

KAPALI DÖNGÜ TEDARİK ZİNCİRİ AĞI TASARIMI

AYCAN KAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2014

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Osman EROĞUL

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Tahir HANALİOĞLU

Anabilim Dalı Başkanı

Aycan KAYA tarafından hazırlanan KAPALI DÖNGÜ TEDARİK ZİNCİRİ
TASARIMI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Sibel ALUMUR ALEV

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Gültekin KUYZU

Üye: Yrd. Doç. Dr. Hakkı Özgür ÜNVER

Üye: Yrd. Doç. Dr. Sibel ALUMUR ALEV

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

AYCAN KAYA

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Sibel ALUMUR ALEV
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Temmuz 2014

AYCAN KAYA

KAPALI DÖNGÜ TEDARİK ZİNCİRİ AĞI TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmada, ileri yöndeki geleneksel tedarik zinciri faaliyetlerine ek olarak tersine akış ve tersine tedarik zinciri faaliyetlerini de içinde barındıran kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi ele alınmaktadır. Stratejik ve taktik seviyedeki kararların birlikte verilmesini gerektiren bu tasarım problemi kapsamında çok ürünlü, kapasiteli, karma bir tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Stratejik seviyede, üretim ve geri kazanım tesislerinin nerelere açılacağına ve hâlihazırda açık olan tesislerden hangilerinin kapatılacağına karar verilmektedir. Taktik seviyede ise üretim tesislerinde elde edilen yeni ürünlerle geri kazanım tesislerinde elde edilen yenilenmiş ürünlerin müşterilere doğru ileri yöndeki akış miktarları ile kullanılmış ürünlerin müşterilerden geri kazanım tesislerine doğru tersine yöndeki akış miktarlarına ve üretim ile geri kazanım tesislerinde işlenmesi gereken toplam ürün miktarlarına karar verilmektedir. Geliştirilen modelin amacı toplam kârın en büyüklenmesidir. Bu kapsamda, tesis açma/kapama, üretim ve geri kazanım, satın alma, taşıma ve kapasite artırımı maliyetleri en küçüklenirken karşılanan taleplerden ve geri kazanım işlemlerinden elde edilen gelir en büyüklenmektedir. Geliştirilen deterministik modele ek olarak, talep ve geri dönüş miktarlarındaki belirsizliğin ağ yapısı üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için senaryo bazlı rassal bir model de geliştirilmiştir. Kullanılan parametre değerlerindeki değişimin problemin optimal çözümü üzerine olan etkilerini araştırmak üzere çok çeşitli duyarlılık analizi çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kapalı Döngü Tedarik Zinciri, Tersine Lojistik, Tesis Yer Seçimi.

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Industrial Engineering
Supervisor : Assist. Prof. Sibel ALUMUR ALEV
Degree Awarded and Date : M.Sc. – July 2014

AYCAN KAYA

CLOSED LOOP SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN

ABSTRACT

In this thesis, we study the closed loop supply chain network design problem, which integrates reverse flows and reverse supply chain activities into the traditional forward supply chain activities. This network design problem requires strategic and tactical level decisions to be taken into account simultaneously. Within this context, a multi product and capacitated mixed integer linear programming model is developed. At the strategic level, the model decides where to open production and recovery facilities and which existing facilities to close. At the tactical level, the model decides on the amount of products that are obtained either from manufacturing or recovery to send to customers in the forward direction, the amount of used products to send from the customers to the recovery facilities in the reverse direction, and the total amount of products to be processed in production and recovery facilities. The aim of the proposed model is to maximize total profit. In order to achieve this, facility establishment / closing, production and recovery, procurement, capacity establishment, and transportation costs are minimized whereas the revenue obtained from the satisfied demand and recovery options is maximized. In addition to the deterministic model, a scenario based stochastic model considering uncertainty in the demand and return amounts is also proposed. Extensive sensitivity analysis is conducted to observe the effect of changes in the problem parameters on the optimal solutions.

Keywords: Closed Loop Supply Chain, Reverse Logistics, Facility Location

TEŞEKKÜR

Atlattığım çok zor dönemlerde benden desteğini eksik etmeyen, durma noktasına geldiğim kendimden umudumu kestiğim anlarda benden umudunu kesmeyen ve hamile bir öğrencinin tez danışmanı olmayı kabul edecek kadar cesaretli değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Sibel ALUMUR ALEV'e teşekkür ederim. Bu tez bittiyse eğer onun desteği ve yönlendirmesi sayesinde. Ayrıca kendisi aklımdaki klasik akademisyen fikrini de yıkmıştır ve şu anda tekrar akademik hayata sıfırdan bir araştırma görevlisi olarak başlamışsam kendisi gibi bir akademisyen olabilme isteğimdir. Üzerimdeki emeğini ve hakkını asla ödeyemeyeceğim kıymetli Hocama sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Bilkent Üniversitesi'nde geçirdiğim dönemlerde danışmanım olan yüzünden gülümsemesi eksik olmayan merhum Prof. Dr. Barbaros TANSEL Hocama'da optimizasyonu bana sevdirdiği ve gerçekten hakkıyla derslerini öğrettiği için şahsım ve yetiştirdiği tüm öğrenciler adına teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren sırf ben ve kardeşlerim iyi okullarda okuyalım diye kendisi köy yollarında karlar içerisinde bata çıka yürümeyi göze alan ve daha sayamayacağım pek çok fedakârlığı yapan sevgili babam Ercan PEKPAZAR' a ve biz hastayken geceler boyunca başucumuzda bekleyen şimdilerde küçük torununa da aynı içtenlikle bağlı sevgili annem Adalet PEKPAZAR'a teşekkür ederim.

Bu tez döneminde benden desteğini esirgemeyen ve akademisyen olmam için beni yüreklendiren sevgili eşim Mikail KAYA'ya ve Allah'ın bana hediyesi olan minik bebeğim gözümün nuru kızım İnci KAYA'ya teşekkür ederim. Kısa zaman önce tanıştığımız sevgili oda arkadaşım Tuğçe BELDEK'e de desteği için çok teşekkür ederim. Ayrıca üç yıl boyunca çalıştığım bana çok şey katan Kurumum TÜBİTAK'a hem edindiğim bilgi birikimi hem de tüm öğrencilere ve akademisyenlere sağladığı burs ve destekler için teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

1.GİRİŞ	1
2.KAPALI DÖNGÜ TEDARİK ZİNCİRİ.....	3
2.1. Yasal Sebepler	3
2.2. Ekonomik Sebepler	7
2.3. Çevresel Sebepler	8
3.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	11
4.PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL	22
4.1.Problem Tanımı	22
4.2.Karma Tamsayılı Matematiksel Model.....	24
5.PROBLEMİN UYGULAMASI.....	33
5.1. Problem Parametreleri	33
5.2. Problemin Çözümü.....	38
6.DUYARLILIK ANALİZLERİ	44
6.1. Kapasite Büyüklüklerindeki Değişimler.....	44
6.2. Minimum Geri Kazanım Değerindeki Değişimler	48
6.3. Sabit Tesis Açma Maliyetlerindeki Değişimler.....	53
6.4. Müşteri Sayısındaki Değişimler	60
6.5. Ürün Sayısındaki Değişimler.....	63
6.6. Talep ve Geri Dönüş Oranlarındaki Değişimler.....	66
6.7. İleri ve Tersine Lojistik Faaliyetlerinin Bağımsız ve Entegre Çözümlerinin Karşılaştırılması	67
7.SENARYO BAZLI RASSAL MODEL.....	70
8.SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME.....	80

KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ	86

TABLULARIN LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 2.1. New York eyaletinde uygulanan ceza bedelleri	4
Tablo 2.2. Belediyelerin nüfuslarına göre toplama merkezi kurması için son tarihler	5
Tablo 2.3. Yıllara göre üreticilerin kişi başı toplaması gereken ürün miktarı	6
Tablo 3.1. Kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı üzerine olan çalışmalar (1998- 2008).....	20
Tablo 3.2. Kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarıma üzerine olan çalışmalar (2009-2014).....	21
Tablo 5.1. Ürünler, üretim ve geri kazanım opsiyonları kümeleri	33
Tablo 5.2. Üretim ve geri kazanım opsiyonları ile ilgili kümeler	34
Tablo 5.3. Parametre değerleri	35
Tablo 5.4. Tesisler için kapasite ve ek kapasite değerleri	36
Tablo 5.5. Maliyet parametrelerinin değerleri	37
Tablo 5.6. Birim ürün başına elde edilen gelir	38
Tablo 5.7. Örnek veri kümesi için sonuç özet tablosu	38
Tablo 5.8. Açılan tesislere ilişkin kapasite bilgileri	39
Tablo 6.1. Normal ve ek kapasite değerlerindeki değişimlerin etkileri	45
Tablo 6.2. Kapasite kümeleri	48
Tablo 6.3. Geniş kapasite kümesi ile minimum yenileme oranının etkisi	49
Tablo 6.4. Orta kapasite kümesi ile minimum yenileme oranının etkisi	49
Tablo 6.5. Dar kapasite kümesi ile minimum yenileme oranının etkisi	50
Tablo 6.6. Geniş kapasite kümesi ile sabit maliyet değerlerindeki değişim	54
Tablo 6.7. Orta kapasite kümesi ile sabit maliyet değerlerindeki değişim	55
Tablo 6.8. Dar kapasite kümesi ile sabit maliyet değerlerindeki değişim	56
Tablo 6.9. Müşteri sayısındaki değişimin etkileri	61
Tablo 6.10. Ürün sayısındaki artışın etkisi	64
Tablo 6.11. Talep ve geri dönüş miktarlarındaki değişimin etkileri	66
Tablo 6.12. Bağımsız ve entegre çözümlerin karşılaştırılması	68
Tablo 7.1. Senaryolar için parametre değerleri	74
Tablo 7.2. Senaryo bazlı rassal modelin optimal çözümü	74
Tablo 7.3. Senaryo bazlı üretim ve ek kapasite kullanım miktarları	75
Tablo 7.4. Her bir senaryo altında tesislerin ürün gönderdikleri müşteriler	76
Tablo 7.5. Senaryoların bağımsız çözümleri	77
Tablo 7.6. Farklı senaryo olasılık değerleri altında rassal modelin çözümleri	78

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Kapalı döngü bir tedarik zinciri ağı	23
Şekil 4.2. Modelin karar değişkenleri	28
Şekil 5.1. Tüm tesis ve müşterilerin düzlemdeki konumları.....	40
Şekil 5.2. Seçilen üretim tesislerinden müşterilere ileri yönde ürün akışı	41
Şekil 5.3. Kullanılmış ürünlerin müşterilerden seçilen yenileme tesislerine ve katı atık sahasına doğru tersine yöndeki akışı.....	42
Şekil 5.4. Geri kazanım tesislerinde yenilenmiş olan ürünlerin müşterilere doğru ileri yönlü akışı.....	43
Şekil 6.1. Kapasite değişimlerine bağlı olarak amaç fonksiyonundaki değişimler....	47
Şekil 6.2. Kapasite değişimlerine bağlı olarak çözüm zamanındaki değişimler.....	47
Şekil 6.3. Minimum yenileme oranı ve kapasite değerleri için amaç fonksiyonundaki değişim	52
Şekil 6.4. Minimum yenileme oranı ve kapasitelerdeki değişimin çözüm zamanına etkisi	53
Şekil 6.5. Sabit tesis açma maliyetlerinin optimal amaç fonksiyonuna olan etkisi ...	59
Şekil 6.6. Sabit tesis açma maliyetlerinin CPU zamanı üzerine olan etkisi.....	60
Şekil 6.7. Müşteri sayısındaki değişimin amaç fonksiyonu üzerine etkisi	62
Şekil 6.8. Müşteri sayısındaki değişimin CPU zamanı üzerine etkisi	63
Şekil 6.9. Ürün sayısındaki değişimin amaç fonksiyonuna etkisi.....	65
Şekil 6.10. Ürün sayısındaki değişimin çözüm zamanına etkisi	65

1. GİRİŞ

Endüstri devrimi sonrasında başta küresel ısınma olmak üzere pek çok çevresel sorun, hava, su ve topraktaki kirlenme, ciddi boyutlara ulaşmıştır. Bu çevresel sorunların çözülebilmesi için Birleşmiş Milletler (BM) ve Avrupa Birliği (AB) içindeki birçok gelişmiş ülkede aksiyonlar alınmaya başlanmış ve çeşitli yasalar yürürlüğe konmuştur. Türkiye'nin 2009'da üye olduğu Kyoto Protokolü küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda mücadele etmek amacıyla BM'nin öncülüğünde 1997 yılında imzalanmıştır [1]. Avrupa Birliği'nde ise 1973 yılından bu yana çevre eylem programları uygulanmaktadır. Bu kapsamda, hava kalitesi, su kalitesi, atık yönetimi, doğa koruma, endüstriyel kirlenmenin kontrolü ve risk yönetimi, kimyasallar, iklim değişikliği ve çevresel gürültü konusunda çok çeşitli direktifler yürürlüğe girmiştir [2].

Bu çalışmada ele alınan konu ile doğrudan bağlantılı olarak Avrupa Parlamentosu ve Komisyonu tarafından 2000/53/EC sayılı "Ömrünü Tamamlamış Taşıtların Kontrolü" ve 2002/96/EC sayılı "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya" Direktifleri yayınlanmıştır. Bu direktifler kapsamında, artık üreticiler ürettikleri araçlar ile elektrikli ve elektronik eşyaların geri toplanması ve çevreye zararsız hale getirilmesi konusunda yükümlü tutulmaktadır [3, 4].

Yasal zorunlulukların yanı sıra müşterilerin artan çevre bilinci de üreticileri çevreye daha duyarlı olmaya zorlamakta ve alışlagelmiş şekilde sadece ileri yöndeki akış faaliyetlerini planlayan üreticilerin artık satış sonrası kullanılmış ürünlerinin toplanması, geri kazanımı ve bertarafını da içeren tersine akış faaliyetlerini de planlamasını zorunlu hale getirmektedir.

Bu kapsamda, bu çalışmada, ileri ve tersine akış faaliyetlerini içinde bir arada barındıran bir kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi ele alınmaktadır. Bu tasarım problemini çözebilmek içinse stratejik ve taktik kararların birlikte ele alındığı karma tamsayı bir matematiksel model önerilmektedir. Stratejik seviyede, üretim ve geri kazanım tesislerinin nerelere açılması gerektiğine ve halihazırda açık olan

tesislerden hangilerinin kapatılması gerektiğine karar verilmektedir. Taktik seviyede ise üretim tesislerinde elde edilen yeni ürünlerle geri kazanım tesislerinde elde edilen yenilenmiş ürünlerin müşterilere doğru ileri yöndeki akış miktarları ile kullanılan ürünlerin müşterilerden geri kazanım tesislerine doğru tersine yöndeki akış miktarlarına ve üretim ile geri kazanım tesislerinde işlenmesi gereken toplam ürün miktarlarına karar verilmektedir. Geliştirilen model kapasiteli, çok ürünlü, tek periyotlu, deterministik talep ve geri dönüşlerin olduğu karma tamsayılı bir yer seçimi ve dağıtım modelidir.

Kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı ile ilgili bu tez çalışması sekiz bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde kapalı döngü tedarik zinciri ile ilgili temel kavramlar açıklanmakta, üçüncü bölümde ise literatür taraması sunulmaktadır. Dördüncü bölümde ele alınan problem tanımlanmakta ve problemin çözümüne ilişkin olarak önerilen karma tamsayılı matematiksel model tanıtılmaktadır. Beşinci bölümde, üretilen test verileriyle modelin çalışma performansı test edilmektedir. Altıncı bölümde, çeşitli parametre değerlerindeki değişimin sonuçlar üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla yapılan duyarlılık analizi çalışmaları sunulmaktadır. Yedinci bölümde ise talep ve geri dönüş değerlerinin belirsiz olduğu durumların ele alınabilmesi için senaryo bazlı rassal bir matematiksel model önerilmektedir. Tezin son kısmında ise çalışmada elde edilen sonuçlar ve ileriki araştırma konuları sunulmaktadır.

2. KAPALI DÖNGÜ TEDARİK ZİNCİRİ

Kapalı döngü tedarik zincirleri, geleneksel ileri akış ve ileri tedarik zinciri faaliyetlerine ek olarak tersine akış ve tersine tedarik zinciri faaliyetlerini de içeren tedarik zincirleridir. İleri tedarik zincirleri genel olarak hammaddeden son ürün elde edilmesi ile ilgili bir seri süreci ve bu ürünlerin müşterilere ulaştırılması ile ilgili faaliyetleri içermektedirken, tersine tedarik zincirleri ise son kullanıcıdan ürünlerin toplanarak ayrıştırma tesislerine taşınmasını, ürünün durumunu ve ekonomik olarak en etkin yeniden kullanım opsiyonunu belirleyebilmek için test edilmesini, sınıflandırma ve ayrıştırma işlemlerini, ekonomik açıdan en uygun olan geri kazanım (tamir, yeniden üretim, yenileme, geri dönüşüm) veya bertaraf yöntemlerinin seçilmesi ve uygulanmasını, geri kazanılan ürünler için ise yeniden pazarlama ve dağıtım faaliyetlerini içermektedir [5].

Kapalı döngü tedarik zincirlerinin ve tersine lojistiğin, tedarik zinciri yönetimi araştırmaları içerisindeki yeri son yıllarda oldukça artmıştır. Bu alanlara olan ilginin artış sebepleri yasal, ekonomik ve çevresel sebepler olmak üzere üç kategoride incelenebilir. Aşağıda, bu üç sebep ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

2.1. Yasal sebepler

Son yıllarda başta AB üye ülkeleri, ABD ve Japonya gibi gelişmiş ülkelerde olmak üzere ürünlerin geri kazanımını, çevreye zararsız hale getirilmesi ve bertaraf edilmesini zorunlu tutan yasal düzenlemeler yürürlüğe girmeye başlamıştır. Bu kısımda AB, ABD ve Türkiye’de son yıllarda yürürlüğe giren elektrik elektronik eşya atıkları ile ilgili bu gibi yasal düzenlemelere ilişkin örnekler verilmektedir.

AB üye ülkelerinde üretilen insan sağlığına ve çevreye zararı olan elektrik elektronik atıkların azaltılması ve yasal olmayan yollardan ihraç edilen elektronik atıkların önüne geçilmesi amacıyla Avrupa Parlamentosu tarafından 2003 yılında 2002/96/EC sayılı Elektrik Elektronik Eşya Atıkları (WEEE) Direktifi yayınlanmıştır [6]. Direktif

kapsamında Şu anda üreticilerin kişi başına toplaması gereken atık miktarı 4 kg olarak belirlenmiştir [6]. 2020 yılında AB çapında yıllık üretilen elektronik atık miktarının 12 milyon civarına ulaşacağı tahmin edilmektedir ve bu atıklarla daha etkin bir şekilde mücadele edebilmek amacıyla 2012/19/EU sayılı yeni WEEE Direktifi yürürlüğe girmiştir. Bu yeni direktif kapsamında 2019 yılına kadar üretilen toplam elektronik atığın %85'inin toplanması planlanmıŐtır ve bu miktar 10 milyon tona veya kişi başına yaklaşık 20 kg ürüne tekabül etmektedir [6].

ABD'de elektronik atıkların geri dönüşümü ile ilgili federal bir yasa oluşturulmasına ilişkin birçok kez girişimlerde bulunulmuş olmasına rağmen henüz üzerinde uzlaşılan federal bir yasa bulunmamaktadır. Ancak başta California, Washington, New York olmak üzere 50 eyaletten 25'inde zorunlu elektronik geri dönüşüm programları uygulanmaktadır [7]. Örneğin New York eyaletinde, üretici kendisine yahut başka bir üreticiye ait elektronik atıkları toplamak, taşımak, geri dönüştürmek veya yeniden kullanmak zorundadır. Toplanması gereken elektronik atık miktarı firmanın pazar payı ile orantılı olarak hesaplanmakta ve yeterli miktar toplanamaması halinde ceza kesilmektedir. Tablo 2.1'de New York eyaletinde elektronik ürün üreticilerinin yeterli miktar atığı toplayamadıkları zaman ödemeleri gereken ceza tutarları sunulmaktadır [8].

Tablo 2.1. New York eyaletinde uygulanan ceza bedelleri

Toplama Yüzdesi	Ödenmesi gereken ceza (cent / pound)
%100	0
$%90 \leq x < \%100$	30
$%50 \leq x < \%90$	40
$x < \%50$	50

Türkiye, AB aday ülkesi statüsünde bir ülke olarak AB Çevre Politikalarını yakından izlemektedir. Bu kapsamda, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından Avrupa Birliği'nin 2002/95/EC sayılı "Elektrikli ve Elektronik Eşyalarda Bazı Zararlı Maddelerin Kullanımının Sınırlandırılması" Direktifi ile 2002/96/EC sayılı "Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya (AEEE)" Direktifine paralel olarak 5/7/2008 tarihli ve 26927 sayılı Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği yayınlanmıştır [9]. Bu yönetmelik kapsamında Tablo 2.2.'de gösterildiği üzere belediyeler belirlenen tarihlere kadar nüfusları ile orantılı miktarda elektronik eşyaları toplamak için toplama merkezi kurmak, elektronik eşyaları toplama işlemini yapmak veya yaptırmak ve açılan merkezler hakkında halkı bilgilendirmekle yükümlüdür [9].

Tablo 2.2. Belediyelerin nüfuslarına göre toplama merkezi kurması için son tarihler

Belediye Nüfusu	Toplama Merkezi Kurma ve AEEE Toplama Başlangıç Tarihleri
400.000'den fazla	1/5/2013
200.000 – 400.000 arası	1/1/2014
100.000 – 200.000 arası	1/1/2015
50.000 – 100.000 arası	1/1/2016
10.000 – 50.000 arası	1/1/2017
10.000'den az	1/1/2018

Elektronik ürün üreticileri ise, belediyeler ve dağıtıcılar tarafından toplanan evsel AEEE'lerin toplama merkezlerinden veya dağıtıcılardan başlamak üzere nakliye maliyetlerini karşılamakla, çevre izin ve lisansı almış teknik özellikleri sağlayan tesislerde işlenmesini sağlamakla, işleme imkânının bulunmaması durumunda ise bertarafı için bir sistem kurmak ve ilgili maliyetleri karşılamakla yükümlüdür. Evsel olmayan AEEE'ler hususunda ise üreticiler AEEE'lerin toplanması, işlenmesi ve bertaraf edilmesi amacıyla bir sistem kurmakla tam yükümlüdür [9].

Üreticiler, Tablo 2.3'de verilen programa uygun olarak evsel AEEE toplama hedeflerine ulaşılmasını sağlamalıdır. Tablo 2.3'de görüldüğü üzere üreticilerin 2013

yılı hedefi kişi başına yıllık 0,3 kg iken 2018’de bu rakam kişi başına yıllık 4 kg’a yükselecektir. AB’nin 2019 yılı için kabaca kişi başına yıllık toplama hedefi 20 kg düzeyindeyken Türkiye’nin hedefi bunun beşte biri seviyesinde olacaktır.

