



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇEREN KAPALI ÇEVRİM TEDARİK ZİNCİRLERİNİN BULANIK ORTAMDA MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Eren ÖZCEYLAN

DOKTORA TEZİ

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2013
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DEMONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇEREN KAPALI ÇEVRİM TEDARİK ZİNCİRLERİNİN BULANIK ORTAMDA MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Eren ÖZCEYLAN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Turan PAKSOY

2013, 213 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Turan PAKSOY
Prof. Dr. Aşkıner GÜNGÖR
Prof. Dr. Ahmet ARSLAN
Prof. Dr. Ahmet PEKER
Yrd. Doç. Dr. Ahmet BABALIK

İleri tedarik zinciri (İTZ) sayesinde kullanıcılara ulaştırılan ürünlerin geri toplanması, yeniden işlenmesi, demonte edilmesi vb. işlemler tersine tedarik zinciri (TTZ) faaliyetleridir ve kullanılmış ürünlerin yeniden pazara sunumu bu faaliyetler ile gerçekleşir. Üretim ve dağıtım işlemlerinin gerçekleştirildiği ileri lojistik zincirine tersine lojistik faaliyetlerinin entegre edilmesi sonucu oluşan yapılar kapalı döngü tedarik zinciri (KDTZ) olarak bilinmektedir. Bu entegrasyonun başarılı olmasındaki kilit nokta, KDTZ'nin en önemli süreçlerinden biri olan demontaj ve hat dengeleme faaliyetlerine bağlıdır. Fakat tersine lojistik veya KDTZ ağlarının tasarımı, ileri lojistik ağlarına göre daha karmaşıktır. Ürünlerin müşterilere ulaştırılmasına ek olarak, hangi ürünlerin hangi müşterilerden ne miktarda toplanacağının belirlenmesi, toplama, geri dönüşüm veya benzeri merkezlerin nerelerde konumlandırılacağı, üründeki deformasyon oranının neye göre sınıflandırılacağı gibi kararlar ve bu kararların tamamının belirsizliklere bağlı olması tasarım aşamasını oldukça zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada sırasıyla tersine lojistik ve KDTZ ağ tasarımı problemleri ile demontaj hattı dengeleme (DHD) problemleri entegre edilmiş; talep, kapasite, geri dönüşüm oranları ve amaç fonksiyonu katsayılarının belirsiz olduğu entegre modeller bulanık programlama yoluyla modellenmiştir. Önerilen modeller hipotetik verilere dayalı sayısal örnekler yardımıyla GAMS paket programında çözülmüş ve elde edilen sonuçlar senaryo analizleri aracılığıyla yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: bulanık matematiksel programlama, demontaj hattı dengeleme, kapalı döngü tedarik zinciri, tersine tedarik zinciri.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

MODELING AND OPTIMIZATION OF THE INTEGRATED PROBLEM OF CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN AND DISASSEMBLY LINE BALANCING UNDER FUZZY ENVIRONMENT

Eren ÖZCEYLAN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY

DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN COMPUTER ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Turan PAKSOY

2013, 213 Pages

Jury
Assoc. Prof. Dr. Turan PAKSOY
Prof. Dr. Aşkıner GÜNGÖR
Prof. Dr. Ahmet ARSLAN
Prof. Dr. Ahmet PEKER
Assist. Prof. Dr. Ahmet BABALIK

Collection, refurbishment and disassembly of out of use products are typical activities of reverse supply chain (RSC). On the other hand, the forward supply chain (FSC) involves mostly production and distribution activities. The integration of RSC and FSC results in a rather complex structure called as closed-loop supply chain (CLSC). The success of this integration is related to disassembly and disassembly line balancing activities, which are respected as most important processes of the CLSC. However, the RSC or CLSC network design problems are more complicated than problems associated with FSC networks. Complications are related to the determination of customers from whom end of life products are collected, calculating the amount of products to be collected, identifying the number of collection, recycling and etc. centers, determination of the locations of those facilities, and optimizing the product flow among these facilities. Complications are further enhanced due to uncertainty issues throughout the supply chain. In this thesis, disassembly line balancing (DLB) problem is integrated into the RSC and CLSC network design problems. The integrated models containing fuzzy cost coefficients, demands, capacities and recycling rates are developed using fuzzy programming approaches. Proposed models are solved in GAMS package solver using some numerical examples. The results are discussed with different scenario analyses.

Keywords: closed-loop supply chain, disassembly line balancing, fuzzy mathematical programming, reverse supply chain.

ÖNSÖZ

Doktora eğitimim süresince değerli katkılarını ve desteklerini esirgemeyen, tezimin planlanmasından hazırlanmasına kadar her aşamasında yanımda olan danışman hocam Doç. Dr. Turan PAKSOY'a; yine tezimin son halini almasında yardımlarını esirgemeyen ve mümkün olduğu sürece bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan tez izleme komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. Aşkıner GÜNGÖR ve Prof. Dr. Ahmet ARSLAN'a; akademik desteklerinden dolayı Doç. Dr. Tolga BEKTAŞ'a; lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve emeklerini esirgemeyen Selçuk Üniversitesi Endüstri ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü sayın hocalarıma ve meslektaşlarıma; doktora eğitimim süresince maddi destek sağlayan TÜBİTAK–BİDEB programına teşekkür ederim.

Son olarak, koşulsuz sevgisini ve manevi desteğini esirgemeyen, bana olan sonsuz inancından dolayı sevgili eşim Ayca ÖZCEYLAN'a minnettarlığımı belirtirim.

Eren ÖZCEYLAN
KONYA-2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
ÖNSÖZ ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **12**
2.1. Tersine ve Kapalı Döngü Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı Problemlerine İlişkin Literatür Taraması 12
2.2. Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı Problemlerine Bulanık Matematiksel Programlama Yaklaşımları 19
2.3. Demontaj Hattı Dengeleme Problemine İlişkin Literatür Taraması 26

3. MATERYAL VE YÖNTEM **30**
3.1. İncelenen Problemler 30
3.1.1. Tersine ve KDTZ ağ tasarımı problemleri 30
3.1.2. Demontaj hattı dengeleme problemi 47
3.2. Geliştirilen Matematiksel Modeller 65
3.2.1. Kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı 66
3.2.1.1. Model 1: Kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli 66
3.2.1.2. Model 2: Kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımına çok amaçlı bulanık programlama yaklaşımı 71
3.2.1.2.1. Liang ve Cheng bulanık yaklaşımı 77
3.2.2. Tersine tedarik zinciri ve demontaj hattı dengeleme problemi entegrasyonu 80
3.2.2.1. Model 3: Demontaj hattı dengeleme problemi içeren tersine tedarik zinciri ağ tasarımı modeli 81
3.2.2.2. Model 4: Demontaj hattı dengeleme problemi içeren tersine tedarik zinciri ağ tasarımına bulanık matematiksel programlama yaklaşımları 86
3.2.2.2.1. Maks-min operatörlü bulanık model 88

3.2.2.2.2. Min ve maks operatörlerinin konveks kombinasyonlu bulanık model 89
3.2.2.2.3. Bulanık-ve operatörlü bulanık model 90
3.2.2.2.4. Werners yaklaşımlı bulanık model 91
3.2.3. Kapalı döngü tedarik zinciri ve demontaj hattı dengeleme problemi entegrasyonu 92
3.2.3.1. Model 5: Demontaj hattı dengeleme problemi içeren kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı modeli 92
3.2.3.2. Model 6: Demontaj hattı dengeleme problemi içeren kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımına etkileşim bulanık programlama yaklaşımları 99
3.2.3.2.1. Bulanık çok amaçlı modelin durulaştırılması 102
3.2.3.2.1.1. Bulanık amaç fonksiyonlarının durulaştırılması 103
3.2.3.2.1.2. Ağırlıklı ortalama yöntemine göre bulanık kısıtların durulaştırılması 104
3.2.3.2.1.3. Melez yönteme göre bulanık kısıtların durulaştırılması .. 105
3.2.3.2.2. Etkileşimli bulanık çok amaçlı programlama yaklaşımlarının uygulanması 107

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 111
4.1. Model 1'e Ait Sayısal Örnek 111
4.1.1. Model 1'e ait senaryo analizleri 116
4.1.1.1. Talep değişimlerinin etkisi 116
4.1.1.2. Ürün toplama oranlarının etkisi 117
4.1.1.3. Fabrika ve perakendeci kapasitelerinin etkisi 118
4.1.1.4. Geri dönüşüme ait oranların etkisi 119
4.1.1.5. Problem (ağ) boyutunun etkisi 120
4.2. Model 2'ye Ait Sayısal Örnek 123
4.2.1. Model 2'ye ait senaryo analizleri 125
4.2.1.1. Farklı α değerlerinin etkisi 126
4.2.1.2. Kötümser ve iyimser değerlerin aralıklarının etkisi 127
4.3. Model 3'e Ait Sayısal Örnek 129
4.3.1. Model 3'e ait senaryo analizleri 135
4.3.1.1. Talep değişimlerinin etkisi 135

4.3.1.2. Çalışma zamanının etkisi 138
4.4. Model 4'e Ait Sayısal Örnek 140
4.4.1. Uygulanan yaklaşımların karşılaştırılması 142
4.5. Model 5'e Ait Sayısal Örnek 144
4.5.1. Model 5'e ait senaryo analizleri 153
4.5.1.1. Talep değişimlerinin etkisi 153
4.5.1.2. Vardiya süresinin etkisi 155
4.5.1.3. Satın alma/yenileme maliyeti oranının etkisi 156
4.5.1.4. Geri dönüşüm oranlarının etkisi 158
4.5.1.5. Toplama ve yenileme merkezleri kapasitelerinin etkisi 159
4.5.1.6. Ürün karmaşıklığının etkisi 161
4.5.1.7. Geri dönen ürün kalitesinin etkisi 163
4.5.1.8. Demontaj merkezleri kapasitelerinin etkisi 165
4.6. Model 6'ya Ait Sayısal Örnek 166
4.6.1. Model 6'ya ait senaryo analizleri 171
4.6.1.1. γ değerinin etkisi 171
4.6.1.2. α değerinin etkisi 174

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **177**
5.1. Sonuçlar 178
5.2. Öneriler 184

KAYNAKLAR **185**
EKLER **198**
ÖZGEÇMİŞ **202**

KISALTMALAR

ADTZ	**A**çık **D**öngü **T**edarik **Z**inciri
AEEE	**A**tık **E**lektrikli ve **E**lektronik **E**şyalar
BMP	**B**ulanık **M**atematiksel **P**rogramlama
ÇABP	**Ç**ok **A**maçlı **B**ulanık **P**rogramlama
ÇŞB	**Ç**evre ve **Ş**ehircilik **B**akanlığı
DHD	**D**emontaj **H**attı **D**engeleme
DVVD	**D**önüştürülmüş **V**E/**V**EYA **D**iyagramı
EEA	**E**uropean **E**nvironmental **A**gency
İTZ	**İ**leri **T**edarik **Z**inciri
KDTZ	**K**apalı **D**öngü **T**edarik **Z**inciri
KTDP	**K**arma **T**amsayılı **D**oğrusal **P**rogramlama
KTDOP	**K**arma **T**amsayılı **D**oğrusal **O**lmayan **P**rogramlama
TP	**T**amsayılı **P**rogramlama
TTZ	**T**ersine **T**edarik **Z**inciri
TZY	**T**edarik **Z**inciri **Y**önetimi
USO	**U**luslararası **S**tandart **O**rganizasyonu
YDA	**Y**aşam **D**öngü **A**nalizi

1. GİRİŞ

Bir tedarik zinciri, birçok aktörün (tedarikçiler, üreticiler, dağıtıcılar ve satıcılar), hammaddeleri elde etmek, bu hammaddeleri son ürünlere çevirmek ve bu son ürünleri de nihai kullanıcılara ulaştırmak için birlikte çalıştığı entegre bir süreçtir (Beamon, 2008). Başka bir ifadeyle, bir tedarik zinciri, malzemelerin temini fonksiyonunu yerine getiren, bu malzemeleri ara ve bitmiş ürünlere dönüştüren ve müşterilere bu bitmiş ürünlerin dağıtımını yapan tesislerin ve dağıtım seçeneklerinin bir şebekesidir (Güleş ve ark. 2012). Yukarıdaki tanımlardan da anlaşılacağı gibi ağ yapılarında farklı aktörler yer alsa bile (perakendeci, dağıtım merkezi, depo vb.) son on yıla kadar tedarik zincirlerindeki son aktörlerin çoğunlukla nihai kullanıcılar olduğu gözükmektedir. Bu tarz yapılar, yani akış yönünün hammadde kaynağından nihai kullanıcılara doğru olduğu yapılar, ileri tedarik zinciri (İTZ) olarak adlandırılır (Salema ve ark. 2009).

Uzun yıllar, tedarik zinciri yönetimi (TZY), ileriye doğru olan faaliyetlerle ilgilenmiştir. Fakat günümüz dünyasında artan çevre sorunları, müşterilerin geri dönüşüm konusunda bilinçlenmeleri ve yasal düzenlemeler, şirketleri baskı altına almaya başlamış ve üzerlerine çevrenin yanı sıra sosyal bir sorumluluk da yüklemiştir. Bu gelişmeler, tersine lojistik, ürün geri kazanım seçenekleri ve tersine tedarik zinciri (TTZ) yönetimi gibi kavramların ortaya çıkmasına yol açmıştır. İşte bu yüzden son yıllarda şirketler, tersine lojistik konusuna eğilerek diğer şirketlere göre maliyet ve rekabet avantajı yaratmayı düşünmüşlerdir (Wang ve Hsu, 2010a). Bu düşüncenin hayata geçirilebilmesi için mevcut İTZ yapıları yetersiz kaldığından, bu yapıların ürün geri dönüşümlerini de içerecek şekilde genişletilmesi kaçınılmazdır.

Tedarik zinciri yapılarına yeniden kullanım, tamir, yenileme veya demontaj gibi geri dönüşüm faaliyetlerinin entegre edilmiş yeni halleri TTZ ve kapalı döngü tedarik zinciri (KDTZ) olmak üzere iki farklı yapıda karşımıza çıkmaktadır (Yang ve ark. 2009; Easwaran ve Üster, 2010). TTZ ağlarında müşterilerden veya nihai kullanıcılardan toplanan kullanılmış ürünlerin tersine akışı söz konusu iken; KDTZ, hem ileri hem de tersine akışın gerçekleştiği bütünleşik ağ yapılarıdır. KDTZ ağlarında, ürünlerin sadece üreticiden tüketiciye (montaj süreci) giden doğrusal bir yol izlemesi değil, tüketiciden üreticiye doğru olan bir yolu da (demontaj süreci) kat ederek, döngüyü tamamlaması söz konusudur (Wang ve Hsu, 2010a; Paksoy ve ark. 2011). Dolayısıyla, TTZ ve KDTZ'lerin hammadde kaynağı İTZ'lerde olduğu gibi tedarikçiler değil, aksine nihai kullanıcılar veya müşterilerdir (Jayaraman ve ark. 1999). Van Nunen ve Zuidwijk

(2004) ve Prahinski ve Kocabaşoğlu (2006)'na göre TTZ ve KDTZ ağlarının önem kazanmasındaki temel nedenler aşağıda verilmiştir (Mondragon ve ark. 2011):

- Yüksek orandaki ürün geri dönüş miktarları,
- Geri dönen ürünlerin ikincil pazarlarda satış imkanı,
- Geri dönüşüm ve çevreye duyarlı yaklaşımların benimsenmesi,
- Yaşam döngüsü bitmiş ürünlerin yeniden değerlendirilmesinin yasal yollarla benimsetilmesi,
- Yeniden paketleme, yeniden üretim ve geri dönüşüm içeren alternatiflerin ortaya çıkması,
- Geri dönüşüm konusundaki müşteri bilincinin sürekli artması.

Yukarıda verilen temel sebeplerin en önemlisi birinci madde olan yüksek orandaki ürün geri dönüş miktarlarıdır. Çünkü özellikle elektronik sektöründeki teknolojik hızlı değişimler, kullanıcıların kullandıkları ürünleri sıklıkla değiştirmesine neden olmaktadır. Ürün geri dönüş oranlarının artmasına yol açan diğer önemli faktörler aşağıda verilmiştir (De Brito ve Dekker, 2002; Nakıboğlu, 2007):

Üretici Dönüşleri

- Ürünün hammadde fazlası olması,
- Ürünün kalite kontrolde başarısız olması,
- Üretim fazlası olması.

Dağıtıcı Dönüşleri

- Yanlış veya hasarlı teslimat yapılması,
- Kullanım süresi geçmiş ürünler,
- Stok fazlası/satılmamış ürünler,
- Mevsimsel dalgalanmalar, stok ayarlamaları.

Müşteri Dönüşleri

- Garanti kapsamındaki dönüşler,
- Ürünlerin tamir edilerek yeniden kullanılması,
- Değer kazanımı (hurda değeri ve diğer kazanım seçeneklerini değerlendirme),

- Kullanım sonu dönüşleri (ikinci el olarak satılması),
- Yaşam sonu dönüşleri,
- Zararlı materyaller ile ilgili yasal düzenlemeler,
- Ürünün hasarlı olması veya kullanıcının ürünün hasarlı/hatalı olduğunu düşünmesi.

Fonksiyonel Dönüşler

- Paketleme materyalleri, konteynır, palet, paket, kutu gibi ürünlerin yeniden kullanılabilir olması,
- Üründeki hata, güvenlik veya sağlık problemleri ile üreticinin ürünü geri çağırması.

Bahsedilen sebepler sonucunda ürün geri dönüşüm sistemlerini mevcut tedarik zinciri yapılarına entegre eden işletmeler aşağıda verilen fırsatlara ön ayak olabilirler (Pochampally ve ark. 2009):

Doğal kaynakların tasarrufu: Ürün imalatı sırasında sıfır hammaddelerin yerine ürün geri dönüşlerinden elde edilen kullanılabilir hammadde veya parçaların üretime dahil edilmesi mevcut doğal kaynakların da korunmasına yardımcı olur.

Enerji tasarrufu: Kullanılmış ürünlerden yeni ürün imal etmek, sıfırdan yeni ürün imal etmeye göre daha az miktarda enerji tüketir.

Temiz hava ve su tasarrufu: Sıfırdan yeni ürün imal etmek yerine, kullanılmış ürünlerden yeni ürün imal etmek daha az miktarda su tüketimine neden olurken, yine daha az miktarda doğaya CO_2 salınmasına sebep olur.

Atık alanlarından tasarruf: Kullanılmış ürünlerin yeniden üretim süreçlerine dahil edilmesi, atık alanlarından ciddi oranda tasarruf sağlanmasına neden olur.

Ekonomik tasarruf: Kullanılmış ürünlerden yeni ürün üretmek, sıfırdan yeni ürün üretmeye göre daha az maliyetle gerçekleşebilir.

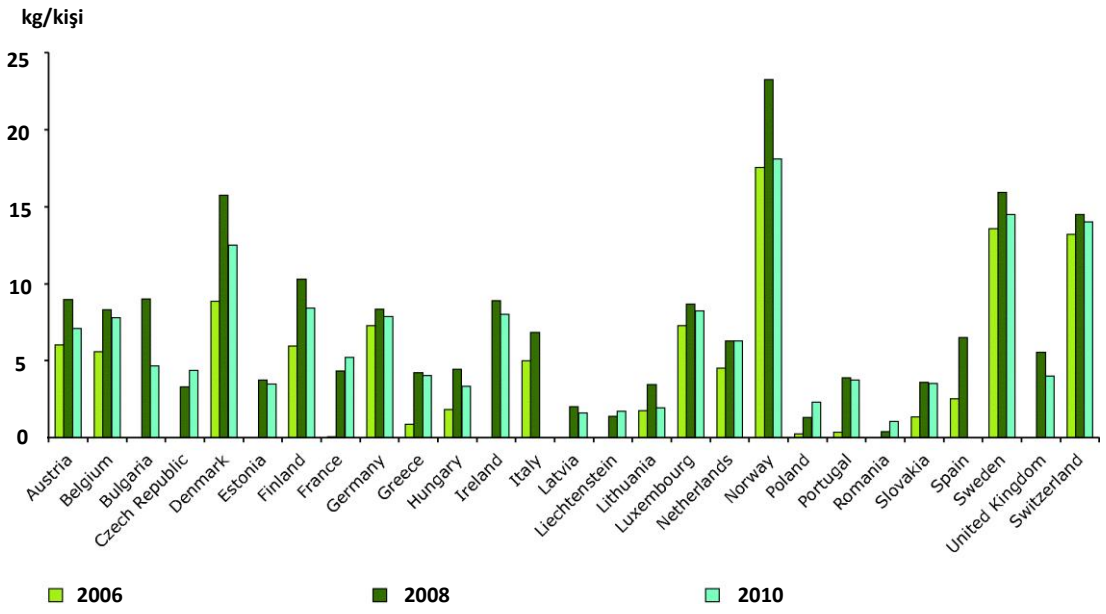
Yukarıda verilen bilgiler ışığında, TTZ ve KDTZ ağ yapılarının, işletmelerin rekabet güçlerini ve müşteri memnuniyet seviyelerini artırdığı ve üretim maliyetlerini ise düşürdüğü söylenebilir (Demirel ve Gökçen, 2008a). Zaten bu faydaların reel sektördeki Dell, HP, Kodak, GM ve Xerox gibi çeşitli firmalar tarafından yıllardır sağlandığı bir gerçektir (Easwaran ve Üster, 2010; Akçalı ve Çetinkaya, 2011). Kodak ve Xerox topladıkları kullanılmış ürünleri yeniden üretmekte ve bu ürünleri yeniden satmak için ikincil pazarlara sürmektedir. Örneğin Xerox tek kullanımlık fotoğraf makinalarının yeniden üretiminden son 5 yılda yaklaşık olarak 200 milyon dolar tasarruf etmiştir (Vishwa ve ark. 2010). Başka bir örneğe göre Kodak, kullanılmış bir kameranın ortalama olarak %76'sını yeni bir fotoğraf makinası üretiminde kullanmaktadır (Savaşkan ve ark. 2004). Almanya'da 1991 yılında yürürlüğe giren yönetmeliğe göre firmalar sattıkları ürünlere ait paketlerin en az %60-75'ini geri dönüştürmek zorundadırlar. Hollanda'da ise trafik kazalarında zarar görmüş otomobillerin %90'ının geri kazanımını sağlayacak ulusal bir sistem başarıyla uygulanmaktadır. ABD'de camın %20'si, kağıt ürünlerinin %30'u ve alüminyum kutuların %61'i geri dönüştürülürken; 10 milyon araba ve kamyonun her yıl %95'i geri dönüşüme girmekte ve bu araçların %75'i yeniden kullanım için geri kazandırılabilmektedir (Demirel ve Gökçen, 2008a). Dell kullanılmış bilgisayarlardaki faydalı parçaları geri kazanmak için, "Recycling your Dell" programını hayata geçirmiştir. Yapılan bir çalışmaya göre ise çamaşır makinesi, bilgisayar, telefon ve buzdolabı gibi ürünlerde %58 oranında yeniden kullanım ve yeniden imalat yapılabilmektedir. Bu oranlarda yapılan geri dönüşüm aktivitelerinin üretim maliyetlerini ciddi oranlarda düşürdüğü saptanmıştır (Altekin ve ark. 2008; Akçalı ve Çetinkaya, 2011).

Türkiye'de, tersine lojistik ağı kurarak ürettiği malları değerlendiren firma sayısı çok fazla değildir. Katı atık kontrolüyle ilgili yasa gereği ambalajlarında plastik, pet şişe, polietilen, polistiren malzeme kullanan üretici firmalar bunların en az %30'unu geri toplamak durumundadır. Bu bağlamda, plastik şişe üreten firmalar, üretici firmalar adına tersine lojistik faaliyetiyle ürünlerinin %30'unu geri toplamakta ve topladığının %70'ini de geri kazanmaktadır. Şişecam, ambalajlamada kullanılan şişelerin %30'unu kanunen geri toplamakta ve çeşitli işlemlerden geçirerek geri kazanmaktadır. Benzer şekilde Tetra Pak firması da lamine karton kutuları geri kazanmaktadır (Birdoğan, 2003). Türkiye'de, 18.05.2009 tarihi itibariyle 139 tane geri kazanım/bertaraf tesisi bulunmaktadır. Bu geri kazanım tesislerinin çoğu tehlikeli atıkların geri kazanımını

sağlamaktadır. Ayrıca, Türkiye'de akü/pil için 4, alüminyum için 2, ambalaj için 13, cam için 2, elektronik atık için 2, lastik için 1, plastik için 7, tekstil için 1 ve yağ için 3 olmak üzere 35 tane lisanslı geri dönüşüm tesisi bulunmaktadır. Türkiye'de, Sanayi ve Ticaret odaları bünyesinde atık borsaları kurulmuştur. Bu atık borsasının amacı; işletmelerde üretim sonucu ortaya çıkan atıkların geri kazanılmasını ve daha fazla ikincil hammadde olarak değerlendirilmesini; nihai bertaraf edilecek atıkların miktarını azaltarak, daha pahalı bertaraf giderlerinden tasarruf edilmesini sağlayan bir aracılık sistemidir (Kaçtıoğlu ve Şengül, 2010). Türkiye Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın çıkarmış olduğu Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların (AEEE) kontrolü yönetmeliğine göre kişi başına düşen elektronik ürün atık miktarı hedefi Çizelge 1.1'de ve karşılaştırma yapılabilmesi için Avrupa ülkelerinde kişi başına düşen AEEE atık miktarları da Şekil 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Kişi başına düşen evsel AEEE atık miktarı hedefi (ÇŞB, 2012)

Yıl	Toplama hedefi kg/kişi-yıl
2012	0.5
2013	1
2014	1.5
2016	2
2018	4



Şekil 1.1. 27 Avrupa ülkesinde 2006, 2008 ve 2010 yıllarına ait kişi başına düşen AEEE atık miktarı (EEA, 2012)

Çizelge 1.1'e göre 2012 yılında Türkiye'de kişi başı 0.5 kg evsel AEEE toplanmıştır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı bu miktarın her yıl kademeli olarak artarak 2018 yılında kişi başı 4 kg olması konusunda bir hedef belirlemiştir. Türkiye'nin 2018 hedefinin bile Avrupa'daki 27 ülkenin 2010 yılındaki gerçekleşmiş kişi başı atık miktarının çok altında olduğu Şekil 1.1'den açıkça görülmektedir. Türkiye'nin belirlemiş olduğu 2018 hedefi sadece Letonya, Litvanya, Lihtenştayn, Polonya ve Romanya'nın 2010 yılındaki gerçekleşmiş değerlerinden fazladır. Avrupa ülkelerinde, yıllar arttıkça toplanan atık miktarının da arttığı gözükse de ekonomik kriz dolayısıyla 2006 yılındaki atık miktarının 2008 yılı miktarından fazla olduğu anlaşılmaktadır. Kişi başına düşen en fazla AEEE atık miktarı ise refah seviyesi oldukça yüksek olan İskandinav ülkelerinde (Norveç, Danimarka, İsveç) gerçekleşmiştir.

Çizelge 1.2. Yeniden kullanım ve geri dönüşüm hedefleri (ÇŞB, 2012)

Elektrikli ve Elektronik Eşya Kategorileri	**Yıllar**				
	2012	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**
	Ağırlıkça (%) olarak				
Büyük ev eşyaları	50	55	60	65	75
Küçük ev aletleri	10	20	30	40	50
Bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları	15	25	35	50	65
Tüketici ekipmanları	15	25	35	50	65
Işıklandırma cihaz ve aletleri	10	20	30	40	50
Gaz deşarj lambaları	50	55	60	70	80
Elektrikli ve elektronik aletler	10	20	30	40	50
Oyuncaklar, eğlence, spor aletleri	10	20	30	40	50
Tıbbî cihazlar	---	---	---	---	---
İzleme ve kontrol cihaz ve aletleri	10	20	30	40	50
Otomatlar	50	55	60	65	75

Çizelge 1.3. Geri kazanım hedefleri (ÇŞB, 2012)

Elektrikli ve Elektronik Eşya Kategorileri	**Yıllar**				
	2012	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**
	Ağırlıkça (%) olarak				
Büyük ev eşyaları	60	65	70	75	80
Küçük ev aletleri	20	30	40	55	70
Bilişim ve telekomünikasyon ekipmanları	20	30	45	60	75
Tüketici ekipmanları	20	30	45	60	75
Işıklandırma cihaz ve aletleri	10	20	30	50	70
Gaz deşarj lambaları	50	55	60	70	80
Elektrikli ve elektronik aletler	10	20	30	50	70
Oyuncaklar, eğlence, spor aletleri	10	20	30	50	70
Tıbbî cihazlar	---	---	---	---	---
İzleme ve kontrol aletleri	10	20	30	50	70
Otomatlar	50	55	60	70	80

Çizelge 1.2 ve 1.3, Türkiye'deki AEEE yönetmeliğince belirlenmiş olan yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım hedeflerini göstermektedir. Buna göre elektrikli ve elektronik eşyaların 2012 yılında %10-50 arası olan yeniden kullanım ve geri dönüşüm hedefleri, 2016 yılında %50-80'e çıkarılmıştır. Yine aynı şekilde geri kazanım hedefleri yani tamamıyla demonte edilip yeni ürün imalatında kullanım oranları %10-60 aralığından %70-80 aralığına yükseltilmiştir. Bu göstergeler ve belirlenen hedefler doğrultusunda işletmelerin farklı geri dönüşüm faaliyetlerini içerecek TTZ/KDTZ ağları kurmaları kaçınılmaz bir gerçektir.

Das (2012), stratejik bir karar olan TTZ/KDTZ ağ tasarımlarının başarılı olabilmesi için dikkat edilmesi gereken kararları aşağıda sıralamıştır:

- Hangi ağ yapısının (tersine, kapalı) kurulacağının karar verilmesi,
- Karar verilen ağ yapısındaki ürün cinsine ve diğer faktörlere bağlı olarak hangi tesislerin (toplama merkezi, yenileme merkezi, demontaj merkezi vb.) ağda yer alacağına karar verilmesi,
- Açılacak tesislerde toplanacak ürünlere hangi geri dönüşüm işlem(ler)inin (yenileme, tamir, demontaj, yeniden üretim vb.) uygulanacağına karar verilmesi,
- Nihai kullanıcılardan geri dönebilecek ürün ve bu ürünlerin ne kadarının geri kazandırılabileceği konusunda tahmin yürütülmesi,
- Geri dönüşüm sonucunda ortaya çıkan ürün veya parçaların tekrardan pazara nasıl sunulacağının karar verilmesi.

Yukarıda verilen kararların en iyi şekilde gerçekleştirilebilmesi, zincirdeki temel iş adımlarının entegre bir şekilde yürütülmesine bağlıdır. TTZ ve KDTZ ağ yapılarında bu temel iş adımları genel olarak satın alma, taşıma, geri dönüşüm ve dağıtım (hem ileri hem tersine) kararlarından meydana gelir (Paksoy ve ark. 2011). Özellikle KDTZ ağlarında ileri ve tersine ağların etkileşimli ve entegre çalışması geri dönüşüm aşamasına bağlıdır. Geri dönüşüm aşamasının en kilit noktası ise demontaj faaliyetidir.

Demontaj; bir ürünün kendisini oluşturan parçalara sistematik bir şekilde ayrılması, başka bir deyişle tersine montaj olarak tanımlanırken; DHD problemi, demontaj görevlerini sıralı bir istasyon dizisine atarken görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin sağlanması ve bir etkinlik ölçütünün optimize edilmesi olarak tanımlanmaktadır (Güngör ve Gupta, 1999a; Ding ve ark. 2010; Ilgın ve Gupta, 2010).

Literatürde, ilk olarak 2000'li yılların başında dile getirilen DHD kavramı ile ilgili yapılan çalışmalar sadece hat tasarlama ve çizelgeleme alanında yoğunlaşmıştır. Oysaki demontaj, ürünlerin yaşam sürelerini doğrudan etkilediği için KDTZ'lerin tasarımlarında da dikkate alınması gereken bir kavramdır. Çünkü KDTZ'lerdeki en büyük problemlerden biri kullanıcılardan toplanan ürünlerin nasıl sınıflandırılacağının ve ayrıştırılma sonucu alt parçaların durumlarının nicelik ve nitelik olarak belirsizliğidir. Burada amaç ürünleri mümkünse bakımdan geçirip tekrar kullanıma sokmak, mümkün değilse yeniden üretim yoluyla üretmektir. Ürünlerin bu iki yolla tekrar kullanımı veya üretim zincirlerine yollanma imkanı yok ise, sökülen parça ve komponentlerden iyi durumda olanlar yedek parça olarak veya ikincil başka pazarlara gönderilmek üzere üretim zincirine sokulmaktadır. Bütün bu yollarla değerlendirilemeyen parça ve komponentlerden, çevreye zararlı olanlar bertaraf edilmek üzere özel tesislere gönderilirken geri kalanlar atık olarak sistemden çıkarılmaktadır (Altekin ve ark. 2008; Demirel ve Gökçen, 2008a).

Yukarıdaki faaliyetlerin doğru planlanması (demontaj hatları) geri dönüşüm sistemini besleyen zincir ile bu faaliyetlerin eş zamanlı olarak ele alınmasına bağlıdır. Bu sayede, demontaj planlamasının yapıldığı DHD ile TTZ/KDTZ ağlarının entegrasyonu ile ağın izlenebilirliği, çevikliği, rekabetçiliği ve en önemlisi kontrol edilebilirliği artacaktır.

Taktiksel seviyedeki DHD probleminin stratejik bir seviyedeki TTZ/KDTZ ağ tasarımı problemi ile eş zamanlı olarak ele alınması sorgulanabilir. Bu tez, bu çabanın aslında değerli olduğunu göstermek adına ortaya çıkmıştır. Özellikle, iki problemin tek bir formülasyonda ifade edilip, analiz edilmesi sonucunda farklı parametre değerlerinin tüm sistem üzerindeki etkisinin ölçülmesi bu çalışmanın temelini ve motivasyonunu oluşturmaktadır (benzer entegrasyonlar için Salema ve ark. (2009); Paksoy ve ark. (2012a) ve Paksoy ve Özceylan (2012)'ye göz atılabilir). Bu çalışmanın olası bir diğer katkısı ise birbirleri ile çelişkili olabilecek farklı karar yapılarının uzlaşık bir çözüme kavuşmasının sağlanmasıdır. Örneğin, KDTZ ağ tasarımındaki en önemli karar yapılarından biri sıfır hammadde satın alma maliyetinin minimize edilmesidir. Bu maliyet minimizasyonu geri dönüşümden elde edilebilecek kullanılmış parça veya hammadde ile sağlanabilir. Bu durum da demonte edilmesi gereken kullanılmış ürün sayısının artması manasına gelir ki, diğer taraftan istenmeyen bir durum olan demontaj hattındaki istasyon sayısının artmasına sebep olunur. Tam tersi bir durumda, yani demontaj hatlarındaki istasyon sayılarının düşürülmesi geri dönüşümden sağlanabilecek

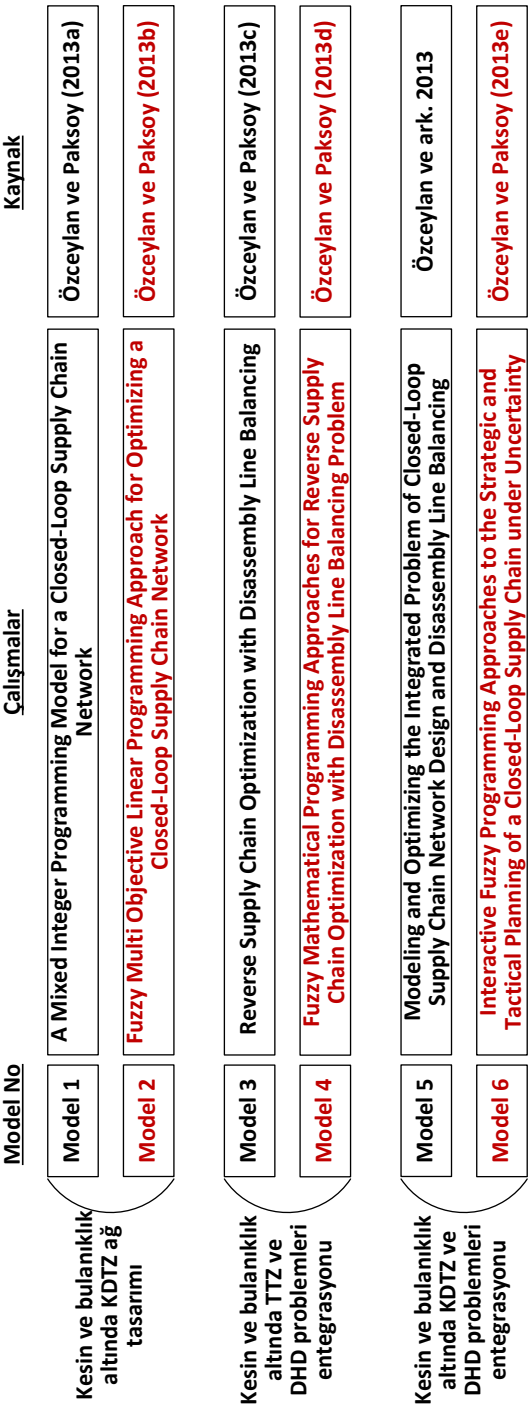
olan muhtemel kazançların da önüne geçecektir. İki problemin tek bir formülasyonda ifade edilmesi yukarıda bahsedilen probleme ödünleşik bir çözüm sunacaktır (Pagell ve ark. 2007).

Gerek KDTZ ağ tasarımı problemi, gerekse DHD probleminde en büyük sorun, ürün geri dönüşümlerinden, maliyetlerden, taleplerden, birbirleri ile çelişkili amaç fonksiyonlarından veya diğer sistem parametrelerinden kaynaklı belirsizliktir. Bundan dolayı, belirsizlik her iki problem yapısının en temel karakteristik özelliği olarak kabul görmüştür (Zarandi ve ark. 2011). Literatürde gerçek hayattaki belirsizlikleri yansıtmak için stokastik ve bulanık programlama olmak üzere iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Belirsizliklerin stokastik programlama yaklaşımı ile ele alındığı TTZ/KDTZ ağ tasarımı çalışmaları olsa da (Chouinard ve ark. 2008; Kara ve Önüt, 2010; Ramezani ve ark. 2013), stokastik programlamanın geçmiş verilere ihtiyaç duymasından dolayı bu uygulamaların sayısı oldukça azdır. Geçmiş veri elde etmenin TTZ/KDTZ ağ tasarımı problemlerinde zor olduğu düşünülürse, belirsizlikleri ele almak için bulanık programlamanın stokastik programlamaya göre daha uygun olduğu aşikardır (Wei ve Zhao, 2013).

Bu tez çalışmasının amacı, sırasıyla TTZ ve KDTZ ağ tasarımı problemleri ile DHD problemi entegrasyonun kesin ve bulanık parametreler altında analiz edilmesidir. Bunun için birbirinden farklı 6 matematiksel model geliştirilmiştir. 6 matematiksel model birbirini takip eden 3 ana kısımdan oluşmaktadır: (i) kesin ve bulanık parametreler altında KDTZ ağ tasarımı, (ii) kesin ve bulanık parametreler altında TTZ ağ tasarımı ve DHD problemleri entegrasyonu ve son olarak (iii) kesin ve bulanık parametreler altında KDTZ ağ tasarımı ve DHD problemleri entegrasyonudur. Tez çalışmasının ana kısmını oluşturan bu 6 matematiksel model, kaynakçaları ile beraber Şekil 1.2'de verilmiştir. Şekil 1.2'de kırmızı olarak ifade edilen çalışmalar bulanıktır.

Birinci modelde tezin zeminini oluşturması ve konunun daha iyi anlaşılabilmesi adına bir adet KDTZ ağ tasarımı problemi geliştirilmiş ve çözüm yöntemi olarak KTDP modeli önerilmiştir. İkinci modelde, KDTZ ağındaki ürün geri dönüşümlerinden ve karar vericilerin amaçlarından kaynaklanan belirsizliklerin dikkate alınması için birinci modele ÇABP yaklaşımı uygulanmıştır. Üçüncü modelde gerek DHD probleminin uygulanabilirliğinin gösterilmesi gerekse nihai modellere (Model 5 ve 6) temel oluşturması adına TTZ ağ tasarımı ve DHD problemleri entegre edilmiş, ortaya çıkan bu yeni problem için KTDOP modeli geliştirilmiştir. Dördüncü modelde ise, hem TTZ hem de DHD problemlerinin yapısında mevcut olan belirsiz durumların yansıtılması adına

üçüncü modelde önerilen entegre model BMP yaklaşımı ile yeniden ele alınmıştır. Beşinci modelde, bir önceki entegre modelin daha gerçekçi ve komplike hali olan KDTZ ağ tasarımı ve DHD problemleri entegre edilmiş; son modelde ise farklı etkileşimli BMP yaklaşımları, tüm parametrelerin bulanık olarak ele alındığı KDTZ ve DHD entegrasyonuna uygulanmıştır.



Şekil 1.2. Tez kapsamında geliştirilen matematiksel modeller ve ilişkileri

Bu tez çalışmasının literatüre ve pratiğe katkıları şu şekilde verilebilir: (i) DHD probleminin hem TTZ hem de KDTZ ağ tasarımı optimizasyonu problemlerine entegre edilebilirliğinin gösterilmesi, (ii) birbirleri ile ödünleşen farklı performans göstergelerinin (satın alma, geri dönüşüm, istasyon açma vb.) detaylı bir şekilde analiz edilmesi, (iii) makro ve mikro planlama kapsamında ağ arasındaki taşıma miktarlarının, satın alma faaliyetlerinin, geri dönüşüm faaliyetlerinin ve hat dengeleme işlemlerinin tek bir formülasyonda esnek bir şekilde kontrol edilebilmesi, (iv) yukarıdaki tüm maddelerin hem kesin hem de bulanık parametreler altında karar vericilere yönetimsel bakış açısı getirecek şekilde analiz edilmesi.

Tezin giriş niteliğindeki birinci bölümünün ardından, ikinci bölümde tersine/KDTZ ağ tasarımı problemine, DHD problemine ve BMP uygulamalarına ilişkin detaylı bir literatür taraması verilmiştir. Üçüncü bölümde tezin ana problemlerini içeren tersine/KDTZ ağ tasarımı ve DHD problemleri ayrı ayrı detaylı bir şekilde açıklanmış ve tez kapsamında geliştirilen 6 farklı matematiksel model formülasyonları ile beraber sunulmuştur. Dördüncü bölümde, geliştirilen her bir matematiksel model sayısal örnekler ile test edilmiş ve senaryo analizleri yardımıyla sonuçlar yorumlanmıştır. Sonuç ve öneriler kısmı ile de tez sonlandırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde 3 kısımdan oluşan detaylı bir literatür taraması sunulmuştur. İlk olarak TTZ ve KDTZ ağ tasarımı problemlerine, ikinci olarak tedarik zinciri ağ tasarımı problemlerine uygulanmış BMP yaklaşımlarına son olarak da DHD problemine ilişkin literatürdeki çalışmalara yer verilmiştir.

2.1. Tersine ve Kapalı Döngü Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı Problemlerine İlişkin Literatür Taraması

İTZ ağ tasarımına ilişkin literatürde çok fazla sayıda çalışma olmasına rağmen (Mula ve ark. 2010), son 10 yılda geri dönüşümün popülerlik kazanması gerek TTZ gerekse KDTZ ağ tasarımına ilişkin akademik çalışmalarda ciddi bir artış göstermiştir. Bu bölümde verilecek çalışmalara ek olarak okuyucular Blumberg (2005), Pochampally ve ark. (2009) ve Gupta (2013) tarafından çıkarılan kitaplara, Fleischmann ve ark. (1997), Demirel ve Gökçen (2008b), Sasikumar ve Kannan (2008a; 2008b; 2009) ve Akçalı ve Çetinkaya (2011)'ya ait detaylı literatür taramalarına da göz atılabilir. Geliştirilen matematiksel modeller ile ilgili literatürdeki diğer çalışmalar aşağıda verilmiştir.

TTZ ve KDTZ ağlarına ilişkin kapsamlı ilk çalışmalar Fleischmann ve ark. (1997) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda lojistik faaliyetlerindeki geri dönüşüm konusuna ilişkin kantitatif modeller incelenmiş ve araştırmacılara genel bir çerçeve sunulmuştur. Sunulan çerçevede geri dönüşüm içeren ağ tasarımlarında dağıtım planlama (ileri ve ters yönde), stok kontrolü (sıfır ve kullanılmış ürün) ve üretim planlama (montaj ve demontaj) olmak üzere 3 ana başlığın yer alması gerektiği vurgulanmıştır. Bir sonraki çalışmasında Fleischmann ve ark. (2001) sanayiden gerçek bir uygulamayı ele almışlar, ileri ve tersine zincirlerin entegre edildiği fotokopi makinası yeniden üretimi ve kağıt geri dönüşümü konularını çalışmışlardır. Çalışmaları, ileri ve tersine zincirlerin entegre edilmesinin sıralı olarak ele alınmasına göre ciddi oranda maliyet avantajı sağladığını göstermiştir.

Jayaraman ve ark. (1999) çalışmalarında dağıtım, tesis açma ve yeniden üretim kararlarının yer aldığı bir KDTZ modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model 0-1 tamsayılı programlama (TP) şeklinde olup; tesis açma, taşıma, yeniden üretim ve stok maliyetlerini minimize etmektedir. Shih (2001), Tayvan'daki elektronik ve bilgisayar

ürünlerinin geri dönüşüm lojistik faaliyetleri için KTDP modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model toplam maliyeti (taşıma, operasyon, açma/kapama, atık ve geri dönüşüm) minimize etmeye çalışırken, geri dönüşümden elde edilen karı da maksimize etmeye çalışmaktadır. Ürünlerin dönüş oranlarına göre birtakım senaryo analizleri yapılıp, yorumlanmıştır.

Hu ve ark. (2002) çok dönemli ve çok ürünlü, zararlı atığın olduğu lojistik sistemler için maliyet minimizasyonlu bir model geliştirmişlerdir. Yasal düzenlemeler ve diğer kısıtlar altında zararlı ürün atıklarının azaltılması için kesikli/sürekli analitik yapıda bir model kurmuşlardır. Sistemdeki süreçler, atıkların toplanması, depolanması, işlenmesi ve dağıtılması olarak tanımlanmıştır. Geliştirilen model göstermiştir ki, bir takım operasyonel stratejiler dahilinde toplam geri dönüş lojistik maliyetleri %49 oranında azaltılabilmektedir. Schultmann ve ark. (2003), Almanya'daki kullanılmış pil atıklarının geri dönüşümü için KDTZ ağı tasarımı problemini ele almışlardır. Ağdaki akışın optimize edilmesi için farklı seçenekleri simülasyon tekniği ile bulmaya çalışmışlardır. Çalışmaları göstermiştir ki, başarılı bir atık pil sistemi için, mevcut ağ yapısının tersine bir şekilde modifiye edilmesi gerekmektedir. Başka bir gerçek uygulamada ise, Krikke ve ark. (2003) hem ürün tasarımının hem de lojistik ağ tasarımının ele alındığı bir model geliştirmiştir. Geliştirilen model Japonya'daki bir buzdolabı üreticinin KDTZ ağına uygulanmış, müşterilerden toplanan kullanılmış ürünlerin lojistik faaliyetleri optimize edilirken, yeniden üretim sırasında ürün tasarımı sürecine geri besleme yapılmıştır. Beamon ve Fernandes (2004) imalatçıların yeni ürün ürettiği ve kullanılmış ürünlerin tekrardan üretime dahil edildiği bir KDTZ için çok dönemli KTDP modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model ile zincirdeki hangi deponun veya toplama merkezinin açılıp açılmayacağı sorusu ve depoların sınıflandırma yetenekleri sorgulanmıştır.

Savaşkan ve ark. (2004) müşterilerden toplanan kullanılmış ürünler için en uygun tersine taşıma yapısını bulmaya çalışmışlardır. Kullanılmış ürünlerin sırasıyla üreticiler, perakendeciler ve 3. parti lojistik sağlayıcılar tarafından toplandığı, 3 farklı merkezi olmayan KDTZ yapısını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sırasında ise satış rakamları, ürün geri dönüşüm oranları ve toplam tedarik zinciri karını ele almışlardır. Yaptıkları oransal karşılaştırmalar sonucunda karar vericiler için farklı alternatifler sunmuşlardır. Bloemhof-Ruwaard ve ark. (2005) bir geri dönüşüm sisteminde yer alan fabrikaların ve atık birimlerinin bulunduğu bir dağıtım ağı için KTDP modeli geliştirmişlerdir. Modelde, fabrikanın kapasite kısıtları, atık yok etme birimleri ve

sistemin servis ihtiyaçları ele alınmış ve toplam amaç tüm ağın maliyetinin minimize edilmesi olarak belirlenmiştir. Gautam ve Kumar (2005) toplama merkezleri sayısının, hizmet ağındaki müşteri sayısının, müşterilerin ortalama yürüme mesafesinin ve toplama araçlarının kat ettiği mesafeler arasındaki ödünleşmeyi optimize etmek için çok amaçlı bir model geliştirmişlerdir. Coğrafik bilgi sistemi temelli geliştirilen model bir katı atık toplama ve geri dönüşüm sistemine uygulanmıştır. Sheu ve ark. (2005) yeşil tedarik zinciri yönetimindeki bütünleşik operasyonel problemlerin optimize edilmesi için bir model önermişlerdir. Hem ileri hem de tersine lojistik ağını entegre bir şekilde optimize eden çok amaçlı doğrusal bir programlama modeli geliştirmişlerdir. Ürün geri dönüş miktarları ve yasal zorunluluklar modelde ele alınmış olup, yapılan sayısal örnekler önerilen modelin ağdaki net karda %21'lik bir artış sağladığını göstermiştir. Nagurney ve Toyasaki (2005) elektronik atık geri dönüşümü içeren TTZ yönetim sistemi için bütünleşik bir model önermişlerdir. Modelde karar vericilerin farklı ürünler için nasıl bir geri dönüşüme izin vereceklerini, çok aşamalı bir elektronik geri dönüşüm ağı modeli ile test etmişlerdir. Yazarlar, ağdaki denge fiyatını ve aşamalar arası malzeme akışını tespit etmek için varyasyonel eşitsizlik denklemini kullanmışlardır.

KDTZ ağ tasarımı için geliştirilen sezgisel örneklerden biri Min ve ark. (2006) tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmada ağ tasarımının yanı sıra ürün geri dönüşlerinin belirli tesislerde konsolide edildiği bir KDTZ ağı için KTDOP modeli önerilmiş, çözüm yöntemi olarak da genetik algoritmaya dayalı sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Salema ve ark. (2007) birden fazla ürünün yer aldığı TTZ ağ tasarımı problemi için KTDP modeli geliştirmiştir. Demirel ve Gökçen (2008a), kullanılmış ürünlerin toplanarak ayrıştırıldığı, uygun kalitede olan parçaların yeni ürünlerin imalatında kullanıldığı bir ağ yapısı için çok ürünlü ve çok aşamalı KTDP modeli geliştirmişlerdir. Modelde, müşterilerden dönen ürünlerin daha ekonomik olması durumunda toplama merkezlerine uğramadan, doğrudan ayrıştırma tesislerine taşınmasına izin verilmektedir. Tek dönem için geliştirilen model, farklı boyuttaki problemler üzerinde test edilmiştir.

Stratejik ve taktiksel kararların eş zamanlı ele alındığı çalışmalardan birinde Salema ve ark. (2009) bütünleşik bir KDTZ ağ tasarımı için çok dönemli, dinamik bir model geliştirmişlerdir. Ağ tasarımı konusu stratejik karar olarak makro zaman seviyesinde dikkate alınırken, üretim ve stok seviyeleri gibi kararlar taktik kararlar olarak mikro zaman seviyesinde dikkate alınmıştır. Yang ve ark. (2009) birbirleri ile çelişkili amaçları olan tedarikçiler, üreticiler, perakendeciler, müşteriler ve geri dönüşüm merkezlerinden oluşan bir KDTZ ağ tasarımı modeli geliştirmişlerdir.

Varyasyonel eşitsizlikler teoremini kullanarak her bir amacı optimize eden denge durumlarını elde etmişlerdir. Wang ve Hsu (2010a), KDTZ ağ tasarımı için ilk önce TP şeklinde matematiksel bir model geliştirmiş daha sonra çözüm yöntemi olarak yayılan ağaç temelli genetik algoritmaya dayalı sezgisel bir yöntem önermişlerdir. Belirsizliklerin ele alınabileceği yaklaşımlardan biri olan stokastik programlama Kara ve Önüt (2010) tarafından kağıt geri dönüşümü ağı için kar maksimizasyonu amaçlı bir modelin çözümünde kullanılmıştır. Ortaya koydukları yaklaşım, ağdaki geri dönüşüm tesislerinin optimal yerlerini ve bu yerleşime göre de tesisler arasındaki optimal dağıtım ağını bulmaktadır. Kannan ve ark. (2010) atık pillerin üretimi, dağıtımı, geri dönüşümü ve bertarafını ele alan çok aşamalı, çok dönemli, çok ürünlü bir KDTZ modeli geliştirerek, genetik algoritma tabanlı bir sezgisel yardımıyla çözmüşlerdir. Yazarlar, küçük boyutlu problemler için geliştirdikleri algoritmadan elde ettikleri çözümleri GAMS paket programından edilen optimum çözümlerle karşılaştırmışlardır.

Yukarıda bahsedilen birkaç sezgisel yaklaşımdan sonra Easwaran ve Üster (2010) fabrikalar, müşteriler, toplama merkezleri ve yeniden üretim merkezlerinin yer aldığı çok ürünlü bir KDTZ ağ tasarımı problemi için Benders ayrıştırma yöntemine dayalı kesin bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Paksoy ve ark. (2011), tedarikçiler, imalatçılar, depolar, dağıtım merkezleri ve müşterilerden oluşan genel bir ileri ağ ile toplama merkezleri, tamir merkezleri, sökme tesisleri, ayrıştırma tesisleri ve atık alanlarından oluşan tersine ağı birlikte ele alan bütünleşik bir sistem için doğrusal bir model geliştirmişlerdir. Modelin amaç fonksiyonunda, maliyetler ve gelirler dışında taşımalardan kaynaklanan karbon dioksit yayılımları da dikkate alınmıştır. Alumur ve ark. (2012) kar amaçlı bir TTZ ağ tasarımı problemini ele almışlar, tersine ürün ağaçlarının kullanıldığı çok dönemli bu problem için KTDP modeli geliştirmişlerdir. Son olarak Qiang ve ark. (2013) hammadde tedarikçileri, perakendeciler ve aynı zamanda ürün geri dönüşümü de yapabilen fabrikalardan oluşan merkezi olmayan bir KDTZ ağ tasarımı problemini ele almışlardır.

Yukarıda verilmeye çalışılan TTZ ve KDTZ ağ tasarımına ilişkin modeller ve çözüm yaklaşımlarının özeti Çizelge 2.1 ve 2.2'de verilmiştir. Çizelgelerin sol sütunlarında modellere ilişkin anahtar kelimeler ve model karakteristikleri yer alırken, modellere ait kaynaklar Çizelge 2.3'te verilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen 6 modelin bulanık olmayan 3 tanesi de (Model 1, 3 ve 5) çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 2.1 ve 2.2'ye göre Jayaraman ve ark. (1999), Fleishmann ve ark. (2001), Kannan ve ark. (2010) ve Paksoy ve ark. (2011) geliştirdikleri modelleri KDTZ ağ

yapısına uygularken; Beamon ve Fernandes (2004), Demirel ve Gökçen (2008a) ve Khajavi ve ark. (2011) tersine ağ tasarımı problemini ele almışlardır. KDTZ ağ tasarımı problemlerinde en fazla taşıma maliyetleri, ürün yenileme veya toplama maliyetleri minimize edilirken, kar maksimizasyonu (Lee ve ark. 2009; Alumur ve ark. 2012) olan çalışmalar sayıca azdır. Çözüm yöntemi olarak çoğunlukla KTDP modeli (Krikke ve ark. 2003; Salema ve ark. 2007) kullanılırken, genetik algoritma (Lee ve ark. 2009; Kannan ve ark. 2010; Wang ve Hsu, 2010a) ve tabu arama algoritması (Easwaran ve Üster, 2009) sezgisel olarak kullanılan yöntemlerdendir.

İncelenen çalışmalarda müşterilerden toplanan ürünler çoğunlukla yenilenmekte veya yeniden üretilmekte iken, bunlara ek olarak Salema ve ark. (2007), Demirel ve Gökçen (2008a) ve Lee ve ark. (2009) toplanan kullanılmış ürünlerin demonte edildiğini varsaymış ve demontaj maliyetlerini minimize etmeye çalışmışlardır. Ancak yukarıdaki çalışmalarda demontaj sadece bir faaliyet olarak ele alınmış, gerçek hayattaki demontaj görevleri veya istasyonları yok sayılmıştır.

Bu bilgiler ışığında tez kapsamında geliştirilen modellerden birinci modelde (Özceylan ve Paksoy, 2013a) çok ürünlü, çok dönemli ve ileri/tersine ürün ağaçlarının kullanıldığı KDTZ ağ tasarımı problemi ele alınmıştır. Problemde amaç taşıma, satın alma, yenileme ve tesis açma (potansiyel fabrika ve perakendecilerin) maliyetlerinin minimize edilmesidir. Söz konusu problem KTDP yöntemi ile çözülmüş, farklı parametreler üzerinde senaryo analizleri yapılarak karar vericilere önerilerde bulunulmuştur. Diğer bir bulanık olmayan model olan üçüncü modelde (Özceylan ve Paksoy, 2013c) TTZ ve DHD problemleri KTDOP modeli ile entegre edilmiş, bir önceki modelde demontaj faaliyetleri bu modelde hat dengeleme problemi olarak daha gerçekçi hale getirilmiştir. İki amaçlı olarak modellenen problemde birinci amaç tersine ağdaki ürün akışlarının minimum maliyetle sağlanması iken, ikinci amaç eş zamanlı olarak demontaj istasyon sayısını azaltmaya çalışmaktadır. Son bulanık olmayan model de ise (Özceylan ve ark. 2013) DHD problemi KDTZ ağ tasarımı problemine entegre edilmiştir. Söz konusu yeni entegrasyon için KTDOP modeli geliştirilmiş, taşıma maliyetleri, satın alma maliyetleri ve yenileme maliyetlerinin yanında demontaj işlemlerinin yapıldığı iş istasyonları sayısı da eş zamanlı olarak minimize edilmiştir.

Çizelge 2.1. TTZ ve KDTZ ağ tasarımı problemlerine ilişkin literatür matrisi

Model Özellikleri	**[1]**	**[2]**	**[3]**	**[4]**	**[5]**	**[6]**	**[7]**	**[8]**	**[9]**	**[10]**	**[11]**	**[12]**	**[13]**
Ağ yapısı													
Tersine			■	■		■	■		■				
Kapalı döngü	■	■			■			■		■	■	■	■
Araştırma çeşidi													
Teorik	■			■	■		■	■	■	■			■
Gerçek uygulama		■	■			■					■	■	
Amaç fonksiyonları													
Taşıma (*min.*)	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Stok (*min.*)	■			■	■			■			■	■	
Tesis işletme maliyeti (*min.*)	■	■	■	■		■	■		■	■			■
Ceza maliyeti (*min.*)		■									■		
Enerji (*min.*)			■										
Atık (*min.*)			■					■				■	
Kiralama (*min.*)					■								
Satın alma (*min.*)							■	■			■	■	
Toplama (*min.*)				■		■	■					■	
Üretim (*min.*)													
Kar (*maks.*)								■			■		
Yenileme (*min.*)						■	■		■				
Demontaj (*min.*)						■	■		■				
Yok satma (*min.*)						■							
Kararlar													
Stok	■			■				■			■	■	
Yeniden üretim	■				■	■	■	■	■	■		■	■
Demontaj		■					■		■		■		
Atık		■	■					■			■	■	
Yenileme						■			■				
Geri dönüşüm			■			■		■			■	■	
Taşıma tipleri													
CO_2													
DHD													
Tedarikçi seçimi													
Kapasite planlama													
Ürünler													
Çok			■			■	■		■			■	■
Tek	■	■		■	■			■		■	■		
Komponent													
Çok			■						■				
Tek	■	■		■	■	■	■	■		■	■	■	■
Dönem													
Çok				■	■			■			■	■	
Tek	■	■	■			■	■		■	■			■
Çözüm yöntemi													
Doğrusal programlama													
TP													
KTDP	■	■	■	■		■	■		■	■	■	■	■
KTDOP					■								
Dinamik programlama								■					
Stokastik programlama													
Benders ayrıştırma										■			■
Lagrangian gevşetmesi													
Genetik algoritma					■				■			■	
Tabu arama										■			

Çizelge 2.2. devam

Model Özellikleri	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]	[26]
Ağ yapısı													
Tersine		■	■		■							■	
Kapalı döngü	■			■		■	■	■	■	■	■		■
Araştırma çeşidi													
Teorik	■		■	■		■	■	■	■	■	■	■	■
Gerçek uygulama		■			■								
Amaç fonksiyonları													
Taşıma (*min.*)	■	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■
Stok (*min.*)						■	■		■				
Tesis işletme maliyeti (*min.*)		■	■		■	■			■		■		
Ceza maliyeti (*min.*)		■		■									
Enerji (*min.*)													
Atık (*min.*)													
Kiralama (*min.*)													
Satın alma (*min.*)				■	■			■	■		■		■
Toplama (*min.*)													
Üretim (*min.*)	■	■				■							
Kar (*maks.*)		■		■	■			■	■	■			
Yenileme (*min.*)											■		■
Demontaj (*min.*)												■	■
Yok satma (*min.*)							■						
Kararlar													
Stok						■	■		■				
Yeniden üretim		■	■	■	■	■			■				
Demontaj					■			■			■	■	■
Atık				■			■	■			■	■	■
Yenileme				■				■			■		■
Geri dönüşüm	■		■						■	■			
Taşıma tipleri				■									
CO_2				■									
DHD												■	■
Tedarikçi seçimi								■					
Kapasite planlama						■				■			
Ürünler													
Çok				■	■			■		■			
Tek	■	■	■			■	■		■		■	■	■
Komponent													
Çok					■			■			■	■	■
Tek	■	■	■	■		■	■		■	■			
Dönem													
Çok					■	■					■	■	■
Tek	■	■	■	■			■	■	■	■			
Çözüm yöntemi													
Doğrusal programlama				■									
TP	■												
KTDP			■		■	■		■			■		
KTDOP												■	■
Dinamik programlama									■				
Stokastik programlama		■					■			■			
Benders ayrıştırma													
Lagrangian gevşetmesi						■							
Genetik algoritma	■												
Tabu arama													

Çizelge 2.3. İncelenen çalışmalara ait kaynaklar

[1]	Jayaraman ve ark. (1999)	**[14]**	Wang ve Hsu (2010a)
[2]	Fleischmann ve ark. (2001)	**[15]**	Kara ve Önüt (2010)
[3]	Krikke ve ark. (2003)	**[16]**	Khajevi ve ark. (2011)
[4]	Beamon ve Fernandes (2004)	**[17]**	Paksoy ve ark. (2011)
[5]	Min ve ark. (2006)	**[18]**	Alumur ve ark. (2012)
[6]	Salema ve ark. (2007)	**[19]**	Zhang ve ark. (2012)
[7]	Demirel ve Gökçen (2008a)	**[20]**	Kenné ve ark. (2012)
[8]	Yang ve ark. (2009)	**[21]**	Amin ve Zhang (2012)
[9]	Lee ve ark. (2009)	**[22]**	Qiang ve ark. (2013)
[10]	Easwaran ve Üster (2009)	**[23]**	Ramezani ve ark. (2013)
[11]	Salema ve ark. (2009)	**[24]**	Özceylan ve Paksoy (2013a) (Model 1)
[12]	Kannan ve ark. (2010)	**[25]**	Özceylan ve Paksoy (2013c) (Model 3)
[13]	Easwaran ve Üster (2010)	**[26]**	Özceylan ve ark. (2013) (Model 5)

2.2. Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı Problemlerine Bulanık Matematiksel Programlama Yaklaşımları

Tedarik zinciri ağ tasarımı problemlerinde belirsiz etmenlerin çokluğu ve birbirleri ile çelişkili amaçların fazla olmasından dolayı konvensiyonel deterministik yöntemler etkili çözüm üretmede yetersiz kalabilmektedir (Liang, 2008). Belirsizliğin dikkate alınması kapsamında, stokastik programlama ve bulanık küme teorisi olmak üzere temelde iki yaklaşım bulunmaktadır (Wei ve Zhou, 2011). Çizelge 2.2'de gösterildiği gibi tedarik zinciri çalışmalarında stokastik programlamanın başvurulduğu çalışmalar olsa da, karar vericilerin ellerindeki yok denecek kadar az olan geçmiş veri eksikliği bu yöntemin uygulanabilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Wei ve Zhao, 2013). Bundan dolayı tedarik zinciri ağ tasarımı problemlerinde bulanık küme teorisinin stokastik programlamaya nazaran daha aktif kullanılması beklenen bir durumdur (Peidro ve ark. 2009a). Bu belirsizlik durumu, Zadeh (1965) tarafından önerilen "bulanık küme teorisi" ile dilsel olarak "az çok", "biraz" gibi formlarda ifade edilebilir hale gelmiştir. Kesin olmayan bilginin sayısal gösterimi olan bulanık sayıların kullanılması ile gerçek dünya problemlerinin belirsiz yapısının modellenmesinde kullanılacak yeni matematiksel teknikler geliştirilmiştir (Paksoy ve ark. 2013b). Son yıllarda çok farklı alanlarda kullanılmaya başlanan bulanık mantık içsel ve dışsal olarak çok fazla belirsizliğin olduğu tedarik zinciri ağı tasarımı problemlerinde de başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Peidro ve ark. 2009a).

Literatür taramasının bu kısmında, ilk olarak genel tedarik zinciri ağı tasarımına ilişkin bulanık mantık uygulamalarına değinilirken, daha sonra belirsizliğin arttığı ancak

literatürde pek fazla yer almayan bulanık TTZ/KDTZ ağ tasarımı problemlerine ait birtakım araştırmalara yer verilmiştir.

Verma ve ark. (1997) doğrusal olmayan hiperbolik ve üssel bulanık üyelik fonksiyonlarını çok amaçlı bir taşıma probleminin çözümünde kullanmışlardır. Sayısal bir örnek yardımıyla elde edilen sonuçlar, doğrusal üyelik fonksiyonları kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, taşıma problemlerinde, doğrusal olmayan üyelik fonksiyonlarının kullanılabileceğini göstermişlerdir. Chang ve ark. (1997) katı atık yönetimi için en uygun toplama/dağıtım ağının tasarlamasında kullanılmak üzere bulanık çok amaçlı KTDP modeli geliştirmişlerdir. Gürültü, kaza, kirlilik gibi belirsiz çevresel faktörleri ve dağıtım maliyeti gibi ekonomik faktörleri içine alan modeli Tayvan'daki bir katı atık toplama işletmesine uygulamışlardır. Petrovic ve ark. (1999), bulanık ortamdaki bir tedarik zincirinin davranışını modellemişlerdir. Tanımlanan bulanık tedarik zinciri modeli, tedarik zincirindeki her bir stok için belirsizlik altında, makul maliyetler ile tedarik zincirinin kabul edilebilir bir servis düzeyini veren sipariş miktarlarını belirlemek için geliştirilmiş ve özel amaçlı benzetim programı ile işletilerek sınırlı bir zaman ufku süresince tedarik zincirinin performans ölçüleri ve dinamikleri analiz edilmiştir. Sonuç olarak belirsiz müşteri talebinin ve tedarik zinciri boyunca belirsiz teslimlerin, tedarik zincirinin davranışına büyük etkisi olduğu ortaya konmuştur. Petrovic (2001) bir önceki çalışmasında tanımladığı modelini, teslimat sürelerindeki belirsizliği de bulanık küme teorisi içine alarak genişletmiştir. Müşteri talebi ve hammadde dış tedarikinin yanı sıra, tesislerdeki işlem/sipariş teslim süreleri de belirsiz olarak düşünülmüş ve tedarik zincirinin davranışı ve performansı geliştirilen özel amaçlı bir simülasyon yazılımı ile analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, talep belirsizliği arttıkça nihai ürün teslimini temel alan tedarik zinciri performansının düştüğü, tedarik zinciri boyunca stok seviyelerindeki ve siparişlerdeki (bir tesisten bir önceki stok noktasına gönderilen) değişimlerin arttığı gözlemlenmiştir. Zarandi ve ark. (2002) TZY'de bulanık küme sayılarının kullanılmasını detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmalarında hem kesin hem de bulanık olan 70'e yakın makaleyi incelemişler, bulanık küme teorisi olan çalışmaları ise üç ana sınıfta gruplandırmışlardır. Malzeme akışı, bilgi akışı ve alıcı-tedarikçi ilişkilerine göre ayırdıkları çalışmalarda, bulanık üyelik fonksiyonlarının tedarik zinciri parametrelerinde kolaylıkla kullanabileceğini savunmuşlardır. Sakawa ve ark. (2002) merkezi olmayan iki seviyeli etkileşimli bulanık programlama yaklaşımı ile ev aletleri imal eden ana sanayi ile tedarikçilerinin amaçları arasında bir uzlaşma sağlamışlardır.

Ev imalatçısı işletme, işbirlikçi bir yaklaşım ile fabrika ve depolarından ürünleri müşterilere taşımak için dış kaynak sağladığı iki tür acentenin amaçlarını da değerlendirmektedir. Bu acentelerden biri düzenli partileri, diğeri küçük partileri taşımaktadır. İşletmenin amacı taşıma maliyetini ve taşıma zamanına göre fırsat maliyetini minimize etmek iken, acentelerin amacı karlarını maksimize etmektir. Acenteler bu amacı sağlayan işgücü atamasını gerçekleştirirken, sürücülerin kabiliyetlerini de dikkate almaktadır. Bu taşıma ve işgücü atama problemi merkeziyetçi olmayan iki seviyeli TP problemi olarak formüle edilmiş, rasyonel ve etkin bir plan ortaya koyabilmek ve işletmeler arası işbirliğini yansıtabilmek için etkileşimli bulanık programlama yaklaşımı kullanılmış ve her bir işletme için tatmin edici bir sonuç elde edilmiştir.

Giannoccaro ve ark. (2003) tedarik zincirinde envanter kontrolü problemini ele alarak stok yönetimi için periyodik gözden geçirme esasına dayalı bulanık bir model oluşturmuşlardır. Bulanık kümeler üzerinde kurulu bu modelde düzeysel stok sistemi üzerinde durulmuş ve oluşturulan modelin bir simülasyonu yapılmıştır. Sonuç olarak, merkezi stok kontrol politikasının yerel politikalardan daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Liu ve Kao (2004), tedarikçilerden ve müşterilerden oluşan tek aşamalı bir tedarik zincirini ulaştırma problemi olarak modelleyerek toplam taşıma maliyetini minimize etmeyi amaçlamışlardır. Ulaştırma probleminde, birim taşıma maliyeti, tedarik miktarları ve talep miktarlarının bulanık olduğunu düşünmüşler ve bulanık toplam ulaştırma maliyetinin üyelik fonksiyonunu bulmak için bir yöntem geliştirmişlerdir. Ulaştırma modelinin tedarik zinciri ve lojistik yönetiminde önemli bir role sahip olmasına rağmen, geliştirilen tek aşamalı ulaştırma problemi tabanlı model, TZY'nin küresel bakış açısını yansıtmaktan oldukça uzak kalmıştır. Chen ve Lee (2004), talep miktarlarının ve ürün fiyatlarının belirsiz olduğu çok aşamalı bir tedarik zinciri ağında, belirlenen ve ölçülemeyen amaçlara ulaşabilmek için çok ürünlü, çok aşamalı ve çok dönemli bir planlama modeli önermişlerdir. Belirsiz talep miktarlarının modellenmesinde, bilinen olasılıklara sahip farklı senaryolar kullanılmış; satıcıların ve alıcıların ürün fiyatları ile ilgili birbirine uymayan tercihleri ise bulanık kümeler kullanılarak ifade edilmiştir. Selim ve ark. (2004) çalışmalarında çok dönemli, çok ürünlü ve çok üretim merkezli bir üretim/dağıtım modeli geliştirmişlerdir. Bu model, kapasite ve stok denge kısıtları altında üretim, dağıtım ve stok tutma maliyetlerini minimize eden çok amaçlı bir yapıdadır. Karar vericilerin kesin olmayan hedef değerlerini modele dahil edebilmek amacıyla bulanık hedef programlama yaklaşımları

kullanılmıştır. Bulanık modelleme yaklaşımlarının çözüm karmaşıklığı ve modelleme esnekliği açısından üstünlüğünü ortaya koymak amacıyla model, doğrusal programlama, hedef programlama ve bulanık hedef programlama yaklaşımları kullanılarak çözülmüştür. Wang ve Shu (2005) tedarik zincirindeki belirsizlikleri ele almak ve stok stratejilerini belirlemek için bir bulanık karar metodolojisi geliştirmişlerdir. Tedarik zincirinin performansını değerlendirmek için olasılık teorisi temelli bulanık bir model önermişlerdir. Geliştirilen modeli genetik algoritma yaklaşımı ile yeniden tasarlayarak müşteri taleplerini karşılayacak ve en düşük stok maliyetini verecek stok seviyesinin belirlenmesinde kullanmışlardır. Chen ve Chang (2006) çok ürünlü, çok aşamalı ve çok dönemli bir tedarik zinciri problemi için bulanık üyelik fonksiyonlu bir yaklaşım önermişlerdir. Toplam maliyetin minimize edildiği modelde birim taşıma ve hammadde maliyetleri ile talepler bulanık olarak modellenmiştir. Tahmini üyelik fonksiyonunu türetebilmek için, farklı olasılık düzeyleri için bulanık minimum toplam maliyetin alt ve üst sınırlarını hesaplamışlar ve ilgili optimum faaliyet planlarını üretmişlerdir. El-Wahed ve Lee (2006) çok amaçlı taşıma problemleri için bulanık bir hedef programlama modeli geliştirmişler ve her bir amaç fonksiyonu için bulanık bir amaç değeri olduğunu varsaymışlardır. Modelde, en iyi üst sınırı bulmak için en iyi kötü sınırı minimize etmeye çalışmışlardır. Sonuç olarak bu yöntemin, sadece çok amaçlı taşıma problemi için değil, diğer çok amaçlı karar verme problemlerinin çözümü için de etkili bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Liang (2006) ve (2008) bulanık çok amaçlı ulaştırma problemleri için etkileşimli, çok amaçlı doğrusal bir programlama yöntemi geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem, amaç fonksiyonlarının bulanık olduğu ve parçalı doğrusal üyelik fonksiyonları ile ifade edildiği durum için önerilmiş ve toplam dağıtım maliyetlerinin ve toplam teslimat sürelerinin minimizasyonu amaçlanmıştır. Önerilen metot, karar vericiye, tatmin edici bir çözüm elde edene kadar bulanık veriler ve ilgili parametreler üzerinde etkileşimli olarak değişiklikler yapma olanağını da vermektedir. Uygulanan metodun etkinliği sayısal bir örnekle de test edilmiştir. Xie ve ark. (2006) tedarik zincirlerinde stok yönetimi ve kontrolü için hiyerarşik iki seviyeli bir yaklaşım sunmuşlardır. Bulanık küme ile modellenen çalışmada, talebin belirsiz olduğu belirtilmiştir. Tedarik zinciri problemi, daha basit optimizasyon alt problemlerine parçalanmış, bu alt problemler birbirinden bağımsız olarak çözülmüş ve çözümler hiyerarşik bir şekilde birleştirilmiştir. Selim ve Özkarahan (2008) ve Selim ve ark. (2008) çalışmalarında tedarik zinciri ağı tasarımı problemini ele almışlardır. Problemin amacı perakendecilerin taleplerini en az maliyetle karşılayacak

şekilde tesislerin yerlerinin, sayılarının ve taşıma miktarlarının belirlenmesidir. Perakendecilerin belirsiz talepleri ve karar vericilerin farklı hedeflerinden dolayı yeni bir etkileşimli bulanık hedef programlama yaklaşımı önermişlerdir. Bilgen (2008) deniz taşımacılığının yapıldığı çok ürünlü ve çok dönemli bir tedarik zinciri ağı tasarımı için KTDP modeli geliştirmiştir. Geliştirilen deterministik model, amaç fonksiyonu ve talep, kapasite gibi sağ taraf değerlerinin bulanık olarak ele alındığı BMP modeline dönüştürülmüştür. Problemin çözümünde ise farklı bulanık programlama yaklaşımları karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Torabi ve Hassini (2008) çoklu tedarikçi, tek fabrika ve çoklu dağıtım merkezinden oluşan bir tedarik zinciri planlama modelini ele almışlardır. İlk olarak çok amaçlı KTDP modeli geliştirmişler ve daha sonra geliştirilen bu modele talep, maliyet katsayıları ve kapasite belirsizliklerinden dolayı yeni bir etkileşimli bulanık yaklaşım önermişlerdir. Torabi ve Hassini (2009) önceki çalışmalarındaki tek fabrika sayısını çoğaltarak çok aşamalı bir tedarik zinciri ağı tasarımı problemini ele almışlardır. Modelde satın alma değerinin maksimize; toplam maliyetin, kusurlu ürünlerin ve geç teslimatların minimize edildiği birbirinden farklı 4 amaç yer almaktadır. Hedeflenen amaçlara ödünleşik bir çözüm bulabilmek için etkileşimli bulanık hedef programlama yaklaşımı uygulamışlardır. Liang ve Cheng (2009) paranın zaman değerini ele alarak çok ürünlü çok dönemli bir tedarik zinciri için üretim/dağıtım planlama problemine bulanık küme teorisi uygulamışlardır. Önerilen ÇABP modeli stok seviyeleri, makine ve işçi kapasiteleri, tesisler arası uzaklıklar ve toplam bütçe kısıtları altında tedarik zincirindeki toplam maliyeti ve teslimat süresini minimize etmeye çalışmaktadır. Peidro ve ark. (2009b) çalışmalarında tedarik, talep ve süreç belirsizliklerinin olduğu tedarik zinciri sistemi için BMP modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen model verilerin bilinmediği ve üçgensel bulanık sayıların kullanıldığı bulanık KTDP modeli şeklinde formüle edilmiştir. Model aynı zamanda karar vericiye farklı memnuniyet derecelerine göre alternatif karar planları sağlamaktadır. Çalışmanın sonunda ise model gerçek bir otomotiv tedarik zinciri problemine uygulanmış ve test edilmiştir. Peidro ve ark. (2010) bulanık küme teorisi ile tedarik zinciri belirsizliklerini modellemişler ve çok aşamalı, çok ürünlü, çok seviyeli ve çok dönemli bir tedarik zinciri ağı için BMP modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modelde talebi, süreçleri ve tedarik kısmını belirsiz olarak ele almışlardır. Çalışmadaki amaç müşteri taleplerinin minimum maliyetle karşılandığı en iyi kapasite kullanımının tüm dönem boyunca elde edilmesi olarak belirlenmiştir. Önerilen bulanık model ile karar vericiye farklı memnuniyet dereceleri için farklı karar kazanımları sağlanmıştır. Bilgen (2010) farklı

üretim hatlarındaki üretim miktarlarının ve dağıtım merkezlerine teslim edilen ürünlerin yer aldığı bir tedarik zinciri sisteminde, üretim ve dağıtım planlama problemini ele almıştır. Gerçek hayattaki dinamik ve belirsiz olan çevreden dolayı ilk olarak deterministik olarak kurulan model kapasite kısıtlarının ve maliyet parametrelerinin bulanıklaştırılması ile bulanık hale dönüştürülmüştür. Son olarak da modelin uygulanabilirliğini ve esnekliğini gösterebilmek adına sayısal bir örnek ile test edilmiştir. Kabak ve Ülengin (2011) taleplerin, maliyetlerin ve kapasitelerin bulanık olarak ele alındığı bir tedarik zinciri modeli için BMP modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen modelin amacı işletmenin toplam karını maksimize etmektir. Son olarak ise Paksoy ve ark. (2012b) yenilebilir bitkisel yağ üretimi yapan bir işletmenin tedarik zinciri ağını optimize etmişlerdir. Kullanıcı taleplerinin ve tesis kapasitelerinin üçgensel bulanık sayılar ile ele alındığı modelin amacı toplam taşıma maliyetinin minimize edilmesidir.

