili modelin sonuçları ($c_v=0,1$)

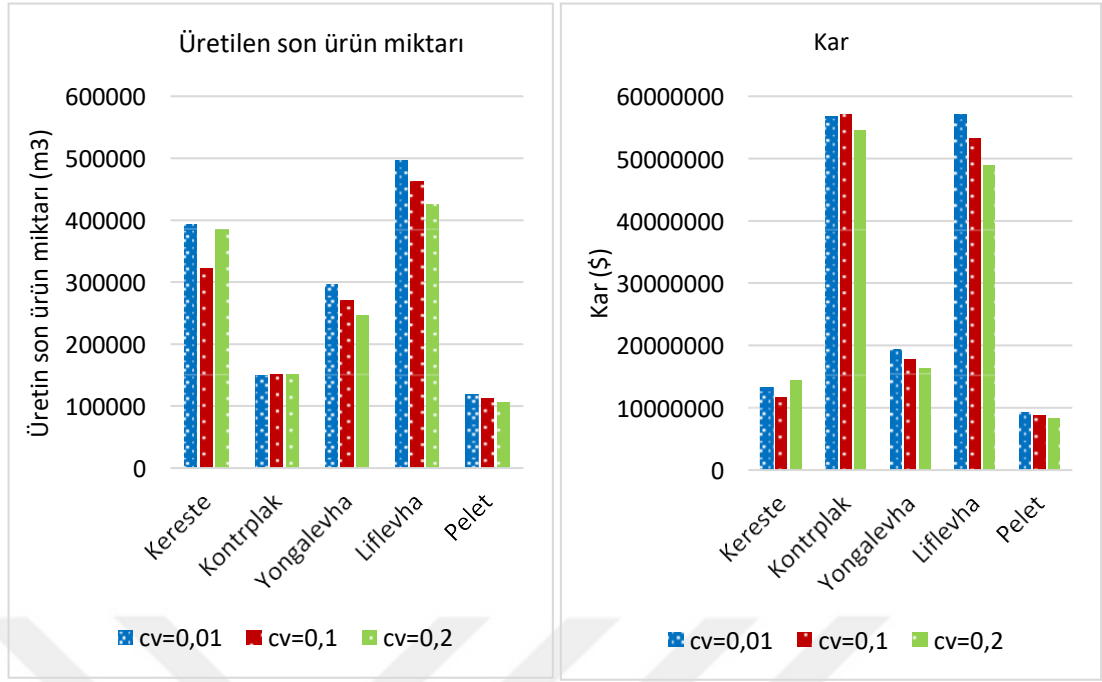
İşletme	Periyot	Üretilen son ürün (m ³)	Ortaya Çıkan Yan ürün (ton)	Kullanılan Hammadde (ton)	Kullanılan Yan ürün (ton)	Yan ürün stok (ton)	Tonlam Maliver (\$)	Kar (\$)
Kereste	1	80.670,9	48.402,8	129.074,0	-	0	20.836.300	1.751.530
	2	81.229,8	48.738,0	129.968,0	-	0	20.980.700	3.990.180
	3	76.494,1	45.896,6	122.391,0	-	0	19.757.500	3.902.780
	4	84.228,8	50.537,3	134.766,0	-	27.110	22.433.100	2.015.200
Kontrplak	1	36.680,0	14.641,2	77.058,7	-	0	10.187.200	17.635.900
	2	35.696,7	14.248,7	74.993,1	-	0	9.914.090	12.411.700
	3	36.114,6	14.415,5	75.871,0	-	0	10.030.100	12.522.000
	4	42.249,9	16.864,5	88.760,4	-	0	11.734.100	14.509.600
Yongalevha	1	66.700,7	10.690,1	62.151,8	39.671,3	0	86.375.300	6.036.640
	2	66.104,8	13.768,2	80.047,6	13.160,1	10.690	10.326.500	4.216.530
	3	65.832,5	14.814,5	86.130,7	4.014,9	13.768	10.893.900	3.589.280
	4	72.347,5	16.180,1	94.070,4	5.240,2	14.815	11.916.200	4.000.250
Liflevha	1	113.817,0	49.313,3	170.046,0	1.700,5	0	23.239.600	12.612.800
	2	112.779,0	45.463,9	156.772,0	35.242,4	13.639	23.647.700	13.019.100
	3	113.196,0	44.685,2	154.087,0	44.723,0	9.088	23.773.700	13.047.200
	4	122.980,0	52.097,3	179.646,0	13.546,2	6.530	25.355.100	14.604.600
Pelet	1	28.054,0	-	529,5	52.420,6	-	1.145.930	2.220.550
	2	27.355,7	-	1.037,7	50.315,4	-	1.147.680	2.135.010
	3	27.932,7	-	1.549,1	50.625,2	-	1.201.240	2.150.680
	4	29.387,7	-	2.080,1	52.571,0	-	1.290.820	2.235.710

Çizelge 5.14’de ise $c_v = 0,2$ değeri için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlar deterministik duruma en yakın değerler ($c_v = 0,01$ değeri ile sonuçlar) ile karşılaştırıldığında ağdaki işletmelerin ürettikleri son ürün değerlerinin daha da düştüğü ve karlılıkların da düştüğü görülmüştür. Bu beklenen bir durumdur. Çünkü c_v değerinin artmasıyla işletmelerin taleplerindeki dalgalanma artmaktadır. Talepteki bu belirsizlik son ürün üretimini azaltmaktadır. Son ürün üretimindeki ($c_v = 0,01$ değeri ile karşılaştırıldığında) bu azalma işletmelerin kullandığı hammadde miktarı, ürettiği yan ürün miktarı, yan ürün stokunu miktarlarını ve maliyetlerini düşürmüştür. Ağdaki işletmelerin kullandığı yan ürün miktarı ise, yongalevha tesisinde son üç dönemde, liflevha tesisinde de ise son dönemde artmış diğer dönemlerde düşmüştür.

Çizelge 5.14. İşletmelerin periyotlara göre üretim ile ilgili sonuçları ($c_v=0,2$)

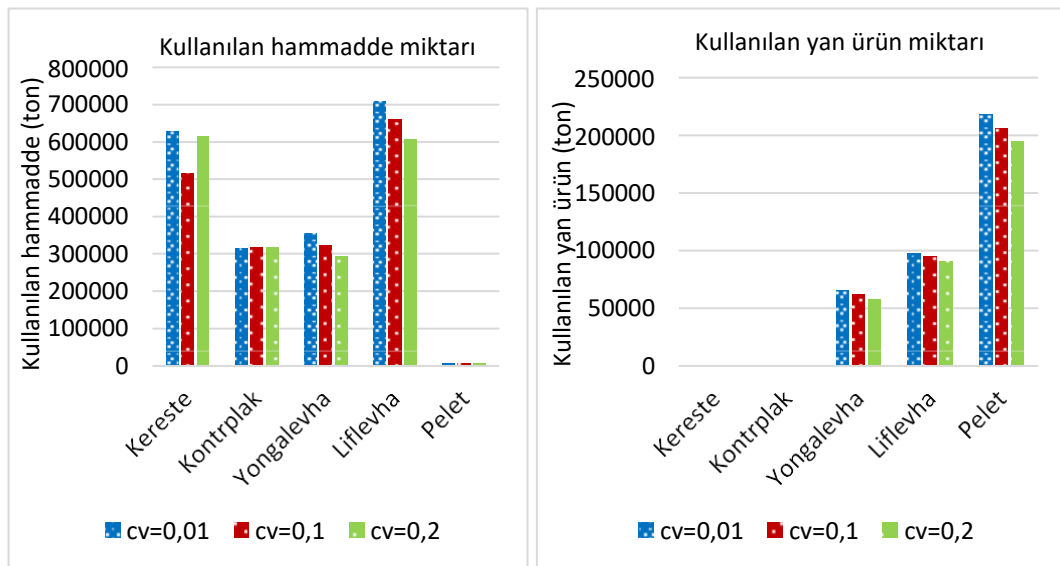
İşletme	Periyot	Üretilen son ürün (m^3)	Ortaya Çıkan Yan ürün (ton)	Kullanılan Hammadde (ton)	Kullanılan Yan ürün (ton)	Yan ürün stok (ton)	Tonlam Maliver (\$)	Kar (\$)
Kereste	1	96.308,1	57.784,9	154.093,0	-	0	24.875.200	2.091.040
	2	95.841,1	57.504,8	153.346,0	-	0	24.754.600	4.739.000
	3	95.520,5	57.312,4	152.833,0	-	0	24.671.800	4.719.150
	4	96.792,1	58.075,1	154.867,0	-	27.190,1	25.680.000	2.807.420
Kontrplak	1	34.300,5	13.691,4	72.059,8	-	0	9.526.310	14.424.000
	2	34.597,1	13.809,8	72.682,9	-	0	9.608.680	11.998.400
	3	35.104,7	14.012,4	73.749,5	-	0	9.749.680	12.169.400
	4	46.665,3	18.626,9	98.036,4	-	0	12.960.400	15.907.600
Yongalevha	1	58.161,7	13.341,7	77.568,3	1.458,2	0	9.674.510	3.121.070
	2	58.935,6	9.467,6	55.044,4	34.871,1	13.341,7	7.736.620	5.229.210
	3	59.870,1	12.502,7	72.690,2	11.646,2	9.467,7	9.368.710	3.802.710
	4	70.101,5	15.089,5	87.729,8	9.926,1	12.502,7	11.219.700	4.202.650
Liflevha	1	103.471,0	44.830,5	154.588,0	1.545,9	0	21.127.000	11.466.200
	2	103.825,0	42.820,2	147.656,0	22.913,7	12.793,7	21.660.000	12.070.200
	3	99.179,6	38.476,0	132.676,0	45.858,4	10.717,2	20.953.900	11.314.900
	4	118.617,0	49.526,5	170.781,0	20.196,1	1.251,6	24.460.200	14.095.300
Pelet	1	27.481,9	-	518,7	51.351,6	-	1.122.560	2.175.270
	2	24.892,1	-	980,6	45.728,4	-	1.046.510	1.940.550
	3	25.364,6	-	1.444,4	45.912,9	-	1.093.080	1.950.660
	4	28.588,9	-	1.961,9	51.236,7	-	1.252.030	2.178.640

ES ağındaki işletmelerin 4 dönemde ürettikleri son ürün miktarları ve kar değerleri farklı c_v değerleri için Şekil 5.9'da karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre işletmelerin ürettiği son ürün miktarı ile karları orantılıdır. Üretilen son ürün miktarları c_v değerlerinin düşmesiyle genelde artmaktadır. Yani işletmelerin son ürün taleplerindeki arasındaki belirsizlik arttıkça ürettikleri son ürün miktarları da düşmektedir. Ağdaki işletmelerden sadece kereste fabrikası için c_v değerleri arttıkça üretilen son ürün miktarı azalmıştır. Kereste fabrikası için karlılıkta benzer şekilde azalmıştır. c_v değerlerinin değişmesi işletmelerin karlılıkları da üretilen son ürün miktarıyla aynı oranda etkilemiştir. Kontrplak fabrikasının ürettiği son ürün miktarı da c_v değerleri arttıkça azalmıştır. Bu işletmenin talep değerleri ağdaki diğer işletmelerden daha düşük olduğu için değişim daha az olmuştur.