Tablo 2.3. Yıllara göre üreticilerin kişi başı toplaması gereken ürün miktarı

EEE Kategorileri	Yıllara Göre Toplama Hedefi (kg/kişi-yıl)				
	2013	2014	2015	2016	2018
Buzdolabı/Soğutucular/İklimlendirme cihazları	0,05	0,09	0,17	0,34	0,68
Büyük beyaz eşyalar (Buzdolabı/soğutucular/iklimlendirme cihazları hariç)	0,1	0,15	0,32	0,64	1,3
Televizyon ve monitörler	0,06	0,10	0,22	0,44	0,86
Bilişim ve telekomünikasyon ve tüketici ekipmanları (Televizyon ve monitörler hariç)	0,05	0,08	0,16	0,32	0,64
Aydınlatma ekipmanları	0,01	0,02	0,02	0,04	0,08
Küçük ev aletleri, elektrikli ve elektronik aletler, oyuncaklar, spor ve eğlence ekipmanları, izleme ve kontrol aletleri	0,03	0,06	0,11	0,22	0,44
TOPLAM EVSEL AEEE (kg/kişi-yıl)	0,3	0,5	1	2	4

Üreticiler, lisanslı işleme tesisleriyle yahut kendi kurdukları tesislerle yönetmelikçe belirlenen her bir kategorideki eşyanın, geri kazanım hedeflerini karşılamakla yükümlüdür [9]. Geri kazanım hedeflerine ilişkin detaylı bilgilere Çevre Bakanlığı’nın sayfasından ulaşılabilir.

Elektrikli ve elektronik eşyaların atıkları ile mücadele etmek amacıyla AB, ABD ve Türkiye’de yürürlüğe giren ve kapsamlarından kısaca bahsedilen yasal düzenlemeler gibi kağıt, karton gibi ambalaj atıklarının geri dönüşümü, ömrünü tamamlamış taşıtların kontrolü, pil ve lityum bataryaların geri dönüşümü gibi günlük hayatımızda kullandığımız pek çok ürünle ilgili yasal düzenlemelerin sayısı giderek artmaktadır. Yasaların yürürlüğe girdiği ülkelerde faaliyetlerini sürdürmek ve pazar payını kaybetmemek isteyen çok uluslu firmalar, bu yasaların gerektirdiği şartları yerel firmalar gibi yerine getirmekle yükümlüdür. Bu bağlamda yasalar üreticileri ürettikleri ürünün tüm hayat döngüsünden sorumlu tutmakta ve aslında sosyal sorumlulukları gereği zaten yerine getirmeleri gereken görevler firmalara devletler tarafından zorunlu hale getirilmektedir. Bu durumda üreticilerin geleneksel anlamda alışkın oldukları ileri tedarik zinciri yönetiminin yanı sıra ürünlerin tersine akışını da içeren kapalı döngü tedarik zincirlerini maliyet etkin bir şekilde tasarlamaları ve yönetmeleri gerekmektedir.

2.2. Ekonomik sebepler

Genellikle elektronik ve otomotiv sektöründeki ürünler diğer ürün gruplarına görece yüksek geri kazanım değerine ve uzun bir ürün hayat döngüsüne sahiptir. Dell, HP, Kodak, GM ve Xerox gibi şirketler kaynakların yeniden kullanımı ile hammadde ihtiyaçlarından tasarruf sağlamak için ürün geri kazanımını tercih etmektedir [10].

Batarya ve bilgisayarlar gibi içerisinde değerli materyaller barındıran kullanılmış ürünlerin geri dönüşümü sağlanarak ciddi tasarruflar sağlanabilir. Ayrıca, bazı cihazların içerisinde nadir bulunan elementler yer almaktadır. Bu elementlerin geri kazanılmaması ileride ciddi sorunlara yol açabilir [11].

Ürün geri dönüş miktarlarının artması da kapalı döngü tedarik zincirlerine verilen önemin ekonomik sebepleri arasında sıralanabilir. Günümüzde e-ticaretin hızlı bir şekilde gelişmesi, internet üzerinden yapılan alışverişler ve esnek iade koşulları iade

edilen ürün sayısının artmasına sebep olmaktadır [12]. Bu geri dönüşlerin etkin bir şekilde planlanması ve yönetilmesi gerekmektedir.

Üretim esnasında ortaya çıkan hatalar yüzünden ürünlerin üreticiler tarafından müşterilerden geri çağırılması gibi durumlar, garanti kapsamında tamir görmesi gereken ürünler, ürün ömrü tamamlanmamış olsa da üreticilerin planlaması gereken geri dönüşlerdir [12]. Bu ürün geri dönüşlerinin de etkin bir şekilde planlanması firmanın imajı yönünden önemli hususlardır.

Ayrıca devletler tarafından verilen finansal teşvikler de ekonomik sebepler arasında gösterilebilir. ABD’de yirmiden fazla ürünün geri dönüşüm oranları ile ilgili yapılan bir çalışmada genellikle arabalarda kullanılan kurşun-asit bataryaların en büyük geri dönüşüm oranına sahip olduğu görülmüştür [11]. Bunun ana sebebi ise kurşun konusunda daha fazla endişelenen devletin araba üreticilerine bataryaların geri dönüştürülmesi için verdiği finansal teşviklerdir [11]. Bu gibi finansal teşvikler de üreticileri ürünlerini etkin bir şekilde geri kazanmaya teşvik etmektedir.

Ürün ve pazar ihtiyaçlarının gitgide artması, kaynakların sınırlı olması, yahut yönetimin gereken ilgiyi göstermemesi sebebiyle pratikte firmalar ileri ve tersine ağ tasarımlarını entegre bir şekilde optimize etme fikrine sıcak bakmayabilmektedir [12]. Ancak hammadde kaynaklarının azalması, bahsi geçen nadir elementler gibi üretimde kullanılan hammadde fiyatlarındaki ciddi artışlar, politik sebeplerle hammadde arzının azalması, e-ticaretin yaygınlaşması, esnek iade ve garanti koşulları, devletlerin sağladığı finansal teşvikler gibi ekonomik sebepler de göz önüne alındığında tersine lojistik faaliyetlerinin ileri tedarik zincirine entegre edilmemesi firmalar için ekonomik açıdan büyük değer kayıplarına sebep olabilmektedir.

2.3. Çevresel Sebepler

Son yirmi yıldır şirketlerin çevrecilik anlayışı dar tepkisel bir yaklaşımdan aşama aşama daha proaktif ve iş stratejileri ile entegre bir yaklaşıma dönüşmüştür [13]. Artık

şirketler, sürdürülebilirlik hedefleri kapsamında yaşam döngüsü değerlendirmesi, tedarik zinciri izleme, eko-sertifikasyon ve sürdürülebilirlik raporlaması gibi artık neredeyse standart hale gelmiş iş araçlarını kullanmaktadır [13].

General Electric, Procter&Gamble, Coca-Cola, IBM, Toyota, Ford gibi büyük küresel şirketlerden pek çoğu sürdürülebilir stratejiler uygulamaktadır. Örneğin General Electric 2005'ten bu yana "Ecomagination" adını verdiği temiz enerji, temiz su ve temiz teknolojilerle büyüme hedefleri olan bir strateji uygulamaktadır. Best Buy 2010 yılında "Greener Together" adını verdiği müşterileri kullanım ömrünün sonuna gelmiş elektronikleri azaltmaya, bu ürünlerin yeniden kullanımını ve ticaretini yapmaya teşvik etmeyi amaçlayan bir strateji uygulamaktadır [13].

Düzenlenmeye başladığı 2011 yılından itibaren Interbrand Marka Danışmanlığı Ajansı tarafından gerçekleştirilen "En İyi Küresel Yeşil Markalar" (Best Global Green Brands) raporunda üç yıldır üst üste dünyanın en çevreci markası olmayı başaran Toyota ise 2011 yılında "Toyota Global Vision" stratejisini yayınlamıştır [14,15]. Bu strateji kapsamında karbondioksit emisyonunu azaltmak ve fosil yakıtlara alternatif enerji kaynakları kullanan fişe takılabilir hibrid araçlar, elektrikli araçlar, yakıt pili kullanan araçlar gibi yeşil araç teknolojileri üzerinde çalışarak en iyi eko-aracı yaratmak istenmektedir. Toyota geri kazanım konusunda da ciddi adımlar atmıştır. Yaklaşık 20 yıl önce hibrid araç Prius'u piyasaya çıkardığında ömrünü tamamlamış hibrid araç bataryalarını toplamak üzere kendi geri kazanım ağını oluşturmuş ve günümüze kadar 30,000 adet hibrid araç bataryasını toplayarak hepsinin geri kazanımını sağlamıştır [16]. Geri kazanıma tabi tutulan bataryalar içindeki nikel ve kobaltın yanı sıra ekonomik sebepler arasında bahsi geçen nadir elementler de geri dönüştürülerek yeni bataryaların üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır [16].

Küresel firmaların sürdürülebilirlik stratejileri kapsamında çevresel konulara önem vermeleri ve doğayı koruma girişimleri müşteriler üzerinde olumlu bir etki yaratmakta ve şirketlerin yeşil marka imajına sahip olmalarını sağlamaktadır. Artık küresel ısınma ve iklim değişikliği gerçeği tüm dünyayı zengin ve fakir ülke ayrımı yapmadan etkisi

altına almaktadır. Bu nedenle şirketler, kâr/zarar hesaplarını bir yana bırakarak sosyal sorumluluk bilinciyle çevreye zarar vermeden sürdürülebilir büyümenin yollarını aramaktadır. Müşteriler tarafında ise daha pahalı olsalar dahi yeşil ürünlere olan talep giderek artmaktadır. Bu nedenle çevresel faktörler de kapalı döngü tedarik zincirlerinin kurulmasını zorunlu hale getirmektedir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kapalı döngü tedarik zinciri tasarımı üzerine 1990'lı yıllardan bu yana pek çok makale yazılmıştır. Bu bölümde kapalı döngü tedarik zinciri tasarımı ile ilgili 1998-2014 yılları arasında yapılan ve bu tez çalışmasına ışık tutan bazı çalışmalar incelenmektedir.

Bu konuda incelemiş olduğumuz en eski çalışma Marin ve Pelegrin tarafından yapılan 1998 tarihli çalışmadır. Bu çalışmada Marin ve Pelegrin, “geri dönüş tesisi yer seçimi problemi” olarak adlandırmış oldukları ileri ve tersine akışları birlikte içeren kapalı döngü tedarik zinciri problemi kapsamında dağıtım merkezlerinin yerlerine ve dağıtım merkezleri ile müşteriler arasındaki ileri ve tersine yöndeki akışlara karar veren tek aşamalı bir model geliştirmiştir [17]. Müşteri talepleri deterministiktir, geri dönecek ürün miktarları ise her tesis için o tesisin ilettiği toplam ürün miktarlarının belirli bir oranı olacak şekilde alınmaktadır. Tesisler kapasitesiz olarak tasarlanmıştır. Çözüme yönelik olarak ise Lagrange ayrıştırmasına dayalı kesin ve sezgisel çözüm yöntemleri önerilmiştir [17].

Jayaraman vd. birden fazla yeniden üretilebilir ürün bulunan, tesislerin depolama kapasitelerinin bulunduğu, deterministik talep ve geri dönüşlerin olduğu bir ağ tasarımı problemini ele almıştır [18]. Ağ iki aşamadan oluşmaktadır; kullanılmış ürünler toplama merkezlerinden alınarak işlenmek üzere yeniden üretim tesislerine gönderilmekte ve yeniden üretilen ürünler tekrar kullanılmak üzere müşteri noktalarına gönderilmektedir [18]. Her işleme tesisinin her ürün tipini yeniden üretebildiği varsayılmıştır. Ayrıca maksimum açılacak tesis sayısı için bir sınır ve yeniden üretim tesisleri ve ürünü yeniden kullanacak olan noktalar için ise depolama kapasitesi mevcuttur [18]. Önerilen modelle açılması gereken optimum tesis sayısı belirlerken taşıma maliyetlerinin ağ tasarımı üzerine olan etkileri de araştırılmıştır [18].

Fleischmann vd. tek ürünün geri dönüşlerini içeren tesis yer seçimi probleminin çözümüne ilişkin olarak genel bir matematiksel model geliştirmiştir [19]. Ürünler üretim tesislerinden depolar aracılığıyla müşterilere, müşterilerden ayrıştırma tesislerine ve oradan ise geri dönüşüm tesislerine yahut bertarafa gönderilmektedir [19]. Talebin karşılanmamasının yanı sıra ürünlerin toplanmaması da modelde ele alınmaktadır [19]. Geliştirilen model tek periyotlu, deterministik, tek ürünlü, kapasitesiz, maliyet en küçüklemesine dayanan bir tesis yer seçimi modelidir. Model fotokopi makineleri ve kağıt geri dönüşümü ile ilgili iki ayrı vaka üzerinde denenmiştir [19].

Krikke vd. çalışmasında genellikle birbirinden ayrı düşünülen ürün tasarımı ve lojistik ağı tasarımı kararları birleştirilerek modülerlik, tamir edilebilirlik ve geri dönüşüm özelliklerini içeren bir ürün tasarımı ile lojistik ağı tasarımı birlikte ele alan bir model geliştirilmiştir [20]. Amaç fonksiyonlarında sıklıkla ele alınan maliyetin yanı sıra çevresel etkiler de lineer enerji ve atık fonksiyonları ile modele dahil edilmiştir [20]. Geliştirilen bu model Avrupa operasyonları hakkında endişe duyan Japon tüketici elektroniği firmasının buzdolapları ile ilgili gerçek hayat Ar-Ge verileri kullanılarak kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemine uygulanmıştır [20]. Matematiksel modelde olası ürün tasarımları, bileşenler, modüller ve malzemeler ayrı birer küme olarak tanımlanmıştır [20]. İlgili ürün tasarımı için gerekli hammaddeler, bileşenler ve modüller tedarikçilerden temin edilmekte ve tesislerde gerekli işlemlere tabi tutulmaktadır [20]. Müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürünler ise geri dönerek birden fazla operasyonun yapılabileceği tesislerde geri kazanılmaktadır, geri kazanıma uygun olmayan ürünler ise katı atık sahasına yahut ısı geri dönüşüme gönderilmektedir [20]. Model tek periyotlu, deterministik, kapasitesiz, çok amaçlı bir hedef programlama modeli olarak modellenmiştir [20].

Beamon ve Fernandes belirli bir kapasiteye sahip depo ve toplama merkezlerinin yerlerine, hangi depoların sınıflandırma işlemi yapacağına ve tesisler arasındaki ürün akışının nasıl olması gerektiğine karar vermek üzere deterministik, çok periyotlu karma tamsayı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir, yatırım ve

operasyonel maliyetleri birlikte analiz etmek için ise bugünkü değer metodu modelde kullanılmıştır [21].

Min vd. tersine lojistik ağı tasarımı problemi için deterministik, kapasiteli, doğrusal olmayan karma tamsayılı bir programlama modeli geliştirmiştir, geliştirilen modelin çözümü için genetik algoritma kullanılmıştır [22].

Salema vd. İspanya'daki bir ofis dokümanı firması için deterministik talep ve arzın bulunduğu, tek periyotlu, çok ürünlü, kapasitesiz ağ tasarımı modeli geliştirmiştir [23]. Ürünler hibrid üretim/yeniden üretim tesislerinde üretilerek depo veya dağıtım merkezleri aracılığıyla müşterilere iletilmektedir [23]. Kullanılmış ürünler ise demontaj ve toplama merkezleri aracılığıyla üretim/yeniden üretim tesislerine taşınmaktadır, toplama merkezlerinde planlanmış bertarafa da izin verilmektedir [23].

Sahyouni vd. kapasitesiz tesis yerleşimi modelini tersine akışları da içerecek şekilde geliştirmiştir [12]. Tek ürünlü, kapasitesiz, tek periyotlu model ile ileri ve tersine ağdaki dağıtım merkezlerinin yerlerine karar verilmek istenmektedir, çözüm için ise Lagrange gevşetmesi metodu kullanılmıştır [12]. Tersine dağıtım merkezlerinin ileri dağıtımın bir alt kümesi olarak kabul edildiği yanı sıra ileri dağıtımın tersine dağıtım merkezlerinin alt kümesi olarak kabul edildiği iki ayrı model daha geliştirilmiş ve geri dönüş miktarı taleplerin belirli bir oranı olarak modele dahil edilmiştir [12].

Wang vd. ürün geri dönüşlerinin olduğu bir sistemde, bir tedarikçinin, bir firmanın ve birden fazla dağıtım merkezinin bulunduğu tedarik zinciri ağının ve stok politikasının nasıl olması gerektiğine karar vermek amacıyla iki aşamalı, tek ürünlü, çok periyotlu, kapasitesiz, çok amaçlı ve iki aşamalı bir programlama modeli geliştirmiştir [24].

Ko ve Evans ileri ve tersine akışlar ile ilgili lojistik operasyonlarını iyileştirmek isteyen ve birbirinden farklı müşterilerinin tedarik zincirlerini yönetmek zorunda olan üçüncü parti lojistik firmaları için çok ürünlü, çok periyotlu, kapasiteli, karma tamsayılı

doğrusal olmayan matematiksel bir model geliştirmiştir [25]. Çözüm yöntemi olarak ise genetik algoritma temelli sezgisel bir çözüm yöntemi önerilmiştir [25]. Fabrikalarda üretilen ürünler üçüncü parti lojistik firmalarına ait depolarda depolanmakta ve müşterilere zaman içerisinde gönderilmektedir, müşteri noktalarından toplanan tamir edilecek ürünler ise tamir merkezi/depo olarak kullanılan hibrid tesisler üzerinden üreticilere gönderilmektedir [25].

Listes talep ve geri dönüş değerlerinin rassal olduğu kapalı döngü tedarik zinciri tasarımı için jenerik stokastik bir model geliştirmiştir [26]. Çözüm yöntemi olarak ise tamsayılı L-şekil metodu olarak bilinen dal-kesim prosedürüne dayalı bir ayrıştırma yaklaşımı kullanılmıştır [26]. Üretim tesislerinden ürünler müşterilere, kullanılmış ürünler ise müşterilerden geri kazanım tesislerine iletilmektedir, geri kazanılan ürünler fabrikalara gönderilmekte, geri kazanılamayan ürünler ise bertarafa iletilmektedir [26]. Tesislerin kapasiteleri bulunmaktadır ve ürünlerin test edilmesine ilişkin maliyetler de modele eklenmiştir [26].

Lu ve Bostel üretim, yeniden üretim ve toplanan kullanılmış ürünlerin yeniden üretime gönderilmeden önce temizleme, demontaj, muayene ve sınıflandırmasının yapıldığı ara tesisler olmak üzere üç tip tesisin bulunduğu iki aşamalı tesis yerleşimi problemi için ileri ve tersine akışları içine alan karma tamsayılı bir matematiksel model geliştirmiştir [27]. Geliştirilen modelde talep ve geri dönüşler deterministiktir, ayrıca, model kapasitesiz, tek ürünlü ve tek periyotludur, çözüm için Lagrange sezgiseline dayalı bir algoritma önerilmektedir [27].

Salema vd., Fleischmann vd. tarafından geliştirilen modeli baz alan ve tersine akışları içeren ağ tasarımı problemini çözecek yeni bir model geliştirmiştir [19,28]. Fleischmann vd. tarafından geliştirilen model kapasite, çok ürün ve talepteki belirsizlik durumlarını içermediği için gerçek hayattaki durumları tam olarak yansıtmadığı gerekçesiyle talepler ve geri dönüşlerin belirsiz olduğu, çok ürünlü ve kapasiteli bir model geliştirilmiş ve problem GAMS/CPLEX programı kullanılarak çözülmüştür [19,28].

Demirel ve Gökçen üreticiler ve müşterilerin yerlerinin sabit olduğu durumda dağıtım merkezleri, toplama merkezleri ve demontaj merkezlerinin yerlerine karar verildiği ağ tasarımı problemini çözmek için çok ürünlü, kapasiteli, tek periyotlu, talep ve geri dönüşlerin deterministik olduğu karma tamsayılı bir matematiksel model geliştirmiştir [29].

Kusumastuti vd. bir bilgisayar firması adına tamir işlerini yapan bir firmada dağıtım merkezi ve depo yerlerine karar verilmesi için bir vaka analizi çalışması gerçekleştirmiştir [30]. Birden fazla parça tipinin olduğu, çok periyotlu, dağıtım merkezi ve depoların kapasitesiz olduğu, talep ve geri dönüşlerin deterministik olduğu bir model geliştirilmiştir [30].

Lee ve Dong kullanım ömrünün sonuna gelmiş bilgisayarların geri kazanılması için tek ürünlü, tek periyotlu, deterministik, kapasiteli bir tesis yer seçimi modeli geliştirmiştir [31]. İşleme tesisleri aracılığıyla ürünler tesislerden müşterilere iletilmekte ve ömrünü tamamlamış ürünler toplanarak gene işleme tesisleri aracılığıyla üreticiye gönderilmektedir [31]. Geliştirilen modeli çözmek için iki aşamalı bir sezgisel yöntem önerilmektedir; ilk aşamada depoların yerini belirleyebilmek için bir seçim stratejisi uygulanmakta, ikinci aşamada ise tabu arama metodu ile taşıma çözümü iyileştirilmektedir [31].

Salema vd. ileri ve tersine tedarik zinciri ağı tasarımlarını eş zamanlı çözecek olan stratejik bir yer seçimi-dağıtım modeli geliştirmiştir [32]. Ağ tasarımına ilişkin stratejik kararların yanı sıra üretim, stok ve dağıtım planı gibi taktik kararlar da modelde dikkate alınmıştır [32]. Stratejik ve taktik kararların entegrasyonu birbirleriyle bağlantılı makro ve mikro zaman ölçekleri yardımıyla sağlanmıştır [32]. Makro düzeyde deterministik talep ve geri dönüşler için tedarik zinciri tasarlanırken mikro düzeyde ise taleplerin nasıl karşılanacağı ve geri dönüşlerin nasıl yapılacağı planlanmaktadır [32]. Modeli çözmek üzere karma tamsayılı bir doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir, geliştirilen model çok ürünlü, çok periyotlu,

deterministik talep ve geri dönüşlere sahip, kapasiteli ve stok tutulmasına izin veren bir modeldir [32].

Pishvae ve Torabi tek ürünlü, çok periyotlu, kapasiteli, iki amaç fonksiyonuna sahip karma tamsayılı bir model geliştirmiştir ve modeli iki aşamalı bulanık bir yöntemle çözmüşlerdir [33]. Geri dönüşler, talebin belirli bir yüzdesi olarak hesaplanmaktadır, aynı şekilde hurda ürün miktarları da geri dönen ürünlerin belirli bir yüzdesi olarak hesaplanmaktadır [33]. İki amaç fonksiyonundan birincisi maliyet en küçüklemesidir, ikincisi ise toplam teslim süresinin gecikmesinin en küçüklenmesidir [33].

Salema vd. 2010 yılında yaptıkları çalışmada, Salema vd. tarafından 2009 yılında çalışılan problemi tekrar ele almış, her tesis ve müşteri noktasını tedarik zinciri üzerinde belirli operasyonları gerçekleştirecek düğüm noktaları olarak kabul etmiştir [32,34]. Çok ürünlü ayrıtlar ise düğümler arasındaki bağlantıları sağlamaktadır [34]. İki yeni özellik olarak ayrıtlar üzerindeki yolculuk süreleri ile kullanım/işleme süreleri de modellenmiştir [34]. Önerilen model ileri tedarik zinciri açısından, kapalı döngü tedarik zinciri ağına pek çok türdeki tedarik zinciri ağı tasarımında kullanılabilir [34]. Geliştirilen model çok ürünlü, çok periyotlu, kapasiteli, stoğa izin veren, ileri ve tersine akışları içeren, hem stratejik hem de satın alma, üretim ve dağıtım gibi taktiksel kararları içeren bir modeldir ve Portekiz sanayisi ile ilgili bir gerçek hayat problemi üzerinde test edilmiştir [34].