Yukarıda verildiği gibi BMP'nin İTZ'lere uygulandığı çok sayıda çalışma olmasına rağmen, son yıllarda TTZ ve KDTZ ağ tasarımı problemlerine de bu yönde gerçekleşen uygulamalar vardır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Roy ve ark. (2009) çok dönemli ve tek ürünlü bir üretim/yeniden üretim sistemi için bütünleşik bir model geliştirmişlerdir. Üretim aşamasında bazı ürünlerin hasarlı üretildiği ve bunların sağlam ürünlerle karşılanarak müşterilere yollandığı varsayılmıştır. Aynı şekilde müşterilerden toplanan kullanılmış ürünlerin bir kısmı yeniden üretime kazandırılmak için sisteme dahil edilirken geri kalan kısmı da sistemden çıkarılarak hurdaya yollanmaktadır. Gerçek hayattaki geri dönüş oranlarının belirsizliğinden dolayı bu oranlar iyimser, kötümser ve ortalama bulanık sayılarla ifade edilmiştir. Sistemin toplam karını maksimize edecek şekilde rulet çemberi, aritmetik çaprazlama ve rastgele mutasyon operatörleri kullanılarak genetik algoritmaya başvurulmuştur. Pishvaee ve Torabi (2010) ileri ve tersine lojistik faaliyetlerinin entegre edildiği KDTZ için çok amaçlı olasılık tabanlı bir KTDP modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen olasılık tabanlı modelin çözümü için interaktif bir bulanık çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. Son olarak da birtakım sayısal örneklerle geliştirilen olasılık tabanlı modelin önemini ve uygulanabilirliğinin yanı sıra önerilen bulanık çözüm yaklaşımının kullanışlılığını da göstermişlerdir. Qin ve Ji (2010) bir ürün geri dönüşüm ağı tasarımı için bulanık programlama modeli geliştirmişlerdir. Farklı kriterlere bağlı olmak kaydıyla, 3 tip optimizasyon modeli önermişlerdir. Önerilen modelleri çözmek için bulanık simülasyon ve genetik algoritmalardan oluşan melez bir algoritma

geliştirmişlerdir. Sonuç olarak da önerilen model ve algoritmaların etkinliğini göstermek için birtakım örnekler sunmuşlardır. Wang ve Hsu (2010b) ele aldıkları KDTZ problemlerindeki belirsizlikler için bulanık sayıları kullanmışlardır. Tedarikçilerden, fabrikalardan, dağıtım merkezlerinden, müşterilerden ve geri dönüşüm tesislerinden meydana gelen bir tedarik zinciri için belirsizlikler altında toplam taşıma maliyetini minimize etmeye çalışmışlardır. Modelin çözümünde aralıklı programlama yaklaşımı kullanmışlar, bu sayede en uygun çözüme ulaşmada farklı seviye kesitlerine başvurmuşlardır. Wei ve Zhao (2011) perakendeci rekabetinin olduğu bulanık bir KDTZ ağında fiyatlandırma tabanlı bir karar modeli geliştirmişlerdir. Müşteri talepleri, yeniden üretim maliyetleri ve toplama maliyetleri bulanık olarak ele alınmış, her bir perakendeciyi memnun edecek en uygun fiyatlandırma politikası aranmıştır. Subulan ve ark. (2012) biri sıfır hammaddeden, diğeri ise toplanan ürünlerden yeniden üretimin yapılabildiği iki farklı seçeneğin yer aldığı bir KDTZ ağı için bulanık KTDP modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen modelde, tesis kapasiteleri, perakendeci talepleri, geri dönüşüm ve kabul oranları ve amaç fonksiyonları bulanık olarak ele alınmıştır. Sonraki çalışmasında Wei ve Zhao (2013) bir üretici (aynı zamanda yeniden üretim yapan bir tesis), bir perakendeci ve 3. parti lojistik sağlayıcısından oluşan küçük bir bulanık KDTZ ağı problemini ele almışlardır. Ele alınan problemde müşteri talepleri, yeniden üretim maliyetleri ve kullanılmış ürün toplama maliyetleri bulanık sayılar ile ifade edilmiştir. Özkır ve Başlıgil (2013), KDTZ ağı tasarımı problemine ÇABP yaklaşımı uygulamışlardır. Talep ve kapasitelerin bulanık ele alındığı modelde, bir taraftan sistemin karı ve müşteri memnuniyeti maksimize edilirken, diğer taraftan tesis işletme maliyeti, satın alma maliyeti ve ceza maliyetlerinin oluşturduğu toplam maliyet minimize edilmektedir. Son olarak Fallah-Tafti ve ark. (2014) stratejik seviyede tesis açma kararlarının, taktiksel seviyede ise tedarikçi seçiminin ele alındığı çok dönemli bir KDTZ problemi için çok amaçlı etkileşimli bir bulanık model geliştirmişlerdir. Maliyet katsayıları ve müşteri taleplerinin bulanık olarak tanımlandığı modelde amaç, taşıma maliyetlerinin minimizasyonu, tedarikçi performansının maksimizasyonu ve teslimat süresinin minimizasyonudur.

Yukarıdaki BMP uygulamalarına ek olarak, bu tezde önerilen 6 matematiksel modelden 3'ü (Model 2, 4 ve 6) bulanık olarak ele alınmıştır. Model 2'de (Özceylan ve Paksoy, 2013b) birinci modelde önerilen deterministik KDTZ problemindeki (Özceylan ve Paksoy, 2013a) amaç fonksiyonları, kapasite, talep ve geri dönüşüm oranları bulanık olarak ifade edilmiştir. Söz konusu ÇABP modelinin çözümü için Liang ve Cheng

(2009)'un bulanık çok amaçlı yaklaşımı kullanılmıştır. Diğer bulanık çalışmada ise (Model 4), TTZ ağ tasarımı ve DHD problemleri entegrasyonuna Zimmermann (1976) ve Werners (1987) tarafından önerilen BMP yaklaşımları uygulanmıştır (Özceylan ve Paksoy, 2013d). Ele alınan bulanık entegre modelde amaç fonksiyonları, talepler, kapasiteler ve geri dönüşüm oranları bulanıklaştırılmış ve karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Son modelde ise (Model 6) KDTZ ağ tasarımı ve DHD problemleri entegrasyonu bulanık olarak ele alınmıştır. Maliyet katsayıları, müşteri talepleri, ileri ve tersine tesis kapasitelerinin ve geri dönüşüm oranlarının belirsiz olduğu probleme Werners (1988), Torabi ve Hassini (2008) ve Selim ve Özkarahan (2008) tarafından önerilen 3 farklı etkileşimli bulanık programlama yaklaşımı uygulanmıştır.

2.3. Demontaj Hattı Dengeleme Problemine İlişkin Literatür Taraması

Literatürde demontaj işlemi ile ilgili birkaç alt problem (planlama, sıralama, çizelgeleme, DHD vb.) olmasına rağmen (montaj işleminde olduğu gibi) (Boysen ve ark. 2007; Battaïa ve Dolgui, 2013), bu tez çalışmasında sadece DHD problemine ait ilgili literatür taramasına yer verilmiştir. DHD problemleri, demontaj görevlerini sıralı bir istasyon dizisine atarken demontaj görevleri arasındaki öncelik ilişkilerini sağlayıp, istasyon sayısının en küçüklenmesi, çevrim süresinin en küçüklenmesi, verimliliğin en büyüklenmesi, karın en büyüklenmesi veya maliyetin en küçüklenmesi gibi ölçütleri optimize etmeyi amaçlar (Ding ve ark. 2010). DHD problemleri, Güngör ve Gupta (1999b) tarafından literatüre kazandırıldıktan sonra, Güngör ve Gupta (2002), geri dönüşüm sistemlerinin başarılı olabilmesi için optimum bir şekilde dengelenmiş demontaj hatlarına sahip olunması gerektiğini belirtmişlerdir. Demontaj çizelgeleme ve dengeleme problemlerini sistematik bir şekilde ayırarak demontaj hat tasarımında karşılaşılan ve karşılaşılabilecek olan unsurları tanımlamışlardır. Demontaj hat tasarım problemlerinin genel amaçlarını ve kısıtlarını ele almışlar ve bu problem için sezgisel bir yöntem geliştirmişlerdir. Sayısal örneklerle test edilen model (8 demontaj işleminden meydana gelen bir masaüstü bilgisayar) ileriki çalışmalarda araştırmacılar için de büyük bir kaynak oluşturmuştur. DHD probleminin McGovern ve Gupta (2007a) tarafından NP-zor olarak tanımlanmasından sonra, genetik algoritma (McGovern ve Gupta, 2007b), karınca kolonisi optimizasyonu (Agrawal ve Tiwari, 2008; Ding ve ark. 2010; Kalaycı ve Gupta, 2013a), tavlama benzetimi (Kalaycı ve ark. 2012), parçacık sürü optimizasyonu (Kalaycı ve Gupta, 2013b), yapay arı kolonisi (Kalaycı ve Gupta,

2013c) ve takviyeli öğrenme tekniği (Tuncel ve ark. 2013) tabanlı sezgisel yöntemler uygulanmıştır.

Çizelge 2.4. DHD problemlerine ait literatür özeti

Kaynak	Amaç	Çözüm yöntemi
Güngör ve Gupta (1999b)	• Verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısın minimizasyonu	• Sezgisel
Güngör ve Gupta (2002)	• Verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısı ve boşta kalma süresinin minimizasyonu	• Sezgisel
McGovern ve Gupta (2007a)	• Verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısı ve boşta kalma süresinin minimizasyonu	• Genetik algoritma • Karınca kolonisi optimizasyonu • Greedy algoritması • Greedy/Climbing Hill hibritleşmesi • Greedy/2-Opt hibritleşmesi
McGovern ve Gupta (2007b)	• Verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısı ve boşta kalma süresinin minimizasyonu • Zararlı parçaların öncelikli demontajı	• Genetik algoritma
Agrawal ve Tiwari (2008)	• Verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısı ve boşta kalma süresinin minimizasyonu • Hat etkinliğinin maksimizasyonu	• Karınca kolonisi optimizasyonu
Altekin ve ark. (2008)	• Kar maksimizasyonu • Verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısın minimizasyonu	• KTDP
Koç ve ark. (2009)	• Verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısın minimizasyonu	• KTDP
Ding ve ark. (2010)	• Verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısı ve boşta kalma süresinin minimizasyonu • Yüksek talepli parçaların öncelikli demontajı	• Karınca kolonisi algoritması
Altekin ve Akkan (2012)	• Kar maksimizasyonu • Görev hatası temelli maliyet minimizasyonu	• KTDP
Kalaycı ve ark. (2012)	• Verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısı ve boşta kalma süresinin minimizasyonu • Zararlı parçaların öncelikli demontajı • Yüksek talepli parçaların öncelikli demontajı	• Tavlama benzetimi
Kalaycı ve Gupta (2013a)	• Verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısı ve boşta kalma süresinin minimizasyonu • Zararlı parçaların öncelikli demontajı • Yüksek talepli parçaların öncelikli demontajı	• Karınca kolonisi algoritması
Kalaycı ve Gupta (2013b)	• Verilen çevrim zamanı altında boşta kalma süresinin minimizasyonu • Zararlı parçaların öncelikli demontajı • Yüksek talepli parçaların öncelikli demontajı	• Parçacık sürü optimizasyonu
Kalaycı ve Gupta (2013c)	• Verilen çevrim zamanı altında boşta kalma süresinin minimizasyonu • Zararlı parçaların öncelikli demontajı • Yüksek talepli parçaların öncelikli demontajı	• Yapay arı kolonisi
Tuncel ve ark. (2013)	• Verilen çevrim zamanı altında toplam istasyon sayısı ve boşta kalma süresinin minimizasyonu	• Takviyeli öğrenme tekniği
Paksoy ve ark. (2013a)	• Çevrim zamanı, istasyon sayısı ve istasyon iş yükü hedeflerinin sapma değerlerinin minimizasyonu	• 0-1 bulanık hedef programlama

Yukarıdaki sezgisel yöntemlere ek olarak, optimal sonuçların elde edilebilmesi için matematiksel modellerin geliştirildiği çalışmalar da literatürde mevcuttur (örneğin Altekin ve ark. 2008; Koç ve ark. 2009 ve Altekin ve Akkan, 2012). DHD problemi için ilk sayılabilecek matematiksel model Altekin ve ark. (2008) tarafından bir KTDP modeli olarak önerilse de, çoğu küçük boyutlu problemler için bile optimal sonuca ulaşılamamıştır. Bu çalışmayı takiben, Koç ve ark. (2009) biri dinamik programlama temelli diğeri ise TP temelli olmak üzere DHD problemi için iki farklı kesin çözüm yöntemi önermişlerdir. Geliştirilen matematiksel model klasik montaj hattı dengeleme problemine benzetilmiş, olası tüm demontaj alternatifleri VE/VEYA diyagramı ile gösterilmiştir. Önerilen model, verilen tüm demontaj alternatifleri arasından çevrim zamanını aşmayacak ve istasyon sayısını minimize edecek şekilde en iyi alternatifi bulmaktadır. Altekin ve Akkan (2012) görev hatalı bir DHD problemi için öngörülü ve tepkili bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yaklaşımın ilk adımında istenen performans göstergesinin sağlandığı tahmini bir hat dengesi yaratılmış daha sonra tahmin edilenin dışında hatalı görev olması halinde ikinci adımda hattın yeniden dengelenmesi sağlanmıştır. Son olarak Paksoy ve ark. (2013a) iki üründen oluşan karışık modelli bir DHD problemini ele almışlardır. Geliştirilen problemde çevrim zamanı, istasyon sayısı ve istasyon yükü hedefleri bulanık olarak ele alınmış, çözüm yöntemi olarak 0-1 bulanık hedef programlama yaklaşımı kullanılmıştır.

Yukarıda bahsedilen çalışmaların amaç fonksiyonları ve çözüm yöntemlerine ait kısa bir özeti Çizelge 2.4'te verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında TTZ ve KDTZ ağ tasarımı problemlerine entegre edilen DHD modeli, Koç ve ark. (2009) tarafından önerilen DHD modelidir. Ancak birtakım temel farklılıklar mevcuttur. Çizelgeden anlaşılacağı gibi ele alınan çoğu DHD probleminde klasik montaj hattı dengeleme problemlerinde olduğu gibi verilen çevrim zamanı altında istasyon sayısı minimizasyonu çalışılmıştır. Ancak, çevrim zamanının demonte edilecek ürüne bağlı olduğunu ve geri dönüşüm sistemlerinde toplanan ürünlerin ve bu ürünlerden ne kadarının demonte edileceğinin belirli olmadığını varsayarsak, demontaj faaliyetlerinin gerçekleştiği TTZ ve KDTZ ağlarında çevrim zamanının da belirsizlik göstereceği açıktır. Bundan dolayı tez çalışması kapsamında ele alınan DHD probleminde hem çevrim zamanı hem de açılacak demontaj iş istasyonu sayısı değişkendir. İkinci temel farklılık ise kullanılan parametrelerin özelliği ile ilgilidir. Literatürdeki çoğu DHD probleminde (Agrawal ve Tiwari (2008)'de stokastik olarak alınmıştır) kullanılan parametreler deterministik olarak ele alınmıştır. Ancak, demontajın doğası gereği DHD

problemi büyük bir çoğunlukta belirsizlik içerir. Yine bu sebepten, tez kapsamında geliştirilen son entegre modelde (Model 6) demontaj görev süreleri ve maliyet katsayıları bulanık olarak ifade edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tez kapsamında ele alınan TTZ, KDTZ ve DHD problemleri detaylı bir şekilde verilmiştir. Daha sonra geliştirilen matematiksel modeller deterministik ve bulanık formülasyonları ile sunulmuştur.

3.1. İncelenen Problemler

Bu alt bölümde sırasıyla TTZ/KDTZ ve DHD problemleri açıklanmıştır.

3.1.1. Tersine ve KDTZ ağ tasarımı problemleri

TTZ ve KDTZ'lerin güdüleyicileri

İşletmelerin TTZ ve KDTZ ağlarına ihtiyaç duymalarının en temel sebebi ürün geri dönüşümleridir. Ürün geri dönüşümlerinin veya işletmelerin geri dönüşüme gösterdikleri bu ilgilinin artmasının temelinde ise 3 belirgin faktör yatmaktadır. Bunlar kullanılmış ürünlerin içindeki tehlikeli maddelerden kaynaklı çevre kirliliğine yol açabilme potansiyelleri; bir takım sebeplerden dolayı nihai kullanıcılardan ürünlerin geri dönmesi ve son olarak yasal yaptırımlardır. Bu faktörlere ilişkin bilgiler kısaca aşağıda verilmiştir.

Sürekli artan nüfusla paralellik gösteren tüketim seviyesi, kaynakların sınırlı olduğu günümüz dünyasında ciddi bir çevresel problem olan atığa sebep olmaktadır (Pochampally ve ark. 2009). Örneğin her yıl A.B.D'de 60 milyonun üzerinde bilgisayar satışı gerçekleşirken, bunların aynı yıl 12 milyondan fazlası elden çıkarılmaktadır. Elden çıkarılan bu rakamın yaklaşık sadece %10'u geri dönüşüme kazandırılırken, geri kalanı bertaraf edilmektedir (Williams ve ark. 2002). Geri dönüşümün çevresel boyutlarının daha iyi açıklanması için, geri dönüşümü yapılan ürünler arasında büyük bir orana sahip bilgisayarların üretiminde kullanılan malzemeler ve tüketilen enerji miktarları sırasıyla Çizelge 3.1 ve 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Mikroçip üretiminde kullanılan malzeme ve enerji miktarları (Pochampally ve ark. 2009)

Malzeme	Tanım	Mikroçip başına miktar	Dünya genelinde yıllık kullanım	Bir bilgisayar içindeki mikroçip için gerekli miktar
Silikon devre levhası		0.25 gr	4,400 ton	0.025 kg
Kimyasallar	Nadir toprak elementi	0.016 gr	280 ton	0.002 kg
	Fotolitografi	22 gr	390,000 ton	2.2 kg
	Gravürler	0.37 gr	6,600 ton	0.037 kg
	Asit/baz	50 gr	890,000 ton	4.9 kg
	Toplam kimyasallar	72gr	1.3 milyon ton	7.1 kg
Elemental gazlar	N_2,O_2, H_2, He, Ar	700 gr	12 milyon ton	69 kg
Enerji	Elektrik	2.9 kWh	52 milyar kWh	281 kWh
	Doğrudan fosil yakıtları	1.6 MJ	28 milyar MJ	155 MJ
	Katı fosil yakıtları	970 gr	17 milyon ton	94 kg
Su		32 litre	570 milyar litre	310 litre

Çizelge 3.1'e göre bir bilgisayar içindeki mikroçiplerin üretilmesi için 310 litre suya ihtiyaç varken, bu rakam dünya genelinde yılda 570 milyar litreye kadar çıkmaktadır. Yine bir yılda dünya genelinde insan sağlığına zararlı, açığa çıkan kimyasal miktarı ise 1.3 milyon tondur.

Çizelge 3.2. Bir adet LCD monitör üretiminde kullanılan malzemeler (Pochampally ve ark. 2009)

Malzeme	Miktar
Fotolitografi ve diğer kimyasallar	3.7 kg
Elemental gazlar (N_2, O_2, Ar)	5.9 kg
Elektrik	87 kWh
Doğrudan fosil yakıt (%98 doğal gaz)	198 kg
Katı fosil yakıt	226 kg
Su	1,290 litre

Hem bilgisayarlarda hemde diğer cihazlarda kullanılabilen LCD monitör üretiminde de benzer durumlar söz konusudur. Örneğin 1 adet LCD monitör üretiminde yaklaşık 1290 litre su tüketilirken, kullanılan elektrik miktarı da 87 kWh'dır.

Geri dönüşümün çevresel boyutlarının yanında, birtakım sebeplerden dolayı ürün geri dönüşleri de TTZ/KDTZ'lerin önemli bir itici gücüdür. Kullanılmış ürünler, parçalar, malzemeler ve teçhizatlar çeşitli nedenlerden dolayı zincire yeniden dahil olmaktadır. Kalite özelliklerini sağlayamama, kullanıcısı tarafından istenmeme, fazla üretim, fiziki ömür sonuna gelme, garanti kapsamında bozulma vb. sebepler örnek olarak gösterilebilir. Tedarik zinciri hiyerarşisine göre ürün geri dönüş sebepleri üç sınıfa ayrılır. Bunlar (Şengül, 2011);

Üretim geri dönüşleri: Üretim sırasında oluşabilecek hatalardan dolayı olan ürün geri dönüşleridir. Üretim geri dönüşlerine; artık hammadde geri dönüşleri, kalite kontrol geri dönüşleri ve üretim artıkları geri dönüşleri örnek olarak verilebilir.

Dağıtım geri dönüşleri: Dağıtım geri dönüşleri, üretilen ürünün dağıtımı süresince ortaya çıkan geri dönüşleri tanımlamak için kullanılır. Bu geri dönüşler; ürün geri çağırma, ticari geri dönüşler, stok düzenleme ve işlevsel geri dönüşlerdir. Ürün geri çağırma, dağıtılan ürünlerin güvenlik ya da sağlık problemlerinden dolayı geri toplatılması işlemleridir. Ticari geri dönüşler, genellikle yapılan sözleşme gereği bir perakendecinin ürünleri tedarikçiye geri göndermesini içerir. Stok düzenlemede, zincirde yer alan bir aktörün stoklarını yeniden dağıtması sonucu ortaya çıkar. Bu konuda antrepo ve mağazalar arasında yapılan stok uyarlaması örnek olarak gösterilebilir. Son olarak, fonksiyonel geri dönüşler, dağıtımda kullanılan konteyner, palet vb. araçların geri dönüşünü içerir. Bu ürün taşıyıcıları temel bir işleme tabi tutulmaksızın tekrar kullanılabilmelerinden dolayı ekonomik olarak ilgi çekicidirler.

Tüketici/kullanıcı geri dönüşleri: Bu geri dönüşler ürünün tüketiciye ulaştıktan sonra çeşitli sebeplerden dolayı geri gönderilmesi ile oluşur. Garanti kapsamındaki geri dönüşler, servis geri dönüşleri (tamir ve yedek parça) ve kullanım ve yaşam sonu geri dönüşleri bu kapsamdaki dönüşlerdir.

Örnek olarak A.B.D.'deki gri ve beyaz eşyalara ait ürün geri dönüş oranları ve sebepleri Çizelge 3.3 ve 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Sebeplerine göre tüketim malları geri dönüşleri (Blumberg, 2005)

		Yıllık geri dönüş oranları	
	Geri dönüş sebepleri	**Gri eşya**	**Beyaz eşya**
Arızalı	Üretim kaynaklı ürün hatası	%9.4	%1.5
	Taşıma kaynaklı ürün hatası	%2.3	%1.2
Arızasız	Stok dengeleme kaynaklı ürün hatası hata	%3.6	%0.5
	Taşıma kaynaklı ürün hatası	%3.2	%0.3
	Kullanım ömrü bitmesi veya memnuniyetsizlik	%7.5	%1.0
Toplam		%26.0	%4.5

Çizelge 3.3'e göre gri eşyaların ürün geri dönüş oranları beyaz eşyalara göre çok daha fazladır. Bunun temel sebebi elektronik ürünlerin çok çabuk bozulmaları ve ürün yaşam döngülerinin çok kısa olmasıdır. Diğer taraftan gri eşyalarda arızalı geri dönüş oranları (%11.7), arızasız geri dönüş oranlarından (%14.3) daha düşük iken, bu durum

beyaz eşyalarda tam tersidir. Gri eşyaların beyaz eşyalara göre daha az karmaşık olması üretimden kaynaklı hataların da daha az olmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan beyaz eşyaların ürün yaşam döngüleri gri eşyalara göre daha fazla olduğundan, arızasız geri dönüşler oranları da aynı oranda daha düşüktür.

Çizelge 3.4. Beyaz ve gri eşyalara ait ürün geri dönüş oranları* (Blumberg, 2005)

			Arızalı		Arızasız	
Ürünler	**Ürün/üretim hatası**	**Taşıma hatası**	**Stok dengesi**	**Taşıyıcı hatası**	**Müşteri dönüşü**	**Toplam****
Beyaz eşya						
Kurutucu	%19	%37	%5	%2	%37	%3.5
Ocak	%20	%39	%7	%2	%35	%3.9
Bulaşık makinesi	%24	%41	%3	%1	%31	%3.9
Mikrodalga	%28	%46	%1	%1	%24	%6.8
Klima	%39	%40	%2	%2	%16	%4.7
Çöp öğütücü	%31	%30	%2	%1	%29	%4.5
Su ısıtıcı	%36	%35	%3	%2	%27	%4.4
Buzdolabı	%21	%41	%2	%1	%35	%4.6
Ortalama	%27	%39	%3	%2	%29	%4.5
Gri eşya						
TV	%32	%12	%18	%16	%38	%18.6
Müzik seti	%38	%4	%16	%14	%34	%28.9
VHS oynatıcı	%40	%4	%16	%14	%26	%29.3
PC	%35	%10	%14	%12	%28	%23.6
Dizüstü	%31	%8	%10	%8	%28	%25.8
DVD oynatıcı	%37	%8	%10	%8	%24	%26.8
Ortalama	%36	%8	%14	%12	%30	%26.0

* üretici oranları; ** taşınan ürün yüzdesi

Çizelge 3.4'e göre buzdolabı, kurutucu ve ocak en düşük geri dönüşüm oranlarına sahip ürünlerken; su ısıtıcıları, müzik setleri ve VHS/DVD oynatıcıları en yüksek ürün geri dönüş oranlarına sahip ürünlerdir.

Geri dönüşümün çevresel etkisi ve ürün geri dönüşlerinin fazla olmasının yanında diğer bir itici güçte işletmelerin uyması gereken uluslararası standartlardır. Uluslararası Stadart Organizasyonu (USO/ISO), çıkarttığı ISO 14000 çevre yönetimi standardizasyonu serisi ile işletmelerin üretim süreçlerindeki zararlı atıkların bertaraf edilmesi ve çevreyi kirletmeyecek şekilde yeniden yapılandırılmasını sağlayacak standartları belirtmiştir (Giudice ve ark. 2006). Bu standartlar sayesinde işletmeler ürün yaşam döngü analizi (YDA) konusunda belirli bir standarda erişirler. Çizelge 3.5'te ISO 14000 serisinin alt başlıları ve içerikleri verilmiştir. Yinelenen standartlar bir önceki standardın güncellenmiş halidir.

Çizelge 3.5. Ürün YDA için USO standartları (Gupta ve Lambert, 2008)

Standart	Başlık	İçerik
ISO 14040: 1997	İlkeler ve çerçeve	Ürün YDA çalışmaları için gerekli olan bilgiler, genel içerik ve ilkeler
ISO 14041: 1998	Amaç ve kapsam tanımı ve envanter analizi	YDA'nın tanımı/kapsamı ve envanter analizi için derlenmesi ve hazırlanması için gerekli şartlar ve prosedürler
ISO 14042: 2000	Yaşam döngüsü etki analizi	YDA'nın yaşam döngüsü etki analizi aşaması için genel çerçeve
ISO 14043: 2000	Yaşam döngüsü yorumlanması	YDA'nın yaşam döngüsü yorumlanma aşamasının yürütülmesi için gereksinimler ve öneriler
ISO 14040: 2006	İlkeler ve çerçeve	Potansiyel kullanıcılar için YDA'nın uygulamaları ve sınırları
ISO 14044: 2006	Gereksinimler ve kılavuz	Ürün yaşam döngü envanterinin hazırlanması, yürütülmesi ve kontrol edilmesi

Yukarıda verilen Dünya genelindeki standartların ve yasal düzenlemelerin yanında, ülkemizde de kabul edilmiş birtakım yönetmelikler bulunmaktadır. Ülkemizde AB uyum yasaları çerçevesinde hazırlanıp kabul edilmiş çevreyle ilgili yönetmelikler Çevre ve Şehircilik Bakanlığı web sitelerinde bulunmaktadır. İzleyen paragraflarda mevcut yönetmelikler kısaca özetlenmiştir (Erol ve ark. 2006).

Atık Elektrik Elektronik Eşyaların Kontrolü ve Yönetimi Yönetmeliği (AEEE Yönetmeliği): Atık elektrik ve elektronik eşyaların toplatılması, geri kazanımı ve uygun bertarafını teşvik etmek için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, AB'nin ilgili yönetmeliğini temel alarak bir AEEE yönetmeliği hazırlamıştır. Bu yönetmelikte önemli bir unsur "Üreticinin Sorumluluğu" prensibidir. Bu sorumluluk, üreticilerin ve ithalatçıların ürünlerinin son kullanıcılar tarafından kullanıldıktan sonra geri kalan atığın belirli bir yüzdesinin geri kazanımı faaliyetlerini kapsar. Üreticiler ve ithalatçılar aynı zamanda geri kazanım faaliyetlerini izlemek ve miktarlarını piyasaya sürdükleri ürün miktarı ile karşılaştırmak ve bu bilgilere yönelik kanıtlar sunmak zorundadırlar. Önemli noktalardan biri, yönetmelikteki hükümlerin satış tekniklerine bakılmaksızın (doğrudan/uzaktan/elektronik satış) bütün ürün ve üreticileri kapsamasıdır.

Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği: Bu yönetmelik pil ve akümülatör ürünlerinin etiketlenmesi ve işaretlenmesi, üretiminde zararlı madde miktarının azaltılması, kullanıldıktan sonra atıklarının evsel ve diğer atıklardan ayrı olarak toplanması, taşınması, bertarafı ile ithalat, transit geçiş ve ihracatına ilişkin yasak,

sınırlama ve yükümlülükleri, alınacak önlemleri, yapılacak denetimleri, tabi olunacak sorumlulukları düzenlemektedir.

Ambalaj ve Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği: Bu yönetmeliğin amacı çevresel açıdan belirli kriter, temel koşul ve özelliklere sahip ambalajların üretimi, ambalaj atıklarının çevreye zarar verecek şekilde doğrudan ve dolaylı bir şekilde alıcı ortama verilmesinin önlenmesi, öncelikle ambalaj atıklarının oluşumunun önlenmesi, önlenemeyen ambalaj atıklarının tekrar kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım yolu ile bertaraf edilecek miktarının azaltılması, ambalaj atıklarının yönetiminde gerekli teknik ve idari standartların oluşturulması ve bunlarla ilgili prensip, politika ve programlar ile hukuki, idari ve teknik esasların belirlenmesidir. Bu yönetmelik, kullanılan malzemeye (plastik, metal, cam, kağıt, karton, kompozit ve benzeri) ve kaynağına (evsel, endüstriyel, ticari, işyeri) bakılmaksızın ülke içinde piyasaya sürülen bütün ambalajları ve ambalaj atıklarını kapsamaktadır.

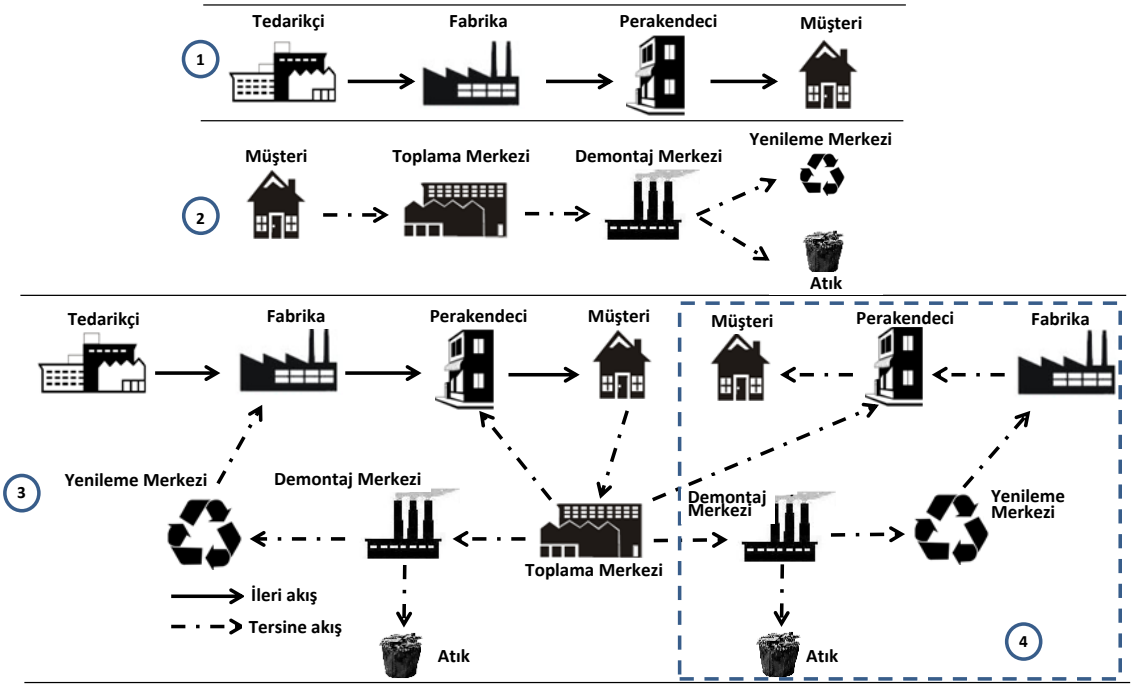
Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği: Bu yönetmeliğin amacı, her türlü atık ve artığın çevreye zarar verecek şekilde, doğrudan veya dolaylı bir biçimde alıcı ortama verilmesi, depolanması, taşınması, uzaklaştırılması ve benzeri faaliyetlerin yasaklanması, çevreyi olumsuz yönde etkileyebilecek olan tüketim maddelerinin idaresini belli bir disiplin altına alarak, havada, suda ve toprakta kalıcı etki gösteren kirleticilerin hayvan ve bitki nesillerini, doğal zenginlikleri ve ekolojik dengeyi bozmasının önlenmesi ile buna yönelik prensip, politika ve programların belirlenmesi, uygulanması ve geliştirilmesidir. Bu yönetmeliğe göre katı atık üreten kişi ve kuruluşlar, en az katı atık üreten teknolojiyi seçmekle, mevcut üretimdeki katı atık miktarını azaltmakla, katı atık içinde zararlı madde bulundurmamakla, katı atıkların değerlendirilmesi ve maddesel geri kazanma konusunda yapılan çalışmalara katılmakla yükümlüdür.

Hayat Seyrini Tamamlamış Taşıt Araçları Direktifi: Türkiye'de otomotiv sanayinde geri kazanım faaliyetleri ile ilgili AB uyum süreci kapsamında 2000 yılında kabul edilen Hayat Seyrini Tamamlamış Taşıt Araçları Direktifi mevcuttur. Bu direktif, otomotiv sektörüne yeni taşıt geri dönüşüm hedeflerini gerçekleştirmek üzere bazı finansal ve fiziksel sorumluluklar yüklemektedir. 2006 yılına kadar hayat seyrini tamamlamış bir aracın ağırlığının yüzde 85'inin, 2015'e kadar da yüzde 95'inin yeniden kullanılması ya da geri dönüşümü bu direktifle hüküm altına alınmıştır.

TTZ ve KDTZ ağları

Geri dönüşüm ile ilgili yukarıda verilen yasal, çevresel ve ekonomik göstergeler, işletmeleri, nihai kullanıcılarından kullanılmış ürünleri yeniden toplayıp bu ürünleri tekrardan değerlendirmek zorunda bırakmıştır. Ürünlerin yeniden kazanımı için, kullanılmış ve geri kazanılmış ürünlerin akışına imkan veren uygun lojistik yapıların oluşturulması gerekmektedir. Bunun başarılabilmesi için sadece ileri yönde etkili akış sağlayan bir lojistik ağı yeterli olmamakta, geleneksel tedarik zinciri yapılarının revize edilmesi gerekli kılınmaktadır.

Bir imalat tesisinin, daha önceden taşınmış ürün ya da parçaları mümkün geri dönüşüm, yeniden imalat ya da bertaraf işlemlerinden birini uygulamak üzere tüketim noktasından sistematik bir şekilde yeniden elde etmesi, tersine yönde tedarik zincirleri sayesinde sağlanır (Dowlatshahi, 2005; Zhou ve Zhang, 2007). Bir TTZ kullanılmış ürünlerin tüketicilerden toplanması, yeniden değerlendirilmesi ve gerekiyorsa bertaraf edilmesi gibi işlemlerin yer aldığı tersine akışlı bir yapı iken, ileri ve tersine zincirlerin kombinasyonlarına döngülü tedarik zincirleri adı verilir (Alumur ve ark. 2012). Eğer, kullanıcılardan toplanan ürünler tekrardan mevcut İTZ'ye dahil ediliyor ise bu döngü kapalı bir döngüdür ve KDTZ ağı olarak adlandırılır. Eğer kullanılmış ürünler başka bir İTZ ağ yapısına dahil edilmiş ise bu döngü açık bir döngü olup, açık döngü tedarik zinciri (ADTZ) olarak adlandırılır. Örnek İTZ (1), TTZ (2), KDTZ (3) ve ADTZ (4) ağları Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. İTZ (1), TTZ (2), KDTZ (3) ve ADTZ (4) ağları

Tedarik zincirinde geriye doğru akan malzemeler, ileriye doğru akanlardan farklı özellikler taşımaktadır. Her şeyden önce daha düşük değer içermektedirler; çünkü yeni olmayıp kullanılmışlardır. Ayrıca farklı ulaştırma ve depolama koşullarını gerektirirler. Ek olarak, kullanılmış ürünlerin toplanmasında miktar, zamanlama ve kaliteleriyle ilgili önemli oranda değişkenlikler söz konusudur. Geriye akışın ileriye akışla bütünleştirilmesi (tesislerin kullanımı, yeni tesisler için yer seçimi, yeni toplama/ulaştırma sistemlerinin kurulması, vb.) yani KDTZ ve ADTZ'ler ise başlı başına bir sorundur. Bu nedenlerle geriye akışın planlanması ve kontrolü giderek daha fazla araştırmacının ilgi gösterdiği bir alan olarak ortaya çıkmaktadır.

TTZ ve KDTZ ağlarının İTZ ağlarına göre farklılıkları

TTZ ağları İTZ ağlarının simetrik bir şekilde tersi gibi gözükse de, yapılan faaliyetlerden ve sistemin genel belirsizliğinden dolayı ciddi oranda farklılıklar bulunmaktadır. İleri ve tersine akıştan kaynaklı temel farklar Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. İleri ve TTZ/KDTZ ağları arasındaki farklar (Wang ve Hsu, 2010b)

İTZ	**TTZ/KDTZ**
Tahminler kolay ve belirgindir.	Tahminler oldukça güçtür.
Kar-fayda odaklıdır.	Çevreye duyarlı ürün odaklıdır.
Dağıtım tek kaynaktan çok kaynağa doğrudur.	Dağıtım çok kaynaktan tek kaynağa doğrudur.
Ürün kalitesi standarttır.	Ürün kalitesi standart değildir.
Ürün paketleme sabittir.	Ürün paketleme sabit değildir.
Ürün yapısı standarttır.	Ürün yapısı standart değildir.
Dağıtım rotası belirlidir.	Dağıtım rotası belirsizdir.
Dağıtım kanalları belirlidir.	Dağıtım kanalları belirsizdir.
Ürün/ücret fiyatlandırması standarttır.	Ürün/ücret fiyatlandırması standart değildir.
Hız önemlidir.	Hız önemli bir faktör değildir.
Maliyetlendirme kontrol edilebilirdir.	Maliyetlendirme zor belirlenir ve zor kontrol edilir.
Stok yönetimi kolaydır.	Stok yönetimi zordur.
Ürün yaşam eğrisi kolay yönetilir.	Ürün yaşam eğrisi karmaşıktır.
Pazarlama yöntemleri belirlidir.	Pazarlama yöntemleri karmaşıktır.
Ürün kontrol edilebilirliği ve izlenebilirliği açıktır.	Ürünlerin izlenebilirliği zordur.
Taraflar arası anlaşmalar belirli ve kesindir.	Taraflar arası anlaşmalar her an değişebilir.

Yukarıdaki çizelgede kısaca belirtilen farklar, aşağıda detaylı şekilde maddelenmiştir (Guide, 2000; Karaçay, 2005).

- Tersine lojistik, içerdiği belirsizlikler sebebi ile tahminler, planlamalar ve kontroller yapılması daha zor bir akış türüdür. Geri dönen ürünün miktarı ve zamanlaması hakkında belirsizlikler bulunmakta, dahası firmanın ürettiği her ürün için farklı bir dönüş oranı geçerli olmaktadır.

- İleri lojistik, bir orijin noktasından birçok dağıtım noktasına olacak şekilde akarken, tersine lojistikte bunun tersi geçerlidir. Geri dönüşler perakendeciler aracılığı ile de gerçekleşebilir ancak, ileri ve geri lojistiğin bazen aynı dağıtım noktalarına sahip olması, bunların bütünleştirilebileceği anlamına gelmemektedir.

- İleri lojistikte ürün ve paketleme kalitesi belirli ve aynıdır, bu da taşımayı kolaylaştırır. Ancak, geri dönüşlerde ürünler tam olarak paketlenmemiş olabilir. Aynı zamanda, dönen ürünler, giden yeni ürünler kadar büyük miktarlarda olmadığından, bunlar için taşımayı kolaylaştırıcı paketlemeler (paletler, konteynırlar) kullanılamamaktadır.

- Geri dönen ürünün kalitesi standart olmadığından tedarikçi, müşterilere satın aldıkları ürün miktarı ve diğer birçok faktöre bağlı olarak farklı fiyatlar uygulayabilir.

- İleri lojistikte maliyetler tanımlanmıştır ve belirlidir. Muhasebe sistemleri, ileri akış kanalı boyunca olacak maliyetleri izleyecek şekilde tanımlanmıştır. Ancak, tersine lojistikte farklı maliyetler, ileri lojistikten farklı şekilde ortaya çıkacaktır. Çizelge 3.7, ileri ve tersine lojistik maliyetlerinin karşılaştırmasını yapmaktadır. Tersine lojistikteki en önemli maliyetlerden biri, nakliye aktivitelerine ilişkin maliyettir. Nakliye miktarının az olması ve paketlemenin düzgün olmaması nakliye maliyetlerinin artmasına sebep olur. Stok bulundurma maliyeti ise değişkendir, daha düşük miktarlarda olduğundan stok maliyetinin daha düşük olması beklenebilir. Ancak, paketlemenin düzgün olmaması, bozulmalar ve mevsimsel dalgalanmaların olması ürünün ikinci el pazarlarındaki değerini düşürebilir.

Çizelge 3.7. Tersine lojistikte maliyet düzeyi (Karaçay, 2005)

Maliyet kalemleri	**İleri lojistik ile karşılaştırma**
Nakliye	Daha yüksektir
Stok bulundurma maliyeti	Daha azdır
Fire/kayıp	Çok azdır
Eskime	Daha yüksek olabilir
Toplama	Çok yüksek-daha az standartlaştırılmış
Sınıflama/kalite tanımlama	Çok daha yüksek
Yenileme/yeniden paketleme	Tersine lojistik için önemlidir, ileri lojistikte yoktur

- Geleneksel stok kontrol yöntemlerinde geçerli olan varsayımların çoğu, tersine lojistikte uygulanamamaktadır. Tersine lojistik kanalına ürün girişleri, satış fiyatı, talep gibi değişkenler ortamın belirsizliğini artırmaktadır.

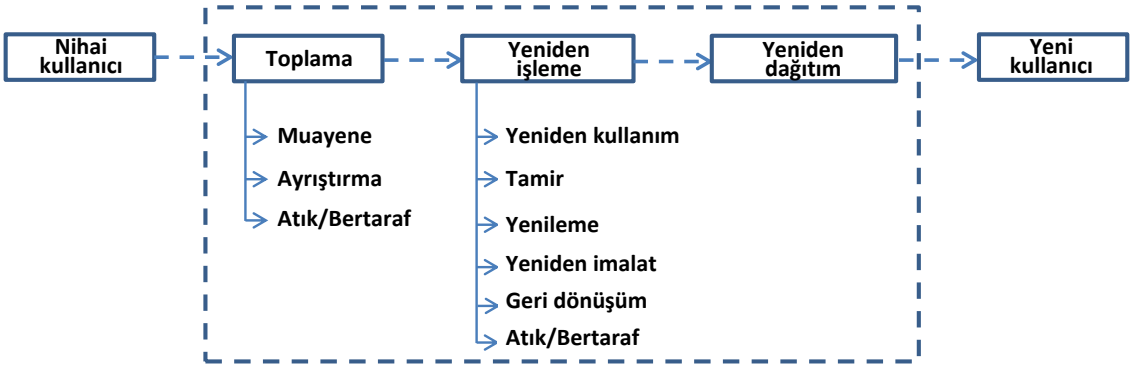
- İleri lojistikte, tedarik zincirindeki taraflarla yani tedarikçi ve satıcı ile anlaşmalar yapılması daha kolaydır. Ancak tersine lojistikte ürünün bir örnek olmaması, miktar ve fiyat belirsizliği, talep değişkenliği gibi sebeplerle anlaşmalar daha karmaşık olacaktır.

- Tersine lojistikte akışın izlenmesi, ileri lojistiğe kıyasla daha güç olmaktadır. Çünkü firmaların bilişim sistemleri, geri dönüşleri takip edecek şekilde

tasarlanmamaktadır. Bu da ürün gelişlerini takip etmeyi zorlaştırmakta, kısa dönemli operasyon planları yapılmasını bile oldukça güç kılmaktadır. Merkezi toplama sistemlerinde uygun bilişim sistemleri kullanılması, planlayıcıların daha uzun dönemlik ve etkin planlar yapmasını sağlayacaktır.

TTZ ve KDTZ aktiviteleri

Gerek TTZ gerekse KDTZ'leri gibi geri dönüşüm süreçlerinin olduğu her iki tipteki ağ yapısında da toplama, yeniden işleme ve yeniden dağıtım olmak üzere 3 temel süreç vardır. Şekil 3.2, bu 3 temel adımı ve alt işlemlerini göstermektedir.



Şekil 3.2. TTZ/KDTZ işlem adımları (Thierry ve ark. (1995)'dan uyarlanmıştır)

Temeldeki 3 adımın ve hangi alt işlemlerin uygulanacağı; ürünün yapısı, özellikleri, dönen ürün miktarı, kalitesi, teknolojik ve ekonomik kısıtlar gibi faktörlere bağlıdır. Hangi seçeneğin uygulanacağı, o ürünün geri kazanımı ve bertarafı ile ilgili kanuni düzenlemelerin olup olmaması ve düzenlemenin içeriğine bağlı olarak da değişebilmektedir. Firmalar kanunlara uyma, bilinçli müşteri beklentilerine karşılık verebilme ve kar elde etme arzusuyla farklı geri kazanım seçenekleri uygulayabilirler. Şekil 3.2'de gösterilen ve genel olarak kullanılan işlem adımları aşağıda açıklanmıştır (Thierry ve ark. 1995):

İlk işlem adımı olan ***Toplama*** (collection), birtakım sebeplerden dolayı kullanılmış ürünlerin nihai kullanıcılardan geri kazanılmak üzere toplanmasını ifade etmektedir. Toplama işlemi muayene (inspection), ayrıştırma (seperation) ve bertaraf etme (disposal) alt işlemlerini içerebilir. Muayenede, geri dönen ürünlerin yeniden kullanılabilir durumda olup olmadığı kontrol edilirken, ayrıştırmada muayeneden geçen

ürünlerin hangi geri kazanım seçeneğiyle geri kazanılacağı kararı alınır. Yani, planlanan geri kazanım seçeneğine bağlı olarak ürünler, kalitelerine ve izleyecekleri rotalara göre tasnif edilir. Eğer kullanılmış ürün toplandıktan sonra geri kazandırılamayacak kadar kötü durumda ise bertaraf edilir.

Yeniden işleme (reprocessing) kullanılmış bir ürününün ürün veya parça olarak tekrardan kullanılabilir hale getirildiği aşamadır. Bu aşama yeniden kullanım (reusing), tamir (repairing), yenileme (refurbishing), yeniden imalat (remanufacturing), geri dönüşüm (recycling) ve toplama da olduğu gibi bertaraf etme işlemlerinden meydana gelir.

- ***Yeniden kullanım*** (reusing) kullanılmış bir ürünün üzerinde herhangi bir iyileştirici işlem yapılmaksızın tekrardan kullanımıdır. Yeniden kullanım, kullanılmış ürünün yine aynı amaçla kullanılması şeklinde olabilirken, farklı bir alandaki kullanımı da söz konusudur. Ürünün hiçbir parçası bu işlemden etkilenmez. Şekil 3.3'te yeniden kullanıma ait birkaç örnek verilmiştir. Şeklin sol tarafındaki resimde bir tel makarasının masa olarak kullanıldığı gösterilmişken, sağ taraftaki resimde ampuller mum olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Yeniden kullanıma örnek (Wikipedia, 2013a)

- ***Tamir*** (repairing) kullanılmış ürünün çalışır ya da yeniden kullanılabilir duruma getirmek için onarılmasıdır. Tamir edilmiş ürünün kalitesi, genellikle yeni ürüne nazaran daha düşüktür. Tamir işleminde, üründe yer alan hasarlı parçalar onarılır ya da yenileriyle değiştirilir. Ürün garantisi kapsamında dönen ürünler tamir seçeneğine örnek olarak verilebilir. Şekil 3.4'te ekranı kırılmış ve tamir edilmiş bir telefon örneği gösterilmiştir. Tamir işleminde genel bir işlem yapılmazken, sadece tamir edilecek kısım ile ilgilenilir.



Şekil 3.4. Ekran tamiri (Wikipedia, 2013a)

- ***Yenileme*** (refurbishing) işlemi, kullanılmış ürünün kalitesini artırmak ve ömrünü uzatmak amacıyla önemli modüllerin kontrol edilmesi, yenileriyle değiştirilmesi, teknolojik yeniliklerin ilave edilmesi gibi işlemleri içerir. Amaç, kullanılmış ürünü belirli bir kalite seviyesine (sıfır ürün kalitesine yakın) taşımaktır. Bazı durumlarda tamir ve yenileme işlemleri aynı şeyi ifade edebilir. Tamir sadece belirli bir nokta (hasarlı kısım) ile ilgilenirken, yenileme işleminde kullanılmış ürünün genel bir bakımı, hatalı bir parçası var ise değiştirilmesi gibi kapsamlı bir işlem yapılır. Tamir edilen ürün garanti kapsamında olmayabilirken, yenilenen ürün sıfır ürün süresi kadar olmasa da garanti kapsamında sayılabilir. Şekil 3.5'te ürün yenilemeye bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.5. Ürün yenileme (Wikipedia, 2013a)

- ***Yeniden imalatın*** (remanufacturing) amacı, kullanılmış ürünü yeni ürünün kalite standartlarına ulaştırmaktır. Yeniden imal edilen ürünler, yeni ham maddeler

kullanılarak imal edilen yeni ürünlerle aynı özelliklere sahiptir. Yeniden imalatta ürünler tamamen demonte edilir, tüm modül ve parçalar kontrol edilir, tamir edilebilir durumda olanlar tamir edilerek, ayrıntılı teste tabi tutulur, eskimiş, teknolojisi geride kalmış olanlar ise yenileriyle değiştirilir.

- Bir önceki işlem olan yeniden üretimde kullanılmış ürün eski işlevselliğine döndürülmeye çalışılırken, ***Geri dönüşümde*** (recycling), ürün ve bileşenlerin özellik ve fonksiyonları kaybolur. Geri dönüşümün amacı, kullanılmış ürün ve bileşenlerin yeniden kullanılabilmesidir, dolayısıyla bu işlemin çıktısı ürün seviyesinde değil bileşen ve/veya parça seviyesindedir. Elde edilen malzemenin kalitesi yüksek olduğunda, geri kazanıldığı ürünlerin yenilerinin üretiminde, aksi takdirde başka ürünlerin üretiminde yeniden kullanılabilir.

- ***Bertaraf etme*** (disposal) işleminde teknik ve ekonomik açıdan hiçbir şekilde kullanılamaz olan parçalar sistem dışına çıkarılır ve yakma, gömme gibi işlemler ile yok edilir.

Şekil 3.2'de gösterilmese de, yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı gibi demontaj faaliyeti tüm geri dönüşüm süreçlerinde yer almaktadır. Demontaj işlemi kısmi ve tam demontaj olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilir. Kısmi demontajda ürünler tamamıyla demonte edilmez iken, tam demontajda ürün tüm alt parçalarına kadar ayrıştırılır. Demontaj ile ilgili detaylı bilgiler bir sonraki bölümde verilmiştir. Yeniden işleme seçeneklerinin farklı açılardan karşılaştırılması Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Yeniden işleme seçeneklerinin karşılaştırılması (Thierry ve ark. 1995)

Seçenekler	Demontaj seviyesi	Kalite gereksinimleri	Ortaya çıkan ürün	Örnek
Yeniden kullanım	Demontaj yok	Ürün mevcut ya da farklı alandaki kullanımına hazırdır	Aynı ürün	Tel makarasının masa olarak kullanılması, plastik şişelerden avize yapılması
Tamir	Ürün seviyesi	Ürün çalışır durumdadır.	Bozuk veya hasarlı parçalar tamir edilir, aynı ürün ortaya çıkar.	ifixit.com web sitesi aracılığıyla kullanılmış ürünler tamir edilerek, tekrardan hazır hale getirilmektedir.
Yenileme	Ürün ve modül seviyesinde	Tüm modüller detaylı bir şekilde incelenir, teknolojik alt yapı güncellenir.	Bazı modüller tamir edilir, yenisi ile değiştirilir, genel bir güncelleme yapılır, aynı ürün ortaya çıkar.	Apple bir yıl garantili şekilde yenilenmiş bir Ipad'i 319 dolara satarken, sıfır Ipad'in bir yıl garantili fiyatı 399 dolardır.
Yeniden imalat	Parça seviyesinde	Tüm modüller ve parçalar incelenir, yenileri ile değiştirilir.	Yeni ve kullanılmış parçalardan oluşan aynı ürün ortaya çıkar.	BMW kazalı ve kullanılmış arabalardaki motor ve alternatörleri yeniden imal ederek yeni bir görüntü kazandırmaktadır. Kullanılmış ürünlerin yeniden imalat maliyeti, sıfırdan üretim maliyetinin yaklaşık %50-60'ı kadardır.
Geri dönüşüm	Parça ve malzeme seviyesinde	Orijinal parçaların üretimi için yüksek, diğerleri için düşüktür.	Ortaya kullanılmış parçalar çıkar ve bu parçalar başka bir ürünün üretiminde kullanılır.	Almanya, İngiltere ve A.B.D.'de ki hurda arabaların yaklaşık %75'i geri dönüştürülmektedir.

Yeniden dağıtım (redistribution), geri kazanılan kullanılmış ürünlerin, tekrardan satış, taşıma ve depolama faaliyetlerini içerecek şekilde yeniden pazara sunulması işlemidir. Bu aşama geleneksel dağıtım ağına benzer ancak aralarında bazı farklılıklar vardır. Örneğin, geleneksel dağıtımda ürünlerin rotaları önceden bilinmekte iken, tersine lojistikte ürün rotaları muayene ve ayıklama sürecinin sonunda ortaya çıkar. Yeniden dağıtım stratejilerinin oluşturulmasında şüphesiz ki dikkat edilecek en önemli unsur piyasadan toplanabilecek ürün miktarlarıdır. Bu nedenle miktarla ilgili olarak aşağıda sıralanan unsurlar ayrı ayrı gözden geçirilmelidir (Şengül, 2011).

- Belli bir zaman diliminde toplanabilen ürün miktarı, cinsi, ürün miktarındaki değişiklik,

- Çöplerin veya atık kaynaklarının sayısı, miktarı,
- Kaynakların bölgesel dağılımı,
- Yardımcı nakliye araçlarının kullanımı,
- Toplanan malların değişik kullanım alanlarının varlığı,
- Kaynakların çöp toplama merkezlerine olan ortalama uzaklığıdır.

Yeniden dağıtım işleminde birkaç alternatif vardır. Bunlar (Karaçay, 2005):

Outlet ile satış: Daha çok marka duyarlı firmalar tarafından uygulanır. Üretici ürünleri geri alır ve işlemlerden sonra kendi outlet mağazalarında bu ürünleri satar.

İkincil pazarlara satış: Ürünleri düşük fiyata alan firmalar bu pazarı işletirler. Firmalar ürünleri bu pazarda kendi dükkanlarında veya diğer perakendeciler aracılığı ile satabilirler.

Kurumlara bağış: Bazı durumlarda ürünü belirli organizasyonlara vermek bir alternatif olacaktır. Bu seçenek aynı zamanda vergi avantajı da sağlar.

Geri dönmüş ürünün internette açık artırma ile satışı: Şu an birkaç uygulama olmakla beraber, bu uygulamanın gittikçe artması beklenmektedir.

Gömmek: Yok etme son seçenek olmalıdır. Ürün yok edilecekse bile, en az maliyetle veya enerji kazanımı ile (yakma) yok etme uygulanmalıdır.

TTZ ve KDTZ ağlarına ait kararlar

TTZ ve KDTZ ağlarında, İTZ ağlarında olduğu gibi kararlar üç farklı aşamada gerçekleşir. Bunlar, tedarik zinciri tasarımı (stratejik seviye), tedarik zinciri planlaması (taktiksel seviye) ve tedarik zinciri operasyonu (operasyonel seviye)'dur (Pochampally ve ark. 2009):

Tedarik zinciri tasarımı: Bu aşama aynı zamanda stratejik planlama olarak da geçmektedir. Bu aşamada alınan kararlar tedarik zincirinin ilerideki birkaç yılını

etkileyeceğinden ve şekillendireceğinden kolay kolay değiştirilemezler. Hangi yapıda bir ağın tasarlanacağı (TTZ, KDTZ veya ADTZ), tersine akışta yer alacak tesislerin neler (tamir merkezi, toplama merkezi vb.) ve konumlarının ne olacağı, yeniden işleme faaliyetlerinden hangilerinin yapılacağı (tamir, yenileme, demontaj vb.) ve taleplerin karşılanması için ileri ve tersine ağda gerekli olan en uygun ürün akışının tespit edilmesi bu aşamada alınacak kararlardır. Bu aşamadaki kararlar uzun dönemli kararlar olduğundan belirsizlik oldukça yüksektir ve alınan kararların maliyetleri fazladır.

Tedarik zinciri planlama: Taktiksel planlama olarak da anılan bu aşamada, alınan kararlar bir önceki aşamaya göre daha kısa süreli olup aylar ile ifade edilir. İkincil pazar stratejileri, talep tahminleri, ileri ve tersine ağdaki stok planları, tersine dağıtım stratejisi, montaj/demontaj hattı planlama ve yeniden üretim planları bu aşamada alınabilecek kararlardır.

Tedarik zinciri operasyonu: Bu aşamanın diğer bir adı da operasyonel planlamadır. Günlük ve haftalık olarak alınan bu kararlar kısa süreli olduklarından üst seviyedeki kararlara göre daha az belirsizlik içerir. Yeniden üretim çizelgelemesi, nihai kullanıcılardan ürün toplayacak araçların rotalanması ve demontaj/yeniden montaj operasyonları bu aşamada alınan kararlardır.

Yukarıdaki karar aşamaları, TTZ ve KDTZ ağlarının tasarlanmasının ileri lojistik ağlarının tasarlanması kadar basit olmayacağını göstermektedir. Çünkü ürünler müşterilerden toplandığında, izleyecekleri rotalar ürünün durumuna göre değişecektir. Diğer taraftan ürünün tüm bileşenleri imalat tesislerine taşınmaya değecek değerde olmayacaktır. Ürünlerin dönüş zamanları, miktarları ve kalitelerindeki belirsizlikler, geleneksel sistemlerde uygulanan birçok varsayımı tersine lojistik için geçersiz kılmaktadır. İyileştirilen ürünler için son pazarların bilinmemesi ağ tasarımını daha da zor hale getirmektedir. İster stratejik, ister taktiksel isterse operasyonel kararlar olsun, etkili bir TTZ/KDTZ ağının gerekleri aşağıdaki gibidir (Şengül, 2011):

Özel toplama merkezi: Ürün tiplerinin fazlalığından dolayı randımanlı bir toplama merkezine gereksinim vardır.

Sınıflandırma sistemi: İyi tanımlanmış bir sınıflandırma sistemi, ürün çeşitliğinin çok olmasından dolayı gereklidir.

Stok politikası: Esnek bir stok politikası tersine lojistik akışı ile ilişkilendirilmiş elleçleme için gereklidir.

Zamanlama politikası: Toplanacak ürün ne kadar hızlı ele geçirilirse pazarda kalan ürüne göre ekonomik değeri o kadar yüksek olur. Kısa yaşam döngüsüne sahip ürünlerin değerlerini çabuk kaybetmelerinden dolayı, geri dönüşünün daha hızlı olması gerekir.

Enformasyon akışı: Geri kazandırılacak ürünle ilişkili olarak; konuma ilişkin enformasyon, kullanıma ilişkin enformasyon, yasamaya ilişkin enformasyon, pazara ilişkin enformasyon ve sürece ilişkin enformasyon gereklidir.

Esneklik: Uygulama, nakletme vb. gibi kapasitenin de dahil edildiği esnek bir sistem gereklidir.

Çok parçalı koordinasyon: Çeşitli katılımcıların koordinasyonu gereklidir.

3.1.2. Demontaj hattı dengeleme problemi

Demontaj

Çizelge 3.8'de görüldüğü gibi yeniden üretim seçeneklerinden hangisi olursa olsun bu faaliyetlerin içinde kısmi veya tam demontaj söz konusudur. Ürünlerin geri dönüşümünde ve yeniden kazandırılmasında kilit rol oynayan demontajın popülerliği, gerek teoride gerekse pratikte hızla artmaktadır (Altekin ve ark. 2008).

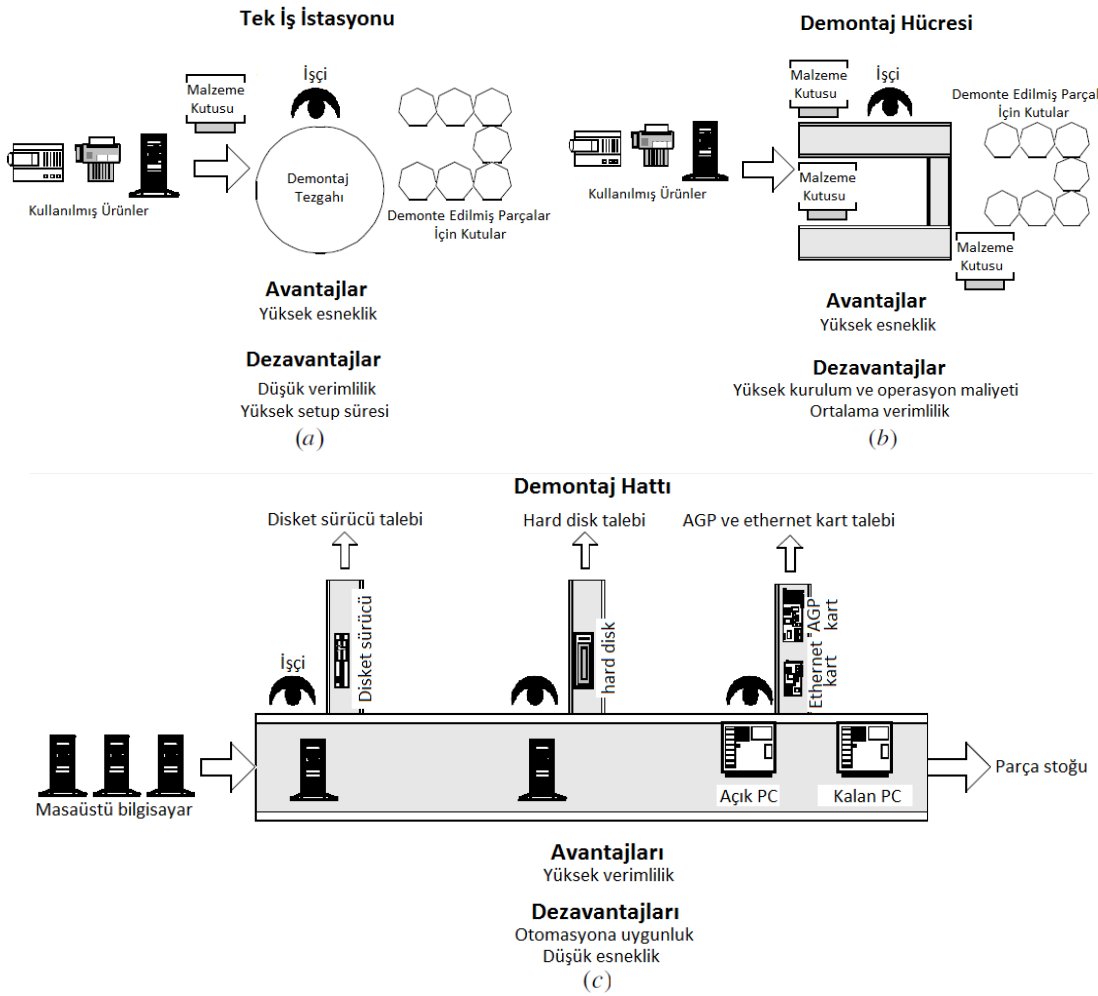
Demontaj, bir ürünün kendisini oluşturan parçalara sistematik bir şekilde ayrılması yani başka bir deyişle tersine montaj olarak tanımlanabilir (Moore ve ark. 2001). Demontajın işletmeler tarafından fazla kullanılmamasının temel sebeplerinden birkaçı kurulum maliyetlerinin yüksek olması, demontaj sonunda elde edilecek olan alt parçaların durumlarındaki belirsizlik, planlamasının zor olması ve bazı durumlarda maliyet açısından avantaj sağlamamasıdır. Buna rağmen Dünyada uzun zamandır

Türkiye'de ise birkaç yıldır beyaz eşya, otomobil ve elektronik gibi sektörlerde kullanım yaygınlığı artmaktadır. Tipik bir demontaj işleminde aşağıdaki durumlar amaçlanır (Güngör ve Gupta, 2001a):

- Diğer parçalara göre daha değerli olan parça ve alt montajların önce sökülmesi,
- Üretimi veya tedariki durdurulmuş parça ve alt montajların ani talep karşısında karşılanması için önce sökülmesi,
- Kimyasal madde içeren zararlı parçaların öncelikli sökülmesi,
- Kimyasal ıslah amacıyla geri kalan ürünün saflığını artırmak,
- İleride kullanılmak üzere stokta bekletilecek parça ve alt montajın çıkarılması,
- Bertaraf edilecek malzeme miktarını azaltmak,
- Çevreye duyarlı üretim standartlarına ulaşmak (hedeflenen geri dönüşümden elde edilen malzeme miktarının sıfırdan elde edilen malzeme miktarına oranının karşılanması).

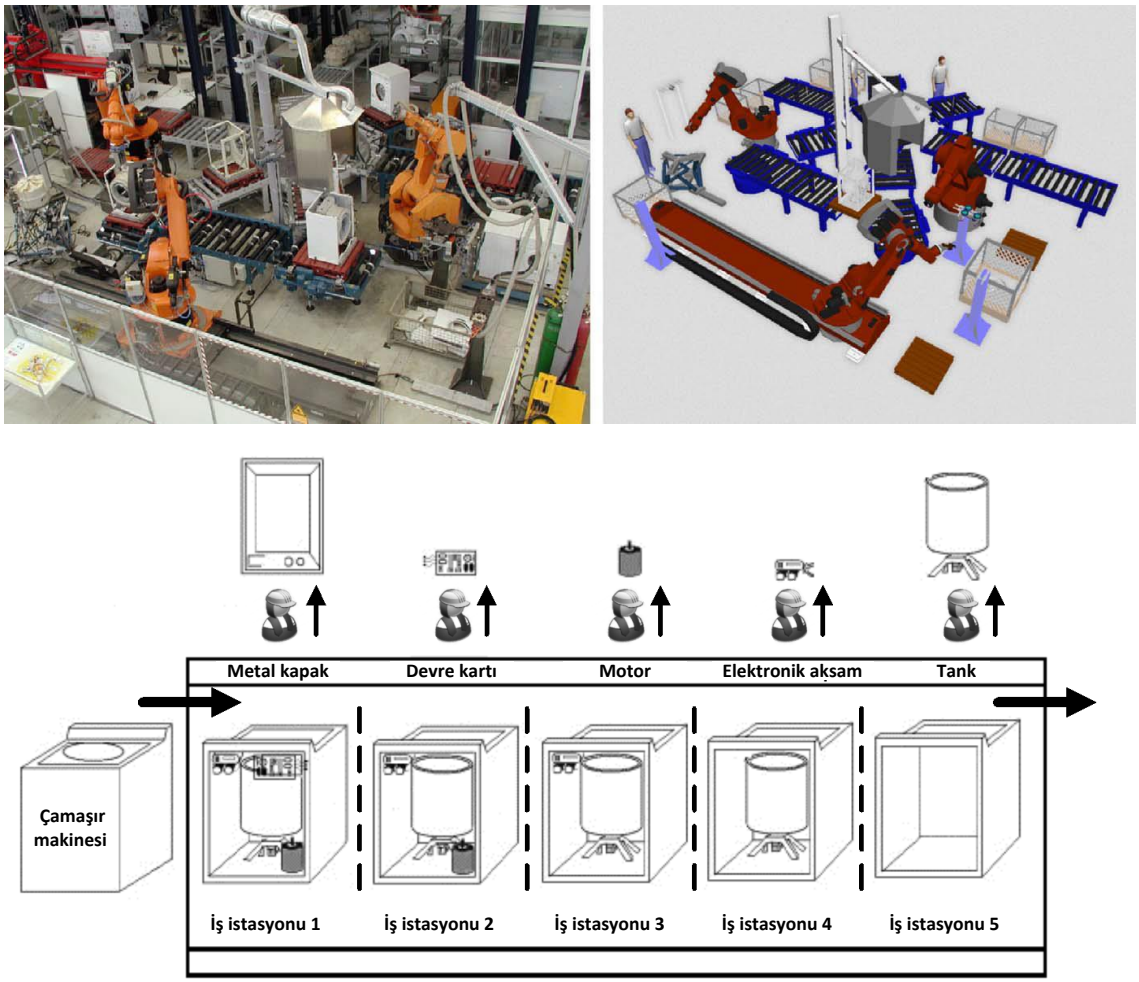
Demontaj hatları

Literatür taramasında da belirtildiği gibi demontaj ile ilgili birçok alt problem (demontaj sıralaması ve çizelgelemesi gibi) olmasına rağmen, Güngör ve Gupta (2001a) demontaj sistemlerinin eksikliklerini vurgulamışlar ve birtakım iyileştirmelerde bulunmuşlardır. Çünkü mevcut demontaj sistemlerinin manuel ve emek yoğun olduklarını belirtmişlerdir. Bundan dolayı demontaj sistemlerinin işçi, para ve zaman gibi temel kaynakları optimize edecek şekilde tasarlanması ve geliştirilmesi söz konusu olmuştur. Geri dönüşüm tesislerinde geri dönen ürünlerin demontajları tek bir iş istasyonunda (Şekil 3.6 (a)), bir demontaj hücresinde (Şekil 3.6 (b)) veya bir demontaj hattında (Şekil 3.6 (c)) gerçekleşebilir.



Şekil 3.6. Demontaj iş istasyonu, hücresi ve hattı (Güngör ve Gupta, 2001a)

Şekil 3.6'da gösterildiği gibi tek bir demontaj iş istasyonu ve demontaj hücresi sökülen parçaların kalitesi ve miktarına göre sıralanmalarında yüksek esneklik gösterse de, en yüksek verimlilik demontaj hatları ile sağlanabilir. Demontaj hatları tümüyle manuel olabildiği gibi hem manuel hem robotik veya tümüyle robotik olabilir. Şekil 3.7'de çamaşır makinesine ait demontaj hatları gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Çamaşır makinesi demontaj hatları (Kim ve ark. 2006; Ilgın ve Gupta, 2011)

Demontaj hatlarının ilk örneklerine 19. yüzyılda Şikago'daki mezbahalarda rastlanmaktadır. Mezbahalarda günlük 5000 ve üzeri domuz, kasaplar tarafından parçalanırken, bir domuzun tümüyle parçalanması yaklaşık 15 dakika sürmektedir. Yüzlerce kasabın bir hat boyunca yaptığı işlemler toplamda 13 adımdan oluşmaktadır: canlı domuzun bacaklarından asılması, boğazının kesilmesi, içinin boşaltılması, derisinin yüzülmesi, temizlenmesi, yıkanması, kancaya asılması, bacaklarının kesilmesi, kellesinin kesilmesi, etin parçalanması, ayrıştırılması, temizlenmesi ve dondurulması (Fitzgerald, 2010). Yukarıdaki ilk örneklerden sonra ürünlerin demonte edilebilir şekilde tasarlanmaları ile demontaj hatlarının popülerliği ve gerçek hayattaki uygulamaları da artmıştır. Literatürden bazı örnekler aşağıda verilmiştir (Altekin, 2005):

- Almanya'daki Zerlegezentrum Gruenbroich fabrikasında buzdolabı, radyatör ve TV gibi ürünler için farklı demontaj hatları kurulmuştur.