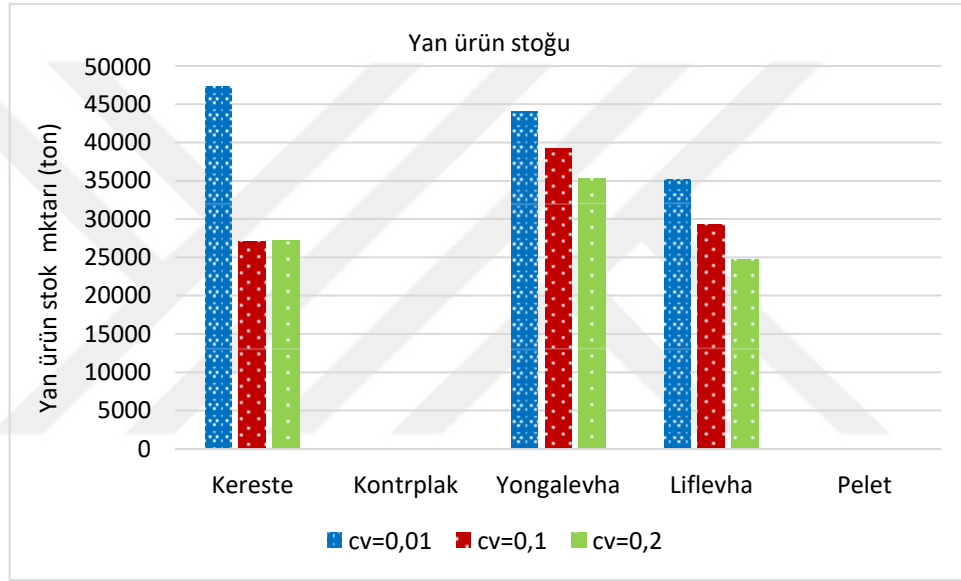
Şekil 5.9. Farklı c_v değerler için işletmelerin ürettiği son ürün miktarları ve karları

ES ağındaki işletmelerin 4 dönemde kullandığı hammadde ve yan ürün miktarları Şekil 5.10'da karşılaştırılmıştır. Bilindiği gibi ağda Kereste ve Kontrplak fabrikaları yan ürün kullanmamaktadırlar. Bu fabrikalar için farklı c_v değerlerinde son ürün talep miktarı değiştikçe kullanılan hammadde miktarı da orantılı olarak değişmektedir. $c_v = 0,01$ senaryosu ile karşılaştırıldığında kullanılan hammadde miktarı talep belirsizliği arttıkça düşmektedir. Bu durum beklenen bir sonuçtur, çünkü talep belirsizliği ile son ürün miktarı da düşmektedir.



Şekil 5.10. Farklı c_v değerler için kullanılan hammadde ve yan ürün miktarları

ES ağındaki işletmelerin 4 dönemdeki yan ürün stok miktarları Şekil 5.11’de verilmiştir. Kontrplak fabrikası ürettiği tüm yan ürünlerini ağıdaki diğer fabrikalara satmıştır, stok yapmamıştır. Pelet tesisi ise yan ürün ortaya çıkarmamaktadır. Dolayısıyla stok yapmamaktadır. Diğer tesisler için ise c_v değerlerinin artmasıyla yan ürün stok miktarının düştüğü görülmektedir. Yan ürün stok miktarının düşmesi işletmeler için olumlu bir durumdur. Yani ES ağındaki talep belirsizliği artıkça yan ürün akışlarında bir olumsuz durum olmadığını göstermektedir. Tüm c_v senaryolarında işletmeler arasında simbiyotik ilişki devam etmekte ve tüm işletmeler karlı durumdadır.



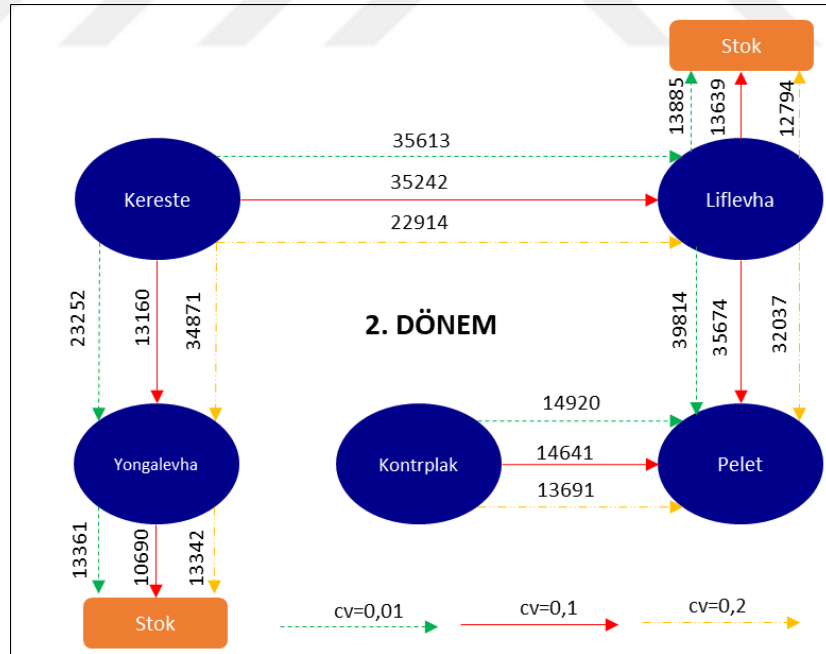
Şekil 5.11. Farklı c_v değerler için yan ürün stok miktarları

Ayrıca farklı c_v değerleri için ağıdaki işletmeler arasındaki yan ürün akışları dönemlere göre de incelenmiştir. 2. dönemde farklı c_v değerleri için işletmeler arasındaki yan ürün akışları Şekil 5.12’de verilmiştir. Şekildeki oklar işletmeler arası yan ürün akışlarını ve miktarlarını (ton) göstermektedir.

Örneğin, $c_v = 0,1$ olduğu durumda Kereste fabrikası 2. dönemdeki yan ürünün bir kısmını (13.160,1 ton) yongalevha tesisine bir kısmını (35.242,4 ton) da liflevha tesisine satmıştır. Üçüncü dönemde ise bir önceki dönemdeki gibi bir kısmını yongalevha tesisine, bir kısmını liflevha tesisine satmıştır. Son dönemde ise %11’ini yongalevha tesisine ve %30’unu liflevha tesisine satmıştır. Geri kalan %59’ini satamamış ve stoklamıştır. Kontrplak fabrikası ortaya çıkardığı yan ürünlerin hepsini

ağdaki Pelet tesisine satmıştır. Yongalevha tesisi diğer işletmelerden yan ürün satın almak için bu ağa dahil olmuştur. Kendisi ise ortaya çıkardığı yan ürünlerin hepsini tesisinde stoklamış diğer işletmelere satamamıştır. Liflevha tesisi ise yan ürünlerinin bir kısmını (%72) pelet tesisine satmış, geri kalan miktarı ise stoklamıştır. Pelet tesisi diğer işletmelerden ortaya çıkan yan ürünleri kullanarak son ürün üretmektedir ve yan ürün ortaya çıkarmamaktadır.

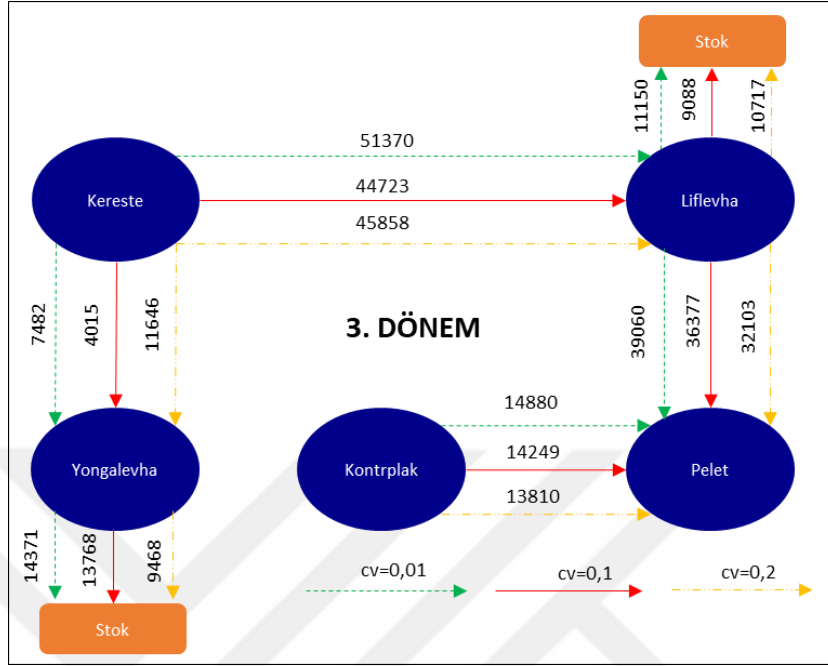
Ayrıca, kereste fabrikası 2. dönem liflevha ve yongalevha tesislerine yan ürün göndermektedir. c_v değeri arttıkça yongalevha tesisine gönderdiği yan ürün miktarı artmakta, liflevha tesisine gönderdiği yan ürün miktarı ise azalmaktadır. Dolayısıyla, c_v değeri değişmesi bu tesis için yan ürün akış miktarını etkilemiştir. Kontrplak fabrikasından pelet tesisine olan yan ürün akışları c_v değerinden etkilenmemiştir. Bu değer arttıkça pelet tesisine gönderilen yan ürün miktarı da düşmektedir. Bu dönemde yongalevha tesisi tüm yan ürünlerini stok olarak tutmuştur. Liflevha tesisi ise yan ürünlerinin bir kısmını stok olarak tutmuş, bir kısmı ise pelet tesisine göndermiştir. c_v değeri arttıkça bu tesisin gönderdiği yan ürün miktarları da düşmektedir.



Şekil 5.12. Farklı c_v değerleri için ikinci dönemdeki işletmeler arası yan ürün akışları

3. dönemde farklı c_v değerleri için oluşan yan ürün akışları Şekil 5.13’de verilmiştir. Kereste ve Kontrplak fabrikalarındaki yan ürün akışları bir önceki dönem göre bir miktar, fakat 2. dönem benzer şekilde olmuştur. Yongalevha tesisinde ise c_v değerinin

artmasıyla stokta tutulan yan ürün miktarı düşmüştür. Liflevha tesisinde ise c_v değerdeki değişim yan ürün akışını bir önceki döneme benzer şekilde etkilemiştir.



Şekil 5.13. Farklı c_v değerleri için üçüncü dönemdeki işletmeler arası yan ürün akışları

Son dönemde farklı c_v değerleri için oluşan yan ürün akışları Şekil 5.14’de verilmiştir. Bu dönem diğer iki dönemden farklı olarak kereste fabrikası yan ürün stoku tutmuştur. Bu yan ürün stokunun oluşmasının nedeni ağdaki diğer işletmelerin son ürünlerini büyük bir kısmını önceki dönemlerde üreterek bu dönem ürettikleri son ürün miktarlarının düşmesidir.

nasıl etkileyeceği incelenmiştir. Gerçek hayatta işletmelerin talepleri belirsizdir ve değişkendir. İşletmelerin ürettikleri son ürünlerin taleplerinin değişmesi ES ağındaki alışverişi etkilemektedir. Çünkü bir işletmede ortaya çıkan yan ürün miktarı o işletmenin ürettiği son ürüne bağlıdır. Bu belirsizlik altında işletmelerin karlılıkları olumsuz etkilenirse ekonomik nedenlerle ağda kalmayacaklardır.

Bu durumu analiz etmek için geliştirilen iki aşamalı stokastik programlama modeli, stokastik talep altında ağa dahil olan işletmelerin karlarını ençoklamayı amaçlamaktır. Talep senaryoları latin hiperküüp örnekleme yöntemi ile elde edilmiştir. Modelin çözümünde ise örnekleme ortalaması yakınsama algoritması kullanılmıştır.

Ayrıca talep dalgalanmalarının etkisini görmek için model farklı değişim katsayıları ($c_v = 0,01$, $c_v = 0,1$ ve $c_v = 0,2$) ile model çözülmüş ve işletmelerin ES ağındaki durumları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar c_v değerinin değişmesiyle yan ürün miktarının değiştiği fakat yan ürün akışının devam ettiği görülmüştür. Aynı şekilde c_v değerinin değişmesi ağdaki işletmelerin karlarını etkilemiş, fakat tüm işletmeler hala karlı durumdadır.