Wang ve WeiHsu tedarikçi, fabrika ve müşteri yerlerinin sabit olduğu bir ağda hibrid dağıtım/toplama merkezleri ile geri dönüşüm merkezlerinin yerlerine karar vermek için tek ürünlü, tek periyotlu, kapasiteli, deterministik talep ve geri dönüşlerin olduğu bir model geliştirmiştir [35]. Geri kazanım ve bertaraf edilecek ürün oranları talep ve geri dönen ürün sayısı ile orantılıdır, ayrıca dağıtım merkezlerinde geri kazanıma ayrılacak olan kapasite karar değişkeni olarak modele dahil edilmiştir [35]. İlk geliştirilen model doğrusal olmayan bir modeldir, yeni kısıt ve değişkenler eklenerek model doğrusal tamsayılı modele çevrilmiştir [35]. Problemi çözmek için bir genetik algoritma geliştirilmiştir [35].

Easwaran ve Üster çok ürünlü, tek periyotlu, deterministik, hibrid üretim/yeniden üretim tesisleri ve belirli bir kapasitesi olan hibrid dağıtım/toplama merkezlerinin bulunduğu karma tamsayılı bir kapalı döngü tedarik zinciri modeli geliştirmiştir ve geliştirilen model Benders ayrıştırması yöntemi ile çözülmüştür [10].

Lundin İsveç Merkez Bankası'nın nakit para akışı için kullanılan tedarik zinciri için bir vaka çalışması gerçekleştirmiştir [36]. Çalışma kapsamında taşıma maliyetlerini minimize etmeyi amaçlayan zaman yayımlı minimum maliyet akış modeli (TEMCF-time expanded minimum cost flow) geliştirilmiştir [36]. İleri yöndeki nakit para akışı, Merkez Bankası depolarından, özel bankalar tarafından işletilen depolara oradan da bu bankalara ait özel şubeler yahut ATM'ler aracılığıyla müşterilere doğru gerçekleşmektedir, tersine nakit para akışı ise ileri akışın tersi yönde müşterilerden merkez bankasına doğru ilerlemektedir [36]. Risk altında rotalama için bir risk analizi çalışması yapılarak modele saldırıların olasılıklarına bağlı kayıpları içeren bir risk değerlendirme fonksiyonu eklenmiştir, buna ek olarak model kapasiteli ve çok periyotludur [36].

Amin ve Zhang kapalı döngü tedarik zinciri tasarımı için çok amaçlı, tek periyotlu, çok ürünlü, kapasiteli, karma tamsayılı bir model geliştirmiştir [37]. Amaç fonksiyonlarından bir tanesi maliyet fonksiyonu diğeri ise çevresel faktörlerin ele alındığı bir fonksiyondur [37]. Bu iki fonksiyon ağırlıklı toplama ve epsilon kısıtı yöntemi kullanılarak ele alınmıştır [37]. Çok amaçlı bu problem, talep ve geri dönüşlerdeki belirsizlik eklenerek senaryo bazlı rassal programlama modeli olarak modellenmiştir [37].

Wei ve Zhao yeni veya yeniden üretilmiş bileşenlerden ürün üreten ve bir perakendeci aracılığıyla müşterilere ürünlerini ileten bir üreticinin kullanılmış ürünlerini toplamak üzere doğrudan toplama, perakendeci yahut üçüncü parti lojistik firması aracılığıyla toplama şeklinde belirlenen üç yöntemden hangisini seçmesi gerektiğini bulmak üzere oyun teorisi ve bulanık teoriyi kullanmıştır [38]. Talep, yeniden üretim maliyeti ve kullanılmış ürünün toplama maliyetleri bulanık değerler olarak ele alınmıştır [38].

Fahimniaa vd. ileri ve tersine akışları içeren kapalı döngü tedarik zinciri tasarımı için karbon ayak izlerini içeren çok ürünlü, çok periyotlu, deterministik, stoğa izin veren, kapasiteli bir karma tamsayı model geliştirmiştir [39]. Avustralya da karbon vergisi uygulaması başladığı için Avustralya’da bulunan bir firmadan elde edilen verilerle bir vaka çalışması yapılmıştır [39].

Ramezani vd. kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı için çok ürünlü, çok periyotlu, çok amaçlı bulanık bir matematiksel programlama modeli geliştirmiştir, modelde karın maksimize edilmesi, teslim zamanının kısaltılması ve kalitenin maksimizasyonu olmak üzere üç ayrı amaç fonksiyonu bulunmaktadır [40]. Model kapsamında bulanık/esnek kısıtlar, bilgi eksikliğinin bulunduğu noktalarda bulanık kat sayılar ve karar vericiler için bulanık hedefler kullanılmıştır [40]. Bulanık çok amaçlı karma tamsayı modeli eşdeğer bir modele dönüştürmek için bulanık optimizasyon yaklaşımı kullanılmıştır [40].

Özceylan vd. stratejik seviyede ileri ve tersine lojistikte taşınması gereken ürün miktarı, taktik seviyede ise tersine tedarik zinciri için demontaj hattının dengelenmesi problemini ele alan doğrusal olmayan bir karma tamsayı model geliştirmiştir [41]. Geliştirilen model kapasiteli, tek ürünlü çok bileşenli, çok periyotlu, deterministik bir modeldir [41].

1998-2014 yılları arasında ileri akışların yanı sıra tersine akışları da içeren kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemiyle ilgili incelenen çalışmalarla ilgili bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla çalışmalarda ele alınan ağın aşama sayısı, ürün sayısı, modelin dinamik mi statik mi olduğu, ağ üzerinde tanımlanan tesislerin kapasitelerinin olup olmadığı, kullanılan verilerin deterministik mi rassal mı olduğu ve çözüm yöntemi ile ilgili özet bilgiler Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de gösterilmektedir. Bu sınıflandırma yapılırken Akçali vd. çalışmasından faydalanılmıştır. Bu kapsamda, tamamen aynı faaliyeti yapsın yahut yapmasın benzer bir amaca hizmet eden noktalar kümesi kademe, iki ardışık kademe arasında kalan bağlantılar kümesi ise aşama olarak tanımlanmaktadır [42]. Tek periyotlu sadece bir zamanlı karar vermenin olduğu

modeller statik, talep, arz ve maliyetler gibi parametrelerin zaman içerisinde değiştiği modeller ise dinamik yapıya sahip modeller olarak sınıflandırılmaktadır [42]. Talep ve arz parametrelerinin belirli olduğu yapıya sahip modeller deterministik, ilgili parametrelerin olasılıklı bir dağılıma sahip olduğu modeller ise rassal modeller olarak sınıflandırılmaktadır [42]. Bu tanımlamalara uygun olacak şekilde Tablo 3.1’de 1998-2008 yılları arasındaki makaleler, Tablo 3.2’de ise 2009-2014 yılları arasındaki makaleler sınıflandırılmıştır.

Bu alışma kapsamında geliştirilen ilk model iki aşamalı, çok rnl, kapasiteli, deterministik ve tek periyotlu bir modeldir. Bu açıdan Jayaraman vd., Demirel ve Gökçen ve Easwaran ve ster’in geliştirdikleri modellerle aynı özellikleri taşımaktadır [10,18,29]. Ancak bu çalışmalarda ele alınan modeller maliyetleri en küçüklemek için sabit tesis açma, taşıma, birim üretim ve geri kazanım gibi maliyetleri göz önüne almaktadır. Bu çalışmada geliştirilen model ise diğer modellerde ele alınan maliyet kalemlerinin yanı sıra tesis kapama, operasyonel maliyetler ve ek kapasite kullanım maliyetleri ile ürün satışından elde edilen gelir ve geri kazanımdan elde edilen kazancı da göz önüne alarak kârı en byklemeyi hedeflemektedir. Literatür çalışmasında incelenen kesin yöntemlerle üzülen tek periyotlu, tek rnl ve kapasitesiz diğer jenerik modeller ise Marin ve Pelegrin, Fleischmann vd. tarafından geliştirilmiştir [17,19]. Marin ve Pelegrin, tarafından geliştirilen model tek aşamalı bir modeldir [17]. Fleischmann vd. ise bu çalışmada geliştirilen modelde olduğu gibi iki aşamalıdır [19]. Ancak model tek rnl ve kapasitesizdir. Bu sebeple bu çalışmada ele alınan model çok rnl ve kapasiteli yapısıyla gerçek hayatta karşılaşılan problemleri daha iyi yansıtılmaktadır.

Bu alışma kapsamında ayrıca talep ve geri dönüşlerdeki belirsizliği içerecek şekilde senaryo bazlı rassal bir model de geliştirilmiştir. Senaryo bazlı rassal modelin yapısı Salema vd. tarafından geliştirilen jenerik modele belirsizlik durumlarının modele eklenmesi hususunda benzetilmektedir [28]. Ancak amaç fonksiyonunda ele alınan maliyet ve gelir kalemlerinin detayı, kapasite artırımına izin vermesi ve bir ürünün değişik hallerinin de modellenebilirliği açısından ilgili çalışmadan ayrışmaktadır.

Tablo 3.1. Kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı üzerine olan çalışmalar (1998-2008)

Makale	Aşama	Statik/ Dinamik	Tek ürün/ Çok ürün	Kapasiteli / Kapasitesiz	Deterministik / Stokastik	Amaç fonksiyonu	Çözüm yöntemi
Marin ve Pelegrin [17]	1	Statik	Tek	Kapasitesiz	Deterministik	Min	Kesin ve sezgisel (B&B ve Lagrange ayrıştırması)
Jayaraman vd. [18]	2	Statik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min	Kesin (CPLEX)
Fleischman n vd. [19]	2	Statik	Tek	Kapasitesiz	Deterministik	Min	Kesin (CPLEX)
Krikke vd. [20]	2	Statik	Çok	Kapasitesiz	Deterministik	Çok amaçlı	Kesin (Hedef Programlama)
Beamon ve Fernandes [21]	2	Dinamik	Tek	Kapasiteli	Deterministik	Min	Kesin
Min vd. [22]	2	Statik	Tek	Kapasiteli	Deterministik	Min	Sezgisel (Genetik Algoritma,)
Salema vd. [23]	2	Statik	Çok	Kapasitesiz	Deterministik	Min	Kesin (CPLEX)
Sahyouni vd. [12]	1	Statik	Tek	Kapasitesiz	Deterministik	Min	Sezgisel (Lagrange Gevşetmesi)
Wang vd. [24]	2	Dinamik	Tek	Kapasitesiz	Stokastik	Çok amaçlı	Sezgisel (İki aşamalı programlama)
Ko ve Evans [25]	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min	Sezgisel (Genetik Algoritma)
Listes [26]	2	Statik	Tek	Kapasiteli	Stokastik	Maks.	Sezgisel (Ayrıştırma)
Lu ve Bostel [27]	2	Statik	Tek	Kapasitesiz	Deterministik	Min	Sezgisel (Lagrange)
Salema vd. [28]	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Stokastik	Min	Kesin (CPLEX)
Demirel ve Gökçen [29]	2	Statik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min	Kesin (CPLEX)
Kusumastuti vd. [30]	3	Dinamik	Tek- Çok bileşen	Kapasiteli	Deterministik	Min	Kesin (Lingo)
Lee ve Dong [31]	2	Statik	Tek	Kapasiteli	Deterministik	Min	Sezgisel (iki aşamalı tabu arama)

Tablo 3.2. Kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı üzerine olan çalışmalar (2009-2014)

Makale	Aşama	Statik/ Dinamik	Tek ürün/ Çok ürün	Kapasiteli / Kapasitesiz	Deterministik / Stokastik	Amaç fonksiyonu	Çözüm yöntemi
Salema vd. [32]	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Maks.	Kesin (CPLEX)
Pishvae ve Torabi [33]	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Stokastik	Çok amaçlı	Sezgisel (İki aşamalı- bulanık yöntem)
Salema vd. [34]	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min	Kesin (CPLEX)
Wang ve WeiHsu [35]	3	Statik	Tek	Kapasiteli	Deterministik	Min	Sezgisel (Genetik algoritma)
Easwaran ve Üster [10]	2	Statik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min	Kesin (Benders ayırıştırması)
Lundin [36]	2	Dinamik	Tek	Kapasiteli	Deterministik - Taşımalarda risk durumları için olasılık değerleri var	Min	Kesin (Zaman yayımlı minimum maliyet akış modeli)
Amin ve Zhang [37]	2	Statik	Çok	Kapasiteli	Deterministik - Alternatif model stokastik	Çok amaçlı	Kesin (CPLEX)
Wei ve Zhao [38]	2	Statik	Tek	Kapasitesiz	Stokastik	Maks.	Sezgisel (Oyun ve bulanık teori)
Fahimniaa vd. [39]	2	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Deterministik	Min	Kesin (CPLEX)
Ramezani vd. [40]	3	Dinamik	Çok	Kapasiteli	Stokastik	Çok amaçlı	Kesin (CPLEX)
Özceylan vd. [41]	3	Dinamik	Tek- Çok bileşen	Kapasiteli	Deterministik	Min	Kesin (COIN/BO NMIN)

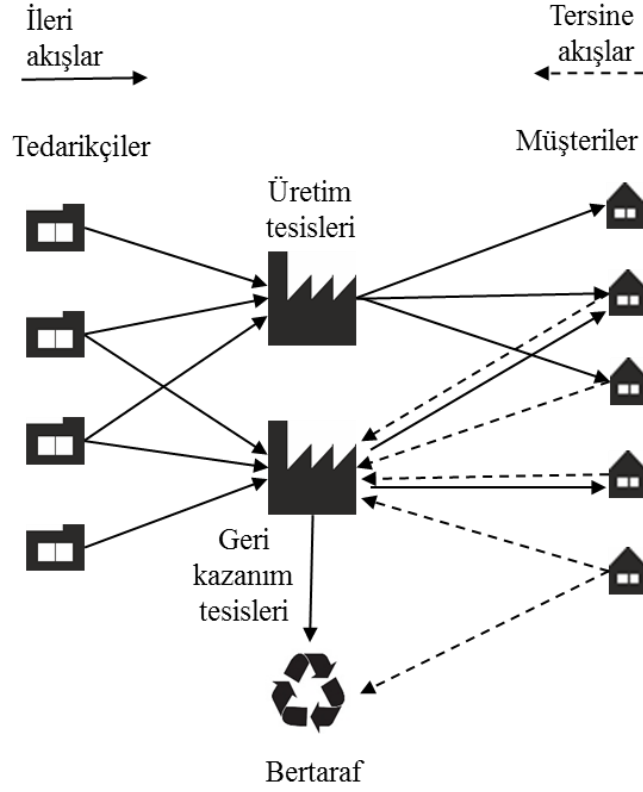
4. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, tez çalışmasında ele alınan kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi tanımlanmakta ve problemin çözümü için geliştirilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli anlatılmaktadır.

4.1. Problem Tanımı

İleri ve tersine yöndeki akışları bir arada ele alan kapalı döngü bir tedarik zinciri ağında, tedarikçilerden temin edilen hammadde, parça ve bileşenler üretim tesislerinde işlenerek yeni ürünler elde edilir ve bu ürünler müşteri taleplerini karşılamak üzere müşterilere iletilir. Müşteriye ulaşan ürünler kullanım veya ürün ömrünün dolması, arızalanma gibi sebeplerle kullanılmış ürün haline gelir ve üreticilere geri iletilir. Üreticiler, geri gönderilen bu ürünleri yasalarca belirlenen minimum gereklilikleri sağlayacak şekilde geri kazanır veya bertaraf eder. Geri kazanım sonrası yenilenmiş ürün elde edilir ve bu ürünlerle tekrar müşteri taleplerinin karşılanması sağlanır. Bertaraf edilmesine karar verilen ürünler ise yok edilerek üretici ve müşteri arasında oluşan bu döngüyü terk eder. Bahsedilen akışlar ve ele alınan kapalı döngü tedarik zinciri ağı Şekil 4.1’de yapısal olarak gösterilmektedir.

Bu çalışmada, kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi ele alınmaktadır. Bu kapsamda, ileri akış içerisinde potansiyel üretim tesislerinden hangilerinin açılacağına, açık olan mevcut tesislerden hangilerinde üretime devam edileceğine hangilerinin ise kapatılması gerektiğine, müşteri taleplerini karşılamak üzere ne kadar miktarda ürünün hangi üretim opsiyonu ile üretileceğine ve tedarikçilerden ne kadar hammadde sağlanması gerektiğine karar verilmektedir. Aynı şekilde tersine akış ile ilgili olarak da potansiyel geri kazanım tesislerinden hangilerinin açılacağına ve açık olanlarından hangilerinin kapatılacağına, yasalarca zorunlu olarak toplanması gereken minimum miktar karşılanacak şekilde ne kadar kullanılmış ürünün toplanacağına ve bu ürünlerin hangi geri kazanım opsiyonları ile işlem göreceğine karar verilmektedir. Bu kararlar verilirken amaç toplam kârın en büyüklenmesidir.



Şekil 4.1. Kapalı döngü bir tedarik zinciri ağı.

Problemde birçok farklı tesis ve ağ topolojisi ele alınabilmektedir. Problemdeki tesisler *seçilebilir* ve *seçilemez* olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Seçilebilir tesisler ilgili üretim ve geri kazanım işlemleri için *mevcut* ve *potansiyel* tesisler olarak ayrıca ikiye ayrılmaktadır. Seçilebilecek mevcut tesisler için işletme/kapatma, seçilebilecek potansiyel tesisler için ise yer seçimi kararları verilmelidir. Seçilemeyecek tesisler müşterileri kapsamaktadır ve bu kümedeki tesisler için herhangi bir işletim maliyeti bulunmamaktadır.

Problem çok ürünlü olarak ele alınmaktadır. Bu kapsamda birden farklı ürün olabileceği gibi tek bir ürünün farklı halleri (yeni ürün, kullanılmış ürün, yenilenmiş ürün gibi) de problemde ayrıca göz önüne alınabilmektedir. Bir sonraki kısımda problem için oluşturulan matematiksel model sunulmaktadır.

4.2 Karma Tamsayı Matematiksel Model

Problem, çok ürünlü, kapasite kısıtlı, deterministik taleplere sahip, birden fazla üretim ve geri kazanım opsiyonuna olanak tanıyan iki aşamalı doğrusal karma bir tamsayı programlama problemi olarak modellenmiştir.

Problemin çözümü için geliştirilen karma tamsayı matematiksel modelde kullanılan parametreler aşağıda sunulmaktadır.

Kümeler:

- P : Ürünler kümesi.
- M : Üretim opsiyonları kümesi.
- R : Geri kazanım opsiyonları kümesi.
- I_m^e : $m \in M$ üretim opsiyonu gerçekleştirilen mevcut tesisler kümesi.
- I_m^n : $m \in M$ üretim opsiyonu için potansiyel tesisler kümesi.
- I_m : $m \in M$ üretim opsiyonu için seçilebilir tesisler kümesi $I_m = I_m^e \cup I_m^n$.
- J_m : $m \in M$ üretim opsiyonu için seçilemeyecek tesisler kümesi.
- L_m : $m \in M$ üretim opsiyonu için tüm tesisler kümesi $L_m = I_m \cup J_m$.
- I_r^e : $r \in R$ geri kazanım opsiyonu gerçekleştirilen mevcut tesisler kümesi.
- I_r^n : $r \in R$ geri kazanım opsiyonu için potansiyel tesisler kümesi.
- I_r : $r \in R$ geri kazanım opsiyonu için seçilebilir tesisler kümesi $I_r = I_r^e \cup I_r^n$.
- J_r : $r \in R$ geri kazanım opsiyonu için seçilemeyecek tesisler kümesi.
- L_r : $r \in R$ geri kazanım opsiyonu için tüm tesisler kümesi $L_r = I_r \cup J_r$.
- I : Tüm seçilebilir tesisler kümesi $I = I_r \cup I_m$.

J : Tüm seçilemeyecek tesisler kümesi (mesela müşteriler).

L : Tüm tesisler kümesi $L = L_m \cup L_r$.

Parametreler:

d_{lp} : $p \in P$ ürünü için $l \in L$ noktasının talebi.

g_{lp} : $l \in L$ noktasında ortaya çıkan $p \in P$ ürünü miktarı.

a_{mqp} : $m \in M$ üretim yöntemiyle bir adet $q \in P$ ürünü için üretmek için kullanılması gereken $p \in P$ ürünü miktarı.

β_{rqp} : $r \in R$ geri kazanım yöntemiyle bir adet $q \in P$ ürünü geri kazanıldığında ortaya çıkan $p \in P$ ürünü miktarı.

K_{ml} : $l \in I_m$ tesisinde kullanılabilir $m \in M$ üretim opsiyonunun kapasitesi.

K_{rl} : $l \in I_r$ tesisinde kullanılabilir $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun kapasitesi.

EK_{ml} : $l \in I_m$ tesisinde kullanılabilir $m \in M$ üretim opsiyonunun artırılabilir en yüksek kapasitesi.

EK_{rl} : $l \in I_r$ tesisinde kullanılabilir $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun artırılabilir en yüksek kapasitesi.

RT_{rp} : $r \in R$ opsiyonu ile geri kazanılması gereken $p \in P$ ürünü için hedeflenen miktar.

Maliyetler:

FC_{ml} : $m \in M$ üretim opsiyonunun $l \in I_m^n$ tesisinde kullanılmaya başlamasının sabit maliyeti.

FC_{rl} : $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun $l \in I_r^n$ tesisinde kullanılmaya başlamasının sabit maliyeti.

- SC_{ml} : Halihazırda $l \in I_m^e$ tesisinde yürütülen $m \in M$ üretim opsiyonunun kaldırılmasının sabit maliyeti.
- SC_{rl} : Halihazırda $l \in I_r^e$ tesisinde yürütülen $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun kaldırılmasının sabit maliyeti.
- OC_{ml} : $m \in M$ üretim opsiyonunun $l \in L_m$ tesisinde kullanılmasının sabit operasyon maliyeti.
- OC_{rl} : $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun $l \in L_r$ tesisinde kullanılmasının sabit operasyon maliyeti.
- PC_{lp} : $l \in L$ tesisinde $p \in P$ ürününün dışarıdan satın alınmasının maliyeti.
- MC_{mlp} : $l \in L_m$ tesisinde $m \in M$ üretim yöntemiyle üretilen bir birim $p \in P$ ürününün üretim maliyeti.
- RC_{rlp} : $l \in L_r$ tesisinde $m \in R$ geri kazanım yöntemiyle bir birim $p \in P$ ürününü geri kazanmanın maliyeti.
- $TC_{ll'p}$: $p \in P$ ürününü $l \in L$ tesisinden $l' \in L$ tesisine taşımanın birim maliyeti.
- EC_{ml} : $l \in I_m$ tesisinde kullanılabilecek $m \in M$ üretim opsiyonunun kapasitesini bir birim arttırmanın maliyeti.
- EC_{rl} : $l \in I_r$ tesisinde kullanılabilecek $r \in R$ geri kazanım opsiyonunun kapasitesini bir birim arttırmanın maliyeti.
- DC_{lp} : $l \in L$ noktasının $p \in P$ ürünü için karşılanamayan talebinin birim ceza maliyeti.
- RE_{lp} : $l \in L$ noktasından $p \in P$ ürününün talebinin karşılanmasından elde edilen birim gelir.
- RE_{rlp} : $l \in L$ tesisinde $r \in R$ geri kazanım opsiyonu ile geri kazanılan $p \in P$ ürününden elde edilen birim gelir.