- Hollanda'da bulunan ve Philips'in yan sanayisi olan Mirec BV firmasında kullanılmış TV'lerin demonte edildiği demontaj hatları bulunmaktadır. Demonte edilen TV'lerden elde edilen kullanılabilir parçalar Philips tarafından yeni ürün yapımında kullanılmaktadır.
- Yine Hollanda'daki AVR ve Prozon firmalarında kullanılmış buzdolabı ve soğutucuların demonte edildiği hatlar bulunmaktadır.
- Almanya'daki BMW fabrikasında, operasyonları montaj operasyonlarının tam tersi sırada gerçekleşen demontaj hatları yer almaktadır.
- Japonya'da Sharp firmasının çözüm ortağı olan Kansai Geri Dönüşüm firması kullanılmış klima, TV, buzdolabı ve bulaşık makinesi demontajının yapıldığı 4 farklı demontaj hattına sahiptir.
- HP firmasında kullanılmış yazıcıların demonte edildiği hatlar bulunmaktadır ve ortalama olarak 72 saniyede bir yazıcının demontajı yapılabilmektedir.
- Bir otomobil fabrikasında ise toplamda 12 istasyondan oluşan bir demontaj hattı mevcuttur. Amaç kullanılmış araçlardan çelik şasinin elde edilmesidir. 8 saatlik bir vardiyada toplamda 28 araç demonte edilmekte ve hatta 16 işçi çalışmaktadır.

Demontaj hatları yüksek verimlilik içersede, kurulumları sırasında dikkate alınması gereken birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar (Gupta ve Mclean, 1996; Göksoy, 2010; McGovern ve Gupta, 2011):

Ürünle ilgili hususlar: Demontaj hattının karakteristiği hat üzerindeki ürün çeşitliliğine bağlıdır. Demontaj hattı tek tipte bir ürün (tek modelli) veya bir ürün grubu (çok modelli) demontajını içerebilir.

Hattın yapısı ile ilgili hususlar: Montaj hatlarından esinlenerek, demontaj hatları da seri, paralel, hücresel, U-tipli veya çift taraflı olabilir.

Parça ile ilgili hususlar: Demontaj süreci ciddi bir belirsizlik içerdiği için demontaj sonrası ortaya çıkan parçalar kullanılabilir (arızasız) özellikte olabileceği gibi kullanılamaz (arızalı) yapıda da olabilirler.

Operasyonel hususlar: Demontaj görev süreleri kesin, belirsiz veya dinamik olabilirler. Görev zamanlarının bu çeşitliliği ürünün ve işçinin demontaj sırasındaki durumu ve konumuna bağlıdır.

Talep ile ilgili hususlar: İki tipte talep mevcuttur. Talep tek bir parça ve birkaç parçaya (kısmi demontaj) olabileceği gibi tüm alt parçalara da (tam demontaj) olabilir.

Atama ile ilgili hususlar: Demontaj görevlerinin istasyonlara atanması ile ilgili bir takım sınırlamalar vardır. Bu sınırlamalar, benzer görevlerin gruplandırılması, yürüme mesafesinin minimize edildiği istasyonun seçilmesi, bazı ekipmanların sadece belirli istasyonlarda bulunması, demontaj yön ve ekipman değişikliklerinin minimize edilmesi gibi durumları içermektedir.

Diğer hususlar: İş istasyonlarının, işçilerin ve ürünlerin güvenilirliklerine bağlı olarak ortaya çıkabilecek belirsizliklerdir. Demontaj sırasında ürünün içinden tahmin edilemeyen zararlı bir madde çıkması, ürün veya parçaların demontaj sırasında kırılması veya iş istasyonundaki duruşlar demontaj hatları ile ilgili diğer hususlardandır.

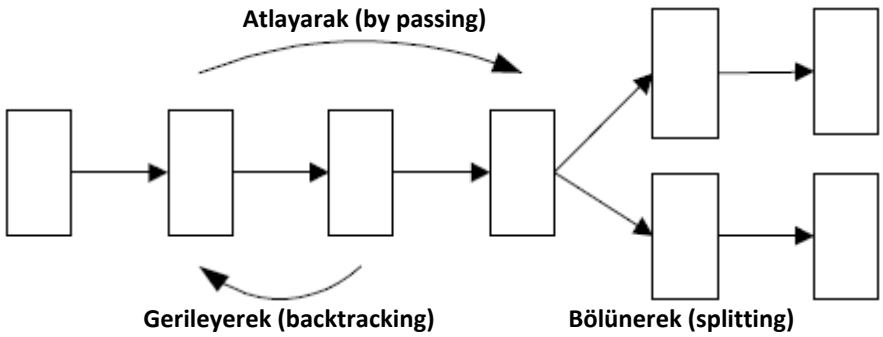
Yukarıda verilen hususlardan dolayı demontaj hatları montaj hatlarına benzese de, teknik ve operasyonel açıdan ciddi farklılıklar bulunmaktadır. Çizelge 3.9'da iki hat arasındaki temel farklar gösterilmiştir. Çizelgeye göre demontaj hatları montaj hatlarına göre çok daha karmaşık yapılardır (Lambert ve Gupta, 2005).

Çizelge 3.9. Montaj ve demontaj hatlarının karşılaştırılması (Lambert ve Gupta, 2005)

Özellikler ve hususlar	Montaj hattı	Demontaj hattı
Talep kaynakları	Tek	Çok
Talep edilen ürün	Nihai ürün	Alt parçalar/komponentler
Öncelik ilişkileri	Var ve sıkı	Var ve esnek
Öncelik ilişkilerine bağlı karmaşıklık	Yüksek (fonksiyonel ve fiziksel)	Orta (fiziksel)
Parça kalitesine bağlı belirsizlik	Düşük	Yüksek
Parça sayısına bağlı belirsizlik	Düşük	Yüksek
İstasyonlara ilişkin belirsizlik	Düşük-Orta	Yüksek
İstasyon güvenilirliği	Yüksek	Düşük
Çoklu ürün	Mevcut	Mevcut
Akış süreci	Yakınsak	Iraksak
Hat esnekliği	Düşük-Orta	Yüksek
Performans ölçütlerine bağlı karmaşıklık	Orta	Yüksek
Bilinen performans ölçütleri	Çok sayıda	Mevcut değil
Yok olan parça durumu	Mevcut değil	Mevcut
Patlayan parça durumu	Mevcut değil	Mevcut
Gürbüz hat gerekliliği	Orta	Yüksek
İstasyonlar arası stoğa bağlı karmaşıklık	Orta	Yüksek
Hat optimizasyonu için bilinen teknikler	Çok sayıda	Çok az

Yukarıda kısaca özetlenen montaj ve demontaj hatları arasındaki farklar aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmaya çalışılmıştır (Altekin, 2005).

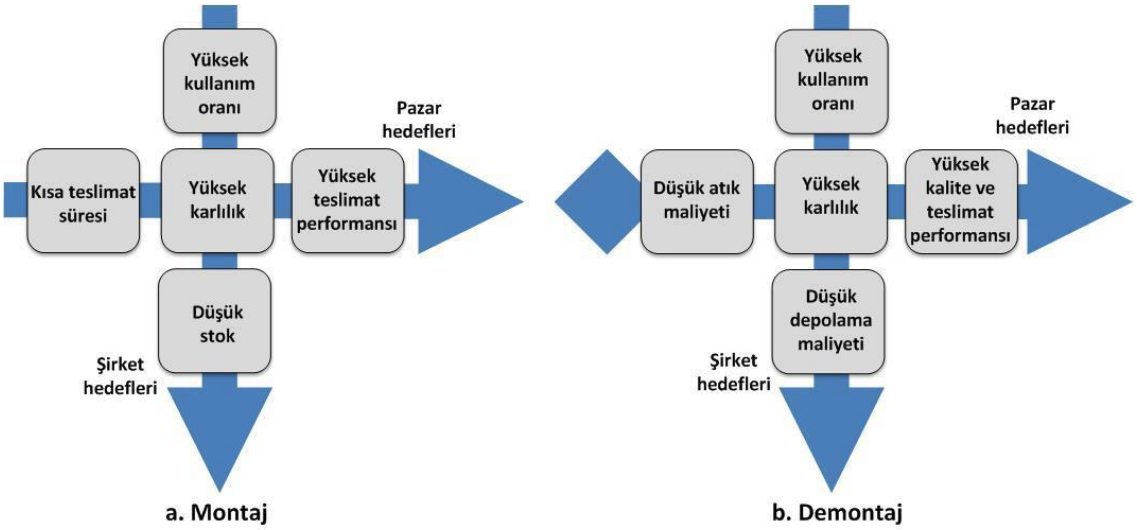
- Her iki hatta da ürüne ait belirli sayıda görev veya operasyon olmasına rağmen montaj hattında tüm görevler, demontaj hatlarında ise bazı görevler yapılmaktadır. Bu durumun temel sebebi sökülecek ürünlerin (kullanıcılardaki farklı kullanımları ve geçtikleri farklı tamir süreçleri yüzünden) yapı ve kalite açısından yüksek derecede belirsizlik içermesidir. Bu tür belirsizlikler demontajın her bir ürün için hat üzerinde farklı şekilde gerçekleşmesine sebep olabildiğinden hatta daha karmaşık bir akış süreci söz konusudur (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Demontaj görevlerinin muhtemel akışları (Güngör ve Gupta, 2001a; Altekin, 2005)

- Demontaj operasyon sürelerindeki değişkenlik montaja göre daha yüksektir. Montaj hattı dengeleme probleminde talep hattın sonunda elde edilen tam fonksiyonel bir ürün için söz konusudur. Oysa DHD probleminde sökülmekte olan ürünlerin parça ve modülleri için farklı farklı talepler vardır. Bu farklı taleplerin hepsinin karşılanmasının da zorunluluğu olmadığından çevrim süresinin veya üst sınırlarının nasıl belirleneceği konusunda belirsizlikler bulunmaktadır.

- DHD problemi için kullanılan operasyonlar arasındaki öncelik ilişkilerini tanımlayan ilişkiler için montaj hattı dengeleme probleminde kullandığımız öncelik ilişkisi yapısına ek olarak başka öncelik ilişkisi yapılarının tanımlanması gerekmektedir. Bu öncelik ilişkileri ileriki sayfalarda açıklanmıştır.



Şekil 3.9. Montaj ve demontaj sistemlerindeki amaçlar (Wiendahl ve Brückner, 1999)

- Montaj sistemlerinde, müşteriler ürünün hızlı bir şekilde akmasını ve ürünleri zamanında teslim almayı hedeflerler. Yüksek kullanım oranı ve düşük stok seviyeleri işletme için çelişkili hedeflerdir (Şekil 3.9). Demontaj sistemlerinde ise teslimat zamanları ve dakiklik müşteriler için daha az öneme sahiptir. Demontaj sistemleri için iki farklı pazar vardır. Birincisi kullanılan ürünlerin elde edildiği diğeri ise demonte edilmiş parçaların ve malzemelerin satıldığı yerlerdir. Birinci pazar ucuz geri dönüşüm isterken, ikinci pazar iyi kalite ürün talep eder. Demontaj sistemlerinde de yüksek kullanım oranı ve düşük stok seviyeleri şirkete ait çelişkili amaçları oluşturmaktadır. Montaj sistemlerinden

farkı sermayenin sıfır ürünlerden çok demonte edilmiş ve kullanılmış parçalara bağlanmış olmasıdır.

Demontaj hattı dengeleme

Demontaj literatüründe demontaj planlama, çizelgeleme ve dengeleme olmak üzere 3 temel problem vardır. Demontaj planlaması, parça talebinin karşılanması için hangi yeniden üretim seçeneğinde ne kadar demontaj yapılacağının kapasite ve stok kısıtları altında belirlenmesidir (Lee ve ark. 2001). Demontaj çizelgelemesi ise parça talebinin karşılanması için kullanılmış ürünlerin teslimat zamanlarına bağlı olarak demonte edilecek ürün sayısının belirlenmesidir. Çizelgelemede genellikle demonte edilecek ürün sayısı minimize edilir (Gupta ve Taleb, 1994; Güngör ve Gupta, 2001b). Bu çalışmada TTZ ve KDTZ ağ tasarımı ile DHD problemleri entegre edildiğinden dolayı, DHD problemi üzerine odaklanılmıştır.

DHD problemi, aynı montaj hattı dengeleme problemi gibi, operasyonları sıralı bir istasyon dizisine atarken operasyonlar arasındaki öncelik ilişkilerinin sağlanması ve bir etkinlik ölçütünü eniyilemek olarak tanımlanmaktadır (Ding ve ark. 2010). Etkinlik ölçütleri de yine benzer şekilde aşağıdaki gibi listelenmektedir (McGovern ve Gupta, 2011):

- Verilen çevrim zamanı altında istasyon sayısının minimize edilmesi,
- Verilen istasyon sayısı altında çevrim zamanının minimize edilmesi,
- Boşta kalma süresinin minimize edilmesi,
- İstasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımının yani verimliliğin maksimize edilmesi,
- Ortaya çıkan parça talebinden kaynaklı karın maksimize edilmesi,
- Demontaj sırasında tehlikeli ve zararlı parçaların erkenden uzaklaştırılması,
- Demontaj işlemi için gerekli olan demontaj yön değişikliği ve ekipmanlarının sayısının minimize edilmesi.

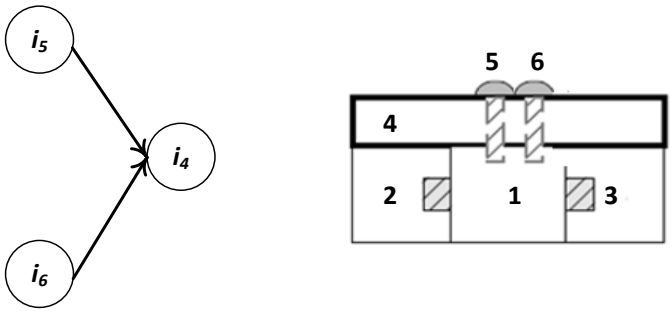
Yukarıdaki amaçlardan birine veya birkaçına ulaşmak için montaj hattı dengeleme problemlerinde olduğu gibi DHD problemlerinde de sağlanması gereken temel kısıtlar bulunmaktadır. Bunlardan birincisi çevrim zamanı kısıtıdır. Güngör ve

Gupta (2002)'ya göre çevrim zamanı herhangi bir iş istasyonundaki tüm demontaj görevlerinin tamamlanması için gerekli süre iken (tüm istasyonlar için aynı), aynı zamanda çevrim zamanı en uzun demontaj görevi süresinden daima büyük veya eşit olmalıdır. Çevrim zamanı çalışılabilir zamanın demonte edilecek ürün sayısına oranlanması ile elde edilir. Çevrim zamanı gibi diğer önemli bir kısıt ise demontaj görevleri arasındaki öncelik ilişkilerinin sağlanmasıdır.

Demontaj görevleri arasındaki öncelik ilişkileri

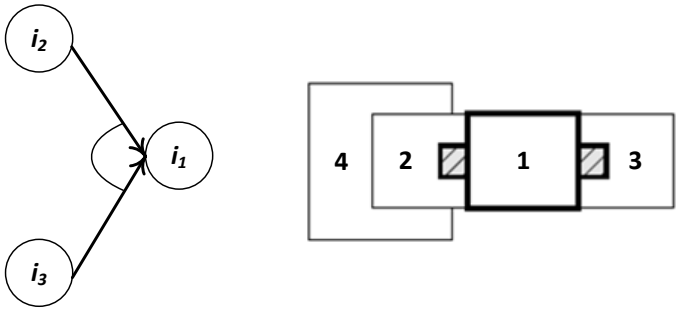
Montaj hattı dengeleme probleminde olduğu gibi, DHD probleminde de görevler arası öncelik ilişkilerinin sağlanması gerekmektedir. Montaj hattı dengeleme probleminde bir görevin tüm öncüllerinin tamamlanması zorunludur. Montaj hattı dengeleme problemlerinde bu öncelik ilişkileri fiziksel ve fonksiyonel kısıtların ele alınması ile geliştirilir, çünkü montaj süreçlerinde amaç sabit ve işlevsel bir nihai ürün ortaya çıkarmaktır. DHD problemlerindeki öncelik ilişkilerinde ise parçaların birbirleri ile olan işlevselliklerine bakılmaksızın sadece fiziksel yapıları önemlidir. Bundan dolayı demontajdaki bazı öncelik ilişkileri işlevsel kısıtların çıkartılması ile rahatlatılır. Bu rahatlama, demontaj probleminin basitleşmesi manasına gelmezken, çok farklı öncelik ilişkileri kombinasyonlarının ve belirsizliklerin olmasından dolayı aksine daha karmaşık hale gelmesine sebep olmaktadır. Bu karmaşıklıklar demontaj görevleri arasında farklı öncelik ilişkilerinin tanımlanmasına neden olmuştur (Altekin, 2005). Moore ve ark. (2001) VE (AND), VEYA (OR) ve karmaşık VE/VEYA (complex AND/OR) öncelik ilişkileri tanımlamış olsalar da VEYA ardılları (OR successors), VEYA içinde VE (AND within OR), ve VE içinde VEYA (OR within AND) gibi daha karmaşık öncelik ilişkileri de literatürde mevcuttur (Altekin ve ark. 2008). Bu ilişkiler (komponent bazlı olacak şekilde) kısaca aşağıda açıklanmıştır (Moore ve ark. 2001; Altekin ve ark. 2008).

VE öncelik ilişkisi: Eğer demonte edilecek bir üründe *i.* komponentin sökülmesi için kendisinden önce demonte edilmesi gereken komponentler varsa tüm bu komponentler demonte edilmeden *i.* komponent demonte edilemez. Komponentler arasındaki bu ilişkiye VE öncelik ilişkisi adı verilir. Bu duruma örnek Şekil 3.10'da verilmiştir. Şekildeki parçada 4 numaralı parçanın demonte edilebilmesi için ilk önce 5 ve 6 numaralı vidaların çıkarılması gerekmektedir. Dolayısıyla 5 ve 6 numaralı parçalar 4 numaralı parçaya VE öncelik ilişkisi ile bağlıdır.



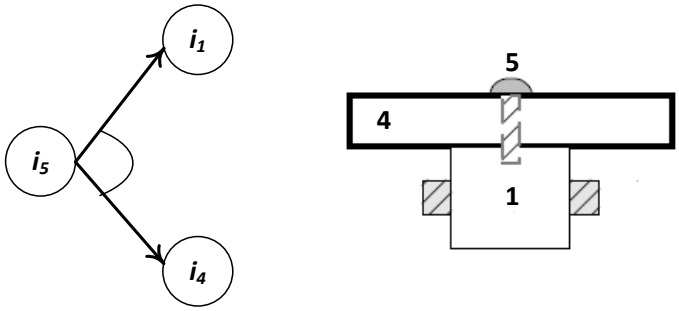
Şekil 3.10. VE öncelik ilişkisi (Moore ve ark. 2001'den uyarlanmıştır)

VEYA öncelik ilişkisi: VEYA öncelik ilişkisinde ise *i.* komponentin demonte edilebilmesi için kendisinden önceki komponentlerden en az birinin demonte edilmesi yeterlidir. Örneğin, Şekil 3.11'de 1 numaralı komponentin demonte edilmesi için 2 veya 3 numaralı komponentlerden herhangi birinin demonte edilmesi yeterlidir. VEYA ilişkilerinin gösterilmesi için yay şekli kullanılmaktadır (Şekil 3.11).



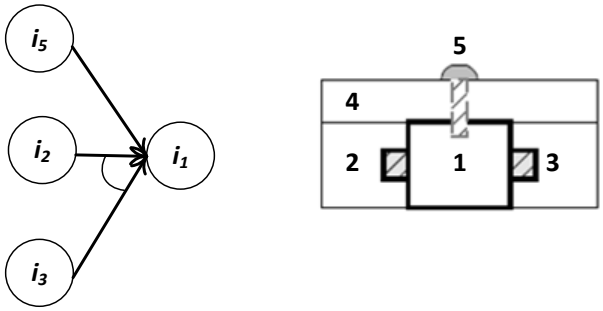
Şekil 3.11. VEYA öncelik ilişkisi (Moore ve ark. 2001'den uyarlanmıştır)

VEYA ardıllık ilişkisi: VEYA ilişkileri öncül olabildiği gibi aynı zamanda ardıl da olabilir. VEYA ardıllık ilişkisinde *i.* komponent söküldükten sonra kendisinden sonra gelen komponentlerden herhangi birinin demonte edilmesi durumu söz konusudur. Şekil 3.12'yı tekrar ele alırsak, 5 numaralı vidanın sökülmesinden sonra geri kalan alt üründen 1 veya 4 numaralı komponentlerden herhangi biri sökülebilir.



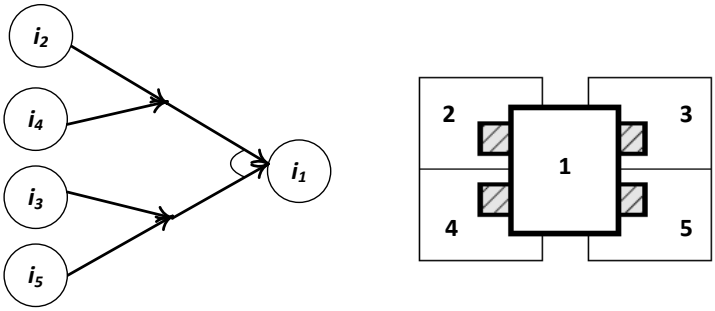
Şekil 3.12. VEYA ardıllık ilişkisi (Moore ve ark. 2001'den uyarlanmıştır)

Karmaşık VE/VEYA öncelik ilişkisi: Karmaşık VE/VEYA öncelik ilişkisinde ise hem VE hem de VEYA öncelik ilişkileri aynı anda yer almaktadır. Şekil 3.13 üzerinden bu öncelik ilişkisini açıklayacak olursak, 1 numaralı komponenti demonte edebilmek için 5 numaralı komponenti ve 2 veya 3 numaralı komponenti öncelikle sökmemiz gerekir. Bu durumda 5 numaralı komponent 1 numaralı komponente VE ilişkisi ile bağlı iken, 2 ve 3 numaralı komponentler VEYA ilişkisi ile bağlıdır.



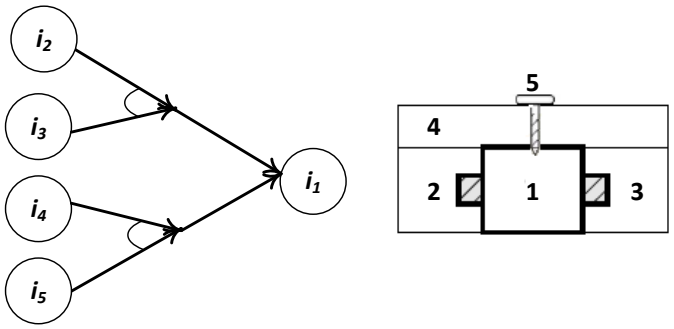
Şekil 3.13. Karmaşık VE/VEYA öncelik ilişkisi (Moore ve ark. 2001'den uyarlanmıştır)

VEYA içinde VE öncelik ilişkisi: Bu tarzdaki öncelik ilişkilerinde ilk önce VE daha sonra VEYA öncelik ilişkisi gözlemlenir. Şekil 3.14'te gösterilen üründe 1 numaralı komponenti sökebilmek için ilk önce 2 ve 4 veya 3 ve 5 numaralı komponentlerin sökülmesi gerekmektedir. Dolayısıyla (2 ve 4) ve (3 ve 5) komponentleri birbirlerine VE öncelik ilişkileri ile VE grupları ise 1 numaralı komponente VEYA öncelik ilişkisi ile bağlıdır.



Şekil 3.14. VEYA içinde VE öncelik ilişkisi (Moore ve ark. 2001'den uyarlanmıştır)

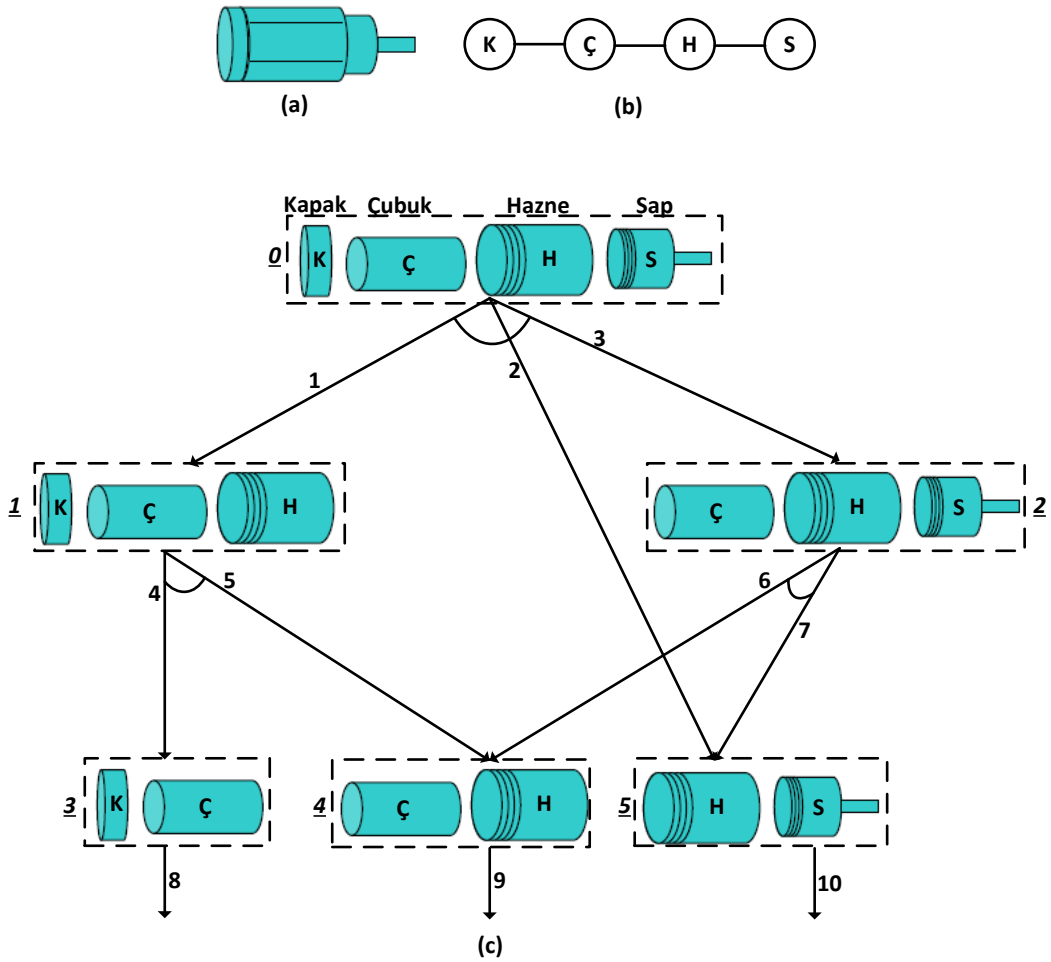
VE içinde VEYA öncelik ilişkisi: Bu tarz öncelik ilişkileri yapı olarak VEYA içinde VE öncelik ilişkisine benzese de, bu ilişkide önce VEYA daha sonra VE öncelik ilişkisi gözlemlenir. Şekil 3.15'de gösterilen üründe 1 numaralı komponenti sökebilmek için ilk önce 5 veya 4 ve 2 veya 3 numaralı komponentlerin sökülmesi gereklidir. Dolayısıyla (2 ve 3) ve (4 ve 5) komponentleri birbirlerine VEYA öncelik ilişkileri ile VEYA grupları ise 1 numaralı komponente VE öncelik ilişkisi ile bağlıdır. Bu örnekteki 5 numaralı komponent vida değil, raptiye veya çivi benzeri bir bağlantı aracıdır.



Şekil 3.15. VE içinde VEYA öncelik ilişkisi (Moore ve ark. 2001'den uyarlanmıştır)

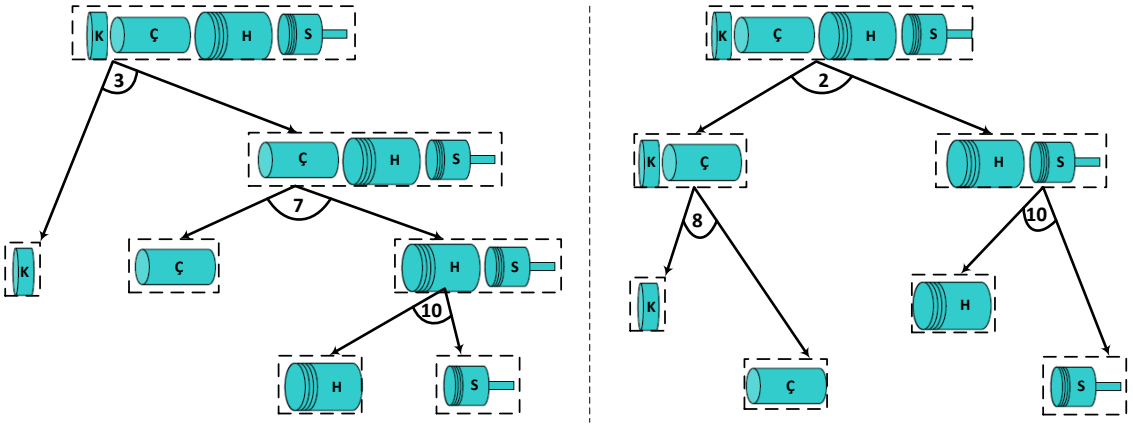
Yukarıdaki öncelik ve ardıllık ilişkilerinden de anlaşılacağı gibi bir ürünün demontajı için montaj hattı dengeleme problemlerinde olduğu gibi sadece tek bir yol yoktur. Bundan dolayı De Mello ve Sanderson (1990, 1991a ve 1991b) bütün muhtemel demontaj görev sıralarının olduğu VE/VEYA diyagramlarını oluşturmuşlardır (Koç ve ark. 2009). Literatürde hem montaj hem de DHD problemleri için görev öncelik diyagramı (Salveson, 1955) ve parça öncelik diyagramı (Güngör ve Gupta, 2001b) gibi farklı öncelik ilişkileri diyagramları tanımlanmış olsa da, demontaj görevleri için VE/VEYA diyagramlarının kullanıldığı çalışmalar oldukça fazladır (Lambert, 1997; Rai ve ark. 2002; Altekin ve ark. 2008; Koç ve ark. 2009).

Tipik bir VE/VEYA diyagramında her bir demontaj görevi nihai üründen bir komponentin ayrılmasına veya iki farklı alt ürün ortaya çıkarmasına neden olur (Koç ve ark. 2009). Bu diyagramlarda üst ve alt montaj arasındaki bağlantılara hiper bağlantı (hyper-arc) adı verilir. De Mello ve Sanderson (1990) tarafından önerilen VE/VEYA diyagramlarında düğümler ve hiper bağlantılar sırasıyla alt montajları ve demontaj görevlerini temsil etmektedir. Demonte edilecek bir ürüne ait VE/VEYA diyagramının nasıl oluşturulacağının açıklanabilmesi için, 4 parçadan oluşan bir ürün ele alınmıştır. Şekil 3.16 ürüne ait bağlantı diyagramını (graph of connections) ve VE/VEYA diyagramını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, 4 parçadan oluşan ürünün tümüyle demonte edilebilmesi için 6 düğüme (nihai ürün ve alt montajlar) ve 10 hiper bağlantıya (demontaj görevi) ihtiyaç vardır. İtalik ve altı çizili rakamlar VE/VEYA diyagramındaki düğümleri göstermektedir. Diyagramdaki her bir düğüm, parçalardan oluşan alt montajlara karşılık gelmektedir. Örneğin S (sap) komponentini kök üründen sökersek, geriye kalan alt montaj ürünü K, Ç ve H komponentlerinden (*1*) oluşur. VE/VEYA diyagramlarında bir alt montajın ortaya çıkması için birden fazla yol olabilir. Örneğin 4. düğümdeki alt montaj (*4*) hem 5. hem de 6. demontaj görevleri sonucunda elde edilebilir.



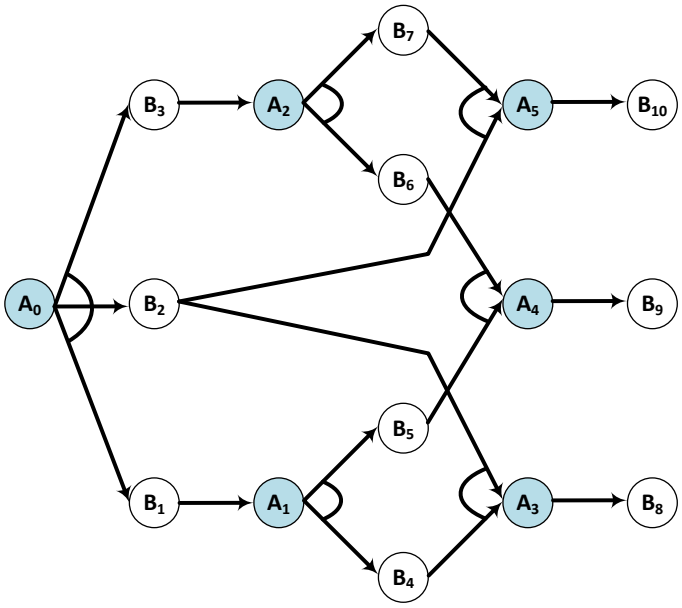
Şekil 3.16. Örnek ürün (a), bağlantı diyagramı (b), VE/VEYA diyagramı (Koç, 2005'ten uyarlanmıştır)

Yukarıdaki şekilden de anlaşılabileceği gibi bir ürünü tamamıyla demonte edebilmek için VE/VEYA diyagramlarında birden fazla yol bulunmaktadır. İşte, bir ürünü tamamıyla demonte edecek gerekli demontaj görev sırasına demontaj ağacı (disassembly tree) adı verilir (Koç, 2005). Demontaj ağaçları *N* düğüm sayısını göstermek üzere *N*-1 sayıda demontaj görevinden meydana gelir. Şekil 3.16'da verilen ürünün tamamıyla demonte edilebilmesi için toplamda 5 farklı yol yani 5 farklı demontaj ağacı vardır. Bu alternatif demontaj ağaçlarından 2 tanesi aşağıda verilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Şekil 3.16'daki ürüne ait VE/VEYA diyagramından elde edilen 2 farklı demontaj ağacı (Koç, 2005'ten uyarlanmıştır)

Bir ürüne ait tüm alternatif demontaj yolları yani demontaj ağaçları bilinmiyor ise o ürüne ait optimal demontaj sırasının bulunması oldukça zordur. VE/VEYA diyagramları demonte edilecek ürüne ait muhtemel alt montajları ve demontaj görevlerini gösterse de, demontaj görevleri arasındaki öncelik ilişkilerini vermede yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı Koç ve ark. (2009) tüm demontaj ağaçlarını görevler arasındaki öncelik ilişkileri ile gösteren ve mevcut VE/VEYA diyagramlarının modifiye edilmiş yeni bir hali olan dönüştürülmüş VE/VEYA diyagramlarını (DVVD) önermişlerdir. Mevcut VE/VEYA diyagramlarında alt montajları gösteren her bir düğüm DVVD'de yapay düğümler ile demontaj görevlerini gösteren hiper bağlantılar ise normal düğümler ile gösterilmiştir. Şekil 3.16'daki ürüne ait DVVD Şekil 3.18'de verilmiştir. Şekil 3.18'de yapay düğümler A_i ile normal düğümler de B_i ile gösterilmiştir. DVVD'de her bir yapay düğüm bir veya birden fazla normal düğümün ardılı veya öncülü olabilir. Ama yalnızca bir adet ardıl veya öncül işleme tabi tutulur (Koç, 2005). Dolayısıyla, yapay düğümlerin öncülleri ve ardılları "veya" biçimindedir. Şekil üzerinde "veya" tipli ilişkiler yay ile ifade edilmiştir.



Şekil 3.18. Şekil 3.16'daki örneğe ilişkin DVVD

Literatür özetinde de verildiği gibi Koç ve ark. (2009) tarafından önerilen 0-1 TP modeli olası tüm demontaj ağaçlarını hesaba kattığı için optimal çözüme ulaşan tek matematiksel modeldir. Bu nedenle tez kapsamında geliştirilen entegre modellerde Koç ve ark. (2009) tarafından önerilen matematiksel model kullanılmıştır. Koç ve ark. (2009) tarafından önerilen 0-1 TP modeli aşağıda varsayımları ile beraber verilmiştir.

Varsayımlar

- Tüm alt komponentleri ile beraber demonte edilecek ürün bilinmektedir.
- Tamamıyla demonte edilecek ürüne ait tüm demontaj görevleri belirlidir.
- Tüm demontaj görevlerine ait görev süreleri (bağlantı elemanlarının sökülme zamanı dahil) bilinmekte ve kesindir.
- Demontaj görevleri arasındaki öncüllük ilişkileri bilinmektedir.
- Çevrim zamanı kesin ve bilinmektedir.

İndisler

A_k	DVVD'deki yapay düğümler kümesi, $k=0, 1,2,\ldots,h$,
B_i	DVVD'deki normal düğümler kümesi, $i=1,2,\ldots, I$,
$P(A_k)$, $P(B_i)$	A_k, B_i'nin hemen öncülleri kümesi,
$S(A_k)$, $S(B_i)$	A_k, B_i'nin hemen ardılları kümesi,
j	iş istasyonu sayısı, $j=1,2,\ldots, M$.

Parametreler

T	çevrim zamanı,
d_{Bi}	B_i düğümüne ait görev zamanı,
M	maksimum iş istasyonu sayısı.

Değişkenler

X_{ij}	Eğer B_i görevi j. iş istasyonuna atanırsa, 1; aksi halde 0,
F_j	Eğer j. iş istasyonu açılır ise 1; aksi halde 0,
Z_i	Eğer B_i görevi yapılır ise 1; aksi halde 0.

Amaç fonksiyonu

$$\text{Minimizasyon } \sum_{j=1}^{M} j \times F_j \tag{3.1}$$

Kısıtlar

$$\sum_{i:B_i \in S(A_k)} Z_i = 1 \qquad \forall_{k=0} \tag{3.2}$$

$$\sum_{i:B_i \in S(A_k)} Z_i = \sum_{i:B_i \in P(A_k)} Z_i \qquad \forall_{k=1,2,\ldots h} \tag{3.3}$$

$$\sum_{j=1}^{M} X_{ij} = Z_i \qquad \forall_{i=1,2,\ldots,I} \tag{3.4}$$

$$\sum_{i:B_i \in P(A_k)} \sum_{j=1}^{v} X_{ij} \leq \sum_{i:B_i \in S(A_k)} X_{iv} \qquad \forall_{k=1,2,\ldots,h} \tag{3.5}$$

$$\sum_{i=1}^{l} X_{ij} \times d_{Bi} \leq T \times F_j \qquad \forall_{j=1,2,\ldots,M} \tag{3.6}$$

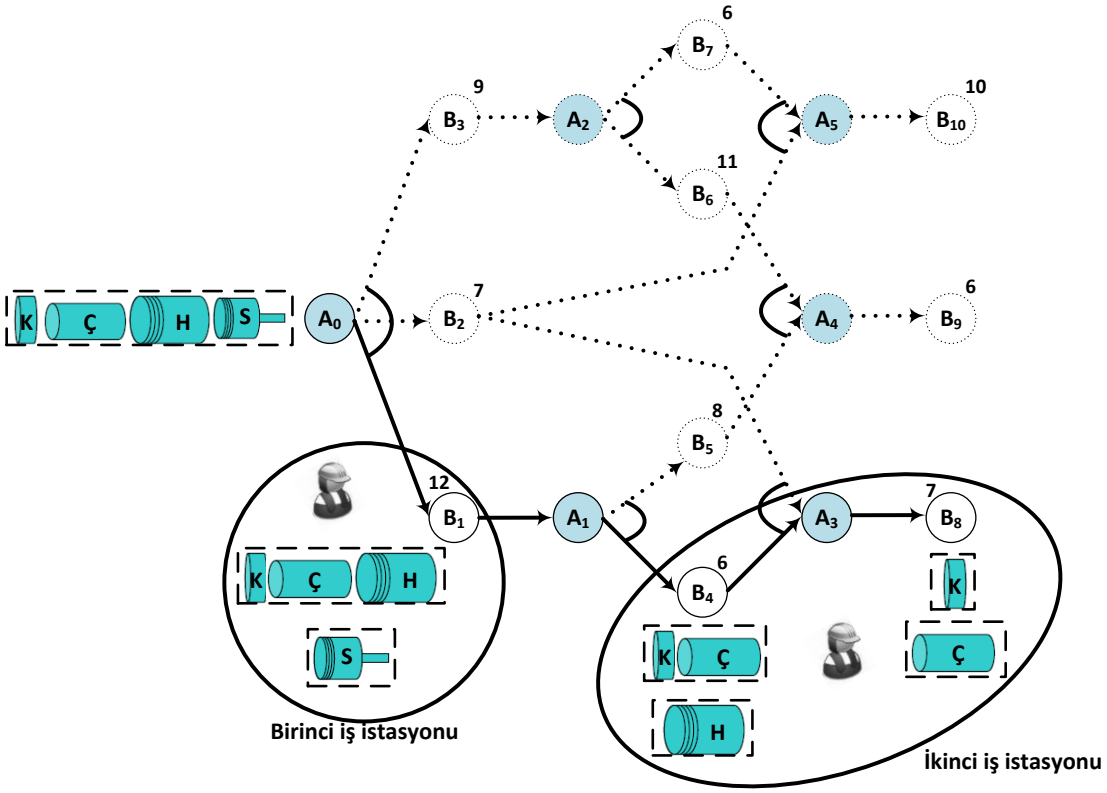
$$X_{ij}, F_j, Z_i \in \{0,1\} \qquad \forall_{i=1,2,\ldots,I;\, j=1,2,\ldots,M} \tag{3.7}$$

Eşitlik (3.1) verilen çevrim zamanı altında kullanılan istasyon sayısını minimize etmektedir. (3.2) ve (3.3) numaralı kısıtlar VEYA ilişkisine sahip ardıllardan yalnızca bir tanesinin seçilmesini sağlamaktadır. Bu iki kısıt çözümün demontaj ağacı oluşturan bir iş kümesinden meydana gelmesini sağlar. Kısıt (3.4) eğer bir demontaj görevi yapılıyorsa bu işin istasyonlardan birine atanmasını, yapılmıyorsa atanmamasını sağlar. Kısıt (3.5) ise normal düğümler arasındaki öncelik ilişkilerini kontrol etmek amaçlıdır. Kısıt (3.6) eğer bir iş istasyonu açıksa o iş istasyonuna atanan demontaj görevlerinin görev süreleri toplamının çevrim zamanından küçük olmasını garanti eder. Son olarak kısıt (3.7) 0-1 karar değişkenlerini göstermektedir.

Yukarıda verilen matematiksel modelin daha iyi anlaşılması amacıyla Şekil 3.16'da gösterilen ürün demontajına ait bir DHD örneği ele alınmıştır. Çevrim zamanı

13 ve maksimum açılabilir istasyon sayısı da 3 olarak belirlenmiştir. 10 adet demontaj görevinin işlem süreleri sırasıyla 12; 7; 9; 6; 8; 11; 6; 7; 6 ve 10'dur. LINGO 13.0 paket programında çözülen örneğin açık formülasyonu Ek-1'de verilmiştir.

Şekil 3.19 elde edilen optimal sonucu göstermektedir. Şekilde düğümler yani görevlerin üzerindeki değerler görev zamanlarıdır. Elde edilen çözüme göre, toplamda 2 adet iş istasyonu açılmış ve birinci, dördüncü ve sekizinci görevler yapılmıştır. Verilen çevrim zamanı kısıtı altında birinci görev birinci iş istasyonuna atanırken, diğer dördüncü ve sekizinci görevler ikinci iş istasyonuna atanmıştır. Buna göre üründen ilk önce S komponenti, daha sonra H komponenti ve en sonunda Ç komponenti sökülmüştür. Elde edilen demontaj sırası Şekil 3.17'de verilen 2 demontaj ağacından farklı bir sıradadır.



Şekil 3.19. Optimal demontaj hattı dengesi

3.2. Geliştirilen Matematiksel Modeller

Bu bölümde tez kapsamında geliştirilen 3'ü deterministik 3'ü de bulanık olan 6 farklı matematiksel model, formülasyonları ile beraber verilmiştir. Modeller 3 ana

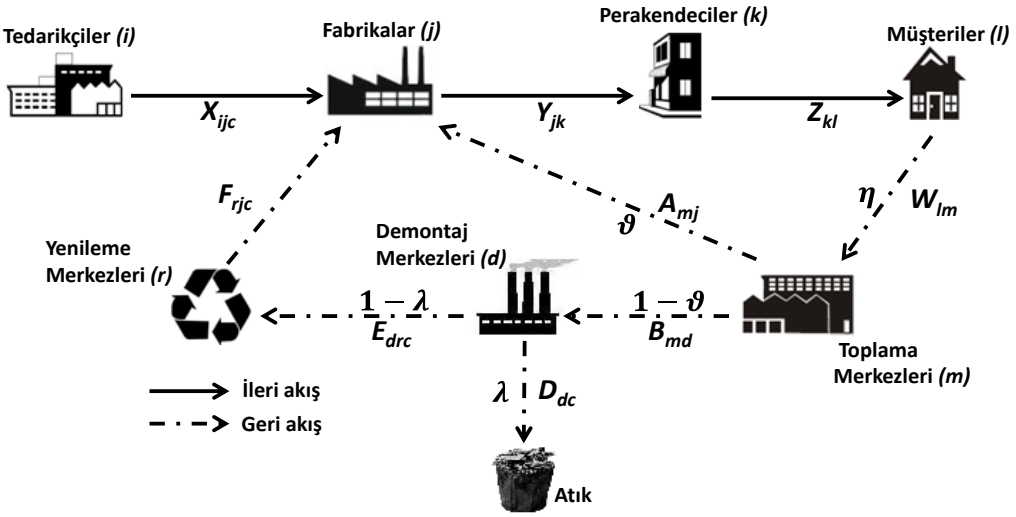
gruptan (hiyerarşik olarak) oluşmaktadır. Her bir gruptaki model hem deterministik hem de bulanık olarak ele alınmıştır. Birinci grupta KDTZ ağ tasarımı problemi, ikinci grupta TTZ ve DHD problemleri entegrasyonu ve son olarak üçüncü grupta da KDTZ ve DHD problemleri entegrasyonu parametrelerinin hem kesin (deterministik) hem de belirsiz (bulanık) olduğu durumlar için modellenmiştir.

3.2.1. Kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı

Bu alt bölümde 2 farklı KDTZ ağ tasarımı modeli verilmiştir. Birinci model tüm parametrelerin kesin olduğu KTDP modeli iken, ikinci modelde belirsizliklerin yansıtılabilmesi amacıyla parametreler bulanık alınmış ve Liang ve Cheng (2009) tarafından önerilen ÇABP yaklaşımı uygulanmıştır.

3.2.1.1. Model 1: Kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli

Bu bölümde Özceylan ve Paksoy (2013a)'un ele aldığı hem ileri hem de tersine akışların eş zamanlı optimize edildiği KDTZ için karma tamsayılı bir model verilmiştir. Ele alınan KDTZ ağının ileri akışı hammaddelerin satın alınması, montajlanması ve nihai kullanıcılara ulaştırılmasından oluşurken; tersine akış, kullanılan ürünlerin toplanması, demonte edilmesi, yenilenmesi ve gerekirse atığa yollanmasından oluşmaktadır. Şekil 3.20'de verilen KDTZ yapısı, (i) hammadde tedarikçilerinden, (ii) fabrikalardan, (iii) perakendecilerden, (iv) müşterilerden, (v) toplama merkezlerinden, (vi) demontaj merkezlerinden, (vii) yenileme merkezlerinden ve (viii) atık tesislerinden oluşmaktadır.



Şekil 3.20. Model 1'e ait KDTZ yapısı (Özceylan ve Paksoy, 2013a)

Ağdaki akış fabrikalarda montajlanmak için tedarikçilerden belirli oranlarda hammadde satın alınması ile başlamaktadır. Fabrikalarda ilgili ürünün ürün ağacı yapısına bağlı olarak montajlanan ürünler perakendeciler aracılığıyla nihai kullanıcılara ulaştırılmaktadır. Karar verici her bir dönem için açılması gereken fabrika ve perakendeci sayısını da bir üst sınır ile sınırlandırmıştır. Geri akış ise bir takım teknik problemlerden dolayı müşterilerden kullanılmış ürünlerin geri toplanması ile başlar. Müşterilerden η oranında ürün toplandığı varsayılmıştır. Kullanılan ürünlerde eğer ciddi bir problem yoksa ϑ oranında kullanılmış ürün toplama merkezlerinden direk fabrikalara gönderilirken, ürünler kullanılamaz ise parçalanmak için demontaj merkezlerine gönderilir. Eğer demontaj merkezlerinde demonte edilen ürünlerden çıkan parçaların durumu iyiyse yenilenmesi için yenileme merkezine, parçalar kullanılamaz durumda ise atık merkezine gönderilir. Yenileme merkezinde yeni bir görünüm kazandırılan parçalar bir sonraki dönemde kullanılması için fabrikalara gönderilir. Bundan dolayı işletme için biri tedarikçiler diğeri ise yenileme merkezleri olan iki farklı hammadde kaynağı mevcuttur. Karar verici yukarıdaki bilgiler ışığında toplam taşıma, satın alma, yenileme ve tesis açma maliyetlerini minimize etmek istemektedir. Problem ile ilgili varsayımlar aşağıda verilmiştir (Sheu ve ark. 2005; Neto ve ark. 2008; Wang ve Hsu, 2010a).

Varsayımlar

- Müşteri talepleri her bir dönem için kesin olup, tümüyle karşılanmaktadır.
- İleri ve tersine ağdaki tüm tesislerin kapasiteleri sabit ve kesindir.

- Taşıma, satın alma, yenileme ve tesis açma maliyetleri sabit ve kesindir.
- Geri dönüşüme ait oranlar önceden bilinmektedir.

Yukarıdaki bilgiler ışığında geliştirilen karma tamsayılı matematiksel modele ait formülasyon aşağıda verilmiştir.

İndisler

i tedarikçiler kümesi

j fabrikalar kümesi

k perakendeciler kümesi

l müşteriler kümesi

m toplama merkezleri kümesi

d demontaj merkezleri kümesi

r yenileme merkezleri kümesi

c parça kümesi

p dönem kümesi

Değişkenler

X_{ijcp} tedarikçi i' den fabrika j'ye dönem p'de taşınan parça c miktarı

Y_{jkp} fabrika j'den perakendeci k'ya dönem p'de taşınan ürün miktarı

Z_{klp} perakendeci k'dan müşteri l'ye dönem p'de taşınan ürün miktarı

W_{lmp} müşteri l'den toplama merkezi m'ye dönem p'de taşınan ürün miktarı

A_{mjp} toplama merkezi m'den fabrika j'ye dönem p'de taşınan ürün miktarı

B_{mdp} toplama merkezi m'den demontaj merkezi d'ye dönem p'de ürün miktarı

D_{dcp} demontaj merkezi d'den dönem p'de atığa yollanan parça c miktarı

E_{drcp} demontaj merkezi d'den yenileme merkezi r'ye dönem p'de taşınan parça c miktarı

F_{rjcp} yenileme merkezi r'den fabrika j'ye dönem p'de taşınan parça c miktarı

H_{jp} eğer fabrika j dönem p'de açılır ise 1, aksi halde 0

G_{kp} eğer perakendeci k dönem p'de açılır ise 1, aksi halde 0

Parametreler

a_{icp} tedarikçi i'nin dönem p'deki parça c kapasitesi

b_{jp} fabrika j'nin dönem p'deki kapasitesi

c_{kp} perakendeci *k*'nın dönem *p*'deki kapasitesi

d_{lp} müşteri *l*'nin dönem *p*'deki kapasitesi

e_{mp} toplama merkezi *m*'nin dönem *p*'deki kapasitesi

f_{dcp} demontaj merkezi *d*'nin dönem *p*'deki parça *c* kapasitesi

g_{rcp} yenileme merkezi *r*'nin dönem *p*'deki parça *c* kapasitesi

di_{ij} tedarikçi *i* ve fabrika *j* arasındaki mesafe

di_{jk} fabrika *j* ve perakendeci *k* arasındaki mesafe

di_{kl} perakendeci *k* ve müşteri *l* arasındaki mesafe

di_{lm} müşteri *l* ve toplama merkezi *m* arasındaki mesafe

di_{md} toplama merkezi *m* ve demontaj merkezi *d* arasındaki mesafe

di_{mj} toplama merkezi *m* ve fabrika *j* arasındaki mesafe

di_{d} demontaj merkezi *d* ve atık arasındaki mesafe

di_{dr} demontaj merkezi *d* ve yenileme merkezi *r* arasındaki mesafe

di_{rj} yenileme merkezi *r* ve fabrika *j* arasındaki mesafe

r_c bir adet nihai ürün içindeki parça *c* sayısı

α_{jp} fabrika *j*'nin dönem *p*'deki sabit işletme maliyeti

β_{kp} perakendeci *k*'nın dönem *p*'deki sabit işletme maliyeti

t birim taşıma maliyeti

s_{ic} tedarikçi *i*'den parça *c*'yi satın alma maliyeti

w_{rc} yenileme merkezi *r*'nin parça *c*'yi yenileme maliyeti

H_p dönem *p*'de açılabilir maksimum fabrika sayısı

G_p dönem *p*'de açılabilir maksimum perakendeci sayısı

η müşterilerden toplanan kullanılmış ürün yüzdesi

ϑ toplama merkezlerinden fabrikalara gönderilen ürün yüzdesi

λ demonte edilen ürünlerden açığa çıkan parçaların atığa yollanan yüzdesi

Amaç fonksiyonu

$$Minimizasyon$$

$$t(\sum_i \sum_j \sum_c \sum_p X_{ijcp}.di_{ij} + \sum_j \sum_k \sum_p Y_{jkp}.di_{jk} + \sum_k \sum_l \sum_p Z_{klp}.di_{kl} +$$
$$\sum_l \sum_m \sum_p W_{lmp}.di_{lm} + \sum_m \sum_j \sum_p A_{mjp}.di_{mj} +$$
$$\sum_m \sum_d \sum_p B_{mdp}.di_{md} + \sum_d \sum_c \sum_p D_{dcp}.di_{d} + \sum_d \sum_r \sum_c \sum_p E_{drcp}.di_{dr} +$$
$$\sum_r \sum_j \sum_c \sum_p F_{rjcp}.di_{rj}) + \quad (3.8)$$
$$\sum_i \sum_j \sum_c \sum_p X_{ijcp}.s_{ic} + \quad (3.9)$$

$$\sum_r \sum_j \sum_c \sum_p F_{rjcp}.w_{rc} + \quad (3.10)$$

$$\sum_j \sum_p H_{jp}.\alpha_{jp} + \sum_k \sum_p G_{kp}.\beta_{kp} \quad (3.11)$$

Kısıtlar

$$\sum_j X_{ijcp} \leq a_{icp} \qquad \forall_{i,c,p} \quad (3.12)$$

$$\sum_k Y_{jkp} \leq b_{jp}.H_{jp} \qquad \forall_{j,p} \quad (3.13)$$

$$\sum_l Z_{klp} \leq c_{kp}.G_{kp} \qquad \forall_{k,p} \quad (3.14)$$

$$\sum_j A_{mjp} + \sum_d B_{mdp} \leq e_{mp} \qquad \forall_{m,p} \quad (3.15)$$

$$D_{dcp} + \sum_r E_{drcp} \leq f_{dcp} \qquad \forall_{d,c,p} \quad (3.16)$$

$$\sum_j F_{rjcp} \leq g_{rcp} \qquad \forall_{r,c,p} \quad (3.17)$$

$$\sum_k Z_{klp} \geq d_{lp} \qquad \forall_{l,p} \quad (3.18)$$

$$\sum_j H_{jp} \leq H_p \qquad \forall_p \quad (3.19)$$

$$\sum_k G_{kp} \leq G_p \qquad \forall_p \quad (3.20)$$

$$\sum_i X_{ijcp} + \sum_r F_{rjc(p-1)} + r_c \sum_m A_{mj(p-1)} - r_c \sum_k Y_{jkp} = 0 \qquad \forall_{j,c,p} \quad (3.21)$$

$$\sum_j Y_{jkp} - \sum_l Z_{klp} = 0 \qquad \forall_{k,p} \quad (3.22)$$

$$\eta \sum_k Z_{klp} - \sum_m W_{lmp} = 0 \qquad \forall_{l,p} \quad (3.23)$$

$$\vartheta \sum_l W_{lmp} - \sum_j A_{mjp} = 0 \qquad \forall_{m,p} \quad (3.24)$$

$$(1-\vartheta) \sum_l W_{lmp} - \sum_d B_{mdp} = 0 \qquad \forall_{m,p} \quad (3.25)$$

$$r_c \lambda \sum_m B_{mdp} - D_{dcp} = 0 \qquad \forall_{d,c,p} \quad (3.26)$$

$$r_c (1-\lambda) \sum_m B_{mdp} - \sum_r E_{drcp} = 0 \qquad \forall_{d,c,p} \quad (3.27)$$

$$\sum_d E_{drcp} - \sum_j F_{rjcp} = 0 \qquad \forall_{r,c,p} \quad (3.28)$$

$$X_{ijcp}, Y_{jkp}, Z_{klp}, W_{lmp}, A_{mjp}, B_{mdp}, D_{dcp}, E_{drcp}, F_{rjcp} \geq 0 \qquad \forall_{i,j,k,l,m,d,r,c,p} \quad (3.29)$$

$$H_{jp}, G_{kp} = \{0, 1\} \qquad \forall_{j,k,p} \quad (3.30)$$

Amaç fonksiyonu dört kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım (3.8) taşıma, ikinci kısım (3.9) satın alma, üçüncü kısım (3.10) yenileme ve dördüncü kısım (3.11) sabit işletme maliyetlerini minimize etmektedir. Kısıtlar (3.12)-(3.17) sırasıyla tedarikçiler, fabrikalar, perakendeciler, toplama merkezleri, demontaj merkezleri ve yenileme merkezlerine ait kapasite kısıtlarıdır. Bu tesislerden çıkan ürünler ilgili tesislerin kapasitelerinden büyük olamaz. Kısıt (3.18) her bir dönem için müşteri taleplerinin eksiksiz karşılanmasını sağlamaktadır. Kısıtlar (3.19) ve (3.20) açılabilir fabrika ve perakendeci sayısının istenen seviyenin altında olmasını sağlamaktadır. Kısıtlar (3.21)

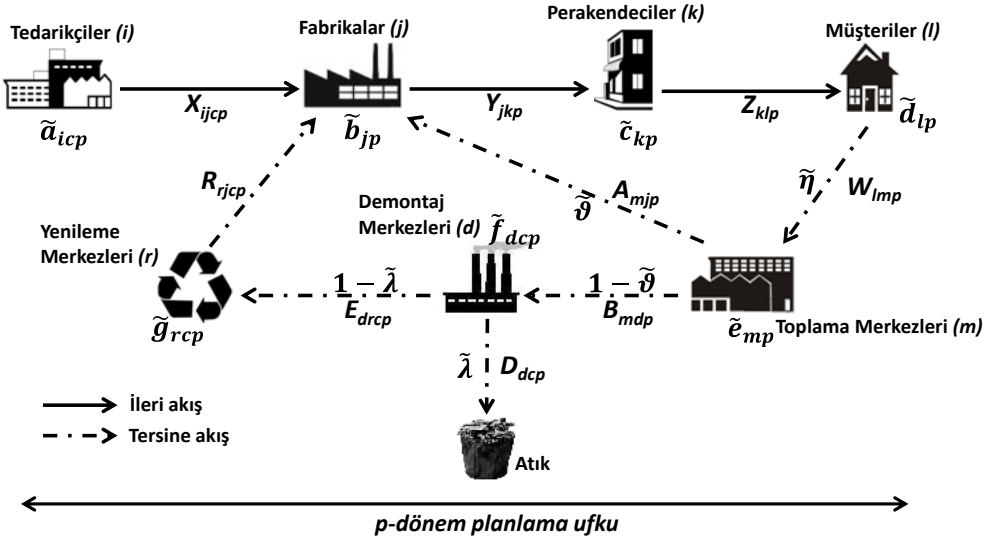
ve (3.28) denge kısıtlarıdır yani ilgili tesise giren ürün veya parça miktarı o tesisten çıkan ürün veya parça miktarına eşit olmalıdır. Son iki kısıt (3.29 ve 3.30) ise karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır.

3.2.1.2. Model 2: Kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımına çok amaçlı bulanık programlama yaklaşımı

Bu bölümde, bir önceki bölümde verilen KDTZ ağ tasarımı modeli belirsizliklerin yanısıtılabilmesi adına bulanık olarak ele alınmıştır. Modelde taşıma, yenileme ve satın alma maliyetlerinden oluşan üretim ve dağıtım maliyetleri ve tesis açma maliyetleri ve talep, kapasite ve geri dönüşüm oranları bulanık olarak ifade edilmiş, çözüm yöntemi olarak Liang ve Cheng (2009) tarafından önerilen ÇABP modeli uygulanmıştır (Özceylan ve Paksoy, 2013b).

Ele alınan KDTZ ağının ileri akışı, bulanıklık altında hammaddelerin satın alınması, montajlanması ve nihai kullanıcılara ulaştırılmasından oluşurken; tersine akış kullanılan ürünlerin toplanması, demonte edilmesi, yenilenmesi ve gerekirse atığa yollanmasından oluşmaktadır (Şekil 3.21). Şekil 3.21'de $\sim$ ile gösterilen parametreler bulanıklığı ifade etmektedir. Ağdaki akış fabrikalarda montajlanmak için tedarikçilerden bulanık kapasite altında parça satın alınması ile başlamaktadır. Fabrikalarda ilgili ürünün ürün ağacı yapısına bağlı olarak montajlanan ürünler perakendeciler aracılığıyla nihai kullanıcılara ulaştırılmaktadır. Bu aşamadaki tüm akışlar bulanık kapasite ve müşteri talepleri altında gerçekleşmektedir. Geri akış ise bir takım teknik problemlerden dolayı müşterilerden kullanılmış ürünlerin geri toplanması ile başlar. Ancak gerçek hayatta müşterilerden toplanacak ürün sayısında ve kalitesinde belirsizlik olduğundan dolayı bu oran bulanık olarak ifade edilmiştir ($\tilde{\eta}$). Kullanılan ürünlerde eğer kayda değer bir kalite problemi yoksa bulanık $\tilde{\vartheta}$ oranında kullanılmış ürün toplama merkezlerinden direk fabrikalara gönderilirken, ürünler kullanılamaz ise parçalanmak için (1-$\tilde{\vartheta}$) bulanık oranında demontaj merkezlerine gönderilir. Eğer demontaj merkezlerinde demonte edilen ürünlerden çıkan parçaların kalite durumları iyiyse yenilenmesi için yenileme merkezine (1-$\tilde{\lambda}$), parçalar kullanılamaz durumda ise atık merkezine gönderilir ($\tilde{\lambda}$). Yenileme merkezinde yeni bir görünüm kazandırılan parçalar bir sonraki dönemde kullanılması için fabrikalara gönderilir. İleri akışta olduğu gibi tersine akışta da tüm taşıma kararları bulanık tesis kapasiteleri altında incelenmiştir.

Ele alınan problemde, gerçek hayatta belirsizlik içeren kapasite, talep ve geri dönüşüm oranları gibi sistem parametreleri bulanık olarak ifade edildiği için karar vericinin ulaşmak istediği amaçlar da bulanık olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.21. Model 2'ye ait bulanık KDTZ yapısı (Özceylan ve Paksoy (2013a)'dan uyarlanmıştır)

Şekil 3.21'de verilen ağdaki ürün akışı bir önceki bölümde verilen ürün akışının aynısıdır. Ancak bir önceki bölümde kesin olarak verilen parametreler ve amaç fonksiyonları bu modelde bulanık olarak ele alınmış ve karar vericinin her bir amaç fonksiyonu için memnuniyet seviyesi belirlemesi ve ödünleşik bir çözüm elde etmesi amaçlanmıştır. Problem ile ilgili varsayımlar aşağıda verilmiştir.

Varsayımlar

- Her bir amaç fonksiyonu belirsiz istek (aspiration) seviyelerinden oluşmakta ve bulanık olarak ele alınmıştır.
- Amaç fonksiyonları ve kısıtlar doğrusaldır.
- Bulanık sayıların ifade edilmesinde üçgen bulanık sayılar kullanılmıştır.
- Talep, kapasite ve geri dönüşüm oranları bulanık olarak ifade edilmiştir.
- Bulanık sayılar doğrusal üyelik fonksiyonları ile temsil edilmiş ve amaç fonksiyonlarının birleştirilmesinde minimum operatörü kullanılmıştır.

Yukarıdaki bilgiler ışığında geliştirilen ÇABP modeline ait formülasyon aşağıda verilmiştir.

İndisler

i tedarikçiler kümesi

j fabrikalar kümesi

k perakendeciler kümesi

l müşteriler kümesi

m toplama merkezleri kümesi

d demontaj merkezleri kümesi

r yenileme merkezleri kümesi

c parça kümesi

p dönem kümesi

g amaç fonksiyonları kümesi

Değişkenler

X_{ijcp} tedarikçi i'den fabrika j'ye dönem p'de taşınan parça c miktarı

Y_{jkp} fabrika j'den perakendeci k'ya dönem p'de taşınan ürün miktarı

Z_{klp} perakendeci k'dan müşteri l'ye dönem p'de taşınan ürün miktarı

W_{lmp} müşteri l'den toplama merkezi m'ye dönem p'de taşınan ürün miktarı

A_{mjp} toplama merkezi m'den fabrika j'ye dönem p'de taşınan ürün miktarı

B_{mdp} toplama merkezi m'den demontaj merkezi d'ye dönem p'de ürün miktarı

D_{dcp} demontaj merkezi d'den dönem p'de atığa yollanan parça c miktarı

E_{drcp} demontaj merkezi d'den yenileme merkezi r'ye dönem p'de taşınan parça c miktarı

F_{rjcp} yenileme merkezi r'den fabrika j'ye dönem p'de taşınan parça c miktarı

H_{jp} eğer fabrika j dönem p'de açılır ise 1, aksi halde 0

G_{kp} eğer perakendeci k dönem p'de açılır ise 1, aksi halde 0

Parametreler

$\tilde{a}_{icp}$ tedarikçi i'nin dönem p'deki parça c bulanık kapasitesi

$\tilde{b}_{jp}$ fabrika j'nin dönem p'deki bulanık kapasitesi

$\tilde{c}_{kp}$ perakendeci k'nın dönem p'deki bulanık kapasitesi

$\tilde{d}_{lp}$ müşteri l'nin dönem p'deki bulanık kapasitesi

$\tilde{e}_{mp}$ toplama merkezi m'nin dönem p'deki bulanık kapasitesi

$\tilde{f}_{dcp}$ demontaj merkezi *d*'nin dönem *p*'deki parça *c* bulanık kapasitesi

$\tilde{g}_{rcp}$ yenileme merkezi *r*'nin dönem *p*'deki parça *c* bulanık kapasitesi

di_{ij} tedarikçi *i* ve fabrika *j* arasındaki mesafe

di_{jk} fabrika *j* ve perakendeci *k* arasındaki mesafe

di_{kl} perakendeci *k* ve müşteri *l* arasındaki mesafe

di_{lm} müşteri *l* ve toplama merkezi *m* arasındaki mesafe

di_{md} toplama merkezi *m* ve demontaj merkezi *d* arasındaki mesafe

di_{mj} toplama merkezi *m* ve fabrika *j* arasındaki mesafe

di_{d} demontaj merkezi *d* ve atık arasındaki mesafe

di_{dr} demontaj merkezi *d* ve yenileme merkezi *r* arasındaki mesafe

di_{rj} yenileme merkezi *r* ve fabrika *j* arasındaki mesafe

r_c bir adet nihai ürün içindeki parça *c* sayısı

α_{jp} fabrika *j*'nin dönem *p*'deki sabit işletme maliyeti

β_{kp} perakendeci *k*'nın dönem *p*'deki sabit işletme maliyeti

t birim taşıma maliyeti

s_{ic} tedarikçi *i*'den parça *c*'yi satın alma maliyeti

w_{rc} yenileme merkezi *r*'nin parça *c*'yi yenileme maliyeti

H_p dönem *p*'de açılabilir maksimum fabrika sayısı

G_p dönem *p*'de açılabilir maksimum perakendeci sayısı

$\tilde{\eta}$ müşterilerden toplanan kullanılmış ürün bulanık yüzdesi

$\tilde{\vartheta}$ toplama merkezlerinden fabrikalara gönderilen ürün bulanık yüzdesi

$\tilde{\lambda}$ demonte edilen ürünlerden açığa çıkan parçaların atığa yollanan bulanık yüzdesi

Amaç Fonksiyonları

z_1 toplam üretim ve dağıtım maliyeti

z_2 toplam fabrika ve perakendeci tesisi açma maliyeti

Amaç fonksiyonu

$Minimizasyon$

$$z_1 \cong t(\sum_i \sum_j \sum_c \sum_p X_{ijcp}.di_{ij} + \sum_j \sum_k \sum_p Y_{jkp}.di_{jk} + \sum_k \sum_l \sum_p Z_{klp}.di_{kl} +$$
$$\sum_l \sum_m \sum_p W_{lmp}.di_{lm} +$$
$$\sum_m \sum_j \sum_p A_{mjp}.di_{mj} +$$
$$\sum_m \sum_d \sum_p B_{mdp}.di_{md} + \sum_d \sum_c \sum_p D_{dcp}.di_{d} + \sum_d \sum_r \sum_c \sum_p E_{drcp}.di_{dr} +$$

$$\sum_r \sum_j \sum_c \sum_p F_{rjcp}.di_{rj}) + \sum_i \sum_j \sum_c \sum_p X_{ijcp}.s_{ic} + \sum_r \sum_j \sum_c \sum_p F_{rjcp}.w_{rc} \quad (3.31)$$

$$z_2 \cong \sum_j \sum_p H_{jp}.\alpha_{jp} + \sum_k \sum_p G_{kp}.\beta_{kp} \quad (3.32)$$

Eşitlik (3.31) ve (3.32)'de "≅" olarak gösterilen ifade "=" ifadesinin bulanıklaştırılmış halidir ve amaç fonksiyonu değerinin yaklaşık olarak bir değere eşit olduğunu gösterir. Verilen model, 2 amaç fonksiyonundan oluşmaktadır. Birinci kısım (3.31) taşıma, yenileme ve satın alma maliyetlerinden oluşan üretim ve dağıtım maliyetlerini gösterirken, ikinci kısım (3.32) fabrika ve perakendecilere ait tesis açma maliyetlerini göstermektedir.

Kısıtlar

$$\sum_j X_{ijcp} \leq \tilde{a}_{icp} \qquad \forall_{i,c,p} \quad (3.33)$$

$$\sum_k Y_{jkp} \leq \tilde{b}_{jp}.H_{jp} \qquad \forall_{j,p} \quad (3.34)$$

$$\sum_l Z_{klp} \leq \tilde{c}_{kp}.G_{kp} \qquad \forall_{k,p} \quad (3.35)$$

$$\sum_j A_{mjp} + \sum_d B_{mdp} \leq \tilde{e}_{mp} \qquad \forall_{m,p} \quad (3.36)$$

$$D_{dcp} + \sum_r E_{drcp} \leq \tilde{f}_{dcp} \qquad \forall_{d,c,p} \quad (3.37)$$

$$\sum_j F_{rjcp} \leq \tilde{g}_{rcp} \qquad \forall_{r,c,p} \quad (3.38)$$

$$\sum_k Z_{klp} \geq \tilde{d}_{lp} \qquad \forall_{l,p} \quad (3.39)$$

$$\sum_j H_{jp} \leq H_p \qquad \forall_p \quad (3.40)$$

$$\sum_k G_{kp} \leq G_p \qquad \forall_p \quad (3.41)$$

$$\sum_i X_{ijcp} + \sum_r F_{rjc(p-1)} + r_c \sum_m A_{mj(p-1)} - r_c \sum_k Y_{jkp} = 0 \qquad \forall_{j,c,p} \quad (3.42)$$

$$\sum_j Y_{jkp} - \sum_l Z_{klp} = 0 \qquad \forall_{k,p} \quad (3.43)$$

$$\tilde{\eta} \sum_k Z_{klp} - \sum_m W_{lmp} = 0 \qquad \forall_{l,p} \quad (3.44)$$

$$\tilde{\vartheta} \sum_l W_{lmp} - \sum_j A_{mjp} = 0 \qquad \forall_{m,p} \quad (3.45)$$

$$(1 - \tilde{\vartheta}) \sum_l W_{lmp} - \sum_d B_{mdp} = 0 \qquad \forall_{m,p} \quad (3.46)$$

$$r_c \tilde{\lambda} \sum_m B_{mdp} - D_{dcp} = 0 \qquad \forall_{d,c,p} \quad (3.47)$$

$$r_c (1 - \tilde{\lambda}) \sum_m B_{mdp} - \sum_r E_{drcp} = 0 \qquad \forall_{d,c,p} \quad (3.48)$$

$$\sum_d E_{drcp} - \sum_j F_{rjcp} = 0 \qquad \forall_{r,c,p} \quad (3.49)$$

$$X_{ijcp}, Y_{jkp}, Z_{klp}, W_{lmp}, A_{mjp}, B_{mdp}, D_{dcp}, E_{drcp}, F_{rjcp} \geq 0 \qquad \forall_{i,j,k,l,m,d,r,c,p} \quad (3.50)$$

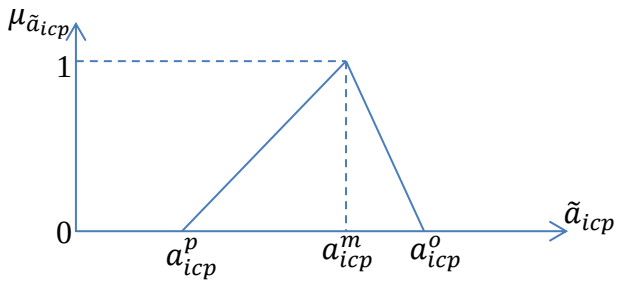
$$H_{jp}, G_{kp} = \{0, 1\} \qquad \forall_{j,k,p} \quad (3.51)$$

Kısıt (3.33) tedarikçilerden fabrikalara taşınan parça miktarının ilgili tedarikçinin bulanık kapasitesinden fazla olamayacağını; Kısıt (3.34) fabrikalardan perakendecilere taşınan ürün miktarının ilgili fabrikanın bulanık kapasitesinden fazla olamayacağını; Kısıt (3.35) perakendecilerden müşterilere gönderilen ürün miktarının ilgili perakendecinin bulanık kapasitesinden fazla olamayacağını; Kısıt (3.36) toplama merkezlerinden fabrikalara ve demontaj merkezlerine taşınan kullanılmış ürün miktarının ilgili toplama merkezi bulanık kapasitesini aşamayacağını; Kısıt (3.37) demontaj merkezlerinden atığa ve yenileme merkezlerine gönderilen parça miktarının ilgili demontaj merkezi bulanık kapasitesinden fazla olamayacağını ve Kısıt (3.38) yenileme merkezlerinden fabrikalara gönderilen parça miktarının ilgili yenileme merkezinin bulanık kapasitesinden büyük olamayacağını göstermektedir. Kısıt (3.39) müşteri taleplerinin perakendeci tarafından eksiksik biçimde karşılanmasını sağlamaktadır. Kısıtlar (3.40) ve (3.41) sırasıyla açılabilir fabrika ve perakendeci sayılarının istenen rakama eşit ve altında olmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.42) tedarikçilerden, toplama merkezlerinden ve yenileme merkezlerinden fabrikalara gönderilen parça ve kullanılmış ürün miktarının fabrikalardan perakendecilere gönderilen ürün miktarına eşit olmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.43) fabrikalardan perakendecilere gönderilen ürün miktarının perakendecilerden müşterilere gönderilen ürün miktarına eşit olmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.44), perakendecilerden müşterilere gönderilen ürün miktarının bulanık bir yüzdesinin toplanarak, toplama merkezlerine gönderilmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.45) müşterilerden toplanan ürünlerin bulanık bir yüzdesinin toplama merkezleri aracılığıyla fabrikalara ulaştırılmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.46) toplama merkezlerinde geri kalan kullanılmış ürünlerin demonte edilebilmesi için demontaj merkezlerine gönderilmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.47), toplama merkezlerinden demontaj merkezlerine gönderilen kullanılmış ürünlerden bulanık bir oranının demonte edildikten sonra atığa yollanmasını, Kısıt (3.48) ise demonte edildikten sonra kullanılabilir olan geri kalan parça miktarının yenilenmek üzere yenileme merkezine gönderilmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.49), yenileme merkezlerinden montajlanmak üzere fabrikalara parça gönderimini garanti etmektedir. Son iki kısıt ise karar değişkenlerine ait negatif olmama kısıtlarıdır.