Ağda sadece yan ürün satıcısı olarak yer alan Kereste fabrikasının talebin 2. ve 3. dönemde karlılığı ciddi derece artmıştır. c_v değerinin artmasıyla son ürün talebi düştüğü için karlılıkta orantılı olarak düşmüştür. Yongalevha tesisinin ise son dönemde karlılıkta bir miktar düşüş olmuştur. Talepteki bu belirsizlik sadece yan ürün alıcısı olan pelet tesisi ile hem yan ürün alıcısı hem de satıcısı olan kağıt ve liflevha tesisleri üzerinde çok bir değişiklik yaratmamıştır. Bu ES ağının sürdürülebilirliği için istenilen bir durumdur. Özellikle sadece yan ürün alıcı olan pelet tesisinin belirsiz talep karşısında olumsuz bir durum görülmemiştir. Çünkü pelet tesisi bu ES ağı ile ortaya çıkan ve son ürün üretmek için kullandığı tüm yan ürünleri (sadece yan ürün kullanıyor) ağ içerisinde karşılayan bir işletmedir. Dolayısıyla yan ürün akışının değişmesi en çok bu tesisi etkiler. Tüm c_v senaryolarında pelet tesisinin yan ürün talebinin karşılanması ve karlılığının devam etmesi böyle bir ES ağının stokastik olduğu durum için sürdürülebilir olduğu bir kez daha göstermektedir.

Yongalevha tesisine ortaya çıkan yan ürünler genelde stok olarak tutulmuştur. Bu durum yongalevha tesisi için bir olumsuzluk olarak gözükebilir, fakat işletmeler

ağdaki diğer işletmelerden yan ürün satın alarak ES ağına dahil olmaya devam etmişlerdir. Bu tesis tüm c_v değerleri için yan ürünlerini stok olarak tuttuğu için karlılığı tüm senaryolarda etkilenmemiştir. Yongalevha tesisi gelecek dönemlerde stoktaki yan ürünleri park içine veya dışına satabilir. Ayrıca bu yan ürünü kullanabilecek bir işletmenin ES ağına dahil olmasıyla bu yan ürün ağ içine satılabilir. Dolayısıyla yan ürün akışıyla ES'nin işbirliğinden faydalananak yeni işletmeler ağa dahil olabilir.

Ayrıca, sonuçlar analiz edildiğinde tüm c_v senaryoları için işletmelerin ES ağındaki rolleri aynıdır. Kereste ve Kontrplak fabrikası yan ürün tedarikçisi, yongalevha, liflevha ve pelet tesisleri ise yan ürün alıcısı olarak ağa dahil olmuşlardır. Talepteki stokastik durumun ES ağının sürdürülebilirliğine olumsuz bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Talebin belirsiz olduğu durumda da ES ağında işletmeler arası işbirlikleri devam etmekte ve işletmeler ekonomik kazanımlar sağlamaktadırlar.

BÖLÜM VI

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Son yıllarda çevrenin kirlenmesi ve doğal kaynakların yok olması sonucunda doğanın bize, afetler, aşırı kuraklık ve sel gibi çeşitli şekillerde tepki verdiğini görüyoruz. Bu tepkiler ülkeler için hiç istenmeyen bir durumdur. Bu tip durumların önüne geçmek için çevre yönetimi ile sürdürülebilir kaynak yönetimi hükümetler ve işletmeler için stratejik hedefler arasında yer almaktadır. Son yıllarda temiz ve sürdürülebilir üretimi destekleyen ES projeleri bu hedeflere ulaşmada alternatif yollardan biridir. ES doğadaki simbiyotik hayatın endüstriye uyarlanması olarak tanımlanabilir. ES, işletmelerde üretim sürecinde oluşan atık, yan ürün ve enerjinin işletmelerde tekrar kullanılması şeklinde ifade edilebilir. Bu şekilde işletmeler arasında işbirliği ve sinerji oluşturularak hem ekonomik hem de çevresel kazanımların sağlandığı bilinmektedir. ES ağları, işletmeler arasında kurulabileceği temiz ve sürdürülebilir üretimi benimseyen sanayi bölgelerinde de olabilmektedir. Bu tür sanayi bölgelerine EEP denmektedir ve EEP'ler ES'yi uygulamanın en önemli yoludur.

Birçok farklı sektörde uygulanan ES, özellikle orman endüstrisinde sıklıkla uygulanmıştır. Odunun değerli bir doğal kaynak olması bu durumun başlıca nedenlerinden biridir. Bu çalışmada temel amaç, teorik bir ES ağı kurarak bu ağı yönetmek için matematiksel modeller geliştirmektir. Yapılan literatür çalışmasında orman endüstri temelli ES ağları için matematiksel modellere rastlanmamıştır.

Önerilen tez çalışmasında iki farklı matematiksel model geliştirilmiştir. İlk model işletmelerin ekonomik ve çevresel çıkarlarını ön planda tutan çok amaçlı çok dönemli bir modeldir. Bu modelin verileri YDA ile elde edilmiş ve işletmeler arasında yapılabilecek orman endüstrisi temelli teorik bir EEP tasarlanmıştır. Model ilk olarak, ağırlıklı toplam yöntemi ile eşit ağırlıktaki amaçları göz önünde bulundurarak çözülmüştür. Malzeme değişiminin mevcut olmadığı ilk döneme kıyasla, sonraki

dönemlerde beklenen şekilde maliyetler ve karbon emisyonları azalmıştır. Ayrıca, önemli miktarda su, atık ve yan ürün değişimi gözlenmiştir. Bu bulgular, literatürde tartışılan ES kazanımları ile uyumludur. Orman endüstri temelli bu ES ağında dört periyotta yaklaşık 400 bin ton odun kökenli doğal yan ürün değiş tokuşu olmuştur. Tamamen ağa bağlı çalışan pelet tesisinde pelet üretilip EEP içindeki tesislere satılmıştır. Tesisler ısı elde etmek için peleti kullandığı için yaklaşık 60 bin ton akaryakıt tasarrufu sağlamıştır. Böylece karbon salınımı ciddi derece de düşmüştür. Ayrıca, EEP içindeki su arıtma tesisi sayesinde 220 bin tondan fazla temiz su tasarrufu sağlanmıştır. Dahası, organik gübre üretimi için ağ içinde ortaya çıkan ve ekonomik değeri olmayan kül ile lif çamuru gibi atıklar bertaraf edilmek yerine üretimde kullanılmıştır. Çok amaçlı modelin çözümündeki bu sonuçlar ES'nin beklendiği gibi çalıştığında hem ekonomik hem de çevresel kazanımlar sağlayacağını bir kez daha göstermiştir.

Geliştirilen model hem ağırlıklı toplam hem de ε -kısıt yöntemi ile çözülmüştür. ε -kısıt yöntemi ağırlıklı toplam yöntemine göre daha çok baskın olmayan çözüm noktası bulmuştur. Bu durum karar verici açısından daha çok çözüm anlamına gelmektedir. Karar verici birbirine baskın olmayan bu çözümlerden kendisi için en uygununu seçebilir. Ancak, karar vericinin çözümüne göre işletmelerin ES ağında yapacakları paylaşımın yeniden hesaplanması gerekmektedir. Seçilen çözümler işletmelerin ağdaki rolünü ve ağdaki akışları değiştirebilir.

İkinci model ise iki aşamalı stokastik modeldir. Ağdaki işletmelerin taleplerindeki belirsizliğin işletme karlılığına ve ağın sürdürülebilirliğine etkisinin incelenmesi için önerilen bu model geliştirilen ilk modelin küçültülmüş halidir. Önerilen model SAA algoritması yardımıyla çözülmüştür. Oluşturulan model farklı değişim katsayısı (c_v) değerleri kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. c_v değeri azaldıkça amaç fonksiyonu değeri olan karlılık artmaktadır. Benzer şekilde c_v değeri arttıkça yani talep belirsizliği arttıkça karlılık azalmaktadır. Çünkü son ürün talebindeki dalgalanma arttığından belirsizliğe bağlı maliyetlerde artmaktadır. Bu durum işletmelerin elde ettiği geliri düşürdüğü için karlılık da düşmektedir. c_v değeri azalmasıyla amaç fonksiyonu değerlerinde dalgalanma azalmaktadır. Dolayısıyla optimalite boşluğu da azalmaktadır. Deterministik duruma en yakın senaryo olan $c_v=0,01$ için boşluk oranı %0,007 gibi sıfıra çok yakın bir değerdir. Bunun yanı sıra yan ürün akışlarındaki

işletmelerin rolleri tüm c_v değerinde aynıdır. Yani farklı c_v değerlerinde son ürün miktarları düştüğü için değişilen yan ürün miktarı düşmüş, işletmeler arası yan ürün akışı devam etmiştir. Ağda $c_v=0,01$ için yaklaşık olarak 380 bin ton, $c_v=0,1$ için 370 bin ton ve $c_v=0,2$ için 340 bin ton odun kökenli doğal yan ürün değiş tokuşu olmuştur. Bu da beklenen bir durumdur.

Kullanılan hammadde miktarı talep belirsizliği arttıkça düşmektedir. Bu durum da beklenen bir sonuçtur, çünkü talep belirsizliği ile üretilen son ürün miktarı da düşmektedir. c_v değerlerinin artmasıyla yan ürün stok miktarının düştüğü de görölmektedir. Tüm c_v senaryolarında işletmeler arasında simbiyotik ilişki devam etmektedir. Karlılığı devam eden işletmelerin ağda kalmaya devam etmesi durumunda ise ağın sürdürülebilir olduğu söylenebilir.

6.1. Gelecek alışmalar

Geliştirilen çok amaçlı model ile baskın olmayan bir çözümler kümesi elde edilmiştir. Karar vericilerin bu kümeden daha kolay seçim yapabilmesi için AHP gibi sistematik bir yaklaşımla karar vericilerin tercihleri net bir şekilde belirlenebilir. Ayrıca bu çok amaçlı model işletme ve park yöneticilerin çıkarlarını ön planda tutan iki seviyeli modellerde ifade edilebilir.

İki aşamalı stokastik model ise farklı talep desenleri için test edilebilir. Bu tez çalışmasında işletmelerin taleplerinin her dönem durağan olduğu ve normal dağıldığı varsayılmıştır. Geliştirilen model dönemler arası artan, azalan ve mevsimsel talep desenleri için de test edilebilir. Ayrıca ağda alışverişi yapılan yan ürün maliyetleri ile taşıma maliyetlerinin gibi ağa etkisi olan diğer parametrelerin belirsiz olma durumu da modele dahil edilebilir.

KAYNAKÇA

- Afshari, H., Farel, R., & Peng, Q. (2017). Improving the resilience of energy flow exchanges in eco-industrial parks: Optimization under uncertainty. *ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Eng.*, 3(2).
- Afshari, H., Farel, R., & Peng, Q. (2018a). Challenges of value creation in Eco-Industrial Parks (EIPs): A stakeholder perspective for optimizing energy exchanges. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 315-325.
- Afshari, H., Farel, R., Gurlia, J. P., & Peng, Q. (2016, August). Energy symbioses in Eco-Industrial Parks: models and perspectives. In *International Design Engineering Technical Conferences*, American Society of Mechanical Engineers.
- Afshari, H., Jaber, M. Y., & Searcy, C. (2018b). Extending industrial symbiosis to residential buildings: A mathematical model and case study. *Journal of Cleaner Production*, 183, 370-379.
- Afshari, H., Tosarkani, B. M., Jaber, M. Y., & Searcy, C. (2020). The effect of environmental and social value objectives on optimal design in industrial energy symbiosis: A multi-objective approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104825.
- Aguilar, K. D. T., Chiu, G. M. K., Ubando, A. T., Aviso, K. B., Tan, R. R., & Chiu, A. S. (2017). Bi-level fuzzy optimization model of an algae-sugarcane-based Eco-industrial park. *Chemical Engineering Transactions*, 61, 877-882.
- Aguilar, K. D. T., Ubando, A. T., Culaba, A. B., Aviso, K. B., Tan, R. G. R., & Chiu, A. S. F. (2017 a). Carbon dioxide reduction incentive for eco-industrial parks using bilevel fuzzy programming. In *2017IEEE 9th International Conference on Humanoid, HNICEM* ,(pp. 1-6). IEEE.
- Aissani, L., Lacassagne, A., Bahers, J. B., & Féon, S. L. (2019). Life cycle assessment of industrial symbiosis: A critical review of relevant reference scenarios. *Journal of Industrial Ecology*, 23(4), 972-985.