Modelde kullanılan karar değişkenlerinin tanımları şu şekildedir:

Karar Değişkenleri:

$$y_{ml} : \begin{cases} 1, & l \in I_m \text{ tesisinde } m \in M \text{ üretim opsiyonu kullanılırsa,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

$$y_{rl} : \begin{cases} 1, & l \in I_r \text{ tesisinde } r \in R \text{ geri kazanım opsiyonu kullanılırsa,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$$

$$s_{lp} : l \in L \text{ tesisinde dışarıdan satın alınan } p \in P \text{ ürünü miktarı.}$$

$$z_{mlp} : l \in L_m \text{ tesisinde } m \in M \text{ üretim opsiyonu ile üretilen } p \in P \text{ ürünü miktarı.}$$

$$v_{rlp} : l \in L_r \text{ tesisinde } r \in R \text{ geri kazanım opsiyonu ile geri kazanılan } p \in P \text{ ürünü miktarı.}$$

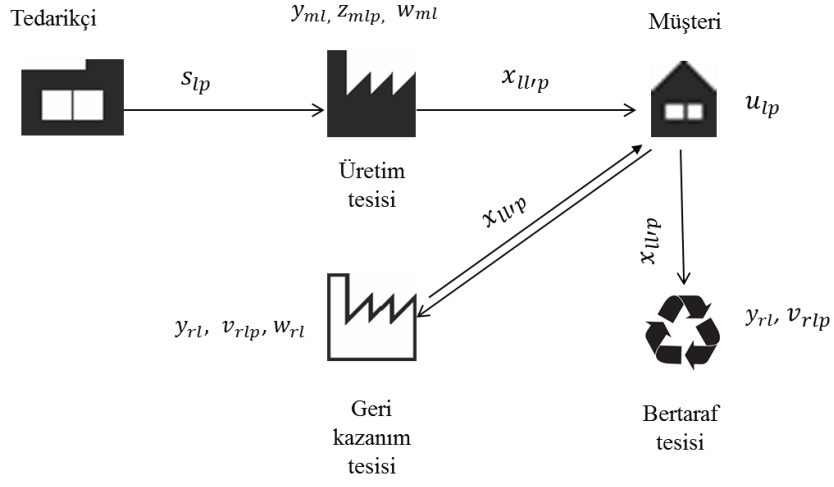
$$x_{ll'p} : l \in L \text{ tesisinden } l' \in L \text{ tesisine taşınan } p \in P \text{ ürünü miktarı.}$$

$$w_{ml} : l \in I_m \text{ tesisinde } m \in M \text{ üretim opsiyonu için kullanılan ekstra kapasite miktarı.}$$

$$w_{rl} : l \in I_r \text{ tesisinde } r \in R \text{ geri kazanım opsiyonu için kullanılan ekstra kapasite miktarı.}$$

$$u_{lp} : l \in L \text{ noktasında } p \in P \text{ ürününün karşılanamayan talebinin miktarı.}$$

Modelin karar değişkenleri Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Tedarikçilerden temin edilen bileşenler (s_{lp}) belirli bir kapasitesi ve ek kapasitesi (w_{ml}) bulunan üretim tesislerinde nihai ürünlere dönüştürülmekte (z_{mlp}) ve müşterilere iletilmektedir ($x_{ll'p}$). Müşterilerde bulunan kullanılmış ürünler ise üreticiye ait olan belirli bir kapasitesi ve ek kapasitesi (w_{rl}) olan geri kazanım merkezlerinde en az yasal mevzuatlar gereğince geri dönüştürülmesi gereken minimum miktar karşılanacak şekilde geri kazanılmakta (v_{rlp}) veya bertaraf tesislerinde imha edilmektedir.



Şekil 4.2. Modelin karar değişkenleri.

Yukarıda tanımlanan parametre ve karar değişkenleri kullanılarak oluşturulan matematiksel model aşağıda sunulmaktadır:

Matematiksel Model:

$$\begin{aligned}
\mathbf{Max} \quad & \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} RE_{lp} (d_{lp} - u_{lp}) + \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} RE_{rlp} v_{rlp} \\
& - \left\{ \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m^n} FC_{ml} y_{ml} + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r^n} FC_{rl} y_{rl} \right. \\
& + \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m^e} SC_{ml} (1 - y_{ml}) + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r^e} SC_{rl} (1 - y_{rl}) \\
& + \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m} OC_{ml} y_{ml} + \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m} OC_{ml} + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r} OC_{rl} y_{rl} \\
& + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r} OC_{rl} + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} PC_{lp} s_{lp} \\
& + \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m} \sum_{p \in P} MC_{mlp} z_{mlp} + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r} \sum_{p \in P} RC_{rlp} v_{rlp} \\
& + \sum_{l \in L} \sum_{l' \in L \setminus \{l\}} \sum_{p \in P} TC_{ll'p} x_{ll'p} + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} DC_{lp} u_{lp} \\
& \left. + \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m} EC_{ml} w_{ml} + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r} EC_{rl} w_{rl} \right\} \tag{4.1}
\end{aligned}$$

s.t.

$$\begin{aligned}
g_{lp} + s_{lp} + \sum_{m \in M} z_{mlp} + \sum_{r \in R} \sum_{q \in P} \beta_{rqp} v_{rlq} \\
+ \sum_{l' \in L \setminus \{l\}} x_{ll'p} \\
= \sum_{m \in M} \sum_{q \in P} a_{mqp} z_{mlq} + \sum_{r \in R} v_{rlp} \quad \forall l \in L, p \in P \tag{4.2} \\
+ \sum_{l' \in L \setminus \{l\}} x_{ll'p} + d_{lp} - u_{lp}
\end{aligned}$$

$$u_{lp} \leq d_{lp} \quad \forall l \in L, p \in P \tag{4.3}$$

$$s_{lp} \leq M \sum_{m \in M} y_{ml} \quad \forall l \in I_m, p \in P \tag{4.4}$$

$$\sum_{p \in P} z_{mlp} \leq K_{ml} y_{ml} + w_{ml} \quad \forall m \in M, l \in I_m \quad (4.5)$$

$$\sum_{p \in P} z_{mlp} \leq K_{ml} \quad \forall m \in M, l \in J_m \quad (4.6)$$

$$\sum_{p \in P} v_{rlp} \leq K_{rl} y_{rl} + w_{rl} \quad \forall r \in R, l \in I_r \quad (4.7)$$

$$\sum_{p \in P} v_{rlp} \leq K_{rl} \quad \forall r \in R, l \in J_r \quad (4.8)$$

$$\sum_{l \in L_r} v_{rlp} \geq RT_{rp} \quad \forall r \in R, p \in P \quad (4.9)$$

$$w_{ml} \leq EK_{ml} y_{ml} \quad \forall m \in M, l \in I_m \quad (4.10)$$

$$w_{rl} \leq EK_{rl} y_{rl} \quad \forall r \in R, l \in I_r \quad (4.11)$$

$$x_{llp} \leq M \sum_{m \in M} y_{ml} \quad \forall l \in I_m, l' \in L \setminus \{l\}, p \in P \quad (4.12)$$

$$x_{llp} \leq M \sum_{m \in M} y_{ml'} \quad \forall l \in L \setminus \{l'\}, l' \in I_m, p \in P \quad (4.13)$$

$$x_{llp} \leq M \sum_{r \in R} y_{rl} \quad \forall l \in I_r, l' \in L \setminus \{l\}, p \in P \quad (4.14)$$

$$x_{llp} \leq M \sum_{r \in R} y_{rl'} \quad \forall l \in L \setminus \{l'\}, l' \in I_r, p \in P \quad (4.15)$$

$$z_{mlp} = 0 \quad \forall l \in L \setminus L_m, m \in M, p \in P \quad (4.16)$$

$$v_{rlp} = 0 \quad \forall l \in L \setminus L_r, r \in R, p \in P \quad (4.17)$$

$$y_{ml}, y_{rl} \in \{0,1\} \quad \forall m \in M, r \in R, l \in L \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} s_{lp}, z_{mlp}, v_{rlp}, x_{llp}, \\ w_{rl}, w_{ml}, u_{lp} \geq 0 \end{aligned} \quad \forall m \in M, r \in R, l \in L, p \in P \quad (4.19)$$

Amaç fonksiyonu (4.1) toplam kârı maksimize etmektedir. Toplam kâr; yeni üretilen ve geri kazanım yöntemleriyle elde edilen ürünlerden elde edilen gelirlerin toplamından, açılacak olan tesislerin sabit maliyetleri, mevcut tesislerin kapatılmasına ilişkin sabit maliyetler, açılacak olan tesislerin operasyonel maliyetleri, mevcut tesislerin operasyonel maliyetleri, satın alma, kapasite artırımını ve karşılanamayan talebe ilişkin ceza maliyetlerinin tümünün toplamının çıkarılması ile elde edilmektedir.

Akış dengesi kısıtları (4.2), her bir tesis ve ürün için yazılmaktadır. Bir tesiste dışarıdan satın alınan, ortaya çıkan, üretilen ve bir başka ürünün geri kazanımdan elde edilen ürün miktarı ile o tesise başka tesislerden gelen ürünlerin toplamı, o noktanın karşılanan talebi ile bir başka ürün üretilirken kullanılan, geri kazanıma gönderilen ve bir başka tesise iletilen ürün miktarlarının toplamına eşit olmalıdır.

Kısıt (4.3), karşılanamayan talep miktarının, o ürüne olan talepten daha büyük bir değer almasını engellemektedir. Kısıt (4.4) bir tesis tarafından bir ürünün dışarıdan temininin ancak o tesiste en az bir üretim opsiyonu faaliyette ise gerçekleşmesine izin vermektedir.

Kısıtlar (4.5)-(4.8) kapasite kısıtlarıdır. Kısıt (4.5), bir üretim opsiyonu için seçilebilecek tesislerde üretilen ürün miktarı eğer o tesis açılırsa o tesisin normal ve ek kapasiteleri toplamından fazla olmamasını sağlamaktadır. Kısıt (4.6), üretim faaliyetlerinin yürütüldüğü mevcut seçilemeyecek tesislerdeki kapasitenin aşılmasını engellemektedir. Kısıt (4.7), geri kazanım opsiyonu için seçilebilecek tesislerde geri kazanımla elde edilecek olan ürün miktarının o tesisin normal ve ek kapasiteleri toplamından fazla olmamasını sağlamaktadır. Kısıt (4.8), geri kazanım faaliyetlerinin yürütüldüğü mevcut seçilemeyecek tesislerdeki kapasitenin aşılmasını engellemektedir.

Kısıt (4.9), geri kazanım yöntemiyle üretilmesi gereken ürün miktarının yasalarca belirlenen hedefi karşılamasını sağlamaktadır. Kısıt (4.10) ve (4.11) üretim ve geri

kazanım opsiyonları için seçilebilecek olan tesislerdeki ek kapasite sınırlarının aşılmasını engellerken aynı zamanda açık olmayan tesislere ek kapasite alınmamasını sağlamaktadır.

Kısıtlar (4.12)-(4.15) ürün akışlarının sadece açık olan tesisler arasında veya tesislerden müşterilere ya da müşterilerden tesislere doğru olmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.12), ancak açık olan bir üretim tesisinden herhangi bir tesise veya müşteriye taşıma yapılabilmesini sağlamaktadır. Kısıt (4.13), herhangi bir tesisten veya müşteriden, bir üretim tesisine taşıma yapılabilmesi için o üretim tesisinin en az bir üretim opsiyonu için seçilmiş olması gerektiğini söylemektedir. Açılmış olan üretim tesisleri arasında akışa izin veren bu kısıtlar kısıt (4.14) ve (4.15) ile geri kazanım opsiyonları için de aynı şekilde yazılmıştır.

Kısıt (4.16) ve (4.17) bir üretim veya geri kazanım opsiyonunun sadece bu opsiyonlara uygun olan ilgili seçilebilecek tesisler kümesinde yer alan tesisler dışında başka tesislerde yapılmasını engellemektedir. Kısıt (4.18) ve (4.19) ise işaret kısıtlarıdır.

Çalışmanın bir sonraki kısmında burada verilen matematiksel modelin örnek bir uygulama üzerinde çözümünden bahsedilmektedir.

5. PROBLEMİN UYGULAMASI

Bu bölümde geliştirilen matematiksel modelin performansını test etmek amacıyla oluşturulan örnek veri kümesi ile modelin GAMS programlama dili yardımıyla Intel® Core™ i5-3470 işlemcili bir bilgisayarda CPLEX 12.5.1.0 yazılımı ile optimal olarak çözdürülmesi sonucunda elde edilen sonuçlar aktarılmaktadır.

5.1 Problem Parametreleri

Oluşturulan örnek veri kümesinde tek ürün bulunmaktadır. Ancak, bu tek ürünün tedarikçiler, üretim tesisleri, müşteriler, geri kazanım tesisleri ve imha alanlarında geçireceği dönüşümü temsil edecek şekilde ürün kümesinde ürünü oluşturan bileşen, ürünün kendisi, ürünün kullanılmış ve bertaraf edilmiş halleri kümenin ayrı bir elemanı olarak bulunmaktadır.

Model farklı üretim ve geri kazanım opsiyonlarına olanak tanımaktadır. Bu kısımda ele alınan örnekte ise bir üretim opsiyonu, yenileme ve bertaraf etme olmak üzere de iki ayrı geri kazanım opsiyonu ele alınmaktadır. Tablo 5.1’de ürünler, üretim ve geri kazanım opsiyonları kümeleri gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Ürünler, üretim ve geri kazanım opsiyonları kümeleri

Küme	Küme elemanları
Ürünler (P)	Bileşen, Ürün, Kullanılmış ürün, Bertaraf edilen ürün
Üretim opsiyonları (M)	Üretim
Geri kazanım opsiyonları (R)	Yenileme, Bertaraf

Örnek veri kümesinde, mevcut tesisler olarak bir üretim tesisi (fabrika) ve bir imha tesisi (katı atık sahası), ayrıca, elli müşteri (C1-C50) bulunmaktadır. Seçilebilir potansiyel tesisler olarak on adet potansiyel üretim (M1-M10) ve on adet potansiyel

geri kazanım tesisi (R1-R10) yeri bulunmaktadır. Tablo 5.2’de her bir üretim ve geri kazanım opsiyonu için mevcut ve potansiyel tesisler ile seçilebilecek ve seçilemeyecek olan tesislerin bilgileri gösterilmektedir. Ayrıca, modelde yer alan diğer tüm kümelerin elemanları da bu tabloda yer almaktadır.

Tablo 5.2. Üretim ve geri kazanım opsiyonları ile ilgili kümeler

	Üretim	Yenileme	Bertaraf
Mevcut tesisler (I_m^e, I_m^e)	Fabrika	-	Katı atık sahası
Potansiyel tesisler (I_m^n, I_m^n)	M1-M10	R1-R10	-
Seçilebilir tesisler (I_m, I_r)	Fabrika, M1-M10	R1-R10	Katı atık sahası
Seçilemeyecek tesisler (J_m, J_r)	C1-C50	C1-C50	C1-C50
Her bir opsiyon için tüm tesisler (L_m, L_r)	Fabrika, M1-M10, C1-C50	R1-R10, C1-C50	Katı atık sahası, C1-C50
Tüm seçilebilir tesisler (I)	Fabrika, Katı Atık Sahası, M1-M10, R1-R10		
Tüm seçilemeyecek tesisler (J)	C1-C50		
Tüm tesisler (L)	Fabrika, Katı atık sahası, M1-M10, R1-R10, C1-C50		

Ürün iki bileşenden oluşmaktadır. Üretim tesislerinde tedarik edilen bileşenler tek bir ürün haline getirilmekte ve talebi olan müşteri noktalarına iletilmektedir. Müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürünler ise geri kazanım tesislerinde yenileme işlemine tabi tutulmakta veya bertaraf edilmek üzere katı atık tesisine gönderilmektedir. Yenilenmiş ürünler geri kazanım tesislerinden yeni ürün olarak tekrar talebi olan müşterilere iletilebilmektedir.

Elli müşterinin talepleri ve aynı müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürün miktarları $[0,100]$ arasında düzgün dağılımla rastgele değişen sayılar olarak alınmıştır. Müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürünlerin tümü toplanmakta, geri

kazanıma tabi tutulması gereken minimum ürün miktarı sağlandıktan sonra geri kalan kullanılmış ürünler kârı en büyükleyecek şekilde ister geri kazanılmakta ister bertaraf edilmektedir. Yenileme opsiyonu ile geri kazanılması gereken minimum ürün miktarı ise müşteri noktalarında ortaya çıkan toplam kullanılmış ürün miktarının %50'si olarak belirlenmiştir. İlgili parametre değerleri Tablo 5.3'de özetlenmektedir.

Tablo 5.3. Parametre değerleri

Parametre	Değer
Müşteri noktalarının ürün talebi (d_{lp})	$\sim U[0,100]$
Müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürün miktarı (g_{lp})	$\sim U[0,100]$
Bir adet yeni ürün üretmek için kullanılması gereken bileşen sayısı (a_{mqp})	2
Yenileme işlemi ile bir kullanılmış üründen kaç adet ürün elde edileceği (β_{rqp})	1
Bertaraf işlemi ile kullanılmış üründen ne kadar bertaraf edilmiş ürün elde edileceği (β_{rqp})	1
Yenileme opsiyonu ile geri kazanılması gereken minimum kullanılmış ürün miktarı (RT_{rp})	$0,5 * \sum_{l \in L} g_{lp}$

Üretim ve geri kazanım tesislerinin kapasiteleri tüm müşterilerin talepleri ve tüm toplanan kullanılmış ürünlerin geri kazanılması gereken minimum ürün miktarı karşılanacak şekilde belirlenmiştir. Tablo 5.4'te gösterildiği üzere, tesis farkı gözetmeksizin tüm tesisler için normal kapasite 1000 ton, ek kapasite ise 250 ton olarak kabul edilmiştir.

Tablo 5.4. Tesisler için kapasite ve ek kapasite değerleri

	Üretim tesisleri	Geri kazanım tesisleri
Kapasite	1000	1000
Ek kapasite	250	250

Üretim ve geri kazanım tesisleri için sabit tesis açma maliyeti 10.000 Avro, mevcutta açık olan tesisleri kapamanın maliyeti ise 5.000 Avro olarak alınmıştır. Üretilen ürün miktarından bağımsız olan ve bir defaya mahsus tesis açıldığında katlanılması gereken operasyonel maliyetler ise gene tesis tipi farkı gözetmeksizin 100 Avro olarak kabul edilmiştir. Seçilemeyecek olan tesisler arasında müşteriler de bulunduğundan müşteriler için operasyonel maliyetler 0 olarak alınmıştır.

Üretim tesislerinde bir birim ürünü üretmenin maliyeti 1 Avro, yenileme tesislerinde bir birim kullanılmış ürünü yenilemenin maliyeti de gene 1 Avro olarak alınmıştır. Hali hazırda mevcut olan bertaraf opsiyonunun üçüncü parti şirketler ya da devlet tarafından işletilmesi beklendiğinden bir birim ürünü bertaraf etmenin maliyeti yenileme opsiyonuna görece fazla alınmıştır. Bu durum gerçek hayatta karşılaşılan geri kazanım maliyetleri ile benzerlik göstermektedir.

Modelde ek maliyetler göz önüne alınarak kapasite artırımına izin verilmektedir. Ek kapasite kullanım maliyeti birim ürün başına 10 Avro olarak alınmıştır.

Ağ üzerindeki tüm noktalar X ve Y düzleminde [0,100] arasında düzgün dağılımla değişen koordinat değerleri almaktadır. Noktalar arasındaki mesafeler (5.1)'de gösterilen Öklid mesafesi denklemi ile hesaplanmaktadır. Buna göre, A(X₁,Y₁) ve B(X₂,Y₂) noktaları arasındaki mesafe, d(A,B), aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$d(A,B)=\sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \quad (5.1)$$

Bir ton ürünü bir km taşımanın maliyeti 0,005 Avro/ton-km olarak alınmıştır. Yukarıdaki formüle göre hesaplanan mesafe değerlerinin 1 ton ürünü 1 km taşıma maliyeti olarak kabul edilen 0,005 değeri ile çarpılması sonucu iki nokta arasında bir birim ürünü taşımanın maliyet değeri hesaplanmıştır. Tüm maliyetlere ilişkin bilgiler Tablo 5.5’de gösterilmektedir.

Tablo 5.5. Maliyet parametrelerinin değerleri

Maliyet Parametresi	Maliyet Değeri (Avro)
Tesis açmanın sabit maliyeti (FC_{ml}, FC_{rl})	10.000
Tesis kapatmanın sabit maliyeti (SC_{ml}, SC_{rl})	5.000
Operasyonel maliyet (OC_{ml}, OC_{rl})	100
Bir birim bileşen satın almanın maliyeti (PC_{lp})	1
Bir birim ürünü üretmenin maliyeti (MC_{mlp})	1
Bir birim ürünü yenilemenin maliyeti (RC_{rlp})	1
Bir birim ürünü bertaraf etmenin maliyeti (RC_{rlp})	3
Tesis kapasitesini bir birim arttırmanın maliyeti (EC_{ml}, EC_{rl})	10
Bir birim ürünü bir km taşımanın maliyeti (TC_{llp})	0,005
Müşteriye ait bir birimlik talebin karşılanmamasının ceza maliyeti (DC_{lp})	100

Müşteri talebinin yeni ürünle yahut yenilenmiş ürünle karşılanması arasında yarı yarıya bir fiyat farkı oluşturulması amacıyla bir müşterinin bir birimlik ürün talebinin karşılanmasından elde edilen gelir 100 Avro olarak alınırken yenileme işleminden elde edilen gelir -50 olarak alınmıştır. Bertaraf etme işleminden ise bir kazanç elde edilmemektedir. Tablo 5.6’da birim ürün başına elde edilen gelir değerleri gösterilmektedir.

Tablo 5.6. Birim ürün başına elde edilen gelir

Gelir Tipi	Gelir Değeri (Avro)
Müşterinin bir birim talebinin karşılanması sonucu elde edilen gelir (RE_{tp})	100
Yenileme işlemi ile elde edilen kazanç (RE_{rlp})	-50
Bertaraf etme işleminden elde edilen kazanç (RE_{rlp})	0

5.2. Problemin Çözümü

Matematiksel model Bölüm 5.1’de anlatılan örnek veri kümesi ile GAMS programı üzerinde kodlanmış ve Intel® Core™ i5-3470 işlemcili Exper bilgisayarda CPLEX 12.5.1.0 yazılımı ile optimal olarak çözdürülmüştür. Çözüm sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değeri, CPU zamanı, açılan üretim ve geri kazanım tesislerinin bilgisi Tablo 5.7’de gösterilmektedir.

Çözüm sonucunda halihazırda açık olan fabrikanın ve katı atık sahasının açık kalmasına, ek olarak geri kazanım tesislerinden R3 ve R4 tesislerinin açılmasına karar verilmiştir. Tüm müşterilerin talebi eksiksiz olarak karşılanmıştır.

Tablo 5.7. Örnek veri kümesi için sonuç özet tablosu

Amaç fonksiyonu değeri	CPU zamanı (saniye)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri
170.827	20,69	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4

Tablo 5.8’de açılan üretim ve geri kazanım tesislerinde işlem gören ürün sayıları ve kapasite kullanım miktarları görülmektedir. Kapasite kullanım durumlarına bakılacak olursa fabrikanın ve katı atık sahasının kapasitelerinin %100’ünün kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca, bu iki tesiste ek kapasite kullanımları da söz konusudur. Fabrika için alınan ek kapasitenin tümü kullanılmaktadır. Yeni açılan tesislerde ise ek kapasite kullanımına ihtiyaç duyulmadığı görülmektedir.