Yukarıda bulanık olarak ifade edilen çok amaçlı matematiksel modelin çözülebilmesi için bulanık ifadelerin durulaştırılması yani deterministik hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için Liang ve Cheng (2009) tarafından önerilen ÇABP yaklaşımı kullanılmıştır.

3.2.1.2.1. Liang ve Cheng bulanık yaklaşımı

Liang ve Cheng (2009) yaklaşımının uygulanabilmesi için birbirleri ile çelişen birden fazla amaç fonksiyonunun olması gerekmektedir. Önerilen yaklaşım karar vericinin memnuniyet seviyesini maksimum kılacak ödünleşik çözümü bulmaktadır. Diğer bulanık modellerde olduğu gibi Liang ve Cheng (2009)'in önerdikleri model de öncelikle bulanık ifadelerin bulanık olmayan ifadelere dönüştürülüp daha sonra tek amaçlı klasik doğrusal programlama modeli şeklinde çözülmesine dayalıdır. Problem varsayımlarında belirtildiği gibi bulanık parametreler üçgen sayılar ile ifade edilmiştir. Üçgen bulanık sayıların avantajı bulanık aritmetik işlemler sırasında kolaylık ve esneklik sağlamalarıdır (Liang, 2006). Liang ve Cheng (2009) yukarıdaki bulanık çok amaçlı modelin bulanık sağ taraf değerlerinin üçgen bir yapıda olduğunu varsaymıştır. Bu üçgen yapının sol, orta ve sağ değerlerini ise sırasıyla en kötümser değer (*p= pessimistic*), en olası değer (*m= most likely*) ve en iyimser değer (*o= optimistic*) olarak tanımlamıştır. Şekil 3.22 örnek olarak tedarikçi kapasite değerinin üçgen bulanık sayı olarak ($\tilde{a}_{icp} = a_{icp}^{p}, a_{icp}^{m}, a_{icp}^{o}$) gösterimini vermektedir.



Şekil 3.22. $\tilde{a}_{icp}$ değerinin üçgensel gösterimi (Paksoy ve ark. 2013b)

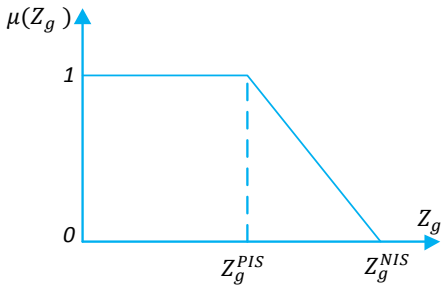
Kötümser, olası ve iyimser değerler ile tanımlanan bulanık sağ taraf sabiti, ağırlıklandırılmış ortalama ağırlık yöntemi ile bulanık olmayan sayıya dönüştürülür. Kabul edilebilir minimum üyelik seviyesi (α) verildiğinde,

$$\sum_j X_{ijcp} \leq w_1\, a_{icp}^{p,\alpha} + w_2 a_{icp}^{m,\alpha} + w_3 a_{icp}^{o,\alpha} \qquad \forall_{i,c,p} \qquad (3.52)$$

olarak bulanık olmayan hale getirilir.

Eşitlik (3.52)'de, w_1 kötümser değerin, w_2 olası değerin ve w_3 iyimser değerin katsayısı olmak üzere $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ eşitliği bulunmaktadır. Modele ait tüm bulanık kısıtlar yukarıdaki gibi dönüşüm yapılarak bulanık olmayan eşitliklere dönüştürülebilir. Gerçek hayatta ağırlık katsayıları ve α değerleri karar vericinin deneyimine bırakılsa da Liang ve Cheng (2009) bu değerler için $w_1 = w_3 = 1/6$, $w_2 = 4/6$ ve α= 0.5 alınabileceğini belirtmiştir. Liang ve Cheng (2009), farklı w ve α değerleri için farklı çözümler elde edilebileceği gibi, önem verilen amaç fonksiyonu değerlerinin en büyük katsayıya sahip olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Buraya kadar olan kısım, bulanık kısıtların bulanık olmayan değerler ile ifade edilmesinden oluşmaktadır. Ancak, modelin klasik doğrusal programlama modeli olarak çözülebilmesi için bulanık amaçların da bulanık olmayan ifadelere dönüştürülmesi gerekmektedir. Liang ve Cheng (2009) amaç fonksiyonlarının dönüştürülmesi için her bir amaç fonksiyonu için Z_g^{PIS} ve Z_g^{NIS} olmak üzere iki farklı değer hesaplanması gerektiğini önermişlerdir. Buradaki Z_g^{PIS} ilgili amaç fonksiyonu için pozitif ideal çözümü (alt sınır) temsil ederken, Z_g^{NIS} değeri ilgili amaç fonksiyonunun negatif ideal çözümünü (üst sınır) temsil etmektedir (eğer amaç minimizasyon ise). Bu sayede, her bir amaç fonksiyonuna ait birer alt ve üst sınıra sahip olunmuş olur. Şekil 3.23 amaç fonksiyonlarına (minimizasyon problemleri için) ait üyelik fonksiyonunu göstermektedir (Paksoy ve ark. 2013b).



Şekil 3.23. Amaç fonksiyonlarına ait üyelik fonksiyonu (Paksoy ve ark. 2013b)

Şekil 3.23'ten çıkarılabilecek amaç fonksiyonlarına ait üyelik fonksiyonu da aşağıda verilmiştir.

$$\mu(Z_g) = \begin{cases} 1, & z_g \le z_g^{PIS} \\ \frac{z_g^{NIS} - z_g}{z_g^{NIS} - z_g^{PIS}}, & z_g^{PIS} < z_g < z_g^{NIS}, \quad \forall_g \\ 0, & z_g \ge z_g^{NIS} \end{cases} \tag{3.53}$$

Liang ve Cheng (2009)'in önerdiği yaklaşımda, bulanık amaç fonksiyonu durulaştırıldıktan sonra son adım çok amaçlı bulanık doğrusal modelin *L (karar verici memnuniyet seviyesi)* karar değişkeni eklenerek tek amaçlı doğrusal programlama modeline dönüştürülmesidir. Sonuç olarak (3.31)-(3.51) eşitliklerinden oluşan ÇABP modeli aşağıdaki gibi tek amaçlı doğrusal programlama modeline dönüştürülür.

Amaç fonksiyonu

Maksimizasyon (L) (3.54)

Kısıtlar

$L \le \frac{z_1^{NIS} - z_1}{z_1^{NIS} - z_1^{PIS}}$ (3.55)

$L \le \frac{z_2^{NIS} - z_2}{z_2^{NIS} - z_2^{PIS}}$ (3.56)

$\sum_j X_{ijcp} \le w_1 a_{icp}^{p,\alpha} + w_2 a_{icp}^{m,\alpha} + w_3 a_{icp}^{o,\alpha} \quad \forall_{i,c,p}$ (3.57)

$\sum_k Y_{jkp} \le (w_1 b_{jp}^{p,\alpha} + w_2 b_{jp}^{m,\alpha} + w_3 b_{jp}^{o,\alpha}).H_{jp} \quad \forall_{j,p}$ (3.58)

$\sum_l Z_{klp} \le (w_1 c_{kp}^{p,\alpha} + w_2 c_{kp}^{m,\alpha} + w_3 c_{kp}^{o,\alpha}).G_{kp} \quad \forall_{k,p}$ (3.59)

$\sum_j A_{mjp} + \sum_d B_{mdp} \le w_1 e_{mp}^{p,\alpha} + w_2 e_{mp}^{m,\alpha} + w_3 e_{mp}^{o,\alpha} \quad \forall_{m,p}$ (3.60)

$D_{dcp} + \sum_r E_{drcp} \le w_1 f_{dcp}^{p,\alpha} + w_2 f_{dcp}^{m,\alpha} + w_3 f_{dcp}^{o,\alpha} \quad \forall_{d,c,p}$ (3.61)

$\sum_j F_{rjcp} \le w_1 g_{rcp}^{p,\alpha} + w_2 g_{rcp}^{m,\alpha} + w_3 g_{rcp}^{o,\alpha} \quad \forall_{r,c,p}$ (3.62)

$\sum_k Z_{klp} \ge w_1 d_{lp}^{p,\alpha} + w_2 d_{lp}^{m,\alpha} + w_3 d_{lp}^{o,\alpha} \quad \forall_{l,p}$ (3.63)

$(w_1 \eta^{p,\alpha} + w_2 \eta^{m,\alpha} + w_3 \eta^{o,\alpha}) \sum_k Z_{klp} - \sum_m W_{lmp} = 0 \quad \forall_{l,p}$ (3.64)

$(w_1 \vartheta^{p,\alpha} + w_2 \vartheta^{m,\alpha} + w_3 \vartheta^{o,\alpha}) \sum_l W_{lmp} - \sum_j A_{mjp} = 0 \quad \forall_{m,p}$ (3.65)

$(1 - (w_1 \vartheta^{p,\alpha} + w_2 \vartheta^{m,\alpha} + w_3 \vartheta^{o,\alpha})) \sum_l W_{lmp} - \sum_d B_{mdp} = 0 \quad \forall_{m,p}$ (3.66)

$r_c(w_1 \lambda^{p,\alpha} + w_2 \lambda^{m,\alpha} + w_3 \lambda^{o,\alpha}) \sum_m B_{mdp} - D_{dcp} = 0 \quad \forall_{d,c,p}$ (3.67)

$r_c(1 - (w_1 \lambda^{p,\alpha} + w_2 \lambda^{m,\alpha} + w_3 \lambda^{o,\alpha})) \sum_m B_{mdp} - \sum_r E_{drcp} = 0 \quad \forall_{d,c,p}$ (3.68)

$L \in [0, 1]$ (3.69)

(3.40), (3.41), (3.42), (3.43), (3.49), (3.50) ve (3.51)

Liang ve Cheng (2009) yaklaşımının önerilen modele uygulanması aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır,

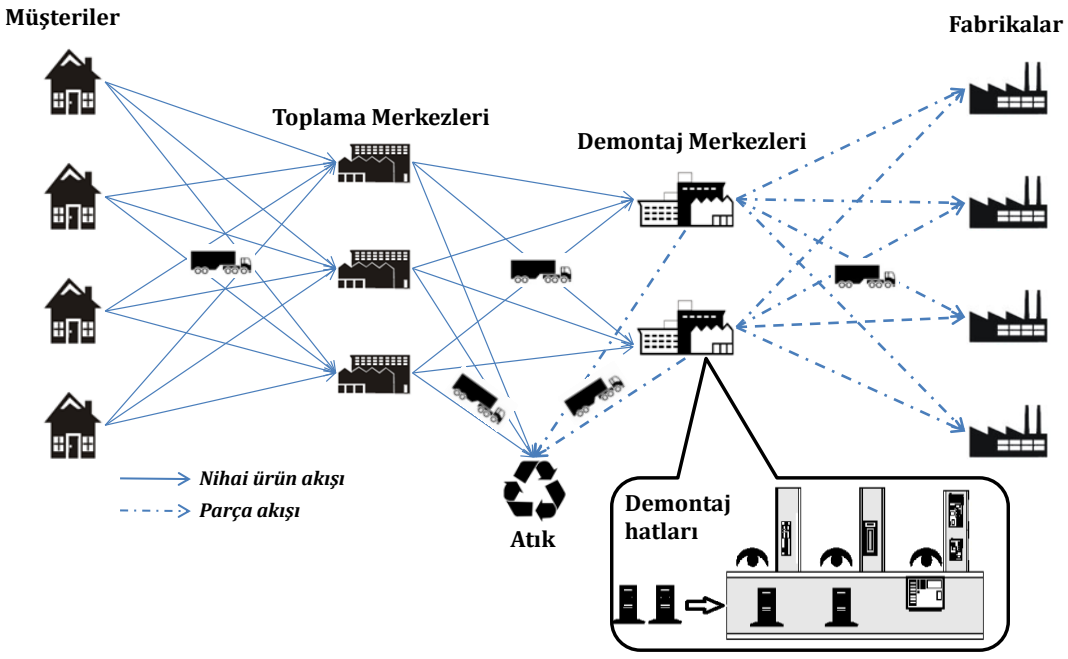
1. Orjinal ÇABP modeli oluşturulur.
2. Verilen minimum kabul edilebilir üyelik seviyesi (α) göz önüne alınarak, bulanık sağ taraf değerine sahip olan kısıtlar, ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılarak bulanık olmayan (durulaştırma) kısıtlara dönüştürülür.
3. Her bir amaç fonksiyonu için z_g^{NIS} ve z_g^{PIS} değerleri hesaplanarak, amaç fonksiyonlarına ilişkin üyelik fonksiyonları belirlenir. Bir amacın z_g^{PIS} değeri o amacın modelde tek başına çözülmesi sonucunda elde edilen amaç fonksiyon değeri olup, z_g^{NIS} değeri ise diğer amacın amaç fonksiyonu olduğu durumda hesaplanan ilk amacın değeri olup, bu değer ilgili amacın en kötü değeridir. Diyer bir ifadeyle, amaç fonksiyonlarına ait ödünleşme tablosu (pay-off table) oluşturulur.
4. *L* değişkeni eklenerek çok amaçlı doğrusal programlama modeli tek amaçlı bir doğrusal programlama modeline dönüştürülür. Bu yeni değişken (*L*), karar vericinin bulanık amaçlarına ilişkin toplam tatmin düzeyi olarak tanımlanabilir.
5. *L* değişkenin amaç fonksiyonu olduğu tek amaçlı doğrusal programlama modeli çözülür.
6. Elde edilen tatmin seviyesi karar verici tarafından kabul edilene kadar işlemler tekrarlanır. Eğer karar verici tatmin seviyesinden memnun kalmaz ise, elde edilen amaç fonksiyonu değerlerini z_g^{NIS} değerinin güncellenmesinde kullanabilir.

3.2.2. Tersine tedarik zinciri ve demontaj hattı dengeleme problemi entegrasyonu

Bu alt bölümde 2 farklı TTZ ve DHD problemi entegrasyonu modeli verilmiştir. Birinci model tüm parametrelerin kesin olduğu entegre model iken, ikinci entegre modelde belirsizliklerin yansıtılabilmesi amacıyla parametreler bulanık olarak ele alınmış ve Zimmermann (1976) ve Werners (1987) tarafından önerilen BMP yaklaşımları karşılaştırmalı olarak uygulanmıştır.

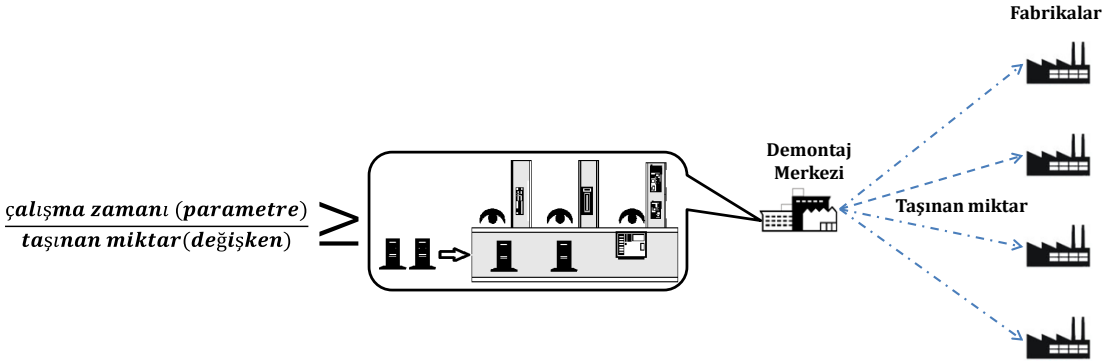
3.2.2.1. Model 3: Demontaj hattı dengeleme problemi içeren tersine tedarik zinciri ağ tasarımı modeli

Tez kapsamında geliştirilen 3. modelde TTZ ve DHD problemlerinin eş zamanlı optimizasyonu için KTDOP modeli önerilmiştir (Özceylan ve Paksoy, 2013c). Önerilen modelde ürün akışı müşterilerden, toplama merkezlerinden, demontaj merkezlerinden ve fabrikalardan oluşan bir TTZ ağında meydana gelmektedir (Şekil 3.24). Müşterilerden belirli bir oranda toplanan ürünler ön incelemeye tabi tutuldukları toplama merkezlerine gönderilirler. İncelenen kullanılmış ürünlerden durumları kötü olanlar atığa yollanırken, geri kalan kısım demonte edilmesi için demontaj merkezlerine taşınır. Demontaj işlemi sonrasında işe yarayan parçalar yeniden kullanılmak üzere fabrikalara gönderilirken, kullanılamaz durumda olan parçalar atığa gönderilir. Bu ağ yapısında karar vericinin çözmesi gereken 2 temel problem vardır. Bunlardan birincisi tüm ağdaki taşıma maliyetini minimize edecek optimum dağıtım akışını bulmak iken, ikincisi de demontaj merkezlerinde kullanılmış ürünlerin demontajının en az iş istasyonu ile yapılmasının sağlanmasıdır. Karar vericinin tüm ağ sürecindeki akışı kontrol edebilmesi ve iki temel problem arasındaki etkileşimi görebilmesi için bu iki problem tek bir formülasyonda entegre edilmiştir.



Şekil 3.24. Model 3'e ait TTZ ağ yapısı

Bu iki problemin entegrasyonu demontaj merkezlerindenki çevrim zamanı ile sağlanmıştır. Bilindiği gibi çevrim zamanı elverişli çalışma zamanının müşteri talebine bölünmesi ile elde edilir. Önerilen modelde müşteriler fabrikalar olup, fabrikanın talebi ise demontaj merkezlerinden çıkan demonte edilmiş parçalardır. Söz konusu TTZ ağlarında demontaj merkezlerindeki çalışma saatleri bilinebilirken, demontaj merkezlerinde demonte edilecek ürün miktarı yani demontaj merkezlerinden fabrikalara taşınacak ürün sayısı ağ tasarımı kararlarından olup, bir değişkendir. Bu durumda demontaj merkezlerindeki çevrim zamanı da sabit olmayıp bir değişkendir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. İki problemin entegrasyonu

Sonuç olarak, geliştirilen matematiksel model fabrika taleplerini karşılamak için minimum taşıma maliyetli en uygun dağıtım ağını bulmaya çalışırken, diğer yandan demontaj merkezlerindeki iş istasyonları sayısını minimize edecek en uygun hat dengesini amaçlamaktadır. Problem ile ilgili varsayımlar aşağıda verilmiştir.

Varsayımlar

- Fabrika parça talepleri deterministiktir ve tamamıyla karşılanmalıdır.
- Ürün akışları sadece ardıl tesisler arasında gerçekleşmektedir.
- Tüm tesis kapasiteleri sınırlı ve bilinmektedir.
- Toplama, atık ve demontaj oranları bilinmektedir.
- Birden fazla parçaya sahip tek bir ürün tümüyle demonte edilmektedir.
- Her bir demontaj merkezindeki çevrim zamanı değişkendir.
- Operatörlerin yürüme zamanları dikkate alınmamıştır.
- Bir demontaj görevi birden fazla iş istasyonuna atanamaz veya ayrıştırılamaz.
- Demontaj görevleri arasındaki öncelik ilişkileri ve süreleri bilinmektedir.

- Tüm demontaj görevleri herhangi bir iş istasyonuna atanabilir.
- Demontaj görev süreleri atandığı iş istasyonundan bağımsızdır.
- Her demontaj görevi bir üst alt montajdan bir parça çıkarılmasına veya yeni bir alt montaja yol açmaktadır.
- Ürünler düz bir demontaj hattında demonte edilmektedir.

Yukarıda verilen ilk 4 varsayım genel TTZ ağ tasarımı varsayımlarıdır (Neto ve ark. 2008; Wang ve Hsu 2010b). Geri kalan varsayımlar (çevrim zamanlı olan hariç) Altekin ve ark. (2008) ve Koç ve ark. (2009) tarafından tanımlanmıştır. Bu varsayımlar altında geliştirilen KTDOP modeline ait formülasyon aşağıda verilmiştir.

İndisler

c müşteriler kümesi $c=1, 2, ...C$

l toplama merkezleri kümesi $l=1, 2,...L$

d demontaj merkezleri kümesi $d=1, 2,...D$

p fabrikalar kümesi $p=1, 2,...P$

k parça kümesi $k=1, 2,...K$

j iş istasyonu kümesi $j=1, 2,...J$

a yapay düğümler kümesi $a=1, 2,...A_a$

i görevler kümesi $i=1, 2,...B_i$

$P(A_a)$, $P(B_i)$ A_a, B_i'nin hemen öncülleri kümesi

$S(A_a)$, $S(B_i)$ A_a, B_i'nin hemen ardılları kümesi

Değişkenler

Q_{cl} müşteri c'den toplama merkezi l'ye taşınan kullanılmış ürün miktarı

Y_{ld} toplama merkezi l'den demontaj merkezi d'ye taşınan kullanılmış ürün miktarı

N_l toplama merkezi l'den atığa yollanan kullanılmış ürün miktarı

W_{dpk} demontaj merkezi d'den fabrika p'ye gönderilen parça k miktarı

V_{dk} demontaj merkezi d'den atığa gönderilen parça k miktarı

CT_d demontaj merkezi d'deki çevrim zamanı

X_{ijd} eğer görev i demontaj merkezi d'deki iş istasyonu j'ye atanır ise 1, aksi halde 0

F_{jd} eğer demontaj merkezi d'de iş istasyonu j açılır ise 1, aksi halde 0

Z_{id} eğer görev i demontaj merkezi d'de gerçekleşirse 1, aksi halde 0

Parametreler

d_{Bi} görev *i*'nin işlem süresi

J açılabilir maksimum iş istasyonu sayısı

W_{time} çalışma zamanı

Ca_c müşteri *c*'deki toplam ürün miktarı

Ca_l toplama merkezi *l*'nin kapasitesi

Ca_{dk} demontaj merkezi *d*'nin parça *k* kapasitesi

De_{pk} fabrika *p*'nin parça *k* talebi

C_t taşıma maliyeti ($/ton*km)

D_{cl} müşteri *c* ve toplama merkezi *l* arası mesafe (km)

D_{ld} toplama merkezi *l* ve demontaj merkezi *d* arası mesafe (km)

D_l toplama merkezi *l* ve atık arası mesafe (km)

D_{dp} demontaj merkezi *d* ve fabrika *p* arası mesafe (km)

D_d demontaj merkezi *d* ve atık arası mesafe (km)

O demontaj hattında bir iş istasyonu açma maliyeti ($)

r_k nihai ürünün demontajı sonrasında açığa çıkan parça *k* sayısı

η_c müşteri *c*'den kullanılmış ürün toplama yüzdesi

τ_l toplama merkezi *l*'den demontaj merkezlerine gönderilen kullanılmış ürün yüzdesi

β_d demontaj merkezi *d*'den fabrikalara gönderilen parça yüzdesi

Amaç fonksiyonu

$Minimizasyon$

$$C_t.\left(\sum_c^C \sum_l^L Q_{cl}.D_{cl} + \sum_l^L \sum_d^D Y_{ld}.D_{ld} + \sum_l^L N_l.D_l + \sum_d^D \sum_p^P \sum_k^K W_{dpk}.D_{dk} + \sum_d^D \sum_k^K V_{dk}.D_d\right) + \quad (3.70)$$

$$O.\sum_j^J \sum_d^D F_{jd}.j \quad (3.71)$$

Amaç fonksiyonu iki kısmından oluşmaktadır. Birinci kısım (3.70) TTZ ağındaki toplam taşıma maliyetini minimize ederken, ikinci kısım (3.71) demontaj merkezlerindeki iş istasyonu açma maliyetini minimize etmektedir.

Kısıtlar

$$\sum_{i:B_i \in S(A_a)}^{I} Z_{id} = 1 \qquad \forall_{a=0,d} \qquad (3.72)$$

$$\sum_{i:B_i \in S(A_a)}^{I} Z_{id} = \sum_{i:B_i \in P(A_a)}^{I} Z_{id} \qquad \forall_{a\neq 0,d} \qquad (3.73)$$

$$\sum_{j}^{J} X_{ijd} = Z_{id} \qquad \forall_{i,d} \qquad (3.74)$$

$$\sum_{i:B_i \in P(A_a)}^{I} \sum_{j}^{h} X_{ijd} \geq \sum_{i:B_i \in S(A_a)}^{I} X_{ihd} \qquad \forall_{a\neq 0, h\in J, d} \qquad (3.75)$$

$$CT_d = (W_{time}/(\sum_{p}^{P} \sum_{k}^{K} W_{dpk} + \sum_{k}^{K} V_{dk})).F_{jd} \qquad \forall_{j,d} \qquad (3.76)$$

$$\sum_{i}^{I} X_{ijd}.d_{B_i} \leq CT_d.F_{jd} \qquad \forall_{j,d} \qquad (3.77)$$

$$\sum_{l}^{L} Q_{cl} \leq \eta_c.Ca_c \qquad \forall_{c} \qquad (3.78)$$

$$\sum_{d}^{D} Y_{ld} + N_l \leq Ca_l \qquad \forall_{l} \qquad (3.79)$$

$$\sum_{p}^{P} W_{dpk} + V_{dk} \leq Ca_{dk} \qquad \forall_{d,k} \qquad (3.80)$$

$$\sum_{d}^{D} W_{dpk} \geq De_{pk} \qquad \forall_{p,k} \qquad (3.81)$$

$$\tau_l.\sum_{c}^{C} Q_{cl} = \sum_{d}^{D} Y_{ld} \qquad \forall_{l} \qquad (3.82)$$

$$(1-\tau_l).\sum_{c}^{C} Q_{cl} = N_l \qquad \forall_{l} \qquad (3.83)$$

$$r_k.\beta_d.\sum_{l}^{L} Y_{ld} = \sum_{p}^{P} W_{dpk} \qquad \forall_{d,k} \qquad (3.84)$$

$$r_k.(1-\beta_d).\sum_{l}^{L} Y_{ld} = V_{dk} \qquad \forall_{d,k} \qquad (3.85)$$

$$Q_{cl}, Y_{ld}, N_l, W_{dpk}, V_{dk}, CT_d \geq 0 \qquad \forall_{c,l,d,k} \qquad (3.86)$$

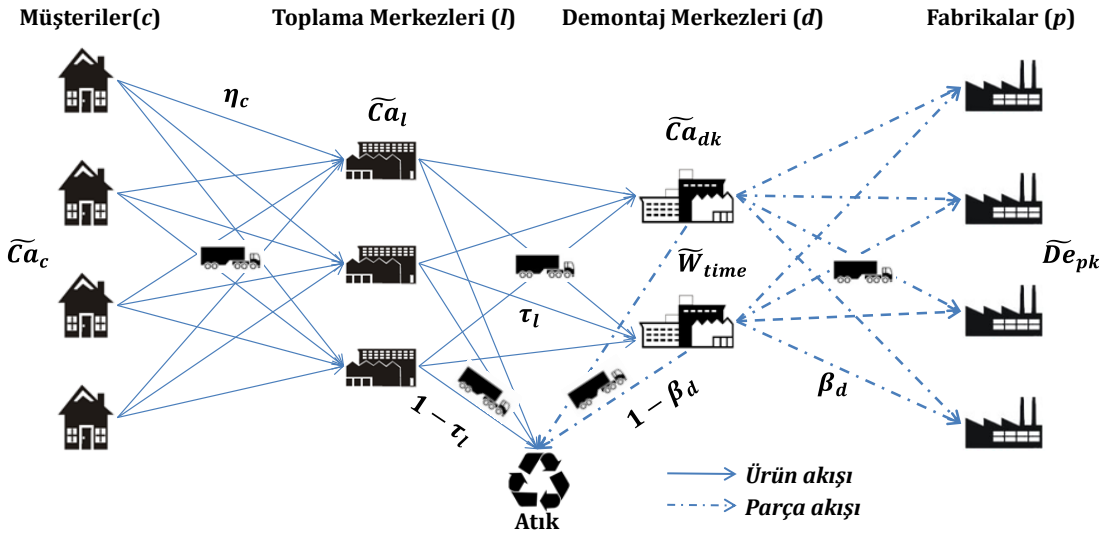
$$X_{ijd}, F_{jd}, Z_{id} \in \{0,1\} \qquad \forall_{i,j,d} \qquad (3.87)$$

(3.72) ve (3.73) numaralı eşitlikler demontaj görev diyagramındaki VE/VEYA tipi öncelik ilişkisine sahip ardıllardan yalnızca bir tanesinin seçilmesini sağlamaktadır. Bu iki kısıt çözümün demontaj ağacı oluşturan bir görev kümesinden meydana gelmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.74) eğer demontaj merkezinde bir demontaj görevi yapılıyorsa bu görevin istasyonlardan birine atanmasını, yapılmıyorsa atanmamasını sağlamaktadır. Kısıt (3.75) ise demontaj görev diyagramındaki normal düğümler arasındaki öncelik ilişkilerini kontrol etmek amaçlıdır. Kısıt (3.76) her bir demontaj merkezinden çıkan parça miktarını çalışma zamanına bölerek ilgili demontaj merkezinin çevrim zamanını hesaplamaktadır. Kısıt (3.77) ise her bir demontaj merkezinde eğer bir istasyon açıksa o istasyona atanan işlerin görev süreleri toplamının çevrim zamanından küçük olmasını garanti eder. Kısıt (3.78) müşterilerden belirli bir oranda kullanılmış ürün toplanmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.79) toplama merkezinden demontaj merkezlerine ve atığa gönderilen ürün miktarının ilgili toplama merkezinin kapasitesinden fazla olamayacağını göstermektedir. Kısıt (3.80) demontaj merkezinden fabrikalara ve atığa gönderilen parça miktarının ilgili demontaj merkezi kapasitesini

aşamayacağını göstermektedir. Kısıt (3.81) fabrikaların parça talebinin demontaj merkezleri tarafından eksiksiz biçimde sağlandığını göstermektedir. Kısıt (3.82) toplama merkezindeki kullanılmış ürünlerin belirli bir kısmının demontaj merkezlerine, Kısıt (3.83) ise geri kalan kısmın atığa yollanmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.84) demonte edildikten sonra elde edilen parça miktarının belirli bir kısmının fabrikalara gönderilmesini sağlarken, Kısıt (3.85) geri kalan kullanılamaz parça miktarının atığa gönderilmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.86) ve (3.87) sırasıyla karar değişkenlerinin pozitif ve 0-1 değerleri almasını sağlamaktadır.

3.2.2.2. Model 4: Demontaj hattı dengeleme problemi içeren tersine tedarik zinciri ağ tasarımına bulanık matematiksel programlama yaklaşımları

Bir önceki bölümde verilen deterministik TTZ/DHD problemleri entegrasyonu modelinde tüm parametrelerin önceden bilindiği ve kesin olduğu varsayımında bulunulmuştu. Ancak, gerçek hayatta kapasite, talep veya çalışma zamanı gibi önemli sistem parametreleri TTZ söz konusu olduğunda büyük oranda belirsizlik içermektedir. Parametrelerin belirsiz olduğu durumlarda en uygun amaç fonksiyonu değerlerinin de belirsiz olması kaçınılmaz bir durumdur. Bu sebeple bahsi geçen belirsizliklerin (kapasite, talep, çalışma zamanı ve amaç fonksiyonları) yansıtılabilmesi adına bir önceki bölümde verilen determistik entegre modele (Model 3) 2 farklı matematiksel programlama yaklaşımı uygulanmıştır (Şekil 3.26). Birinci yaklaşım olan Zimmermann (1976) yaklaşımı 3 farklı operatörle (*maks-min operatörü, min ve maks operatörlerinin konveks kombinasyonu* ve *bulanık-ve operatörü*) test edilirken, ikinci bulanık yaklaşım da Werners (1987) tarafından önerilen yöntem uygulanmıştır (Özceylan ve Paksoy, 2013d).

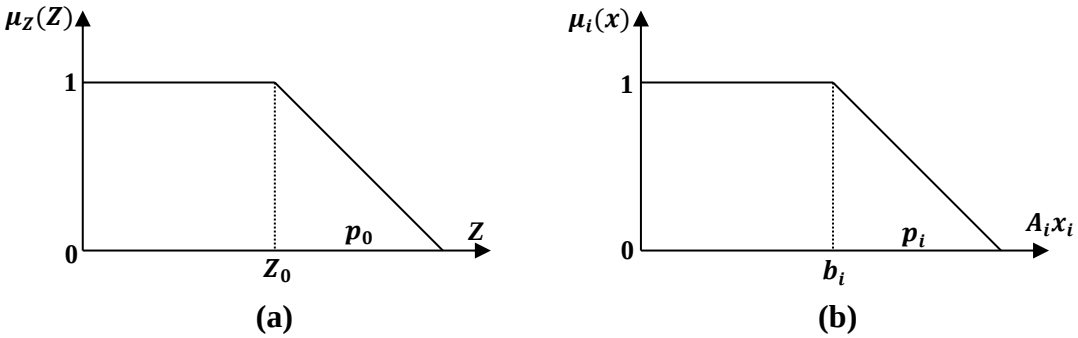


Şekil 3.26. Bulanık TTZ/DHD problemleri entegrasyonu

Önerilen modelde bir önceki modelde verilen deterministik amaç fonksiyonları (3.70) ve (3.71) aşağıda verilen üyelik fonksiyonu ile tanımlanmıştır.

$$\mu_Z(Z) = \begin{cases} 1 & z < z_0 \\ 1 + \frac{z_0 - z}{p_0} & z_0 \le z \le z_0 + p_o \\ 0 & z_0 + p_0 < z \end{cases} \tag{3.88}$$

burada, $\mu_Z(Z)$ amaç fonksiyonlarına ait üyelik fonksiyonunu gösterirken, p_0 ilgili amaç fonksiyonuna ait tolerans değerini, z_0 da hedeflenen amaç fonksiyonu değerini göstermektedir (Şekil 3.27a).



Şekil 3.27. Amaç fonksiyonlarına ait üyelik fonksiyonu (a); kısıtlara ait üyelik fonksiyonu (b)

Yine, bir önceki modelde deterministik olarak verilen (3.76), (3.78)-(3.81) kısıtları da aşağıdaki üyelik fonksiyonu ile bulanıklaştırılmıştır.

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & A_i x_i \leq b_i \\ 1 - \frac{A_i x_i - b_i}{p_i} & b_i < A_i x_i \leq b_i + p_i \\ 0 & A_i x_i > b_i + p_i \end{cases} \quad (3.89)$$

burada, $A_i x_i$ bulanık kısıtların sol taraf değerlerini, b_i sağ taraf değerlerini, p_i ise ilgili kısıtın tolerans seviyesini göstermektedir (Şekil 3.27b). Literatürde bulanık ifadelerin durulaştırılması için farklı bulanık operatörler kullanılmaktadır. Bu modelde *maks-min operatörü* (Bellman ve Zadeh, 1970), *min ve maks operatörlerinin konveks kombinasyonu* (Zimmermann, 1978) ve *bulanık-ve operatörü* (Werners, 1988) kullanılmıştır. Aşağıda her bir operatörle elde edilen bulanık matematiksel modeller verilmiştir.

3.2.2.2.1. Maks-min operatörlü bulanık model

Amaç fonksiyonu

Maksimizasyon (λ_1) (3.90)

Kısıtlar

$C_t.(\sum_c^C \sum_l^L Q_{cl}.D_{cl} + \sum_l^L \sum_d^D Y_{ld}.D_{ld} +$
$\sum_l^L N_l.D_l + \sum_d^D \sum_p^P \sum_k^K W_{dpk}.D_{dk} + \sum_d^D \sum_k^K V_{dk}.D_d) +$
$O.\sum_j^J \sum_d^D F_{jd} + \lambda_1.P_0 \leq Z_0 + P_0$ (3.91)

$CT_d.(\sum_p^P \sum_k^K W_{dpk} + \sum_k^K V_{dk})/F_{jd} + \lambda_1.P_1 \leq W_{time} + P_1 \quad \forall_{j,d}$ (3.92)

$\sum_l^L Q_{cl} \leq \eta_c.Ca_c + \lambda_1.P_2 \quad \forall_c$ (3.93)

$\sum_d^D Y_{ld} + N_l + \lambda_1.P_3 \leq Ca_l + P_3 \quad \forall_l$ (3.94)

$\sum_p^P W_{dpk} + V_{dk} + \lambda_1.P_4 \leq Ca_{dk} + P_4 \quad \forall_{d,k}$ (3.95)

$\sum_d^D W_{dpk} \geq De_{pk} + \lambda_1.P_5 \quad \forall_{p,k}$ (3.96)

$0 \leq \lambda_1 \leq 1$ (3.97)

(3.72)-(3.75), (3.77) ve (3.82)-(3.87)

Amaç fonksiyonu (3.90) tüm bulanık kısıtlardaki memnuniyet seviyesini (λ_1) maksimize etmeye çalışmaktadır. Z_0, toplam amaç fonksiyonuna ait hedefi temsil ederken, P_0 toplam amaç fonksiyonuna ait sapma miktarını yani kabul edilebilir tolerans

miktarını göstermektedir. P_1, P_2, P_3, P_4 ve P_5 sırasıyla çalışma zamanı, müşterilerde bulunan ürün miktarı, toplama merkezi kapasitesi, demontaj merkezi kapasitesi ve fabrika taleplerine ait tolerans değerlerini göstermektedir. Geri kalan (3.72)-(3.75), (3.77) ve (3.82) ve (3.87) kısıtlar aynı şekilde kalmıştır. Eğer λ_1=1 ise tam tatmin, λ_1=0 ise toleranslar tümüyle kullanıldığı için sıfır tatmin söz konusu olur.

3.2.2.2.2. Min ve maks operatörlerinin konveks kombinasyonlu bulanık model

Bir önceki bulanık modelde sadece maks-min operatörü kullanılmışken, bu bulanık modelde min operatörü ile maksimum operatörünün kombinasyonu kullanılmıştır. Min ve maks operatörlerinin konveks kombinasyonlu bulanık modeli aşağıda verilmiştir.

Amaç fonksiyonu

Maksimizasyon $\delta.\lambda_1 + (1-\delta).\lambda_2$ (3.98)

Kısıtlar

$C_t.(\sum_c^C \sum_l^L Q_{cl}.D_{cl} + \sum_l^L \sum_d^D Y_{ld}.D_{ld} +$

$\sum_l^L N_l.D_l + \sum_d^D \sum_p^P \sum_k^K W_{dpk}.D_{dk} + \sum_d^D \sum_k^K V_{dk}.D_d) + O.\sum_j^J \sum_d^D F_{jd} + \lambda_2.P_0 \leq Z_0 +$

$P_0 + M.\gamma_1$ (3.99)

$CT_d.(\sum_p^P \sum_k^K W_{dpk} + \sum_k^K V_{dk})/F_{jd} + \lambda_2.P_1 \leq W_{time} + P_1 + M.\gamma_2 \ \forall_{j,d}$ (3.100)

$\sum_l^L Q_{cl} \leq \lambda_c.Ca_c + \lambda_2.P_2 + M.\gamma_3 \quad \forall_c$ (3.101)

$\sum_d^D Y_{ld} + N_l + \lambda_2.P_3 \leq Ca_l + P_3 + M.\gamma_4 \quad \forall_l$ (3.102)

$\sum_p^P W_{dpk} + V_{dk} + \lambda_2.P_4 \leq Ca_{dk} + P_4 + M.\gamma_5 \quad \forall_{d,k}$ (3.103)

$\sum_d^D W_{dpk} \geq De_{pk} + \lambda_2.P_5 + M.\gamma_6 \quad \forall_{p,k}$ (3.104)

$0 \leq \lambda_2 \leq 1$ (3.105)

$\sum_{f=1}^F \gamma_f = F - 1$ (3.106)

$\delta_f \in \{0,1\} \quad \forall_f$ (3.107)

(3.72)-(3.75), (3.77), (3.82)-(3.87) ve (3.91)-(3.97)

Yukarıdaki modelde bulanık amaç fonksiyonu ve kısıtlar 2 farklı şekilde tanımlanmıştır. İlki min operatörlü olan (3.91)-(3.97) grubu iken, diğeri maks operatörlü olan (3.99)-(3.107) grubudur. (3.91)-(3.97) grubuna ait λ_1 değeri en az memnun edilen

kısıtın memnuniyet seviyesini temsil ederken; (3.99)-(3.107) 'na ait λ_2 değeri en çok memnun edilen kısıtın memnuniyet seviyesini temsil etmektedir. Amaç fonksiyonu bu iki karar değişkeninin belirli bir katsayı yardımıyla kombinasyonundan oluşmaktadır. δ katsayısı çoğunlukla 0.6 değerine eşitlenmektedir (Bilgen ve Özkarahan, 2006). $f \in F$ modeldeki bulanık olan kısıt sayısını ifade ederken, γ_f değeri ise oldukça büyük bir sayı olan M değerinin katsayısını göstermektedir.

3.2.2.2.3. Bulanık-ve operatörlü bulanık model

Bulanık-ve operatörlü yaklaşımda bulanık amaç fonksiyonu kısıtı ile diğer bulanık kısıtlar bütünleştirilmektedir (Köçken ve Ahlatçıoğlu, 2011). Werners (1988) tarafından önerilen bulanık-ve operatörlü entegre model aşağıdaki gibi elde edilir.

Amaç fonksiyonu

$$\textit{Maksimizasyon } \lambda + (1-\delta).\frac{1}{F}\sum_f^F \lambda_f \tag{3.108}$$

Kısıtlar

$$C_t.\left(\sum_c^C \sum_l^L Q_{cl}.D_{cl} + \sum_l^L \sum_d^D Y_{ld}.D_{ld} + \sum_l^L N_l.D_l + \sum_d^D \sum_p^P \sum_k^K W_{dpk}.D_{dk} + \sum_d^D \sum_k^K V_{dk}.D_d\right) + O.\sum_j^J \sum_d^D F_{jd} + (\lambda+\lambda_1).P_0 \leq Z_0 + P_0 \tag{3.109}$$

$$CT_d.\left(\sum_p^P \sum_k^K W_{dpk} + \sum_k^K V_{dk}\right)/F_{jd} + (\lambda+\lambda_2).P_0 \leq W_{time} + P_1 \quad \forall_{j,d} \tag{3.110}$$

$$\sum_l^L Q_{cl} \leq \lambda_c.Ca_c + (\lambda+\lambda_3).P_2 \quad \forall_c \tag{3.111}$$

$$\sum_d^D Y_{ld} + N_l + (\lambda+\lambda_4).P_3 \leq Ca_l + P_3 \quad \forall_l \tag{3.112}$$

$$\sum_p^P W_{dpk} + V_{dk} + (\lambda+\lambda_5).P_4 \leq Ca_{dk} + P_4 \quad \forall_{d,k} \tag{3.113}$$

$$\sum_d^D W_{dpk} \geq De_{pk} + (\lambda+\lambda_6).P_5 \quad \forall_{p,k} \tag{3.114}$$

$$\lambda + \lambda_f = 1, \lambda_f \geq 0 \quad \forall_f \tag{3.115}$$

$$0 \leq \lambda \leq 1 \tag{3.116}$$

(3.72)-(3.75), (3.77) ve (3.82)-(3.87)

Amaç fonksiyonundaki (3.108) λ değeri bulanık kısıtlar için ortak tatmin seviyesini gösterirken, λ_f her bir bulanık kısıta ait tatmin seviyesini göstermektedir. Bir

önceki yaklaşımdaki gibi δ değeri genellikle 0.6 olarak kabul edilmektedir. Ancak δ=1 olarak kabul edilirse, model maks-min operatörlü bulanık modele dönüşür.

3.2.2.2.4. Werners yaklaşımlı bulanık model

3 farklı operatörlü Zimmermann (1976) yaklaşımına ek olarak, Werners (1987) tarafından önerilen bulanık yaklaşım geliştirilen bulanık TTZ/DHD entegrasyonuna uygulanmıştır. Werners (1987) yaklaşımında da bir önceki yaklaşımda olduğu gibi bulanık kısıtların p_i toleransına sahip olduğu varsayılmıştır. Ancak, Werners (1987) bulanık kısıtların olduğu bir ortamda karar vericinin amaç fonksiyonuna ait b_0 ve p_0 değerlerini öngöremeyebileceğini belirtmiştir. Bundan dolayı amaç fonksiyonu için aşağıda verilen z^0 ve z^1 gibi iki uç nokta hesaplanması gerektiğini önermişlerdir (Lai ve Hwang, 1992),

$$z^0 = \min cx \qquad\qquad z^1 = \min cx$$
$$s.t.\ (Ax)_i \le b_i, \forall_i, and\ x \ge 0 \qquad\qquad s.t.\ (Ax)_i \le b_i + p_i, \forall_i, and\ x \ge 0$$

Burada, z^0 modelin sıfır tolerans ile çözüldüğünde elde edilen amaç fonksiyonu değeri iken, z^1 modelin maksimum tolerans ile çözüldüğünde elde edilen değeridir. Elde edilecek amaç fonksiyonu değerinin bu iki sınır arasında olacağını varsayarsak, amaç fonksiyonuna ait üyelik fonksiyonu değeri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\mu(z) = \begin{cases} 1, & Z \le Z^0 \\ \frac{Z^1 - Z}{Z^1 - Z^0}, & Z^0 < Z < Z^1 \\ 0, & Z \ge Z^1 \end{cases} \tag{3.117}$$

Sonuç olarak Werners (1987) yaklaşımı ile elde edilen bulanık TTZ/DHD entegre modeli aşağıda verilmiştir.

Amaç fonksiyonu

Maksimizasyon (λ_1) (3.118)

Kısıtlar

$$C_t.(\sum_c^C \sum_l^L Q_{cl}.D_{cl} + \sum_l^L \sum_d^D Y_{ld}.D_{ld} + \sum_l^L N_l.D_l + \sum_d^D \sum_p^P \sum_k^K W_{dpk}.D_{dk} + \sum_d^D \sum_k^K V_{dk}.D_d) + O.\sum_j^J \sum_d^D F_{jd} + (Z^1 - Z^0)\lambda_1 \leq Z^1 \quad (3.119)$$

(3.72)-(3.75), (3.77), (3.82)-(3.87) ve (3.91)-(3.97)

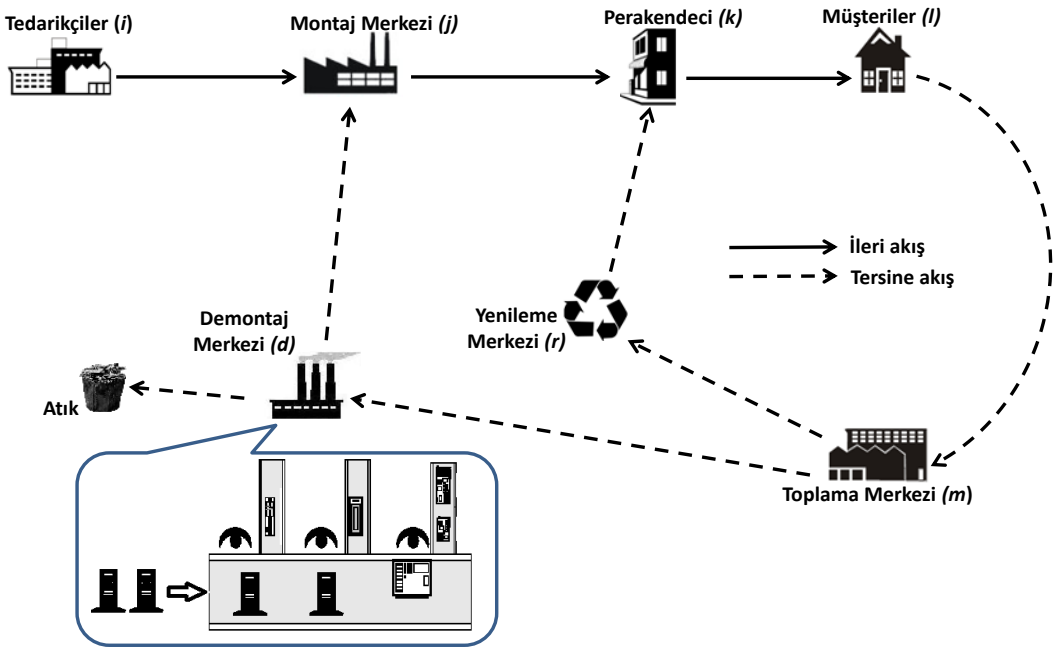
3.2.3. Kapalı döngü tedarik zinciri ve demontaj hattı dengeleme problemi entegrasyonu

Bu bölümde 2 farklı KDTZ ve DHD problemi entegrasyonu modeli verilmiştir. Birinci model tüm parametrelerin kesin olduğu entegre model iken, ikinci entegre modelde belirsizliklerin yansıtılabilmesi amacıyla tüm parametreler (amaç fonksiyonu katsayıları, sağ taraf değerleri, geri dönüşüm oranları vb.) bulanık olarak çok amaçlı ele alınmıştır. Bulanık modelin çözümü için iki aşamalı bir yöntem uygulanmıştır. İlk aşamada söz konusu bulanıklık Lai ve Hwang (1992) tarafından önerilen ağırlıklı ortalama yöntemi ve Pishvaee ve Torabi (2010) tarafından önerilen melez yöntem ile durulaştırılmıştır. Elde edilen durulaşmış çok amaçlı deterministik modellerin tek amaçlı olarak çözülebilmesi için ikinci aşamada Werners (1988), Selim ve Özkarahan (2008) ve Torabi ve Hassini (2008) tarafından önerilen etkileşimli bulanık yaklaşımlar uygulanmıştır.

3.2.3.1. Model 5: Demontaj hattı dengeleme problemi içeren kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı modeli

Altekin ve Akkan (2012)'a göre çoğu KDTZ ağ sistemi demontaj operasyonlarına ihtiyaç duymaktadır. Bundan dolayı, bu bölümde, DHD problemi ile KDTZ ağ tasarımı problemi eş zamanlı olarak ele alınmıştır (Özceylan ve ark. 2013). Bu amaçla, tedarikçiler, montaj merkezleri, perakendeciler, müşteriler, toplama, yenileme, demontaj ve atık merkezlerinden oluşan bir KDTZ ağı tasarlanmıştır. Tasarlanan ağ toplanan ürünlerin yeniden döngüye dahil edilebilmesi için çok dönemli olarak; kullanılmış ürünlerin demontaj merkezlerinde demonte edilebilmesi için de çok parçalı ürün yapısına sahip olacak şekilde ele alınmıştır. İki problemin entegrasyonu için KTDOP modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model stratejik açıdan KDTZ'deki taşıma, satın alma ve yenileme maliyetlerini minimize ederken, taktiksel açıdan da

demontaj merkezlerindeki demontaj istasyonu açma maliyetlerini minimize etmektedir. İki problemin entegrasyonu için TTZ/DHD entegrasyonundaki çevrim zamanı kısıtı kullanılmıştır.



Şekil 3.28. DHD problemi içeren KDTZ ağı

Söz konusu KDTZ ağı biri ileri diğeri de tersine akışın olduğu iki ana kısımdan oluşmaktadır. İleri akış sıfır parçaların satın alınması, bu parçaların montajlanarak nihai ürüne dönüştürülmesi ve bu ürünlerin müşterilere ulaştırılmasından oluşurken; tersine akış kullanılmış ürünlerin müşterilerden toplanması, yenilenmesi, demonte edilmesi ve tekrardan ileri akışa dahil edilmesinden oluşmaktadır (Şekil 3.28).

Geliştirilen KDTZ ağında, parça temin etmenin iki farklı yolu bulunmaktadır. Birincisi tedarikçilerden sıfır parça satın almak iken, ikinci yol geri dönüşüm yoluyla kullanılmış parça teminidir. Dolayısıyla karar vericinin hammadde temininde karşılaştığı bir ödünleşme söz konusudur. Diğer bir ödünleşme de demontaj hatları ile ilgilidir. Karar verici sıfır ürün satın alma maliyetlerini düşürmek için geri dönüşüme ağırlık vermek isteyebilir. Ancak bu durumda geri dönüşümden dolayı demonte edilecek ürün sayısı ve sonuç olarak iş istasyonu sayısı da artacaktır. Bahsi geçen ödünleşmeler arasında en uygun kararın verilmesi adına KDTZ ağ tasarımı ile DHD problemleri entegre edilmiştir. Probleme ait varsayımlar aşağıda verilmiştir (McGovern ve Gupta, 2007a; Koç ve ark. 2009; Wang ve Hsu, 2010a).

Varsayımlar

- Müşteri talepleri kesin, bilinmekte ve tümüyle karşılanmaktadır.
- İleri ve tersine ağda bulunan tüm tesis kapasiteleri sınırlı ve belirlidir.
- Taşıma, satın alma, yenileme ve istasyon açma maliyetleri kesin ve bilinmektedir.
- Toplama, atık ve demontaj oranları kesin ve bilinmektedir.
- Bütün ağda bir karar verici bulunmaktadır.
- Birden fazla parçaya sahip tek bir ürün tümüyle demonte edilmektedir.
- Her bir demontaj merkezindeki çevrim zamanı değişkendir.
- Operatörlerin yürüme zamanları dikkate alınmamıştır.
- Bir demontaj görevi birden fazla iş istasyonuna atanamaz veya ayrıştırılamaz.
- Demontaj görevleri arasındaki öncelik ilişkileri ve süreleri bilinmektedir.
- Tüm demontaj görevleri herhangi bir iş istasyonuna atanabilir.
- Demontaj görev süreleri atandığı iş istasyonundan bağımsızdır.
- Her demontaj görevi bir üst alt montajdan bir parça çıkarılmasına veya yeni bir alt montaja yol açmaktadır.
- Ürünler düz bir demontaj hattında demonte edilmektedir.

Bu varsayımlar altında geliştirilen KTDOP modeline ait formülasyon aşağıda verilmiştir.

İndisler

i tedarikçiler kümesi *i=1, 2, ...I*

j montaj merkezleri kümesi *j=1, 2, ...J*

k perakendeciler kümesi *k=1, 2, ...C*

l müşteriler kümesi *l=1, 2, ...L*

m toplama merkezleri kümesi *m=1, 2, ...M*

r yenileme merkezleri kümesi *r=1, 2, ...R*

d demontaj merkezleri kümesi *d=1, 2, ...D*

p dönem kümesi *p=1, 2, ...P*

c parça kümesi *c=1, 2, ...C*

s demontaj hattı istasyon kümesi *s=1, 2, ...S*

t demontaj görev kümesi *t=1, 2, ...B_t*

a demontaj hattı dengelemeye ilişkin yapay düğümler kümesi *a=1, 2, ...A_a*

Parametreler

d_{ij} tedarikçi *i* ve montaj merkezi *j* arası mesafe (km)

d_{jk} montaj merkezi *j* ve perakendeci *k* arası mesafe (km)

d_{kl} perakendeci *k* ve müşteri *l* arası mesafe (km)

d_{lm} müşteri *l* ve toplama merkezi *m* arası mesafe (km)

d_{mr} toplama merkezi *m* ve yenileme merkezi *r* arası mesafe (km)

d_{md} toplama merkezi *m* ve demontaj merkezi *d* arası mesafe (km)

d_{rk} yenileme merkezi *r* ve perakendeci *k* arası mesafe (km)

d_{dj} demontaj merkezi *d* ve montaj merkezi *j* arası mesafe (km)

d_{d} demontaj merkezi *d* ve atık arası mesafe (km)

a_{icp} tedarikçi *i*'nin *p*'nci dönemdeki *c*'nci parça kapasitesi (ton)

b_{jp} montaj merkezi *j*'nin *p*'nci dönemdeki ürün kapasitesi (ton)

c_{kp} perakendeci *k*'nın *p*'nci dönemdeki ürün kapasitesi (ton)

u_{lp} müşteri *l*'nin *p*'nci dönemdeki ürün talebi (ton)

e_{mp} toplama merkezi *m*'nin *p*'nci dönemdeki ürün kapasitesi (ton)

f_{rp} yenileme merkezi *r*'nin *p*'nci dönemdeki ürün kapasitesi (ton)

g_{dcp} demontaj merkezi *d*'nin *p*'nci dönemdeki *c*'nci parça kapasitesi (ton)

t birim taşıma maliyeti ($/ton*km)

s_{ic} tedarikçi *i*'den bir birim *c*'nci parçayı satın alma maliyeti ($/ton)

h yenileme merkezi *r*'nin ürün yenileme maliyeti ($/ton)

O demontaj merkezlerindeki istasyon açma maliyeti ($)

r_c nihai ürün içindeki *c*'nci parça miktarı (adet)

θ_{max} müşterilerden toplama merkezine gönderilen maksimum ürün yüzdesi (%)

θ_{min} müşterilerden toplama merkezine gönderilen minimum ürün yüzdesi (%)

τ toplama merkezinden yenileme merkezine gönderilen ürün yüzdesi (%)

κ demontaj merkezinden montaj merkezine gönderilen parça yüzdesi (%)

d_{Bt} normal düğümdeki *t*'nci görevin işlem süresi (zaman birimi)

S_{dp} *p*'nci dönemde demontaj merkezi *d*'de açılabilir maksimum istasyon sayısı

W_{time} çalışma zamanı (zaman birimi)

$P(A_a)$, $P(B_t)$ A_a, B_t'nin hemen öncülleri kümesi

$S(A_a)$, $S(B_t)$ A_a, B_t'nin hemen ardılları kümesi

Değişkenler

X_{ijcp} tedarikçi *i*'den montaj merkezi *j*'ye *p*'nci dönemde taşınan *c*'nci parça miktarı

Y_{jkp} montaj merkezi *j*'den perakendeci *k*'ya *p*'nci dönemde taşınan ürün miktarı

W_{klp} perakendeci *k*'dan müşteri *l*'ye *p*'nci dönemde taşınan ürün miktarı

A_{lmp} müşteri *l*'den toplama merkezi *m*'ye *p*'nci dönemde taşınan ürün miktarı

B_{mrp} toplama merkezi *m*'den yenileme merkezi *r*'ye *p*'nci dönemde taşınan ürün miktarı

S_{mdp} toplama merkezi *m*'den demontaj merkezi *d*'ye *p*'nci dönemde taşınan ürün miktarı

E_{rkp} yenileme merkezi *r*'den perakendeci *k*'ya *p*'nci dönemde taşınan ürün miktarı

Z_{djcp} demontaj mer. *d*'den montaj mer. *j*'ye *p*'nci dönemde taşınan *c*'nci parça miktarı

F_{dcp} demontaj merkezi *d*'den *p*'nci dönemde atığa yollanan *c*'nci parça miktarı

CT_{dp} *p*'nci dönemde demontaj merkezi *d*'deki çevrim zamanı

M_{tsdp} Eğer *p*'nci dönemde demontaj merkezi *d*'de *t*'nci demontaj görevi *s*'nci istasyona atanır ise *1*; aksi halde *0*

N_{sdp} Eğer *p*'nci dönemde demontaj merkezi *d*'de *s*'nci istasyon açılır ise *1*; aksi halde *0*

L_{tdp} Eğer *p*'nci dönemde demontaj merkezi *d*'de *t*'nci demontaj görevi tamamlanır ise *1*; aksi halde *0*

Amaç fonksiyonu

Minimizasyon

$$t\left(\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P}X_{ijcp}\,d_{ij}+\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{p\in P}Y_{jkp}d_{jk}+\sum_{k\in K}\sum_{l\in L}\sum_{p\in P}W_{klp}d_{kl}+\right.$$
$$\sum_{l\in L}\sum_{m\in M}\sum_{p\in P}A_{lmp}d_{lm}+\sum_{m\in M}\sum_{r\in R}\sum_{p\in P}B_{mrp}\,d_{mr}+$$
$$\left.\sum_{m\in M}\sum_{d\in D}\sum_{p\in P}S_{mdp}.d_{md}+\sum_{r\in R}\sum_{k\in K}\sum_{p\in P}E_{rkp}.d_{rk}+\sum_{d\in D}\sum_{j\in J}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P}Z_{djcp}.d_{dj}+\right.$$
$$\left.\sum_{d\in D}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P}F_{dcp}\,.d_{dc}\right) \quad (3.120)$$
$$+\left(\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P}X_{ijcp}s_{ic}\right) \quad (3.121)$$
$$+h\left(\sum_{m\in M}\sum_{r\in R}\sum_{p\in P}B_{mrp}\right) \quad (3.122)$$
$$+\left(\sum_{s\in S}\sum_{d\in D}\sum_{p\in P}N_{sdp}O_{dp}\right) \quad (3.123)$$

Amaç fonksiyonu toplam 4 kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım (3.120), hem ileri hem de tersine ağdaki toplam taşıma maliyetini; ikinci kısım (3.121), tedarikçilerden sıfır parça satın alma maliyetini; üçüncü kısım (3.122), kullanılmış

ürünlerin toplam yenileme maliyetini; dördüncü kısım ise (3.123), demontaj merkezlerindeki toplam istasyon açma maliyetini minimize etmektedir.

Kısıtlar

$$\sum_{j\in J} X_{ijcp} \leq a_{icp} \qquad \forall_{i,c,p} \qquad (3.124)$$

$$\sum_{k\in K} Y_{jkp} \leq b_{jp} \qquad \forall_{j,p} \qquad (3.125)$$

$$\sum_{l\in L} W_{klp} \leq c_{kp} \qquad \forall_{k,p} \qquad (3.126)$$

$$\sum_{k\in K} W_{klp} \geq u_{lp} \qquad \forall_{l,p} \qquad (3.127)$$

$$\sum_{r\in R} B_{mrp} + \sum_{d\in D} S_{mdp} \leq e_{mp} \qquad \forall_{m,p} \qquad (3.128)$$

$$\sum_{k\in K} E_{rkp} \leq f_{rp} \qquad \forall_{r,p} \qquad (3.129)$$

$$F_{dcp} + \sum_{j\in J} Z_{djcp} \leq g_{dcp} \qquad \forall_{d,c,p} \qquad (3.130)$$

$$\sum_{i\in I} X_{ijcp} + \sum_{d\in D} Z_{djc(p-1)} - r_c \sum_{k\in K} Y_{jkp} = 0 \qquad \forall_{j,c,p} \qquad (3.131)$$

$$\sum_{j\in J} Y_{jkp} + \sum_{r\in R} E_{rk(p-1)} - \sum_{l\in L} W_{klp} = 0 \qquad \forall_{k,p} \qquad (3.132)$$

$$\theta_{min} \sum_{k\in K} W_{klp} \leq \sum_{m\in M} A_{lmp} \leq \theta_{max} \sum_{k\in K} W_{klp} \qquad \forall_{l,p} \qquad (3.133)$$

$$\tau \sum_{l\in L} A_{lmp} - \sum_{r\in R} B_{mrp} = 0 \qquad \forall_{m,p} \qquad (3.134)$$

$$\sum_{m\in M} B_{mrp} - \sum_{k\in K} E_{rkp} = 0 \qquad \forall_{r,p} \qquad (3.135)$$

$$(1-\tau) \sum_{l\in L} A_{lmp} - \sum_{d\in D} S_{mdp} = 0 \qquad \forall_{m,p} \qquad (3.136)$$

$$r_c(1-\kappa) \sum_{m\in M} S_{mdp} - F_{dcp} = 0 \qquad \forall_{d,c,p} \qquad (3.137)$$

$$r_c.\kappa \sum_{m\in M} S_{mdp} - \sum_{j\in J} Z_{djcp} = 0 \qquad \forall_{d,c,p} \qquad (3.138)$$

$$\sum_{t:B_t\in S(A_a)} L_{tdp} = 1 \qquad \forall_{a=0,d,p} \qquad (3.139)$$

$$\sum_{t:B_t\in S(A_a)} L_{tdp} = \sum_{t:B_t\in P(A_a)} L_{tdp} \qquad \forall_{a\neq 0,d,p} \qquad (3.140)$$

$$\sum_{s\in S} M_{tsdp} = L_{tdp} \qquad \forall_{t,d,p} \qquad (3.141)$$

$$\sum_{t:B_t\in P(A_a)} \sum_{s\in S} M_{tsdp} \geq \sum_{t:B_t\in S(A_a)} M_{tvdp} \qquad \forall_{a\neq 0,s,v,d,p} \qquad (3.142)$$

$$CT_{dp} = (W_{time}/(\sum_{j\in J} \sum_{c\in C} Z_{djcp} + \sum_{c\in C} F_{dcp}) N_{sdp} \qquad \forall_{d,p} \qquad (3.143)$$

$$\sum_{t\in T} M_{tsdp}.d_{B_t} \leq CT_{dp}.N_{sdp} \qquad \forall_{s,d,p} \qquad (3.144)$$

$$X_{ijcp}, Y_{jkp}, W_{klp}, A_{lmp}, B_{mrp}, S_{mdp}, E_{rkp}, Z_{djcp}, F_{dcp}, CT_{dp} \geq 0 \qquad \forall_{i,j,k,l,m,r,d,c,p} \qquad (3.145)$$

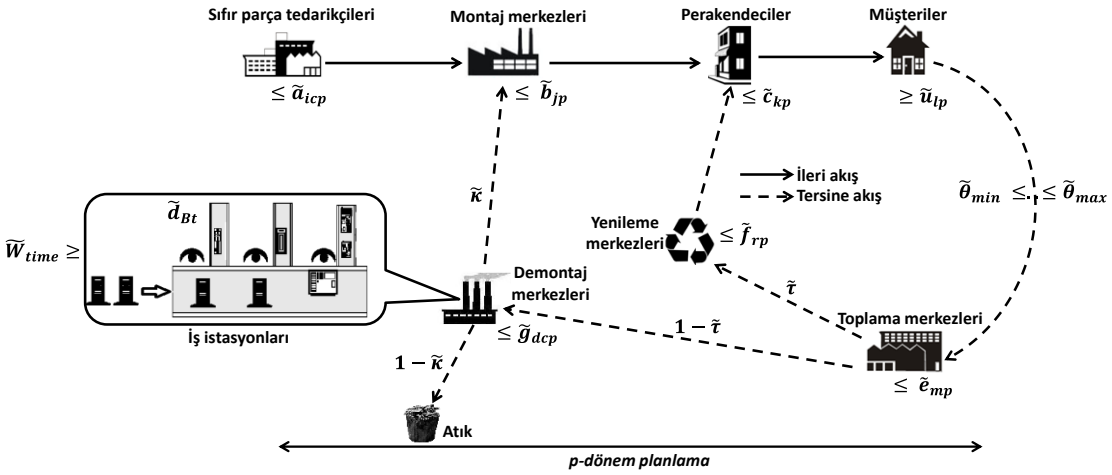
$$M_{tsdp}, N_{sdp}, L_{tdp} \in \{0,1\} \qquad \forall_{t,s,d,p} \qquad (3.146)$$

Kısıt (3.124) tedarikçilerden fabrikalara taşınan parçaların ilgili tedarikçi kapasitesinden fazla olamayacağını sağlamaktadır. Kısıt (3.125) fabrikalardan perakendecilere gönderilen ürünlerin ilgili fabrika kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Kısıt (3.126) perakendecilerden müşterilere gönderilen ürün miktarının

ilgili perakendeci kapasitesinden az olmasını garanti eder. Kısıt (3.127) perakendecilerden müşterilere gönderilen ürün miktarının her bir müşteri talebini karşılayacak şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Kısıtlar (3.128)-(3.130) sırasıyla toplama merkezi, yenileme merkezi ve demontaj merkezinden çıkan ürün ve parça miktarlarının ilgili tesis kapasitesini aşmamasını sağlamaktadır. Kısıt (3.131) tedarikçilerden ve bir önceki dönem demontaj merkezlerinden fabrikalara gönderilen parça miktarının fabrikalardan perakendecilere gönderilen ürün miktarına eşit olmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.132) fabrikalardan ve bir önceki dönem yenileme merkezlerinden perakendecilere gönderilen ürün miktarının perakendecilerden müşterilere gönderilen ürün miktarına eşit olmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.133) müşterilerden toplanacak ürün miktarının alt (θ_{min}) ve üst (θ_{max}) toplama oranları arasında olmasını sağlamaktadır. Kısıt (3.134) toplama merkezlerindeki kullanılmış ürün miktarının belirli bir oranının (τ) yenileme merkezlerine gönderilmesini sağlarken; Kısıt (3.136) geri kalan kısmın (1- τ) demontaj merkezlerine gönderilmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.135) toplama merkezlerinden yenileme merkezlerine gönderilen kullanılmış ürün miktarının yenileme merkezlerinden perakendecilere eksiksiz gönderilmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.137) toplama merkezlerinden demontaj merkezlerine gönderilen kullanılmış ürün miktarının belirli bir oranının ($1 - \kappa$) atığa gönderilmesini sağlarken; Kısıt (3.138) geri kalan kısmının ise tekrardan kullanılmak üzere fabrikalara gönderilmesini sağlamaktadır. (3.139) ve (3.140) numaralı kısıtlar demontaj görev diyagramındaki VE/VEYA tipi öncelik ilişkisine sahip ardıllardan yalnızca bir tanesinin seçilmesini sağlamaktadır. Bu iki kısıt çözümün demontaj ağacı oluşturan bir görev kümesinden meydana gelmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.141) eğer demontaj merkezinde bir demontaj görevi yapılıyorsa bu görevin istasyonlardan birine atanmasını, yapılmıyorsa atanmamasını sağlamaktadır. Kısıt (3.142) ise demontaj görev diyagramındaki normal düğümler arasındaki öncelik ilişkilerini kontrol etmek amaçlıdır. Kısıt (3.143) her bir demontaj merkezinden çıkan parça miktarını çalışma zamanına bölerek ilgili demontaj merkezinin çevrim zamanını hesaplamaktadır. Kısıt (3.144) ise her bir demontaj merkezinde eğer bir istasyon açıksa o istasyona atanan işlerin görev süreleri toplamının çevrim zamanından küçük olmasını garanti eder. Kısıt (3.145) karar değişkenlerinin pozitif değer almasını sağlarken, Kısıt (3.146) 0-1 değişkenleri göstermektedir.

3.2.3.2. Model 6: Demontaj hattı dengeleme problemi içeren kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımına etkileşim bulanık programlama yaklaşımları

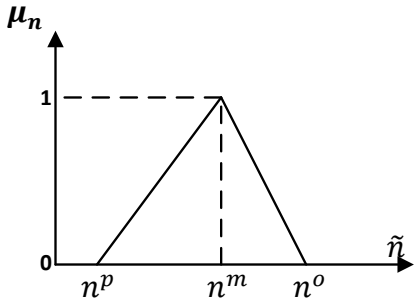
Tez kapsamında önerilen bu son modelde bir önceki modelde verilen KDTZ/DHD problemi entegrasyonu bulanık olarak ele alınmıştır. Bir önceki modelin varsayımlarında yer alan "*kesin ve bilinmektedir*" ifadeleri bu model kapsamında bulanıklaştırılmıştır. Önerilen yeni modelde, tesis kapasiteleri, müşteri talepleri, geri dönüşüm oranları, çalışma zamanı ve amaç fonksiyonu katsayıları (birim taşıma maliyeti, birim satın alma maliyeti, birim yenileme maliyeti ve istasyon açma maliyeti) bulanık olarak ifade edilmiştir (Şekil 3.29). Ağdaki ürün akışı bir önceki modeldeki akışın aynısıdır. Önerilen yeni modelde belirsizlik dışındaki diğer bir fark ise söz konusu bulanık modelin çok amaçlı olarak ele alınmasıdır.



Şekil 3.29. Belirsizlik altında DHD içeren KDTZ ağı

Geliştirilen çok amaçlı bulanık modelin çözümü için iki aşamalı bir yaklaşım uygulanmıştır. İlk aşamada söz konusu bulanıklık Lai ve Hwang (1992) tarafından önerilen ağırlıklı ortalama yöntemi ve Pishvaee ve Torabi (2010) tarafından önerilen melez yöntem ile durulaştırılmıştır. Elde edilen durulaşmış çok amaçlı deterministik modellerin tek amaçlı olarak çözülebilmesi için ikinci aşamada Werners (1988), Selim ve Özkarahan (2008) ve Torabi ve Hassini (2008) tarafından önerilen etkileşimli bulanık yaklaşımlar uygulanmıştır. Bir önceki deterministik modelde verilen varsayımlardan kesin parametreli olanlar bu çalışmada bulanık olarak ifade edilmiştir. Onun dışındaki varsayımlar bu model için de geçerlidir. Söz konusu bulanık parametreler için üçgen bulanık sayılar kullanılmıştır (Şekil 3.30). Bu üçgen yapının

sol, orta ve sağ değerlerini ise sırasıyla en kötümser değer (*p= pessimistic*), en olası değer (*m= most likely*) ve en iyimser değer (*o= optimistic*) olarak tanımlamıştır (Model 2'de tanımlandığı gibi). Şekil 3.30'da $\tilde{n}$ bulanık sayısı kötümser (n^p), olası (n^m) ve iyimser (n^o) değerleri ile beraber gösterilmiştir (Torabi ve Hassini, 2008).



Şekil 3.30. $\tilde{n}$ bulanık sayısının üçgensel olarak gösterimi (Torabi ve Hassini, 2008)

Önerilen bulanık modelde bir önceki modelde verilen indisler, parametreler ve karar değişkenleri aynı olup, tek fark aşağıda verilen bulanıklaştırılmış parametrelerdir.

Bulanık parametreler

$\tilde{a}_{icp}$ tedarikçi *i*'nin *p*'nci dönemdeki *c*'nci bulanık parça kapasitesi (ton)

$\tilde{b}_{jp}$ montaj merkezi *j*'nin *p*'nci dönemdeki bulanık ürün kapasitesi (ton)

$\tilde{c}_{kp}$ perakendeci *k*'nın *p*'nci dönemdeki bulanık ürün kapasitesi (ton)

$\tilde{u}_{lp}$ müşteri *l*'nin *p*'nci dönemdeki bulanık ürün talebi (ton)

$\tilde{e}_{mp}$ toplama merkezi *m*'nin *p*'nci dönemdeki bulanık ürün kapasitesi (ton)

$\tilde{f}_{rp}$ yenileme merkezi *r*'nin *p*'nci dönemdeki bulanık ürün kapasitesi (ton)

$\tilde{g}_{dcp}$ demontaj merkezi *d*'nin *p*'nci dönemdeki *c*'nci bulanık parça kapasitesi (ton)

$\tilde{t}$ bulanık taşıma maliyeti ($/ton*km)

$\tilde{s}_{ic}$ tedarikçi *i*'den bir birim *c*'nci parçayı bulanık satın alma maliyeti ($/ton)

$\tilde{h}$ yenileme merkezi *r*'nin bulanık ürün yenileme maliyeti ($/ton)

$\tilde{O}$ demontaj merkezlerindeki istasyon bulanık açma maliyeti ($)

$\tilde{\theta}_{max}$ müşterilerden toplama merkezine gönderilen bulanık maks ürün yüzdesi (%)

$\tilde{\theta}_{min}$ müşterilerden toplama merkezine gönderilen bulanık min ürün yüzdesi (%)

$\tilde{\tau}$ toplama merkezinden yenileme merkezine gönderilen bulanık ürün yüzdesi (%)

$\tilde{\kappa}$ demontaj merkezinden montaj merkezine gönderilen bulanık parça yüzdesi (%)

$\tilde{d}_{Bt}$ normal düğümdeki *t*'nci görevin bulanık işlem süresi (zaman birimi)

$\widetilde{W}_{time}$ bulanık çalışma zamanı (zaman birimi)

Yukarıdaki bulanıklaştırılmış parametreler kullanılarak oluşturulan yeni ÇABP modeli aşağıda verilmiştir.