- Albino, V., Fraccascia, L., & Giannoccaro, I. (2016). Exploring the role of contracts to support the emergence of self-organized industrial symbiosis networks: an agent-based simulation study. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4353-4366.
- Alkaya, E., Böğürcü, M., & Ulutaş, F. (2014). Industrial symbiosis in Iskenderun Bay: a journey from pilot applications to a national program in Turkey. *Technology Development Foundation of Turkey*.
- Alkaya, E., Böğürcü, M., Ulutaş, F., & Demirer, G. N. (2012, June). A new approach to industrial waste recycling in Turkey: Industrial symbiosis in Iskenderun Bay. In *International Conference on Recycling and Reuse* (pp. 4-6), Boğaziçi and İstanbul University, 4 - 6 June, 2012, İstanbul, Turkey.
- Anahtar (2017) Antalya OSB’de Endüstriyel Simbiyoz ve Eko-Verimlilik Projesi” Paydaş Toplantısı ve Çalıştayı Antalya’da Gerçekleştirildi, Temmuz 2017 Sayı: 343 <https://anahtar.sanayi.gov.tr/tr/default>
- Ashton, W. (2008). Understanding the organization of industrial ecosystems: A social network approach. *Journal of Industrial Ecology*, 12(1), 34-51.
- Aviso, K. B. (2014). Design of robust water exchange networks for eco-industrial symbiosis. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(2), 160-170.
- Aviso, K. B., Chiu, A. S., Yu, K. D. S., Promentilla, M. A. B., Razon, L. F., Ubando, A. T., ... & Tan, R. R. (2015). P-graph for optimising industrial symbiotic networks. In *Chemical Engineering Transactions* (pp. 1345-1350). Italian Association of Chemical Engineering-AIDIC.
- Aviso, K. B., Tan, R. R., & Culaba, A. B. (2010 a). Designing eco-industrial water exchange networks using fuzzy mathematical programming. *Clean technologies and environmental policy*, 12(4), 353-363.
- Aviso, K. B., Tan, R. R., Culaba, A. B., & Cruz Jr, J. B. (2010 b). Bi-level fuzzy optimization approach for water exchange in eco-industrial parks. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(1), 31-40.
- Aviso, K. B., Tan, R. R., Culaba, A. B., Foo, D. C., & Hallale, N. (2011). Fuzzy optimization of topologically constrained eco-industrial resource conservation networks with incomplete information. *Engineering Optimization*, 43(3), 257-279.
- Avşar, E., & Demirer, G. N. (2008). Cleaner production opportunity assessment study in SEKA Balıkesir pulp and paper mill. *J. of Clean. Prod.*, 16(4), 422-431.
- Ayres, R. U. (1989). Industrial metabolism. *Technology and environment*, 23-49.

- Ayvaz, B., & Bolat, B. (2013). Kalite ve miktar belirsizlikleri altında geri dönüşüm ağ tasarımı, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
- Ayvaz, B., Bolat, B., & Aydın, N. (2015). Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. Resources, conservation and recycling, 104, 391-404.
- Baas, L. (2008). Industrial symbiosis in the Rotterdam Harbour and Industry Complex: reflections on the interconnection of the techno-sphere with the social system. Business Strategy and the Environment, 17(5), 330-340.
- Bagaram, M. B., & Tóth, S. F. (2020). Multistage sample average approximation for harvest scheduling under climate uncertainty. Forests, 11(11), 1230.
- Bain, A., Shenoy, M., Ashton, W., & Chertow, M. (2010). Industrial symbiosis and waste recovery in an Indian industrial area. Resources, Conservation and Recycling, 54(12), 1278-1287.
- Bard, J. F., (1998) Practical Bilevel Optimization: Algorithms and Applications (Vol. 30). Springer Science & Business Media.
- Bansal, P., & McKnight, B. (2009). Looking forward, pushing back and peering sideways: analyzing the sustainability of industrial symbiosis. Journal of Supply Chain Management, 45(4), 26-37.
- BEBKA (2014), Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı 2014 Yılı Mali Destek Programları Etki Değerlendirmesi Raporu
- BEBKA (2019) Eskişehir ili Endüstriyel Simbiyoz Olanaklarının Araştırılması Projesi, Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı (BEBKA), Bursa
- Behera, S. K., Kim, J. H., Lee, S. Y., Suh, S., & Park, H. S. (2012). Evolution of designed industrial symbiosis networks in the Ulsan Eco-industrial Park: research and development into business as the enabling framework. Journal of Cleaner Production, 29, 103-112.
- Bichraoui, N., Guillaume, B., & Halog, A. (2013). Agent-based modelling simulation for the development of an industrial symbiosis-preliminary results. Procedia Environmental Sciences, 17, 195-204.
- Birge, J. R., & Louveaux, F. (1997). Two-Stage Linear Recourse Problems. Introduction to Stochastic Programming, 155-197.
- Bissett, C. R. (2014). Mathematical models for eco-industrial networks, Master's Theses, Industrial and Systems Engineering, University Of Rhode Island

- Boix, M., Montastruc, L., Azzaro-Pantel, C., & Domenech, S. (2015). Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 87, 303-317.
- Boix, M., Montastruc, L., Pibouleau, L., Azzaro-Pantel, C., & Domenech, S. (2012). Industrial water management by multiobjective optimization: from individual to collective solution through eco-industrial parks. *Journal of Cleaner Production*, 22(1), 85-97.
- Boons, F., & Baas, L. (2006, August). Industrial symbiosis in a social science perspective. In Discussion proposal for the Third Industrial Symbiosis Research Symposium, Birmingham, UK.
- Bossilkov, A., van Beers, D., & van Berkel, R. (2005). Industrial symbiosis as an integrative business practice in the Kwinana industrial area: Lessons learnt and ways forward. In Proc. 11th Inter. Sustainable Development Research Conference.
- Brundtland, G. H. (1987). Our common future—Call for action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291-294.
- Bungener, S. L., Van Eetvelde, G., & Maréchal, F. (2016). Optimal operations and resilient investments in steam networks. *Frontiers in Energy Research*, 4, 1.
- Butturi, M. A., Lolli, F., Sellitto, M. A., Balugani, E., Gamberini, R., & Rimini, B. (2019). Renewable energy in eco-industrial parks and urban-industrial symbiosis: A literature review and a conceptual synthesis. *Applied Energy*, 255, 113825.
- Bütün, H., Kantor, I., & Maréchal, F. (2019). Incorporating location aspects in process integration methodology. *Energies*, 12(17), 3338.
- Cao, X., Wen, Z., Xu, J., De Clercq, D., Wang, Y., & Tao, Y. (2020). Many-objective optimization of technology implementation in the industrial symbiosis system based on a modified NSGA-III. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118810.
- Capelleveen, G. C. (2020). Industrial Symbiosis Recommender Systems, Ph.D. dissertation, University of Twente, Department of Industrial Engineering and Business Information Systems, Netherlands
- Caramia, M., & Dell’Olmo, P. (2020). Multi-objective optimization. In *Multi-objective management in freight logistics* (pp. 21-51). Springer, Cham.
- Carlsson, D., & Rönnqvist, M. (2005). Supply chain management in forestry—case studies at Södra Cell AB. *European J. of Operational Research*, 163(3), 589-616.
- Carr, A. J. P. (1998). Choctaw Eco-Industrial Park: an ecological approach to industrial land-use planning and design. *Land. and urban plan.*, 42(2), 239-257.

- Castiglione, C., & Alfieri, A. (2019). Supply chain and eco-industrial park concurrent design. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1313-1318.
- Cecelja, F., Raafat, T., Trokanas, N., Innes, S., Smith, M., Yang, A., Zorgios, Y., Korkofygas, A., Kokossis, A., (2014), e-Symbiosis: technology-enabled support for industrial symbiosis targeting small and medium enterprises and innovation. *J. Clean. Prod.* 98, 336–352.
- Celik. B. (2011) Pellet üretim tesisinin fizibilitesi: Bartın Örneği. Master's thesis, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- Cerceau, J., Mat, N., Junqua, G., Lin, L., Laforest, V., & Gonzalez, C. (2014). Implementing industrial ecology in port cities: international overview of case studies and cross-case analysis. *Journal of Cleaner Production*, 74, 1-16.
- Chae, S. H., Kim, S. H., Yoon, S. G., & Park, S. (2010). Optimization of a waste heat utilization network in an eco-industrial park. *Applied Energy*, 87(6), 1978-1988.
- Chankong, V., & Haimes, Y. Y. (1983). Optimization-based methods for multiobjective decision-making-an overview. *Large Scale Systems in Information and Decision Technologies*, 5(1), 1-33.
- Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual review of energy and the environment*, 25(1), 313-337.
- Chertow, M. R. (2007). "Uncovering" industrial symbiosis. *Journal of industrial Ecology*, 11(1), 11-30.
- Chertow, M., & Ehrenfeld, J. (2012). Organizing self-organizing systems: Toward a theory of industrial symbiosis. *Journal of industrial ecology*, 16(1), 13-27.
- Chertow, M., & Park, J. (2016). Scholarship and practice in industrial symbiosis: 1989–2014. In *Taking stock of industrial ecology* (pp. 87-116). Springer, Cham.
- Chopra, S. S., & Khanna, V. (2014). Understanding resilience in industrial symbiosis networks: Insights from network analysis. *Journal of environmental management*, 141, 86-94.
- Christensen, J. (2006). The History of the Industrial Symbiosis at Kalundborg, Denmark. In *Scientific Workshop 'Frontiers of Research in Industrial Ecology*.
- Cimren, E., Fiksel, J., Posner, M. E., & Sikdar, K. (2011). Material flow optimization in by-product synergy networks. *Journal of Industrial Ecology*, 15(2), 315-332.
- Claro, J., & de Sousa, J. P. (2010). A multiobjective metaheuristic for a mean-risk static stochastic knapsack problem. *Computational Optimization and Applications*, 46(3), 427-450.

- Costa, I., & Ferrão, P. (2010). A case study of industrial symbiosis development using a middle-out approach. *Journal of Cleaner Production*, 18(10-11), 984-992.
- Cui, Y., Geng, Z., Zhu, Q., & Han, Y. (2017). Multi-objective optimization methods and application in energy saving. *Energy*, 125, 681-704.
- Curri, D., Aziz, T., Baugh, J., & Johnson, J. (2021, January). Industrial Symbiosis Waste Exchange Identification and Optimization. In *Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences* (p. 916).
- da Paixao Cansado, I. P., Belo, C. R., & Mourão, P. A. M. (2018). Valorization of Tectona Grandis tree sawdust through the production of high activated carbon for environment applications. *Bioresource technology*, 249, 328-333.
- da Silva, F. A., Simioni, F. J., & Hoff, D. N. (2020). Diagnosis of circular economy in the forest sector in southern Brazil. *Science of The Total Environment*, 706, 135973.
- Daddi, T., Nucci, B., & Iraldo, F. (2017). Using Life Cycle Assessment (LCA) to measure the environmental benefits of industrial symbiosis in an industrial cluster of SMEs. *Journal of Cleaner Production*, 147, 157-164.
- D'amours, S., Rönnqvist, M., & Weintraub, A. (2008). Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. *INFOR: information systems and operational research*, 46(4), 265-281.
- Dantzig, G. B., & Medansky, A. (1961, January). On the Solution of Two-stage Linear Programs under Uncertainty. In *Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, University of California Press.
- Davey, K. R. (2008). Latin hypercube sampling and pattern search in magnetic field optimization problems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(6), 974-977.
- Dayaniklioglu, S (2004), Türkiye’de lif levha ve yonga levha sektörünün durumu, Avrupa birliği ilkeleriyle karşılaştırılması, problemleri ve çözüm yolları. Master’s thesis.
- Deb, K., (2001) *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN 0-471-87339-X
- Demirer, G.N., (2014), Ankara OSTİM Organize Sanayi Bölgesinde Endüstriyel Simbiyoz Olanaklarının Belirlenmesi, Mevlana Kalkınma Ajansı, <http://www.mevka.org.tr/Yukleme/Uploads/DsyFYRgrF713201755338PM.pdf> (Erişim tarihi 27.09.2019)