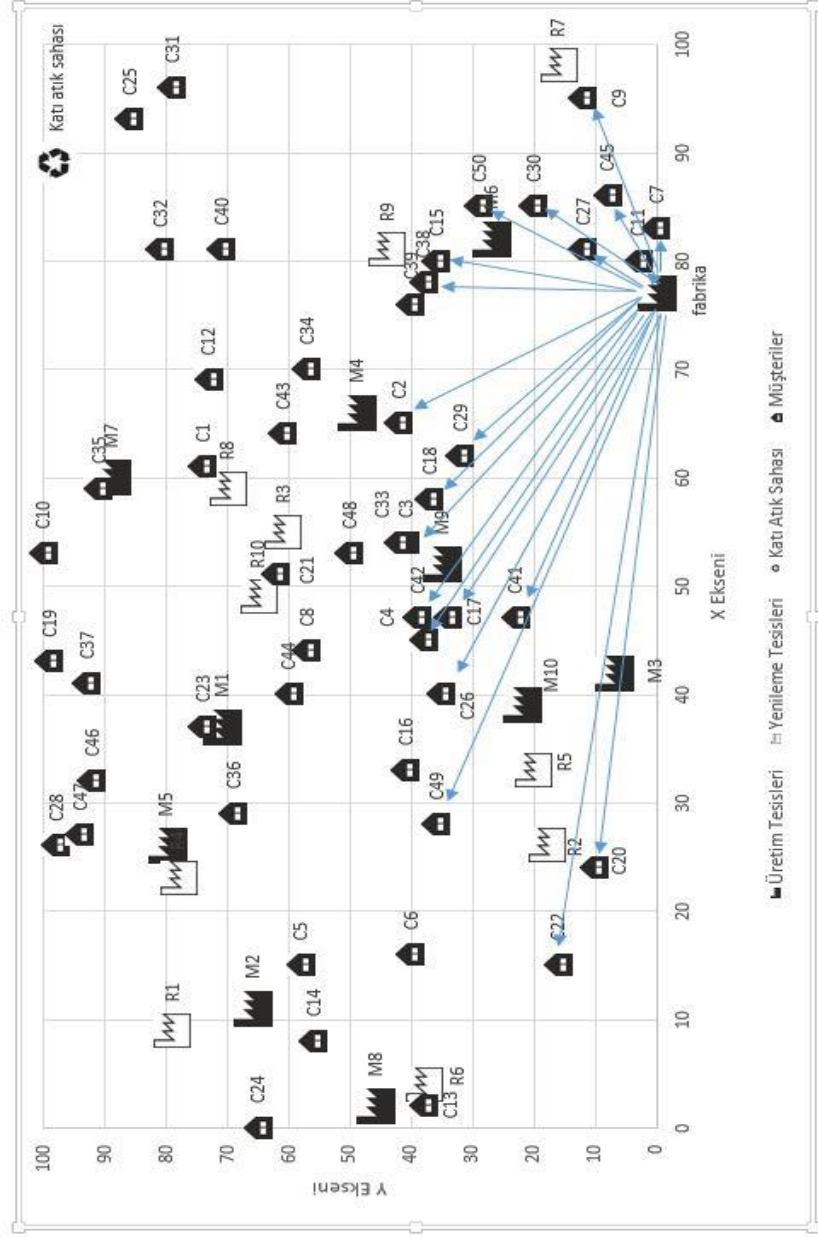
Tablo 5.8. Açılan tesislere ilişkin kapasite bilgileri

Açılan tesisler	İşlem gören ürün miktarı	Kullanılan kapasite	Kullanılan ek kapasite
Fabrika	1250	1000	250
Katı atık sahası	1135	1000	135
R3	994	994	0
R4	601	601	0

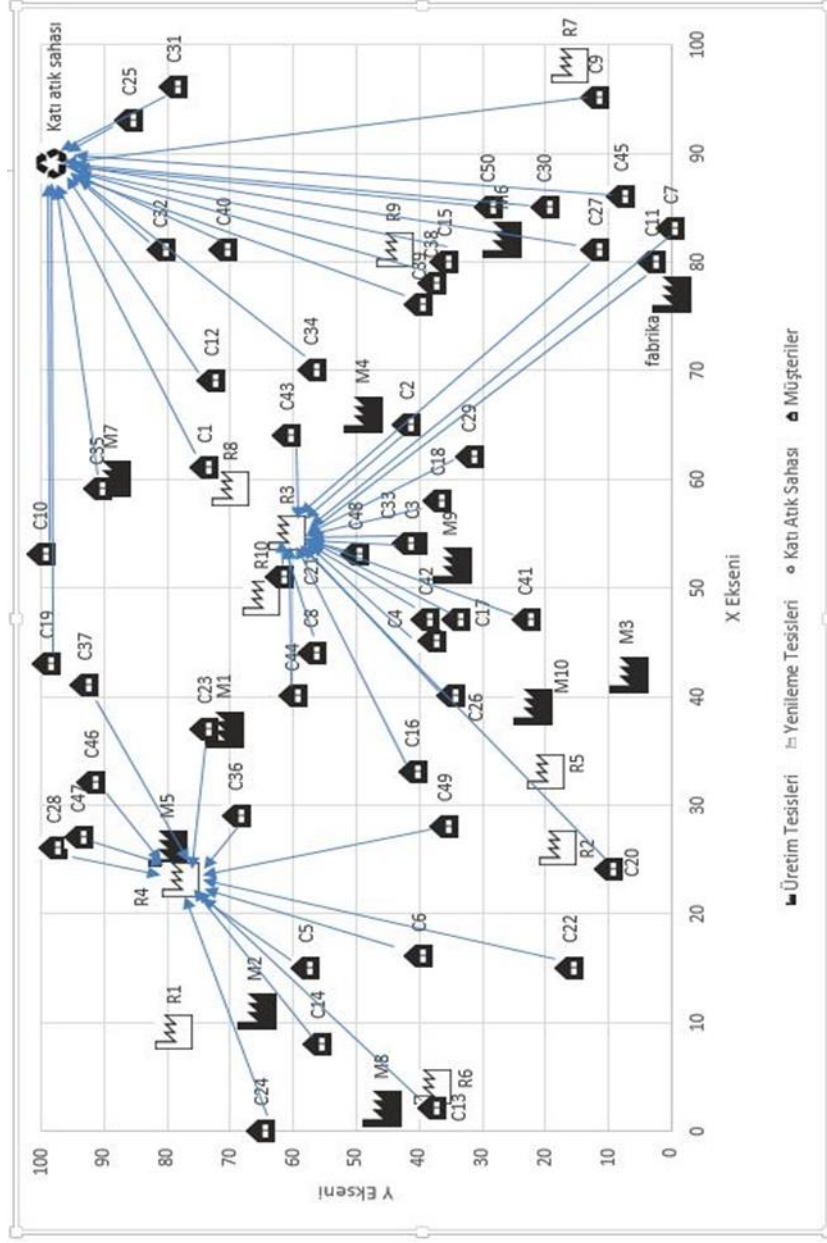
Elde edilen bu çözüm, X-Y koordinat düzlemi üzerinde tesislerin ve müşterilerin konumları ve tesisler ile müşteriler arasında ileri ve tersine yöndeki akışlar ile beraber Şekil 5.1-5.4’de incelenmektedir.

Şekil 5.1’de potansiyel üretim ve geri kazanım tesislerinin yerleri ile müşterilerin konumları gösterilmektedir. Şekil 5.2’de model çözdürüldükten sonra seçilen tek üretim tesisi olan fabrikada üretilen yeni ürünlerin müşteri noktalarına doğru ileri yönlü akışı görülmektedir. Müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürünlerin seçilen geri kazanım tesislerine ve katı atık sahasına doğru tersine akışı ise Şekil 5.3’de gösterilmektedir. Geri kazanım tesislerine gönderilen kullanılmış ürünler yenileme işleminden sonra Şekil 5.4’te gösterildiği üzere talebi olan müşterilere iletilmektedir.

Bir sonraki bölümde problem parametrelerinde yapılan değişikliklerin sonuçlar üzerine olan etkileri incelenmektedir.



Şekil 5.2. Seçilen üretim tesislerinden müşterilere ileri yönde ürün akışı



Şekil 5.3. Kullanılmış ürünlerin müşterilerden seçilen yenileme tesislerine ve kati atık sahasına doğru tersine yöndeki akışı

6. DUYARLILIK ANALİZLERİ

Bir önceki bölümde, kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı için önerilen karma tamsayılı programlama modelinin örnek bir senaryo üzerindeki çözümü incelenmiştir. Bu kısımda ise oluşturulan model için belirlenen parametre değerlerindeki değişimin, problemin optimal çözümü ve ağ tasarımı üzerine olan etkileri incelenmektedir.

6.1.Kapasite Büyüklüklerindeki Değişimler

Tesis kapasitelerindeki değişimin etkilerini incelemek için tüm maliyet kalemleri ve parametre değerleri sabit tutulmuş, normal kapasite değerleri 200-2000 arasında, ek kapasite değerleri ise 0-500 arasında değiştirilerek çeşitli koşullar alınmıştır. Alınan sonuçlar Tablo 6.1’de gösterilmektedir.

Tablo 6.1’in ilk iki sütununda her bir koşulda tesisler için kullanılan normal ve ek kapasite parametrelerinin değerleri sunulmaktadır. Diğer sütunlarda, sırasıyla, ilgili koşulda elde edilen optimum amaç fonksiyonu değeri, optimum çözümü elde edebilmek için CPLEX tarafından gerekli CPU zamanı, açılan üretim ve geri kazanım tesislerinin yerleri ile kullanılan toplam ek kapasite kullanım miktarları verilmektedir. Bu tabloda üçüncü satırdaki koşul bir önceki bölümde incelenen örnek verilere karşılık gelmektedir.

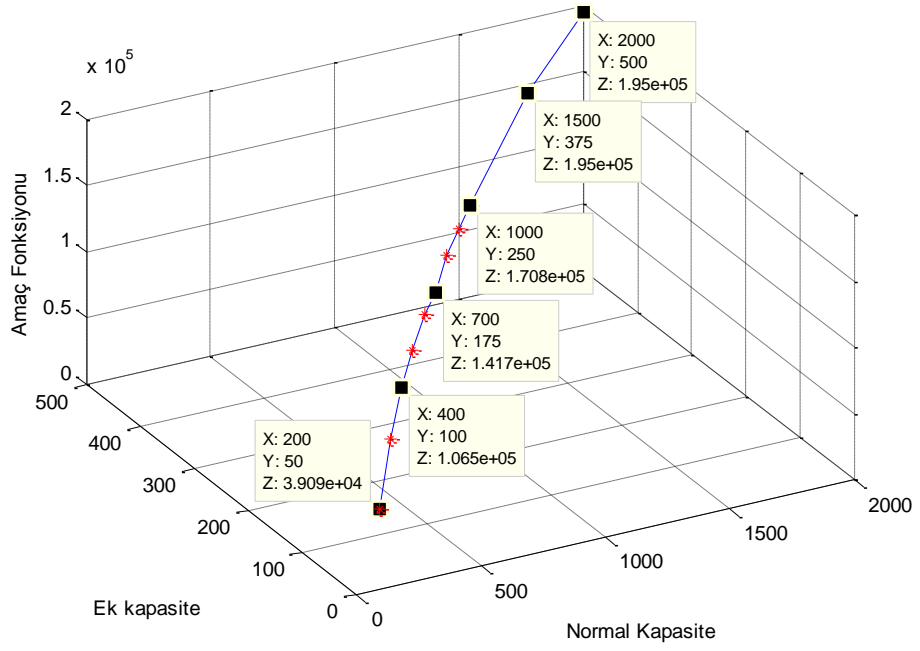
Tablo 6.1. Normal ve ek kapasite değerlerindeki değişimlerin etkileri

Normal kapasite	Ek kapasite	Amaç fonksiyonu (Kâr)	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Toplam ek kapasite kullanımı
2000	500	194.979	0,92	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
1500	375	194.979	1,05	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
1000	250	170.827	20,69	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
900	225	165.728	17,03	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	335
800	200	158.185	18,08	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	200
700	175	141.651	14,74	Fabrika	Katı atık sahası, R4, R5, R9	175
600	150	137.488	30,33	Fabrika	Katı atık sahası, R5, R6, R9, R10	445
500	125	123.110	6,24	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	355
400	100	106.523	4,02	Fabrika	Katı atık sahası, R3-R5, R9, R10	445
300	75	80.761	5,12	Fabrika	Katı atık sahası, R3-R9	445
200	50	39.089	1,48	Fabrika, M9	Katı atık sahası, R1-R10	530

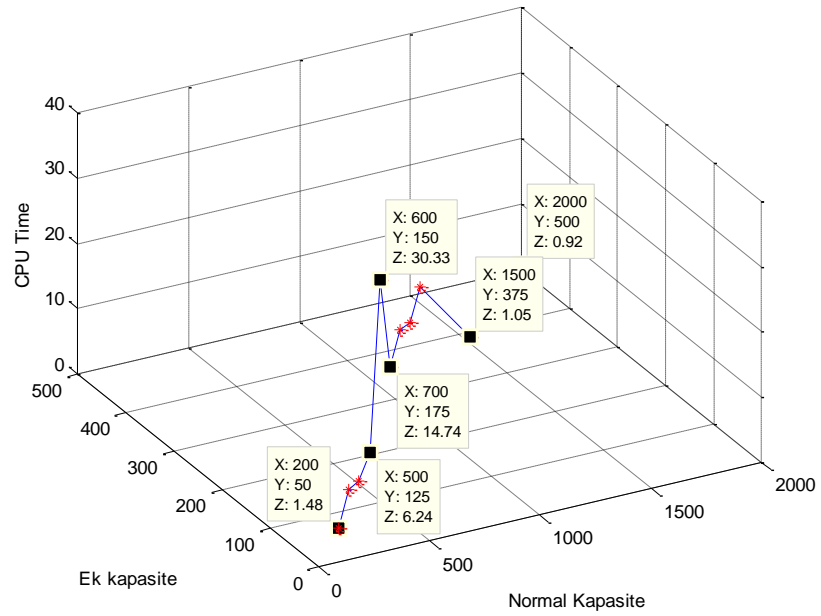
Normal ve ek kapasite değerlerinin toplamının 250 değerinin altında olduğu durumda problem için olurlu bir çözüm bulunamamaktadır. Normal kapasite değeri 1500 ve üzerinde olduğunda amaç fonksiyonu maksimum değerine (194.979) ulaşmaktadır yani problemdeki en kârlı çözümlere ulaşılmaktadır. 1500'ün üzerindeki kapasite değerleri için amaç fonksiyonunda ve ağ tasarımında herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Kullanılmış ürünlerin toplanması zorunluluğu ve minimum geri kazanım yüzdesi sebebiyle belirli sayıda geri kazanım tesisi açılması zorunluluğu bulunduğundan kapasite değerleri artsa da daha az tesis ile problemin çözülmesi mümkün olmamaktadır. Bu sebeple ağ tasarımı 1500'ün üzerindeki kapasite değerleri için değişmemektedir.

Kapasite değerleri azaldıkça açılan toplam tesis sayısında beklendiği gibi artış görülmektedir. Ancak üretim tesisleri bu durumdan daha az etkilenmektedir. Normal kapasite değerleri 300-2000 arasında iken sadece tek bir üretim tesisinin açıldığı görülmektedir. Normal kapasite değeri 200 olduğunda ise ikinci bir üretim tesisinin açılmasına karar verilmiştir. Diğer yandan, kapasite değerleri azaldıkça açılan geri kazanım tesisi sayısı hızlı bir artış göstermektedir. En düşük kapasite değerinde tüm potansiyel geri kazanım tesislerinin açıldığı görülmektedir.

Kullanılan ek kapasite değerlerine bakıldığında, normal kapasite değeri 1500 ve üzerindeki ek kapasite kullanılmadığı, diğer durumların tümünde ise ek kapasite kullanıldığı görülmektedir. Kapasite değerleri arttıkça amaç fonksiyonu değeri artış göstermektedir. Amaç fonksiyonu normal kapasite değeri 1500'ün üzerinde olduğu durumda sabitlenmektedir. Kârın düşmesinin sebebi ise açılan tesislerin maliyetlerinin gelire oranla hayli yüksek olmasıdır. Normal kapasite değerlerinin 200-2000, ek kapasite değerlerinin ise 0-500 arasında değişimi sonucu amaç fonksiyonunda oluşan değişimi gösteren grafik Şekil 6.1'de görülmektedir. Ayrıca, Şekil 6.2'de kapasite değişimlerinin çözüm zamanı üzerine olan etkileri gösterilmektedir. Kapasite değerleri (600,150) olduğunda çözüm zamanı tepe değerine ulaşmıştır, kapasitenin en fazla ve en az olduğu noktalarda ise çözüm zamanının kısaldığı görülmektedir. Genel olarak modelin birkaç saniye içerisinde optimal çözümü verebildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.1. Kapasite değişimlerine bağlı olarak amaç fonksiyonundaki değişimler



Şekil 6.2. Kapasite değişimlerine bağlı olarak çözüm zamanındaki değişimler

6.2. Minimum Geri Kazanım Değerindeki Değişimler

Ele alınan problemde, müşteri noktalarında oluşan tüm kullanılmış ürünlerin toplanması gerekmektedir, ancak toplanan ürünlerin en az yüzde kaçının yenileceğine modeldeki minimum geri kazanım miktarı kısıtı ile karar verilmektedir. Bir önceki bölümde yapılan analizde müşteri noktalarında üretilen kullanılmış ürünlerin en az %50'sinin yenilenmek zorunda olduğu kabul edilmişti. Bu bölümde ise minimum yenileme hedef tutarının sonuçlar üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu kapsamda yapılan analizlerde geniş, orta ve dar olmak üzere üç farklı kapasite kümesi kullanılmaktadır. Tablo 6.2'de ilgili kapasite kümelerindeki kapasite değerleri sunulmaktadır.

Tablo 6.2. Kapasite kümeleri

Kapasite	Üretim tesisi	Geri kazanım tesisi	Üretim için ek kapasite	Geri kazanım için ek kapasite
Geniş kapasite	2000	2000	500	500
Orta kapasite	1000	1000	250	250
Dar kapasite	500	500	125	125

Minimum yenileme oranının %0 ile %100 değerleri arasındaki değişiminin geniş, orta ve dar kapasite kümeleri ile elde edilen sonuçları sırasıyla Tablo 6.3, 6.4 ve 6.5'te gösterilmektedir. Her bir tabloda kullanılan minimum yenileme oranı ile elde edilen optimum amaç fonksiyonu değeri, optimal çözüm için gerekli CPU zamanı, açılan üretim ve geri kazanım tesislerinin yerleri ile ek kapasite kullanım miktarları sunulmaktadır.

Tablo 6.3. Geniş kapasite kümesi ile minimum yenileme oranının etkisi

Minimum yenileme oranı	Amaç fonksiyonu (Kâr)	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Toplam ek kapasite kullanımı
%100	123.764	1,36	Fabrika	R9, R10	0
%75	163.936	1,40	Fabrika	Katı atık sahası, R3	48
%50	194.979	0,92	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
%25	223.311	4,46	Fabrika	Katı atık sahası, R4	209
%0	231.581	10,58	Fabrika	Katı atık sahası, R6	885

Tablo 6.4. Orta kapasite kümesi ile minimum yenileme oranının etkisi

Minimum yenileme oranı	Amaç fonksiyonu (Kâr)	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Toplam ek kapasite kullanımı
%100	113.758	1,37	Fabrika	Katı atık sahası, R5, R9, R10	0
%75	153.919	1,53	Fabrika	Katı atık sahası, R9, R10	48
%50	170.827	20,69	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
%25	170.827	17,46	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
%0	170.827	17,46	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385

Tablo 6.5. Dar kapasite kümesi ile minimum yenileme oranının etkisi

Minimum yenileme oranı	Amaç fonksiyonu (Kâr)	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Toplam ek kapasite kullanımı
%100	91.374	0,95	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R8, R9	230
%75	123.110	3,68	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	355
%50	123.110	6,24	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	355
%25	123.110	4,63	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	355
%0	123.110	4,76	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	355

Genel olarak her kapasite değerinde en büyük amaç fonksiyonu değerleri minimum yenileme koşulunun %0 olduğu durumlarda, en küçük amaç fonksiyonu değerleri ise oranın %100 olduğu durumlarda elde edilmiştir. Bu durum ürünleri yenilemeye zorlamanın elde edilen kârı olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Yani müşterilerden toplanan kullanılmış ürünlerin geri kazanımı için bir yenileme tesisi açmak bu parametre değerleri ile kârlı bir yatırım olmamaktadır. Müşteri taleplerinin üretim tesislerinde üretilen yeni ürünlerle karşılanması ve müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürünlerin bertaraf edilmesi maliyet ve kazanç açısından en etkin yöntemdir. Ancak, en kârlı çözümler geri kazanım olmadığında elde edilse bile birçok ülkede üreticiler yasalar gereği belirli oranlarda geri kazanıma zorunlu tutulmaktadır.

Ağ tasarımı açısından minimum yenileme oranının etkileri incelenecek olursa her üç kapasite kümesinde de üretim tesisi olarak sadece fabrikanın açıldığı, geri kazanım tesisleri açısından ise farklılıkların olduğu gözlemlenmektedir. Bir önceki kısımda yapılan analizlerdeki gibi geniş kapasite kümesi ile daha az sayıda, dar kapasite kümesi ile ise daha fazla sayıda tesisin açıldığı görülmektedir.

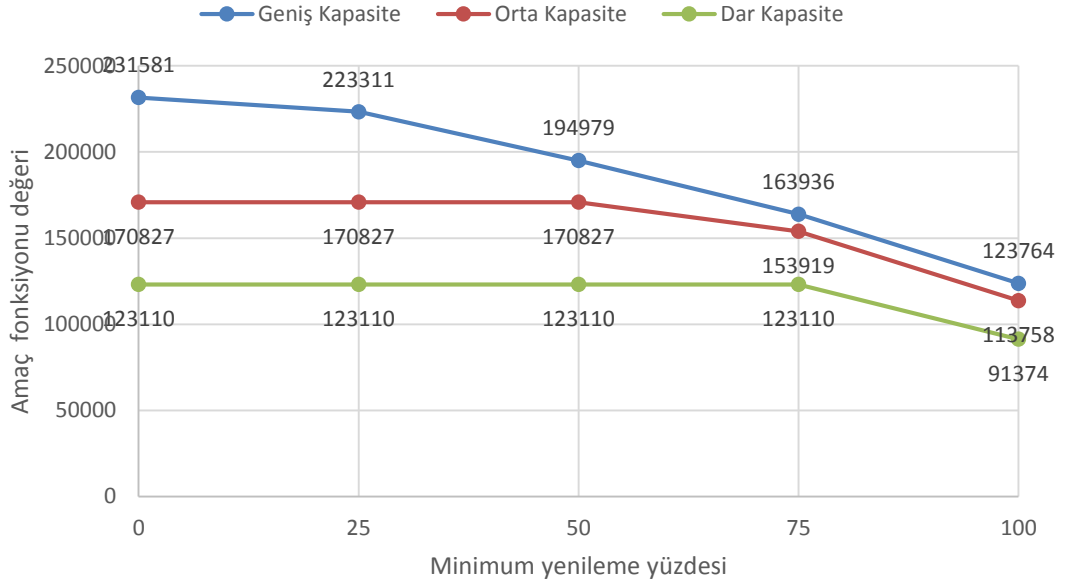
Geri kazanım oranının açılan tesislerle ilişkisine bakılacak olursa, Tablo 6.3'te görüldüğü üzere, geniş kapasite kümesi ile açılan tesis sayısının her oranda sabit

kaldığı, ancak, açılan tesislerin yerlerinin değiştiği görülmektedir. Geniş kapasite kümesi ile %50 ve %100'lük durumda ek kapasite kullanımı söz konusu değilken, %0, %25 ve %75 yenileme oranlarında ek kapasite kullanıldığı görülmektedir. %0'a doğru yaklaştıkça fabrika ve katı atık sahasının ek kapasite kullanımları artmaktadır.