Amaç fonksiyonları

Minimizasyon

$$Z_1 \cong \tilde{t}\big(\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P} X_{ijcp}\, d_{ij} + \sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{p\in P} Y_{jkp} d_{jk} + \sum_{k\in K}\sum_{l\in L}\sum_{p\in P} W_{klp} d_{kl} + \sum_{l\in L}\sum_{m\in M}\sum_{p\in P} A_{lmp} d_{lm} + \sum_{m\in M}\sum_{r\in R}\sum_{p\in P} B_{mrp}\, d_{mr} + \sum_{m\in M}\sum_{d\in D}\sum_{p\in P} S_{mdp}.\, d_{md} + \sum_{r\in R}\sum_{k\in K}\sum_{p\in P} E_{rkp}.\, d_{rk} + \sum_{d\in D}\sum_{j\in J}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P} Z_{djcp}.\, d_{dj} + \sum_{d\in D}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P} F_{dcp}\, .\, d_{dc}\big) \quad (3.147)$$

$$Z_2 \cong \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P} X_{ijcp}\tilde{s}_{ic} \quad (3.148)$$

$$Z_3 \cong \tilde{h}\big(\sum_{m\in M}\sum_{r\in R}\sum_{p\in P} B_{mrp}\big) \quad (3.159)$$

$$Z_4 \cong \tilde{O}\big(\sum_{s\in S}\sum_{d\in D}\sum_{p\in P} N_{sdp}\big) \quad (3.150)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j\in J} X_{ijcp} \le \tilde{a}_{icp} \qquad \forall_{i,c,p} \quad (3.151)$$

$$\sum_{k\in K} Y_{jkp} \le \tilde{b}_{jp} \qquad \forall_{j,p} \quad (3.152)$$

$$\sum_{l\in L} W_{klp} \le \tilde{c}_{kp} \qquad \forall_{k,p} \quad (3.153)$$

$$\sum_{k\in K} W_{klp} \ge \tilde{u}_{lp} \qquad \forall_{l,p} \quad (3.154)$$

$$\sum_{r\in R} B_{mrp} + \sum_{d\in D} S_{mdp} \le \tilde{e}_{mp} \qquad \forall_{m,p} \quad (3.155)$$

$$\sum_{k\in K} E_{rkp} \le \tilde{f}_{rp} \qquad \forall_{r,p} \quad (3.156)$$

$$F_{dcp} + \sum_{j\in J} Z_{djcp} \le \tilde{g}_{dcp} \qquad \forall_{d,c,p} \quad (3.157)$$

$$\tilde{\theta}_{min}\sum_{k\in K} W_{klp} \le \sum_{m\in M} A_{lmp} \le \tilde{\theta}_{max}\sum_{k\in K} W_{klp} \qquad \forall_{l,p} \quad (3.158)$$

$$\tilde{\tau}\sum_{l\in L} A_{lmp} - \sum_{r\in R} B_{mrp} = 0 \qquad \forall_{m,p} \quad (3.159)$$

$$(1-\tilde{\tau})\sum_{l\in L} A_{lmp} - \sum_{d\in D} S_{mdp} = 0 \qquad \forall_{m,p} \quad (3.160)$$

$$r_c(1-\tilde{\kappa})\sum_{m\in M} S_{mdp} - F_{dcp} = 0 \qquad \forall_{d,c,p} \quad (3.161)$$

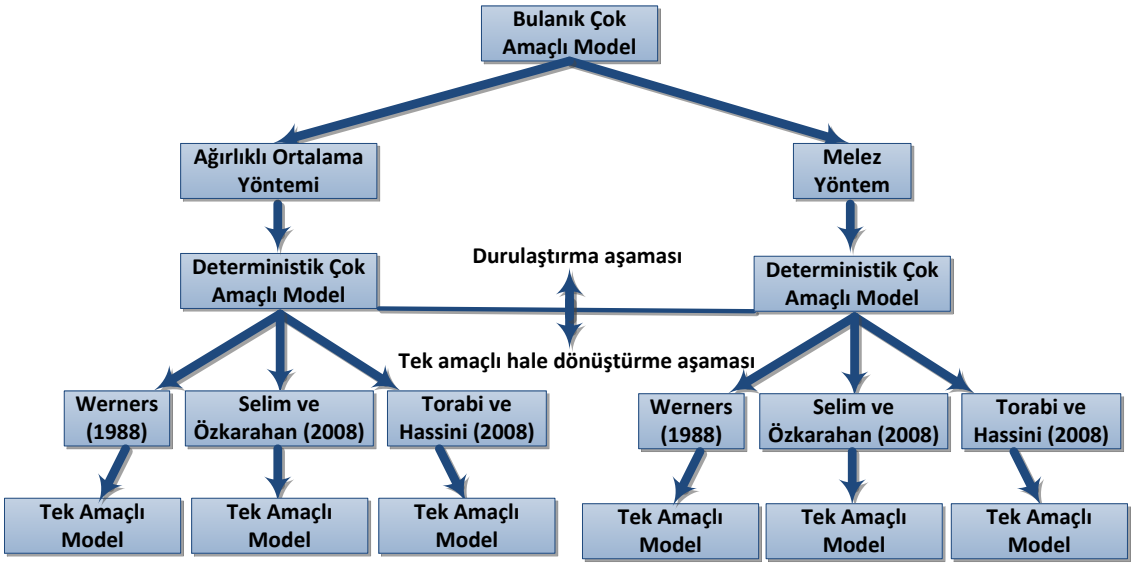
$$r_c.\,\tilde{\kappa}\sum_{m\in M} S_{mdp} - \sum_{j\in J} Z_{djcp} = 0 \qquad \forall_{d,c,p} \quad (3.162)$$

$$CT_{dp} = (\widetilde{W}_{time}/(\sum_{j\in J}\sum_{c\in C} Z_{djcp} + \sum_{c\in C} F_{dcp})N_{sdp} \qquad \forall_{d,p} \quad (3.163)$$

$$\sum_{t\in T} M_{tsdp}.\,\tilde{d}_{B_t} \le CT_{dp}.\,N_{sdp} \qquad \forall_{s,d,p} \quad (3.164)$$

(3.131), (3.132), (3.135), (3.139)-(3.142), (3.145) ve (3.146)

Yukarıda verilen çok amaçlı bulanık matematiksel modelin çözülebilmesi için öncelikle bulanık ifadeler durulaştırılmış ve deterministik çok amaçlı model tek amaçlı hale getirilmiştir. Bunun için iki aşamalı bir yaklaşım uygulanmıştır. İlk aşamada bulanıklık Lai ve Hwang (1992) tarafından önerilen ağırlıklı ortalama yöntemi ve Pishvaee ve Torabi (2010) tarafından önerilen melez yöntem ile durulaştırılmıştır. İkinci aşamada ise Werners (1988), Selim ve Özkarahan (2008) ve Torabi ve Hassini (2008) tarafından önerilen etkileşimli bulanık yaklaşımlar uygulanarak çok amaçlı durulaştırılmış model tek amaçlı hale getirilmiştir. Uygulanan yaklaşımlar Şekil 3.31'de özetlenmiştir.



Şekil 3.31. Bualnık modele ilişkin çözüm yaklaşımı

Şekil 3.31'den de anlaşılacağı gibi uygulanan yaklaşımlar sonucunda 6 farklı deterministik tek amaçlı doğrusal olmayan matematiksel model elde edilmiştir. Aşağıda bu 6 farklı matematiksel model verilmiştir.

3.2.3.2.1. Bulanık çok amaçlı modelin durulaştırılması

Bu bölümde, birinci aşama olan durulaştırma işlemi verilmiştir. Amaç fonksiyonlarının durulaştırılmasında bulanık sayıların beklenen değerleri kullanılmışken (Pishvaee ve Torabi, 2010); kısıtların durulaştırılmasında Lai ve Hwang (1992) tarafından önerilen ağırlıklı ortalama yöntemi ile Parra ve ark. (2005) ve Jimenez ve

ark. (2007) tarafından önerilen yaklaşımların Pishvaee ve Torabi (2010) tarafından melezlenmesi ile ortaya çıkan yöntem kullanılmıştır.

3.2.3.2.1.1. Bulanık amaç fonksiyonlarının durulaştırılması

Varsayımlarda verildiği gibi bulanık parametreler üçgen bulanık sayılar ile ifade edilmiştir. Bulanık taşıma maliyetinin ($\tilde{t}$) üçgen bulanık sayısı ile ifade edildiğini varsayarsak, aşağıdaki gibi bir üyelik fonksiyonu elde edilir (Pishvaee ve Torabi, 2010):

$$\mu_{\tilde{t}}(x) = \begin{cases} \frac{x-t^p}{t^m-t^p}, & t^p \le x \le t^m \\ 1, & x = t^m \\ \frac{t^o-x}{t^o-t^m}, & t^m \le x \le t^o \\ 0, & x \le t^p \; or \; x \ge t^o \end{cases} \quad (3.165)$$

burada, t^p, t^m ve t^osırasıyla en kötümser, en olası ve en iyimser değerleri ifade etmektedir. Pishvaee ve ark. (2012)'na göre ($\tilde{t}$) bulanık değeri aşağıdaki deterministik değere eş değerdir.

$$\tilde{t} = \frac{t^p+2t^m+t^o}{4} \quad (3.166)$$

Eşitlik (3.166) yardımıyla (3.147)-(3.150) numaralı bulanık amaç fonksiyonları aşağıdaki gibi durulaştırılır.

$$Min\ Z_1 \cong \frac{t^p+2t^m+t^o}{4}\left(\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P} X_{ijcp}\, d_{ij} + \sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{p\in P} Y_{jkp} d_{jk} + \sum_{k\in K}\sum_{l\in L}\sum_{p\in P} W_{klp} d_{kl} + \sum_{l\in L}\sum_{m\in M}\sum_{p\in P} A_{lmp} d_{lm} + \sum_{m\in M}\sum_{r\in R}\sum_{p\in P} B_{mrp}\, d_{mr} + \sum_{m\in M}\sum_{d\in D}\sum_{p\in P} S_{mdp}.\, d_{md} + \sum_{r\in R}\sum_{k\in K}\sum_{p\in P} E_{rkp}.\, d_{rk} + \sum_{d\in D}\sum_{j\in J}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P} Z_{djcp}.\, d_{dj} + \sum_{d\in D}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P} F_{dcp}\, .\, d_{dc}\right) \quad (3.167)$$

$$Min\ Z_2 \cong \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P} X_{ijcp}\left(\frac{s_{ic}^p+2s_{ic}^m+s_{ic}^o}{4}\right) \quad (3.168)$$

$$Min\ Z_3 \cong \frac{h^p+2h^m+h^o}{4}\left(\sum_{m\in M}\sum_{r\in R}\sum_{p\in P} B_{mrp}\right) \quad (3.169)$$

$$Min\ Z_4 \cong \frac{O^p+2O^m+O^o}{4}\left(\sum_{s\in S}\sum_{d\in D}\sum_{p\in P} N_{sdp}\right) \quad (3.170)$$

3.2.3.2.1.2. Ağırlıklı ortalama yöntemine göre bulanık kısıtların durulaştırılması

Eğer bulanık parametreler kısıtlardaki eşitliğin sağında ise ağırlıklı ortalama yöntemi kolaylıkla uygulanabilmektedir. Örneğin bulanık tedarikçi kapasite kısıtını (3.151) ele alırsak, $\tilde{a}_{icp}$ bulanık parametresi eşitliğin sağında yer almaktadır. Bu tarz ifadelerin durulaştırılmasında ilgili bulanık değerin kötümser, olası ve iyimser değerleri bir katsayı yardımıyla durulaştırılır. Eğer üyelik fonksiyonlarının kabul edilebilir minimum seviyesi olan α verilirse bulanık kısıtlar (3.151)-(3.162) aşağıdaki gibi durulaştırılır.

$$\sum_{j\in J} X_{ijcp} \le w_1 a^p_{icp,\alpha} + w_2 a^m_{icp,\alpha} + w_3 a^o_{icp,\alpha} \qquad \forall_{i,c,p} \qquad (3.171)$$

$$\sum_{k\in K} Y_{jkp} \le w_1 b^p_{jp,\alpha} + w_2 b^m_{jp,\alpha} + w_3 b^o_{jp,\alpha} \qquad \forall_{j,p} \qquad (3.172)$$

$$\sum_{l\in L} W_{klp} \le w_1 c^p_{kp,\alpha} + w_2 c^m_{kp,\alpha} + w_3 c^o_{kp,\alpha} \qquad \forall_{k,p} \qquad (3.173)$$

$$\sum_{k\in K} W_{klp} \ge w_1 u^p_{lp,\alpha} + w_2 u^m_{lp,\alpha} + w_3 u^o_{lp,\alpha} \qquad \forall_{l,p} \qquad (3.174)$$

$$\sum_{r\in R} B_{mrp} + \sum_{d\in D} S_{mdp} \le w_1 e^p_{mp,\alpha} + w_2 e^m_{mp,\alpha} + w_3 e^o_{mp,\alpha} \qquad \forall_{m,p} \qquad (3.175)$$

$$\sum_{k\in K} E_{rkp} \le w_1 f^p_{rp,\alpha} + w_2 f^m_{rp,\alpha} + w_3 f^o_{rp,\alpha} \qquad \forall_{r,p} \qquad (3.176)$$

$$F_{dcp} + \sum_{j\in J} Z_{djcp} \le w_1 g^p_{dcp,\alpha} + w_2 g^m_{dcp,\alpha} + w_3 g^o_{dcp,\alpha} \qquad \forall_{d,c,p} \qquad (3.177)$$

$$(w_1 \theta^p_{min,\alpha} + w_2 \theta^m_{min,\alpha} + w_3 \theta^o_{min,\alpha}) \sum_{k\in K} W_{klp} \le \sum_{m\in M} A_{lmp} \qquad \forall_{l,p} \qquad (3.178)$$

$$(w_1 \theta^p_{max,\alpha} + w_2 \theta^m_{max,\alpha} + w_3 \theta^o_{max,\alpha}) \sum_{k\in K} W_{klp} \ge \sum_{m\in M} A_{lmp} \qquad \forall_{l,p} \qquad (3.179)$$

$$(w_1 \tau^p_\alpha + w_2 \tau^m_\alpha + w_3 \tau^o_\alpha) \sum_{l\in L} A_{lmp} - \sum_{r\in R} B_{mrp} = 0 \qquad \forall_{m,p} \qquad (3.180)$$

$$(1 - (w_1 \tau^p_\alpha + w_2 \tau^m_\alpha + w_3 \tau^o_\alpha)) \sum_{l\in L} A_{lmp} - \sum_{d\in D} S_{mdp} = 0 \qquad \forall_{m,p} \qquad (3.181)$$

$$r_c(1 - (w_1 \kappa^p_\alpha + w_2 \kappa^m_\alpha + w_3 \kappa^o_\alpha)) \sum_{m\in M} S_{mdp} - F_{dcp} = 0 \qquad \forall_{d,c,p} \qquad (3.182)$$

$$r_c(w_1 \kappa^p_\alpha + w_2 \kappa^m_\alpha + w_3 \kappa^o_\alpha) \sum_{m\in M} S_{mdp} - \sum_{j\in J} Z_{djcp} = 0 \qquad \forall_{d,c,p} \qquad (3.183)$$

Yukarıdaki kısıtlarda w_1, w_2 ve w_3 sırasıyla en kötümser, en olası ve en iyimser değerlerin katsayıları iken, $w_1 + w_2 + w_3$=1'dir. Lai ve Hwang (1992)'a göre w_2=4/6, $w_1 = w_3$=1/6 ve α=0.5 olarak alınabilir. Kısıtlar (3.163) ve (3.164) aşağıdaki gibi tek bir eşitlikte ifade edilebilir.

$$\sum_{t\in T} M_{tsdp}.\tilde{d}_{B_t} \le (\widetilde{W}_{time}/(\sum_{j\in J}\sum_{c\in C} Z_{djcp} + \sum_{c\in C} F_{dcp}).N_{sdp} \qquad \forall_{s,d,p} \qquad (3.184)$$

Elde edilen bu yeni kısıtta eşitliğin hem solunda hem de sağında bulanık ifadeler bulunmaktadır. Bu tip kısıtların durulaştırılması için Lai ve Hwang (1992) bulanık sıralama tekniğini önermiştir. Bu sayede (3.184) numaralı bulanık kısıt aşağıdaki 3 durulaştırılmış yeni kısıta dönüştürülür.

$$\sum_{t\in T} M_{tsdp} d_{Bt}^{p} \leq (W_{time}^{p}/(\sum_{j\in J}\sum_{c\in C} Z_{djcp} + \sum_{c\in C} F_{dcp})N_{sdp} \qquad \forall_{s,d,p} \qquad (3.185)$$

$$\sum_{t\in T} M_{tsdp} d_{Bt}^{m} \leq (W_{time}^{m}/(\sum_{j\in J}\sum_{c\in C} Z_{djcp} + \sum_{c\in C} F_{dcp})N_{sdp} \qquad \forall_{s,d,p} \qquad (3.186)$$

$$\sum_{t\in T} M_{tsdp} d_{Bt}^{o} \leq (W_{time}^{o}/(\sum_{j\in J}\sum_{c\in C} Z_{djcp} + \sum_{c\in C} F_{dcp})N_{sdp} \qquad \forall_{s,d,p} \qquad (3.187)$$

Sonuç olarak ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırılmış deterministik çok amaçlı model aşağıdaki gibi elde edilir.

Amaç fonksiyonu
Minimizasyon (3.167)-(3.170)

Kısıtlar
(3.131), (3.132), (3.135), (3.139)-(3.140), (3.145), (3.146), (3.171)-(3.183) ve (3.185)-(3.187)

3.2.3.2.1.3. Melez yönteme göre bulanık kısıtların durulaştırılması

Lai ve Hwang (1992) tarafından önerilen ağırlıklı ortalama yöntemine ek olarak bulanık kısıtların durulaştırılması için Pishvaee ve Torabi (2010) tarafından önerilen melez yöntem de kullanılmıştır. Eğer üyelik fonksiyonlarının kabul edilebilir minimum seviyesi olan α verilirse bulanık kısıtlar (3.151)-(3.162) ve (3.184) aşağıdaki gibi durulaştırılır.

$$\sum_{j\in J} X_{ijcp} \leq \alpha\left(\frac{a_{icp}^{p}+a_{icp}^{m}}{2}\right) + (1-\alpha)(\frac{a_{icp}^{o}+a_{icp}^{m}}{2}) \qquad \forall_{i,c,p} \qquad (3.188)$$

$$\sum_{k\in K} Y_{jkp} \leq \alpha\left(\frac{b_{jp}^{p}+b_{jp}^{m}}{2}\right) + (1-\alpha)(\frac{b_{jp}^{o}+b_{jp}^{m}}{2}) \qquad \forall_{j,p} \qquad (3.189)$$

$$\sum_{l\in L} W_{klp} \leq \alpha\left(\frac{c_{kp}^{p}+c_{kp}^{m}}{2}\right) + (1-\alpha)(\frac{c_{kp}^{o}+c_{kp}^{m}}{2}) \qquad \forall_{k,p} \qquad (3.190)$$

$$\sum_{k\in K} W_{klp} \geq \alpha\left(\frac{u_{lp}^{o}+u_{lp}^{m}}{2}\right) + (1-\alpha)(\frac{u_{p}^{p}+u_{lp}^{m}}{2}) \qquad \forall_{l,p} \qquad (3.191)$$

$$\sum_{r\in R} B_{mrp} + \sum_{d\in D} S_{mdp} \le \alpha\left(\frac{e^{p}_{mp}+e^{m}_{mp}}{2}\right) + (1-\alpha)\left(\frac{e^{o}_{mp}+e^{m}_{mp}}{2}\right) \qquad \forall_{m,p} \qquad (3.192)$$

$$\sum_{k\in K} E_{rkp} \le \alpha\left(\frac{f^{p}_{rp}+f^{m}_{rp}}{2}\right) + (1-\alpha)\left(\frac{f^{o}_{rp}+f^{m}_{rp}}{2}\right) \qquad \forall_{r,p} \qquad (3.193)$$

$$F_{dcp} + \sum_{j\in J} Z_{djcp} \le \alpha\left(\frac{g^{p}_{dcp}+g^{m}_{dcp}}{2}\right) + (1-\alpha)\left(\frac{g^{o}_{dcp}+g^{m}_{dcp}}{2}\right) \qquad \forall_{d,c,p} \qquad (3.194)$$

$$\left(\alpha\left(\frac{\theta^{o}_{min}+\theta^{m}_{min}}{2}\right) + (1-\alpha)\left(\frac{\theta^{p}_{min}+\theta^{m}_{min}}{2}\right)\right)\sum_{k\in K} W_{klp} \le \sum_{m\in M} A_{lmp} \quad \forall_{l,p} \qquad (3.195)$$

$$\left(\alpha\left(\frac{\theta^{p}_{max}+\theta^{m}_{max}}{2}\right) + (1-\alpha)\left(\frac{\theta^{o}_{max}+\theta^{m}_{max}}{2}\right)\right)\sum_{k\in K} W_{klp} \ge \sum_{m\in M} A_{lmp} \ \forall_{l,p} \qquad (3.196)$$

$$\left(\frac{\alpha}{2}\left(\frac{\tau^{o}+\tau^{m}}{2}\right) + \left(1-\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\tau^{p}+\tau^{m}}{2}\right)\right)\sum_{l\in L} A_{lmp} - \sum_{r\in R} B_{mrp} \le 0 \qquad \forall_{m,p} \qquad (3.197)$$

$$\left(\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\tau^{o}+\tau^{m}}{2}\right) + \left(\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\tau^{p}+\tau^{m}}{2}\right)\right)\sum_{l\in L} A_{lmp} - \sum_{r\in R} B_{mrp} \ge 0 \qquad \forall_{m,p} \qquad (3.198)$$

$$\left(1-\left(\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\tau^{o}+\tau^{m}}{2}\right) + \left(\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\tau^{p}+\tau^{m}}{2}\right)\right)\right)\sum_{l\in L} A_{lmp} - \sum_{d\in D} S_{mdp} \le 0 \ \forall_{m,p} \qquad (3.199)$$

$$\left(1-\left(\frac{\alpha}{2}\left(\frac{\tau^{o}+\tau^{m}}{2}\right) + \left(1-\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\tau^{p}+\tau^{m}}{2}\right)\right)\right)\sum_{l\in L} A_{lmp} - \sum_{d\in D} S_{mdp} \ge 0 \ \ \forall_{m,p} \qquad (3.200)$$

$$r_c\left(1-\left(\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\kappa^{o}+\kappa^{m}}{2}\right) + \left(\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\kappa^{p}+\kappa^{m}}{2}\right)\right)\right)\sum_{m\in M} S_{mdp} - F_{dcp} \le 0 \ \forall_{d,c,p} \qquad (3.201)$$

$$r_c\left(1-\left(\frac{\alpha}{2}\left(\frac{\kappa^{o}+\kappa^{m}}{2}\right) + \left(1-\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\kappa^{p}+\kappa^{m}}{2}\right)\right)\right)\sum_{m\in M} S_{mdp} - F_{dcp} \le 0 \quad \forall_{d,c,p} \qquad (3.202)$$

$$r_c\left(\frac{\alpha}{2}\left(\frac{\kappa^{o}+\kappa^{m}}{2}\right) + \left(1-\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\kappa^{p}+\kappa^{m}}{2}\right)\right)\sum_{m\in M} S_{mdp} - \sum_{j\in J} Z_{djcp} \le 0 \quad \forall_{d,c,p} \qquad (3.203)$$

$$r_c\left(\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\kappa^{o}+\kappa^{m}}{2}\right) + \left(\frac{\alpha}{2}\right)\left(\frac{\kappa^{p}+\kappa^{m}}{2}\right)\right)\sum_{m\in M} S_{mdp} - \sum_{j\in J} Z_{djcp} \ge 0 \ \forall_{d,c,p} \qquad (3.204)$$

$$\sum_{t\in T} M_{tsdp}\left(\alpha\left(\frac{d^{o}_{Bt}+d^{m}_{Bt}}{2}\right) + (1-\alpha)\left(\frac{d^{p}_{Bt}+d^{m}_{Bt}}{2}\right)\right) \le \left(\left(\alpha\left(\frac{W^{p}_{time}+W^{m}_{time}}{2}\right) + (1-\alpha)\left(\frac{W^{o}_{time}+W^{m}_{time}}{2}\right)\right)/\left(\sum_{j\in J}\sum_{c\in C} Z_{djcp} + \sum_{c\in C} F_{dcp}\right)N_{sdp} \qquad \forall_{s,d,p} \qquad (3.205)$$

Sonuç olarak melez yönteme göre durulaştırılmış deterministik çok amaçlı model aşağıdaki gibi elde edilir.

Amaç fonksiyonu

Minimizasyon (3.167)-(3.170)

Kısıtlar

(3.131), (3.132), (3.135), (3.139)-(3.142), (3.145), (3.146) ve (3.188)-(3.205)

3.2.3.2.2. Etkileşimli bulanık çok amaçlı programlama yaklaşımlarının uygulanması

Literatürde çok amaçlı modellerin çözülebilmesi için çok sayıda teknik (hedef programlama vb.) olmasına rağmen, bu çalışmada etkileşimli bulanık programlama yaklaşımları kullanılmıştır. Etkileşimli bulanık programlama yaklaşımının en büyük avantajı karar vericiye her bir amaç fonksiyonu için tercih (kabul) edilebilen etkili bir çözüm sunmasıdır. Çok amaçlı programlama problemlerine bulanık yaklaşımların literatürdeki ilk örneği Zimmermann (1978) tarafından önerilen min-maks yaklaşımıdır. Ancak bu yaklaşımın bazı problemlerde yetersiz sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Lai ve Hwang, 1993; Pishvaee ve Torabi, 2010). Bu yetersizliğin giderilmesi için Werners (1988), Selim ve Özkarahan (2008) ve Torabi ve Hassini (2008) farklı etkileşimli programlama yaklaşımları önermişlerdir. Bu çalışmada da bahsi geçen yaklaşımlar önerilen deterministik çok amaçlı modele uygulanmıştır. Uygulama adımları durulaştırma sürecini de kapsayacak şekilde aşağıda verilmiştir.

Adım1: Bulanık parametrelere ait en kötümser, olası ve iyimser değerlerin yer aldığı üçgen bulanık sayıların tanımlanması (Şekil 3.30).

Adım2: Amaç fonksiyonlarına ait bulanık katsayıların beklenen değerleri ile durulaştırılması (bkz. Bölüm 3.2.3.2.1.1).

Adım3: Minimum kabul edilebilir üyelik fonksiyonu değeri verilerek (α), bulanık kısıtların ağırlıklı ortalama yönteme (bkz. Bölüm 3.2.3.2.1.2) ve melez yönteme (bkz. Bölüm 3.2.3.2.1.3) göre durulaştırılması.

Adım4: Durulaştırılmış çok amaçlı modellerin her bir amaç fonksiyonuna ait pozitif ideal çözümlerinin (PIS, alt sınır) ve negatif ideal çözümlerinin (NIS, üst sınır) bulunması (Şekil 3.23). Çizelge 3.9 durulaştırılmış çok amaçlı modellerin her bir amaç fonksiyonuna ait PIS ve NIS değerlerinin elde edilmesini göstermektedir.

Çizelge 3.9. Her bir amaç fonksiyonuna ait PIS ve NIS değerleri

Durulaştırma yöntemi	Amaç fonksiyonları	Kısıtlar
Ağırlıklı ortalama yöntem	$Z_1^{PIS} = minZ_1$ (3.167) $Z_1^{NIS} = maksZ_1$ (3.167) $Z_2^{PIS} = minZ_2$ (3.168) $Z_2^{NIS} = maksZ_2$ (3.168)	(3.131), (3.132), (3.135), (3.139)-(3.142), (3.145), (3.146), (3.171)-(3.183), (3.185)-(3.187)
Melez yöntem	$Z_3^{PIS} = minZ_3$ (3.169) $Z_3^{NIS} = maksZ_3$ (3.169) $Z_4^{PIS} = minZ_4$ (3.170) $Z_4^{NIS} = maksZ_4$ (3.170)	(3.131), (3.132), (3.135), (3.139)-(3.142), (3.145), (3.146) ve (3.188)-(3.205)

Adım5: PIS ve NIS değerlerini kullanarak her bir amaç fonksiyonuna ait üyelik fonksiyonlarının Eşitlik (3.53) yardımıyla oluşturulması.

Adım6: Çok amaçlı determistik modellerin Werners (1988), Selim ve Özkarahan (2008) ve Torabi ve Hassini (2008) tarafından önerilen etkileşimli bulanık yaklaşımlar yardımıyla tek amaçlı hale dönüştürülmesi. Bu yaklaşımlar aşağıda verilmiştir.

Werners (1988) yaklaşımı:

Amaç fonksiyonu

Maksimizasyon $\gamma\lambda + (1-\gamma)\sum_{g=1}^{G=4}\lambda_g / G$ (3.206)

Kısıtlar (Ağırlık ortalama yöntemine göre durulaştırılmış)

$$\lambda + \lambda_1 \leq \frac{z_1^{NIS} - z_1(Eşitlik\ 3.167)}{z_1^{NIS} - z_1^{PIS}} \quad (3.207)$$

$$\lambda + \lambda_2 \leq \frac{z_2^{NIS} - z_2(Eşitlik\ 3.168)}{z_2^{NIS} - z_2^{PIS}} \quad (3.208)$$

$$\lambda + \lambda_3 \leq \frac{z_3^{NIS} - z_3(Eşitlik\ 3.169)}{z_3^{NIS} - z_3^{PIS}} \quad (3.209)$$

$$\lambda + \lambda_4 \leq \frac{z_4^{NIS} - z_4(Eşitlik\ 3.170)}{z_4^{NIS} - z_4^{PIS}} \quad (3.210)$$

(3.131), (3.132), (3.135), (3.139)-(3.142), (3.145), (3.146), (3.171)-(3.183) ve (3.185)-(3.187)

λ ve $\lambda_{1,2..G} \in [0,1]$

Kısıtlar (Melez yönteme göre durulaştırılmış)

(3.131), (3.132), (3.135), (3.139)-(3.142), (3.145), (3.146), (3.188)-(3.205) ve (3.207)-(3.210)

λ ve $\lambda_{1,2..G} \in [0,1]$

Eşitlik (3.206)'da γ, ortak tatmin seviyesi (λ) değerinin önem katsayısını gösterirken; $\lambda_{g=1,2..G}$ ise (g amaç fonksiyonu indisi iken) her bir amaç fonkiyonuna ait tatmin seviyesi ile ortak tatmin seviyesi arasındaki farkı göstermektedir. Werners (1988)'ın yaklaşımında her bir amaç fonksiyonun tatmin seviyesi eşit öneme sahip olarak ele alınmıştır. Ancak bazı durumlarda karar verici amaç fonksiyonları arasında farklı öncelikler tanımlamak isteyebilir. Bunun için Selim ve Özkarahan (2008), bir önceki yaklaşıma farklı önem katsayıları dahil ederek Werners (1988)'ın yaklaşımını geliştirmişlerdir.

Selim ve Özkarahan (2008) yaklaşımı:

Amaç fonksiyonu

Maksimizasyon $\gamma\lambda + (1-\gamma)\sum_{g=1}^{G=4}\lambda_g\,\zeta_g$ (3.211)

Kısıtlar (Ağırlık ortalama yöntemine göre durulaştırılmış)

(3.131), (3.132), (3.135), (3.139)-(3.142), (3.145), (3.146), (3.171)-(3.183), (3.185)-(3.187) ve (3.207)-(3.210)

λ ve $\lambda_{1,2..G} \in [0,1]$

Kısıtlar (Melez yönteme göre durulaştırılmış)

(3.131), (3.132), (3.135), (3.139)-(3.142), (3.145), (3.146), (3.188)-(3.205) ve (3.207)-(3.210)

λ ve $\lambda_{1,2..G} \in [0,1]$

burada, ζ_g, g. amaç fonksiyonunun önem derecesini gösterirken $\sum_{g=1}^{G=4}\zeta_g = 1$'dir. Eğer ζ_g değeri her amaç fonksiyonu için aynı olursa, bu yöntem Werners (1988) yönteminin aynısı olur.

Son olarak Torabi ve Hassini (2008) her bir amaç fonksiyonun tatmin seviyesi ile ortak tatmin seviyesi arasındaki farkın anlamsız olduğunu varsaymış ve amaç fonksiyonlarına ait üyelik fonksiyonu değerlerinin ortak tatmin seviyesinden büyük veya eşit olmasının yeterli olacağını öne sürmüştür.

Torabi ve Hassini (2008) yaklaşımı:

Amaç fonksiyonu

Maksimizasyon $\gamma\lambda + (1-\gamma)\sum_{g=1}^{G=4}(\frac{z_g^{NIS}-z_g}{z_g^{NIS}-z_g^{PIS}})\,\zeta_g$ (3.212)

Kısıtlar (Ağırlık ortalama yöntemine göre durulaştırılmış)

$\lambda \leq \frac{z_1^{NIS}-z_1(Eşitlik\ 3.167)}{z_1^{NIS}-z_1^{PIS}}$ (3.213)

$\lambda \leq \frac{z_2^{NIS}-z_2(Eşitlik\ 3.168)}{z_2^{NIS}-z_2^{PIS}}$ (3.214)

$\lambda \leq \frac{z_3^{NIS}-z_3(Eşitlik\ 3.169)}{z_3^{NIS}-z_3^{PIS}}$ (3.215)

$\lambda \leq \frac{z_4^{NIS}-z_4(Eşitlik\ 3.170)}{z_4^{NIS}-z_4^{PIS}}$ (3.216)

(3.131), (3.132), (3.135), (3.139)-(3.142), (3.145), (3.146), (3.171)-(3.183) ve (3.185)-(3.187)

$\lambda \in [0,1]$

Kısıtlar (Melez yönteme göre durulaştırılmış)

(3.131), (3.132), (3.135), (3.139)-(3.142), (3.145), (3.146), (3.188)-(3.205), (3.207)-(3.210) ve (3.213)-(3.216)

$\lambda \in [0,1]$

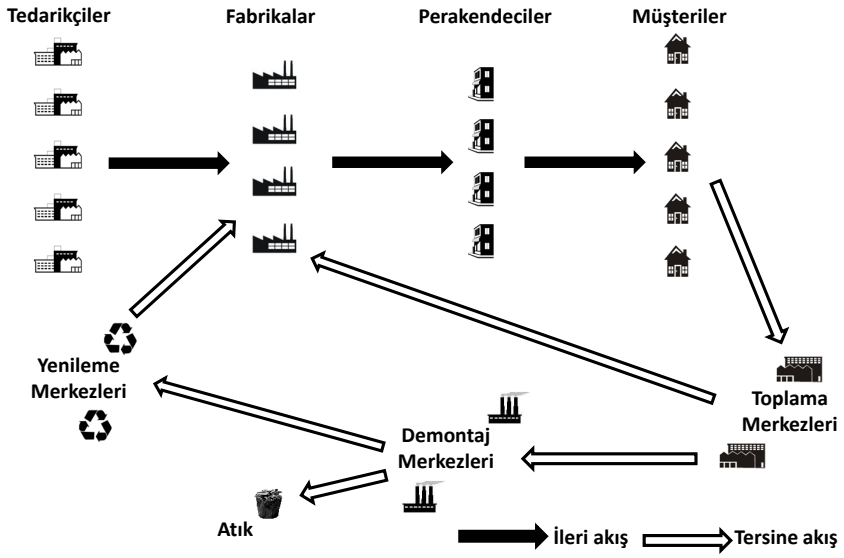
Adım7: Son adımda γ ve ζ_g değerleri belirlenerek tek amaçlı hale dönüştürülen durulaştırılmış modeller çözülür. Eğer karar verici elde edilen çözümden memnun kalmaz ise farklı α, γ ve ζ_g değerleri ile modeller tekrardan çözülebilir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, bir önceki bölümde formülasyonları ile beraber verilen 6 farklı matematiksel model hipotetik verilerle GAMS paket programında test edilmiş ve önerilen modellerin uygulanabilirliği ve geçerliliği gösterilmiştir. Daha sonra farklı parametre değerlerinin sistem üzerindeki etkilerinin ölçülmesi için senaryo analizleri yapılmış ve karar vericiye yönetimsel önerilerde bulunulmuştur.

4.1. Model 1'e Ait Sayısal Örnek

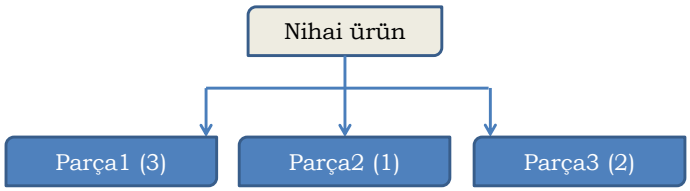
Ele alınan sayısal örnekte KDTZ ağının ileri aşaması 5 tedarikçi, 4 fabrika, 4 perakendeci ve 5 müşteriden oluşurken, tersine aşaması ikişer adet toplama, demontaj ve yenileme merkezinden ve 1 adet atık tesisinden meydana gelmektedir (Şekil 4.1). Tedarikçiler, fabrikalarda montajlanmak üzere ağa 3 farklı parça sevk etmektedirler (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Model 1'e ait sayısal örnekteki ağ yapısı

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi nihai ürün 3 adet birinci parçadan, 1 adet ikinci parçadan ve 2 adet üçüncü parçadan oluşmaktadır. Fabrikalarda belirtilen oranlarda parçalar kullanılarak nihai ürünler elde edilmekte, bu ürünler perakendeciler aracılığıyla müşterilere ulaştırılmaktadır. Müşterilerden her dönem kullanılmış ürünler toplanmakta, söz konusu ürünler toplama merkezlerine taşınmaktadır. Toplama merkezlerindeki ön

incelemeden sonra kullanılabilir durumdaki ürünler doğrudan fabrikalara gönderilirken, geri kalan kullanılamaz durumdaki nihai ürünler demonte edilmesi için demontaj merkezlerine gönderilmektedir. Demontaj sonrası açığa çıkan parçalardan bozuk ve hasarlı olanlar atığa gönderilirken, kullanışlı parçalar bir sonraki dönemde kullanılabilmesi için yenileme merkezleri aracılığıyla fabrikalara gönderilmektedir.



Şekil 4.2. Ürün ağacı

Birim taşıma maliyeti (t) ton-km başına 5.23 cent olarak ele alınmıştır (Forkenbrock, 2001). Birim hammadde satın alma maliyeti (s_{ic}) 50$/ton, iken birim yenileme maliyeti (w_{rc}) 10$/ton olarak belirlenmiştir. Fabrika ve perakendecilerin sabit işletme maliyetleri sırasıyla 5000$ (α_{jp}) ve 3000$ (β_{kp})'dir. Diğer parametreler ise H_p and G_p: 4; η: 0.3; ϑ: 0.3 and λ: 0.2 olarak belirlenmiştir. Örneğe ilişkin diğer veriler Çizelge 4.1-4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.1. Tedarikçiler, fabrikalar, perakendeciler, toplama ve yenileme merkezleri arasındaki mesafeler (km)

	Fabrika 1	**Fabrika 2**	**Fabrika 3**	**Fabrika 4**
Tedarikçi 1	100	130	90	160
Tedarikçi 2	110	150	180	200
Tedarikçi 3	140	80	95	160
Tedarikçi 4	190	185	210	200
Tedarikçi 5	170	135	115	150
Perakendeci 1	160	120	180	160
Perakendeci 2	80	100	150	170
Perakendeci 3	110	90	140	110
Perakendeci 4	70	130	150	120
Toplama merkezi 1	220	180	190	230
Toplama merkezi 2	260	150	170	210
Yenileme merkezi 1	120	150	110	180
Yenileme merkezi 2	190	170	140	130

Çizelge 4.2. Perakendeciler, müşteriler ve toplama merkezleri arasındaki mesafeler (km)

	Müşteri 1	**Müşteri 2**	**Müşteri 3**	**Müşteri 4**	**Müşteri 5**
Perakendeci 1	220	260	150	170	280
Perakendeci 2	320	290	210	330	180
Perakendeci 3	130	320	220	170	390
Perakendeci 4	140	250	130	210	370
Toplama merkezi 1	50	80	100	90	120
Toplama merkezi 2	110	95	65	87	96

Çizelge 4.3. Toplama, demontaj, atık ve yenileme merkezleri arasındaki mesafeler (km)

	Toplama merkezi 1	**Toplama merkezi 2**	**Atık**	**Yenileme merkezi 1**	**Yenileme merkezi 2**
Demontaj merkezi 1	90	80	50	130	160
Demontaj merkezi 2	100	95	60	110	120

Çizelge 4.4. Tedarikçi, demontaj ve yenileme merkezleri kapasiteleri (ton)

		Dönem 1	**Dönem 2**	**Dönem 3**	**Dönem 4**	**Dönem 5**	**Dönem 6**
	Parça 1	620	610	630	620	640	630
Tedarikçi 1	**Parça 2**	320	310	330	320	340	330
	Parça 3	420	410	430	420	440	430
	Parça 1	720	710	730	720	740	730
Tedarikçi 2	**Parça 2**	350	340	330	350	360	350
	Parça 3	520	510	530	520	540	330
	Parça 1	620	610	630	620	640	630
Tedarikçi 3	**Parça 2**	320	210	330	320	340	330
	Parça 3	420	410	430	420	440	430
	Parça 1	880	850	820	810	850	840
Tedarikçi 4	**Parça 2**	370	330	320	370	350	380
	Parça 3	420	410	430	420	440	430
	Parça 1	720	710	730	720	740	730
Tedarikçi 5	**Parça 2**	310	350	370	350	330	380
	Parça 3	520	510	530	520	540	530
	Parça 1	640	560	580	560	750	540
Demontaj merkezi 1	**Parça 2**	450	430	620	730	840	750
	Parça 3	680	740	650	570	840	750
	Parça 1	680	570	630	740	870	740
Demontaj merkezi 2	**Parça 2**	620	540	460	680	790	860
	Parça 3	750	630	520	640	760	840
	Parça 1	760	650	530	450	570	690
Yenileme merkezi 1	**Parça 2**	710	720	640	530	450	670
	Parça 3	550	660	770	670	580	750
	Parça 1	760	650	530	450	570	690
Yenileme merkezi 2	**Parça 2**	710	720	640	530	450	670
	Parça 3	550	660	770	670	580	750

Çizelge 4.5. Fabrika, perakendeci, toplama merkezleri kapasiteleri ve müşteri talepleri (ton)

	Dönem 1	**Dönem 2**	**Dönem 3**	**Dönem 4**	**Dönem 5**	**Dönem 6**
Fabrika 1	570	450	310	440	530	490
Fabrika 2	390	370	480	560	530	440
Fabrika 3	570	450	510	440	330	490
Fabrika 4	470	350	410	540	430	390
Perakendeci 1	420	430	550	310	400	540
Perakendeci 2	480	230	350	470	460	490
Perakendeci 3	410	460	490	330	240	360
Perakendeci 4	410	520	460	430	440	410
Müşteri 1	130	120	110	140	130	140
Müşteri 2	160	180	160	150	140	120
Müşteri 3	130	140	130	140	160	170
Müşteri 4	190	180	160	150	130	150
Müşteri 5	160	140	130	110	120	130
Toplama merkezi 1	200	230	220	210	250	240
Toplama merkezi 2	230	220	210	250	240	270

Yukarıdaki veriler ışığında, geliştirilen KTDP modeli (3.8)-(3.30) 3.16 GHz işlemcili ve 1GB RAM'e sahip bilgisayarda GAMS-CPLEX paket programı ile 3 saniyede çözülmüştür. Taşıma, satın alma, yenileme ve sabit işletme maliyetlerinden oluşan toplam amaç fonksiyonu 1384023.15$ olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.6 her bir amaç fonksiyonu değerini ve toplam amaç fonksiyonu içindeki yüzdesini vermektedir. Çizelge 4.6'ya göre toplam amaç fonksiyonu içindeki en büyük paya, toplam satın alma maliyeti sahipken (%73.13), satın alma maliyetini sırasıyla toplam taşıma maliyeti (%16.80), toplam sabit işletme maliyeti (%6.94) ve toplam yenileme maliyeti (%3.13) izlemiştir. Her bir dönem için örneğe ilişkin optimal değerler Çizelge 4.7'de, birinci döneme ait optimal dağıtım ağı da Şekil 4.3'te verilmiştir.

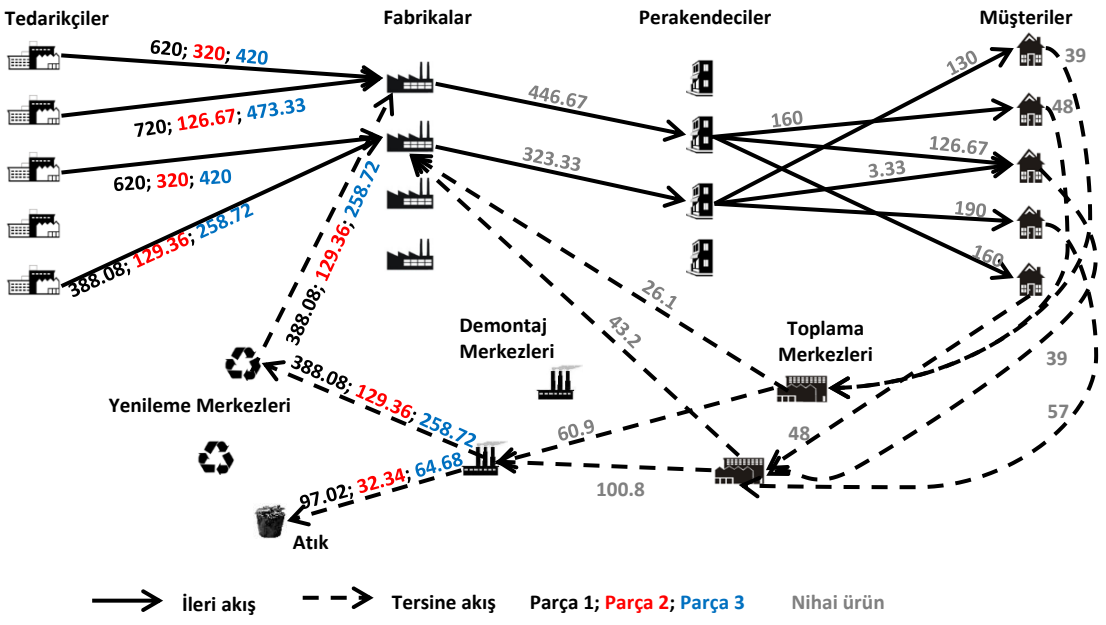
Çizelge 4.6. Her bir amaç fonksiyonu değeri ve yüzdesi

	Performans Göstergesi (PG)	**Değer ($)**	**Toplam amaç fonksiyonu içindeki %**
PG1	Toplam amaç fonksiyonu	1384023.15	100.00
PG2	Toplam taşıma maliyeti	232550.03	16.80
PG3	Toplam satın alma maliyeti	1012100.10	73.13
PG4	Toplam yenileme maliyeti	43344.02	3.13
PG5	Toplam işletme maliyeti	96000.00	6.94

Çizelge 4.7. Optimal dağıtım planı

		Dönem1	Dönem2	Dönem3	Dönem4	Dönem5	Dönem6	Toplam
Satın alınan miktar	Parça1	2310	2280	2070	2070	2040	2130	12900
	Parça2	770	760	690	690	680	710	4300
	Parça3	1540	1520	1380	1380	1360	1420	8600
Toplanan miktar	Nihai ürün	231	228	207	207	204	213	1290
Toplama merkezi-Fabrika	Nihai ürün	69.3	68.4	62.1	62.1	61.2	63.9	387
Demonte edilen miktar	Nihai ürün	161.7	159.6	144.9	144.9	142.8	149.1	903
Atığa yollanan miktar	Parça1	97.02	95.76	86.94	86.94	85.68	89.46	541.8
	Parça2	32.34	31.92	28.98	28.98	28.56	29.82	180.6
	Parça3	64.68	63.84	57.96	57.96	57.12	59.64	361.2
Yenilenen miktar	Parça1	388.08	383.04	347.76	347.76	342.72	357.84	2167.2
	Parça2	129.36	127.68	115.92	115.92	114.24	119.28	722.4
	Parça3	258.72	255.36	231.84	231.84	228.48	238.56	1444.8
Açılan fabrikalar		1-2	1-2	2-3	1-2	1-2	1-2	
Açılan perakendeciler		2-3	1-4	2-4	2-4	2-4	2-4	

Çizelge 4.7'de birinci satır tedarikçilerden montajlanmak üzere satın alınan hammadde miktarlarını göstermektedir. Buna göre, birinci, ikinci ve üçüncü tip parçalardan toplamda sırasıyla 12900, 4300 ve 8600 ton satın alma gerçekleşmiştir. Her bir dönemde hem fabrikadan hem de perakendecilerden ikişer adet açılması uygun görülmüştür. Müşterilerden toplanan ürün oranı %30 olarak belirlendiğinden 4300 nihai ürünün 1290 tonu müşterilerden toplama merkezlerine gönderilmiştir. Toplama merkezinden değerlendirilen ürünlerden 387 tonluk kısmı bir sonraki dönem kullanılmak üzere fabrikalara gönderilirlerken geri kalan kısmı (903 ton) demonte edilmek üzere demontaj merkezine gönderilmiştir.



Şekil 4.3. Birinci döneme ilişkin optimal dağıtım ağı

Demontaj merkezlerindeki 903 ton kullanılmış ürün sırasıyla 2709, 1903 ve 1806 ton alt parçalara ayrılmıştır. Ön değerlendirme sonrası ise bu parçaların sırasıyla 541.8, 180.6 ve 361.2 tonu kullanılamaz olduğundan atığa yollanmıştır. Geri kalan kullanılabilir kısım ise bir sonraki dönemlerde kullanılmak üzere fabrikalara gönderilmiştir.

4.1.1. Model 1'e ait senaryo analizleri

Bu bölümde, problem parametrelerinin ve boyutunun modele ait performans göstergeleri (PG1-PG5) üzerindeki etkilerinin ölçülebilmesi ve karar vericilere yönetimsel bakış açıları kazandırılması için farklı senaryo analizleri yapılmıştır.

4.1.1.1. Talep değişimlerinin etkisi (Senaryo 1)

İlk senaryo analizi olası talep değişimlerinin performans göstergeleri üzerindeki etkisini ölçmek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla, Çizelge 4.5'te verilen başlangıç problemine ait talep değerleri 8 defa %5 oranında artırılmıştır. Çizelge 4.8 bu değişimler sonucunda elde edilen her bir amaç fonksiyonu değeri ve toplam amaç fonksiyonu içindeki yüzdelerini göstermektedir.

Çizelge 4.8. Senaryo 1'e göre elde edilen sonuçlar

	Performans Göstergesi (PG)					Toplam amaç fonksiyonu içindeki %				
Talep değişimi	**PG1**	**PG2**	**PG3**	**PG4**	**PG5**	**PG1**	**PG2**	**PG3**	**PG4**	**PG5**
+%5	1450087.86	245840.30	1062700.36	45511.20	96000.00	100.00	16.95	73.29	3.14	6.62
+%10	1517389.46	260360.00	1113300.06	47678.40	96000.00	100.00	17.16	73.37	3.14	6.33
+%15	1583824.38	274020.08	1164000.70	49845.60	96000.00	100.00	17.30	73.49	3.15	6.06
+%20	1655567.62	284990.02	1214600.40	52012.80	104000.00	100.00	17.21	73.36	3.14	6.28
+%25	1723362.82	300020.12	1265200.20	54180.50	104000.00	100.00	17.41	73.41	3.14	6.03
+%30	1792056.00	312930.20	1315800.60	56347.20	107000.00	100.00	17.46	73.42	3.14	5.97
+%35	1864223.26	323330.30	1366400.56	58514.40	116000.00	100.00	17.34	73.30	3.14	6.22
+%40	1934400.90	338770.10	1417000.20	60681.60	118000.00	100.00	17.51	73.25	3.14	6.10

Çizelge 4.8'deki verilere göre, beklendiği gibi talepteki artış hem taşıma hem de diğer maliyetlerde belirli oranlarda artışa neden olmuştur. Mevcut talepteki %40 oranındaki artış toplam, taşıma, satın alma, yenileme ve tesis açma maliyetlerinde sırasıyla %39.77, %45.68, %40.01, %39.99 ve %22.92 oranında artışa yol açmıştır. Görüldüğü gibi en yüksek artış taşıma maliyetinde gerçekleşmişken, en düşük artış tesis açma maliyetlerinde gözlemlenmiştir. Toplam amaç fonksiyonu içinde tesis açma maliyetinin payı aynı oranda azalırken, taşıma maliyetinin payı da artmaktadır. Buna ek

olarak satın alma ve yenileme maliyetleri birbirleri ile dengeli bir şekilde ödünleşerek toplam amaç fonksiyonu içindeki oranları sabit kalmıştır. Sonuç olarak, pazarlama veya satış yatırımları ile elde edilebilecek bir talep artışı durumunda tesis açma maliyetine daha az önem verilirken, taşıma maliyeti karar vericilerin dikkat etmesi gereken bir performans göstergesi olmuştur.

4.1.1.2. Ürün toplama oranlarının etkisi (Senaryo 2)

Gerçek hayattaki KDTZ ağlarında çok fazla çeşitte ve yapıda (otomotiv parçaları, kitaplar, yazıcılar ve bilgisayarlar) ürün toplanmaktadır. Farklı kullanım sürelerine sahip ürünlerin farklı geri dönüş veya toplama oranlarına da sahip olması beklenen bir durumdur. Rogers ve Tibben-Lembke (1998) farklı ürünlerin sahip olduğu geri dönüşüm oranları ile ilgili yapmış olduğu çalışmasında, ürün geri dönüşlerinin %4 ve %50 arasında değişkenlik gösterdiğini belirtmiştir. Bu geri dönüşüm farklılığının yansıtılabilmesi adına %30 olan başlangıç η değeri %5-%50 arasında değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Senaryo 2'ye göre elde edilen sonuçlar

	Performans Göstergesi (PG)					Toplam amaç fonksiyonu içindeki %				
η	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5
%5	1625684.20	216230.00	1305900.00	7585.20	96000.00	100.00	13.30	80.33	0.47	5.91
%10	1590387.37	221970.37	1257200.60	15170.40	96000.00	100.00	13.96	79.05	0.95	6.04
%15	1555246.81	227870.00	1208600.21	22755.60	96000.00	100.00	14.65	77.71	1.46	6.17
%20	1520106.24	233770.24	1160000.00	30340.80	96000.00	100.00	15.38	76.31	2.00	6.32
%25	1484999.23	239710.23	1111400.00	37926.00	96000.00	100.00	16.14	74.84	2.55	6.46
%30	1450087.86	245840.16	1062700.50	45511.20	96000.00	100.00	16.95	73.29	3.14	6.62
%35	1415236.66	252030.00	1014100.26	53096.40	96000.00	100.00	17.81	71.66	3.75	6.78
%40	1380658.61	258490.01	965490.00	60681.60	96000.00	100.00	18.72	69.93	4.40	6.95
%45	1346521.55	265390.30	916860.45	68266.80	96000.00	100.00	19.71	68.09	5.07	7.13
%50	1313103.83	273020.83	868230.00	75852.00	96000.00	100.00	20.79	66.12	5.78	7.31

Çizelge 4.9'a göre, ürün toplama oranının artması toplam ve satın alma maliyetlerini düşürürken, taşıma ve yenileme maliyetlerini de artırmaktadır; ancak tesis açma maliyetleri üzerinde herhangi bir değişikliğe yol açmamıştır. Bunun en temel sebebi, toplama oranının artmasının doğrudan tersine akış ile ilişkili olmasıdır. Toplama oranının artması ile geri dönüşümden kazanılan parça sayısı arttığından sıfır ürün satın alma maliyetleri ciddi oranda azalmıştır. Örneğin, toplama oranının %5'ten %50'ye çıkarılması, satın alma maliyetlerinde %33.51'lik bir düşüşe sebep olmuştur. Diğer taraftan ürün yenileme maliyetleri de %900 oranında artış göstermiştir. Toplama oranındaki söz konusu artış toplam maliyetin %19.23 azalmasına neden olmuştur.

4.1.1.3. Fabrika ve perakendeci kapasitelerinin etkisi (Senaryo 3)

Bu senaryo analizinin amacı ileri ağda bulunan fabrika ve perakendecilere ait kapasite değerlerindeki değişimin performans göstergeleri üzerindeki etkilerinin ölçülmesidir. Bu amaçla 3 alt senaryo analizi yapılmıştır. İlkinde sadece fabrika kapasitesi (Senaryo 3a), ikincisinde sadece perakendeci kapasitesi (Senaryo 3b) sonuncusunda ise her iki tesis kapasitesi de (Senaryo 3c) %10'dan %80'e sistematik bir biçimde artırılmıştır. Elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge 4.10-4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Senaryo 3a'ya göre elde edilen sonuçlar

	Performans Göstergesi (PG)					**Toplam amaç fonksiyonu içindeki %**				
b_{jp}	**PG1**	**PG2**	**PG3**	**PG4**	**PG5**	**PG1**	**PG2**	**PG3**	**PG4**	**PG5**
+%10	1383617.96	232140.00	1012100.00	43344.00	96000.00	100.00	16.78	73.15	3.13	6.94
+%20	1383349.57	231870.00	1012100.00	43344.00	96000.00	100.00	16.76	73.16	3.13	6.94
+%30	1379438.66	237960.00	1012100.00	43344.00	86000.00	100.00	17.25	73.37	3.14	6.23
+%40	1376157.95	244680.00	1012100.00	43344.00	76000.00	100.00	17.78	73.55	3.15	5.52
+%50	1373743.86	247270.00	1012100.00	43344.00	71000.00	100.00	18.00	73.67	3.16	5.17
+%60	1371858.98	245380.00	1012100.00	43344.00	71000.00	100.00	17.89	73.78	3.16	5.18
+%70	1369784.42	248310.00	1012100.00	43344.00	66000.00	100.00	18.13	73.89	3.16	4.82
+%80	1369784.42	248310.00	1012100.00	43344.00	66000.00	100.00	18.13	73.89	3.16	4.82

Çizelge 4.11. Senaryo 3b'ye göre elde edilen sonuçlar

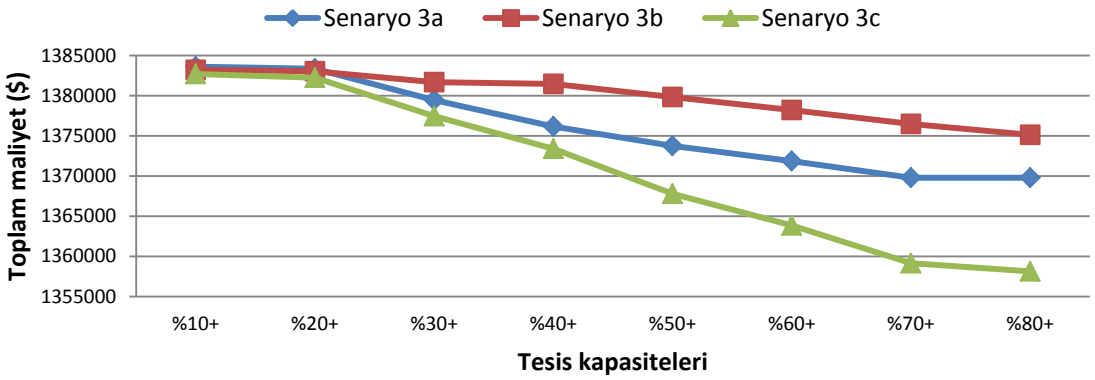
	Performans Göstergesi (PG)					**Toplam amaç fonksiyonu içindeki %**				
c_{kp}	**PG1**	**PG2**	**PG3**	**PG4**	**PG5**	**PG1**	**PG2**	**PG3**	**PG4**	**PG5**
+%10	1383208.69	231730.00	1012100.00	43344.00	96000.00	100.00	16.75	73.17	3.13	6.94
+%20	1383039.66	231560.00	1012100.00	43344.00	96000.00	100.00	16.74	73.18	3.13	6.94
+%30	1381672.15	233190.00	1012100.00	43344.00	93000.00	100.00	16.88	73.25	3.14	6.73
+%40	1381463.19	235990.00	1012100.00	43344.00	90000.00	100.00	17.08	73.26	3.14	6.51
+%50	1379829.23	240350.00	1012100.00	43344.00	84000.00	100.00	17.42	73.35	3.14	6.09
+%60	1378212.92	238730.00	1012100.00	43344.00	84000.00	100.00	17.32	73.44	3.14	6.09
+%70	1376478.58	240000.00	1012100.00	43344.00	81000.00	100.00	17.44	73.53	3.15	5.88
+%80	1375126.31	238650.00	1012100.00	43344.00	81000.00	100.00	17.35	73.60	3.15	5.89

Çizelge 4.12. Senaryo 3c'ye göre elde edilen sonuçlar

	Performans Göstergesi (PG)					**Toplam amaç fonksiyonu içindeki %**				
b_{jp} **ve** c_{kp}	**PG1**	**PG2**	**PG3**	**PG4**	**PG5**	**PG1**	**PG2**	**PG3**	**PG4**	**PG5**
+%10	1382692.46	231210.00	1012100.00	43344.00	96000.00	100.00	16.72	73.20	3.13	6.94
+%20	1382235.72	230760.00	1012100.00	43344.00	96000.00	100.00	16.69	73.22	3.14	6.95
+%30	1377446.71	238970.00	1012100.00	43344.00	83000.00	100.00	17.35	73.48	3.15	6.03
+%40	1373394.59	247920.00	1012100.00	43344.00	70000.00	100.00	18.05	73.69	3.16	5.10
+%50	1367793.30	253320.00	1012100.00	43344.00	59000.00	100.00	18.52	74.00	3.17	4.31
+%60	1363847.80	249370.00	1012100.00	43344.00	59000.00	100.00	18.28	74.21	3.18	4.33
+%70	1359145.18	252670.00	1012100.00	43344.00	51000.00	100.00	18.59	74.47	3.19	3.75
+%80	1358130.56	251650.00	1012100.00	43344.00	51000.00	100.00	18.53	74.52	3.19	3.76

Yukarıdaki çizelgelere göre, fabrika ve perakendecilerin kapasitelerindeki artış toplam maliyeti ve tesis açma maliyetlerini azaltırken, diğer taraftan toplam taşıma maliyetini de artırmıştır. Kapasitedeki değişimler ürün satışına veya geri dönüşüme etki etmediğinden dolayı toplam satın alma ve yenileme maliyetinde herhangi bir değişim

gerçekleşmemiştir. Fabrika kapasitesindeki artış (Senaryo 3a), perakendeci kapasitesindeki artış (Senaryo 3b) ve her iki tesis kapasitesindeki artış (Senaryo 3c) sırasıyla toplam maliyette %1.03, %0.64 ve %1.87'lik düşüşe sebep olmuştur (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Fabrika ve perakendeci kapasitelerinin toplam maliyet üzerindeki etkisi

Şekil 4.4'e göre fabrikaların kapasite değişimleri perakendeci kapasite değişimlerine göre daha etkilidir. Diğer taraftan, tesis kapasitelerinin artmasından dolayı yeni fabrika ve perakendeci açılmasına gerek duyulmamış, bu da tesis açma maliyetlerinin düşmesine neden olmuştur.

4.1.1.4. Geri dönüşüme ait oranların etkisi (Senaryo 4)

Dördüncü senaryo, toplama merkezleri ile fabrikalar arasındaki (ϑ) ve demontaj merkezleri ile atık arasındaki (λ) geri dönüşüm oranlarının performans göstergeleri üzerindeki etkilerinin ölçülmesi için gerçekleştirilmiştir. Bunun için toplamları 1 olacak şekilde ϑ ve λ değerleri %10 ile %90 arasında değiştirilmiştir. Çiezlge 4.13 elde edilen sonuçları göstermektedir.

Çizelge 4.13. Senaryo 4'e göre elde edilen sonuçlar

		Performans Göstergesi (PG)					Toplam amaç fonksiyonu içindeki %				
ϑ	λ	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5
%90	**%10**	1257370.29	184270.00	970130.00	6966.00	96000.00	100.00	14.66	77.16	0.55	7.63
%80	**%20**	1280076.83	191870.00	979820.00	12384.00	96000.00	100.00	14.99	76.54	0.97	7.50
%70	**%30**	1307129.68	198900.00	995980.00	16254.00	96000.00	100.00	15.22	76.20	1.24	7.34
%60	**%40**	1338601.40	205430.00	1018600.00	18576.00	96000.00	100.00	15.35	76.09	1.39	7.17
%50	**%50**	1374389.85	211360.00	1047700.00	19350.00	96000.00	100.00	15.38	76.23	1.41	6.98
%40	**%60**	1414524.33	216730.00	1083200.00	18576.00	96000.00	100.00	15.32	76.58	1.31	6.79
%30	**%70**	1458400.41	220930.00	1125200.00	16254.00	96000.00	100.00	15.15	77.15	1.11	6.58
%20	**%80**	1506447.51	224380.00	1173700.00	12384.00	96000.00	100.00	14.89	77.91	0.82	6.37
%10	**%90**	1558831.01	227250.00	1228600.00	6966.00	96000.00	100.00	14.58	78.82	0.45	6.16

Çizelge 4.13'e göre ϑ değerinin (toplama merkezi ile fabrika arası) düşmesi ve atık oranının (λ) artması toplam, taşıma ve satın alma maliyetini artırmaktadır. Diğer bir ifade ile toplama merkezlerindeki ürünlerin kalite seviyeleri ve demontaj sonrası ortaya çıkan parça kalitesi düştükçe temin edilen sıfır ürün miktarı arttığından dolayı toplam maliyette ve satın alma maliyetinde sırasıyla %23.98 ve %26.64'lük bir artış meydana gelmektedir. Yenileme maliyeti ise geri dönüşüm oranları %50 seviyesinde iken maksimum noktaya ulaşmakta, tesis açma maliyeti (ileri ağda) ise geri dönüşüm oranlarından etkilenmemektedir.

4.1.1.5. Problem (ağ) boyutunun etkisi (Senaryo 5)

Son senaryo analizinde, mevcut ağ yapısının genişletilmesi sonucunda performans göstergeleri üzerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Bunun için mevcut tesis sayıları 6 kat artırılmış ve toplamda 26 farklı test problem geliştirilmiştir. Rassal olarak üretilen parametre değerleri ve aralıkları Çizelge 4.14'te verilmiştir. Çizelgede gösterilmeyen parametreler başlangıç problemleri ile aynı alınmıştır. Mevcut problem 488 değişken ve 975 kısıttan oluşurken, en büyük problem 3076 değişken ve 33773 kısıttan oluşmaktadır. Her bir test probleme ait amaç fonksiyonu değerleri ve işlem süreleri (sn) Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.14. Rassal olarak üretilen parametre değerleri

Parametreler	**Aralık**
Tedarikçi-fabrika arası mesafe	80-210
Fabrika-perakendeci arası mesafe	70-180
Perakendeci-müşteri arası mesafe	130-390
Müşteri-toplama merkezi arası mesafe	50-120
Toplama merkezi-fabrika arası mesafe	150-260
Toplama merkezi-demontaj merkezi arası mesafe	80-100
Demontaj merkezi-atık arası mesafe	50-60
Demontaj merkezi-yenileme merkezi arası mesafe	110-160
Yenileme merkezi-fabrika arası mesafe	110-190
Tedarikçi kapasitesi	500-700
Fabrika kapasitesi	310-570
Perakendeci kapasitesi	240-550
Müşteri talebi	110-180
Toplama merkezi kapasitesi	200-270
Demontaj merkezi kapasitesi	450-850
Yenileme merkezi kapasitesi	450-850
Açılabilir fabrika sayısı	Maks
Açılabilir perakendeci sayısı	Maks

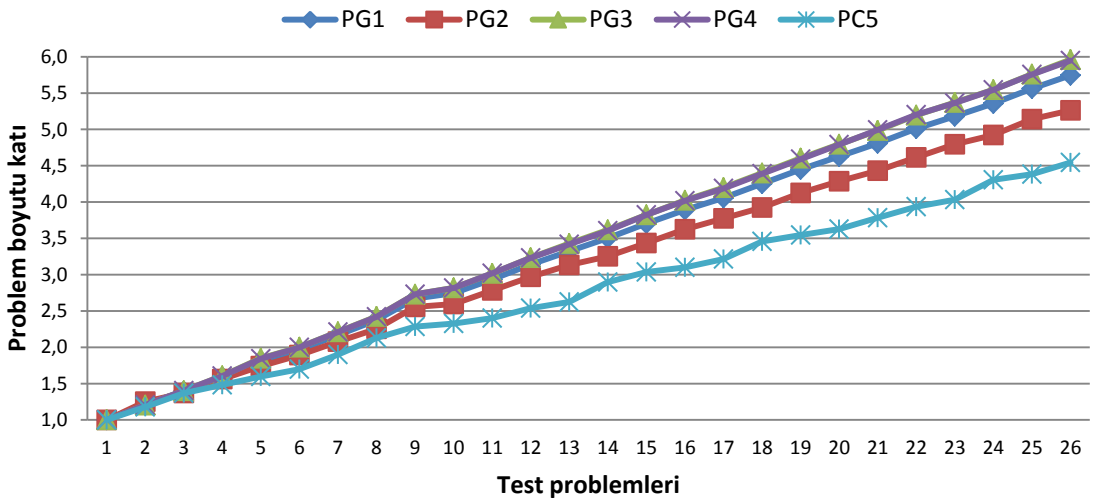
Beklendiği gibi problem boyutu arttıkça hem CPU süresi hem de toplam maliyet artmaktadır. Karar değişkeni sayısı 6.3, kısıt sayısı da 34.6 kat artarken, çözüm süresi 12028 kat artmıştır. Problem boyutu ile amaç fonksiyonları arasındaki ilişki de Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5'e göre problem boyutunun 6 kat artması toplam maliyeti 5.74 kat, toplam taşıma maliyetini 5.26 kat, toplam satın alma maliyetini 5.96 kat, toplam yenileme maliyetini 5.94 kat ve toplam tesis açma maliyetini 4.54 kat artırmaktadır. En yüksek artış satın alma maliyetinde, en düşük artış ise tesis açma maliyetinde gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.15. Senaryo 5'e göre elde edilen sonuçlar

No	Problem boyutu							Toplam maliyet içindeki %					CPU (sn)
	i	*j*	*k*	*l*	*m*	*d*	*r*	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5	
1	5	4	4	5	2	2	2	1384023.15	16.80	73.13	3.13	6.94	3
2	6	5	5	6	2	2	2	1674168.96	17.37	72.75	3.12	6.76	6
3	7	6	6	7	3	3	3	1928899.36	16.51	73.53	3.15	6.81	11
4	8	6	6	8	3	3	3	2199658.69	16.51	73.86	3.16	6.47	14
5	9	7	7	9	4	4	4	2507786.94	16.14	74.56	3.18	6.12	27
6	10	8	8	10	4	4	4	2713284.74	16.21	74.59	3.19	6.01	143
7	11	9	9	11	4	4	4	3000427.80	16.10	74.63	3.19	6.08	68
8	12	10	10	12	5	5	5	3286327.81	15.94	74.65	3.19	6.22	101
9	13	10	10	13	5	5	5	3695594.63	16.08	74.78	3.20	5.94	138
10	14	11	11	14	6	6	6	3800142.43	15.88	75.03	3.21	5.88	397
11	15	12	12	15	6	6	6	4060858.47	15.93	75.17	3.22	5.68	472
12	16	13	13	16	6	6	6	4346439.72	15.89	75.28	3.22	5.61	1282
13	17	14	14	17	7	7	7	4597797.14	15.85	75.45	3.22	5.48	866
14	18	14	14	18	7	7	7	4850068.22	15.59	75.45	3.22	5.74	726
15	19	15	15	19	8	8	8	5126427.25	15.58	75.50	3.23	5.69	1478
16	20	16	16	20	8	8	8	5386273.81	15.65	75.59	3.23	5.53	10431
17	21	17	17	21	8	8	8	5615500.26	15.63	75.64	3.23	5.50	6112
18	22	18	18	22	9	9	9	5886586.45	15.50	75.63	3.23	5.64	6083
19	23	18	18	23	9	9	9	6156764.36	15.58	75.66	3.23	5.53	9738
20	24	19	19	24	10	10	10	6404698.68	15.56	75.76	3.24	5.44	36001
21	25	20	20	25	10	10	10	6654948.50	15.48	75.82	3.25	5.46	23527
22	26	21	21	26	10	10	10	6934662.37	15.47	75.84	3.25	5.45	18771
23	27	22	22	27	11	11	11	7171040.16	15.55	75.81	3.24	5.40	26811
24	28	22	22	28	11	11	11	7413066.06	15.44	75.73	3.24	5.58	21305
25	29	23	23	29	12	12	12	7696714.93	15.53	75.76	3.24	5.47	35039
26	30	24	24	30	12	12	12	7951067.29	15.39	75.88	3.24	5.49	36086

Uygulanan senaryo analizlerine göre elde edilen çıkarımlar aşağıda verilmiştir.

- Amaç fonksiyonları arasında en baskın maliyet taşıma iken, bunu sırasıyla satın alma, yenileme ve tesis açma maliyeti izlemektedir.
- Pazarlama gibi teknikler sonucunda elde edilebilecek %40'lık bir talep artışı, karar vericiye %39'luk bir toplam maliyet artışı olarak geri dönmektedir.
- Eğer karar verici müşterilerden toplanan ürün yüzdesini %5'ten %50 rakamlarına çıkarabilirse, toplam maliyet %19.22 oranında düşüş göstermektedir.
- Fabrika ve perakendeci kapasitelerinin artması toplam maliyet üzerinde az da olsa olumlu etki göstermektedir. Olası kapasite artırımlarındaki önceliğin perakendecilerden ziyade fabrikalara verilmesi toplam maliyette daha fazla düşüşe neden olmaktadır.
- Son olarak, karar vericinin mevcut KDTZ ağını 6 kat artırması, toplam maliyette de 5.74 katlık bir artışa sebep olacaktır.



Şekil 4.5. Problem boyutu ile amaç fonksiyonları arasındaki ilişki

4.2. Model 2'ye Ait Sayısal Örnek

Bu bölümde, bir önceki bölümde verilen sayısal örnek aynen kullanılmıştır. Bulanık parametrelerin en olası değerleri bir önceki bölümde verilen deterministik değerlerdir. En kötümser değerler en olası değerlerin %10 azaltılmış hali iken, en iyimser değerler en olası değerlerin %10 artırılmış halidir. Tüm durulaştırma işlemlerinde α=0.5, $w_1 = w_3 = 1/6$, $w_2 = 4/6$ olarak alınmıştır. z_1 toplam taşıma, satın alma ve yenileme maliyetlerini gösterirken, z_2 toplam tesis açma maliyetini göstermektedir.

Liang ve Cheng (2009) yaklaşımı ile bulanık kısıtlar durulaştırıldıktan (Eşitlik 3.52 yardımıyla) sonra her bir amaç fonksiyonu bireysel olarak çözülmüş ve elde edilen ödünleşme tablosu Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Amaç fonksiyonlarına ait başlangıç çözümleri

			(PIS; NIS)	Başlangıç çözümler
Amaç	Min z_1	Min z_2	-	Maks L
L	100%	100%	-	0.9451
z_1(\$)	1281419.66*	1379404.00	(1281419.66; 1379404.00)	1286764.00
z_2(\$)	192000.00	96000.00*	(96000.00; 192000.00)	99000.00

* Bireysel çözümler sonucunda elde edilen optimal değerler

Çizelge 4.16'ya göre z_1 minimizasyonu sonucunda toplam maliyet (taşıma, satın alma, yenileme) 1281419.66\$ çıkmışken, tesis açma maliyeti 1379404.00\$ çıkmıştır.

Tam tersi durumda yani z_2 minimizasyonunda toplam maliyet (tesis açma) 96000.00$ çıkmışken, toplam taşıma, satın alma ve yenileme maliyetleri 192000.00$ çıkmıştır. Elde edilen rakamlara göre söz konusu amaçların birbirleri ile çeliştikleri açıktır. Bu durumda z_1'e ait PIS ve NIS değerleri (1281419.66; 1379404.00) iken, z_2'ye ait PIS ve NIS değerleri (96000.00; 192000.00) olur. Buna göre eşitlik (3.53) yardımıyla oluşturulan her bir amaç fonksiyonuna ait üyelik fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

$$\mu_1(z_1)\begin{cases} 1, & z_1 \leq 1281419.66 \\ \frac{1379404.00-z_1}{97984.34}, & 1281419.66 < z_1 < 1379404.00, \\ 0, & z_1 \geq 1379404.00 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\mu_2(z_2)\begin{cases} 1, & z_2 \leq 96000.00 \\ \frac{192000.00-z_2}{96000.00}, & 96000.00 < z_2 < 192000.00, \\ 0, & z_2 \geq 192000.00 \end{cases} \quad (4.2)$$

(3.40)-(3.43), (3.49)-(3.51) ve (3.54)-(3.69)'den oluşan tek amaçlı KTDP modeli GAMS-CPLEX paket programında Intel Core i3 işlemcili ve 4GB RAM'e sahip bilgisayarda 1 saniyede çözülmüştür. Elde edilen optimal sonuca göre z_1=1286764.00$ ve z_1=99000.00$ olarak bulunmuş ve karar vericiye ait tatmin seviyesi 0.9451 çıkmıştır (Çizelge 4.16). Eğer karar verici, *L* değerinden memnun kalmaz ise elde edilen z_1 ve z_2 değerleri ilgili amaç fonksiyonları için yeni NIS değerleri olarak model tekrardan çözülebilir. Karar vericinin 0.9451 değerinden memnun olduğunu varsayarsak, Çizelge 4.17 optimal performans göstergelerini; Çizelge 4.18'de optimal dağıtım ağını vermektedir.