- Demirer, G.N., (2015), Gaziantep Sanayisi için Belirlenen Endüstriyel Simbiyoz Olanakları, Gaziantep Endüstriyel Simbiyoz Projesi, Bilgilendirme Toplantısı, İpek Yolu Kalkınma Ajansı 22 Aralık 2015, <http://gaziantepsimbiyoz.org/files/dokumanlar/G%C3%B6ksel%20Demirer%202.pdf> (27.09.2019)
- Desrochers, P. (2001). Cities and industrial symbiosis: Some historical perspectives and policy implications. *Journal of industrial ecology*, 5(4), 29-44.
- Desrochers, P. (2004). Industrial symbiosis: the case for market coordination. *Journal of Cleaner Production*, 12(8-10), 1099-1110.
- Desrochers, P., & Leppälä, S. (2010). Industrial symbiosis: old wine in recycled bottles? Some perspective from the history of economic and geographical thought. *International Regional Science Review*, 33(3), 338-361.
- Doménech, T., & Davies, M. (2009). The social aspects of industrial symbiosis: the application of social network analysis to industrial symbiosis networks. *Progress in Industrial Ecology, an International Journal*, 6(1), 68-99.
- Domenech, T., & Davies, M. (2011). Structure and morphology of industrial symbiosis networks: The case of Kalundborg. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 10, 79-89.
- Dong, H., Ohnishi, S., Fujita, T., Geng, Y., Fujii, M., & Dong, L. (2014). Achieving carbon emission reduction through industrial & urban symbiosis: A case of Kawasaki. *Energy*, 64, 277-286.
- Dong, L., Liang, H., Zhang, L., Liu, Z., Gao, Z., & Hu, M. (2017). Highlighting regional eco-industrial development: Life cycle benefits of an urban industrial symbiosis and implications in China. *Ecological Modelling*, 361, 164-176.
- Dong, L., Zhang, H., Fujita, T., Ohnishi, S., Li, H., Fujii, M., & Dong, H. (2013). Environmental and economic gains of industrial symbiosis for Chinese iron/steel industry: Kawasaki's experience and practice in Liuzhou and Jinan. *Journal of Cleaner Production*, 59, 226-238.
- Dunn, B. C., & Steinemann, A. (1998). Industrial ecology for sustainable communities. *J. of Envir. Plan. and Mang.*, 41(6), 661-672.
- Eckelman, M. J., & Chertow, M. R. (2013). Life cycle energy and environmental benefits of a US industrial symbiosis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(8), 1524-1532.

- EEA (2016) European Environment Agency: Waste: a problem or a resource.
<http://www.eea.europa.eu/signals/signals-2014/articles/waste-a-problem-or-a-resource>. Accessed Mar 2016
- Ehrenfeld, J., & Gertler, N. (1997). Industrial ecology in practice: the evolution of interdependence at Kalundborg. *Journal of industrial Ecology*, 1(1), 67-79.
- Emelogu, A., Chowdhury, S., Marufuzzaman, M., Bian, L., & Eksioglu, B. (2016). An enhanced sample average approximation method for stochastic optimization. *International Journal of Production Economics*, 182, 230-252.
- EPA (2014), U.S. Environmental Protection Agency, Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2011, 2014, <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/pubs/msw2009-fs.pdf>
- EQUA (2015), The equa carbon dioxide index, January 2015. URL <https://equaindex.com/equa-carbon-dioxide/>.
- EUA (2018) (European Emission Allowances). The european energy exchange ag, October 2018. URL <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/spot-market/european-emission-allowances#!/2018/10/26>.
- European Commission (2016): Circular Economy Package: Questions and Answers. Guidance Document. http://europa.eu/rapid/pressrelease_MEMO-15-6204_en.htm. Accessed 15 May 2016
- European Commission, (2013) “Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of The Regions, A new EU Forest Strategy: for forests and the forest-based sector”, Brussels.
- European statistics. (2018) Electricity price statistics, January 2018. https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Electricity_price
- EUROSTAT, (2014) Municipal waste statistics, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Municipal_waste_statistics
- Evans, G. W. (1984). An overview of techniques for solving multiobjective mathematical programs. *Management Science*, 30(11), 1268-1282.
- Fan, E. (2016). A Location-Inventory Problem for Customers with Time Constraints, McMaster University, Master of Applied Science Master Thesis.
- FAO (1982) Classification and definitions of forest product. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Supplement 14 to Volume XXXIV of the Timber Bulletin for Europe, Geneva, Switzerland., 1982.

- FAO (2020) Global Forest Resource Assessm, Forestry Production and Trade, <http://www.fao.org/state-of-forests/en/>
- Fichtner, W., Tietze-Stöckinger, I., Frank, M., & Rentz, O. (2005). Barriers of interorganisational environmental management: Two case studies on industrial symbiosis. *Progress in Industrial Ecology, an International Journal*, 2(1), 73-88.
- FISSAC (2019) Fostering Industrial Symbiosis for a Sustainable Resource Intensive Industry across the extended Construction Value Chain <https://fissacproject.eu/tr/proje/>
- Fleig, A. K. (2000). Eco-industrial parks: A strategy towards industrial ecology in developing and newly industrialized countries. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Fraccascia, L., & Yazan, D. M. (2018). The role of online information-sharing platforms on the performance of industrial symbiosis networks. *Resources, conservation and recycling*, 136, 473-485.
- Francescato, V. Antonini, E and et al (2008) Wood fuels handbook, production, quality requirements, trading. Technical report, AIEL-Italian Agriforestry Energy Association, Legnaro, Italy.
- Francis, R. L., McGinnis, L. F., & White, J. A. (1992). Facility layout and location: an analytical approach. Pearson College Division.
- Frosch, R. A., & Gallopoulos, N. E. (1989). Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 261(3), 144-153.
- Geng, Y., Liu, Z., Xue, B., Dong, H., Fujita, T., & Chiu, A. (2014). Emergy-based assessment on industrial symbiosis: a case of Shenyang Economic and Technological Development Zone. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(23), 13572-13587.
- Geng, Y., Tsuyoshi, F., & Chen, X. (2010). Evaluation of innovative municipal solid waste management through urban symbiosis: a case study of Kawasaki. *Journal of Cleaner Production*, 18(10-11), 993-1000.
- George, D. A., Lin, B. C. A., & Chen, Y. (2015). A circular economy model of economic growth. *Environmental modelling & software*, 73, 60-63.
- Gibbs, D. (2008). Industrial symbiosis and eco-industrial development: An introduction. *Geography Compass*, 2(4), 1138-1154.
- Gonela, V., & Zhang, J. (2014). Design of the optimal industrial symbiosis system to improve bioethanol production. *Journal of cleaner production*, 64, 513-534.

- Gonela, V., (2013), Stochastic Optimization of Sustainable Industrial Symbiosis Based Hybrid Generation Bioethanol Supply Chains, Ph.D. Dissertation, North Dakota State University of Agriculture and Applied Science, Industrial and Manufacturing Engineering, Fargo, North Dakota.
- Gonela, V., Zhang, J., & Osmani, A. (2015). Stochastic optimization of sustainable industrial symbiosis based hybrid generation bioethanol supply chains. *Computers & industrial engineering*, 87, 40-65.
- Grann, H. (1997). The industrial symbiosis at Kalundborg. The Industrial Green Game: Implications for Environmental Design and Management', National academy Press, Washington DC, pp117-123.
- Grant, G. B., Seager, T. P., Massard, G., & Nies, L. (2010). Information and communication technology for industrial symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5), 740-753.
- Grimm, N. B., Foster, D., Groffman, P., Grove, J. M., Hopkinson, C. S., Nadelhoffer, K. J., ... & Peters, D. P. (2008). The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(5), 264-272.
- Grosskurth, J., & Rotmans, J. (2005). The scene model: getting a grip on sustainable development in policy making. *Environment, development and sustainability*, 7(1), 135-151.
- Gu, C., Estel, L., Yassine, A., & Leveneur, S. (2013, b). A multiobjective optimization model for designing and optimizing an ecological industrial park. In 2013 Ninth International Conference on ICNC (pp. 595-600). IEEE.
- Gu, C., Leveneur, S., Estel, L., & Yassine, A. (2013a). Modeling and optimization of material/energy flow exchanges in an eco-industrial park. *Energy Procedia*, 36, 243-252.
- Güder, E. (2013). Türkiye'deki Organize Sanayi Bölgeleri ve Endüstri Bölgelerinin Eko Endüstriyel Parklara Dönüşümü, 3. Sanayi Şurası, Bilimsel Tebliğ, Ankara
- Guo, B., Geng, Y., Sterr, T., Dong, L., & Liu, Y. (2016). Evaluation of promoting industrial symbiosis in a chemical industrial park: A case of Midong. *Journal of Cleaner Production*, 135, 995-1008.
- Heeres, R. R., Vermeulen, W. J., & De Walle, F. B. (2004). Eco-industrial park initiatives in the USA and the Netherlands: first lessons. *Journal of cleaner production*, 12(8-10), 985-995.

- Hein, A. M., Jankovic, M., Farel, R., Sam, L. I., & Yannou, B. (2015, November). Modeling industrial simbiyoz using design structure matrices. In 17 th International Dependency and Structure Modeling Conference, DSM 2015.
- Henriques, J. D., Azevedo, J., Dias, R., Estrela, M., Ascenço, C., Vladimirova, D., & Miller, K. (2021). Implementing Industrial Symbiosis Incentives: an Applied Assessment Framework for Risk Mitigation. *Circular Economy and Sustainability*, 1-24.
- Herczeg, G. (2016). Supply chain management in industrial symbiosis networks, Ph.D. Dissertation, Technical University of Denmark, DTU Management Engineering, Denmark.
- Herczeg, G., Akkerman, R., & Hauschild, M. Z. (2018). Supply chain collaboration in industrial symbiosis networks. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1058-1067.
- Hildebrandt, J., O'Keeffe, S., Bezama, A., & Thrän, D. (2019). Revealing the Environmental Advantages of Industrial Symbiosis in Wood-Based Bioeconomy Networks: An Assessment from a Life Cycle Perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 23(4), 808-822.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (1990). Introduction to stochastic models in operations research. McGraw-Hill Companies.
- Hoefnagels, R., Junginger, M., & Faaij, A. (2014). The economic potential of wood pellet production from alternative, low-value wood sources in the southeast of the US. *biomass and bioenergy*, 71, 443-454.
- Hope, E. S., McKenney, D. W., Allen, D. J., & Pedlar, J. H. (2017). A cost analysis of bioenergy-generated ash disposal options in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(9), 1222-1231.
- Huang, L., Zhen, L., & Yin, L. (2020). Waste material recycling and exchanging decisions for industrial symbiosis network optimization. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124073.
- Huang, M., Wang, Z., & Chen, T. (2019). Analysis on the theory and practice of industrial symbiosis based on bibliometrics and social network analysis. *Journal of cleaner production*, 213, 956-967.
- Iacondini, A., Mencherini, U., Passarini, F., Vassura, I., Fanelli, A., & Cibotti, P. (2015). Feasibility of industrial symbiosis in Italy as an opportunity for economic development: Critical success factor analysis, impact and constraints of the specific Italian regulations. *Waste and biomass valorization*, 6(5), 865-874.

- Illsley, B., Jackson, T., & Lynch, B. (2007). Addressing Scottish rural fuel poverty through a regional industrial symbiosis strategy for the Scottish forest industries sector. *Geoforum*, 38(1), 21-32.
- ISKI (2019) Istanbul water and sewerage administration (ISKI). statistics on istanbul. wastewater management data. indices data, November 2019. URL <http://www.iski.istanbul/web/en-US>.
- Ismail, Y., & Zagloel, T. Y. M. (2014). Industrial symbiosis at supply chain. *Int. J. Bus. Econ. Law*, 4(1), 2289-1552.
- ISO (2006) 14040 International Organization for Standardization, Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. in: European committee for standardization. Technical report, Geneva, Switzerland, 2006.
- ITC (2020), International Trade Center (ITC), Trade Statistics For International Business Development. <http://www.trademap.org>
- Jackson, T. (2005). Exploring the economics of industrial ecology through case studies of industrial symbiosis in the forest industries of British Columbia and Scotland. *Progress in Industrial Ecology, An International Journal*, 2(2), 166-184.
- Jahan-Latibari, A., & Roohnia, M. (2010). Potential of utilization of the residues from poplar plantation for particleboard production in Iran. *Journal of Forestry Research*, 21(4), 503-508.
- Jamal, J., & Montemanni, R. (2018). Industrial Cluster Symbiosis Optimisation Based on Linear Programming. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2(4), 353-364.
- Kafali, M., Aydin, N., Genc, Y., & Çelebi, U. B. (2019). A two-stage stochastic model for workforce capacity requirement in shipbuilding. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 1-13.
- Kaiser, J. (1999). In this Danish industrial park, nothing goes to waste.
- Kamble, S. J., Singh, A., & Kharat, M. G. (2018). Life cycle analysis and sustainability assessment of advanced wastewater treatment technologies. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*.
- Kantor, I., Robineau, J. L., Bütün, H., & Maréchal, F. (2020). A mixed-integer linear programming formulation for optimizing multi-scale material and energy integration. *Frontiers in Energy Research*, 8, 49.