Orta kapasite kümesi ile elde edilen ağ tasarımları incelendiğinde Tablo 6.4'te görüldüğü üzere %100 değerinde dört geri kazanım tesisi, %75 değeri ve altında üç geri kazanım tesisi açıldığı görülmektedir. %50 değeri ve altında ağ yapısı aynı kalmakta ve açılan tesisler değişmemektedir. Ek kapasite kullanımı ise %100 değerinde sıfır, %75 değerinde 48 birim, %50 ve altındaki tüm durumlarda ise, ağ yapısı aynı kaldığından, 385 birim olarak gerçekleşmiştir. En fazla tesis dar kapasite kümesi ile açılmaktadır. Dar kapasite kümesi ile açılan geri kazanım tesisi sayısı %100'de altı taneyken, %75 ve altındaki yüzdeler beşe düşmüş ve bu değerlerin altında ağ yapısı aynı kaldığından ek kapasite kullanımı da sabitlenmiştir.

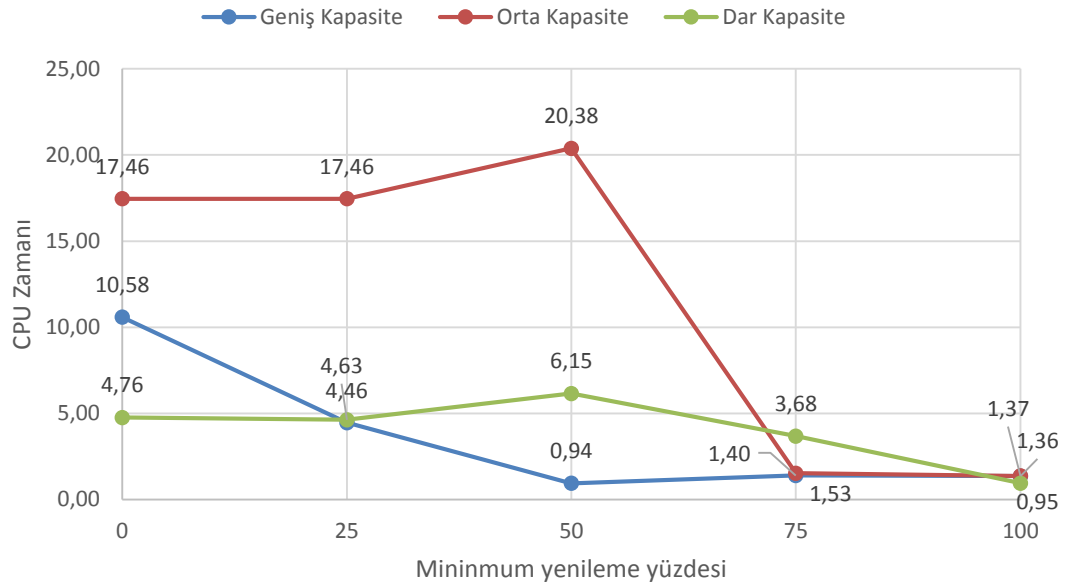
Geniş kapasite kümesi ile gözlenmeyen ama orta ve dar kapasite kümeleri ile gözlemlenen önemli bir nokta ise ağ yapısının belirli bir yüzde (orta kapasite için %50, dar kapasite için %75) değerinin altında aynı kalmasıdır. Bu nedenle, geniş kapasite kümesinin minimum yenileme oranındaki değişime karşı daha duyarlı olduğu kapasite değerleri azaldıkça bu duyarlılığın da azaldığı söylenebilir.

Şekil 6.3'de amaç fonksiyonunun, minimum yenileme oranı ve kapasite değerlerinden nasıl etkilendiği incelenmektedir. Şekil 6.3'te görüldüğü üzere amaç fonksiyonu değerleri ile minimum yenileme oranları arasında ters bir orantı olduğu, kapasite değerleriyle ise doğru bir orantı olduğu görülmektedir. %0 yenileme oranında geniş kapasiteli durumda en yüksek amaç fonksiyonu değerine ulaşılırken, %100 yenileme oranında ve dar kapasitede en küçük amaç fonksiyonu değeri elde edilmiştir. Ayrıca, şekilde de görüldüğü üzere, minimum yenileme yüzdesi arttıkça tüm kapasite değerleri için amaç fonksiyonu değerleri birbirine daha yakın olmaya başlamaktadır.



Şekil 6.3. Minimum yenileme oranı ve kapasite değerleri için amaç fonksiyonundaki değişim

Şekil 6.4'te minimum yenileme oranı ve kapasitelerdeki değişimden çözüm zamanının nasıl etkilendiği görülmektedir. Geri kazanım yüzdesinin %100 olduğu durumda tüm kapasite değerleri ile çok kısa zaman içerisinde optimal çözümlere ulaşılabilmektedir. %50'lik geri dönüşüm oranında geniş kapasite kümesi ile çözüm zamanı tepe değerine ulaşmıştır. En kötü durumda bile model yaklaşık 20 saniye içerisinde optimal olarak çözülebilmektedir.



Şekil 6.4. Minimum yenileme oranı ve kapasitelerdeki değişimin çözüm zamanına etkisi

6.3. Sabit Tesis Açma Maliyetlerindeki Değişimler

Bu bölümde, sabit tesis açma maliyetlerindeki değişimin kapasite değerlerinin geniş, orta ve dar olduğu durumlardaki etkileri incelenmektedir.

Tablo 6.2’de verilen geniş, orta ve dar kapasite kümelerine göre sabit tesis açma maliyetleri 5.000-15.000 değerleri arasında değiştirilerek model çözdürülmüş ve bu değişimlerin amaç fonksiyonu, CPU zamanı ve ağ tasarımı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Geniş, orta ve dar kapasite kümeleri ile elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 6.6, 6.7 ve 6.8’de gösterilmektedir.

Tablo 6.6. Geniş kapasite kümesi ile sabit maliyet değerlerindeki değişim

Sabit maliyet	Amaç fonksiyonu	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Toplam ek kapasite kullanımı
15.000	189.979	0,98	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
14.000	190.979	0,98	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
13.000	191.979	0,97	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
12.000	192.979	0,97	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
11.000	193.979	0,97	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
10.000	194.979	0,92	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
9.000	195.979	0,97	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
8.000	196.979	0,97	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
7.000	197.979	0,95	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
6.000	198.979	0,98	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
5.000	199.979	0,95	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0

Tablo 6.6’da görüldüğü üzere geniş kapasiteli durumda sabit tesis açma maliyetleri ağ tasarımı üzerinde hiçbir etki yapmamıştır. Tüm sabit maliyet değerleri ile fabrika, katı atık sahası ve R10 tesislerinin açılmasına karar verilmiş ve herhangi bir ek kapasite kullanılmamıştır. Bu durum geniş kapasite kümesinin sabit maliyet değerlerine karşı gürbüz olduğunu göstermektedir. Tablo 6.6.’da sunulan CPU zamanları da birbirine çok yakın değerdedir. Tüm optimal çözümler bir saniyenin altında elde edilmiştir.

Tablo 6.7. Orta kapasite kümesi ile sabit maliyet değerlerindeki değişim

Sabit maliyet	Amaç fonksiyonu	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Toplam ek kapasite kullanımı
15.000	160.827	17,09	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
14.000	162.827	11,98	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
13.000	164.827	19,42	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
12.000	166.827	14,80	Fabrika	Katı atık sahası, R3,R4	385
11.000	168.827	13,54	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
10.000	170.827	20,69	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
9.000	172.827	18,99	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
8.000	174.827	19,61	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
7.000	176.827	22,75	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
6.000	179.395	14,40	Fabrika, M1	Katı atık sahası, R5, R9	250
5.000	182.396	14,82	Fabrika, M1	Katı atık sahası, R5, R9	250

Tablo 6.8. Dar kapasite kümesi ile sabit maliyet değerlerindeki değişim

Sabit maliyet	Amaç fonksiyonu	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Toplam ek kapasite kullanımı
15.000	103.110	4,79	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
14.000	107.110	8,52	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
13.000	111.110	6,77	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
12.000	115.110	4,87	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
11.000	119.110	4,87	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
10.000	123.110	6,24	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	345
9.000	127.110	10,02	Fabrika	Katı atık sahası,R3, R4, R5, R9	355
8.000	131.110	8,66	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	355
7.000	135.110	5,07	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	355
6.000	139.477	13,64	Fabrika, M9	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	230
5.000	144.477	20,78	Fabrika, M9	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	230

Tablo 6.7’de görüldüğü üzere orta kapasite kümesi ile sabit tesis açma maliyetleri 7000-15.000 aralığındayken ağ yapısında herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Bu durumlarda fabrika, katı atık sahası, R3 ve R4 tesisleri açılmış ve 385 birimlik ek kapasite kullanılmıştır. Kullanılan ek kapasitenin 250 birimi fabrikada, 135 birini ise katı atık sahasında kullanılmaktadır. Tesis açmanın sabit maliyeti 5000 ve 6000 olduğu durumda ise yeni bir üretim tesisi açılmasına karar verilmiş ve bu üretim tesisinin açılması ile birlikte R3ve R4 geri kazanım tesisleri yerine R5 ve R9 geri kazanım tesisleri açılmıştır. Aynı zamanda, kullanılan ek kapasite değeri toplamda 250 birime düşmüştür. Ek kapasitenin kullanıldığı tesisler incelendiğinde üretim tesislerinde kullanılan ek kapasitenin sıfıra düştüğü geri kazanım tesislerinde ise 115 birim arttığı görülmüştür.

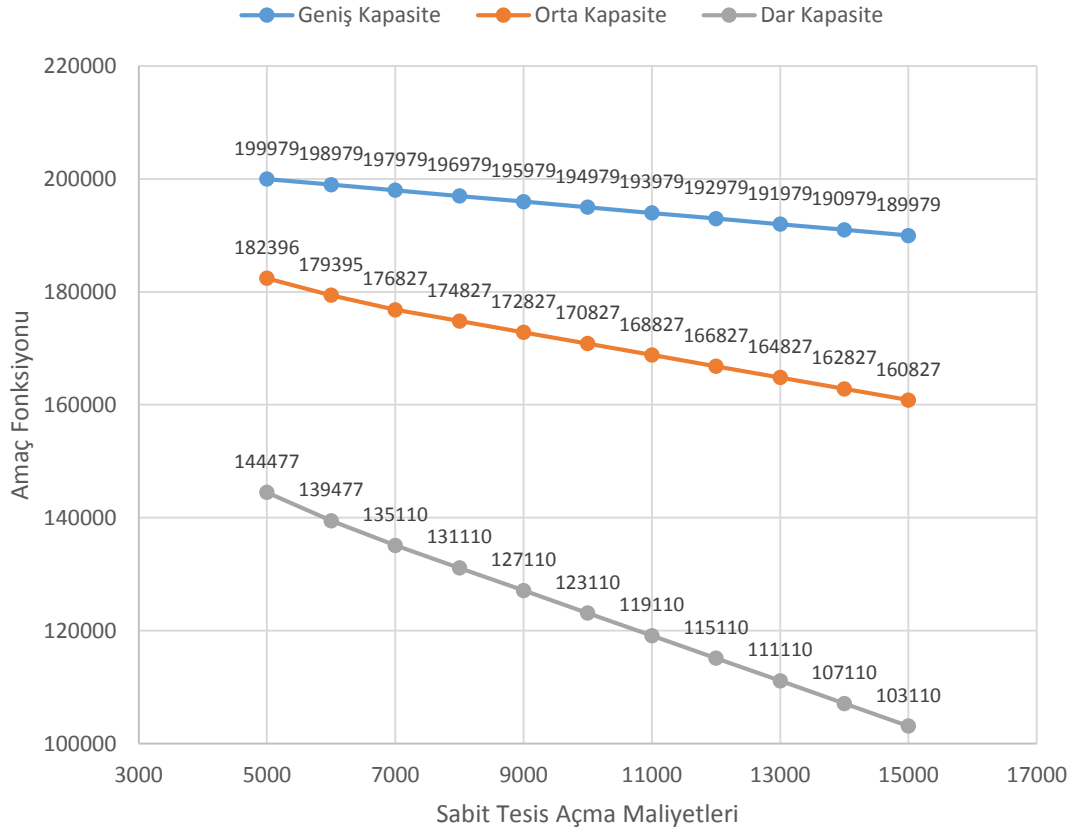
Dar kapasite kümesi ile Tablo 6.8’de görüldüğü üzere, orta kapasite kümesi ile olduğu gibi, sabit tesis açma maliyetinin 7000-15.000 olduğu aralıkta ağ yapısında herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Tüm sabit maliyet değerleri ile açılan tüm geri kazanım tesisleri aynıdır, ancak, sabit maliyetin 5000 veya 6000 olduğu durumda yeni bir üretim tesisinin açılmasına karar verilmektedir. Ek kapasite kullanımı ise 10.000 sabit maliyet değerine kadar 345 birim olarak gerçekleşirken, 9000-7000 değerleri arasında 10 birim artarak 355’e yükselmiş, sonrasında ise yeni üretim tesisinin açılması ile birlikte 230 birime gerilemiştir.

Kapasite değerleri ile açılan tesis sayısı arasındaki ters orantılı ilişki bu bölümdeki sonuçlarda da görülmektedir. Geniş kapasitede en az sayıda tesis ile müşteri talebi karşılanırken, dar kapasitede müşteri taleplerini karşılayabilmek için diğer kapasite değerlerine nazaran daha fazla tesise ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

Genel olarak, tüm kapasite kümeleri ile sabit tesis açma maliyetlerinin artması yahut azalmasının açılan geri kazanım tesisi sayısı üzerinde bir etkisinin olmadığı, ancak maliyetlerin 5000-6000 seviyelerine düştüğü durumlarda yeni bir üretim tesisinin açılmasına karar verildiği görülmektedir.

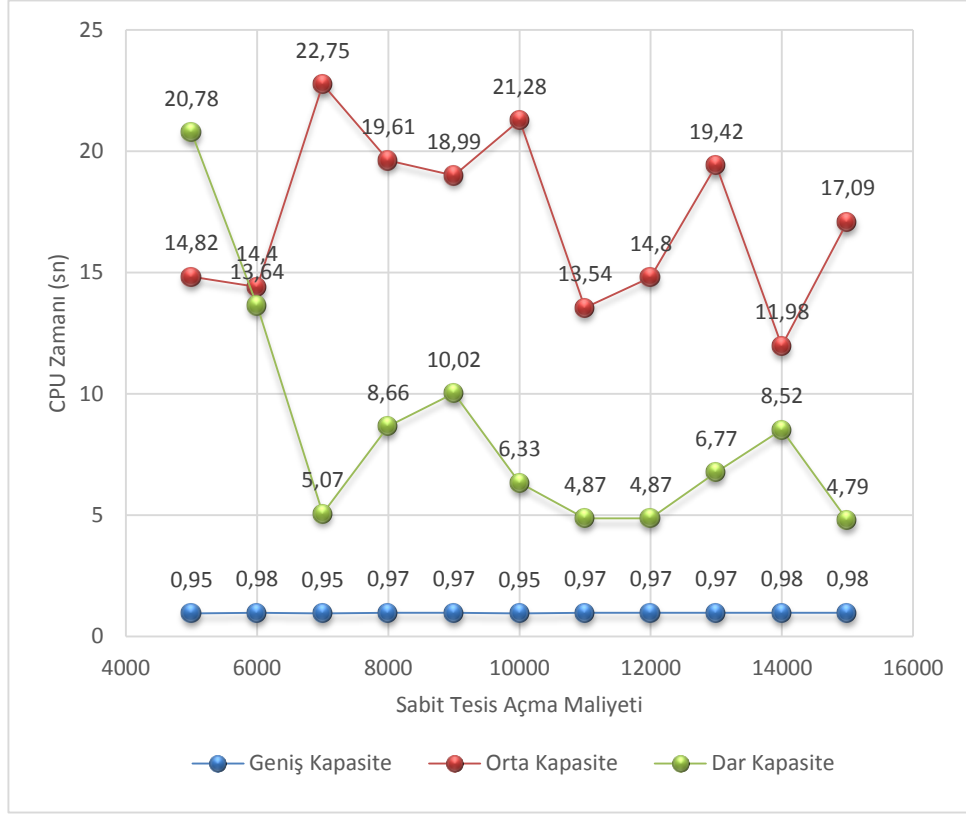
Mevcut tesisler arasında bulunan fabrika için herhangi bir sabit tesis açma maliyeti bulunmadığından kapasite değerlerinden bağımsız olarak bu tesisin her zaman açık kaldığı görülmektedir. Fabrika için de bir sabit maliyet eklenerek deneme koşulları alınmış, alınan bu koşulların her birinde fabrika olmasa da mutlaka başka bir üretim tesisinin açıldığı görülmüştür. Bu durum, bu parametre değerleri ile hiçbir yatırım yapmayıp müşteri talebini karşılamamayı seçmek yerine, üretim için bir yatırım yapmanın daha kârlı olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.5’de sabit tesis açma maliyetlerinin optimal amaç fonksiyonuna olan etkisi incelenmektedir. Beklendiği gibi en yüksek amaç fonksiyonu değerine yani en yüksek kâra sabit maliyetin en az olduğu durumda geniş kapasite kümesi ile ulaşılmaktadır. En kötü sonuç ise dar kapasite kümesi ile sabit maliyetin en fazla olduğu durumda gözlenmiştir. Her üç eğride de görüldüğü üzere kapasite değerleri aynı iken tesis açma sabit maliyetlerinin artması amaç fonksiyonunun yani toplam kârın azalmasına sebep olmuştur.



Şekil 6.5. Sabit tesis açma maliyetlerinin optimal amaç fonksiyonuna olan etkisi

Şekil 6.6'da sabit tesis açma maliyetlerinin CPU zamanı üzerine olan etkisi incelenmektedir. CPU zamanlarına bakıldığında en yüksek değer olan 22,75 saniyeye orta kapasite kümesi ve 7.000 Avro sabit maliyet değeri ile ulaşıldığı görülmektedir. Orta kapasite kümesi ile 10.000, dar kapasite kümesi ile ise 7.000 değerlerinde optimal sonuçlar 20 saniyenin üzerinde elde edilebilmiştir. En düşük CPU zamanları geniş kapasite kümesi ile elde edilmiştir. Geniş kapasite kümesi ile tüm sabit maliyet değerlerinde bir saniye içerisinde optimal çözümlere ulaşılabilmiştir. Şekil 6.6'da görüldüğü üzere ortalamada en fazla CPU zamanı ihtiyacı orta kapasite kümesi ile elde edilmiştir.



Şekil 6.6. Sabit tesis açma maliyetlerinin CPU zamanı üzerine olan etkisi

6.4.Müşteri Sayısındaki Değişimler

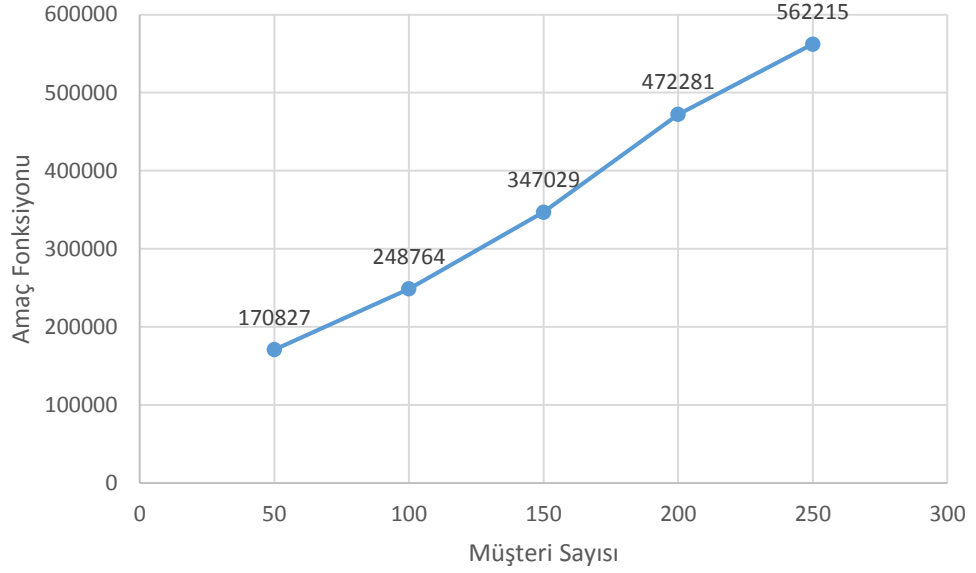
Bundan önce gerçekleştirilen tüm analizlerde müşteri sayısı 50 olarak alınmıştı. Modelin farklı müşteri sayılarında sergilediği performansı görmek amacıyla müşteri sayıları 50'nin katları olacak şekilde 50-250 aralığında değiştirilerek orta kapasite değerlerinde ve 10.000 sabit maliyet değeri ile farklı müşteri sayılarıyla sonuçlar alınmıştır. Müşteri talepleri örnek senaryoda olduğu gibi 0-100 arasında düzgün dağılımla değişen değerler olarak alınmış ve her noktanın X-Y düzlemindeki konumu diğer durumlardan bağımsız olarak 0-100 arasında rastgele sayılar olarak seçilmiştir. Değişen müşteri sayısına göre amaç fonksiyonu değeri, optimal çözümü elde etmek için CPLEX tarafından gerekli CPU zamanı ve ağ tasarımındaki değişimler Tablo 6.9'da gösterilmektedir.