Çizelge 4.17. Örneğe ilişkin optimal performans göstergeleri

Performans göstergeleri	Değer ($)	Toplam maliyet içindeki %
Toplam maliyet	1385764.00	100.00%
Toplam taşıma maliyeti	231320.00	16.69%
Toplam satın alma maliyeti	1012100.00	73.03%
Toplam yenileme maliyeti	43344.00	3.14%
Toplam tesis açma maliyeti	99000.00	7.14%

Çizelge 4.17'ye göre ağdaki toplam taşıma maliyeti, toplam maliyetin %16.69'lık kısmına tekabül etmektedir. En büyük pay %73.03 ile satın alma maliyetinde iken, en küçük pay %3.14 ile yenileme maliyetindedir. Tesis açma maliyeti ise toplam maliyette %7.14'lük bir paya sahiptir.

Çizelge 4.18. Örneğe ilişkin optimal dağıtım ağı

		Dönem1	Dönem2	Dönem3	Dönem4	Dönem5	Dönem6	Toplam
	Parça 1	2310	1684.02	1481.76	1535.94	1505.94	1603.68	10121.34
Satın alınan parça miktarı	**Parça 2**	770	561.34	493.92	511.98	501.98	534.56	3373.78
	Parça 3	1540	1122.68	987.84	1023.96	1003.96	1069.12	6747.56
Toplanan ürün miktarı	**Nihai ürün**	231	168.40	148.17	153.59	150.59	160.36	1012.13
Toplama merkezi-fabrika	**Nihai ürün**	69.3	50.52	44.45	46.07	45.17	48.11	303.64
Demonte edilen miktar	**Nihai ürün**	161.7	117.88	103.72	107.51	105.41	112.25	708.49
	Parça 1	97.02	95.76	86.94	86.94	85.68	89.46	541.8
Atık olan parça miktarı	**Parça 2**	32.34	31.92	28.98	28.98	28.56	29.82	180.6
	Parça 3	64.68	63.84	57.96	57.96	57.12	59.64	361.2
	Parça 1	388.08	383.04	347.76	347.76	342.72	357.84	2167.2
Yenilenen parça miktarı	**Parça 2**	129.36	127.68	115.92	115.92	114.24	119.28	722.4
	Parça 3	258.72	255.36	231.84	231.84	228.48	238.56	1444.8
Açılan fabrikalar		1-2	1-2	2-3	1-2	1-2	1-2	
Açılan perakendeciler		2-3	2-3-4	2-4	2-4	2-4	2-4	

Her bir döneme ait ağdaki akış miktarları ve açılan fabrika-perakendeci sayıları Çizelge 4.18'de gösterilmiştir. Çizelgedeki ilk satır tedarikçilerden satın alınan sıfır parça miktarlarını vermektedir. Toplamda 10121.34, 3373.78 ve 6747.56 ton birinci, ikinci ve üçüncü tip parça tedarikçilerden satın alınmış ve fabrikalar-perakendeciler aracılığıyla müşterilere nihai ürün olarak ulaştırılmıştır. Her dönemde (ikinci dönem perakendeci sayısı hariç) ikişer adet fabrika ve perakendeci açılması yeterli görülmüştür. Ele alınan problemde diğer bir bulanık ifade de müşterilerden toplanacak ürün oranıdır ($\tilde{\eta}$). 3373.78 ton toplam ürün talebinin yaklaşık %30'luk kısmı (1012.13 ton) müşterilerden toplanmış ve toplama merkezine gönderilmiştir. Yapılan ön kalite kontrol sonrası toplanan bu ürün miktarının 303.64 tonu sonraki dönemlerde tekrardan kullanılmak üzere fabrikalara gönderilmiştir. Geri kalan 708.49 tonluk kullanılmış ürün demonte edilebilmesi için demontaj merkezlerine taşınmıştır. Demontaj sonrası 2125.47 ton birinci parça, 708.49 ton ikinci parça ve 1416.98 ton üçüncü parça açığa çıkmıştır. Ortaya çıkan bu parçalardan 541.8 ton birinci parça, 180.6 ton ikinci parça ve 361.2 ton üçüncü parça kullanılamaz durumda olduğu için atığa gönderilmiştir. Geri kalan iyi kalitede parçalar ise yenileme merkezi aracılığıyla fabrikalara taşınmıştır.

4.2.1. Model 2'ye ait senaryo analizleri

Bu bölümde, probleme ait bulanık parametrelerinin modele ait performans göstergeleri üzerindeki etkilerinin ölçülebilmesi ve karar vericilere yönetimsel bakış açıları kazandırılması için farklı senaryo analizleri yapılmıştır.

4.2.1.1. Farklı α değerlerinin etkisi (Senaryo 1)

Ele alınan ilk senaryoda kabul edilebilir minimum üyelik fonksiyonu seviyesi α 0.0'dan 1.0'a kadar 0.1 aralıklar ile artırılmıştır. Bunun yanında, başlangıçta $w_1 = w_3 = 1/6$, $w_2 = 4/6$ olarak alınan değerlerde kötümser ve iyimser değerlerin katsayıları eşit alınmıştı. Bu değerler iyimser değerlerin baskın olduğu $w_1 = 1/6$, $w_2 = 2/6$, $w_3 = 3/6$ ve kötümser değerlerin baskın olduğu $w_1 = 3/6$, $w_2 = 2/6$, $w_3 = 1/6$ iki farklı şekilde güncellenmiştir. Farklı α seviyeleri her iki durum için de test edilmiştir. Çizelge 4.19 iyimser değerlerin baskın olduğu, Çizelge 4.20'de kötümser değerlerin baskın olduğu durumlara ait sonuçları vermektedir.

Çizelge 4.19. İyimser değerlerin baskın olduğu durum için farklı α değerlerinin etkisi

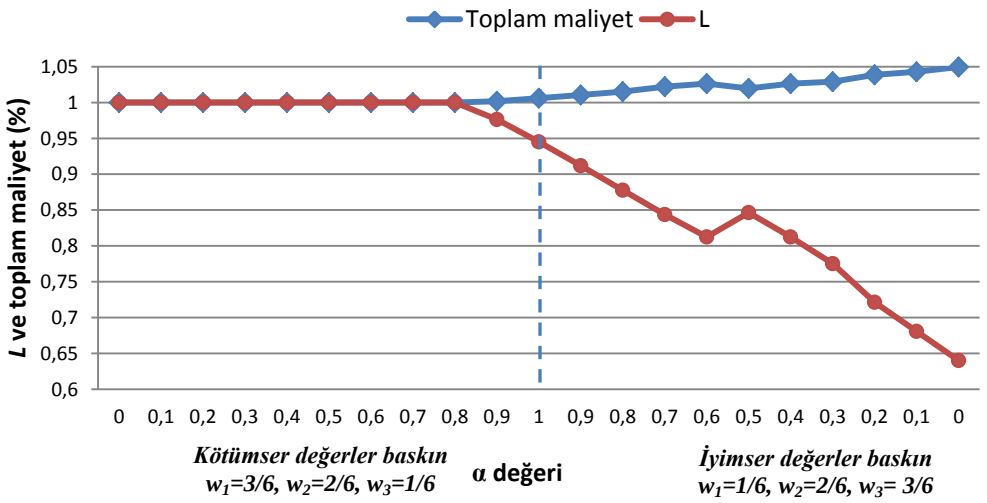
			Performans göstergesi (%)			
α	***L***	**Toplam maliyet ($)**	**Taşıma maliyeti**	**Satın alma maliyeti**	**Yenileme maliyeti**	**İşletme maliyeti**
0.0	0.6401	1445700.20	16.1617	71.7991	3.1162	8.9230
0.1	0.6808	1436655.01	16.2287	72.0145	3.1257	8.6312
0.2	0.7214	1430709.82	16.2612	72.0831	3.1285	8.5272
0.3	0.7751	1417468.96	16.4159	72.3543	3.1873	8.0425
0.4	0.8125	1413741.93	16.4464	72.3046	3.1853	8.0637
0.5	0.8463	1404464.91	16.5672	72.5472	3.1959	7.6898
0.6	0.8125	1413761.78	16.2856	72.5440	3.1067	8.0636
0.7	0.8437	1407777.44	16.3875	72.6180	3.1097	7.8848
0.8	0.8776	1398423.09	16.5107	72.8606	3.1202	7.5085
0.9	0.9119	1392038.34	16.5980	72.9506	3.1241	7.3274
1.0	0.9451	1385764.00	16.6926	73.0355	3.1278	7.1441

İyimser değerlerin baskın olduğu durum ($w_1 = 1/6$, $w_2 = 2/6$, $w_3 = 3/6$) için α değeri arttıkça karar vericinin tatmin seviyesi de artmakta diğer bir ifade ile toplam maliyet azalmaktadır. α değeri arttıkça toplam amaç fonksiyonu içindeki z_1 değeri artarken, z_2 değeri azalmaktadır. Sonuç olarak iyimser değerlerin baskın olduğu durum için α değerinin 0'dan 1'e çıkarılması toplam tatmin seviyesini %47.64 artırırken, toplam maliyeti de %4.14 azaltmaktadır.

Çizelge 4.20. Kötümser değerlerin baskın olduğu durum için farklı α değerlerinin etkisi

			Performans göstergesi (%)			
α	***L***	**Toplam maliyet ($)**	**Taşıma maliyeti**	**Satın alma maliyeti**	**Yenileme maliyeti**	**İşletme maliyeti**
0.0	1.0000	1377414.81	18.4411	71.5696	3.0198	6.9696
0.1	1.0000	1377418.11	18.1840	71.8162	3.0302	6.9696
0.2	1.0000	1377421.41	17.9270	72.0629	3.0406	6.9695
0.3	1.0000	1377431.27	17.5504	72.4668	3.0133	6.9695
0.4	1.0000	1377437.80	17.2923	72.7147	3.0236	6.9695
0.5	1.0000	1377421.46	17.6809	72.2553	3.0943	6.9695
0.6	1.0000	1377416.21	17.4247	72.5010	3.1048	6.9696
0.7	1.0000	1377410.56	17.1699	72.7452	3.1153	6.9696
0.8	1.0000	1377434.91	16.9140	72.9907	3.1257	6.9695
0.9	0.9763	1379769.65	16.7977	73.1137	3.1309	6.9577
1.0	0.9451	1385764.00	16.6926	73.0355	3.1278	7.1441

Çizelge 4.20 kötümser değerlerin baskın olduğu durumda ($w_1 = 3/6$, $w_2 = 2/6$, $w_3 = 1/6$) elde edilen sonuçları vermektedir. Çizelgeye göre α değeri arttıkça karar vericinin tatmin seviyesi düşmüş dolayısıyla toplam maliyet değeri de artmıştır. İyimser değerlerden ziyade kötümser değerlere ağırlık verilmesi bu durumun en temel sebebidir. Toplam maliyet içindeki yüzdelere bakılacak olursa, α değerinin artması satın alma, yenileme ve işletme maliyetlerinin artmasına, taşıma maliyetinin de düşmesine yol açmıştır. Sonuç olarak kötümser değerlerin baskın olduğu durum için α değerinin 0'dan 1'e çıkarılması toplam tatmin seviyesini %5.49 azaltırken, toplam maliyeti de %0.6 artırmaktadır. Şekil 4.6 her iki durum için (iyimser ve kötümser) farklı α değerlerine karşılık gelen toplam maliyet (%) ve tatmin seviyesi (L) değerlerini göstermektedir. Şekil 4.6'ya göre en yüksek toplam maliyet değeri (1445700.20/1385764.00=1.05) iyimser değerlerin baskın olduğu durumda, α=0 iken ve minimum tatmin seviyesinde (0.6401) elde edilmiştir. Aksine, en düşük toplam maliyet değeri de (1385764.00$) kötümser değerlerin baskın olduğu durumda, α=0 iken ve maksimum tatmin seviyesinde (1.00) elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Senaryo 1'e göre elde edilen toplam maliyet ve *L* değerleri

4.2.1.2. Kötümser ve iyimser değerlerin aralıklarının etkisi (Senaryo 2)

Başlangıç çözümünde bulanık parametrelerin en kötümser ve en iyimser değerleri en olası değerlerinin %10'u olarak alınmıştı. Bu senaryo analizinde %10 değeri %0 ve %100 arasında değiştirilmiştir. Bu analiz hem kötümser değerlerin hem de iyimser değerlerin baskın olduğu durumlara uygulanmıştır. Çizelge 4.21 iyimser

değerlerin baskın olduğu, Çizelge 4.22 de kötümser değerlerin baskın olduğu durumda elde edilen sonuçları vermektedir.

Çizelge 4.21. İyimser değerlerin baskın olduğu durumda Senaryo 2'ye göre sonuçlar

			Performans göstergesi (%)			
Aralık	***L***	**Toplam maliyet ($)**	**Taşıma maliyeti**	**Satın alma maliyeti**	**Yenileme maliyeti**	**İşletme maliyeti**
0%	0.9764	1383994.00	16.8028	73.1289	3.1318	6.9364
10%	0.9375	1400860.91	16.7840	72.7338	3.2010	7.2812
20%	0.8646	1427330.19	16.5540	72.7232	3.1563	7.5666
30%	0.8249	1441418.79	16.6190	72.4495	3.2308	7.7007
40%	0.7541	1469238.12	16.4732	72.2075	3.2199	8.0994
50%	0.7083	1487021.87	16.5176	71.9021	3.2415	8.3388
60%	0.6343	1512793.58	16.4695	71.7679	3.2353	8.5273
70%	0.5957	1528576.85	16.5612	71.3736	3.2989	8.7663
80%	0.5149	1556183.07	16.4929	71.3284	3.2466	8.9321
90%	0.4783	1561394.42	16.6915	71.3977	3.3287	8.5821
100%	0.4043	1582127.81	16.7117	71.4860	3.3327	8.4696

Çizelge 4.21'e göre iyimser değer baskın olduğunda kötümser ve iyimser değerlerin aralıkları artırılırsa toplam maliyet artarken, karar verici tatmin seviyesi düşmektedir. Aralık arttıkça taşıma ve satın alma maliyetinin toplam maliyet içindeki oranı azalırken, yenileme ve işletme maliyetinin oranı ise artmaktadır. Sonuç olarak aralık değerinin %0'dan %100'e çıkması, toplam maliyetin %14.31 artmasına, tatmin seviyesinin ise %58.59 azalmasına yol açmıştır.

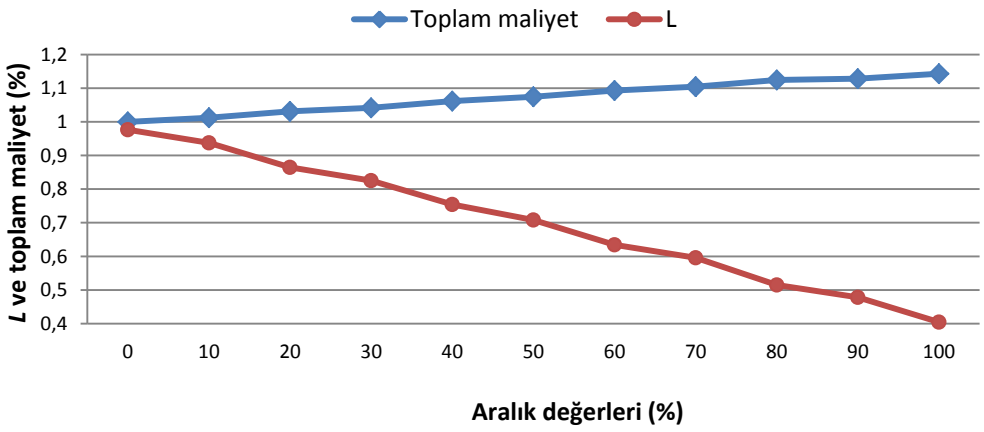
Çizelge 4.22. Kötümser değerlerin baskın olduğu durumda Senaryo 2'ye göre sonuçlar

			Performans göstergesi (%)			
Aralık	***L***	**Toplam maliyet ($)**	**Taşıma maliyeti**	**Satın alma maliyeti**	**Yenileme maliyeti**	**İşletme maliyeti**
0%	0.3496	1425384.00	15.8512	71.0054	3.0409	10.1025
10%	0.4258	1404061.46	15.8241	70.8844	3.0356	10.2560
20%	0.4774	1384594.81	15.7584	71.1984	3.0041	10.0390
30%	0.5541	1361117.53	15.7540	71.1775	3.0032	10.0653
40%	0.6025	1344641.54	15.6384	71.4718	2.9243	9.9655
50%	0.6334	1311886.42	15.7704	71.7974	2.9802	9.4520
60%	0.7323	1293178.62	15.6954	72.2004	2.9020	9.2021
70%	0.8077	1267053.52	15.7720	72.3237	2.9070	8.9973
80%	0.8596	1246507.25	15.8001	72.6711	2.8646	8.6642
90%	0.9325	1220080.45	15.9522	72.8173	2.8703	8.3601
100%	0.9797	1200859.25	16.0027	73.2167	2.7863	7.9943

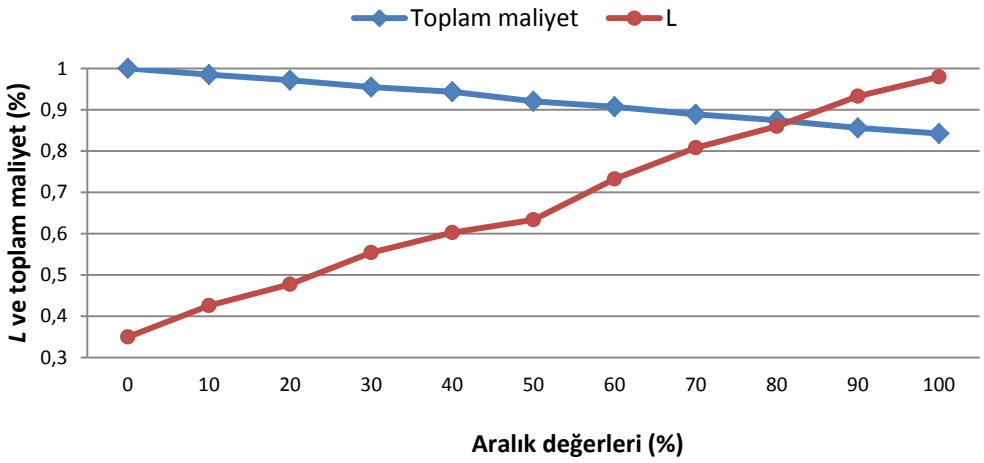
Çizelge 4.22'ye göre kötümser değer baskın olduğunda kötümser ve iyimser değerlerin aralıkları artırılırsa toplam maliyet azalırken, karar verici tatmin seviyesi artmaktadır. Aralık arttıkça taşıma ve satın alma maliyetinin toplam maliyet içindeki oranı artarken, yenileme ve işletme maliyetinin oranı ise azalmaktadır. Sonuç olarak aralık değerinin %0'dan %100'e çıkması, toplam maliyetin %15.75 azalmasına, tatmin seviyesinin ise %180 artmasına yol açmıştır.

Şekil 4.7 ve 4.8 sırasıyla iyimser ve kötümser değerlerin baskın olduğu durumlardaki Senaryo 2'ye göre elde edilen amaç fonksiyonu ve tatmin seviyesi

değerlerini göstermektedir. Şekil 4.7'ye göre maksimum maliyet (1582127.81/1383994.00=1.14) iyimser değerin baskın olduğu durumda ve minimum tatmin seviyesinde (0.4043) elde edilmiş iken; Şekil 4.8' göre minimum maliyet (1200859.25/1425384.00=0.84) kötümser değerin baskın olduğu durumda ve maksimum tatmin seviyesinde (0.9797) elde edilmiştir.



Şekil 4.7. İyimser değerlerin baskın olduğu durumda Senaryo 2'ye göre elde edilen maliyet ve *L* değerleri



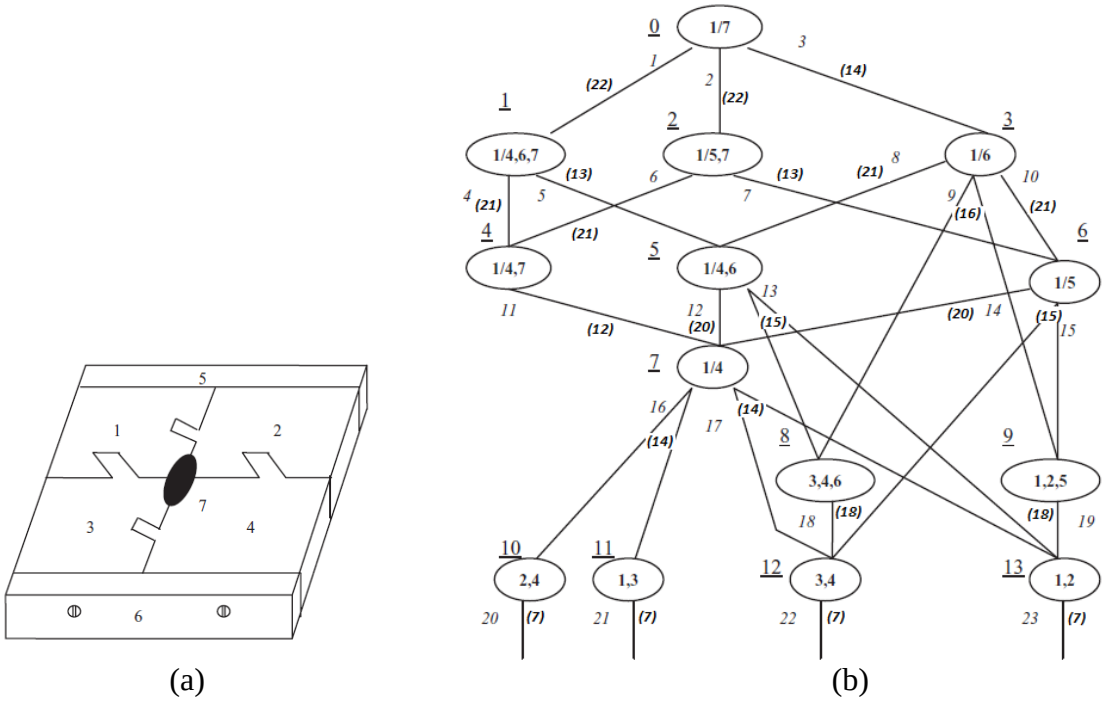
Şekil 4.8. Kötümser değerlerin baskın olduğu durumda Senaryo 2'ye göre elde edilen maliyet ve *L* değerleri

4.3. Model 3'e Ait Sayısal Örnek

Bu bölümde, Bölüm 3.2.2.1'de verilen Model 3'e ait sayısal bir örnek verilmiştir. Söz konusu TTZ ağı 4 müşteri, 3 toplama merkezi, 2 demontaj merkezi, 4 fabrika ve 1 adet atık merkezinden meydana gelmektedir (Şekil 3.24). Önerilen ağda tersine akış (i) kullanılmış ürünlerin toplanması, (ii) toplanan ürünlerin demonte

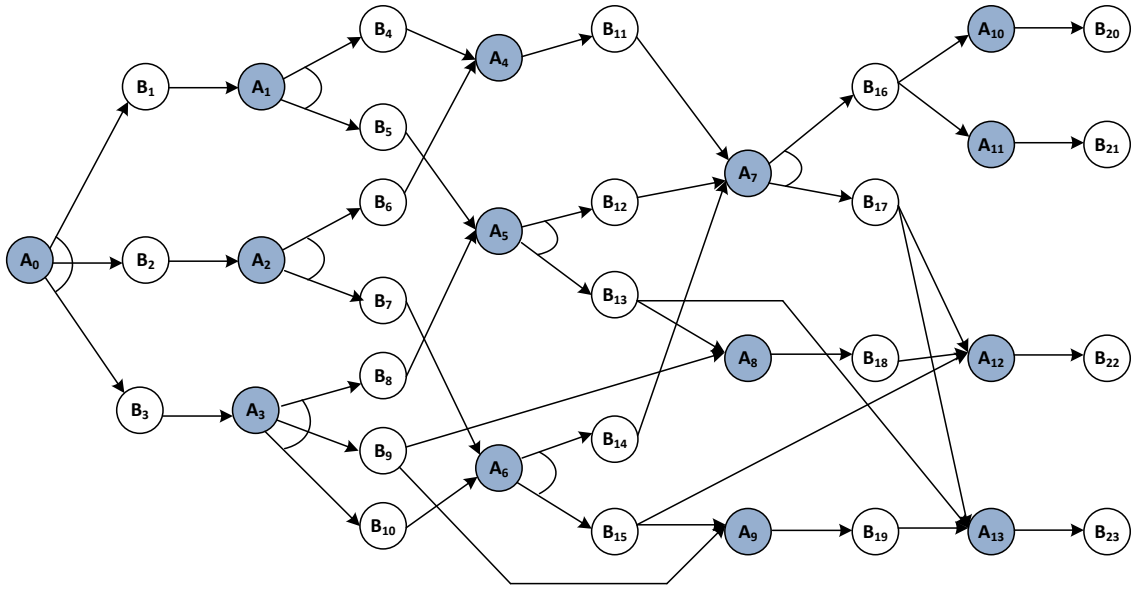
edilmesi ve (iii) kullanılamaz durumda olan ürün ve parçaların bertaraf edilmesinden oluşmaktadır. Müşterilerden belirli bir oranda (η_c) kullanılmış ürünün toplanması ile akış başlamaktadır. Toplanan ürünün durumu demonte edilmeye müsait değil veya kullanılamaz durumda ise atığa (1-τ_l), aksi halde demontaj merkezine (τ_l) gönderilmektedir. Demontaj merkezine gönderilen ürünler demontaj hatlarında belirsiz çevrim zamanı altında demonte edilirken, β_d oranındaki parça miktarı tekrardan kullanılmak üzere fabrikalara, geri kalan kısım ise atığa gönderilmektedir. Sonuç olarak önerilen TTZ ağında amaç tüm ağdaki taşıma maliyetlerini minimize ederken, aynı zamanda demontaj merkezlerinde açılacak olan istasyon sayısını da minimize etmektir.

Model 3'e ait matematiksel gösterimde de verildiği gibi demontaj merkezlerindeki çevrim zamanı önceden bilinmemekte, dolayısıyla bir karar değişkenidir. Ağdaki ürün 7 parçadan oluşmaktadır ve söz konusu ürüne ait VE/VEYA diyagramı Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.9, aynı zamanda ürüne ait 23 görevden (italik olanlar) ve 13 yapay düğümden (altı çizili olanlar) oluşan öncelik ilişkilerini ve görev zamanlarını da (parantezli değerler) göstermektedir. Düğümlerin içindeki rakamlar ilgili parça numarası iken, demontaj işlemi sonucunda kalan alt ürünü de temsil etmektedir. Örneğin 2 numaralı görev sonucu 6 numaralı parça sökülmüş ve ortaya 1'den 5'e kadar olan parçalar (1/5) ile 7 numaralı parça çıkmıştır (Koç ve ark. 2009).



Şekil 4.9. Ürün (a) ve ürüne ait VE/VEYA diyagramı (b) (Koç ve ark. 2009)

Şekil 4.9'da verilen VE/VE diyagramının Koç ve ark. (2009) tarafından güncellenen dönüştürülmüş VE/VEYA diyagramı (DVVD) Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Ürüne ait dönüştürülmüş VE/VEYA diyagramı (Koç ve ark. 2009)

Birim taşıma maliyeti (C_t) 5.23 cent/ton-km olarak alınmıştır (Forkenbrock, 2001). Demontaj hatlarında bir adet istasyon açma maliyeti (O) 100$ iken, çalışma süresi W_{time} 200000 zaman birimidir. Açılabilir maksimum istasyon sayısı (J) 6'dır. Örneğe ilişkin diğer parametreler aşağıda gibi belirlenmiştir. $\eta_{1,2,3,4}$= %60, %30, %50 ve %40; $\tau_{1,2,3}$= %80, %70, ve %90; $\beta_{1,2}$= %70 ve %60. Çizelge 4.23-4.25 sırasıyla tesisler arası mesafeleri, kapasiteleri ve talepleri vermektedir.

Çizelge 4.23. Tesisler arası mesafeler (km)

	Toplama merkezleri			**Fabrikalar**				**Atık**
	1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**4**	
Müşteri 1	280	350	300	-	-	-	-	-
Müşteri 2	250	200	260	-	-	-	-	-
Müşteri 3	310	330	290	-	-	-	-	-
Müşteri 4	270	205	320	-	-	-	-	-
Demontaj merkezi 1	140	110	230	420	350	370	310	100
Demontaj merkezi 2	180	170	150	290	345	190	230	130
Atık	50	80	75	-	-	-	-	-

Çizelge 4.24. Müşterilerde bulunan ürün miktarları ve toplama merkezleri kapasiteleri

Müşteriler				**Toplama merkezleri**		
1	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**
2300	2100	2200	2400	2200	2500	2100

Çizelge 4.25. Demontaj merkezleri ve fabrikalara ait kapasiteler

							Parça
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Demontaj merkezi 1	1700	2100	1800	2300	1900	2300	2200
Demontaj merkezi 2	1700	1800	1900	1600	1700	1800	1900
Fabrika 1	360	400	300	340	300	370	400
Fabrika 2	300	150	400	360	300	380	300
Fabrika 3	200	400	340	300	300	270	360
Fabrika 4	400	300	200	480	300	250	350

Yukarıda verilen sayısal örnek geliştirilen matematiksel modele (3.70-3.87) uygulanmış ve Pentium IV, 1.33 GHz (4GB RAM) bilgisayarda GAMS/BARON çözücüsünde 1637 saniyede çözülmüştür. Elde edilen optimal değerler Çizelge 4.26 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.26. Başlangıç çözüme ait optimal değerler

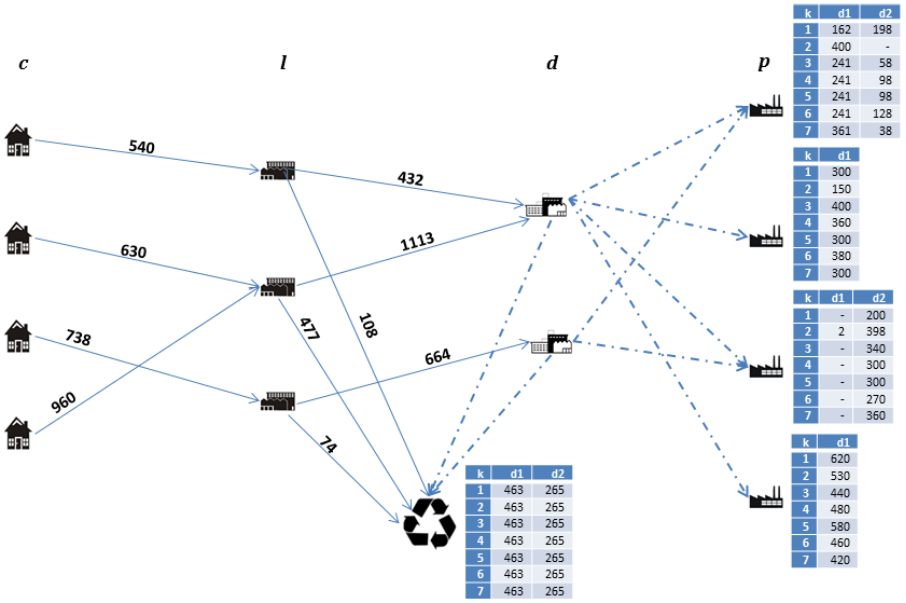
Değişken	**Değer**	**Değişken**	**Değer**	**Değişken**	**Değer**	**Değişken**	**Değer**	**Değişken**	**Değer**
Q_{11}	540	W_{123}	400	W_{231}	200	V_{26}	265	F_{51}	1
Q_{22}	630	W_{124}	360	W_{232}	398	V_{27}	265	Z_{22}	1
Q_{33}	738	W_{125}	300	W_{233}	340	X_{212}	1	Z_{31}	1
Q_{42}	960	W_{126}	380	W_{234}	300	X_{311}	1	Z_{62}	1
Y_{11}	432	W_{127}	300	W_{235}	300	X_{612}	1	Z_{91}	1
Y_{21}	1113	W_{132}	2	W_{236}	270	X_{921}	1	Z_{112}	1
Y_{32}	664	W_{141}	620	W_{237}	360	X_{1122}	1	Z_{162}	1
N_1	108	W_{142}	530	V_{11}	463	X_{1622}	1	Z_{181}	1
N_2	477	W_{143}	440	V_{12}	463	X_{1831}	1	Z_{191}	1
N_3	74	W_{144}	480	V_{13}	463	X_{1941}	1	Z_{202}	1
W_{111}	162	W_{145}	580	V_{14}	463	X_{2022}	1	Z_{212}	1
W_{112}	400	W_{146}	460	V_{14}	463	X_{2122}	1	Z_{221}	1
W_{113}	241	W_{147}	420	V_{16}	463	X_{2251}	1	Z_{231}	1
W_{114}	241	W_{211}	198	V_{17}	463	F_{11}	1	**OBJ1**	9269.04$
W_{115}	241	W_{213}	58	V_{21}	265	F_{12}	1	**OBJ2**	700.00$
W_{116}	241	W_{214}	98	V_{22}	265	F_{21}	1	**Toplam**	9969.04$
W_{117}	361	W_{215}	98	V_{23}	265	F_{22}	1		
W_{121}	300	W_{216}	128	V_{24}	265	F_{31}	1		
W_{122}	150	W_{217}	38	V_{24}	265	F_{41}	1		

GAMS/BARON çözücüsünden elde edilen değerlere göre, fabrikaların tüm parça talepleri karşılanmıştır. Toplam taşıma maliyeti 9269.04$ iken, demontaj merkezlerinde açılan 7 istasyondan dolayı toplam istasyon açma maliyeti de 700$'dır. Toplamda 2868 adet kullanılmış ürün müşterilerden toplanmış ve toplama merkezlerine gönderilmiştir. Toplama merkezlerindeki ön incelemeden sonra 659 adet ürün kullanılamaz olduğundan atığa, geri kalan kısım ise demonte edilmek için demontaj

merkezlerine taşınmıştır. Tüm bu dağıtım ağı optimize edilirken, eş zamanlı olarak demontaj merkezlerindeki demontaj hatları da dengelenmiştir. Demontaj sonrası açığa çıkan 5096 adet parça yeniden kullanmaya uygun olmadığı için atığa, geri kalan kısım ise fabrika talebini karşılamak için fabrikalara gönderilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, her bir demontaj merkezindeki çevrim zamanları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$CT_1 = \frac{W_{time}}{\sum_p^P \sum_k^K W_{1pk} + \sum_k^K V_{1k}} = \frac{200000}{10850} = 18.43 \text{ zaman birimi (birinci demontaj merkezi)}$$

$$CT_2 = \frac{W_{time}}{\sum_p^P \sum_k^K W_{2pk} + \sum_k^K V_{2k}} = \frac{200000}{4641} = 43.09 \text{ zaman birimi (ikinci demontaj merkezi)}$$

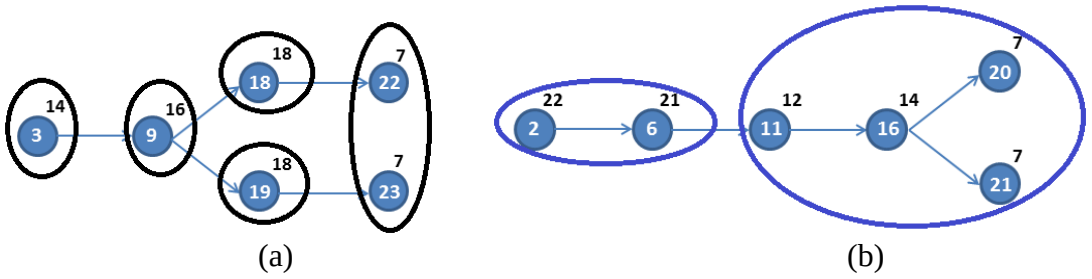


Şekil 4.11. Model 3'e ait optimal dağıtım ağı

Şekil 4.11'e göre birinci demontaj merkezinden fabrikalara toplamda 10850 adet parça taşınmıştır. Bu parçaların elde edilmesi için 18.43 zaman biriminden oluşan çevrim zamanı altında toplam 5 iş istasyonu yeterli olmuştur. Birinci demontaj merkezindeki optimal hat dengesi Çizelge 4.27 ve Şekil 4.12a'da verilmiştir.

Çizelge 4.27. Birinci demontaj merkezindeki optimal hat dengesi

İş istasyonu	Atanan görevler	İstasyon zamanı	Boş zaman
1	3	14	4.43
2	9	16	2.43
3	18	18	0.43
4	19	18	0.43
5	22-23	14	4.43
Toplam		80	12.15



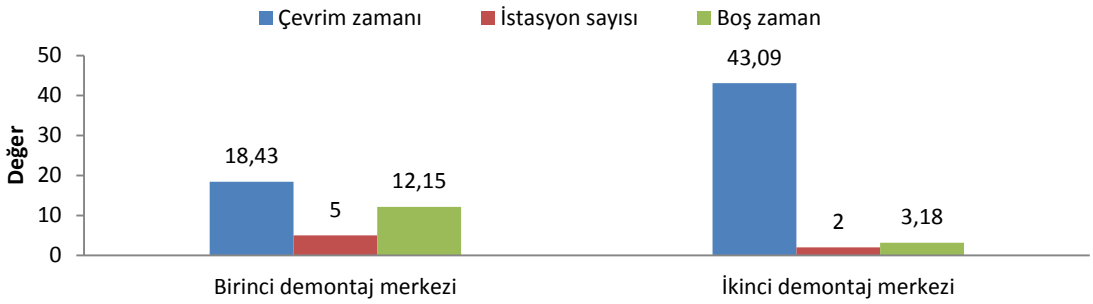
Şekil 4.12. Dengelenmiş öncelik diyagramları (a) birinci demontaj merkezi, (b) ikinci demontaj merkezi

İkinci demontaj merkezinden ise toplamda 4641 adet parça fabrikalara taşınmıştır. Birinci demontaj merkezine göre daha az sayıda parça çıkışı olduğu için çevrim zamanı yükselmiş (43.09 zaman birimi) ve 2 iş istasyonu ile hat dengelenmiştir. İkinci demontaj merkezine ait optimal hat dengesi Çizelge 4.28 ve Şekil 4.12b'de verilmiştir.

Çizelge 4.28. İkinci demontaj merkezindeki optimal hat dengesi

İş istasyonu	Atanan görevler	İstasyon zamanı	Boş zaman
1	2-6	43	0.09
2	11-16-20-21	40	3.09
Toplam		83	3.18

Şekil 4.13 her bir demontaj merkezine ait bulunan çevrim zamanlarını, açılan toplam istasyon sayılarını ve hattaki boş zamanları göstermektedir.



Şekil 4.13. Demontaj merkezlerindeki çevrim zamanı, istasyon sayıları ve boş zamanlar

Şekil 4.13'e göre maksimum çevrim zamanı (43.09) ve minimum iş istasyonu sayısı (2) ikinci demontaj merkezinde gerçekleşmiştir. Yüksek çevrim zamanına rağmen ikinci demontaj merkezindeki hat (3.18 boş zaman) birinci demontaj merkezine (12.15 boş zaman) göre daha iyi dengelenmiştir. Şekil 4.9 ve 4.10'da verilen ürüne ait toplam 17 farklı demontaj ağacı bulunmaktadır (Koç ve ark. 2009) ve bu örnekte bunlardan ikisine ulaşılmıştır. Yukarıdaki sayısal örnek, geliştirilen modelin hem TTZ ağındaki dağıtım ağını hem de demontaj merkezlerindeki demontaj hatlarını eş zamanlı olarak başarılı bir şekilde optimize ettiğini göstermiştir.

4.3.1. Model 3'e ait senaryo analizleri

Bu bölümde Model 3'ün test edildiği sayısal örnek üzerinden farklı senaryo analizleri yapılmıştır. Model açıklamasında da belirtildiği gibi iki problemin (TTZ ve DHD) bağlantı noktası bir karar değişkeni olan çevrim zamanıdır (CT_d). Bu karar değişkeninin etkilendiği iki temel parametre ise fabrika talebi ve çalışma zamanıdır. Bundan dolayı gerek talep değerlerinin gerekse çalışma zamanlarının değiştirilmesi ile karar vericilere birtakım yönetimsel bakış açıları kazandırılmaya çalışılmıştır.

4.3.1.1. Talep değişimlerinin etkisi (Senaryo 1)

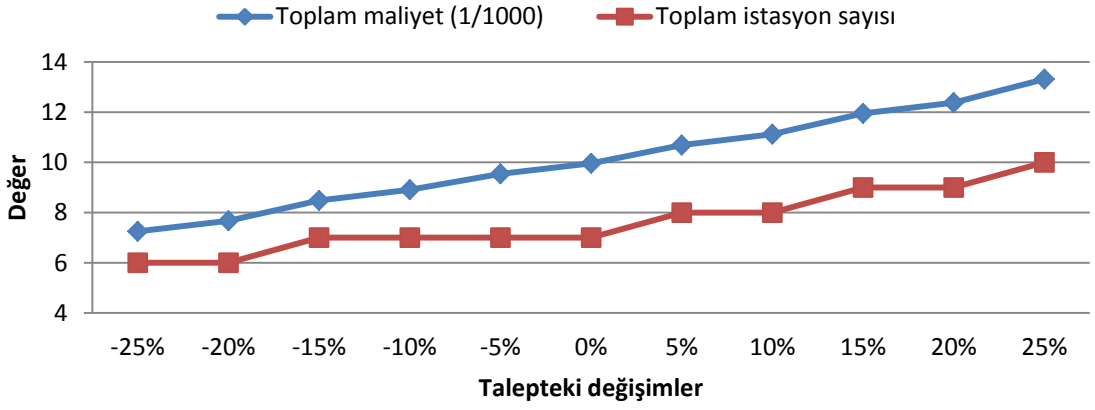
Yapılan ilk senaryo analizinin amacı talep değerlerinin azaltılması ve artırılmasının toplam maliyet, taşıma maliyeti, toplam istasyon maliyeti, atanan demontaj görevleri, CPU süresi ve çevrim zamanı gibi performans göstergeleri üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Çizelge 4.29 ve Şekil 4.14 elde edilen sonuç değerlerini göstermektedir. Görüldüğü gibi talep değerleri üzerindeki bir artış aynı

zamanda toplam maliyet, taşıma ve istasyon açma maliyeti üzerinde de bir artışa yol açmıştır. Talep değerleri ile birlikte ağda dolaşan ürün sayısının ve demonte edilen kullanılmış ürün sayısının artması bu durumun en temel sebebidir. Aynı durum açılan istasyon sayılarında da gözlemlenmiştir. Çalışma zamanı (W_{time}) sabitken talep değerlerinin artması çevrim zamanlarının düşmesine, diğer bir ifade ile istasyon sayısının artmasına neden olmuştur. Şekil 4.14'e göre açılan istasyon sayısı 6 ve 10 arasında değişmektedir. Eğer karar verici %25 oranında bir talep düşüşü ile karşılaşırsa, gerekli olan toplam istasyon sayısı 7'den 6'ya düşmekte, aksi durumda (%25'lik talep artışı durumunda) ise fazladan 3 adet iş istasyonuna ihtiyaç duymaktadır. Toplam maliyet açısında ise talepteki %25'lik bir düşüş toplam maliyetin %27 oranında azalmasına, talepteki %25'lik bir artış toplam maliyette %33 oranında bir artışa neden olmaktadır. Farklı talep değerleri altındaki çözümler 1 saatin altında elde edilmiştir. Modelin doğrusal olmayan yapısından dolayı CPU süreleri değişkenlik göstermiştir.

Çizelge 4.29. Senaryo 1'in toplam maliyet, istasyon sayısı ve CPU süresine etkisi

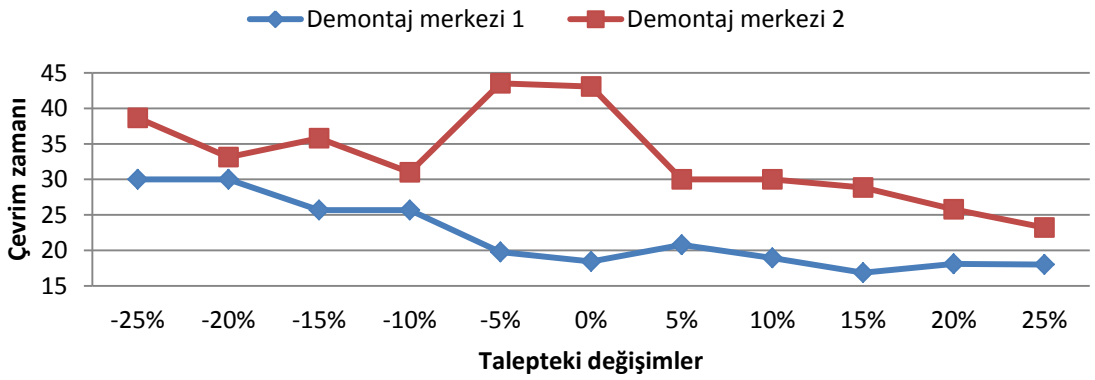
	Talep değişimleri				
	-25%	**-20%**	**-15%**	**-10%**	**-5%**
Toplam maliyet ($)	7250.29	7678.54	8481.90	8909.69	9540.51
OBJ1 ($)	6650.29	7078.54	7781.90	8209.69	8840.51
OBJ2 ($)	600.00	600.00	700.00	700.00	700.00
Toplam istasyon sayısı[a]	3+3= 6	3+3= 6	4+3= 7	4+3= 7	5+2= 7
CPU (sn)	3641	272	3643	1754	3607
	Talep değişimleri				
	+5%	**+10%**	**+15%**	**+20%**	**+25%**
Toplam maliyet ($)	10694.85	11123.41	11951.72	12385.99	13320.92
OBJ1 ($)	9894.85	10323.41	11051.72	11485.99	12320.92
OBJ2 ($)	800.00	800.00	900.00	900.00	1000.00
Toplam istasyon sayısı[a]	5+3= 8	5+3= 8	5+4= 9	5+4= 9	5+5= 10
CPU (sn)	2437	271	1956	378	1431

[a] demontaj merkezi 1 + demontaj merkezi 2



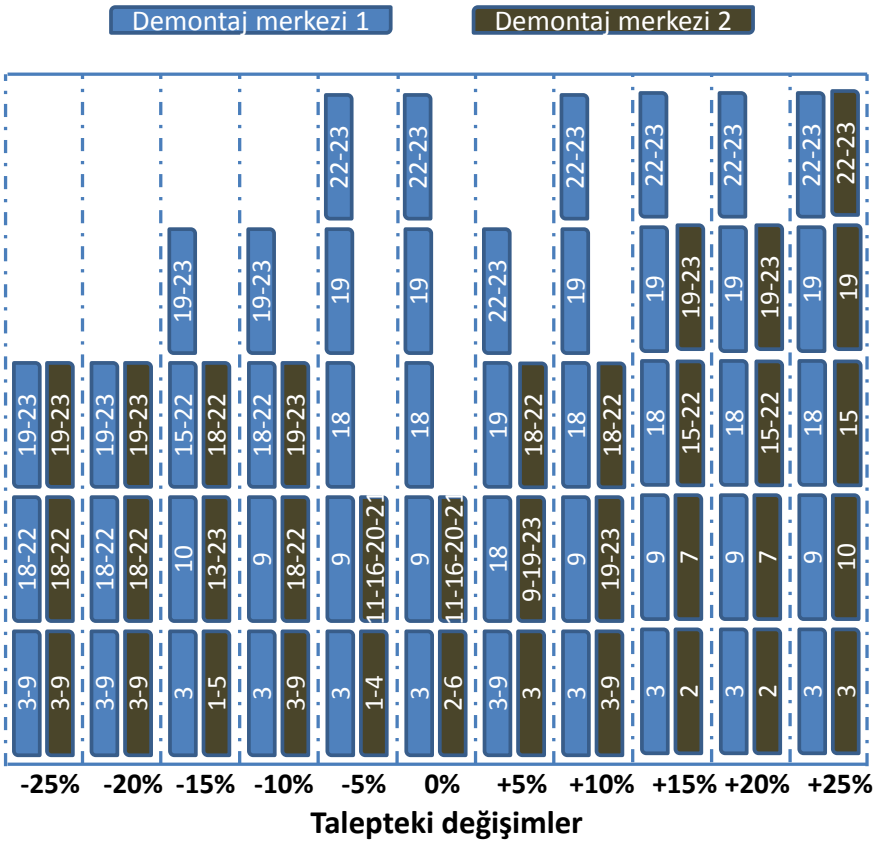
Şekil 4.14. Talep değişimlerinin toplam maliyet ve istasyon sayısına etkisi

Farklı talep değerleri karşısında atanan demontaj görevleri, açılan istasyonlar ve çevrim zamanları Şekil 4.15 ve 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Talep değişimlerinin çevrim zamanı üzerine etkisi

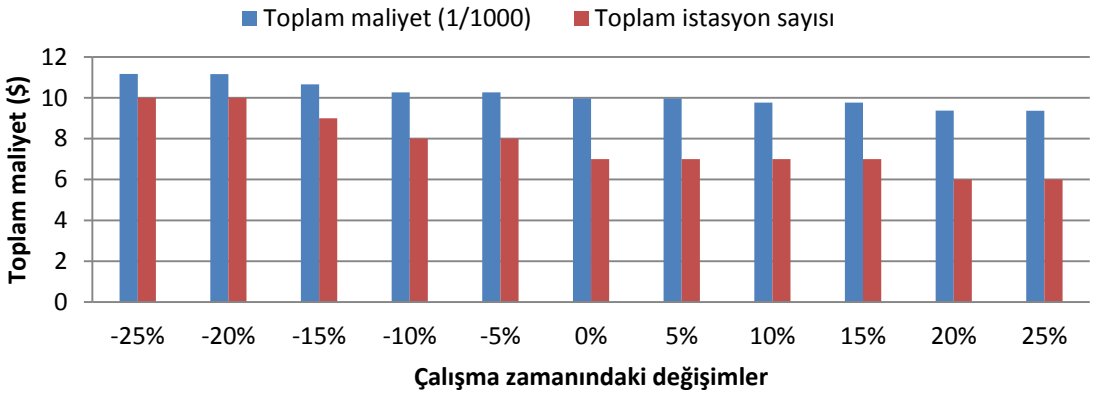
Şekil 4.15'e göre maksimum çevrim zamanı (43.54) ikinci demontaj merkezinde, talebin %5 az olduğu durumda gözlemlenmişken; minimum çevrim zamanı (16.84) birinci demontaj merkezinde talebin %15 fazla olduğu durumda elde edilmiştir. Şekil 4.15'e göre birinci demontaj merkezinde, ikinci demontaj merkezine göre çok daha fazla ürün demonte edildiği için birinci demontaj merkezinde daha fazla istasyon açılmıştır. Başlangıç çözümde ele alınan ürünün 17 farklı demonte edilme yolu olduğundan bahsedilmişti ve bunlardan yalnızca 2 tanesine ulaşılmıştı. Şekil 4.16'ya göre ise farklı talep değişimlerinde bu rakamın 6'ya çıktığı gözükmektedir. En sık rastlanan görev sırası ise 3-9-18-22-19-23'tür.



Şekil 4.16. Talep değişimlerinin atanan görevler ve istasyon sayıları üzerine etkisi

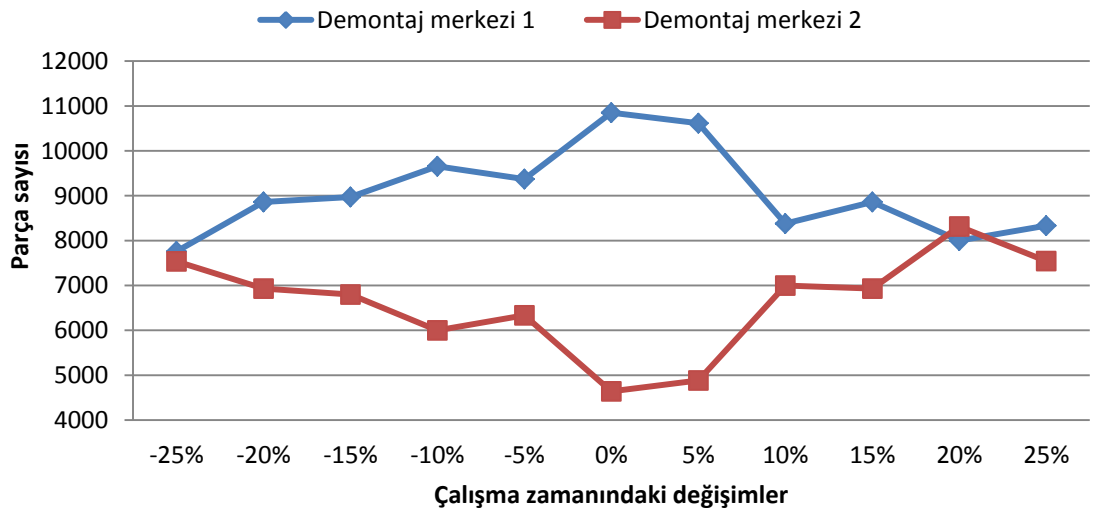
4.3.1.2. Çalışma zamanının etkisi (Senaryo 2)

Şekil 4.17 mevcut çalışma zamanının -%25 ve +%25 arasında %5 aralığıyla değiştiği varsayımında elde edilen toplam maliyet ve açılan toplam istasyon sayılarını vermektedir. Buna göre, çalışma zamanının artması toplam maliyet değerini düşürürken aynı zamanda gerekli iş istasyonu sayısını da azaltmaktadır. Örneğin, çalışma zamanını %25 azaltırsak, karar verici %12 daha fazla maliyetle karşılaşırken 3 adet daha istasyona ihtiyaç duymaktadır. Aksi durumda yani çalışma zamanını %25 artırırsak toplam maliyet %6 azalırken istasyon sayısı 1 farkla 6'ya düşmektedir. Bundan dolayı karar vericinin toplam maliyeti düşürmek için çalışma zamanını artırması önerilebilir.



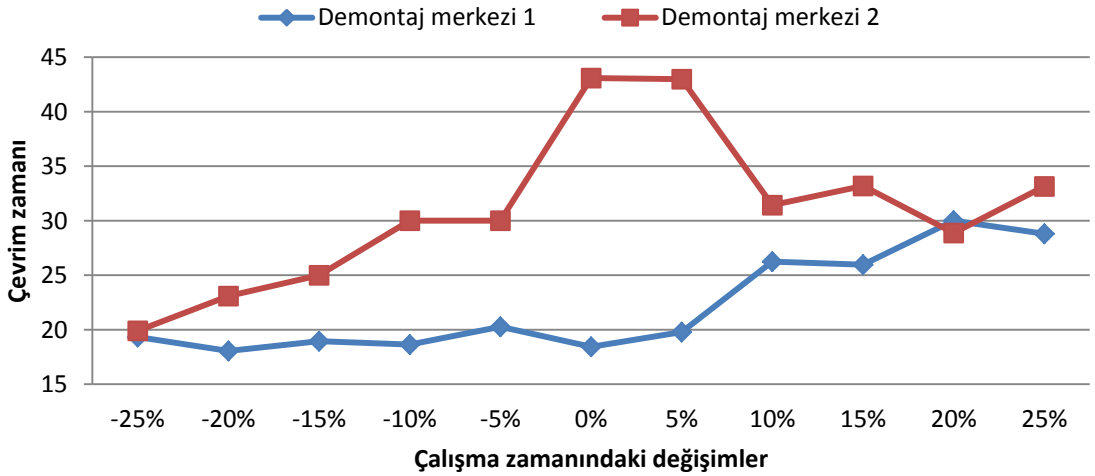
Şekil 4.17. Çalışma zamanı değişimlerinin toplam maliyet ve açılan istasyon sayılarına etkisi

Şekil 4.18 farklı çalışma zamanları altında her bir demontaj merkezindeki demontaj sonrasında açığa çıkan parça miktarlarını göstermektedir. Şekil 4.18'e göre çalışma zamanının artması başlangıç çözümüne kadar birinci demontaj merkezinde parça sayısının artmasına sebep olurken ikinci demontaj merkezinde parça sayısının azalmasına sebep olmaktadır. Başlangıç çözümünde sonra ise tam tersi bir durum gerçekleşmiştir. Mevcut çalışma süresinde demontaj merkezleri ile fabrikalar arasında dengesiz bir dağıtım (4644 ve 10852 arasında) varken, çalışma zamanındaki %25'lik bir düşüş veya artış daha dengeli bir dağıtıma (7736 ve 7760) yol açmıştır. Dolayısıyla çalışma zamanının artırılması veya azaltılması ile daha dengeli bir dağıtım ağına sahip olunabilir.



Şekil 4.18. Farklı çalışma zamanları altında açığa çıkan parça sayısı

Şekil 4.19 farklı çalışma zamanları sonucunda elde edilen demontaj merkezlerindeki çevrim zamanlarını göstermektedir. Şekil 4.19'a göre çalışma zamanı arttıkça her iki demontaj merkezindeki çevrim zamanları da artmıştır. Birinci demontaj merkezinde daha fazla ürün demonte edildiği için ilgili demontaj merkezinde çevrim zamanı düşük, ikinci demontaj merkezinde ise yüksektir.



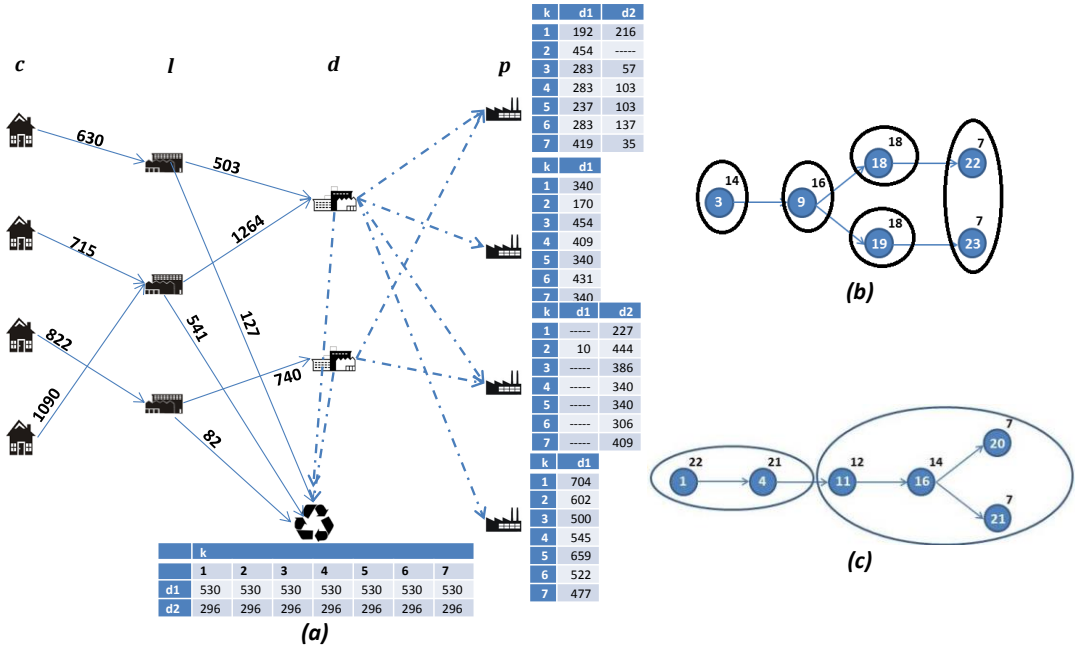
Şekil 4.19. Çalışma zamanındaki değişimlerin çevrim zamanı üzerine etkisi

4.4. Model 4'e Ait Sayısal Örnek

Bu bölümde, geliştirilen dördüncü modelin test edilmesi için sayısal bir örnek verilmiştir. Önerilen dördüncü model üçüncü modelin bulanıklık altında tekrardan modellenmesiydi. Bundan dolayı bir önceki örnekte yer verilen aynı ağ yapısı ve veriler bu modelin test edilmesi için de kullanılmıştır. Sadece bulanık veriler (amaç fonksiyonu, talep, kapasite ve çalışma zamanı) farklı alınmıştır. Karar verici toplam amaç fonksiyonu için %25'lik tolerans payı ile 9000$'lık hedef belirlemiştir. Çalışma zamanı 200000 zaman biriminden oluşmakta ve yine %25'lik bir artışa izin verilmiştir. Tesis kapasiteleri ve fabrika talepleri deterministik değerlerinden (Çizelge 4.24 ve Çizelge 4.25) %25'lik bir tolerans ile bulanıklaştırılmıştır. Kullanılan diğer kesin parametreler bir önceki sayısal örnekte verilmiştir.

Önerilen 4 farklı model (maks-min operatörlü, min ve maks operatörlerinin konveks kombinasyonu, bulanık-ve operatörlü ve Werners (1988) yaklaşımlı bulanık model) yukarıda verilen sayısal örnek üzerinden test edilmiştir. Bir önceki örnekte olduğu gibi Pentium IV, 1.33 GHz (4GB RAM) bilgisayarda GAMS/BARON çözücüsü

ile sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.20-4.23 sırasıyla elde edilen optimal sonuçları hem dağıtım ağı hem de hat dengelemesi şeklinde göstermektedir.



k	d1	d2
1	192	216
2	454	-----
3	283	57
4	283	103
5	237	103
6	283	137
7	419	35

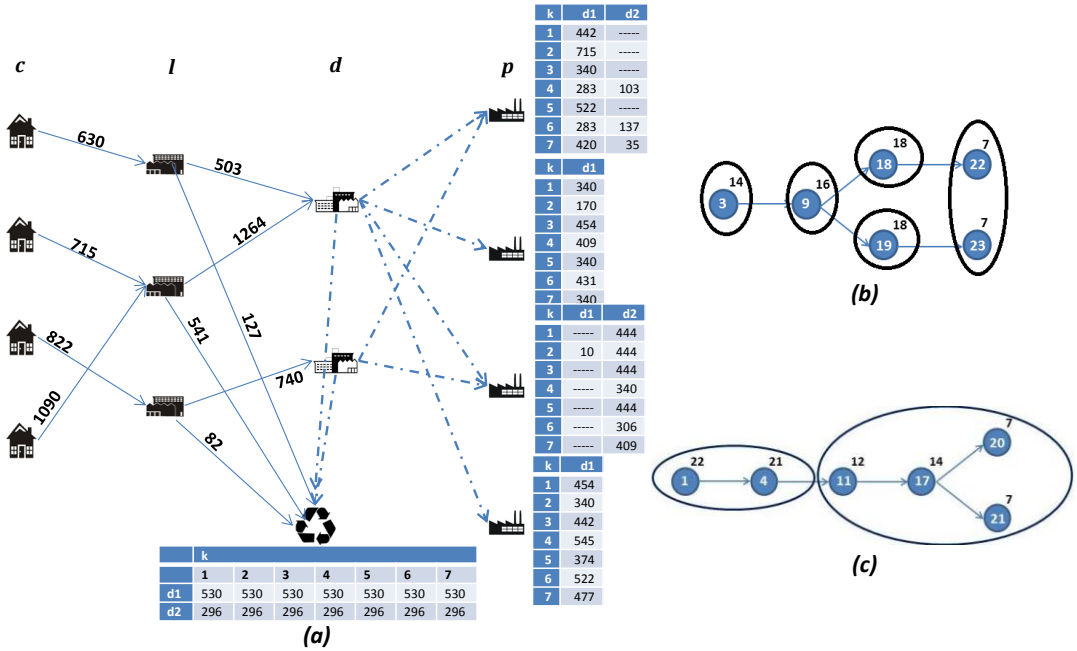
k	d1
1	340
2	170
3	454
4	409
5	340
6	431
7	340

k	d1	d2
1	-----	227
2	10	444
3	-----	386
4	-----	340
5	-----	340
6	-----	306
7	-----	409

k	d1
1	704
2	602
3	500
4	545
5	659
6	522
7	477

	k						
	1	2	3	4	5	6	7
d1	530	530	530	530	530	530	530
d2	296	296	296	296	296	296	296

Şekil 4.20. Maks-min operatörlü modele göre optimal dağıtım ağı (a), birinci demontaj merkezindeki dengelenmiş hat (b), ikinci demontaj merkezindeki dengelenmiş hat (c)



k	d1	d2
1	442	-----
2	715	-----
3	340	-----
4	283	103
5	522	-----
6	283	137
7	420	35

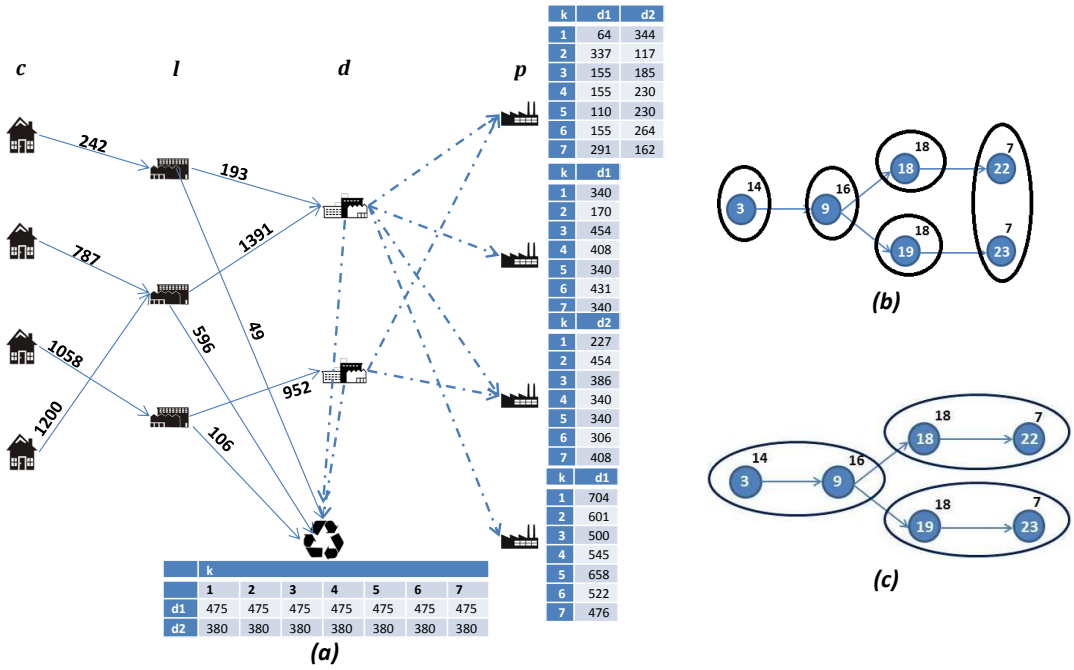
k	d1
1	340
2	170
3	454
4	409
5	340
6	431
7	340

k	d1	d2
1	-----	444
2	10	444
3	-----	444
4	-----	340
5	-----	444
6	-----	306
7	-----	409

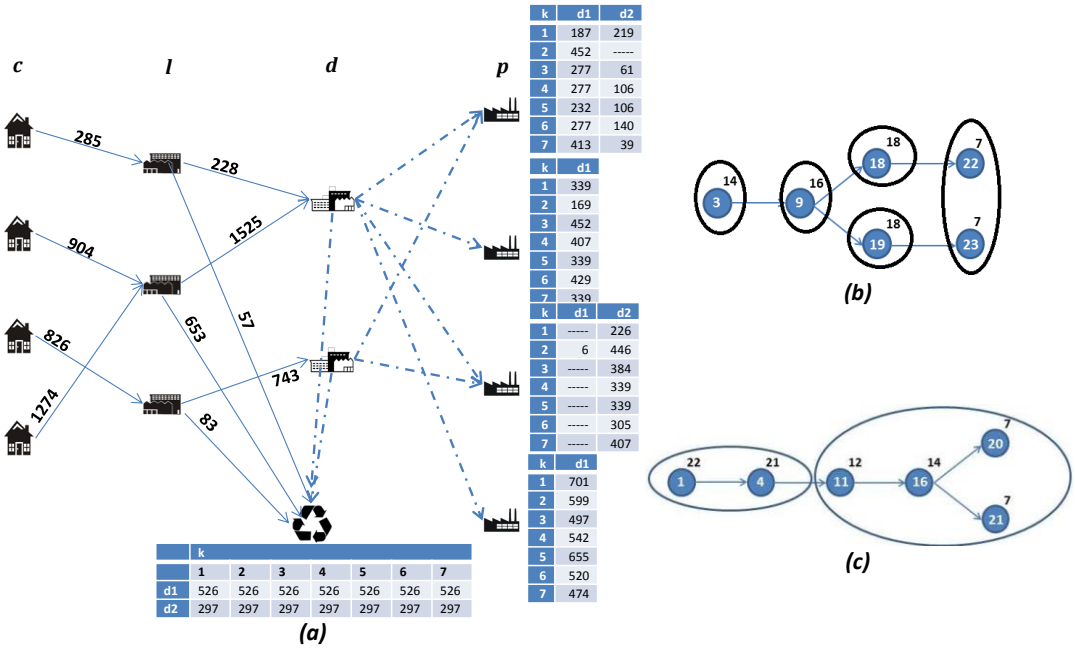
k	d1
1	454
2	340
3	442
4	545
5	374
6	522
7	477

	k						
	1	2	3	4	5	6	7
d1	530	530	530	530	530	530	530
d2	296	296	296	296	296	296	296

Şekil 4.21. Konveks kombinasyonlu modele göre optimal dağıtım ağı (a), birinci demontaj merkezindeki dengelenmiş hat (b), ikinci demontaj merkezindeki dengelenmiş hat (c)



Şekil 4.22. Bulanık-ve operatörlü modele göre optimal dağıtım ağı (a), birinci demontaj merkezindeki dengelenmiş hat (b), ikinci demontaj merkezindeki dengelenmiş hat (c)



Şekil 4.23. Werners yaklaşımlı modele göre optimal dağıtım ağı (a), birinci demontaj merkezindeki dengelenmiş hat (b), ikinci demontaj merkezindeki dengelenmiş hat (c)

4.4.1. Uygulanan yaklaşımların karşılaştırılması (Senaryo 1)

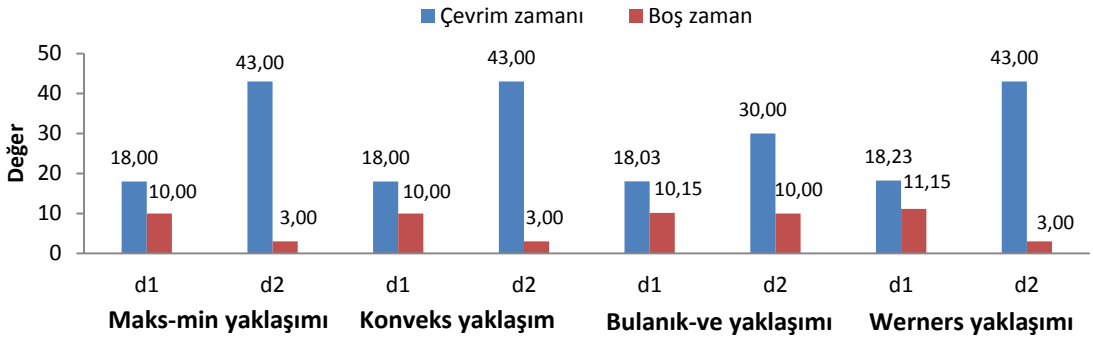
Çizelge 4.30, her yaklaşıma göre elde edilen toplam maliyeti, taşıma maliyetini, istasyon açma maliyetini, λ değerlerini ve CPU sürelerini göstermektedir. Toplam

maliyet açısından Werners (1988)'ın yaklaşımı en düşük maliyeti sağlarken, Werners (1988) yaklaşımını sırasıyla maks-min yaklaşımı, konveks kombinasyonlu yaklaşım ve bulanık-ve yaklaşımları takip etmiştir. İşlem zamanları açısından ise Werners (1988) yaklaşımı en uzun süreli yaklaşım olurken, en kısa sürede çözüm veren ise bulanık-ve yaklaşımı olmuştur. Zimmermann (1976) yaklaşımları içinde ise en uzun süren konveks kombinasyonlu yaklaşım olmuştur. Bunun en temel sebebi konveks kombinasyonlu yaklaşımın diğerlerine göre yaklaşık iki kat kısıttan oluşmasıdır. Son olarak ise tatmin seviyesi açısından en iyi yaklaşım bulanık-ve yaklaşımı olmuştur. En düşük tatmin seviyesine sahip model ise Werners (1988) yaklaşımıdır.

Çizelge 4.30. Her bir yaklaşıma göre elde edilen performans göstergeleri

	Zimmermann'ın maks-min yaklaşımı	**Zimmermann'ın konveks kombinasyonlu yaklaşımı**	**Zimmermann'ın bulanık-ve yaklaşımı**	**Werners yaklaşımı**
Toplam maliyet ($)	9982.20	10024.14	10029.48	9842.22
Taşıma maliyeti ($)	9282.20	9324.14	9229.48	9142.22
İstasyon açma maliyeti ($)	700.00	700.00	800.00	700.00
CPU (sn)	3261	17880	414	38356
$\boldsymbol{\lambda}$	0.5448	$\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5448$	0.6644	0.5235

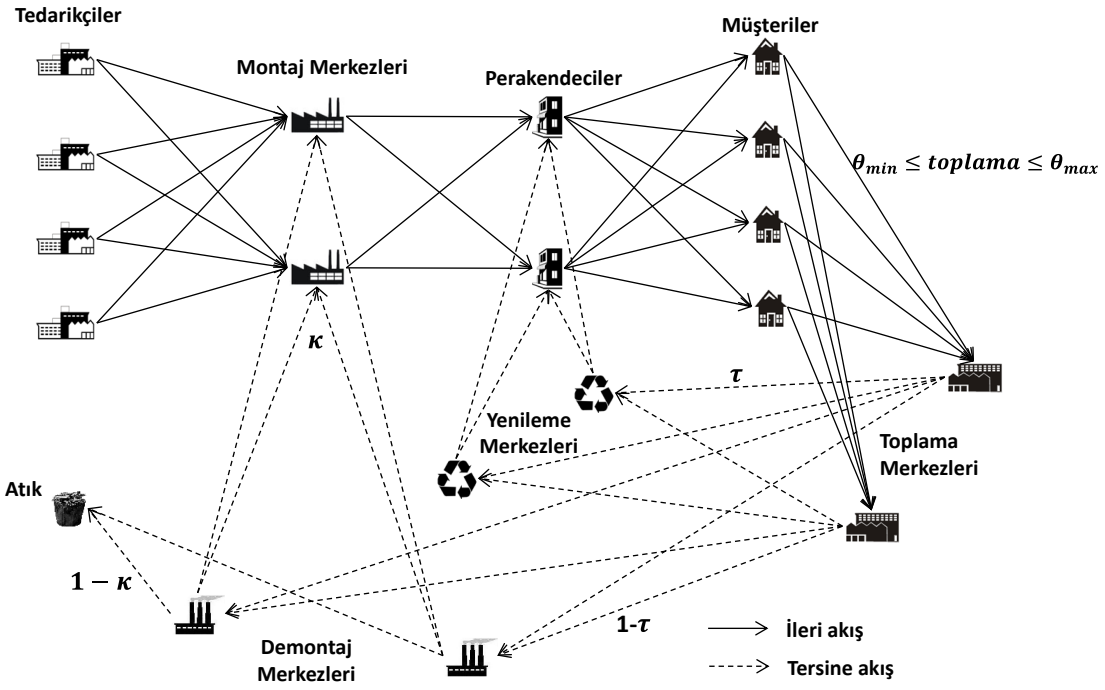
Şekil 4.24 her bir yaklaşıma göre elde edilen çevrim süresi ve boş zamanları göstermektedir. d_1 birinci demontaj merkezini, d_2 ise ikinci demontaj merkezini temsil etmektedir. Şekil 4.24'e göre Zimmermann (1976)'ın maks-min operatörlü yaklaşımı ile konveks yaklaşımı aynı sonuçları vermiştir. Bütün yaklaşımlarda birinci demontaj merkezindeki çevrim zamanı düşük, boş zaman fazla iken; ikinci demontaj merkezinde tam tersi bir durum, çevrim zamanı yüksek, boş zaman ise az olarak hesaplanmıştır. Her iki demontaj merkezinde de maksimum boş zaman bulanık-ve operatörlü modelde elde edilmiştir.



Şekil 4.24. Her bir bulanık yaklaşıma göre elde edilen çevrim zamanı ve boş zamanlar

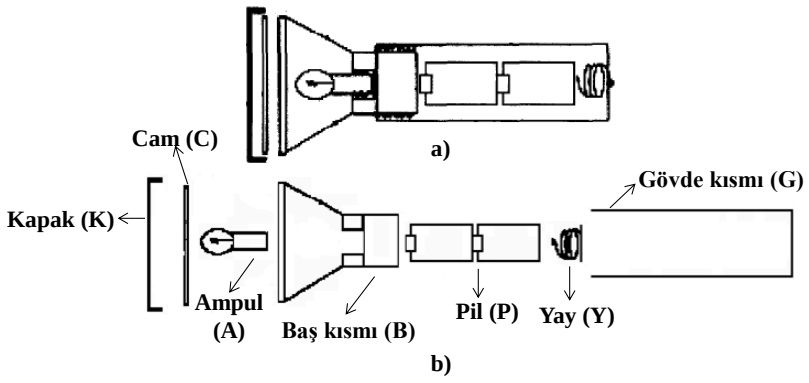
4.5. Model 5'e Ait Sayısal Örnek

Bu bölümde, önerilen 5. modele ilişkin sayısal bir örnek verilmiştir. Ağdaki ileri akış 4 adet sıfır hammadde tedarikçisi, 2 adet montaj merkezi, 2 adet perakendeci ve 4 adet müşteriden oluşurken; tersine akış 2 adet toplama merkezi, 2 adet yenileme merkezi, 2 adet demontaj merkezi ve 1 adet atık merkezinden meydana gelmektedir (Şekil 4.25).