- Karlsson, M., & Wolf, A. (2008). Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry. *Journal of Cleaner Production*, 16(14), 1536-1544.
- Kastner, C. A., Lau, R., & Kraft, M. (2015). Quantitative tools for cultivating symbiosis in industrial parks; a literature review. *Applied Energy*, 155, 599-612.
- Kauppi, P. E., Sandström, V., & Lipponen, A. (2018). Forest resources of nations in relation to human well-being. *PloS one*, 13(5), e0196248.
- Keckler, S. E., & Allen, D. T. (1999). Material reuse modeling: a case study of water reuse in an industrial park. *Journal of Industrial Ecology*, 2(4), 79-92.
- Kerdlap, P., Low, J. S. C., Tan, D. Z. L., Yeo, Z., & Ramakrishna, S. (2020). M3-IS-LCA: a methodology for multi-level life cycle environmental performance evaluation of industrial symbiosis networks. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104963.
- Kim, H. W., Dong, L., Jung, S., & Park, H. S. (2018). The Role of the Eco-Industrial Park (EIP) at the national economy: An input-output analysis on Korea. *Sustainability*, 10(12), 4545.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 32(4), 297-336.
- Kleywegt, A. J., Shapiro, A., & Homem-de-Mello, T. (2002). The sample average approximation method for stochastic discrete optimization. *SIAM Journal on Optimization*, 12(2), 479-502.
- Klugman, S., Karlsson, M., & Moshfegh, B. (2007). A Scandinavian chemical wood-pulp mill. Part 2. International and model mills comparison. *Applied Energy*, 84(3), 340-350.
- Kolluri, S. S., Esfahani, I. J., & Yoo, C. (2016). Robust fuzzy and multi-objective optimization approaches to generate alternate solutions for resource conservation of eco-industrial park involving various future events. *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 424-441.
- Koopmans, T. C. (1951). *Activity Analysis of Production and Allocation*, Cowles Commission for Research in Economics Monograph No. 13, pages 33–97. John Wiley & Sons, New

- Korhonen, J. (2000). Completing the industrial ecology cascade chain in the case of a paper industry—SME potential in industrial ecology. *Eco-Management and Auditing: The Journal of Corporate Environmental Management*, 7(1), 11-20.
- Korhonen, J. (2004). Industrial ecology in the strategic sustainable development model: strategic applications of industrial ecology. *Journal of Cleaner Production*, 12(8-10), 809-823.
- Korhonen, J., & Niutanen, V. (2003). Material and energy flows of a local forest industry system in Finland. *Sustainable Development*, 11(3), 121-132.
- Korhonen, J., & Snäkin, J. P. (2003). Industrial ecosystem evolution of North Karelia heating energy system. *Regional Environmental Change*, 3(4), 128-139.
- Korhonen, J., & Snäkin, J. P. (2005). Analysing the evolution of industrial ecosystems: concepts and application. *Ecological Economics*, 52(2), 169-186.
- Korhonen, J., Wihersaari, M., & Savolainen, I. (2001). Industrial ecosystem in the Finnish forest industry: using the material and energy flow model of a forest ecosystem in a forest industry system. *Ecological Economics*, 39(1), 145-161.
- Kuznetsova, E., Louhichi, R., Zio, E., & Farel, R. (2017). Input-output Inoperability Model for the risk analysis of eco-industrial parks. *Journal of Cleaner Production*, 164, 779-792.
- Law. Turkish Law no: 7033. Organized industrial zones law and wastewater fee, June 2017. URL <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/07/20170701-21.htm>.
- Lawal, M., Alwi, S. R. W., Manan, Z. A., & Ho, W. S. (2021). Industrial symbiosis tools—A review. *Journal of Cleaner Production*, 124327.
- Laybourn, P., & Lombardi, D. R. (2012). Industrial symbiosis in European policy. *Journal of Industrial Ecology*, 16(1), 11-12.
- Leigh, M., & Li, X. (2015). Industrial ecology, industrial symbiosis and supply chain environmental sustainability: a case study of a large UK distributor. *Journal of Cleaner Production*, 106, 632-643.
- Leong, Y. T., Lee, J. Y., Tan, R. R., Foo, J. J., & Chew, I. M. L. (2017). Multi-objective optimization for resource network synthesis in eco-industrial parks using an integrated analytic hierarchy process. *J. of Clean. Prod.*, 143, 1268-1283.
- Li, J., Pan, S. Y., Kim, H., Linn, J. H., & Chiang, P. C. (2015). Building green supply chains in eco-industrial parks towards a green economy: Barriers and strategies. *Journal of environmental management*, 162, 158-170.

- Li, X. (2018). Industrial ecology and industrial symbiosis-definitions and development histories. In *Industrial Ecology and Industry Symbiosis for Environmental Sustainability* (pp. 9-38). Palgrave Pivot, Cham.
- Liao, Z. W., Wu, J. T., Jiang, B. B., Wang, J. D., & Yang, Y. R. (2007). Design methodology for flexible multiple plant water networks. *Industrial & engineering chemistry research*, 46(14), 4954-4963.
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of cleaner production*, 115, 36-51.
- Lombardi, D. R., & Laybourn, P. (2012). Redefining industrial symbiosis: Crossing academic-practitioner boundaries. *Journal of Industrial Ecology*, 16(1), 28-37.
- Long, Y., Chew, E. P., & Lee, L. H. (2015). Sample average approximation under non-iid sampling for stochastic empty container repositioning problem. *OR Spectrum*, 37(2), 389-405.
- Long, Z., Wu, J., Xu, W., & Lin, W. (2018). Study of the coordination mechanism of a wood processing residue-based reverse supply chain. *BioResources*, 13(2), 2562-2577.
- Lovelady, E. M., & El-Halwagi, M. M. (2009). Design and integration of eco-industrial parks for managing water resources. *Environmental Progress & Sustainable Energy: An Official Publication of the American Institute of Chemical Engineers*, 28(2), 265-272.
- Low, J. S. C., Tjandra, T. B., Yunus, F., Chung, S. Y., Tan, D. Z. L., Raabe, B., ... & Herrmann, C. (2018). A collaboration platform for enabling industrial symbiosis: Application of the database engine for waste-to-resource matching. *Procedia CIRP*, 69, 849-854.
- Lowe, E. A. (1997). Creating by-product resource exchanges: strategies for eco-industrial parks. *Journal of Cleaner Production*, 5(1-2), 57-65.
- Lowe, E.A. (2001), *Eco-industrial park handbook for Asian developing countries*, based upon eco industrial parks, a handbook for local development teams. Technical report, Indigo Development Working Papers in Industrial Ecology
- Lu, C., Wang, S., Wang, K., Gao, Y., & Zhang, R. (2020). Uncovering the benefits of integrating industrial symbiosis and urban symbiosis targeting a resource-dependent city: A case study of Yongcheng, China. *J. of Clean. Prod.*, 255, 120210.

- Lun, F., Liu, M., Zhang, D., Li, W., & Liu, J. (2016). Life cycle analysis of carbon flow and carbon footprint of harvested wood products of *larix principis-rupprechtii* in China. *Sustainability*, 8(3), 247.
- Maillé, M., & Frayret, J. M. (2016). Industrial Waste Reuse and By-product Synergy Optimization. *Journal of Industrial Ecology*, 20(6), 1284-1294.
- Mak, W. K., Morton, D. P., & Wood, R. K. (1999). Monte Carlo bounding techniques for determining solution quality in stochastic programs. *Operations research letters*, 24(1-2), 47-56.
- Mallawaarachchi, H., Sandanayake, Y., Karunasena, G., & Liu, C. (2020). Unveiling the conceptual development of industrial symbiosis: Bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120618.
- Mamoune, A., & Yassine, A. (2011). Creating an inductive model of industrial development with optimized flows for reducing its environmental impacts. *Energy Procedia*, 6, 396-403.
- Mansson, J. (2004). Vertical integration and efficiency: Ownership in the Swedish sawmill industry. *Review of Industrial Organization*, 24(1), 25-36.
- Marler, R. T., & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and multidisciplinary optimization*, 26(6), 369-395.
- Martin, M. (2015). Quantifying the environmental performance of an industrial symbiosis network of biofuel producers. *J. of Cleaner Production*, 102, 202-212.
- Martin, M. (2018). Assessing the environmental implications of a regional industrial symbiosis network for innovative products. Technical report, Research Report
- Martin, M., & Harris, S. (2018). Prospecting the sustainability implications of an emerging industrial symbiosis network. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 246-256.
- Massard, G., Jacquat, O., & Zürcher, D. (2014). International survey on eco-innovation parks: Learning from experiences on the spatial dimension of eco-innovation.
- Mattila, T., Lehtoranta, S., Sokka, L., Melanen, M., & Nissinen, A. (2012). Methodological aspects of applying life cycle assessment to industrial symbioses. *Journal of Industrial Ecology*, 16(1), 51-60.
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.

- McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. (1979). Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, 21(2), 239-245.
- Medina-González, S., Graells, M., Guillén-Gosálbez, G., Espuña, A., & Puigjaner, L. (2017). Systematic approach for the design of sustainable supply chains under quality uncertainty. *Energy Conversion and Management*, 149, 722-737.
- Meller, R. D., & Gau, K. Y. (1996). The facility layout problem: recent and emerging trends and perspectives. *Journal of manufacturing systems*, 15(5), 351-366.
- Meneghetti, A., & Nardin, G. (2012). Enabling industrial symbiosis by a facilities management optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, 35, 263-273.
- Miettinen, K. (1994). On the methodology of multiobjective optimization with applications. Jyväskylän Yliopisto.
- Miller, B. L., & Wagner, H. M. (1965). Chance constrained programming with joint constraints. *Operations Research*, 13(6), 930-945.
- Mirata, M. (2004). Experiences from early stages of a national industrial symbiosis programme in the UK: determinants and coordination challenges. *Journal of Cleaner production*, 12(8-10), 967-983.
- Mirata, M., & Emtairah, T. (2005). Industrial symbiosis networks and the contribution to environmental innovation: The case of the Landskrona industrial symbiosis programme. *Journal of cleaner production*, 13(10-11), 993-1002.
- Montastruc, L., Boix, M., Pibouleau, L., Azzaro-Pantel, C., & Domenech, S. (2013). On the flexibility of an eco-industrial park (EIP) for managing industrial water. *Journal of Cleaner Production*, 43, 1-11.
- Morales, E. M., Diemer, A., Cervantes, G., & Carrillo-González, G. (2019). “By-product synergy” changes in the industrial symbiosis dynamics at the Altamira-Tampico industrial corridor: 20 Years of industrial ecology in Mexico. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 235-245.
- Murphy, F., Devlin, G., & McDonnell, K. (2015). Greenhouse gas and energy based life cycle analysis of products from the Irish wood processing industry. *Journal of cleaner production*, 92, 134-141.
- Muther, R., Hales, L., (2015). *Systematic Layout Planning*, Fourth Edition. Number: 978-0-933684-06-5, Management & Industrial Research Publications, USA
- Muther., R (1973) *Systematic Layout Planning*. 1973.