Tablo 6.9. Müşteri sayısındaki değişimin etkileri

Müşteri Sayısı	Amaç fonksiyonu	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Toplam ek kapasite kullanımı
50	170.827	21,69	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
100	248.764	2,26	Fabrika	Katı atık sahası, R2, R3, R4, R9	455
150	347.029	4,20	Fabrika	Katı atık sahası, R2, R3, R4, R5, R8, R9	1160
200	472.281	11,51	Fabrika	Katı atık sahası, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9	1730
250	562.215	7,64	Fabrika	Katı atık sahası, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10	1877

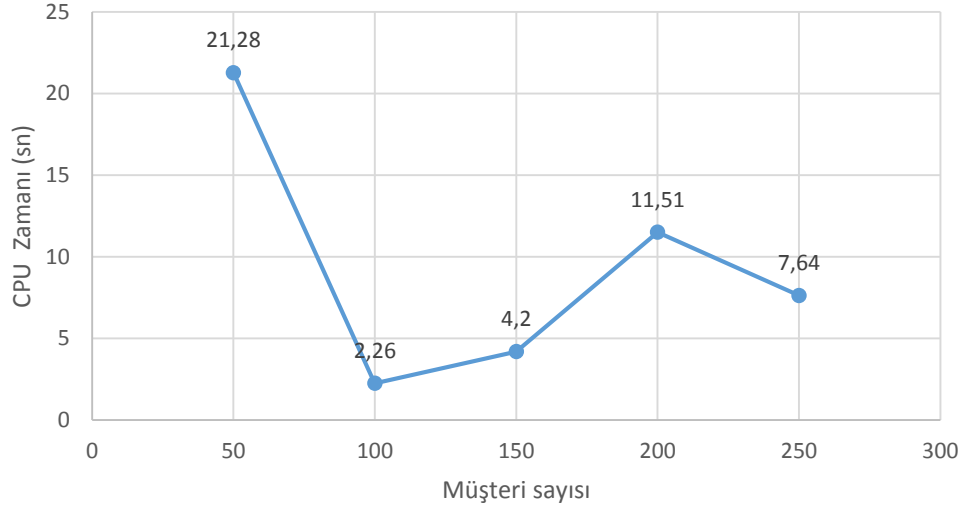
Farklı müşteri sayıları ile elde edilen tüm çözümlerde üretim tesisi olarak sadece fabrikanın açıldığı görülmektedir. Müşteri sayısında büyük bir artış olmasına rağmen müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürünlerin tümünün toplanması ve belirlenen minimum oranlarda geri kazanılması gerektiğinden müşteri talepleri yeni yerine yenilenen ürünlerle karşılanmış ve bu nedenle üretim tesisi sayısında bir değişiklik olmamıştır. Geri kazanım tesisleri açısından ise aksi bir durum söz konusudur. Müşteri sayısı ile birlikte açılan geri kazanım tesisi sayısında da artış görülmektedir. Bunun nedeni, ortaya çıkan kullanılmış ürünlerin en az %50'sinin yenilenmesi gerekliliğidir. Elde edilen tüm çözümlerde tesisler ek kapasite kullanarak müşterilere ait tüm talepleri yeni ürün ve yenilenmiş ürün ile karşılamıştır. Ek kapasite kullanım değeri 50 müşteri için 385 birim iken 250 müşteride 1877 birime ulaşmıştır.

Tablo 6.9’da görüldüğü üzere müşteri sayısı arttıkça amaç fonksiyonu değeri de artış göstermektedir. Müşteri sayısı değıştikçe amaç fonksiyonunun ne şekilde değıştiği Şekil 6.7’de gösterilmektedir.



Şekil 6.7. Müşteri sayısındaki değışimin amaç fonksiyonu üzerine etkisi

Tablo 6.9’da sunulan CPU zamanları Şekil 6.8’de gösterilmektedir. Müşteri sayısının artması ile CPU zamanında bir artış, beklenenin aksine, görülmemektedir. Çözüm zamanı, müşteri sayısı 50’den 100’e çıktığında çok hızlı bir düşüş seyretmiş, ancak 100-250 arasında çok büyük değışimler gözlemlenmemiştir. Genel olarak model 250 müşteri ile bile makul CPU zamanları içerisinde optimal olarak çözülebilmektedir.



Şekil 6.8. Müşteri sayısındaki değişimin CPU zamanı üzerine etkisi

6.5. Ürün Sayısındaki Değişimler

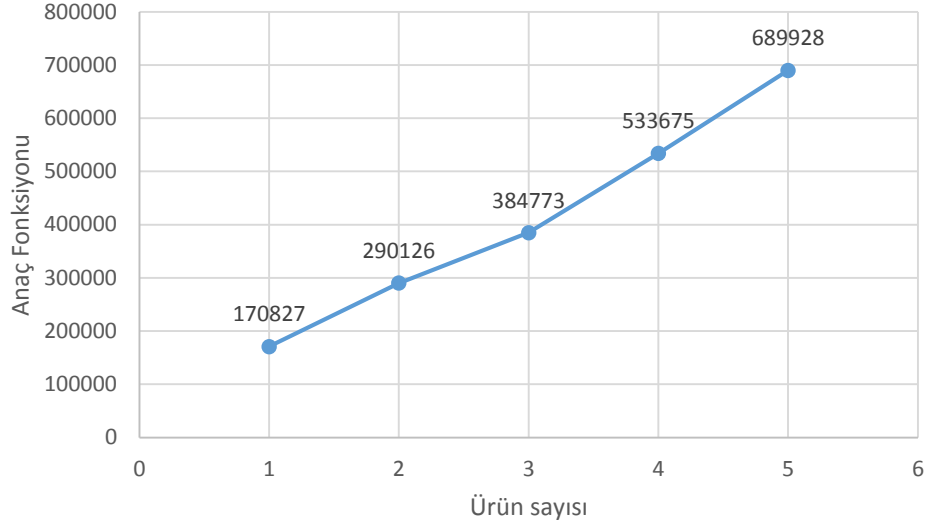
Birden fazla ürün modele eklendiğinde çözümün nasıl etkilendiğini görmek amacıyla iki, üç, dört ve beş ürünle orta kapasite kümesi ve 10.000 sabit maliyet değeri ile koşullar alınmıştır. Modele eklenen her bir ürünün ilk üründe olduğu gibi iki adet aynı bileşen kullanılarak üretildiği farz edilmiştir. Ürünlere olan talep ve müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürün miktarları ise 0 ile 100 arasında düzgün dağılıma sahip ($\sim U[0,100]$) rastgele değerler olarak alınmıştır. Probleme yeni bir ürün eklenirken diğer ürünlere ait müşteri talebinin ve ortaya çıkan kullanılmış ürün sayısının değişmediği varsayılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6.10'da görülmektedir.

Tablo 6.10. Ürün sayısındaki artışın etkisi

Ürün sayısı	Amaç fonksiyonu	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Toplam ek kapasite kullanımı
1	170.827	21,28	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
2	290.126	36,74	Fabrika, M7	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	250
3	384.773	88,35	Fabrika, M7	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R6, R7, R9	949
4	533.675	45,63	Fabrika, M4	Katı atık sahası, R2, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10	1228
5	689.928	31,16	Fabrika, M7, M9	Katı atık sahası, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10	2237

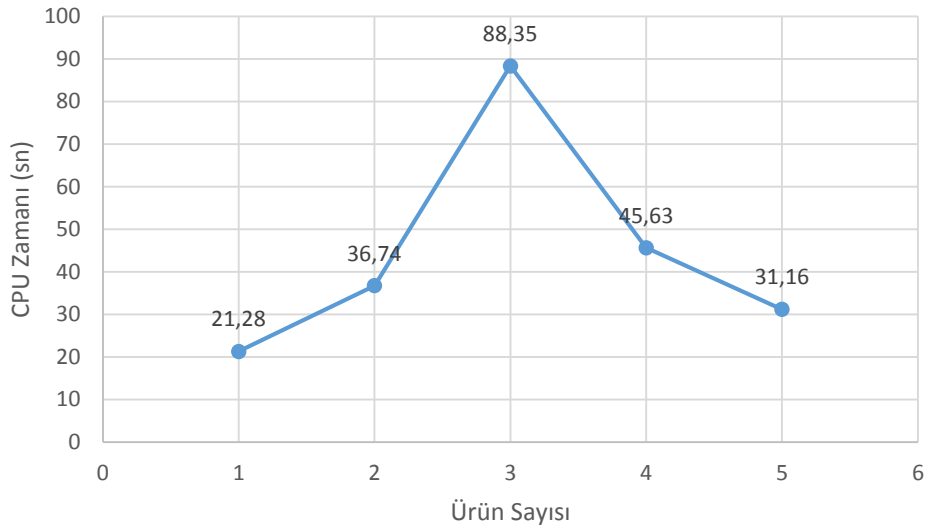
Tablo 6.10’da görüldüğü üzere, yeni bir ürün eklendiğinde açılan toplam tesisi sayısı artmaktadır. Tek ürün ile üretim tesisi olarak sadece fabrika açılırken, iki ve üç ürünle fabrika ve M7 tesisleri, dört ürünle fabrika ve M4 tesisleri, beş ürünle ise fabrika, M7 ve M9 tesisleri açılmıştır. Geri kazanım tesisi sayılarının da ürün sayısı arttıkça arttığı görülmektedir. Ek kapasite kullanım oranının sadece ikinci ürün eklendiğinde biraz azalma gösterdiği, onun haricinde yüksek oranlarda artış gösterdiği gözlemlenmektedir.

Ürün sayısı arttıkça amaç fonksiyonu neredeyse doğrusal bir şekilde artmaktadır. Şekil 6.9’da amaç fonksiyonu ve ürün sayısı arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 6.9. Ürün sayısındaki değişimin amaç fonksiyonuna etkisi

Ürün sayısındaki değişimin çözüm zamanı üzerindeki etkisi Şekil 6.10'da görülmektedir. Çözüm zamanı en yüksek değerine üç ürünlü durumda ulaşmıştır.



Şekil 6.10. Ürün sayısındaki değişimin çözüm zamanına etkisi

6.6. Talep ve Geri Dönüş Miktarlarındaki Değişimler

Talep ve geri dönüş miktarlarındaki değişimin elde edilen sonuçları nasıl etkilediğini görebilmek amacıyla talep ve geri dönüş miktarları değiştirilerek on farklı senaryo üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 6.11’de sunulmaktadır.

Tablo 6.11’in ilk satırında beşinci bölümde ele alınan örnek senaryo ile elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. İki ila on arasındaki her bir senaryoda müşterilerin talepleri ve geri dönüş miktarları 0 ile 100 arasındaki düzgün dağılımdan rastgele seçilen değerler olarak alınmıştır. On birinci senaryoda ise talep ve geri dönüş miktarları tam 100 olarak kabul edilmiştir. Her bir senaryo için minimum geri kazanım oranı %50 olarak alınmıştır.

Tablo 6.11. Talep ve geri dönüş miktarlarındaki değişimin etkileri

Senaryo	Amaç fonksiyonu	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Toplam ek kapasite kullanımı
1 (Örnek senaryo)	170.827	21,28	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
2	163.801	20,44	Fabrika,M7	Katı atık sahası, R5	193
3	164.237	14,51	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R6	352
4	175.852	22,23	Fabrika,M9	Katı atık sahası, R10	221
5	163.333	19,24	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	363
6	117.630	1,40	Fabrika	Katı atık sahası, R5, R10	290
7	140.791	2,72	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R6	261
8	150.531	4,98	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	383
9	163.824	8,44	Fabrika	Katı atık sahası, R6, R10	499
10	157.799	11,05	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R6	482
11	256.973	8,64	Fabrika	Katı atık sahası,R4,R5,R9	1250

Tüm senaryolarda fabrika ve katı atık sahası açılmaktadır, bu iki tesis haricinde geri kazanım tesisi R3’ün de sıklıkla açıldığı görülmektedir. On birinci senaryo hariç diğer

tüm senaryolarda toplamda dört tesis açılmıştır, on birinci senaryoda ise fazladan bir tesis daha açılması gerekmiştir. Talep ve geri dönüş değerlerinin değişmesi ileri tedarik zinciri ağ yapısını çok fazla etkilemezken, tersine tedarik zinciri ağ tasarımının bu değişimlerden çok daha fazla etkilendiği görülmektedir.

Senaryolara ilişkin toplam talep ve geri dönüş değerlerine bakılarak amaç fonksiyonu değişimleri hakkında bir genelleme yapmak mümkün olmamaktadır. Sadece diğer senaryolara kıyasla geri dönüş değerlerinin talep değerlerinden daha fazla olduğu senaryo 6'da amaç fonksiyonunun en düşük değerini aldığı görülmektedir.

6.7. İleri ve Tersine Tedarik Zinciri Ağı Tasarımı Problemlerinin Bağımsız ve Entegre Çözümlerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada geliştirilen matematiksel model hali hazırda hem ileri hem de tersine yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı problemlerini birbirinden bağımsız olarak çözebilmektedir. Bu problemlerin bir arada ele alınması ile kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi çözülmektedir. Bu kısımda, ileri ve tersine yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı problemlerinin bağımsız olarak çözüldüğü durum ile kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı probleminin tek başına çözümü ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

İleri yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı problemini oluşturabilmek için müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürün miktarları (g_{lp}) ve geri kazanılması gereken minimum ürün miktarı oranı (RT_{rp}) değerleri sıfır olarak alınmıştır. İleri yönlü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi kapsamında müşteri taleplerini karşılamak üzere hangi üretim tesislerinin açılması gerektiğine ve üretim tesislerinden müşterilere yeni ürün akışının nasıl olacağına karar verilmektedir.

Tersine yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı problemini oluşturmak için modelde üretim tesislerinde yeni ürün üretilmesine izin verilmemiştir. Müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürün miktarları örnek senaryoda verildiği şekilde alınmıştır.

Tersine tedarik zinciri ağı probleminde müşteri noktalarında ortaya çıkan kullanılmış ürünler geri kazanılarak yenilenmiş ürünler elde edilmekte ve müşteri taleplerini karşılamak üzere müşteri noktalarına iletilmektedir. Bu problem kapsamında hangi geri kazanım tesislerinin açılması gerektiğine, geri kazanım tesisleri ile müşteriler arasındaki ürün akışının nasıl olması gerektiğine, kullanılmış ürünlerden ne kadarının yenilenmesi ve ne kadarının bertaraf edilmesi gerektiğine karar verilmektedir.

İleri ve tersine yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı problemlerinin birbirinden bağımsız olarak çözülmesi ile elde edilen sonuçlar Tablo 6.12’de görülmektedir. Bu tablonun ilk satırında iki problemin entegre çözümü yani kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı probleminin optimal çözümü sunulmaktadır.

Tablo 6.12. Bağımsız ve entegre çözümlerin karşılaştırılması

	Amaç fonksiyonu	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Toplam ek kapasite kullanımı
Kapalı döngü tedarik zinciri ağı	170.827	21,28	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4	385
İleri tedarik zinciri ağı	255.196	2,78	Fabrika, M1, M4	Katı atık sahası	0
Tersine tedarik zinciri ağı	91.114	1,86	Fabrika	Katı atık sahası, R5, R9, R10	0

Beklendiği üzere en fazla kâr ileri yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı problemi tek başına çözüldüğünde elde edilmektedir. En az kâr ise tersine yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı probleminin çözümünden elde edilmiştir. Entegre çözüm ise neredeyse ileri ve tersine ağ problem çözümlerinin ortalamasına eşit bir amaç fonksiyonu değerine sahiptir. Ele alınan problemde ileri ve tersine ağın müşterileri aynı kişilerdir ve müşteri talepleri yeni yahut yenilenmiş üründen karşılanabilmektedir. Yenilenmiş ürün için özel bir ikinci el ürün pazarı bulunmamaktadır. Problem parametrelerine göre

müşteri taleplerinin yeni ve yenilenmiş üründen karşılanması arasında bir gelir farkı bulunmaktadır. Yenilenmiş bir ürünün satışından elde edilen gelir yeni bir ürünün satışından elde edilen gelirden daha düşüktür. Bu nedenle entegre çözüm ile elde edilen kârın ileri yöndeki ağ tasarımı probleminin tek başına çözümünden daha az, tersine yöndeki ağ tasarımı probleminin çözümünden ise daha fazla olması beklenmektedir.

Tablo 6.10’da görülen diğer bir husus ise ileri tedarik zinciri ağında katı atık sahasının açık kalması, tersine tedarik zinciri ağında da üretim yapmamasına rağmen fabrikanın açık kalmasıdır. Bunun sebebi her iki tesis için de kapatma maliyetlerinin olmasıdır.

Her iki problemin birbirinden bağımsız olarak çözdürülmesi ile üretim ve geri kazanım tesislerinin farklı miktarlarda ve farklı yerlerde açılmasına ihtiyaç duyulduğu gözlemlenmektedir. Her iki problemin optimal çözümünde açılan tesislerin farklılık göstermesi problemin entegre olarak ele alınmasının kârı en büyükleyecek tesislerin yerlerini belirlemek açısından çok daha mantıklı olduğunu göstermektedir.

Problemlerin optimal çözümü için gerekli çözüm zamanı incelendiğinde ise entegre çözümün bağımsız çözümlerden daha fazla zamana ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Daha kapsamlı bir problemin çözümü için daha fazla zamana ihtiyaç duyulması beklenen bir durumdur. Ancak, ele alınan problem bir stratejik planlama problemidir ve bu ağ tasarımı probleminin optimal çözümü için ihtiyaç duyulan sürelerin makul seviyede olduğu düşünülmektedir.

7. SENARYO BAZLI RASSAL MODEL

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen ve dördüncü bölümde sunulan matematiksel model talep ve geri dönüş değerlerinin deterministik olduğunu varsaymaktadır. Bu nedenle tersine tedarik zinciri ağı tasarımı problemi gibi belirsizliklerin çok fazla olduğu bir problemi çözmek konusunda yetersiz kalabileceği düşünülebilir. Bu nedenle tezin bu bölümünde, Salema vd. [28] tarafından geliştirilen model örnek alınarak, kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi için senaryo bazlı bir rassal programlama modeli önerilmektedir.

Geliştirilen rassal model beklenen kârı en büyükmektedir. Modelde talep ve geri dönüş değerlerinin alabileceği belirli olasılık değerlerine sahip senaryolar kümesi bulunmaktadır. Her bir senaryoya ilişkin olasılık değeri bir parametre ile belirlenmektedir. Talep, geri dönüş ve minimum geri kazanım oranı parametreleri senaryo bazlı olarak yeniden tanımlanmıştır. Bu parametreler haricinde kalan tüm parametreler senaryo durumlarından bağımsız bir şekilde deterministik modelde tanımlandığı şekilde alınmıştır. Karar değişkenlerinde ise tesis açma, kapama kararlarının verilmesi için kullanılan ikili değişkenler (y_{ml}, y_{rl}) haricinde kalan diğer karar değişkenleri senaryo bazlı olarak yeniden tanımlanmıştır. Dördüncü bölümde tanımlanan kümeler, parametreler ve karar değişkenlerine ek olarak yeni tanımlanan kümeler, parametreler ve karar değişkenleri aşağıda sunulmaktadır.

Kümeler

S : Senaryolar kümesi

Parametreler

d_{lps} : $s \in S$ senaryosunda $p \in P$ ürünü için $l \in L$ noktasının talebi

g_{lps} : $s \in S$ senaryosunda $l \in L$ noktasında ortaya çıkan $p \in P$ kullanılmış ürün miktarı

RT_{rps} : $s \in S$ senaryosunda $r \in R$ opsiyonu ile $p \in P$ ürünü için geri kazanılması gereken minimum kullanılmış ürün miktarı

π_s : $s \in S$ senaryosunun gerçekleşme olasılığı

Karar Değişkenleri

s_{lps} : $s \in S$ senaryosunda $l \in L$ tesisinde dışarıdan satın alınması gereken $p \in P$ ürünü miktarı

z_{mlp} : $s \in S$ senaryosunda $l \in L_m$ tesisinde $m \in M$ üretim opsiyonu ile üretilen $p \in P$ ürünü miktarı

v_{rlps} : $s \in S$ senaryosunda $l \in L_r$ tesisinde $r \in R$ geri kazanım opsiyonu ile geri kazanılan $p \in P$ ürünü miktarı

$x_{ll'ps}$: $s \in S$ senaryosunda $l \in L$ tesisinden $l' \in L$ tesisine taşınan $p \in P$ ürünü miktarı

w_{mls} : $s \in S$ senaryosunda $l \in L_m$ tesisinde $m \in M$ üretim opsiyonu için kullanılan ekstra kapasite miktarı

w_{rls} : $s \in S$ senaryosunda $l \in L_r$ tesisinde $r \in R$ geri kazanım opsiyonu için kullanılan ekstra kapasite miktarı

u_{lps} : $s \in S$ senaryosunda $l \in L$ noktasında $p \in P$ ürününün karşılanamayan talebinin miktarı

Yukarıda tanımlanan parametre ve karar değişkenleri ile oluşturulan senaryo bazlı rassal matematiksel model aşağıdaki şekildedir:

Matematiksel Model

$$\begin{aligned}
Max \quad & \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \pi_s RE_{lp} (d_{lps} - u_{lps}) + \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \pi_s RE_{rlp} v_{rlps} \\
& - \left\{ \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m^n} FC_{ml} y_{ml} + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r^n} FC_{rl} y_{rl} \right. \\
& + \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m^e} SC_{ml} (1 - y_{ml}) + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r^e} SC_{rl} (1 - y_{rl}) \\
& + \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m} OC_{ml} y_{ml} + \sum_{m \in M} \sum_{l \in J_m} OC_{ml} + \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r} OC_{rl} y_{rl} \\
& + \sum_{r \in R} \sum_{l \in J_r} OC_{rl} + \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \pi_s PC_{lp} s_{lps} \\
& + \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{l \in L_m} \sum_{p \in P} \pi_s MC_{mlp} z_{mlps} \\
& + \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L_r} \sum_{p \in P} \pi_s RC_{rlp} v_{rlps} \\
& + \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} \sum_{v \in L \setminus \{l\}} \sum_{p \in P} \pi_s TC_{lvp} x_{lvps} \\
& + \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \pi_s DC_{lp} u_{lps} + \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{l \in I_m} \pi_s EC_{ml} w_{mls} \\
& \left. + \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \sum_{l \in I_r} \pi_s EC_{rl} w_{rls} \right\}
\end{aligned} \tag{7.1}$$

s.t.

$$\begin{aligned}
g_{lps} + s_{lps} + \sum_{m \in M} z_{mlps} + \sum_{r \in R} \sum_{q \in P} \beta_{rqp} v_{rlqs} \\
+ \sum_{l' \in L \setminus \{l\}} x_{ll'ps} \\
= \sum_{m \in M} \sum_{q \in P} a_{mqp} z_{mlqs} \\
+ \sum_{r \in R} v_{rlps} + \sum_{l' \in L \setminus \{l\}} x_{ll'ps} + d_{lps} \\
- u_{lps}
\end{aligned} \quad \forall l \in L, p \in P, s \in S \quad (7.2)$$

$$u_{lps} \leq d_{lps} \quad \forall l \in L, p \in P, s \in S \quad (7.3)$$

$$s_{lps} \leq M \sum_{m \in M} y_{ml} \quad \forall l \in I_m, p \in P, s \in S \quad (7.4)$$

$$\sum_{p \in P} z_{mlps} \leq K_{ml} y_{ml} + w_{mls} \quad \forall m \in M, l \in I_m, s \in S \quad (7.5)$$

$$\sum_{p \in P} z_{mlps} \leq K_{ml} \quad \forall m \in M, l \in J_m, s \in S \quad (7.6)$$

$$\sum_{p \in P} v_{rlps} \leq K_{rl} y_{rl} + w_{rls} \quad \forall r \in R, l \in I_r, s \in S \quad (7.7)$$

$$\sum_{p \in P} v_{rlps} \leq K_{rl} \quad \forall r \in R, l \in J_r, s \in S \quad (7.8)$$

$$\sum_{l \in L_r} v_{rlps} \geq RT_{rps} \quad \forall r \in R, p \in P, s \in S \quad (7.9)$$

$$w_{mls} \leq EK_{ml} y_{ml} \quad \forall m \in M, l \in I_m, s \in S \quad (7.10)$$

$$w_{rls} \leq EK_{rl} y_{rl} \quad \forall r \in R, l \in I_r, s \in S \quad (7.11)$$

$$x_{ll'ps} \leq M \sum_{m \in M} y_{ml} \quad \forall l \in I_m, l' \in L \setminus \{l\}, p \in P, s \in S \quad (7.12)$$

$$x_{ll'ps} \leq M \sum_{m \in M} y_{ml'} \quad \forall l \in L \setminus \{l'\}, l' \in I_m, p \in P, s \in S \quad (7.13)$$

$$x_{ll'ps} \leq M \sum_{r \in R} y_{rl} \quad \forall l \in I_r, l' \in L \setminus \{l\}, p \in P, s \in S \quad (7.14)$$

$$x_{llps} \leq M \sum_{r \in R} y_{rl} \quad \forall l \in L \setminus \{l'\}, l' \in I_r, p \in P, s \in S \quad (7.15)$$

$$z_{mlps} = 0 \quad \forall l \in L \setminus L_m, m \in M, p \in P, s \in S \quad (7.16)$$

$$v_{rlps} = 0 \quad \forall l \in L \setminus L_r, r \in R, p \in P, s \in S \quad (7.17)$$

$$y_{ml}, y_{rl} \in \{0,1\} \quad \forall m \in M, r \in R, l \in L, s \in S \quad (7.18)$$

$$\begin{aligned} s_{lps}, z_{mlps}, v_{rlps}, x_{llps}, \\ w_{rls}, w_{mls}, u_{lps} \geq 0 \end{aligned} \quad \forall m \in M, r \in R, l \in L, p \in P, s \in S \quad (7.19)$$

Amaç fonksiyonu (7.1), beklenen kâr değerini en büyükmektedir. Kısıt (7.2) akış dengesi kısıtıdır ve her bir senaryo için sağlanması gereklidir. Kısıtlar (7.3)–(7.17) dördüncü bölümde sunulan deterministik modeldeki kısıtların her bir senaryo için yazılması ile elde edilmiştir.