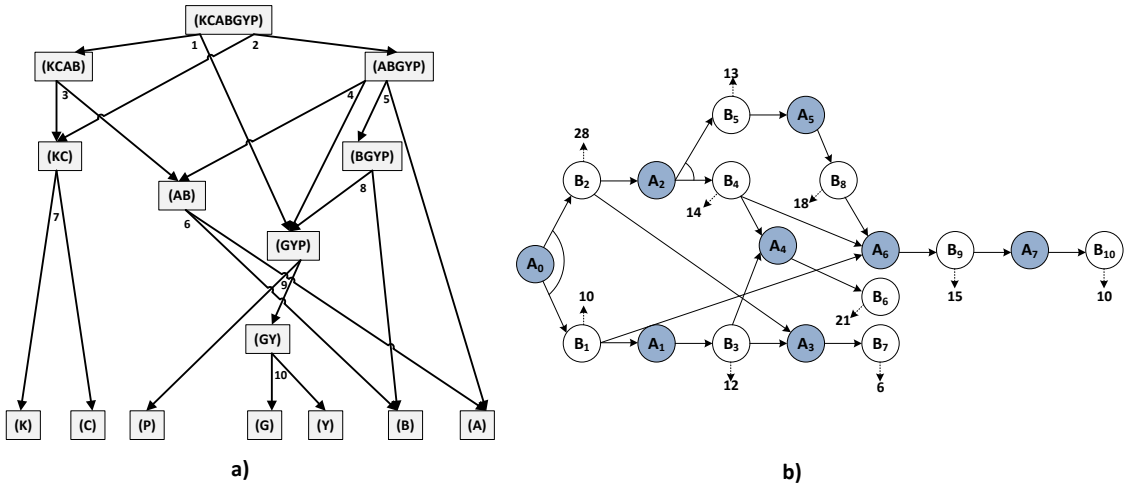
Şekil 4.25. Model 5'e ait sayısal örnekteki ağ yapısı

Tedarikçiler montaj merkezlerine 7 parçadan oluşan bir el fenerine (Şekil 4.26) ait parçaları sağlamaktadırlar.



Şekil 4.26. El feneri (a) ve alt parçaları (b) (Tang ve ark. 2002)

Birinci dönemde, tedarikçilerden elde edilen sıfır parçalar montaj merkezlerinde montajlanarak müşterilere ulaştırılmaktadır. Daha sonra belirli bir aralıkda (θ_{min}: %20 ve θ_{max}: %80) müşterilerden toplanan ürünler ile tersine akış başlamaktadır. Kullanılabilir düzeydeki el fenerleri yenilenmek üzere belirli bir oranda (τ: %30) yenileme merkezlerine geri kalan kısım (%70) ise demonte edilmesi için demontaj merkezlerine gönderilmektedir. Yenilenen el fenerleri bir sonraki dönemde kullanılmak üzere perakendecilere taşınmaktadır. Demontaj merkezlerinde yer alan demontaj hatlarında kullanılmış el fenerleri demonte edildikten sonra ortaya iki farklı tipte parça çıkmaktadır. Kullanılabilir durumda olan parçalar (κ: %70 oranında) bir sonraki dönemde kullanılması için montaj merkezlerine, kullanılamaz durumda olan parçalar ise bertaraf edilmesi için atığa gönderilmektedir.



Şekil 4.27. El fenerine ait VE/VEYA diyagramı (a) ve dönüştürülmüş VE/VEYA diyagramı (b)

El fenerine ait VE/VEYA diyagramı ve dönüştürülmüş VE/VEYA diyagramı (DVVD) Şekil 4.27'de verilmiştir. Şekil 4.27a'da verilen VE/VEYA diyagramı el fenerine ait olası demontaj yollarını gösterirken aynı zamanda açığa çıkan her bir alt montajı da vermektedir. Ürüne ait VE/VEYA diyagramına göre 7 adet düğüm ve 10 adet demontaj görevi (hiper bağlantı) bulunmaktadır. Örneğin, nihai üründen (KCABGYP) KCAB alt ürünü sökülürse açığa KCAB ve GYP alt ürünleri çıkmaktadır. Ancak Şekil 4.27a'da verilen VE/VEYA diyagramı görevler arasındaki tüm öncelik ilişkilerini yansıtmamaktadır. Bu yüzden ürüne ait VE/VEYA diyagramı Koç ve ark. (2009) tarafından önerilen DVVD'ye dönüştürülmüştür (Şekil 4.27b). Mevcut VE/VEYA diyagramında alt ürünleri (montajları) gösteren her bir düğüm DVVD'de yapay düğümler (A_a) ile demontaj görevlerini gösteren hiper bağlantılar ise normal düğümler (B_t) ile gösterilmiştir. Sonuç olarak Şekil 4.27b'deki öncelik ilişkileri diyagramı 6 ile 28 zaman biriminden oluşan 10 adet demontaj görevinden ve 7 adet yapay düğümden meydana gelmektedir. Tüm ağdaki birim taşıma maliyeti (t) 5.23 cent olarak alınmıştır. Demontaj hatlarında istasyon açma maliyeti (O) 1000$ iken, açılabilir maksimum istasyon sayısı her bir dönem için 6 olarak belirlenmiştir. Bir dönem 4 aydan oluşmakta (16 hafta), her haftada 6 çalışma günü ve her günde 9 saatten, toplamda bir dönemde 51850 zaman birimi bulunmaktadır (W_{time}). Ağdaki ürün akışı 2 dönemlik olarak ele alınmıştır. El fenerine ait sıfır parça satın alma maliyeti (s_{ic}) 25$, ürün yenileme maliyeti ise 10$'dır. Çizelge 4.31-4.34 örneğe ilişkin mesafe, kapasite ve talep bilgilerini vermektedir.

Çizelge 4.31. Tesisler arası mesafeler (km)

	Montaj M. 1	Montaj M. 2	Toplama M. 1	Toplama M. 2	Atık
Tedarikçi 1	100	130	-	-	-
Tedarikçi 2	110	150	-	-	-
Tedarikçi 3	140	80	-	-	-
Tedarikçi 4	190	185	-	-	-
Perakendeci 1	160	120	-	-	-
Perakendeci 2	80	100	-	-	-
Demontaj M. 1	120	150	130	110	50
Demontaj M. 2	290	270	160	120	60

Çizelge 4.32. Tesisler arası mesafeler (km)

	Müşteri 1	Müşteri 2	Müşteri 3	Müşteri 4	Yenileme M. 1	Yenileme Merkezi 2
Perakendeci 1	220	260	150	170	220	260
Perakendeci 2	320	290	210	330	180	150
Toplama M. 1	50	80	100	90	90	100
Toplama M. 2	110	95	65	87	80	95

Çizelge 4.33. Tedarikçi ve demontaj merkezleri kapasitesi (ton)

		Parça						
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Tedarikçi 1	**Dönem 1**	585	451	424	523	567	559	480
	Dönem 2	435	557	539	579	485	489	509
Tedarikçi 2	**Dönem 1**	401	480	447	437	460	422	416
	Dönem 2	503	408	592	480	527	588	415
Tedarikçi 3	**Dönem 1**	577	465	512	537	578	457	509
	Dönem 2	498	591	465	499	544	425	408
Tedarikçi 4	**Dönem 1**	507	475	453	485	434	496	449
	Dönem 2	431	496	508	425	559	451	480
Demontaj M. 1	**Dönem 1**	280	219	295	279	292	289	224
	Dönem 2	232	254	203	228	221	279	283
Demontaj M. 2	**Dönem 1**	471	426	426	499	420	452	487
	Dönem 2	471	482	444	415	436	471	437

Çizelge 4.34. Tesislere ait nihai ürün kapasitesi ve müşteri talepleri (ton)

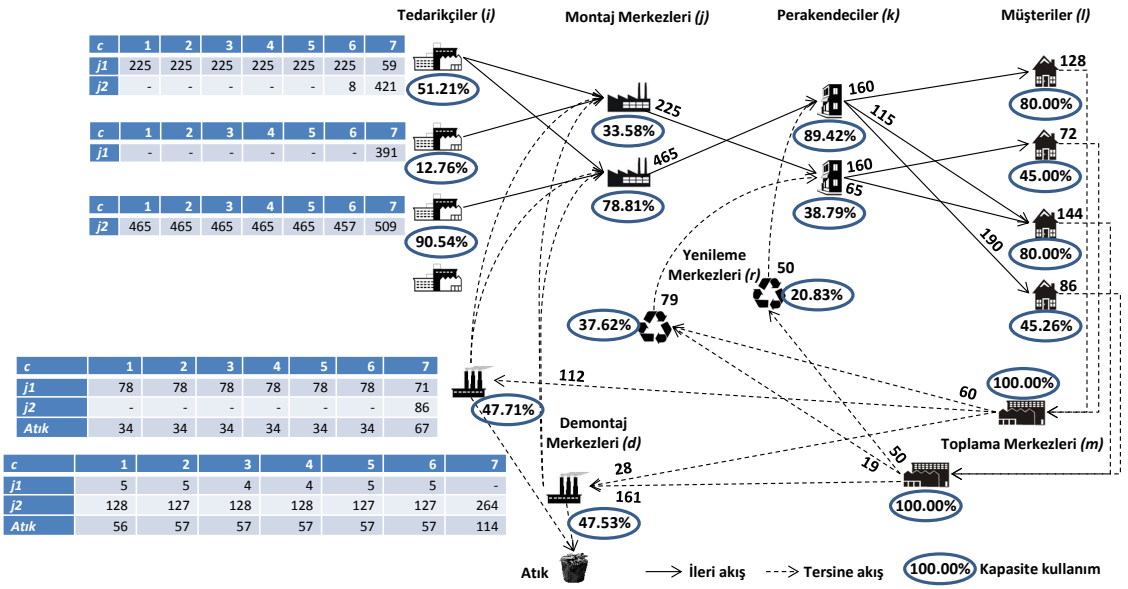
	Montaj M.		**Perakendeciler**		**Müşteriler**				**Toplama M.**		**Yenileme M.**	
Dönem	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**1**	**2**
1	670	590	520	580	160	160	180	190	200	230	240	210
2	550	470	530	330	170	180	170	180	230	220	210	260

Geliştirilen KTDOP modeli (3.120)-(3.146) Intel Core i3 işlemcili ve 4GB RAM'e sahip bilgisayarda GAMS/COINBONMIN çözücüsünde optimal olarak 316 saniyede çözülmüştür (modelin konveksliği Ek-2'de gösterilmiştir). Toplam maliyet 313004.97$ olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.35 her bir amaç fonksiyonu değerini ve toplam maliyet içindeki yüzdesini vermektedir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek oran %67.11 ile satın alma maliyetinde iken, onu sırasıyla taşıma maliyeti (%30.11), istasyon açma maliyeti (%2.23) ve yenileme maliyeti (%0.55) izlemiştir.

Çizelge 4.35. Her bir amaç fonksiyonu değeri ve yüzdesi

Amaç Fonksiyonu	Değer ($)	Toplam maliyet içindeki %
Toplam maliyet (OBJ)	313004.97	100.00
Taşıma maliyeti (OBJ1)	94234.97	30.11
Satın alma maliyeti (OBJ2)	210060.00	67.11
Yenileme maliyeti (OBJ3)	1710.00	0.55
İstasyon açma maliyeti (OBJ4)	7000.00	2.23

Şekil 4.28 birinci döneme ait optimal dağıtım ağını göstermektedir. Toplamda 5520 ton parça 4 tedarikçinin ilk üçünden karşılanmıştır. Tesislerin yanında yer alan daireler ilgili tesisin kapasite kullanım oranlarını göstermekte iken, müşterilerin yanındaki daireler ise ürün toplama yüzdelerini göstermektedir. Tedarikçilerin kapasite kullanım oranları %12.76 ve %90.54 arasında değişkenlik göstermiştir. Montaj merkezlerinde montajlanan parçaların oluşturduğu 690 ton nihai ürün perakendeciler aracılığıyla müşterilere taşınmıştır. Müşterilerden %45 ve %80 arasında kullanılmış el feneri toplanmış ve toplanan 430 ton ürün toplama merkezlerine gönderilmiştir. Toplama merkezindeki ön incelemeden sonra 129 tonluk miktar yenilenmek için yenileme merkezlerine taşınmıştır. Toplama merkezleri Şekil 4.28'de görüldüğü gibi tam kapasite çalışmışlardır. Geri kalan kullanılamaz durumdaki el fenerleri demonte edilmesi için demontaj merkezlerine gönderilmiştir. Birinci dönemde demontaj sonucunda toplamda 2408 ton parça (896 ton birinci demontaj merkezinden, 1512 ton ikinci demontaj merkezinden) elde edilmiştir. Demontaj sonucunda elde edilen bu parçaların %30'u atığa yollanırken, geri kalan kısım bir sonraki dönem kullanılmak üzere montaj merkezlerine gönderilmiştir.



c	1	2	3	4	5	6	7
j1	225	225	225	225	225	225	59
j2	-	-	-	-	-	8	421

c	1	2	3	4	5	6	7
j1	-	-	-	-	-	-	391

c	1	2	3	4	5	6	7
j2	465	465	465	465	465	457	509

c	1	2	3	4	5	6	7
j1	78	78	78	78	78	78	71
j2	-	-	-	-	-	-	86
Atık	34	34	34	34	34	34	67

c	1	2	3	4	5	6	7
j1	5	5	4	4	5	5	-
j2	128	127	128	128	127	127	264
Atık	56	57	57	57	57	57	114

Şekil 4.28. Birinci döneme ilişkin optimal dağıtım ağı

Şekil 4.28'de verildiği gibi birinci dönemde optimal dağıtım ağına ulaşılmışken, aynı zamanda demontaj merkezlerindeki demontaj hatları da dengelenmiştir. Aşağıda birinci dönemde her iki demontaj merkezinde elde edilen çevrim zamanları verilmiştir.

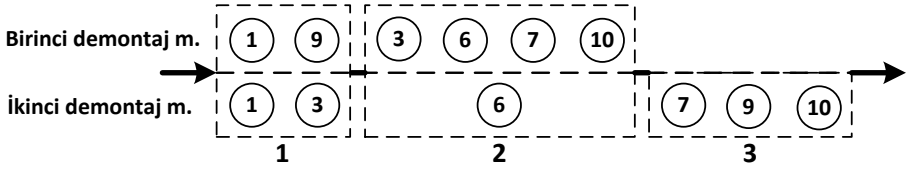
$$CT_{11} = \frac{W_{time}}{\sum_j \sum_c Z_{1jc1} + \sum_c F_{1c1}} = \frac{51840}{896} = 57.86 \text{ zaman birimi (birinci demontaj merkezi)}$$

$$CT_{21} = \frac{W_{time}}{\sum_j \sum_c Z_{2jc1} + \sum_c F_{2c1}} = \frac{51840}{1512} = 34.29 \text{ zaman birimi (ikinci demontaj merkezi)}$$

Yukarıdaki sonuçlara göre birinci demontaj merkezinde çevrim zamanı 57.86, ikinci demontaj merkezinde ise 34.29 zaman birimi olarak bulunmuştur. Çizelge 4.36 ve Şekil 4.29 optimal hat dengesine ilişkin detaylı bilgileri göstermektedir.

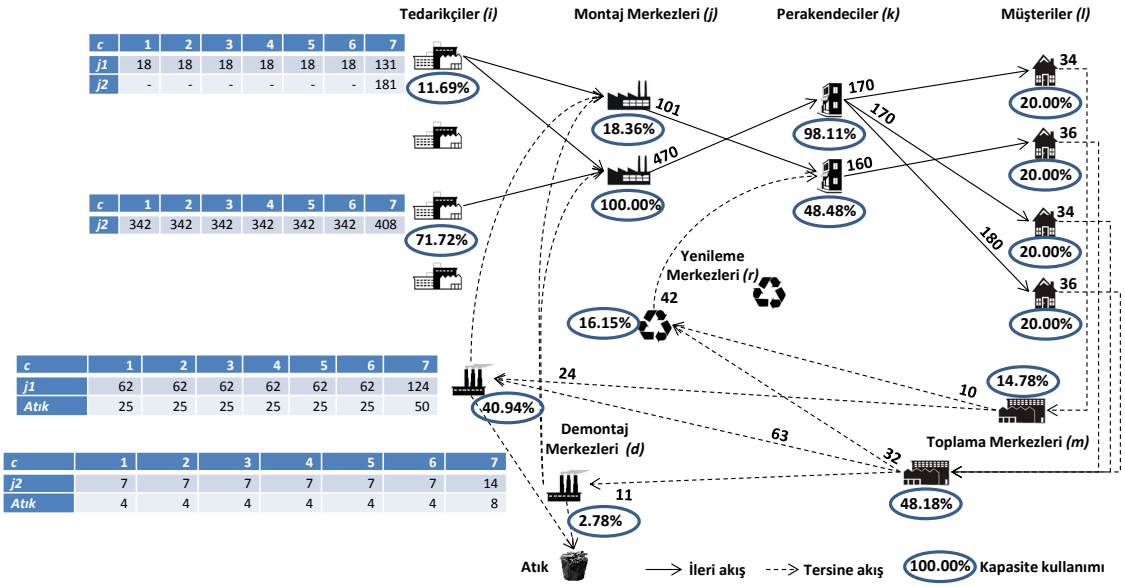
Çizelge 4.36. Birinci dönemde her iki demontaj merkezindeki optimal hat dengesi

	İş istasyonu	Atanan görevler	İstasyon zamanı	Boş zaman
Demontaj M. 1	1	1-9	25	32.86
	2	3-6-7-10	49	8.86
	Toplam			41.72
Demontaj M. 2	1	1-3	22	12.29
	2	6	21	13.29
	3	7-9-10	31	3.29
	Toplam			28.87



Şekil 4.29. Birinci dönemde her iki demontaj merkezindeki atanan görevler

Çizelge 4.36'ya göre hattaki toplam boş süre birinci demontaj merkezinde 41.72 zaman birimi iken, ikinci demontaj merkezinde 28.87'dir. İkinci demontaj merkezinde çevrim zamanının daha az olmasından dolayı birinci demontaj merkezine göre daha fazla sayıda istasyon açılmıştır.



Şekil 4.30. İkinci döneme ilişkin optimal dağıtım ağı

Şekil 4.30 ikinci döneme ait optimal dağıtım ağını göstermektedir. Birinci dönemden kullanılmış parça ve ürün geldiğinden dolayı ikinci dönemde daha az sıfır parça satın alınmıştır. Tedarikçilerden temin edilen 2880 ton sıfır parça ve bir önceki dönemden gelen 1057 ton kullanılmış parça montajlanarak 571 ton nihai ürün perakendeciler aracılığıyla müşteriere ulaştırılmıştır. Geri dönüşümden dolayı ikinci dönemdeki tedarikçi kapasite kullanım oranları beklendiği gibi düşmüştür. Müşterilerden %20 oranında (140 ton) kullanılmış ürün toplanmış ve incelenmek üzere toplama merkezlerine gönderilmiştir. Bu miktarın 42 tonu yenileme merkezlerine gönderilirken, kalan 98 ton demonte edilmesi için demontaj merkezlerine gönderilmiştir. Demontaj merkezlerine gelen bu kullanılmş ürünler birinci demontaj

merkezinde 700 ton, ikinci demontaj merkezinde ise 88 ton parçaya dönüştürülmüştür. Demontaj sonucunda açığa çıkan bu parçaların 232 tonluk kısmı atığa yollanmış, kalan kullanışlı kısım ise montaj merkezlerine gönderilmiştir. İkinci dönemde demontaj merkezlerine ait çevrim zamanları aşağıda verilmiştir.

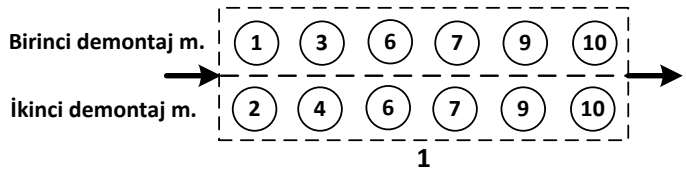
$$CT_{12} = \frac{W_{time}}{\sum_j \sum_c Z_{1jc2} + \sum_c F_{1c2}} = \frac{51840}{700} = 74 \text{ zaman birimi (birinci demontaj merkezi)}$$

$$CT_{22} = \frac{W_{time}}{\sum_j \sum_c Z_{2jc2} + \sum_c F_{2c2}} = \frac{51840}{88} = 589.1 \text{ zaman birimi (ikinci demontaj merkezi)}$$

Çevrim zamanlarının her iki demontaj merkezinde de yüksek çıkmasından dolayı birer adet istasyon açılmıştır. Çizelge 4.37 ve Şekil 4.31 her bir istasyona ait içerikleri vermektedir.

Çizelge 4.37. İkinci dönemde her iki demontaj merkezindeki optimal hat dengesi

	İş istasyonu	**Atanan görevler**	**İstasyon zamanı**	**Boş zaman**
Demontaj M. 1	1	1-3-6-7-9-10	74	0
	Toplam			0
Demontaj M. 2	1	2-4-6-7-9-10	94	495.1
	Toplam			495.1



Şekil 4.31. İkinci dönemde her iki demontaj merkezindeki atanan görevler

Çizelge 4.37 ve Şekil 4.31'e göre birinci demontaj merkezindeki boş zaman sıfır iken, ikinci demontaj merkezindeki boş zaman 495.1 birimdir. Birinci demontaj merkezinden, ikinci demontaj merkezine göre daha fazla parça montaj merkezlerine ve atığa taşındığı için birinci demontaj merkezindeki çevrim zamanı daha düşüktür ve hat tam dengelenmiştir. Yukarıda elde edilen optimal değerler önerilen KDTZ ve DHD entegrasyonu modelinin başarılı olduğunu göstermektedir.

Yukarıda verilen entegre modele ait çözüme ek olarak önerilen problem hiyerarşik olarak da çözülmüştür. Öncelikle DHD problemi ile alakalı (3.139)-(3.144) ve (3.146) numaralı kısıtlar çıkartılarak elde edilen KDTZ ağ tasarımı modeli çözülmüş,

daha sonra her bir demontaj merkezindeki demonte edilen miktarlara göre belirlenen çevrim zamanları altında hat dengelenmiştir. Hiyerarşik çözüme göre elde edilen optimal dağıtım ağında ikinci demontaj merkezine herhangi bir taşıma gerçekleşmemiştir. Birinci ve ikinci dönemde birinci demontaj merkezinde açığa çıkan parça miktarları sırasıyla 772 ve 784 ton'dur. Bu değerlerde göre elde edilen çevrim zamanları aşağıda verilmiştir.

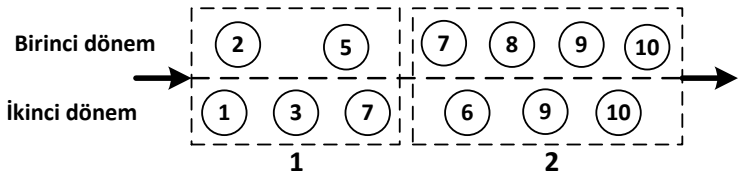
$$CT_{11} = \frac{W_{time}}{\sum_j \sum_c Z_{1jc1} + \sum_c F_{1c1}} = \frac{51840}{772} = 67.15 \text{ zaman birimi (birinci dönem)}$$

$$CT_{12} = \frac{W_{time}}{\sum_j \sum_c Z_{1jc2} + \sum_c F_{1c2}} = \frac{51840}{784} = 66.12 \text{ zaman birimi (ikinci dönem)}$$

Hiyerarşik yaklaşımın ikinci aşamasında yukarıda elde edilen çevrim zamanları altında DHD probleminin çözümü yer almaktadır. Dengelenmiş hat bilgileri Çizelge 4.38 ve Şekil 4.32'de sunulmuştur.

Çizelge 4.38. Hiyerarşik yaklaşıma göre elde edilen optimal hat dengesi

	İş istasyonu	Atanan görevler	İstasyon zamanı	Boş zaman
Birinci dönem	1	2-5	41	26.15
	2	7-8-9-10	49	18.15
	Toplam			44.30
İkinci dönem	2	1-3-7	28	38.12
	3	6-9-10	46	20.12
	Toplam			58.24



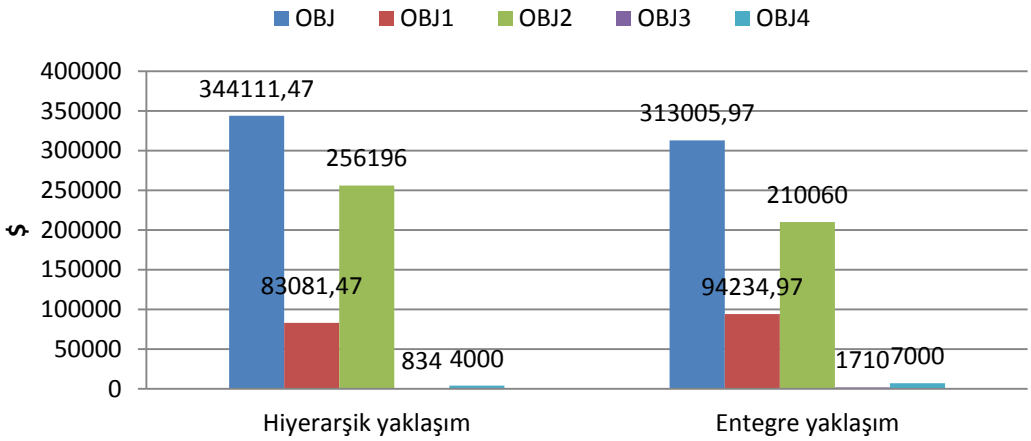
Şekil 4.32. Hiyerarşik yaklaşıma göre birinci demontaj merkezinde atanan görevler

Hiyerarşik yaklaşıma göre elde edilen amaç fonksiyonu değerleri Çizelge 4.39'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre entegre yaklaşım ile hiyerarşik yaklaşıma göre %9.04 oranında daha az toplam maliyet elde edilmiştir.

Çizelge 4.39. Hiyerarşik yaklaşıma göre her bir amaç fonksiyonu değeri ve yüzdesi

Amaç Fonksiyonu	Değer ($)	Toplam maliyet içindeki %
Toplam maliyet (OBJ)	344111.47	100.00
Taşıma maliyeti (OBJ1)	83081.47	24.14
Satın alma maliyeti (OBJ2)	256196.00	74.45
Yenileme maliyeti (OBJ3)	834.00	0.24
İstasyon açma maliyeti (OBJ4)	4000.00	1.17

Şekil 4.33 her iki yaklaşıma göre elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir.



Şekil 4.33. Her iki yaklaşıma göre elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılmasını

4.5.1. Model 5'e ait senaryo analizleri

Bu bölümde Model 5'in test edildiği sayısal örnek üzerinden farklı senaryo analizleri yapılmıştır.

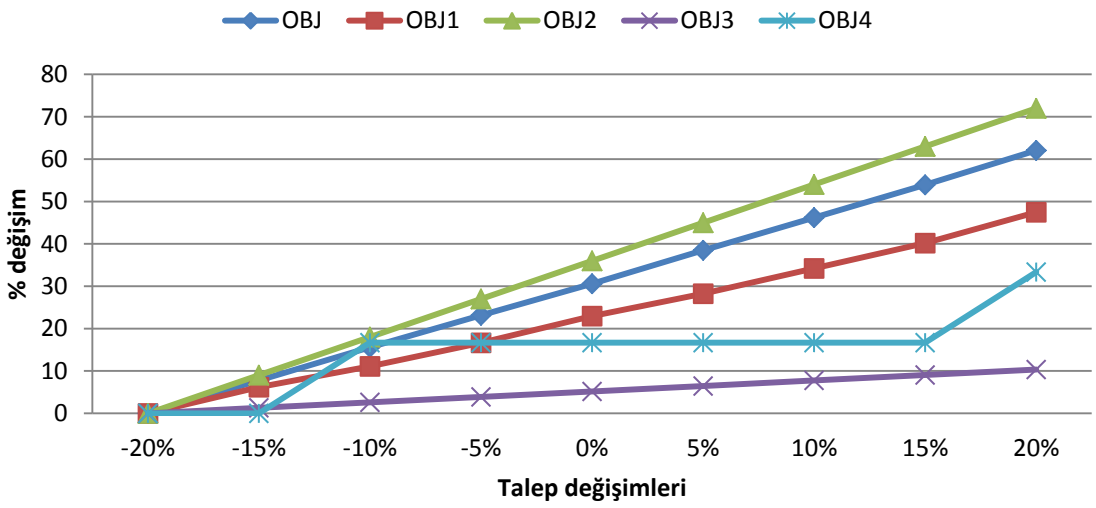
4.5.1.1. Talep değişimlerinin etkisi (Senaryo 1)

Birinci senaryo analizinde amaç, farklı talep değerlerinin toplam maliyet ve her bir amaç fonksiyonu üzerindeki etkilerini gözlemlemektir. Bu amaçla mevcut talep değerleri -%20 ve +%20 aralığında %5 farkla değiştirilmiştir. Çizelge 4.40 birinci senaryo analizi sonucunda elde edilen toplam maliyet değerini, her bir amaç fonksiyonunun toplam maliyet içindeki yüzdesini ve CPU sürelerini vermektedir.

Çizelge 4.40. Senaryo 1'e göre elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

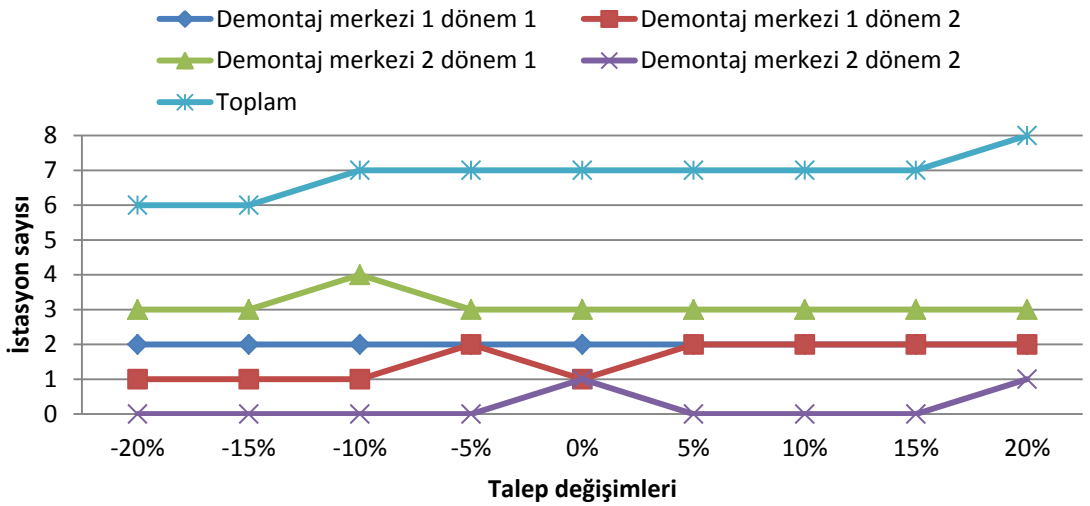
					Talepteki değişimler
	-20%	**-15%**	**-10%**	**-5%**	**0%**
OBJ	238726.40	257375.89	276079.67	294245.11	313004.97
OBJ1 (%)	32.10	31.61	30.84	30.38	30.11
OBJ2 (%)	64.70	65.41	66.02	66.67	67.11
OBJ3 (%)	0.68	0.64	0.60	0.57	0.55
OBJ4 (%)	2.51	2.33	2.54	2.38	2.24
CPU (sn)	136	93	231	173	316
	+5%	**+10%**	**+15%**	**+20%**	
OBJ	330967.48	349472.00	367973.00	388464.00	
OBJ1 (%)	29.69	29.43	29.20	29.09	
OBJ2 (%)	67.67	68.06	68.42	68.39	
OBJ3 (%)	0.52	0.50	0.48	0.46	
OBJ4 (%)	2.12	2.00	1.90	2.06	
CPU (sn)	107	449	186	710	

Çizelge 4.40'a göre talep değişimleri ile problemlerin çözüm süreleri arasında doğrudan bir ilişki ortaya çıkmamıştır. Ancak beklendiği gibi talep değerlerindeki artış toplam maliyet değerleri üzerinde de ciddi bir artışa neden olmuştur. Bu artış oranları Şekil 4.34'de gösterilmiştir. Şekil 4.34'e göre talep değerlerinde %40'lık bir artış toplam maliyette %62.05'lik bir artışa sebep olmuştur. En fazla artış %71.99 ile satın alma maliyetlerinde gözlemlenmiştir. Satın alma maliyetini, sırasıyla taşıma, yenileme ve istasyon açma maliyetleri izlemiştir.



Şekil 4.34. Talep değişimlerinin amaç fonksiyonları üzerine etkisi

Şekil 4.35 ise talep değişimleri altında demontaj merkezlerindeki istasyon sayılarını göstermektedir.



Şekil 4.35. Talep değişimlerinin istasyon sayıları üzerine etkisi

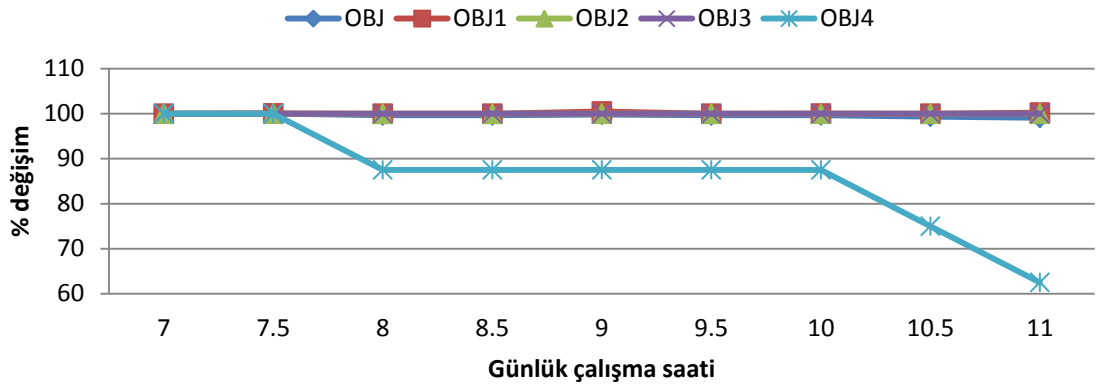
W_{time} değeri sabit iken talep değerlerinin artırılması beklendiği gibi çevrim zamanının düşmesine dolayısıyla açılan istasyon sayısının da artmasına yol açmıştır. %40'lık bir talep artışı toplam istasyon sayısında %33.33 oranında bir artışa sebep olmuştur.

4.5.1.2. Vardiya süresinin etkisi (Senaryo 2)

Bu senaryo analizinde işçi maliyetlerinin ihmal edildiği varsayımı altında farklı vardiya zamanlarının performans göstergeleri üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu amaçla, mevcut 9 saatlik vardiya süresi 7 ve 11 saat arasında 30 dakikalık aralıklar ile değiştirilmiştir. Bu analiz sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 4.41 ve Şekil 4.36'da verilmiştir.

Çizelge 4.41. Senaryo 2'ye göre elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

				Talepteki değişimler	
	7	**7.5**	**8**	**8.5**	**9**
OBJ	313528.11	313599.94	312528.11	312528.11	313004.97
OBJ1 (%)	29.90	29.92	30.00	30.00	30.11
OBJ2 (%)	67.00	66.98	67.21	67.21	67.11
OBJ3 (%)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
OBJ4 (%)	2.55	2.55	2.24	2.24	2.24
CPU (sn)	1285	618	670	710	316
	9.5	**10**	**10.5**	**11**	
OBJ	312528.11	312560.23	311528.11	310771.55	
OBJ1 (%)	30.00	30.01	30.10	30.25	
OBJ2 (%)	67.21	67.21	67.43	67.59	
OBJ3 (%)	0.55	0.55	0.55	0.55	
OBJ4 (%)	2.24	2.24	1.93	1.61	
CPU (sn)	107	1	35	36	



Şekil 4.36. Günlük çalışma saatinin amaç fonksiyonları üzerine etkisi

Çizelge 4.41 ve Şekil 4.36'ya göre günlük çalışma saatinin satın alma ve yenileme maliyetleri üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. Günlük çalışma saatinin 7 saatten 11 saate çıkartılması toplam taşıma maliyetinde %0.26'lık bir artışa, toplam maliyette ise %0.88'lik bir düşüşe sebep olmuştur. Vardiya süresinin DHD problemi ile doğrudan ilgili olmasından dolayı toplam istasyon açma maliyeti %37.5 oranında azalmıştır. Bunun en temel sebebi çevrim zamanı arttığından gerekli istasyon sayısının azalmasıdır.

4.5.1.3. Satın alma/yenileme maliyeti oranının etkisi (Senaryo 3)

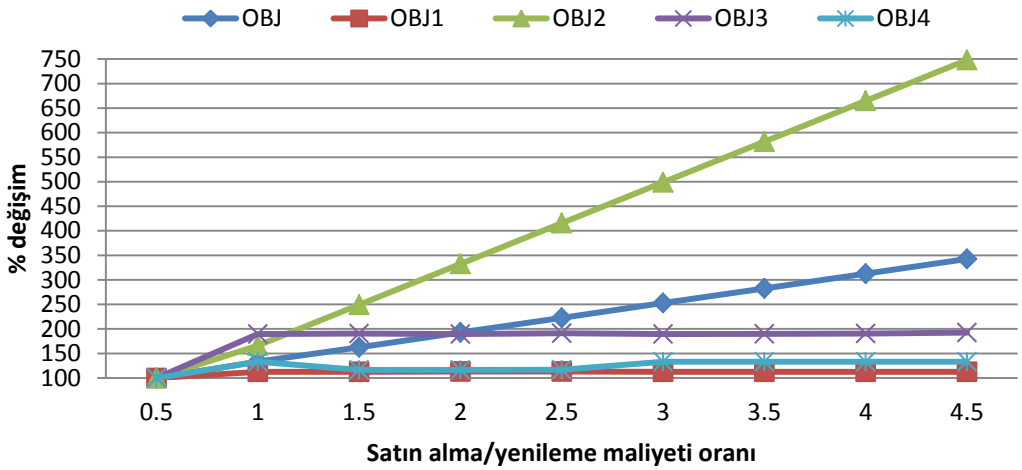
Bu senaryo analizinde karar verici için en uygun satın alma/yenileme maliyeti oranını araştırılmıştır. Çünkü bu oran yani sıfır parça maliyetinin geri dönüşüm maliyetine oranı KDTZ yönetiminde önemli bir parametredir. Amaç karar vericiye en

uygun toplam maliyeti sunacak olan satın alma/yenileme maliyeti oranını bulmaktır. Mevcut örnekte 2.5 ($^{s_{ic}}/_{h}$) olan bu oran 0.5'lik değişimler ile 0.5 ve 4.5 arasında değiştirilmiştir. Farklı oranlar altında elde edilen sonuçlar Çizelge 4.42 ve Şekil 4.37'de verilmiştir.

Çizelge 4.42. Senaryo 3'e göre elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

	Satın alma/yenileme maliyeti oranı				
	0.5	**1**	**1.5**	**2**	**2.5**
OBJ	140636.62	187492.11	228508.11	270994.97	313004.97
OBJ1 (%)	59.15	50.02	41.03	34.77	30.11
OBJ2 (%)	35.94	44.81	55.16	62.01	67.11
OBJ3 (%)	0.64	0.91	0.75	0.63	0.55
OBJ4 (%)	4.27	4.26	3.06	2.58	2.24
CPU (sn)	84	36	306	245	316
	3	**3.5**	**4**	**4.5**	
OBJ	355538.11	397548.11	439568.11	481578.11	
OBJ1 (%)	26.37	23.58	21.33	19.47	
OBJ2 (%)	70.90	73.97	76.46	78.51	
OBJ3 (%)	0.48	0.43	0.39	0.36	
OBJ4 (%)	2.25	2.01	1.82	1.66	
CPU (sn)	128	93	804	38	

Satın alma/yenileme maliyeti oranının artması hem satın alma da hem de toplam maliyette artışa sebep olmuştur. Şekil 4.37'den görüldüğü gibi satın alma/yenileme maliyeti oranının 0.5'ten 4.5'e çıkartılması toplam maliyette %242.43, satın alma maliyetinde ise %648.02'lik bir artış yaratmıştır. Tam tersi olarak eğer karar verici daha düşük fiyatta sıfır ürün temin edebilirse yani satın alma/yenileme maliyeti oranını düşürebilirse toplam maliyeti %55 oranında azaltabilir. Maliyet oranının artması satın alma maliyetini ciddi oranda artırdığı için toplam maliyet içindeki taşıma, yenileme ve istasyon açma maliyetleri düşmüştür.



Şekil 4.37. Satın alma/yenileme maliyeti oranının amaç fonksiyonları üzerine etkisi

4.5.1.4. Geri dönüşüm oranlarının etkisi (Senaryo 4)

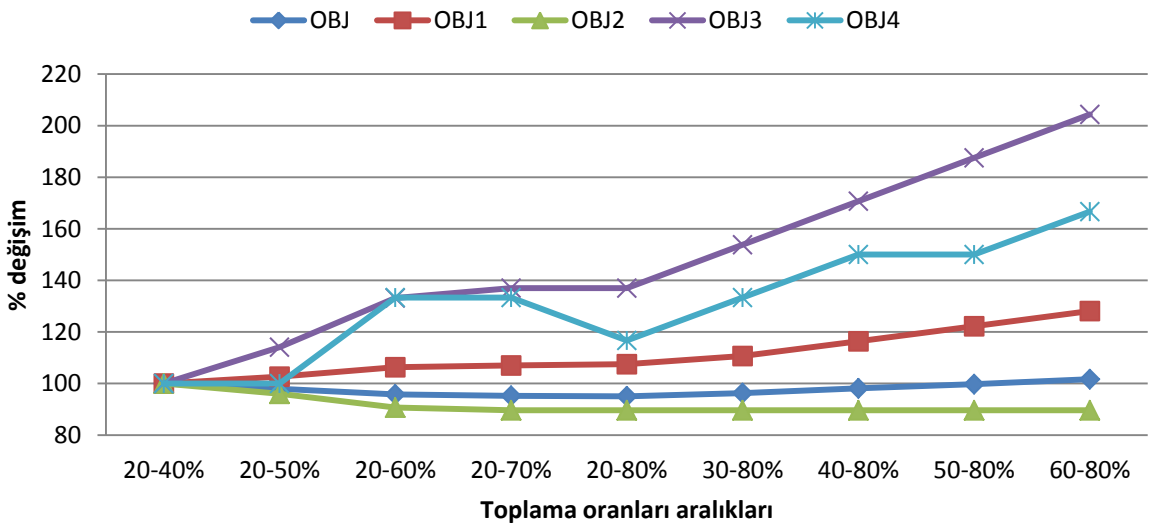
Gerçek hayattaki farklı tipte ürünlerin farklı geri dönüşüm oranları ile kullanıcılardan toplandığından önceki bölümlerde bahsedilmişti (Rogers ve Tibben-Lembke, 1998). Bu değişimi önerilen modelde yansıtabilmek için müşterilerden toplanan ürün yüzdelerinin farklı aralıklarda olduğu varsayılmıştır. Farklı minimium ve maksimum toplama oranları altında elde edilen sonuçlar Çizelge 4.43'te verilmiştir.

Çizelge 4.43. Senaryo 4'e göre elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

			Minimum ve maksimum toplama oranları (%)		
	20-40%	**20-50%**	**20-60%**	**20-70%**	**20-80%**
OBJ	329282.02	322511.98	315435.98	313573.92	313004.97
OBJ1 (%)	26.62	27.90	29.54	29.91	30.11
OBJ2 (%)	71.18	69.80	67.40	66.99	67.11
OBJ3 (%)	0.38	0.44	0.53	0.55	0.55
OBJ4 (%)	1.82	1.86	2.54	2.55	2.24
CPU (sn)	36	163	290	102	316
	30-80%	**40-80%**	**50-80%**	**60-80%**	
OBJ	316963.72	323180.00	328520.00	334880.00	
OBJ1 (%)	30.60	31.56	32.61	33.53	
OBJ2 (%)	66.27	65.00	63.94	62.73	
OBJ3 (%)	0.61	0.66	0.71	0.76	
OBJ4 (%)	2.52	2.78	2.74	2.99	
CPU (sn)	103	310	2407	5509	

Çizelge 4.43'e göre kullanılmış ürün toplama yüzdesinin artırılması taşıma, satın alma ve istasyon açma maliyetlerini artırırken, diğer taraftan sıfır parça satın alma maliyetlerinde de düşüşe sebep olmuştur. Minimum maliyet değeri ürün toplama

yüzdesi aralığının %20-80 olduğu zaman elde edilmişken, maksimum maliyet değeri %60-80 aralığındaki toplama yüzdesinde gözlemlenmiştir. Ürün geri dönüşüm faaliyetlerinin maksimum seviyede olduğu %60-80 aralığında aynı zamanda geri dönüşüm maliyetleri de (yenileme, istasyon açma) ciddi oranda arttığından toplam maliyet de artmıştır. Şekil 4.38 farklı ürün toplama aralıklarının amaç fonksiyonları üzerindeki etkisini göstermektedir. Buna göre düşük toplama aralığından (%20-40) yüksek toplama aralığına (%60-80) çıkıldığında toplam maliyet %28.10, istasyon açma maliyeti %66.67 ve yenileme maliyeti %104.33 oranında artarken, satın alma maliyeti %10.38 oranında düşmüştür.



Şekil 4.38. Ürün geri dönüşüm oranlarının amaç fonksiyonları üzerine etkisi

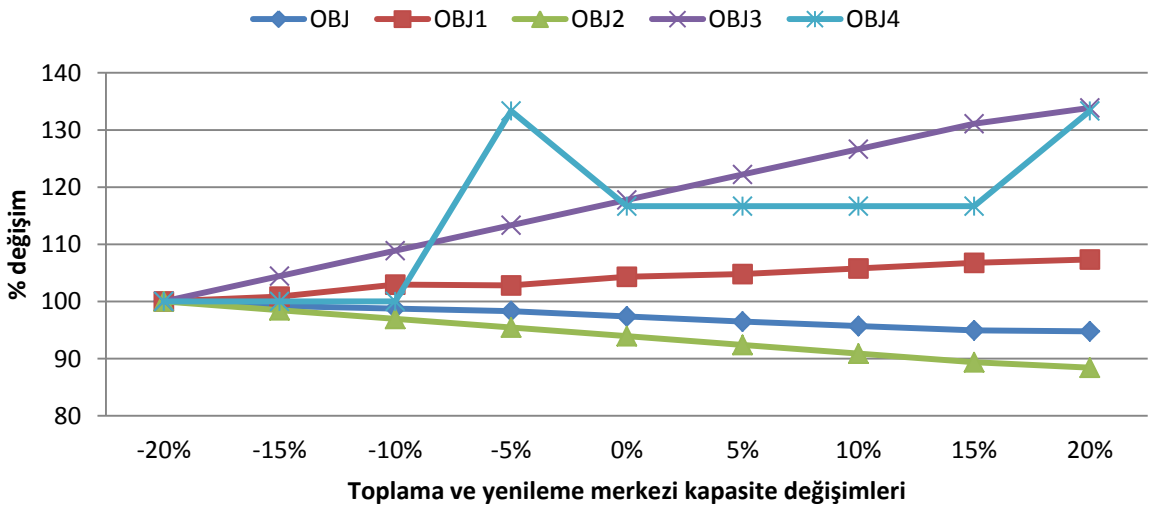
4.5.1.5. Toplama ve yenileme merkezleri kapasitelerinin etkisi (Senaryo 5)

Bu senaryo analizinde geri dönüşüm tesislerinden toplama ve yenileme merkezlerinin kapasite değişimlerinin amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla mevcut tesis kapasiteleri %5 aralıklar ile sistematik olarak azaltılmış ve artırılmıştır. Çizelge 4.44 farklı kapasite değerleri altında elde edilen sonuçları göstermektedir.

Çizelge 4.44. Senaryo 5'e göre elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

	Toplama ve yenileme merkezleri kapasite değişimleri				
	-20%	**-15%**	**-10%**	**-5%**	**0%**
OBJ	321423.99	318867.87	317417.95	315978.03	313004.97
OBJ1 (%)	28.10	28.57	29.29	29.39	30.11
OBJ2 (%)	69.58	69.07	68.32	67.56	67.11
OBJ3 (%)	0.45	0.48	0.50	0.52	0.55
OBJ4 (%)	1.87	1.88	1.89	2.53	2.24
CPU (sn)	111	104	116	308	316
	+5%	**+10%**	**+15%**	**+20%**	
OBJ	310078.18	307638.26	305188.34	304666.43	
OBJ1 (%)	30.52	31.05	31.59	31.83	
OBJ2 (%)	66.65	66.07	65.49	64.91	
OBJ3 (%)	0.57	0.60	0.62	0.64	
OBJ4 (%)	2.26	2.28	2.29	2.63	
CPU (sn)	109	112	726	102	

Çizelge 4.44'e göre toplama ve yenileme merkezleri kapasitelerinin -%20 ve +%20 oranlarında değiştirilmesi taşıma, yenileme ve istasyon açma maliyetlerinde sırasıyla %28.10 ve %31.83, %0.45 ve %0.64 ve %1.87 ve %2.63 aralıklarında artışa sebep olmuştur. Bu değişim oranları Şekil 4.39'da gösterilmiştir. Şekil 4.39'a göre kapasite değerlerinin artırılması taşıma, yenileme ve istasyon açma maliyetlerinde negatif etki yaratırken, satın alma ve toplam maliyet de pozitif etki yaratmıştır. Sonuç olarak kapasite değerlerinin %40 artırılması (-%20'den +%20'ye) taşıma maliyetini %7.35, yenileme maliyetini %33.85 ve istasyon açma maliyetini %33.33 oranında artırırken; toplam maliyeti %5.21, satın alma maliyetini de %11.58 oranında azaltmıştır.



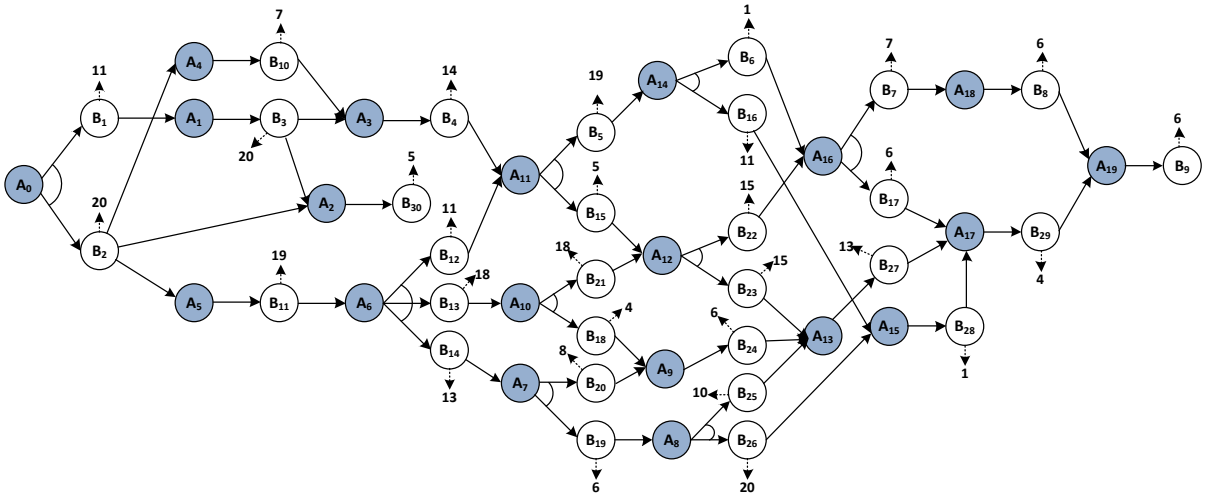
Şekil 4.39. Toplama ve yenileme merkezleri kapasitelerinin amaç fonksiyonları üzerine etkisi

4.5.1.6. Ürün karmaşıklığının etkisi (Senaryo 6)

Bu senaryo analizinde, ürün karmaşıklığının model üzerindeki etkisinin ölçülebilmesi adına mevcut el feneri örneği daha karmaşık olan radyo örneği ile değiştirilmiştir. 10 görevli ve 7 parçalı el feneri örneği yerine 30 görevli ve 10 parçadan oluşan radyo örneği gerekli benzer kapasite düzenlemeleri dışında aynı veriler ile test edilmiştir. Şekil 4.40 ve 4.41 sırasıyla demonte edilecek radyoyu ve radyoya ait 30 normal düğünden ve 19 yapay düğümden oluşan DVVD'nı göstermektedir.



Şekil 4.40. Radyo örneği (Wikipedia, 2013b)



Şekil 4.41. Radyo örneğine ait DVVD (Altekin ve Akkan (2012)'den uyarlanmıştır)

Radyo ürünü içeren model GAMS-COIN/BONMIN çözücüsünde optimal olarak 36339 saniyede çözülmüştür. Elde edilen toplam maliyet değeri 399331.43$'dır. Çizelge 4.45'te iki ürüne göre karşılaştırmalı bir analiz sunulmuştur.

Çizelge 4.45. İki ürüne göre elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

		El fenerli model		Radyolu model
Amaç Fonksiyonu	**Değer ($)**	**Toplam maliyet içindeki %**	**Değer ($)**	**Toplam maliyet içindeki %**
OBJ	313004.97	100.00	399331.43	100.00
OBJ1	94234.97	30.11	101260.00	25.29
OBJ2	210060.00	67.11	290790.00	72.64
OBJ3	1710.00	0.55	1281.43	0.32
OBJ4	7000.00	2.23	6000.00	1.50
CPU (sn)		316		36339

Çizelge 4.45'e göre ürün karmaşıklığındaki ve parça sayısındaki artış aynı zamanda satın alma (%38.43), taşıma (%7.45) ve toplam maliyette de (%27.58) artışa sebep olmuştur. Diğer taraftan ise yenileme maliyetleri %25.06 oranında, istasyon açma maliyetleri de %14.29 oranında azalmıştır. Beklendiği gibi ürün karmaşıklığının artması mevcut modelden 115 kat daha fazla çözüm süresine ihtiyaç duyulmasına sebep olmuştur. Sonuç olarak, ürün yapısının karmaşıklaşması ve parça sayısının artması karar vericinin hammadde temin ederken geri dönüşüm tesislerinden çok tedarikçilere yönelmesine neden olmuştur.

Ağdaki ürün dolaşımı optimize edilirken, diğer yandan demontaj tesislerindeki demontaj hatlarıda dengelenmiştir. İkinci dönemde ikinci demontaj tesisine herhangi bir ürün girmediği için burada bir hat dengelemesi gerçekleşmemiştir. Demontaj merkezlerinde elde edilen çevrim zamanları aşağıda verilmiştir.

$$CT_{11} = \frac{W_{time}}{\sum_j \sum_c Z_{1jc1} + \sum_c F_{1c1}} = \frac{51840}{1010} = 51.33 \text{ zaman birimi (birinci dönem)}$$

$$CT_{21} = \frac{W_{time}}{\sum_j \sum_c Z_{2jc1} + \sum_c F_{2c1}} = \frac{51840}{1000} = 51.84 \text{ zaman birimi (birinci dönem)}$$

$$CT_{12} = \frac{W_{time}}{\sum_j \sum_c Z_{1jc2} + \sum_c F_{1c2}} = \frac{51840}{980} = 52.90 \text{ zaman birimi (ikinci dönem)}$$

Dengelenmiş hatlara ilişkin bilgiler Çizelge 4.46'da verilmiştir. Çizelge 4.46'ya göre radyo örnekli modelde (13.71 zaman birimi) el fenerli modele (141.42 zaman birimi) nazaran ortalama olarak daha düşük boş zaman gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.46. Radyo ürünlü modele ait optimal hat dengesi

Dönem	Demontaj M.	İş istasyonu	Atanan görevler	İstasyon zamanı	Boş zaman
1	1	1	1-3-4	45	6.33
		2	7-8-9-15-22-30	44	7.33
				Toplam	13.66
	2	1	1-3-4	45	6.84
		2	5-9-16-28-29-30	46	5.84
				Toplam	12.68
2	1	1	1-3-4	45	7.90
		2	5-9-16-28-29-30	46	6.90
				Toplam	14.80

4.5.1.7. Geri dönen ürün kalitesinin etkisi (Senaryo 7)

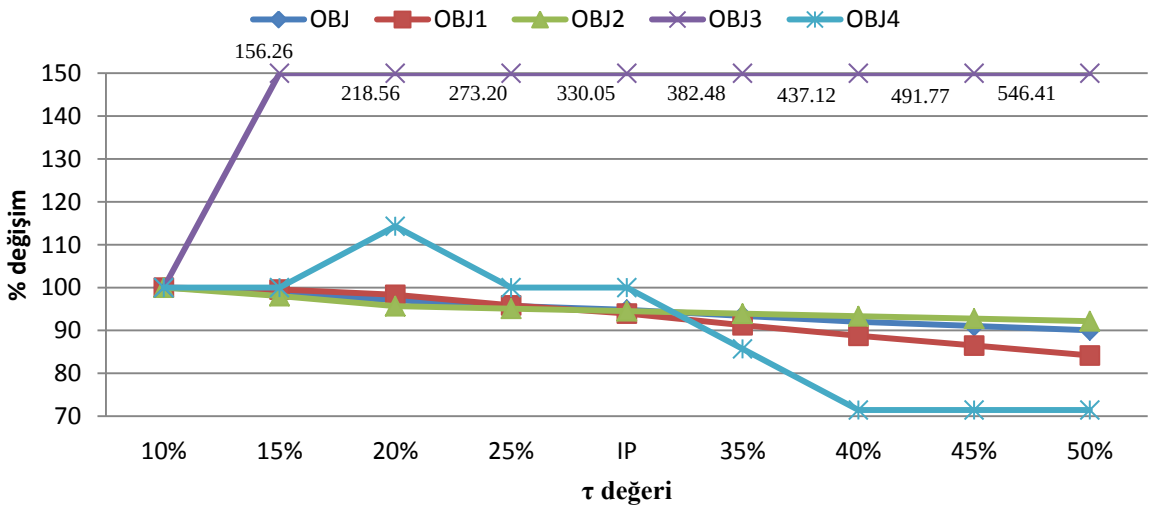
Önerilen modelde, müşterilerden toplanan ürünlerin toplama merkezlerindeki kalite kontrollerinden sonra, τ% oranındaki kullanılmış ürünlerin iyi kalitede olduğu varsayılarak yenileme merkezlerine doğrudan gönderilmekteydi. İyi durumda olmayan geri kalan kısım ise demonte edilmesi için demontaj merkezlerine taşınmaktaydı. Müşterilerden dönen ürünlerin kalite durumlarının modelin performans göstergeleri üzerindeki etkisini ölçmek için mevcut modelde %30 olan τ değeri %10 ve %50 arasında %5 aralıklar ile değiştirilmiştir. τ değerinin artması müşterilerden toplanan kullanılmış ürün kalitesinin artması, τ değerinin düşmesi ise demonte edilecek kullanılmış ürün miktarının artması manasına gelmektedir. Çizelge 4.47 farklı τ değerleri altında elde edilen amaç fonksiyonu değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4.47. Senaryo 7'ye göre elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

					τ (%)
	10%	**15%**	**20%**	**25%**	**30%**
OBJ	330131.59	325574.10	320415.82	315921.86	313004.97
OBJ1 (%)	30.39	30.67	30.78	30.43	30.11
OBJ2 (%)	67.33	66.93	66.36	66.90	67.11
OBJ3 (%)	0.16	0.25	0.36	0.45	0.55
OBJ4 (%)	2.12	2.15	2.50	2.22	2.24
CPU (sn)	69	137	85	63	316
	35%	**40%**	**45%**	**50%**	
OBJ	308290.78	303818.74	300510.01	297209.64	
OBJ1 (%)	29.69	29.31	28.87	28.42	
OBJ2 (%)	67.72	68.29	68.61	68.94	
OBJ3 (%)	0.65	0.75	0.85	0.96	
OBJ4 (%)	1.95	1.65	1.66	1.68	
CPU (sn)	381	201	282	340	

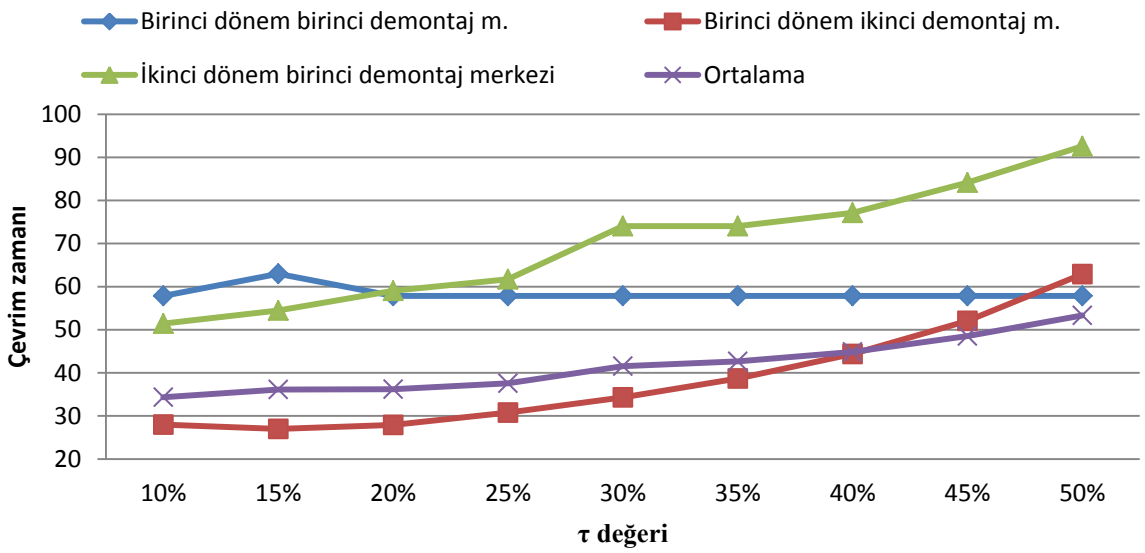
Şekil 4.42 farklı τ değerleri altında amaç fonksiyonu değerlerindeki değişimleri göstermektedir. Şekil 4.42'ye göre müşterilerden dönen kullanılmış ürünlerin yenileme

merkezlerine doğrudan gönderilme oranlarının (kalite seviyelerinin artırılması) %10'dan %50'ye çıkarılmaları, toplam maliyetin %9.97, taşıma maliyetinin %15.81, satın alma maliyetinin %7.82 ve istasyon açma maliyetinin %28.57 oranında azalmasına neden olmuştur. Diğer taraftan beklendiği gibi yenileme maliyeti %446.41 oranında artmıştır.



Şekil 4.42. Toplanan ürün kalitesinin (τ) amaç fonksiyonları üzerine etkisi

Şekil 4.43, τ değeri artarken demontaj tesislerindeki çevrim zamanlarını göstermektedir. İkinci dönemde ikinci demontaj merkezinde çok az miktarda ürün demonte edildiği için buradaki çevrim zamanları dikkate alınmamıştır.



Şekil 4.43. Toplanan ürün kalitesinin (τ) çevrim zamanı üzerine etkisi

Şekil 4.43'e göre τ değerinin artması demonte edilecek ürün miktarının düşmesine diğer bir ifade ile çevrim zamanlarının artmasına sebep olmuştur. Maksimum çevrim zamanı ikinci dönemde birinci demontaj merkezinde gerçekleşmişken, minimum çevrim zamanı birinci dönemde ikinci demontaj merkezinde gerçekleşmiştir. τ değerinin %10'dan %50'ye çıkarılması ortalama çevrim zamanı süresinde %55.42'lik bir artışa neden olmuştur.

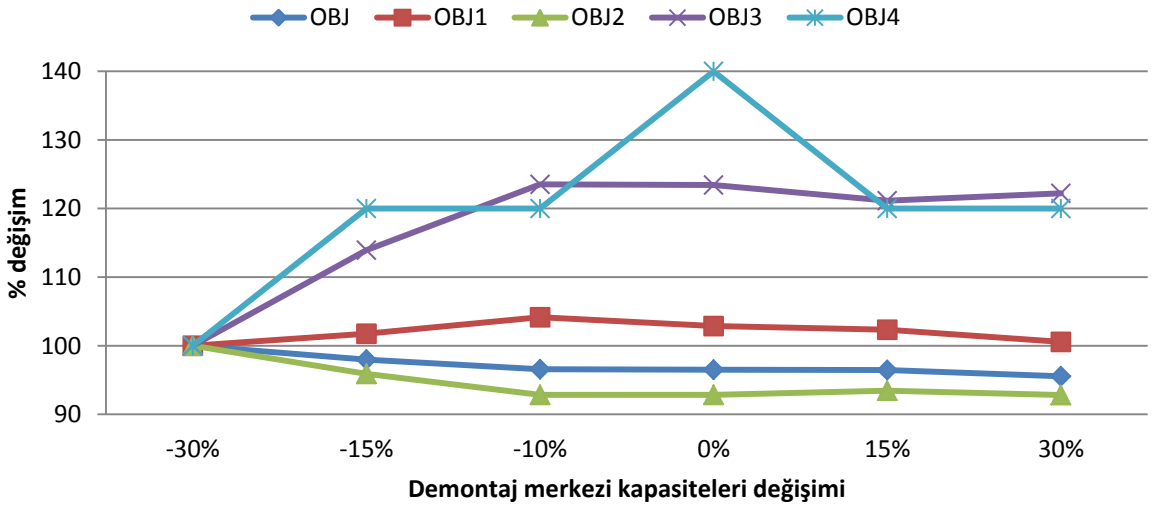
4.5.1.8. Demontaj merkezleri kapasitelerinin etkisi (Senaryo 8)

Bu son senaryo analizinde demontaj merkezlerindeki parça kapasitelerinin amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi sorgulanmıştır. Bu amaçla, başlangıç kapasite değerleri -%30 ve +%30 arasında farklı aralıklar ile değiştirilmiştir. Çizelge 4.48 farklı kapasite değerleri altında elde edilen amaç fonksiyonu değerlerini ve toplam maliyet içindeki yüzdelerini göstermektedir.

Çizelge 4.48. Senaryo 8'e göre elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

Amaç fonksiyonu	Demontaj merkezi kapasitelerindeki değişim					
	-30%	**-15%**	**-10%**	**0%**	**15%**	**30%**
OBJ	324331.39	317785.59	313201.01	313004.97	312867.05	309892.76
OBJ1 (%)	28.25	29.34	30.47	30.11	29.97	29.73
OBJ2 (%)	69.77	68.28	67.07	67.11	67.58	67.78
OBJ3 (%)	0.43	0.50	0.55	0.55	0.54	0.55
OBJ4 (%)	1.54	1.89	1.92	2.24	1.92	1.94
CPU (sn)	641	934	1195	316	709	734

Şekil 4.44' göre demontaj merkezlerine ait kapasite değerleri -%30'dan +%30'a çıkarıldığında taşıma maliyeti %0.55, yenileme maliyeti %9.23 ve istasyon açma maliyeti %20 oranında artarken, toplam maliyet ve satın alma maliyeti sırasıyla %4.46 ve %7.17 oranında azalmıştır.



Şekil 4.44. Demontaj merkezi kapasitelerinin amaç fonksiyonları üzerine etkisi

4.6. Model 6'ya Ait Sayısal Örnek

Bu bölümde, önerilen altıncı modele ait sayısal bir örnek verilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Bölüm 3.2.3.2'de verilen altıncı model önceden de belirtildiği gibi KDTZ ağı ve DHD problemi entegrasyonunun belirsizlik altında modellenmesiydi. Bu bölümde uygulanacak olan sayısal örnekte bir önceki bölümde verilen ağ ve ürün yapısı aynı şekilde alınmıştır. Tek fark bazı parametre değerlerinin bulanık olmasıdır. Önerilen modelin açıklanması sırasında bulanık parametrelerin kötümser, olası ve iyimser değerlerden oluşan üçgen bulanık sayılar ile ifade edildiği belirtilmişti. İlk olarak bulanık parametrelerin en olası (orta değer) (n^m) değerleri Çizelge 4.49'da

belirtilen aralıklar arasında rassal olarak üretilmiştir. Çizelge 4.49'da verilmeyen kesin parametreler bir önceki bölümde verilen sayısal değerlerdir. Daha sonra en kötümser (n^p) ve en iyimser (n^o) değerler r_1 ve r_2 rassal olacak şekilde aşağıdaki matematiksel işlemler sayesinde elde edilmiştir (Pishvaee ve Torabi, 2010).

$n^o = (1 + r_1)n^m$ (iyimser değerlerin bulunması)

$n^p = (1 - r_2)n^m$ (kötümser değerlerin bulunması)

Çizelge 4.49. En olası değerlerin elde edilmesi

Parametre	Aralık	Parametre	Aralık
$\tilde{a}_{icp}$	~ uniform (400, 600)	$\tilde{h}$	~ uniform (8, 12)
$\tilde{b}_{jp}$	~ uniform (470, 670)	$\tilde{O}$	~ uniform (900, 1100)
$\tilde{c}_{kp}$	~ uniform (330, 580)	$\tilde{\theta}_{max}$	~ uniform (0.7, 0.9)
$\tilde{u}_{lp}$	~ uniform (160, 190)	$\tilde{\theta}_{min}$	~ uniform (0.1, 0.3)
$\tilde{e}_{mp}$	~ uniform (200, 230)	$\tilde{\tau}$	~ uniform (0.2, 0.4)
$\tilde{f}_{rp}$	~ uniform (210, 260)	$\tilde{\kappa}$	~ uniform (0.6, 0.8)
$\tilde{g}_{dcp}$	~ uniform (200, 490)	$\tilde{d}_{Bt}$	~ uniform (6, 28)
$\tilde{t}$	~ uniform (0.05, 0.06)	$\widetilde{W}_{time}$	~ uniform (51000, 53000)
$\tilde{s}_{ic}$	~ uniform (20, 30)	r_1, r_2	~ uniform (0.1, 0.3)

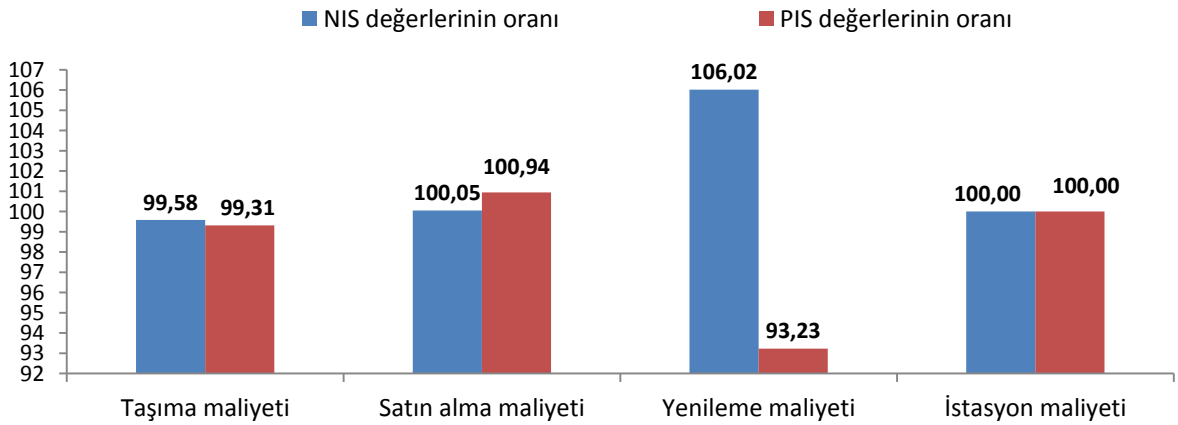
Bu bölümdeki tüm analizler GAMS/COINBONMIN çözücüsünde Xeon 3.16 GHz işlemcili ve 8 GB RAM'li bir bilgisayarda yapılmıştır. Yukarıda verilen bulanık ifadeler (hem amaç fonksiyonu hem de kısıtlarda bulunan) w_2=4/6, $w_1 = w_3$=1/6, α=0.5 değerleri kullanılarak hem ağırlıklı ortalama yöntem hem de melez yönteme göre durulaştırılmıştır. Durulaştırılan modellerin teker teker çözülmesi ile her bir amaç fonksiyonuna ait PIS ve NIS değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.50).

Çizelge 4.50. Durulaştırılmış modellerin amaç fonksiyonlarına ait alt ve üst sınırlar

	Ağırlıklı ortalama yöntem		**Melez yöntem**	
	NIS ($)	**PIS ($)**	**NIS ($)**	**PIS ($)**
$\boldsymbol{Z_1}$ **(taşıma maliyeti)**	198383.84	80977.52	197560.19	80422.02
$\boldsymbol{Z_2}$ **(satın alma maliyeti)**	322118.44	207854.22	322288.57	209815.25
$\boldsymbol{Z_3}$ **(yenileme maliyeti)**	2595.20	821.87	2751.46	766.22
$\boldsymbol{Z_4}$ **(istasyon maliyeti)**	24321.60	4053.60	24321.60	4053.60

Şekil 4.45 melez yönteme göre elde edilen NIS ve PIS değerlerinin ağırlıklı ortalama yöntemine göre elde edilen NIS ve PIS değerlerine oranlanması sonucundaki durumu göstermektedir. Şekil 4.45'e göre melez yöntem ile elde edilen NIS değerleri, ağırlıklı ortalama yöntemine göre elde edilen NIS değerlerinden büyük çıkmıştır (taşıma maliyeti hariç). PIS değerlerinde ise satın alma maliyeti hariç melez yönteme göre elde

edilen değerler ağırlıklı ortalama yöntemine göre elde edilen değerlerden daha iyidir. Diğer bir ifade ile melez yönteme göre durulaştırılmış modeller ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırılmış modellerden daha iyi alt sınır değerleri elde etmiştir. En yüksek fark yenileme maliyetinin NIS değerlerinde elde edilmiştir. İstasyon açma maliyetinin alt ve üst sınır değerleri aynı (6 ve 24 istasyon) olduğu için her iki durumda da aynı PIS ve NIS değerleri elde edilmiştir.

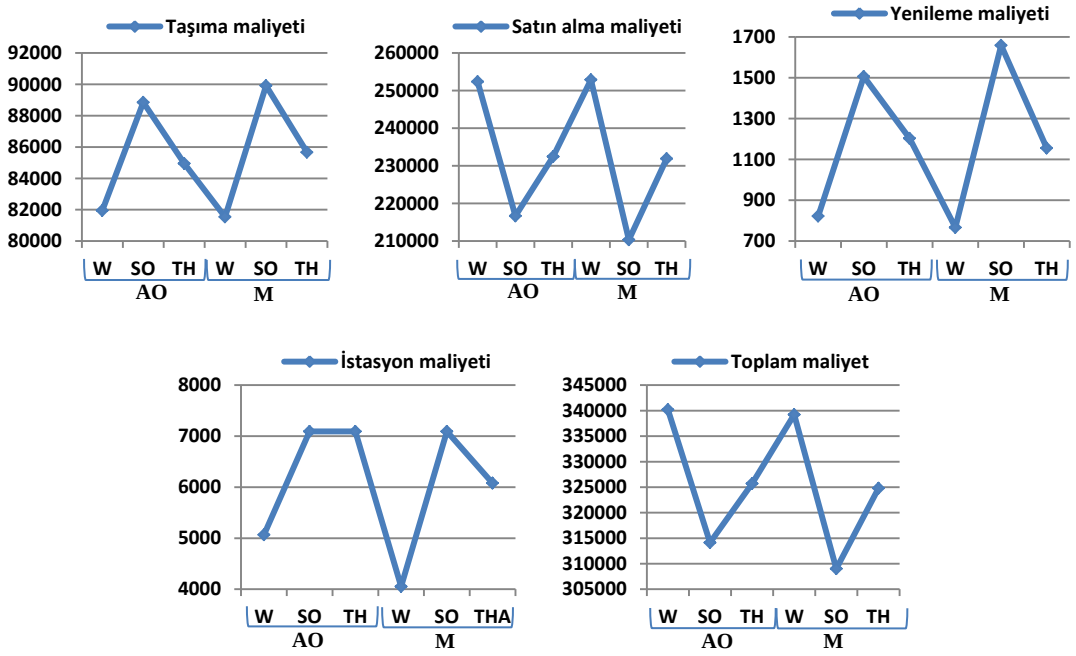


Şekil 4.45. NIS ve PIS değerlerinin karşılaştırılması

Eşitlik (3.53) yardımı ve Çizelge 4.50'deki PIS ve NIS değerleri ile her bir amaç fonksiyonu için üyelik fonksiyonları tanımlanmış, daha sonra bu üyelik fonksiyonları kullanılarak çok amaçlı deterministik modeller tek amaçlı hale dönüştürülmüştür. Bu dönüştürme işlemi için Werners (1988), Selim ve Özkarahan (2008) ve Torabi ve Hassini (2008) tarafından önerilen etkileşimli bulanık yaklaşımlar kullanılmıştır. Etkileşimli bulanık yaklaşımların amaç fonksiyonları için γ: 0.4 ve $\zeta_{1,2,3,4}$: 0.4, 0.3, 0.1 ve 0.2 olarak ele alınmıştır. Bu katsayılara göre amaç fonksiyonlarına verilen önem sırası $\zeta_1 > \zeta_2 > \zeta_4 > \zeta_3$ şeklinde olmuştur. Çizelge 4.51 elde edilen performans göstergelerini gösterirken, Şekil 4.46 amaç fonksiyonlarının karşılaştırmalı bir analizini göstermektedir.