- Neves, A., Godina, R., Azevedo, S. G., & Matias, J. C. (2020). A comprehensive review of industrial symbiosis. *Journal of cleaner production*, 247, 119113.
- Neves, A.S.L. (2020), The current trends in Industrial Symbiosis and its potential implementation in Portuguese industrial parks, Ph.D. Dissertation, Universidade Da Beira Interior, Engenharia, Rio de Janeiro.
- Notarnicola, B., Tassielli, G., & Renzulli, P. A. (2014). Potential developments of industrial symbiosis in the Taranto productive district. In *Pathways to Environmental Sustainability* (pp. 215-224). Springer, Cham.
- Notarnicola, B., Tassielli, G., & Renzulli, P. A. (2016). Industrial symbiosis in the Taranto industrial district: current level, constraints and potential new synergies. *Journal of Cleaner Production*, 122, 133-143.
- OGM (2020) Orman Genel Müdürlüğü, İşletme ve Pazarlama Dairesi Başkanlığı, Oduna Dayali Orman Ürünlerinin Üretim ve Pazarlama Faaliyetler, <https://www.ogm.gov.tr>
- OGM (2019) Turkey general directorate of forestry (OGM). average price of web page. from wood sale indices data, October 2019. URL <https://www.ogm.gov.tr>.
- Ohnishi, S., Dong, H., Geng, Y., Fujii, M., & Fujita, T. (2017). A comprehensive evaluation on industrial & urban symbiosis by combining MFA, carbon footprint and emergy methods, Case of Kawasaki, Japan. *Ecological Indicator*, 73, 513-524.
- Olsson, A., Sandberg, G., & Dahlblom, O. (2003). On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis. *Structural safety*, 25(1), 47-68.
- O'Rourke, D., Connelly, L., & Koshland, C. P. (1996). Industrial ecology: a critical review. *International Journal of Environment and Pollution*, 6(2-3), 89-112.
- Pagnoncelli, B. K., Ahmed, S., & Shapiro, A. (2009). Sample average approximation method for chance constrained programming: theory and applications. *Journal of optimization theory and applications*, 142(2), 399-416.
- Pakarinen, S., Mattila, T., Melanen, M., Nissinen, A., & Sokka, L. (2010). Sustainability and industrial symbiosis—The evolution of a Finnish forest industry complex. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1393-1404.
- Pan, M., Sikorski, J., Akroyd, J., Mosbach, S., Lau, R., & Kraft, M. (2016). Design technologies for eco-industrial parks: From unit operations to processes, plants and industrial networks. *Applied Energy*, 175, 305-323.

- Paquin, R. L., Busch, T., & Tilleman, S. G. (2015). Creating economic and environmental value through industrial symbiosis. *Long Range Planning*, 48(2), 95-107.
- Park, H. S., Rene, E. R., Choi, S. M., & Chiu, A. S. (2008). Strategies for sustainable development of industrial park in Ulsan, South Korea—From spontaneous evolution to systematic expansion of industrial symbiosis. *Journal of environmental management*, 87(1), 1-13.
- Park, J., Sarkis, J., & Wu, Z. (2010). Creating integrated business and environmental value within the context of China's circular economy and ecological modernization. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1494-1501.
- Patil, G. R., & Ukkusuri, S. V. (2011). Sample average approximation technique for flexible network design problem. *J. of Computing in Civil Eng.*, 25(3), 254-262.
- Petríková, K., Borseková, K., & Blam, I. (2016). Industrial symbiosis in European policy: overview of recent progress. *Acta Universitatis Lodziensis. Folia Oeconomica*, 2(320).
- Piekarski, C. M., de Francisco, A. C., da Luz, L. M., Kovalesski, J. L., & Silva, D. A. L. (2017). Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. *Science of the Total Environment*, 575, 103-111.
- Pokharel, R., Grala, R. K., & Grebner, D. L. (2017). Woody residue utilization for bioenergy by primary forest products manufacturers: An exploratory analysis. *Forest Policy and Economics*, 85, 161-171.
- Polverini, D., & Miretti, U. (2019). An approach for the techno-economic assessment of circular economy requirements under the Ecodesign Directive. *Resources, Conservation and Recycling*, 150, 104425.
- Qing-fu, S., Tao, Z., & Cui, M. (2010, November). Research on the optimization price of the industrial waste based on industrial symbiosis. In *2010 International Conference on Management Science & Engineering 17th Annual Conference Proceedings* (pp. 410-416). IEEE.
- Ramin, E., Bestuzheva, K., Gargalo, C. L., Ramin, D., Schneider, C., Ramin, P., ... & Gernaey, K. V. (2021). Incremental design of water symbiosis networks with prior knowledge: The case of an industrial park in Kenya. *Science of The Total Environment*, 751, 141706.

- Ramos, M. A., Boix, M., Aussel, D., Montastruc, L., & Domenech, S. (2016). Water integration in eco-industrial parks using a multi-leader-follower approach. *Computers & Chemical Engineering*, 87, 190-207.
- Ren, J., Liang, H., Dong, L., Sun, L., & Gao, Z. (2016). Design for sustainability of industrial symbiosis based on emergy and multi-objective particle swarm optimization. *Science of the Total Environment*, 562, 789-801.
- Renner, G. T. (1947). Geography of industrial localization. *Economic Geography*, 23(3), 167-189.
- Rivela, B., Hospido, A., Moreira, T., & Feijoo, G. (2006). Life cycle inventory of particleboard: a case study in the wood sector (8 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), 106-113.
- Roberts, B. H. (2004). The application of industrial ecology principles and planning guidelines for the development of eco-industrial parks: an Australian case study. *Journal of Cleaner Production*, 12(8-10), 997-1010.
- Rosa, M., & Beloborodko, A. (2015). A decision support method for development of industrial synergies: case studies of Latvian brewery and wood-processing industries. *Journal of Cleaner Production*, 105, 461-470.
- Sahoo, K., Richard Bergman, Sevda Alanya-Rosenbaum, Hongmei Gu, and Shaobo Liang. Life cycle assessment of forest-based products: a review. *Sustainability*, 11(17):4722, 2019.
- SAIC, S. (2006). Life-cycle assessment: principles and practice. Scientific Applications International Corporation, National Risk Management Research Laboratory, Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Saikku, L. (2006). Eco-Industrial Parks: A background report for the eco-industrial park project at Rantasalmi. Publications of Regional Council of Etelä-Savo, Tampere, Finland.
- Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., & Shapiro, A. (2005). A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167(1), 96-115.
- Satterthwaite, D. (2008). Cities' contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions. *Env. and Urbanization*, 20(2), 539-549.
- Scheepens, A. E., Vogtländer, J. G., & Brezet, J. C. (2016). Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy

- systems. Case: Making water tourism more sustainable. *Journal of Cleaner Production*, 114, 257-268.
- Schulze, F., (2014), Classification and Development of Mathematical Models and Simulation for Industrial Ecology, Master Thesis, University Of Rhode Island, Industrial and Systems Engineering, USA.
- Schütz, P., Tomasgard, A., & Ahmed, S. (2009). Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition. *European journal of operational research*, 199(2), 409-419.
- Schwarz, E. J., & Steininger, K. W. (1997). Implementing nature's lesson: the industrial recycling network enhancing regional development. *Journal of cleaner production*, 5(1-2), 47-56.
- Seehof, J. M., Evans, W. O., Friederichs, J. W., & Quigley, J. J. (1966, January). Automated facilities layout programs. In *Proceedings of the 1966 21st national conference* (pp. 191-199).
- Sen, S., & Higle, J. L. (1999). An introductory tutorial on stochastic linear programming models. *Interfaces*, 29(2), 33-61.
- Şenlier, N., & Albayrak, A. N. (2011). Opportunities for sustainable industrial development in Turkey: Eco-Industrial Parks. *Gazi University Journal of Science*, 24(3), 637-646.
- Shahi, S., & Pulkki, R. (2013). Supply chain network optimization of the Canadian forest products industry: A critical review. *American journal of industrial and business management*, 3(07), 631.
- Shapiro, A., & Homem-de-Mello, T. (1998). A simulation-based approach to two-stage stochastic programming with recourse. *Mathematical Programming*, 81(3), 301-325.
- Shapiro, A., Dentcheva, D., & Ruszczyński, A. (2014). *Lectures on stochastic programming: modeling and theory*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Shell (2014), International BV, New Lenses on Future Cities, [online] 2014, available from: <http://s05.static-shell.com/content/dam/shell>
- Shi, L., & Chertow, M. (2017). Organizational boundary change in industrial symbiosis: Revisiting the Guitang Group in China. *Sustainability*, 9(7), 1085.

- Shukery, M. F. M., & Lim, J. S. (2016). Superstructure-based synthesis and optimisation of an oil palm eco-industrial town: a case study in Iskandar Malaysia. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(7), 2119-2129.
- Singh, A. P., & Yilma, M. (2013, May). Production floor layout using systematic layout planning in Can manufacturing company. In 2013 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT) (pp. 822-828). IEEE.
- Singh, A., Lou, H. H., Yaws, C. L., Hopper, J. R., & Pike, R. W. (2007). Environmental impact assessment of different design schemes of an industrial ecosystem. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(2), 294-313.
- Singh, S. P., & Sharma, R. R. (2006). A review of different approaches to the facility layout problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(5), 425-433.
- Sokka, L., Lehtoranta, S., Nissinen, A., & Melanen, M. (2011a). Analyzing the environmental benefits of industrial symbiosis: life cycle assessment applied to a Finnish forest industry complex. *Journal of Industrial Ecology*, 15(1), 137-155.
- Sokka, L., Pakarinen, S., & Melanen, M. (2011b). Industrial symbiosis contributing to more sustainable energy use—an example from the forest industry in Kymenlaakso, Finland. *Journal of Cleaner Production*, 19(4), 285-293
- Soratana, K., & Landis, A. E. (2011). Evaluating industrial symbiosis and algae cultivation from a life cycle perspective. *Bio. Techn.*, 102(13), 6892-6901.
- Suciu, R., Kantor, I., Bütün, H., & Marechal, F. (2019). Geographically Parameterized Residential Sector Energy and Service Profile. *Frontiers in Energ. Research*, 7, 69.
- Taha, H. A. (2003). *Operation Research: An Introduction*, 7th.
- Tan, R. R., Aviso, K. B., Cruz Jr, J. B., & Culaba, A. B. (2011). A note on an extended fuzzy bi-level optimization approach for water exchange in eco-industrial parks with hub topology. *Process Safety and Environmental Protection*, 89(2), 106-111.
- Teh, B. T., Ho, C. S., Matsuoka, Y., Chau, L. W., & Gomi, K. (2014, February). Determinant factors of industrial symbiosis: greening Pasir Gudang industrial park. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Tiu, B. T. C., & Cruz, D. E. (2017). An MILP model for optimizing water exchanges in eco-industrial parks considering water quality. *Res., Cons. Recyc.*, 119, 89-96.
- Trakya Kalkınma Ajansı (2017) TR21 Trakya Bölgesi Endüstriyel Simbiyoz Raporu, Ocak 2016. https://www.trakyaka.org.tr/upload/Node/33077/xfiles/TR21_Trakya_Bolgesi_Endustriyel_Simbiyoz_Raporu.pdf

- Trochu, J., Chaabane, A., & Ouhimmou, M. (2019). A two-stage stochastic optimization model for reverse logistics network design under dynamic suppliers' locations. *Waste Management*, 95, 569-583.
- Tucker, S., Tharumarajah, A., May, B., England, J., Paul, K., Raison, J., ... & Syme, M. (2009). Life cycle inventory of Australian forestry and wood products, Technical report, Forest and Wood Products Australia Market Access and Development Australia, Melbourne.
- Turken, N., & Geda, A. (2020). Supply chain implications of industrial symbiosis: A review and avenues for future research. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104974.
- Ulutaş, F., 2011. Endüstriyel Ekoloji. Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları-VI, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, s.6-31
- URL (2017) Endüstriyel Simbiyoz, Endüstriyel Ekoloji, Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı, <http://www.endustriyelsimbiyoz.org/> (Erişim Tarihi: 12.01.2017)
- URL (2019) Industrial Symbiosis Network for Environment Protection and Sustainable Development in Black Sea Basin, SYMNET <https://www.msp-platform.eu/projects/industrial-symbiosis-network-environment-protection-and-sustainable-development-black> (Erişim tarihi 27.09.2019)
- URL. (2019b) The forest industry statistics, June 2019. URL <https://www.forestindustries.fi/statistics>.
- USEPA, (2006) United State Environmental Protection Agency (USEPA), Life Cycle Assessment: Principles and Practice”, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Ohio
- Vahidzadeh, R., Bertanza, G., Sbaffoni, S., & Vaccari, M. (2021). Regional industrial symbiosis: a review based on social network analysis. *Journal of Cleaner Production*, 124054.
- Valenzuela Venegas (2019), Design Of Sustainable And Resilient Eco-Industrial Parks By Means Of Optimization Tools, Ph.D. Dissertation, Universidad De Chile Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento De Ingeniería Química, Biotecnología Y Materiales, Santiago De Chile.
- Van Beers, D., Bossilkov, A., Corder, G., & Van Berkel, R. (2007). Industrial symbiosis in the Australian minerals industry: the cases of Kwinana and Gladstone. *Journal of Industrial Ecology*, 11(1), 55-72.