Geliştirilen yeni modelin performansını test etmek amacıyla talep ve geri dönüş miktarları ile ilgili değişik olasılık değerlerine sahip üç farklı senaryo oluşturulmuştur. Bu üç senaryoya ilişkin parametre değerleri Tablo 7.1’de sunulmaktadır.

Tablo 7.1. Senaryolar için parametre değerleri

	1. Senaryo	2. Senaryo	3. Senaryo
Talep	~U[0,100]	~U[50,150]	~U[100,200]
Geri dönüşler	~U[0,100]	~U[50,150]	~U[100,200]
Olasılık değerleri	0,1	0,75	0,15
Geri kazanılması gereken minimum kullanılmış ürün miktarı	%50	%50	%50

Tabloda verilmeyen tüm değerler bölüm 5.1’de sunulan şekilde alınmıştır. Rassal model için geniş kapasite kümesi kullanılmıştır. Yeni model GAMS ara yüzünde kodlanarak CPLEX programı ile optimal olarak çözdürülmüştür. Rassal model ile elde

edilen sonuçlar Tablo 7.2’de sunulmaktadır. Tablo 7.3’te ise açılan tesisler için senaryo bazlı üretim ve ek kapasite kullanım miktarları gösterilmektedir.

Tablo 7.2. Senaryo bazlı rassal modelin optimal çözümü

Amaç fonksiyonu değeri	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Ek kapasite kullanımı
431.062	376,23	Fabrika, M9	Katı atık sahası, R2, R3, R4, R9	2872

Tablo 7.3. Senaryo bazlı üretim ve ek kapasite kullanım miktarları

Tesisler	Senaryolar					
	1		2		3	
	Üretim Miktarı	Ek kapasite	Üretim Miktarı	Ek kapasite	Üretim Miktarı	Ek kapasite
Fabrika	327	-	708	-	1242	-
M9	1153	-	1952	-	1501	-
Katı atık sahası	1365	-	2500	500	2500	500
R2	222	-	806	-	2372	372
R3	355	-	1040	-	2500	500
R4	402	-	1590	-	2500	500
R9	386	-	1215	-	2500	500

Modelin optimal olarak çözdürülmesi sonucunda toplam yedi adet tesisin açılmasına karar verilmiştir. Tablo 7.3’te de görüldüğü üzere üretim tesislerinde üretilen ürün miktarları ve geri kazanılan ürün sayıları, ek kapasite kullanım miktarları ve hangi müşterinin talebinin hangi tesisten karşılandığı her bir senaryo için değişmektedir. Senaryo 1’de üretilen ürün miktarı en az iken Senaryo 3’te en fazla değeri almıştır. Senaryoların hiçbirinde üretim tesislerinde ek kapasite kullanılmazken, Senaryo 3’te yenileme tesislerinin hepsinde ek kapasite kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Katı atık

sahasında ise Senaryo 2 ve 3'te ek kapasite kullanılmaktadır. Her üç senaryoda da talebi karşılanmayan müşteri bulunmamaktadır.

Tablo 7.4'te her bir senaryo için hangi tesislerden hangi müşterilere yeni/yenilenmiş ürün gönderildiği, katı atık sahası için ise hangi müşterilerden toplanan ürünlerin doğrudan bertarafa gönderilmesi gerektiği gösterilmektedir. Her üç senaryo altında bazı müşterilerin hizmet aldığı tesislerin değişmediği durumlar olduğu gibi farklı senaryolarda dağıtım ve toplama ağına birtakım değişiklikler de olmuştur. Örneğin 7 numaralı müşterinin talebi her üç senaryoda da fabrikadan yeni ürünle karşılanırken, 30 numaralı müşterinin talebi 1 ve 2. Senaryoda fabrikadan yeni ürünle, 3. Senaryoda ise R9 tesisinden yenilenmiş ürünle karşılanmaktadır.

Tablo 7.4. Her bir senaryo altında tesislerin ürün gönderdikleri müşteriler

Tesisler	Senaryolar		
	1	2	3
Fabrika	7, 9, 11, 27, 30, 45	7, 9, 11, 27, 30, 45	7, 9, 11, 27, 45
M9	2, 3, 4, 5, 8, 14, 16, 17, 18, 23, 26, 29, 33, 34, 41, 42, 44, 48, 49	2, 3, 4, 8, 16, 17, 18, 26, 29, 33, 41, 42, 48	3, 17, 18, 29, 33, 42
Katı Atık Sahası	1, 2, 3, 6, 9, 10, 12, 17, 18, 19, 21, 25, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 39, 40, 43, 44, 46, 50	1, 2, 3, 6, 9, 10, 12, 18, 19, 25, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 40, 43, 44, 46	1, 4, 6, 10, 12, 19, 25, 31, 32, 34, 35, 37, 40
R2	13, 20, 22	13, 20, 22, 49	13, 14, 16, 17, 20, 22, 26, 41, 49
R3	1, 10, 12, 21, 23, 35, 43	1, 8, 10, 12, 21, 35, 43, 44	1, 8, 10, 12, 21, 32, 35, 43, 44, 48
R4	5, 19, 24, 28, 36, 37, 46, 47	14, 19, 23, 24, 28, 36, 37, 46, 47	14, 19, 23, 24, 28, 36, 37, 46, 47
R9	15, 25, 31, 32, 38, 39, 40, 50	15, 25, 31, 32, 34, 38, 39, 40, 50	2, 15, 25, 29, 30, 31, 32, 34, 38, 39, 40, 50

Her bir senaryo dördüncü bölümde sunulan deterministik model ile olasılık değerleri olmadan optimal olarak çözdürüldüğünde Tablo 7.5'te görülen sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek amaç fonksiyonu değeri en fazla miktarda talebin ve geri dönüşün olduğu Senaryo 3 ile elde edilirken, amaç fonksiyonu Senaryo 1'de en düşük

değerini almıştır. En yüksek çözüm zamanı ise Senaryo 2 ile elde edilmiştir. Fabrika ve katı atık sahası tüm senaryolarda açık tesisler olarak seçilmiştir ancak açılan diğer tesisler için bir genelleme yapmak mümkün değildir. Açılan toplam tesis sayısına bakılacak olursa, bu sayının talep değerleri ile orantılı bir şekilde artış gösterdiği görülmektedir. Senaryo 1’de üç, Senaryo 2’de beş, Senaryo 3’te ise sekiz tesis açılmıştır.

Tablo 7.5. Senaryoların bağımsız çözümleri

Senaryolar	Amaç fonksiyonu	CPU zamanı (sn)	Açılan üretim tesisleri	Açılan geri kazanım tesisleri	Ek kapasite kullanımı
1	194.979	0,94	Fabrika	Katı atık sahası, R10	0
2	434.397	117,39	Fabrika, M4	Katı atık sahası, R4, R5	1151
3	674.050	102,10	Fabrika, M7	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R6, R9	500

Tablo 7.5’de sunulan sonuçlar ile rassal modelin optimal sonucu kıyaslandığında her bir senaryonun bağımsız olarak çözdürülmesi ile elde edilen sonuçların rassal modelin optimal çözümünden farklı olduğu görülmektedir. Rassal model her bir senaryo için optimal değeri vermemekte, ancak senaryoların olasılık değerlerini de göz önüne alarak beklenen kârı en büyükmek için ağ tasarımının nasıl olması gerektiğine karar vermektedir.

Gerçek hayatta senaryoların olasılık değerlerini belirlemenin güç olduğu düşünülerek senaryo olasılıklarının sonuçlar üzerindeki etkilerini incelemek için ayrıca bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her üç senaryonun gerçekleşme olasılıkları değiştirilerek rassal model tekrar çözdürülmüştür. Elde edilen sonuçlar Tablo 7.6’da sunulmaktadır. Tablo 7.6’nın ilk satırında önceki analizlerde kullanılan olasılık değerleri ile elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Tablo 7.6. Farklı senaryo olasılık değerleri altında rassal modelin optimal çözümleri

Olasılık Değerleri			Amaç Fonksiyonu	CPU Zamanı (sn)	Açılan Üretim Tesisleri	Açılan Geri Kazanım Tesisleri	Ek kapasite kullanımı
1	2	3					
0,1	0,75	0,15	431.062	376,23	Fabrika, M9	Katı atık sahası, R2, R3, R4, R9	2872
0,1	0,15	0,75	581.657	737,01	Fabrika, M7	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R6, R9	1000
0,15	0,1	0,75	568.349	774,23	Fabrika, M7	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R6, R9	1000
0,15	0,75	0,1	405.537	507,71	Fabrika, M9	Katı atık sahası, R2, R3, R4, R9	2872
0,333	0,333	0,333	413.296	248,51	Fabrika, M9	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	2872
0,75	0,1	0,15	261.906	157,64	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R5, R9	3712
0,75	0,15	0,1	250.825	151,07	Fabrika	Katı atık sahası, R3, R4, R6, R9	3712

Tablo 7.6’da senaryoların gerçekleşme olasılıklarına göre değişen ağ tasarımları gözlemlenebilmektedir. Senaryo 3’ün olasılığının 0,75’e çıkması ile birlikte Tablo 7.5’te gösterilen üçüncü senaryonun bağımsız olarak optimal çözümünden elde edilen ağ tasarımının aynısının elde edildiği görülmektedir. Talep ve geri dönüşlerin en büyük olduğu senaryonun gerçekleşme olasılığının artması ile tasarlanan ağın üçüncü senaryonun optimal çözümüne daha çok benzediği görülmektedir. Talep ve geri dönüş değerlerinin daha az olduğu birinci ve ikinci senaryo için ise böyle bir sonuç çıkartmak mümkün olmamaktadır.

Amaç fonksiyonu değerlerinin senaryoların olasılık değerleri ile orantılı olarak değiştiği görülmektedir. En düşük talep ve geri dönüş değerlerinin olduğu Senaryo 1’in gerçekleşme olasılığı arttıkça amaç fonksiyonu değeri azalmakta, Senaryo 2 ve Senaryo 3 içinse ilgili olasılık değerleri arttıkça amaç fonksiyonu değeri de artmaktadır.

Tablo 7.6’da sunulan CPU zamanlarına bakıldığında ise rassal modelin çözümü için gereken CPU zamanının deterministik modele kıyasla bir hayli artış gösterdiği görülmektedir.

8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Son yirmi yıldır yasal, ekonomik ve çevresel sebepler nedeniyle tersine lojistik ve kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı konularına olan ilgi artmıştır. Bu çalışmada, kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı problemi ele alınmış ve bu problemin çözümüne yönelik olarak çok ürünlü, kapasiteli, deterministik bir karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model örnek bir veri kümesi üzerinde CPLEX programı kullanılarak optimal olarak çözülmüştür.

Modelin performansının test edilmesi amacıyla çok çeşitli duyarlılık analizi çalışmaları yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonucu kapasite değerleri ile açılan toplam tesis sayısı ve amaç fonksiyonu değeri arasında ters orantılı bir ilişki bulunduğu görülmüştür. Tesislerin kapasiteleri azaldıkça açılan toplam tesis sayısı artmakta ve toplam kâr, açılan tesislerin toplam sabit maliyetleri ve ek kapasite kullanım maliyetlerinin artması sebebiyle, azalmaktadır. Ayrıca, ileri tedarik zinciri ağının kapasite değerlerindeki değişiminden daha az etkilendiği, tersine tedarik zinciri ağının ise kapasite değişimlerine karşı daha duyarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Çoğunlukla yasalarla belirlenen geri kazanılması gereken minimum ürün oranı arttıkça müşteri talepleri yenilenmiş ürünlerle karşılanmakta ve yeni üründen elde edilen kâra göre daha az kâr elde edildiği görülmüştür. Bu oran azaldıkça müşteri talepleri yeni ürünle karşılanmakta ve elde edilen kâr artmaktadır, ayrıca katı atık sahasına iletilen kullanılmış ürün sayısı da artmaktadır.

Maliyet kalemleri içerisinde en büyük değere sahip olan sabit tesis açma maliyetinin sonuçlar üzerine olan etkilerine bakıldığında, geniş kapasiteli durumlarda ağ tasarımının maliyet değişiminden etkilenmediği ancak tesis kapasitelerinin az olduğu durumlarda ağ tasarımında değişiklikler olduğu gözlenmiştir. Sabit maliyet değerlerinin artışı ile beklendiği gibi elde edilen kârın düştüğü görülmektedir.

Müşteri sayıları 50-250 değerleri arasında değiştirildiğinde, müşteri sayısının açılan üretim tesisi sayısını etkilemediği ancak açılan geri kazanım tesisi sayısını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durumda müşteri taleplerinin büyük bir kısmı yeni ürün yerine yenilenmiş ürün ile sağlanmaktadır. Bu durumun başlıca sebebi müşterilerde oluşan tüm atıkların toplanmasının zorunlu olması ve yasal zorunluluklar sebebi ile bir minimum geri kazanım yüzdesinin bulunmasıdır.

Tek ürünle çözdürülen modele beş ürüne kadar yeni ürün eklenmiş ve ürün sayısının çözümler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ürün sayısının artması üretim tesisi ve geri kazanım tesisi sayısını artırmaktadır. Ürün sayısının müşteri sayısı değişimine göre ileri tedarik zinciri ağı tasarımını daha fazla etkilediği gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında kapalı döngü tedarik zinciri ağı ileri ve tersine yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı olarak birbirlerinden bağımsız iki ayrı problem olarak da çözdürülmüştür. Elde edilen sonuçlar kapalı tedarik zinciri ağının entegre çözümü ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, müşteri taleplerinin yeni ve yenilenmiş üründen karşılanması arasında fark bulunmadığı yani yenilenmiş ürünler için ayrı bir ikinci el ürün pazarı olmadığı durumlarda ileri ve tersine tedarik zinciri ağı tasarımı problemlerinin birlikte çözümünden elde edilen kârın ileri yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı probleminin tek başına çözümünden daha az, tersine yöndeki tedarik zinciri ağı tasarımı probleminin çözümünden ise daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, toplam kârı en büyükleyecek tesislerin yerlerini belirlemek için iki problemin ayrı olarak çözdürülmesi yerine kapalı döngü tedarik zinciri ağı tasarımı şeklinde entegre olarak ele alınması gerektiği belirlenmiştir.

Talep ve geri dönüşlerdeki belirsizliğin çözüm üzerindeki etkilerini incelemek üzere senaryo bazlı bir rassal programlama modeli önerilmiştir. Bu rassal model talep ve kullanılmış ürün geri dönüşlerindeki belirsizlik durumlarında her bir senaryonun olasılığını göz önüne alarak beklenen kârı en büyüklemektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar kapsamında tek periyotlu olan modelin çok periyotlu hale getirilerek parametrelerin zaman içerisindeki değişimlerini de dikkate alan dinamik bir model geliştirilmesi ve modelin gerçek hayat verileri ile uygulamasının yapılarak geliştirilen diğer jenerik modellerle performans açısından kıyaslamasının yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] “Kyoto Protokolü” erişim adresi: http://tr.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protokolü, erişim tarihi: 3 Mayıs 2014.
- [2] “Avrupa Birliği’nin Çevre Politikası” erişim adresi: <http://www.ab.gov.tr/index.php?p=92&l=1>, erişim tarihi: 3 Haziran 2014.
- [3] “End-of-life vehicles” erişim adresi: http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/121225_en.htm, erişim tarihi: 26 Eylül 2011.
- [4] “Waste Electrical and Electronic Equipment” erişim adresi: http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/legis_en.htm, erişim tarihi: 3 Haziran 2014.
- [5] Guide V., Harrison T.P., Wassenhove L., The challenge of closed-loop supply chains, *Interfaces*, 33, 3–6, 2003a.
- [6] “Recast of the WEEE Directive” erişim adresi: http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm, erişim tarihi: 2 Temmuz 2014.
- [7] “Wastes-Resource Conservation –Common Wastes Materials-eCycling” erişim adresi: <http://www.epa.gov/epawaste/conserves/materials/ecycling/rules.htm>, erişim tarihi: 7 Kasım 2013.
- [8] “Environmental Conservation Law Article 27 Title 26” erişim adresi: http://www.dec.ny.gov/docs/materials_minerals_pdf/ewastelaw2.pdf.
- [9] “Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Kontrolü Yönetmeliği” <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/05/20120522-5.htm>, erişim tarihi: 22 Mayıs 2012.
- [10] Easwaran G., Uster H., A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions, *IIE Transactions*, 42, 779–792, 2010.
- [11] “A Scarcity of Rare Metals is Hindering Green Technologies” erişim adresi: http://e360.yale.edu/feature/a_scarcity_of_rare_metals_is_hindering_green_technologies/2711, erişim tarihi: 18 Kasım 2013.
- [12] Sahyouni K., Savaskan R.C., Daskin M.S., A Facility Location Model for Bidirectional Flows, *Transportation Science*, 41(4), 484–499, 2007.
- [13] Dauvergne P., Lister J., Big brand sustainability: Governance prospects and environmental limits, *Global Environmental Change*, 22(1), 36–45, 2012.
- [14] “Toyota Dünyanın En Çevreci Markası Seçildi” erişim adresi: http://www.toyota.com.tr/about/news_and_events/en-cevreci-marka.tmex.
- [15] “Best Global Green Brands” erişim adresi: <http://www.interbrand.com/en/best-global-brands/Best-Global-Green-Brands/2013/Best-Global-Green-Brands-2013.aspx>, erişim tarihi: 2014.
- [16] “Respect for the Planet-Toyota’s Environmental Initiatives” erişim adresi: http://www.toyota-global.com/sustainability/report/er/pdf/environmental_report13_fe.pdf, erişim tarihi: Ekim 2013.
- [17] Marin A., Pelegrin B., The return plant location problem: Modelling and resolution, *European Journal of Operational Research*, 104, 375-392, 1998.

- [18] Jayaraman V., Guide V., Srivastav R., A Closed-Loop Logistics Model for Remanufacturing , *Journal of the Operational Research Society*, 50, 497-508, 1999.
- [19] Fleischmann M., Beullens P., Bloemhof-Ruwaard J.M., and Wassenhove L., The impact of product recovery on logistics network design, *Production Operations Management*, 10, 156–173, 2001.
- [20] Krikke H., Bloemhof-Ruwaard J.M., Wassenhoves L., Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators, *International Journal of Production Research*, 41(16), 3689-3719, 2003.
- [21] Beamon B.M., Fernandes C., Supply-chain network configuration for product Recovery, *Production Planning & Control*, 15(3), 270–281, 2004.
- [22] Min H., Ko H.J., Ko C.S., A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns, *International Journal of Management Science (OMEGA)*, 34, 56-69, 2006.
- [23] Salema M.I.G.,Barbosa-Povoa A.P., Novais A.Q., A Warehouse-Based Design Model for Reverse Logistics, *Journal of The Operational Research Society*,57, 615-629, 2006.
- [24] Wang Z., Yao D.Q., Huang P., A new location-inventory policy with reverse logistics applied to B2C e-markets of China, *International Journal of production economics*, 107, 350-363, 2007.
- [25] Ko H.J., Evans G.W., A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs, *Computers & Operations Research* 34, 346–366, 2007.
- [26] Listes O.,A generic stochastic model for supply-and-return network design, *Computers & Operations Research*, 34, 417–442, 2007.
- [27] Lu Z., Bostel N., A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities, *Computers & Operations Research*, 34, 299–323, 2007.
- [28] Salema M.I.G., Barbosa-Povoa A.P., Novais A.Q., An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 179, 1063-1077, 2007.
- [29] Demirel N., Gökçen H., A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment, *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 39, 1197–1206, 2008.
- [30] Kusumastuti R.D., Piplani R., Lim G.H., Redesigning closed-loop service network at a computer manufacturer: A case study, *International Journal of Production Economics*, 111, 244–260, 2008.
- [31] Lee D.H., Dong M., A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery, *Transportation Research Part E*, 44, 455–474, 2008.
- [32] Salema M.I.G., Barbosa-Povoa A.P., Novais A.Q., A strategic and tactical model for closed-loop supply chains, *OR Spectrum*, 31, 573-599, 2009.
- [33] Pishvae M.S., Torabi S.A., A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty, *Fuzzy Sets and Systems* 161, 2668–2683, 2010.

- [34] Salema M.I.G., Barbosa-Povoa A.P., Novais A.Q., Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework, *European Journal of Operations Research*, 203, 336-349, 2010.
- [35] Wang H.F., Hsu H.W., A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm, *Computers & Operations Research*, 37, 376 – 389, 2010.
- [36] Lundin J.F., Redesigning a closed-loop supply chain exposed to risks, *International Journal of Production Economics*, 140, 596–603, 2012.
- [37] Amin S.H., Zhang G., A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return, *Applied Mathematical Modelling*, 37, 4165–4176, 2013.
- [38] Wei J., Zhao J., Reverse channel decisions for a fuzzy closed-loop supply chain, *Applied Mathematical Modelling*, 37, 1502–1513, 2013.
- [39] Fahimnia B., Sarkis J., Dehghanianc F., Banihashemi N., Rahman S., The impact of carbon pricing on a closed-loop supply chain: an Australian case study, *Journal of Cleaner Production*, 59, 210-225, 2013.
- [40] Ramezani M., Kimiagari A.M. , Karimi B., Hejazi T.H., Closed-loop supply chain network design under a fuzzy environment, *Knowledge-Based Systems*, 59, 108–120, 2014.
- [41] Özceylan E., Paksoy T., Bektas T., Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing, *Transportation Research Part E*, 61, 142–164, 2014.
- [42] Akcalı E., Çetinkaya S., Üster H., Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches, *Networks*, 53(3), 231-248, 2009.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAYA, Aycan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 15.03.1985 Sivas
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 530 289 57 14
e-mail : aycanpekpazar@hotmail.com

Eğitim Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	TOBB ETÜ/Endüstri Mühendisliği	2014
Lisans	Gazi Üniversitesi/Elektrik Elektronik Mühendisliği (Çift Anadal)	2009
Lisans	Gazi Üniversitesi/Endüstri Mühendisliği	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-	İTÜ	Araştırma Görevlisi
2011-2014	TÜBİTAK	Bilimsel Programlar Uzman Yardımcısı
2009-2011	Bilkent Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Bildiriler

Kaya A.P., Alumur S.A., Kapalı Döngü Tedarik Zinciri Ağı Tasarımı, Üretim Araştırmaları Sempozyumu 2014, İstanbul, Türkiye, Eylül 2014.