- Van Berkel, R., Fujita, T., Hashimoto, S., & Geng, Y. (2009). Industrial and urban symbiosis in Japan: Analysis of the Eco-Town program 1997–2006. *Journal of Environmental Management*, 90(3), 1544-1556.
- Van Fan, Y., Varbanov, P. S., Klemeš, J. J., & Romanenko, S. V. (2021). Urban and industrial symbiosis for circular economy: Total EcoSite Integration. *Journal of Environmental Management*, 279, 111829.
- Velenturf, A. P. (2016). Promoting industrial symbiosis: empirical observations of low-carbon innovations in the Humber region, UK. *J. of Clea. Prod*, 128, 116-130.
- Venegas, G., Vera-Hofmann, G., & Díaz-Alvarado, F. A. (2020). Design of sustainable and resilient eco-industrial parks: Planning the flows integration network through multi-objective optimization. *J. of Clean. Prod.*, 243, 118610.
- Vila, D., Beauregard, R., & Martel, A. (2009). The strategic design of forest industry supply chains, *Information Systems and Operational Research*, 47(3), 185-202.
- Vimal, K. E. K., Rajak, S., & Kandasamy, J. (2019). Analysis of network design for a circular production system using multi-objective mixed integer linear programming model. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- Wahrlich, J and Flavio Jose Simioni. Industrial symbiosis in the forestry sector: A case study in southern brazil. *Journal of Industrial Ecology*, 23(6):1470-1482, 2019.
- Wallner, H. P. (1999). Towards sustainable development of industry: networking, complexity and eco-clusters. *Journal of cleaner production*, 7(1), 49-58.
- Walls, J. L., & Paquin, R. L. (2015). Organizational perspectives of industrial symbiosis: A review and synthesis. *Organization & Environment*, 28(1), 32-53.
- Wang, D., Li, J., Wang, Y., Wan, K., Song, X., & Liu, Y. (2017). Comparing the vulnerability of different coal industrial symbiosis networks under economic fluctuations. *Journal of Cleaner Production*, 149, 636-652.
- Wang, Q., Tang, H., Qiu, S., Yuan, X., & Zuo, J. (2018). Robustness of eco-industrial symbiosis network: a case study of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(27), 27203-27213.
- Wang, S., Lu, C., Gao, Y., Wang, K., & Zhang, R. (2019). Life cycle assessment of reduction of environmental impacts via industrial symbiosis in an energy-intensive industrial park in China. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118358.
- Wang, Y. F., Yu, W. J., & Ji, F. (2010). Present situation on recycle utilization of waste wood materials. *Wood Processing Machinery*, 21(2), 37-40.

- Wen, Z., & Meng, X. (2015). Quantitative assessment of industrial symbiosis for the promotion of circular economy: a case study of the printed circuit boards industry in China's Suzhou New District. *Journal of Cleaner Production*, 90, 211-219.
- Wilson, J. B. (2010). Life-cycle inventory of medium density fiberboard in terms of resources, emissions, energy and carbon. *Wood and Fiber Science*, 42, 107-124.
- Wolf, A., & Karlsson, M. (2008). Evaluating the environmental benefits of industrial symbiosis: discussion and demonstration of a new approach. *Progress in Industrial Ecology, an International Journal*, 5(5-6), 502-517.
- Wolf, A., & Petersson, K. (2007). Industrial symbiosis in the Swedish forest industry. *Progress in Industrial Ecology, an International Journal*, 4(5), 348-362.
- Wolf, A., (2007), *Industrial Symbiosis in The Swedish Forest Industry*, Ph.D. Dissertation, Division of Energy Systems, Department of Management and Engineering, Linköping Institute of Technology, Linköping, Sweden.
- World Bank (2012), *Information, Communication Technologies, & infoDev (Program)*. (2012). *Information and communications for development 2012: Maximizing mobile*. World Bank Publications.
- Xu, S., Liu, G., Lv, W., & Liu, Y. (2014). The nonlinear complementarity model of industrial symbiosis network equilibrium problem. *RAIRO-Operations Research*, 48(4), 559-594.
- Yarar, B. (2019), *Kagıt ve karton fabrikası atık su arıtma tesisinin enerji analizi*. Master's thesis, Namık Kemal Üniversitesi, 2019.
- Yeo, Z., Masi, D., Low, J. S. C., Ng, Y. T., Tan, P. S., & Barnes, S. (2019). Tools for promoting industrial symbiosis: A systematic review. *Journal of Industrial Ecology*, 23(5), 1087-1108.
- Yeşilkaya, M., Daş, G. S., & Türker, A. K. (2020). A multi-objective multi-period mathematical model for an industrial symbiosis network based on the forest products industry. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106883.
- YOMSAD (2020) Türkiye MDF ve Yonga Levha Sanayicileri Derneği: YOMSAD <http://yomsad.org.tr/> (Erişim: 20.05.2021)
- Yu, F., Han, F., & Cui, Z. (2015a). Assessment of life cycle environmental benefits of an industrial symbiosis cluster in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(7), 5511-5518.
- Yu, F., Han, F., & Cui, Z. (2015b). Evolution of industrial symbiosis in an eco-industrial park in China. *Journal of Cleaner Production*, 87, 339-347.

- Yuan, Z., Bi, J., & Moriguchi, Y. (2006). The circular economy: A new development strategy in China. *Journal of Industrial Ecology*, 10(1-2), 4-8.
- Zanjani, K., Ait-Kadi, M., & Nourelfath, D. (2013). A stochastic programming approach for sawmill production planning. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 5(1), 1-18.
- Zhang, C., Zhou, L., Chhabra, P., Garud, S. S., Aditya, K., Romagnoli, A., ... & Kraft, M. (2016). A novel methodology for the design of waste heat recovery network in eco-industrial park using techno-economic analysis and multi-objective optimization. *Applied energy*, 184, 88-102.
- Zhang, H., Dong, L., Li, H., Fujita, T., Ohnishi, S., & Tang, Q. (2013). Analysis of low-carbon industrial symbiosis technology for carbon mitigation in a Chinese iron/steel industrial park: a case study with carbon flow analysis. *Energy policy*, 61, 1400-1411.
- Zhang, L., Yuan, Z., Bi, J., Zhang, B., & Liu, B. (2010). Eco-industrial parks: national pilot practices in China. *Journal of Cleaner Production*, 18(5), 504-509.
- Zhang, X. H., Deng, S., Jiang, W., Zhang, Y., Peng, H., Li, L., ... & Li, Y. (2010). Emergy evaluation of the sustainability of two industrial systems based on wastes exchanges. *Resources, conservation and recycling*, 55(2), 182-195.
- Zhang, Y., Zheng, H., Chen, B., Su, M., & Liu, G. (2015). A review of industrial symbiosis research: theory and methodology. *Frontiers of Earth Sci.*, 9(1), 91-104.
- Zhou, L., Hu, S. Y., Li, Y., Jin, Y., & Zhang, X. (2012). Modeling and optimization of a coal-chemical eco-industrial system in China. *Journal of Industrial Ecology*, 16(1), 105-118.
- Zhu, Q., Geng, Y., & Lai, K. H. (2010). Circular economy practices among Chinese manufacturers varying in environmental-oriented supply chain cooperation and the performance implications. *J. of Env. Manag.*, 91(6), 1324-1331.
- Zhu, Q., Lowe, E. A., Wei, Y. A., & Barnes, D. (2007). Industrial symbiosis in China: a case study of the Guitang Group. *Journal of Industrial Ecology*, 11(1), 31-42.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Murat YEŞİLKAYA

Doğum Tarihi :

Yabancı Dil : İngilizce

İletişim :

Eğitim Durumu

Lisans : Bartın Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği 2012

Lisans : Anadolu Üniversitesi, İktisat Fakültesi, İktisat 2012

Yüksek Lisans : Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği 2014

Doktora : Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği 2021

Çalıştığı Kurumlar : Öğretim Görevlisi- Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Niksar Meslek Yüksekokulu (2014-devam)

Proje :

Doktora Araştırmacısı

TÜBİTAK -ARDEB-1001, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Mühendislik Araştırma Destek Grubu (TÜBİTAK -MAG); *Endüstriyel Simbiyoz Ağı için İki Seviyeli Programlama Modelleri*, (Proje no: 120M223)

Proje Yürütücüsü: Doç. Dr. Gülesin Sena DAŞ- Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği

Proje süresi: Temmuz 2020- Temmuz 2022 (24 ay)

Yayınları (SCI) :

1. Yeşilkaya, M., Daş, G. S., & Türker, A. K. (2020). A multi-objective multi-period mathematical model for an industrial symbiosis network based on the forest products industry. Computers & Industrial Engineering, 106883.
2. Cabuk, Y., & Yesilkaya, M. (2017). International competitiveness analysis of woodworking machinery industry in Turkey. Fresenius Environmental Bulletin, 26(8), 5395.

Yayınları (Diğer) :

1. Yeşilkaya, M. (2018). Selection of Paper Factory Location Using Multi-Criteria Decision Making Methods. Çukurova Univ. J. Fac. Eng. Arch, 33, 31-44.
2. Yeşilkaya, M., & Çabuk, Y. (2018). Türkiye ahşap işleme makineleri imalat sektörünün finans ve pazarlama faaliyetlerinin analizi. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 20(3), 558-564.
3. Özdağ, M. E., Yeşilkaya, M., & Çabuk, Y. (2017). Türkiye-Almanya mobilya dış ticaretinin yapay sinir ağları ile tahmini. Bartın Orman Fak. Dergi, 19(2), 136-143.
4. Çabuk, Y., Yeşilkaya, M., & Karayılmazlar, S. (2016). Investigation of operational structure of woodworking machinery manufacturing sector in Turkey. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 18(1), 72-80.

Konferans :

1. Daş G. S., Yeşilkaya, M, Türker A. K. (2019) Multi-objective Mathematical Models for an Industrial Symbiosis Network, Proceedings of 10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems Pages 199-208. (Full paper)
2. Yeşilkaya M., Daş G.S., Türker A.K. (2018). A Review of Mathematical Programming Model for Supply Chains in the Forest Products Industry. 16th International Logistics and Supply Chain Congress (Full paper)
3. Yeşilkaya M., Eren T., Daş G. S. (2018). Online Marketplace Platform Selection with Multi Criteria Decision Making Methods. International Conference On Innovative Engineering Applications (Full paper)
4. Yeşilkaya M., Eren T., Gençer A., Daş G. S. (2018). A Research on Use of Linear Goal Programming Model in Public Transportation. International Conference On Innovative Engineering Applications (Full paper)
5. Yeşilkaya M. (2017). Türk Savunma Sanayisinin Uluslararası Rekabet Gücünün Belirlenmesi. 2. Inter. Defence Industry Symposium, 567-573. (Tam Metin).

Araştırma Alanları : Yöneylem araştırması, Matematiksel modelleme, Çok amaçlı optimizasyon, Stokastik programlama, Tedarik zinciri yönetimi

Program : MS Office, LaTeX, C++ , R, CPLEX