Çizelge 4.51. 3 farklı yaklaşıma göre elde edilen sonuçlar

	Ağırlıklı ortalama yöntem			Melez yöntem			
	Werners	**Selim ve Özkarahan**	**Torabi ve Hassini**	**Werners**	**Selim ve Özkarahan**	**Torabi ve Hassini**	**Ortalama**
Z_1	81953.25	88849.38	84949.49	81543.15	89915.70	85663.09	85479.01
Z_2	252370.00	216690.00	232460.00	252870.00	210330.00	231890.00	232768.30
Z_3	821.87	1506.11	1203.74	766.22	1659.07	1155.77	1185.46
Z_4	5067.00	7093.80	7093.80	4053.60	7093.80	6080.40	6080.40
Toplam	340212.12	314139.29	325707.03	339232.97	308998.57	324789.26	325513.21
$\mu(Z_1)$	0.99	0.93	0.97	0.99	0.92	0.96	0.96
$\mu(Z_2)$	0.61	0.92	0.78	0.62	1.00	0.80	0.79
$\mu(Z_3)$	1.00	0.61	0.78	1.00	0.55	0.80	0.79
$\mu(Z_4)$	0.95	0.85	0.85	1.00	0.85	0.90	0.90
Ortalama	0.89	0.83	0.85	0.90	0.83	0.87	---
CPU (sn)	823	1092	1266	51	9042	2383	---



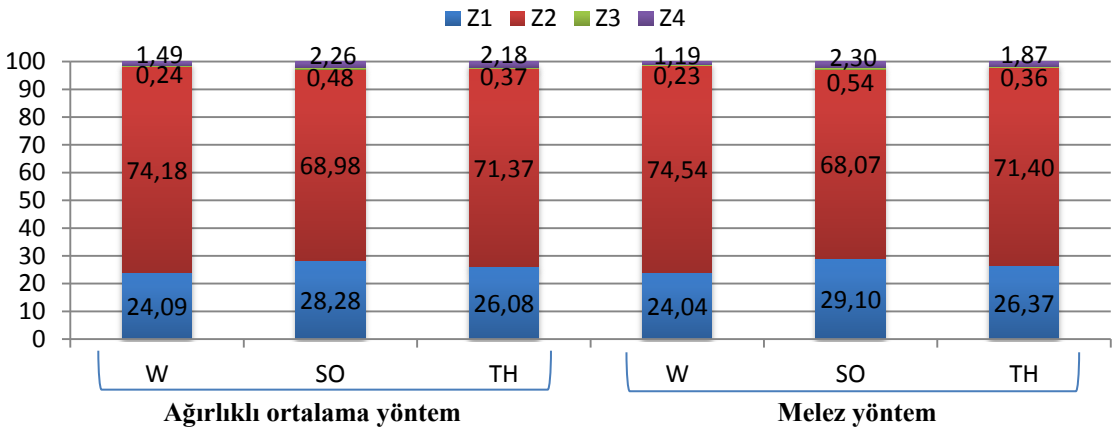
Şekil 4.46. Her bir yaklaşıma göre amaç fonksiyonlarının karşılaştırılması (W: Werners; SO: Selim ve Özkarahan; TH: Torabi ve Hassini; AO: Ağırlıklı ortalama yöntemi; M: Melez yöntem)

Elde edilen sonuçlara göre yapılan çıkarımlar aşağıda verilmiştir.

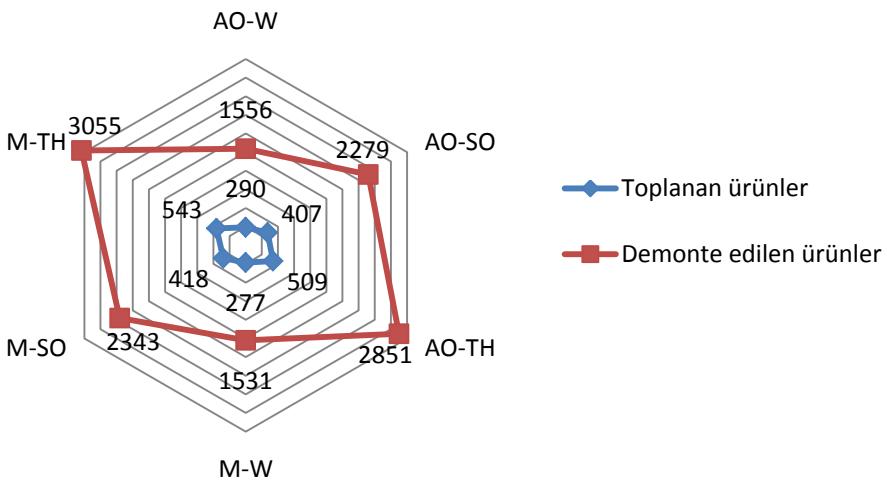
- Ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırılmış modeller, melez yönteme göre durulaştırılmış modellere nazaran daha kötü amaç fonksiyonu değerleri üretmiştir. Örneğin ağırlık ortalama yöntemi tabanlı Werners (1988), Selim ve Özkarahan (2008) ve Torabi ve Hassini (2008) yaklaşımlarından elde edilen toplam maliyet değerleri melez yöntem tabanlı elde edilen değerlerden sırasıyla %0.29, %1.66 ve %0.28 daha büyüktür.
- Çözüm süresi açısından bakıldığında melez yöntem, ağırlıklı ortalama yöntemine göre daha uzun sürede sonuç vermiştir. Etkileşimli bulanık

programlama yaklaşımları arasından ise en hızlı çözüm veren Werners (1988) yaklaşımı iken, en uzun süren Selim ve Özkarahan (2008)'ın yaklaşımıdır.

- En yüksek ortalama tatmin seviyesi melez yönteme göre durulaştırılmış Werners (1988) yaklaşımı ile elde edilirken, en düşük amaç fonksiyonu yine melez yöntemle durulaştırılan Selim ve Özkarahan (2008) yaklaşımı olmuştur.
- Tüm yaklaşımlar sonucu elde edilen sonuçlar arasında toplam maliyet içindeki en büyük pay satın alma maliyetinin olmuştur (Şekil 4.47). Bunu sırasıyla taşıma, istasyon açma ve yenileme maliyeti almıştır.
- Melez yönteme göre durulaştırılmış modeller (ortalama olarak 2309 adet), ağırlıklı ortalama yönteme göre durulaştırılmış modellerden (ortalama olarak 2228) daha fazla geri dönüşümden ürün kazanmışlardır (Şekil 4.48). Etkileşimli bulanık programlama yaklaşımları arasında ise en yüksek ürün toplama ve dolayısıyla demontaj oranına sahip yaklaşım Werners (1988) yaklaşımı olmuştur.



Şekil 4.47. Her bir amaç fonksiyonunun toplam amaç fonksiyonu içindeki yüzdeleri



Şekil 4.48. Her bir yaklaşıma göre toplanan ve demonte edilen ürün miktarları

4.6.1. Model 6'ya ait senaryo analizleri

Bu bölümde uygulanan etkileşimli bulanık programlama yaklaşımlarının önemli parametrelerinden γ ve α değerleri üzerinden birtakım senaryo analizleri yapılmıştır. Elde edilen değerler üzerinden gerek uygulanan durulaştırma yöntemleri gerekse etkileşim bulanık programlama yaklaşımları hakkında yorumlarda bululunulmuştur.

4.6.1.1. γ değerinin etkisi (Senaryo 1)

γ değerinin uygulanan iki durulaştırma yöntemi (ağırlıklı ortalama ve melez) ve üç etkileşimli bulanık programlama yaklaşımı (Werners 1988; Selim ve Özkarahan 2008; Torabi ve Hassini 2008) üzerindeki etkisini ölçebilmek adına α değeri 0.5 iken γ değeri 0.1 aralığında 0-1 arasında değiştirilmiştir. Kısa sürede çözüm alabilmek adına optimal değerden %1 oranında sapma kabul edilmiştir. Her iki durulaştırma yöntemine göre W, SO ve TH yaklaşımlarından elde edilen sonuçlar Çizelge 4.52-4.54'te verilmiştir.

Çizelge 4.52. Werners (1988) yöntemine göre farklı γ değerleri altında elde edilen sonuçlar

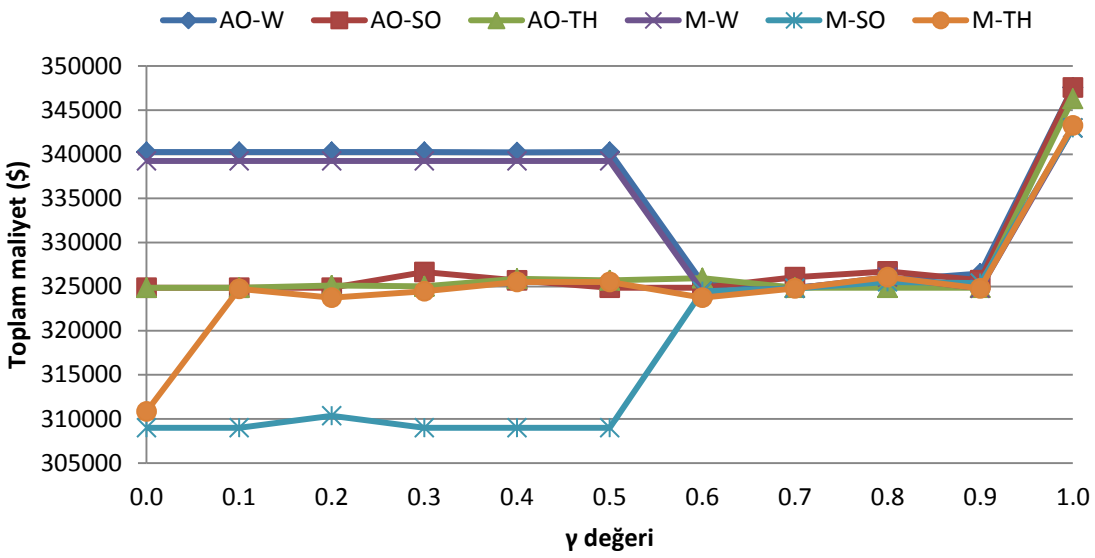
	Ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırma					Melez yönteme göre durulaştırma				
γ	Z_1 ($)	Z_2 ($)	Z_3 ($)	Z_4 ($)	CPU	Z_1 ($)	Z_2 ($)	Z_3 ($)	Z_4 ($)	CPU
0.0	80977.60	252370.00	821.87	6080.40	670	81543.15	252870.00	766.22	4053.60	52
0.1	80977.52	252370.00	821.87	6080.40	130	81543.15	252870.00	766.22	4053.60	58
0.2	80977.57	252370.00	821.87	6080.40	147	81543.15	252870.00	766.22	4053.60	43
0.3	80977.52	252370.00	821.87	6080.40	361	81543.15	252870.00	766.22	4053.60	32
0.4	81953.25	252370.00	821.87	5067.00	151	81543.15	252870.00	766.22	4053.60	51
0.5	80977.57	252370.00	821.87	6080.40	670	81543.15	252870.00	766.22	4053.60	50
0.6	85477.07	232690.00	1199.35	6080.40	149	85228.37	232010.00	1157.92	6080.40	273
0.7	85949.91	232690.00	1199.35	5067.00	31	85663.09	231890.00	1155.77	6080.40	50
0.8	84949.51	232460.00	1203.74	7093.80	54	85927.45	231890.00	1155.77	7093.80	81
0.9	87746.13	232460.00	1203.74	5067.00	31	85663.09	231890.00	1155.77	6080.40	32
1.0	105790.00	232460.00	1203.74	8107.20	4	102840.00	231890.00	1155.77	7093.80	31

Çizelge 4.53. Selim ve Özkarahan (2008) yöntemine göre farklı γ değerleri altında elde edilen sonuçlar

	Ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırma					Melez yönteme göre durulaştırma				
γ	Z_1 ($)	Z_2 ($)	Z_3 ($)	Z_4 ($)	CPU	Z_1 ($)	Z_2 ($)	Z_3 ($)	Z_4 ($)	CPU
0.0	84894.07	232690.00	1199.35	6080.40	319	89915.75	210330.00	1659.07	7093.80	737
0.1	84894.06	232690.00	1199.35	6080.40	181	89915.75	210330.00	1659.07	7093.80	28020
0.2	84894.05	232690.00	1199.35	6080.40	424	88791.37	212810.00	1651.02	7093.80	1566
0.3	84327.38	235080.00	1153.47	6080.40	329	89915.70	210330.00	1659.07	7093.80	1677
0.4	84949.49	232460.00	1203.74	7093.80	812	89915.70	210330.00	1659.07	7093.80	9042
0.5	84894.05	232690.00	1199.35	6080.40	566	89915.70	210330.00	1659.07	7093.80	518
0.6	84894.08	232690.00	1199.35	6080.40	111	85228.37	232010.00	1157.92	6080.40	58
0.7	85300.55	232460.00	1203.74	7093.80	415	85663.09	231890.00	1155.77	6080.40	57
0.8	84949.50	232460.00	1203.74	8107.20	58	85389.04	231890.00	1155.77	7093.80	38
0.9	84956.28	232460.00	1203.74	7093.80	33	86261.48	231890.00	1155.77	6080.40	34
1.0	105790.00	232460.00	1203.74	8107.20	3	102840.00	231890.00	1155.77	7093.80	31

Çizelge 4.54. Torabi ve Hassini (2008) yöntemine göre farklı γ değerleri altında elde edilen sonuçlar

	Ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırma					Melez yönteme göre durulaştırma				
γ	Z_1 ($)	Z_2 ($)	Z_3 ($)	Z_4 ($)	CPU	Z_1 ($)	Z_2 ($)	Z_3 ($)	Z_4 ($)	CPU
0.0	84894.05	232690.00	1199.35	6080.40	301	88623.69	213490.00	1636.88	7093.80	3638
0.1	84894.05	232690.00	1199.35	6080.40	351	85528.33	231970.00	1157.31	6080.40	216
0.2	84884.71	232970.00	1193.96	6080.40	306	85502.45	232010.00	1157.92	5067.00	49
0.3	85054.81	232690.00	1199.35	6080.40	55	85228.37	232010.00	1157.92	6080.40	83
0.4	84894.06	232690.00	1199.35	7093.80	236	85389.01	231890.00	1155.77	7093.80	807
0.5	84949.49	232460.00	1203.74	7093.80	630	85389.02	231890.00	1155.77	7093.80	378
0.6	85207.98	232460.00	1203.74	7093.80	208	85502.45	232010.00	1157.92	5067.00	31
0.7	84894.18	232690.00	1199.35	6080.40	32	85663.09	231890.00	1155.77	6080.40	33
0.8	84894.05	232690.00	1199.35	6080.40	75	85927.45	231890.00	1155.77	7093.80	33
0.9	84894.08	232690.00	1199.35	6080.40	90	85663.09	231890.00	1155.77	6080.40	33
1.0	105520.00	232460.00	1203.74	7093.80	8	103130.00	231890.00	1155.77	7093.80	32

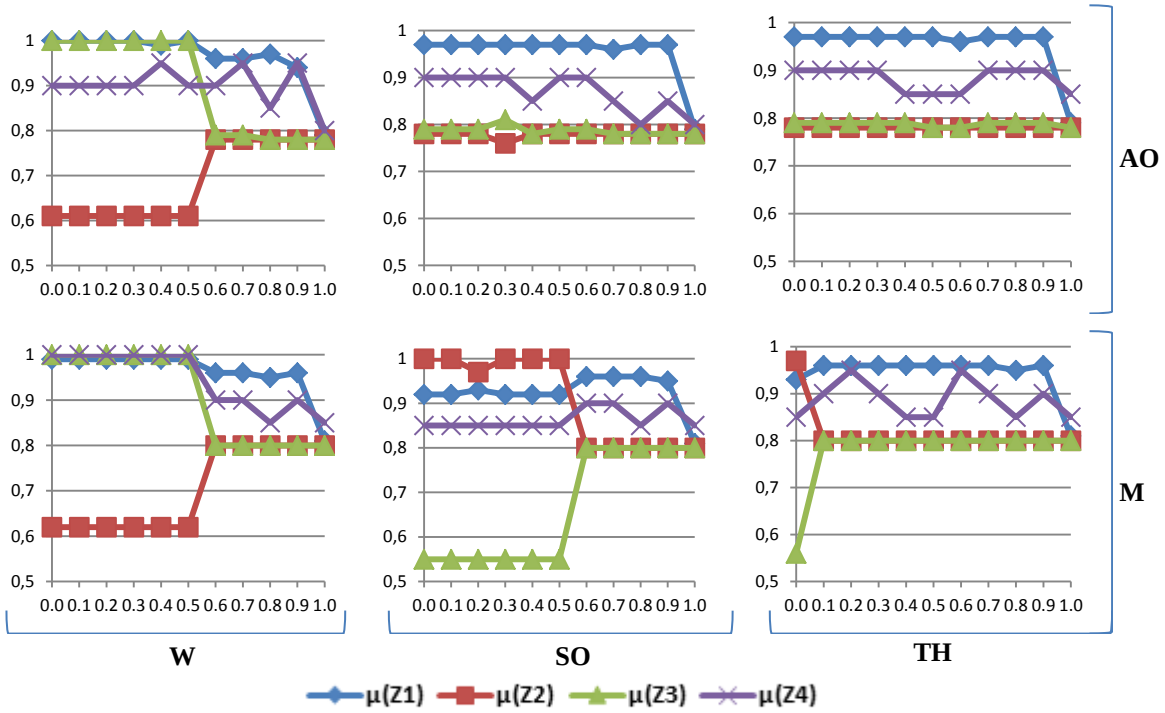


Şekil 4.49. Farklı γ değerlerinin toplam amaç fonksiyonu üzerine etkisi

Yukarıda verilen değerlerden aşağıdaki çıkarımlar elde edilebilir:

- Amaç fonksiyonu açısından melez yönteme göre durulaştırılmış modeller ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırılmış modellerden daha iyi sonuç vermiştir. Ancak çözüm süresi açısından ağırlıklı ortalama yönteme göre durulaştırılmış modeller daha kısa sürede çözüm vermiştir. Diğer bir nokta ise her iki durulaştırma yönteminde de γ değerinin artması ile gerekli çözüm süresi azalmıştır. Bu durumun en önemli sebebi γ değerinin artması ile minimum tatmin seviyesine toplam amaç fonksiyonu değerinden daha fazla önem verilmesidir. Bundan dolayı γ değeri yükseldikçe toplam amaç fonksiyonu gerekli düzeyde minimize edilmemektedir.
- Toplam maliyet açısından Şekil 4.49'a bakıldığında her iki durulaştırma yöntemi için de γ artarken W ve TH yöntemleri benzer davranış göstermiştir. Diğer taraftan tüm yaklaşımlar için γ değeri 0.6 ve 0.9 arasındaki iken toplam amaç fonksiyonunda herhangi bir değişim olmamıştır. En yüksek amaç fonksiyonu değerleri γ= 1 iken gözlemlenmiştir.
- Şekil 4.50 farklı γ değerlerinin her bir amaç fonksiyonu tatmin seviyeleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Yatay kısımda durulaştırma yöntemleri dikey kısımda ise etkileşimli bulanık programlama yaklaşımları gösterilmiştir. γ değerinin artması toplam maliyeti artırdığı için her bir amaç fonksiyonuna ait tatmin seviyeleri de γ değerinin artması ile düşmüştür.

- Şekil 4.50 toplam satın alma maliyeti ile toplam yenileme maliyetlerinin birbirleriyle çelişkili olduğunu göstermektedir. Birindeki artış veya azalış diğerinde ters orantılı bir etki yaratmaktadır.
- Son olarak Şekil 4.50'ye göre melez yöntemle durulaştırılmış modeller ağırlıklı ortalama yöntem ile durulaştırılmış modellere nazaran γ değerine daha duyarlıdır. Etkileşimli bulanık programlama yaklaşımları açısında ise W ve SO yaklaşımları TH yaklaşımına göre γ değerine daha duyarlıdır.



Şekil 4.50. Farklı γ değerlerinin tatmin seviyeleri üzerine etkisi

4.6.1.2. α değerinin etkisi (Senaryo 2)

Bu senaryo analizinde γ=0.4 iken, α değeri 0 ve 1 arasında 0.25 aralıklar ile değiştirilmiştir. Çizelge 4.55-4.57'de farklı α değerleri altında elde edilen amaç fonksiyonu, tatmin seviyeleri ve çözüm süreleri verilmiştir.

Çizelge 4.55. Werners (1988) yöntemine göre farklı α değerleri altında elde edilen sonuçlar

	Ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırma					Melez yönteme göre durulaştırma				
α	Z_1 (\$)	Z_2 (\$)	Z_3 (\$)	Z_4 (\$)	CPU	Z_1 (\$)	Z_2 (\$)	Z_3 (\$)	Z_4 (\$)	CPU
0.00	82010.00 0.99	252240.00 0.61	821.41 1.00	5067.00 0.95	150	70586.08 1.00	227150.00 0.70	604.29 1.00	4053.60 1.00	3
0.25	82021.60 0.99	252310.00 0.61	821.64 1.00	5067.00 0.95	132	75750.22 1.00	239650.00 0.67	699.70 1.00	4053.60 1.00	2
0.50	81953.25 0.99	252370.00 0.61	821.87 1.00	5067.00 0.95	823	81543.15 0.99	252870.00 0.62	766.22 1.00	4053.60 1.00	51
0.75	80989.05 1.00	252430.00 0.61	822.09 1.00	6080.40 0.90	929	87824.70 0.98	265210.00 0.52	877.42 1.00	5067.00 0.95	74
1.00	81016.39 1.00	252300.00 0.61	822.32 1.00	6080.40 0.90	1038	100500.00 0.91	246300.00 1.00	1624.15 0.52	8107.20 0.80	48093

Çizelge 4.56. Selim ve Özkarahan (2008) yöntemine göre farklı α değerleri altında elde edilen sonuçlar

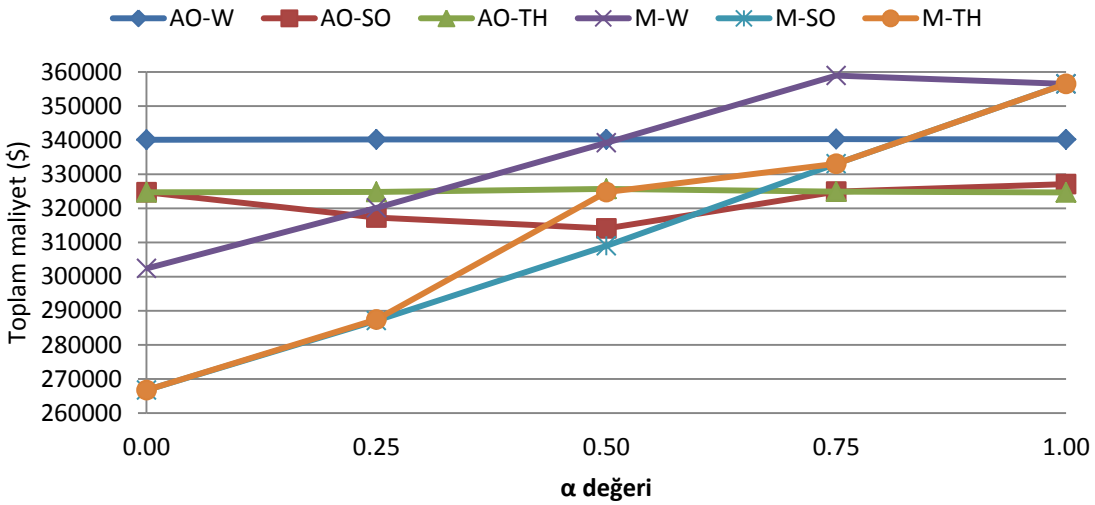
	Ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırma					Melez yönteme göre durulaştırma				
α	Z_1 (\$)	Z_2 (\$)	Z_3 (\$)	Z_4 (\$)	CPU	Z_1 (\$)	Z_2 (\$)	Z_3 (\$)	Z_4 (\$)	CPU
0.00	84852.25 0.97	232590.00 0.78	1198.47 0.79	6080.40 0.90	1418	82842.62 0.91	176290.00 0.99	1498.00 0.65	6080.40 0.90	292
0.25	88761.57 0.93	221050.00 0.89	1421.24 0.66	6080.40 0.90	6268	85947.49 0.92	193430.00 0.99	1617.31 0.58	6080.40 0.90	197
0.50	88849.38 0.93	216690.00 0.92	1506.11 0.61	7093.80 0.85	1092	89915.70 0.92	210330.00 1.00	1659.07 0.55	7093.80 0.85	9042
0.75	84916.29 0.97	232740.00 0.78	1199.77 0.79	6080.40 0.90	985	95101.94 0.91	228250.00 1.00	1638.77 0.54	8107.20 0.80	98037
1.00	85285.04 0.96	235640.00 0.75	1139.12 0.82	5067.00 0.95	363	100500.00 0.91	246300.00 1.00	1624.15 0.52	8107.20 0.80	96109

Çizelge 4.57. Torabi ve Hassini (2008) yöntemine göre farklı α değerleri altında elde edilen sonuçlar

	Ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırma					Melez yönteme göre durulaştırma				
α	Z_1 (\$)	Z_2 (\$)	Z_3 (\$)	Z_4 (\$)	CPU	Z_1 (\$)	Z_2 (\$)	Z_3 (\$)	Z_4 (\$)	CPU
0.00	84859.88 0.97	232590.00 0.78	1198.47 0.79	6080.40 0.90	7997	82842.62 0.91	176290.00 0.99	1498.23 0.65	6080.40 0.90	1365
0.25	85927.33 0.96	232640.00 0.78	1198.91 0.79	5067.00 0.95	1632	86290.99 0.92	193430.00 0.99	1617.31 0.58	6080.40 0.90	282
0.50	84949.49 0.97	232460.00 0.78	1203.74 0.78	7093.80 0.85	1266	85663.09 0.96	231890.00 0.80	1155.77 0.80	6080.40 0.90	2383
0.75	84916.29 0.97	232740.00 0.78	1199.77 0.79	6080.40 0.90	9317	95101.94 0.91	228250.00 1.00	1638.77 0.54	8107.20 0.80	26334
1.00	84987.15 0.97	232420.00 0.78	1200.21 0.79	6080.40 0.90	27841	100500.00 0.91	246300.00 1.00	1624.15 0.52	8107.20 0.80	29007

Çizelge 4.55-4.57'ye göre,

- Ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırılmış modeller (çizelgelerin sol tarafları) farklı α değişimlerinden etkilenmemişken, α değerinin artması melez yönteme göre durulaştırılmış modellerde toplam maliyetin de artmasına yol açmıştır (Şekil 4.51).
- Çözüm sürelerine bakıldığında ise düşük α değerli modeller yüksek α değerli modellere göre daha kısa sürede çözülmüştür.
- Etkileşimli bulanık programlama yaklaşımları açısından SO ve TH (melez yönteme göre durulaştırılmış), α değeri 0 iken en düşük toplam maliyeti elde etmişlerdir.



Şekil 4.51. Farklı α değerlerinin toplam amaç fonksiyonu üzerine etkisi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Son yılların popüler teması olan çevreye duyarlılık anlayışı, birçok organizasyonun günlük ve stratejik aktivitelerini gerçekleştirirken dikkat ettikleri bir konu haline gelmiştir. İşletmeler, tedarik zinciri faaliyetlerini, çevreye daha az zarar verecek şekilde yapılandırmaya özen gösterirken, sosyal, ekonomik ve operasyonel düzeylerde kazanımlarda elde etmektedirler. Tedarik zincirleri daha çok tedarikçiler, fabrikalar, dağıtım merkezleri ve nihai kullanıcılardan oluşan ve bunlar arasındaki bilgi ve malzeme akışının istenen şekilde ve zamanda olmasını sağlayan ağ yapıları olarak karşımıza çıkıyorken; artan çevresel faktörler, azalan kaynaklar ve birtakım yasal düzenlemelerden dolayı bu akış nihai kullanıcılardan sonraki aşamalarda da devam etmektedir. Günümüzde, çevresel kaygılara ve yasal düzenlemelere ek olarak ekonomik ve ekolojik geri kazanımlar, kullanımı bitmiş ürünlerin toplanmasını, demonte edilmesini, test edilerek sınıflandırıldıktan sonra, farklı aşamalardan geçirilerek (bakım sonrası tekrar kullanım, yeniden üretim veya geri dönüşüm gibi) üretim sistemlerine tekrar sokulmaları tersine ve KDTZ yardımı ile sağlanmaktadır.

İster ileri isterse TTZ olsun, bir tedarik zincirinde yer alan öğelerin sayılarının ve yerlerinin tespiti, birbirleri arasındaki fiziksel akış miktarının belirlenmesi gibi alt problemler literatürde ağ tasarımı problemi olarak ele alınmaktadır. Fakat tersine veya KDTZ ağlarının tasarımı ileri lojistik ağlarına göre daha karmaşıktır. Ürünlerin müşterilere ulaştırılmasına ek olarak, hangi ürünlerin hangi müşterilerden ne miktarda toplanacağının belirlenmesi, toplama, geri dönüşüm veya benzeri merkezlerin nerelerde konumlandırılacağı, üründeki deformasyon oranının neye göre sınıflandırılacağı gibi kararlar ve bu kararların tamamının belirsizliklere bağlı olması tasarım aşamasını oldukça zorlaştırmaktadır.

Tersine ve KDTZ ağlarının tasarlanmasında ve tasarlanan yapının modellenmesindeki kilit nokta ileri ve tersine lojistik kısımlarının başarılı bir şekilde entegre edilip edilememesidir. Bu entegrasyonun başarılı olması ise geri dönüşümün en önemli süreçlerinden biri ve zamanla saygınlığını kazanmakta olan demontaj kavramıdır. Demontaj, bir ürünün kendisini oluşturan parçalara sistematik bir şekilde ayrılması yani başka bir deyişle tersine montaj olarak tanımlanabilirken, DHD problemi, demontaj görevlerini sıralı bir istasyon dizisine atarken demontaj görevleri arasındaki öncelik ilişkilerini sağlayıp, bir performans ölçütünü optimize etmeyi amaçlar.

Demontajda olduğu gibi tersine ve KDTZ'ler de belirsiz bir çevrede faaliyet göstermektedir. Bu tarz belirsizlikler daha çok ürünlerin geri kazanım aşamasındaki oranlarda ortaya çıkmaktadır. Bugüne kadar geliştirilen tedarik zinciri modellerinde (çoğunlukla İTZ'lerde) bu belirsizlikler daha çok olasılık yaklaşımları ile ele alınmış fakat bu yaklaşımlarda geçmiş verilerin yanlış veya yetersiz olmasından dolayı olasılık yaklaşımları istenen sonuçları vermede etkisiz kalmıştır. Bulanık mantık yardımıyla mevcut belirsizlikler daha iyi tanımlanabilmekte ve ele alınabilmekte, dolayısıyla gerçek hayat problemlerine daha esnek ve uygun modeller geliştirilebilmektedir.

Bu tezde, TTZ/KDTZ ağ tasarımı problemleri ile DHD problemi gerçek hayattaki belirsizlikleri de yansıtabilmesi amacıyla bulanıklık altında entegre edilmiştir. Söz konusu entegrasyon sayesinde iki problem arasındaki etkileşimlerin daha iyi irdelenmesi, TTZ/KDTZ ağ yapılarının daha iyi gözlemlenmesi ve çevreye daha hızlı uyum sağlaması amaçlanmıştır. Ele alınan problemde amaç stratejik açıdan sırasıyla tedarikçiler, fabrikalar, dağıtım merkezleri, müşteriler, toplama merkezleri, tekrar kazanım merkezleri ve geri dönüşüm merkezleri arasındaki malzeme akışının sağlanması ve toplam maliyetlerin minimize edilmesi iken taktiksel açıdan ise müşterilerden toplanan ürünlerin en düşük maliyette demonte edilmesini amaçlamaktadır.

5.1. Sonuçlar

Söz konusu entegrasyona ulaşabilmek için ardıl ancak farklı 6 matematiksel model geliştirilmiştir. Birinci modelde tipik bir KDTZ ağ tasarımı problemi için KTDP modeli geliştirilmiştir. İkinci modelde ise birinci modelin belirsiz olarak ele alındığı ÇABP modeli geliştirilmiştir. Üçüncü modelde nihai entegrasyona zemin hazırlaması amacıyla TTZ ağ tasarımı ve DHD problemlerinin entegre edildiği KTDOP modeli önerilmiştir. Dördüncü model, üçüncü modelin BMP ile belirsizlik altında modellenmesi iken beşinci modelde KDTZ ağ tasarımı ve DHD problemleri entegrasyonu için KTDOP modeli geliştirilmiştir. Son model ise nihai hedef olan tüm parametrelerin bulanık olarak ele alındığı KDTZ ağ tasarımı ve DHD problemleri entegrasyonu için farklı BMP yaklaşımlarının test edildiği modeldir. Önerilen her bir modelin test edilmesi sonucunda elde edilen çıkarımlar aşağıda özetlenmiştir.

Model 1'e ait sonuçlar

Model 1 hem ileri hem de tersine akışların eş zamanlı optimize edildiği KDTZ ağı için geliştirilen karma tamsayılı bir modeldir. Ele alınan KDTZ ağının ileri akışı hammaddelerin satın alınması, montajlanması ve nihai kullanıcılara ulaştırılmasından oluşurken; tersine akış kullanılan ürünlerin toplanması, demonte edilmesi, yenilenmesi ve gerekirse atığa yollanmasından oluşmaktadır. Önerilen ağ, (i) hammadde tedarikçilerinden, (ii) fabrikalardan, (iii) perakendecilerden, (iv) müşterilerden, (v) toplama merkezlerinden, (vi) demontaj merkezlerinden, (vii) yenileme merkezlerinden ve (viii) atık tesislerinden oluşmaktadır. Uygulanan senaryo analizlerine göre elde edilen çıkarımlar aşağıda verilmiştir.

- Amaç fonksiyonları arasında en baskın maliyet taşıma iken, bunu sırasıyla satın alma, yenileme ve tesis açma maliyetleri izlemektedir.
- Pazarlama teknikleri veya mevsimsel nedenlerden dolayı elde edilebilecek %40'lık bir talep artışı, karar vericiye %39'luk bir toplam maliyet artışı olarak geri dönmektedir.
- Eğer karar verici müşterilerden toplanan ürün yüzdesini %5'ten %50 rakamlarına çıkarabilirse, toplam maliyet %19.22 oranında düşüş göstermektedir.
- Fabrika ve perakendeci kapasitelerinin artması toplam maliyet üzerinde az da olsa olumlu etki göstermektedir. Olası kapasite artırımlarındaki önceliğin perakendecilerden ziyade fabrikalara verilmesi toplam maliyette daha fazla düşüşe neden olmaktadır.
- Son olarak, karar vericinin mevcut KDTZ ağını 6 kat artırması, toplam maliyette de 5.74 katlık bir artışa sebep olacaktır.

Model 2'ye ait sonuçlar

Model 2, Model 1'in belirsizlik altında modellenmiş halidir. Modelde taşıma, yenileme ve satın alma maliyetlerinden oluşan üretim ve dağıtım maliyetleri ve tesis açma maliyetleri ve talep, kapasite ve geri dönüşüm oranları bulanık olarak ifade edilmiş, çözüm yöntemi olarak Liang ve Cheng (2009) tarafından önerilen çok amaçlı

bulanık yaklaşım uygulanmıştır. Uygulanan senaryo analizlerine göre elde edilen çıkarımlar aşağıda verilmiştir.

- Belirsizlik altında en baskın maliyet satın alma iken (%73), bunu sırasıyla taşıma (%16), tesis açma (%8) ve yenileme (%3) maliyetleri izlemiştir.
- Bulanık ifadelerin durulaştırılması sırasında iyimser değerler baskınken, α değerinin 0'dan 1'e çıkarılması toplam maliyette %4.14'lük bir düşüşe; tatmin seviyesinde ise %47.64'lük bir artışa yol açmıştır.
- Kötümser ve iyimser değerlere ait aralığın boyutu elde edilen çözümler üzerinde son derece etkili çıkmıştır. Örneğin, iyimser değerlerin baskın olduğu durum için aralık değerinin %0'dan %100'e genişletilmesi toplam maliyeti %14.31 oranında artırırken, tatmin seviyesini %58.59 oranında düşürmüştür. Tam tersi durumda yani kötümser değerlerin baskın oldğuğu durum için aralık değerinin %0'dan %100'e genişletilmesi toplam maliyeti %15.75 oranında azaltırken, tatmin seviyesini %180 oranında artırmıştır.
- Son olarak uygulanan Liang ve Cheng (2009) yaklaşımı ile karar verici hedeflediği tatmin seviyesine ulaşana kadar bulanık veriler ile oynayabileceği bir sisteme kavuşmuştur.

Model 3'e ait sonuçlar

Tez kapsamında geliştirilen 3. modelde TTZ ve DHD problemlerinin eş zamanlı optimizasyonu için KTDOP modeli önerilmiştir. Önerilen modelde ürün akışı müşterilerden, toplama merkezlerinden, demontaj merkezlerinden ve fabrikalardan oluşan bir TTZ ağında meydana gelmektedir. Bu ağ yapısında karar vericinin çözmesi gereken 2 temel problem vardır. Bunlardan birincisi tüm ağdaki taşıma maliyetini minimize edecek optimum dağıtım akışını bulmak iken, ikincisi de demontaj merkezlerinde kullanılmış ürünlerin demontajının en az iş istasyonu ile yapılmasının sağlanmasıdır. Karar vericinin tüm ağ sürecindeki akışı kontrol edebilmesi ve iki temel problem arasındaki etkileşimi görebilmesi için bu iki problem tek bir formülasyonda entegre edilmiştir. Uygulanan senaryo analizlerine göre elde edilen çıkarımlar aşağıda verilmiştir.

- Eğer karar verici %25 oranında bir talep düşüşü ile karşılaşırsa, gerekli olan toplam istasyon sayısı 7'den 6'ya düşmekte, aksi durumda (%25'lik talep artışı durumunda) ise fazladan 3 adet iş istasyonuna ihtiyaç duymaktadır. Toplam maliyet açısında ise talepteki %25'lik bir düşüş toplam maliyetin %27 oranında azalmasına, talepteki %25'lik bir artış toplam maliyette %33 oranında bir artışa neden olmaktadır.
- Günlük çalışma zamanının %25 azaltılması durumunda, karar verici %12 daha fazla maliyetle karşılaşırken 3 adet daha istasyona ihtiyaç duymaktadır. Aksi durumda yani çalışma zamanını %25 artırılması durumunda toplam maliyet %6 azalırken istasyon sayısı 1 azalmaktadır. Bundan dolayı karar vericinin toplam maliyeti düşürmek için çalışma zamanını artırması önerilebilir.
- Mevcut çalışma süresinde demontaj merkezleri ile fabrikalar arasında dengesiz bir dağıtım (4644 ve 10852 arasında) varken, çalışma zamanındaki %25'lik bir düşüş veya artış daha dengeli bir dağıtıma (7736 ve 7760) yol açmıştır. Dolayısıyla çalışma zamanının artırılması veya azaltılması ile daha dengeli bir dağıtım ağına sahip olunabilir.

Model 4'e ait sonuçlar

Dördüncü modelde gerçek hayattaki belirsizliklerin (kapasite, talep, çalışma zamanı ve amaç fonksiyonları) yansıtılabilmesi adına determistik entegre modele (Model 3) 2 farklı matematiksel programlama yaklaşımı uygulanmıştır. Birinci yaklaşım olan Zimmermann (1976) yaklaşımı 3 farklı operatörle (*maks-min operatörü, min ve maks operatörlerinin konveks kombinasyonu* ve *bulanık-ve operatörü*) test edilirken, ikinci bulanık yaklaşımda Werners (1987) tarafından önerilen yöntem uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre,

- Toplam maliyet açısından Werners (1988)'ın yaklaşımı en düşük maliyeti sağlarken, Werners (1988) yaklaşımını sırasıyla maks-min yaklaşımı, konveks kombinasyonlu yaklaşım ve bulanık-ve yaklaşımları takip etmiştir.
- İşlem zamanları açısından ise Werners (1988) yaklaşımı en uzun süreli yaklaşım olurken, en kısa sürede çözüm veren bulanık-ve yaklaşımı olmuştur.

- Zimmermann (1976) yaklaşımları içinde ise en uzun işlem süresine sahip yaklaşım konveks kombinasyonlu yaklaşım olmuştur. Bunun en temel sebebi konveks kombinasyonlu yaklaşımın diğerlerine göre yaklaşık iki kat kısıttan oluşmasıdır.
- Son olarak ise tatmin seviyesi açısından en iyi yaklaşım bulanık-ve yaklaşımı olmuştur. En düşük tatmin seviyesine sahip model ise Werners (1988) yaklaşımıdır.

Model 5'e ait sonuçlar

Beşinci modelde DHD problemi ile KDTZ ağ tasarımı problemi eş zamanlı olarak ele alınmıştır. Bu amaçla, tedarikçiler, montaj merkezleri, perakendeciler, müşteriler, toplama, yenileme, demontaj ve atık merkezlerinden oluşan bir KDTZ ağı tasarlanmıştır. Geliştirilen model stratejik açıdan KDTZ'deki taşıma, satın alma ve yenileme maliyetlerini minimize ederken, taktiksel açıdan da demontaj merkezlerindeki demontaj istasyonu açma maliyetlerini minimize etmektedir. Uygulanan senaryo analizlerine göre elde edilen çıkarımlar aşağıda verilmiştir.

- Entegre yaklaşım ile hiyerarşik yaklaşıma göre %9.04 oranında daha az toplam maliyet elde edilmiştir.
- Talep değerlerinde %40'lık bir artış toplam maliyette %62.05'lik bir artışa sebep olmuşken, toplam istasyon sayısı da %33.33 oranında artmıştır.
- Günlük çalışma saatinin 7 saatten 11 saate çıkartılması toplam taşıma maliyetinde %0.26'lık bir artışa, toplam maliyette ise %0.88'lik bir düşüşe sebep olmuştur. Vardiya süresinin DHD problemi ile doğrudan ilgili olmasından dolayı toplam istasyon açma maliyeti %37.5 oranında azalmıştır.
- Toplama ve yenileme merkezleri kapasite değerlerinin %40 artırılması taşıma maliyetini %7.35, yenileme maliyetini %33.85 ve istasyon açma maliyetini %33.33 oranında artırırken; toplam maliyeti %5.21, satın alma maliyetini de %11.58 oranında azaltmıştır.
- Ürün yapısının karmaşıklaşması ve parça sayısının artması karar vericinin hammadde temin ederken geri dönüşüm tesislerinden çok tedarikçilere yönelmesine neden olmuştur.

Model 6'ya ait sonuçlar

Tez kapsamında önerilen son modelde bir önceki modelde verilen KDTZ/DHD problemi entegrasyonu bulanık olarak ele alınmıştır. Önerilen altıncı modelde, tesis kapasiteleri, müşteri talepleri, geri dönüşüm oranları, çalışma zamanı ve amaç fonksiyonu katsayıları (birim taşıma maliyet, birim satın alma maliyeti, birim yenileme maliyeti ve istasyon açma maliyeti) bulanık olarak ifade edilmiştir. Önerilen çok amaçlı bulanık matematiksel modelin çözülebilmesi için öncelikle bulanık ifadeler durulaştırılmış ve deterministik çok amaçlı model tek amaçlı hale getirilmiştir. Bunun için iki aşamalı bir yaklaşım uygulanmıştır. İlk aşamada bulanıklık Lai ve Hwang (1992) tarafından önerilen ağırlıklı ortalama yöntemi ve Pishvaee ve Torabi (2010) tarafından önerilen melez yöntem ile durulaştırılmıştır. İkinci aşamada ise Werners (1988), Selim ve Özkarahan (2008) ve Torabi ve Hassini (2008) tarafından önerilen etkileşimli bulanık yaklaşımlar uygulanarak çok amaçlı durulaştırılmış model tek amaçlı hale getirilmiştir. Uygulanan senaryo analizlerine göre elde edilen çıkarımlar aşağıda verilmiştir.

- Ağırlıklı ortalama yöntemine göre durulaştırılmış modeller, melez yönteme göre durulaştırılmış modellere nazaran daha kötü amaç fonksiyonu değerleri üretmiştir.
- Çözüm süresi açısından bakıldığında melez yöntem, ağırlıklı ortalama yöntemine göre daha uzun sürede sonuç vermiştir. Etkileşimli bulanık programlama yaklaşımları arasından ise en hızlı çözüm veren Werners (1988) yaklaşımı iken, en uzun süren Selim ve Özkarahan (2008)'ın yaklaşımıdır.
- En yüksek ortalama tatmin seviyesi melez yönteme göre durulaştırılmış Werners (1988) yaklaşımı ile elde edilirken, en düşük amaç fonksiyonu yine melez yöntemle durulaştırılan Selim ve Özkarahan (2008) yaklaşımı olmuştur.
- Melez yönteme göre durulaştırılmış modeller, ağırlıklı ortalama yönteme göre durulaştırılmış modellerden daha fazla geri dönüşümden ürün kazanmışlardır.
- Etkileşimli bulanık programlama yaklaşımları arasında ise en yüksek ürün toplama ve dolayısıyla demontaj oranına sahip yaklaşım Werners (1988) yaklaşımı olmuştur.

5.2. Öneriler

Bundan sonraki çalışmalar için araştırmacılara aşağıdaki önerilerde bulunulabilir.

- Geliştirilen ve önerilen tüm modeller hipotetik verilere dayalı sayısal örnekler üzerinden test edilmiştir. Bunun en temel sebebi tersine ve KDTZ'lerin gerçek hayattaki uygulamalarının popülerlikleri kadar çok olmamasıdır. Ancak ilerleyen zamanlarda önerilen modellerin gerçek hayattaki problemlere uygulanması önerilebilir.
- Geliştirilen matematiksel modeller tezin içeriğinde de belirtildiği gibi optimizasyon paket programlarında çözülmüştür. Küçük ve orta boyutlu problemler için kabul edilebilir sürelerde istenen çözümlere ulaşılsa da, daha büyük problemler için kısa sürede çözüm verecek birtakım yaklaşımlar geliştirilmelidir. Bu nedenle, ilerideki çalışmalar için birçok NP-zor problemde başarı ile uygulanmış meta-sezgisel yöntemler önerilen modellere uygulanabilir.
- Önerilen matematiksel modellerde performans göstergeleri olarak daha çok geleneksel faktörler (taşıma maliyeti, satın alma maliyeti, yenileme maliyeti, tesis açma maliyeti vb.) hesaba katılmıştır. Tersine ve KDTZ'lerinin ve hatta demontaj hatlarının çevreye duyarlı yapılar olduğunu kabul edersek ele alınan geleneksel faktörlerin yanında çevresel faktörlerin de (sera gazı salınımı, gürültü, yakıt verimliliği vb.) modellere eklenmesi önerilebilir.
- Tez kapsamında geliştirilen son modelde, demontaj hatları ile KDTZ'ler eş zamanlı olarak optimize edilmişti. Tersine ağda ürünlerin demontajı sırasında demontaj hatlarının dengelenmesinin yanında ileri ağda parçaların montajı sırasında da montaj hatlarının eş zamanlı dengelenmesi ileriki çalışmalar için önerilebilir.

KAYNAKLAR

Agrawal, S. and Tiwari, M.K., 2008, A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem, *International Journal of Production Research*, 46 (6), 1405–1429.

Akçalı, E. and Çetinkaya, S., 2011, Quantitative models for inventory and production planning in closed-loop supply chains, *International Journal of Production Research*, 49 (8), 2373–2407.

Altekin, F.T., 2005, Profit-oriented disassembly line balancing, PhD Thesis, *METU Graduate School of Natural Sciences*, Ankara.

Altekin, F.T., Kandiller, L. and Özdemirel, N.E., 2008, Profit-oriented disassembly line balancing, *International Journal of Production Research*, 46 (10), 2675–2693.

Altekin, F.T. and Akkan, C., 2012, Task-failure-driven rebalancing of disassembly lines, *International Journal of Production Research*, 50 (18), 4955–4976.

Alumur, S.A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F. and Verter, V., 2012, Multi-period reverse logistics network design, *European Journal of Operational Research*, 220 (1), 67–78.

Amin, S.H. and Zhang, G., 2012, An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: multi-objective approach, *Expert Systems with Applications*, 39 (8), 6782–6791.

Battaïa, O. and Dolgui, A., 2013, A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches, *International Journal of Production Economics*, 142 (2), 259–277.

Bazaraa, M.S., Sherali, H.D. and Shetty, C.M., 2006, Nonlinear programming: theory and algorithms, *Wiley*, U.S.A.

Beamon, B.M. and Fernandes, C., 2004, Supply-chain network configuration for product recovery, *Production Planning and Control*, 15 (3), 270–281.

Beamon, B.M., 2008, Sustainability and the future of supply chain management, *Operations and Supply Chain Management*, 1 (1), 4–18.

Bellman, R.E. and Zadeh, L.A., 1970, Decision making in fuzzy environment, *Management Science*, 17 (4), 141–164.

Bilgen, B. and Özkarahan, İ., 2006, Fuzzy linear programming approach to multi-mode distribution planning problem, *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, 4251, 37–45.

Bilgen, B., 2008, Modeling of a blending and marine transportation planning problem with fuzzy mixed-integer programming, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36 (9-10), 1041–1050.

Bilgen, B., 2010, Application for fuzzy mathematical programming approach to the production allocation and distribution supply chain network problem, *Expert Systems with Applications*, 37 (6), 4488–4495.

Birdoğan, B., 2003, Tersine lojistik zorunluluk mu? Kazanç mı?, *Dokuz Eylül Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 4 (1), 18–38.

Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Wassenhove, L.N., Gabel, H.L. and Weaver, P.M., 2005, An environmental life cycle optimization model for the European pulp and paper industry, *Omega*, 24 (6), 615–629.

Blumberg, D.F., 2005, Introduction to management of reverse logistics and closed loop supply chain processes, *CRC Press*, U.S.A.

Boysen, N., Fliedner, M. and Scholl, A., 2007, A classification of assembly line balancing problems, Production, *Manufacturing and Logistics*, 183 (2), 674–693.

Chang, N.-B., Chen, Y.L. and Wang, S.F., 1997, A fuzzy interval multi objective mixed integer programming approach for the optimal planning of solid waste management systems, *Fuzzy Sets and Systems*, 89 (1), 35–60.

Chen, C.L. and Lee, W.C., 2004, Multi objective optimization of multi echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices, *Computers and Chemical Engineering*, 28 (6–7), 1131–1144.

Chen, S.-P. and Chang, P.-C., 2006, A mathematical programming approach to supply chain models with fuzzy parameters, *Engineering Optimization*, 38 (6), 647–669.

Chouinard, M., D'Amours, S. and Aït-Kadi, D., 2008, A stochastic programming approach for designing supply loops, *International Journal of Production Economics*, 113 (2), 657–677.

ÇŞB, 2012, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı* [çevrimiçi], http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/05/20120522-5.htm, [Ziyaret Tarihi: 11 Eylül 2013].

Das, K., 2012, Integrating reverse logistics into the strategic planning of a supply chain, *International Journal of Production Research*, 50 (5), 1438–1456.

De Brito, P.M. and Dekker, R., 2002, *Reverse logistics a framework* [online], http://repub.eur.nl/res/pub/543/feweco20021018095304.pdf, [Ziyaret Tarihi: 11 Eylül 2013].

De Mello, L.S.H. and Sanderson, A.C., 1990, AND/OR graph representation of assembly plans, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6 (2), 188–199.

De Mello, L.S.H. and Sanderson, A.C., 1991a, A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6 (2), 228–240.

De Mello, L.S.H. and Sanderson, A.C., 1991b, Representation of mechanical assembly sequences, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7 (2), 211–227.

Demirel, N. and Gökçen, H., 2008a, A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39 (11–12), 1197–1206.

Demirel, N.Ö. ve Gökçen, H., 2008b, Geri kazanımlı imalat sistemleri için lojistik ağı tasarımı: literature araştırması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23 (4), 903–912.

Ding, L.-P., Feng, Y.-X., Tan, J.-R. and Gao, Y.-C., 2010, A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48 (5-8), 761–771.

Dowlatshahi, S., 2005, A strategic framework for the design and implementation of remanufacturing operations in reverse logistics, *International Journal of Production Research*, 43 (16), 3455–3480.

Easwaran, G. and Üster, H., 2009, Tabu search and Benders decomposition approaches for a capacitated closed-loop supply chain network design problem, *Transportation Science*, 43 (3), 301–320.

Easwaran, G. and Üster, H., 2010, A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions, *IIE Transactions*, 42 (11), 779–792.

EEA, 2012, *European Environment Agency* [online], http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/trend-in-weee-recycled-reused-1, [Ziyaret Tarihi: 11 Eylül 2013].

El-Wahed, W.F.A. and Lee, S.M., 2006, Interactive fuzzy goal programming for multi-objective transportation problems, *Omega*, 34 (2), 158–166.

Erol, İ., Velioğlu, N.M. ve Şerifoğlu, F., 2006, AB uyum yasaları ve sürdürülebilir kalkınma bağlamında tersine tedarik zinciri yönetimi: Türkiye'ye yönelik araştırma fırsatları ve önerileri, *İktisat, İşletme ve Finans Dergisi*, 244, 86–106.

Fallah-Tafti, A., Sahraeian, R., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Moeinipour, M., 2014, An interactive possibilistic programming approach for a multi-objective closed-loop supply chain network under uncertainty, *International Journal of Systems Science*, 45 (3), 283–299.

Fitzgerald, A.J., 2010, A social history of the slaughterhouse: from inception to contemporary implications, *Research and Theory in Human Ecology*, 17 (1), 58–69.

Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., Van Der Laan, E., Van Nunen, J.A.E.E. and Van Wassenhove, L.N., 1997, Quantitative models for reverse logistics: a review, *European Journal of Operational Research*, 103 (1), 1–17.

Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J.M. and Van Wassenhove, L.N., 2001, The impact of product recovery on logistics network design, *Production and Operations Management*, 10 (2), 156–173.

Forkenbrock, D.J., 2001, Comparison of external costs of rail and truck freight transportation, *Transportation Research Part A*, 35 (4), 321–337.

Gautam, A.K. and Kumar, S., 2005, Strategic planning of recycling options by multi objective programming in a GIS Environment, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 7 (4), 306–316.

Giannoccaro, I., Pontrandolfo, P. and Scozzi, B., 2003, A fuzzy echelon approach for inventory management in supply chains, *European Journal of Operational Research*, 149 (1), 185–196.

Giudice, F., La Rosa, G. and Risitano, A., 2006, Product design for the environment: a life cycle approach, *CRC Press*, U.S.A.

Göksoy, E., 2010, Disassembly line balancing problem with fixed number of workstations and finite supply, PhD Thesis, *METU Graduate School of Natural Sciences*, Ankara.

Guide, V.D.R., 2000, Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs, *Journal of Operations Management*, 18 (4), 467–483.

Gupta, S.M. and Taleb, K.N., 1994, Scheduling disassembly, *International Journal of Production Research*, 32 (8), 1857–1866.

Gupta, S.M. and Mclean, C.R., 1996, Disassembly of products, *Computers and Industrial Engineering*, 31 (1–2), 225–228.

Gupta, S.M. and Lambert, A.J.D., 2008, Environment conscious manufacturing, *CRC Press*, U.S.A.

Gupta, S.M., 2013, Reverse supply chains: issues and analysis, *CRC Press*, U.S.A.

Güleş, H.K., Paksoy, T., Bülbül, H. ve Özceylan, E., 2012, Tedarik zinciri yönetimi: stratejik planlama, modelleme ve optimizasyon, *Gazi Kitabevi*, Genişletilmiş İkinci Baskı, Ankara, ISBN: 978-605-5804-36-7.

Güngör, A. and Gupta, S.M., 1999a, Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey, *Computers and Industrial Engineering*, 36 (4), 811–853.

Güngör, A. and Gupta, S.M., 1999b, Disassembly line balancing, *Proceedings of the 1999 Annual Meeting of the Northeast Decision Sciences Institute*, 193–195.

Güngör, A. and Gupta, S.M., 2001a, A solution approach to the disassembly line problem in the presence of task failures, *International Journal of Production Research*, 39 (7), 1427–1467.

Güngör, A. and Gupta, S.M., 2001b, Disassembly sequence plan generation using a branch and bound algorithm, *International Journal of Production Research*, 39 (3), 481–509.

Güngör, A. and Gupta, S.M., 2002, Disassembly line in product recovery, *International Journal of Production Research*, 40 (11), 2569–2589.

Hu, T., Sheu, J. and Huan, K., 2002, A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes, *Transportation Research Part E*, 38 (6), 457–473.

Ilgın, M.A. and Gupta, S.M., 2010, Environmentally conscious manufacturing and product recovery: a review or the state of the art, *Journal of Environmental Management*, 91 (3), 563–591.

Ilgın, M.A. and Gupta, S.M., 2011, Recovery of sensor embedded washing machines using a multi-kanban controlled disassembly line, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27 (2), 318–334.

Jayaraman, V., Guide, V.D.R. and Srivastava, R., 1999, A closed-loop logistics model for remanufacturing, *Journal of the Operational Research Society*, 50 (5), 497–508.

Jimenez, M., Arneas, M., Bilbao, A. and Rodriquez, M.V., 2007, Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution, *European Journal of Operational Research*, 177 (3), 1599–1609.

Kabak, Ö. and Ülengin, F., 2011, Possibilistic linear programming approach for supply chain networking decisions, *European Journal of Operational Research*, 209 (3), 253–264.

Kaçtıoğlu, S. ve Şengül, Ü., 2010, Erzurum kenti ambalaj atiklarinin geri dönüşümü için tersine lojistik aği tasarimi ve bir karma tamsayili programlama modeli, *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 24 (1), 89–112.

Kalaycı, C.B., Gupta, S.M. and Nakashima, K., 2012, A simulated annealing algorithm for balancing a disassembly line, *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society*, 714-719.

Kalaycı, C.B. and Gupta, S.M., 2013a, Ant colony optimization for sequence-dependent disassembly line balancing problem, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24 (3), 413–427.

Kalaycı, C.B. and Gupta, S.M., 2013b, A particle swarm optimization algorithm with neighborhood-based mutation for sequence-dependent disassembly line balancing

problem, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-013-4990-1.

Kalaycı, C.B. and Gupta, S.M., 2013c, Artificial bee colony algorithm for solving sequence-dependent disassembly line balancing problem, *Expert Systems with Applications*, 40 (18), 7231–7241.

Kannan, G., Sasikumar, P. and Devika, K., 2010, A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: a case of battery recycling, *Applied Mathematical Modeling*, 34 (3), 655–670.

Kara, S.S. and Önüt, S., 2010, A two-stage stochastic and robust programming approach to strategic planning of a reverse supply network: the case of paper recycling, *Expert Systems with Applications*, 37 (9), 6129–6137.

Karaçay, G., 2005, Tersine lojistik: kavram ve işleyiş, *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 14 (1), 317–332.

Kenné, J.-P., Dejax, P. and Gharbi, A., 2012, Production planning of a hybrid manufacturing-remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain, *International Journal of Production Economics*, 135 (1), 81–93.

Khajavi, L.T., Seyed-Hosseini, S.-M. and Makui, A., 2011, An integrated forward/reverse logistics network optimization model for multi-stage capacitated supply chain, *iBussiness*, 3 (2), 229–235.

Kim, H.J., Ciupek, M., Buchholz, A. and Seliger, G., 2006, Adaptive disassembly sequence control by using product and system information, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22 (3), 267–278.

Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J. and Van Wassenhove, L.N., 2003, Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators, *International Journal of Production Research*, 41 (16), 3689–3719.

Koç, A., 2005, Inquiring the main assumption of the assembly line balancing problem: solution procedures using AND/OR graph, M.S. Thesis, *Bilkent University Graduate School of Natural Sciences*, Ankara.

Koç, A., Sabuncuoğlu, İ. and Erel, E., 2009, Two exact formulations for disassembly line balancing problems with task precedence diagram construction using an AND/OR graph, *IIE Transactions*, 41 (10), 866–881.

Köçken, H.G. and Ahlatçıoğlu, M., 2011, A compensatory approach to multi-objective linear transportation problem with fuzzy cost coefficients, *Mathematical Problems in Engineering*, 2011, 1–19.

Lai, Y.J. and Hwang, C.L., 1992, A new approach to some possibilistic linear programming problems, *Fuzzy Sets and Systems*, 49 (2), 121–133.

Lai, Y.J. and Hwang, C.L., 1993, Possibilistic linear programming for managing interest rate risk, Fuzzy Sets and Systems, 54 (2), *Fuzzy Sets and Systems*, 135–146.

Lambert, A.J.D., 1997, Optimal disassembly of complex products, *International Journal of Production Research*, 35 (9), 2509–2523.

Lambert, A.J.D. and Gupta, S.M., 2005, Disassembly modeling for assembly, maintenance, reuse, and recycling, *CRC Press*, U.S.A.

Lee, D-H., Kang, J-G. and Xirouchakis, P., 2001, Disassembly planning and scheduling: review and further research, *Journal of Engineering Manufacture*, 215 (5), 695–710.

Lee, J.E., Gen, M. and Rhee, K.G., 2009, Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm, *Computers and Industrial Engineering*, 56 (3), 951–964.

Liang, T.-F., 2006, Distribution planning decisions using interactive fuzzy multi objective linear programming, *Fuzzy Sets and Systems*, 157 (10), 1303–1316.

Liang, T.-F., 2008, Fuzzy multi objective production/distribution planning decisions with multi product and multi time period in a supply chain, *Computers and Industrial Engineering*, 55 (3), 676–694.

Liang, T.-F. and Cheng, H.-W., 2009, Application of fuzzy sets to manufacturing/distribution planning decisions with multiproduct and multi-time period in supply chains, *Expert Systems with Applications*, 36 (2), 3367–3377.

Liu, S.T. and Kao, C., 2004, Solving fuzzy transportation problems based on extension principle, *European Journal of Operational Research*, 153 (3), 661–674.

McGovern, S.M. and Gupta, S.M., 2007a, Combinatorial optimization analyses of the unary NP-complete disassembly line balancing problem, *International Journal of Production Research*, 45 (18), 4485–4511.

McGovern, S.M. and Gupta, S.M., 2007b, A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing, *European Journal Operational Research*, 179 (3), 692–708.

McGovern, S.M. and Gupta, S.M., 2011, The disassembly line balancing, *McGraw Hill*, Columbus.

Min, H., Ko, C.S. and Ko, H.J., 2006, The spatial and temporal consolidation of returned products in a closed-loop supply chain network, *Computers and Industrial Engineering*, 51 (2), 309–320.

Mondragon, A.E.C., Lalwani, C. and Mondragon, C.E.C., 2011, Measures for auditing performance and integration in closed-loop supply chains, *Supply Chain Management: An International Journal*, 16 (1), 43–56.

Moore, K.E., Güngör, A. and Gupta, S.M., 2001, Petri net approach to disassembly process planning for products with complex AND/OR precedence relationships, *European Journal of Operational Research*, 135 (2), 428–449.

Mula, J., Peidro, D., Diaz-Madronero, M. and Vicens, E., 2010, Mathematical programming models for supply chain production and transport planning, *European Journal of Operational Research*, 204 (3), 377–390.

Nagurney, A. and Toyasaki, F., 2005, Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multi-tiered network equilibrium framework for e-cycling, *Transportation Research Part E*, 41 (1), 1–28.

Nakıboğlu, G., 2007, Tersine lojistik: önemi ve dünyadaki uygulamaları, *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9 (2), 181–196.

Neto, J.Q.F., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Nunen, J.A.E.E. and Van Heck, E., 2008, Designing and evaluating sustainable logistics networks, *International Journal of Production Economics*, 111 (2), 195–208.

Özceylan, E. and Paksoy, T., 2013a, A mixed integer programming model for a closed-loop supply chain network, *International Journal of Production Research*, 51 (3), 718–734.

Özceylan, E. and Paksoy, T., 2013b, Fuzzy multi objective linear programming approach for optimizing a closed-loop supply chain network, *International Journal of Production Research*, 51 (8), 2443–2461.

Özceylan, E. and Paksoy, T., 2013c, Reverse supply chain optimization with disassembly line balancing, *International Journal of Production Research*, 51 (20), 5985–6001.

Özceylan, E. and Paksoy, T., 2013d, Fuzzy mathematical programming approaches for reverse supply chain optimization with disassembly line balancing, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, doi: 10.3233/IFS-130875.

Özceylan, E. and Paksoy, T., 2013e, Interactive fuzzy programming approaches to the strategic and tactical planning of a closed-loop supply chain under uncertainty, *International Journal of Production Research*, değerlendirmede.

Özceylan, E., Paksoy, T. and Bektaş, T., 2013, Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing, *Transportation Research Part E*, değerlendirmede.

Özkır, V. and Başlıgil, H., 2013, Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment, *Journal of Cleaner Production*, 41, 114–125.

Pagell, M., Wu, Z. and Murthy, N.N., 2007, The supply chain implications of recycling, *Business Horizons*, 50 (2), 133–143.

Paksoy, T., Bektaş, T. and Özceylan, E., 2011, Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain, *Transportation Research Part E*, 47 (4), 532–546.

Paksoy, T. and Özceylan, E., 2012, Supply chain optimization with U-type assembly line balancing, *International Journal of Production Research*, 50 (18), 5085–5105.

Paksoy, T., Özceylan E. and Gökçen, H., 2012a, Supply chain optimization with assembly line balancing, *International Journal of Production*, 50 (11), 3115–3136.

Paksoy, T., Pehlivan, N.Y. and Özceylan, E., 2012b, Application of fuzzy optimization to a supply chain network design: a case study of an edible vegetable oils manufacturer, *Applied Mathematical Modelling*, 36 (6), 2762–2776.

Paksoy, T., Güngör, A., Özceylan, E. and Hancılar, A., 2013a, Mixed model disassembly line balancing problem with fuzzy goals, *International Journal of Production Research*, 51 (20), 6082–6096.

Paksoy, T., Pehlivan, N.Y. ve Özceylan, E., 2013b, Bulanık küme teorisi: bulanık matematiksel programlama giriş, *Nobel Yayınevi*, Ankara, ISBN: 978-605-133-514-8.

Parra, M.A., Terol, A.B., Gladish, B.P. and Rodriguez, M.V., 2005, Solving a multi objective possibilistic problem through compromise programming, *European Journal of Operational Research*, 164 (3), 748–759.

Peidro, D., Mula, J., Poler, R. and Lario, F.-C., 2009a, Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43 (3-4), 400–420.

Peidro, D., Mula, J., Poler, R. and Verdegay, J.-L., 2009b, Fuzzy optimization for supply chain planning under supply, demand and process uncertainties, *Fuzzy Sets and Systems*, 160 (18), 2640–2657.

Peidro, D., Mula, J., Jiménez, M. and Botella, M., 2010, A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment, *European Journal of Operational Research*, 205 (1), 65–80.

Petrovic, D., Roy, R., and Petrovic, R, 1999, Supply chain modeling using fuzzy sets, *International Journal of Production Economics*, 59 (1–3), 443–453.

Petrovic, D., 2001, Simulation of supply chain behaviour and performance in an uncertain environment, *International Journal of Production Economics*, 71 (1–3), 429–438.

Pishvaee, M.S. and Torabi, S.A., 2010, A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty, *Fuzzy Sets and Systems*, 161 (20), 2668–2683.

Pishvaee, M.S., Torabi, S.A. and Razmi, J., 2012, Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty, *Computers & Industrial Engineering*, 62 (2), 624–632.

Pochampally, K.K., Nukala, S. and Gupta, S.M., 2009, Strategic planning models for reverse and closed-loop supply chains, *CRC Press*, U.S.A.

Prahinski, C. and Kocabaşoğlu, C., 2006, Empirical research opportunities in reverse supply chains, *Omega*, 34 (6), 519–32.

Qiang, Q., Ke, K., Anderson, T. and Dong, J., 2013, The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties, *Omega*, 41 (2), 186–194.

Qin, Z. and Ji, X., 2010, Logistics network design for product recovery in fuzzy environment, *European Journal of Operational Research*, 202 (2), 479–490.

Rai, R., Rai, V., Tiwari, M.K. and Allada, W., 2002, Disassembly sequence generation: a petri net based heuristic approach, *International Journal of Production Research*, 40 (13), 3183–3198.

Ramezani, M., Bashiri, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R., 2013, A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level, *Applied Mathematical Modelling*, 37 (1-2), 328–344.

Rogers, D.S. and Tibben-Lembke, R.S., 1998, *Going backwards: reverse logistics trends and practices*, Reverse Logistics Executive Council. www.rlec.org/reverse.pdf, [Ziyaret Tarihi: 11 Eylül 2013].

Roy, A., Maity, K., Kar, S. and Maiti, M., 2009, A production-inventory model with remanufacturing for defective and usable items in fuzzy environment, *Computers and Industrial Engineering*, 56 (1), 87–96.

Sakawa, M., Nishizaki, I. and Uemura, Y., 2002, A decentralized two-level transportation problem in housing material manufacturer: interactive fuzzy programming approach, *European Journal of Operational Research*, 141 (1), 167–185.

Salema, M.I.G., Povoa, A.P.B. and Novais, A.Q., 2007, An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 179 (3), 1063–1077.

Salema, M.I.G., Póvoa, A.P.B. and Novais, A.Q., 2009, A strategic and tactical model for closed-loop supply chains, *OR Spectrum*, 31 (3), 573–599.

Salveson, M.E., 1955, The assembly line balancing problem, *Journal of Industrial Engineering*, 6 (3), 18–25.

Sasikumar, P. and Kannan, G., 2008a, Issues in reverse supply chains, part I: end-of-life product recovery and inventory management-an overview, *International Journal of Sustainable Engineering*, 1 (3), 154–172.

Sasikumar, P. and Kannan, G., 2008b, Issues in reverse supply chains, part II: reverse distribution issues-an overview, *International Journal of Sustainable Engineering*, 1 (4), 234–249.

Sasikumar, P. and Kannan, G., 2009, Issues in reverse supply chain, part III: classification and simple analysis, *International Journal of Sustainable Engineering*, 2 (1), 2–27.

Savaşkan, R.C., Bhattacharya, S. and Van Wassenhove, L.N.V., 2004, Closed-loop supply chain models with product remanufacturing, *Management Science*, 50 (2), 239–252.

Scultmann, F., Engels, B. and Rentz, O., 2003, Closed-loop supply chains for spent batteries, *Interfaces*, 33 (6), 57–71.

Selim, H., Araz, C. and Özkarahan, İ., 2004, An integrated multi-objective supply chain model in a fuzzy environment, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 15 (3), 2–16.

Selim, H. and Özkarahan, İ., 2008, A supply chain distribution network design model: an interactive fuzzy goal programming-based solution approach, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36 (3-4), 401–418.

Selim, H., Araz, C. and Özkarahan, İ., 2008, Collaborative production–distribution planning in supply chain: a fuzzy goal programming approach, *Transportation Research Part E*, 44 (3), 396–419.

Sheu, J.B., Chou, Y.H. and Hu, C.C., 2005, An integrated logistics operational model for green supply chain management, *Transportation Research Part E*, 41 (4), 287–313.

Shih, L.-H., 2001, Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan, *Resources, Conservation and Recycling*, 32 (1), 55–72.

Subulan K,, Taşan A.S. and Baykasoğlu, A., 2012, Fuzzy mixed integer programming model for medium-term planning in a closed-loop supply chain with remanufacturing option, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 23 (6), 345–368.

Şengül, Ü., 2011, Tersine lojistik kavramı ve tersine lojistik ağ tasarımı, *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25, 407–429.

Tang, Y., Zhou, M., Zussman, E. and Caudill, R., 2002, Disassembly modeling, planning, and application, *Journal of Manufacturing Systems*, 21 (3), 200–217.

Thierry, M., Salomon, M. and Van Wassenhove L., 1995, Strategic issues in product recovery management, *California Management Review*, 37 (2), 114–135.

Torabi, S.A. and Hassini, E., 2008, An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning, *Fuzzy Sets and Systems*, 159 (2), 193–214.

Torabi, S.A. and Hassini, E., 2009, Multi-site production planning integrating procurement and distribution plans in multi-echelon supply chains: an interactive fuzzy goal programming approach, *International Journal of Production Research*, 47 (19), 5475–5499.

Tuncel, E., Zeid, A. and Kamarthi, S., 2013, Solving large scale disassembly line balancing problem with uncertainty using reinforcement learning, *Journal of Intelligent Manufacturing*, doi: 10.1007/s10845-012-0711-0.

Van Nunen, J.A.E.E. and Zuidwijk, R.A., 2004, E-enabled closed-loop supply chains, *California Management Review*, 46 (2), 40–53.

Verma, R., Biswal, M.P. and Biswas, A., 1997, Fuzzy programming technique to solve multi-objective transportation problems with some non-linear membership functions, *Fuzzy Sets and Systems*, 91 (1), 37–43.

Vishwa, V.K. Chan, F.T.S., Mishra, N. and Kumar, V., 2010, Environmental integrated closed loop logistics model: an artificial bee colony approach, *8th International Conference on Supply Chain Management and Information Systems*, 1–7.

Wang, J. and Shu, Y.F., 2005, Fuzzy decision modeling for supply chain management, *Fuzzy Sets and Systems*, 150 (1), 107–127.

Wang, H.-F. and Hsu, H.-W, 2010a, A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm, *Computers and Operations Research*, 37 (2), 376–389.

Wang, H.-F. and Hsu, H.-W., 2010b, Resolution of an uncertain closed-loop logistics model: an application to fuzzy linear programs with risk analysis, *Journal of Environmental Management*, 91 (11), 2148–2162.

Wei, J. and Zhao, J., 2011, Pricing decisions with retail competition in a fuzzy closed-loop supply chain, *Expert Systems with Applications*, 38 (9), 11209–11216.

Wei, J. and Zhao, J., 2013, Reverse channel decisions for a fuzzy closed-loop supply chain, *Applied Mathematical Modelling*, 37 (3), 1502–1513.

Werners, B., 1987, An interactive fuzzy programming system, *Fuzzy Sets and System*, 23 (1), 131–147.

Werners, B., 1988, Aggregation models in mathematical programming, In: Mitra, G., Greenberg, H.J., Lootsma, F.A., Rijckaert, M.J., Zimmermann, H.J. (Eds.), Mathematical models for decision support, *Springer*, Berlin.

Wiendahl, H.-P. and Bürkner, S., 1999, Planning and control in disassembly: the key to an increased profitability, *Proceedings of the Second International Working Seminar on Re-Use*, 247–256.

Wikipedia, 2013a, *Recycling* [online], http://en.wikipedia.org/wiki/Recycling, [Ziyaret Tarihi: 11 Eylül 2013].

Wikipedia, 2013b, Motorola radio [online], http://wiki.wifi.ee/index.php/Motorola_MC_Micro, [Ziyaret Tarihi: 11 Eylül 2013].

Williams, E., Ayres, R. and Heller, M., 2002, The 1.7 kg microchip: energy and chemical use in the production of semiconductors, *Environmental Science and Technology*, 36 (24), 5504–5510.

Xie, Y., Petrovic, D. and Burnham, K., 2006, A heuristic procedure for the two-level control of serial supply chains under fuzzy customer demand, *International Journal of Production Economics*, 102 (1), 37–50.

Yang, G.-F., Wang, Z.-P. and Li, X.-Q., 2009, The optimization of the closed-loop supply chain network, *Transportation Research Part E*, 45 (1), 16–28.

Zadeh, L.A., 1965, Fuzzy sets, *Information Control*, 8 (3), 338–353.

Zarandi, M.H.F., Türkşen, İ.B. and Saghiri, S., 2002, Supply chain: crisp and fuzzy aspects, *International Journal of Applied Mathematics and Computational Science on Computers with Words and Perspectives*, 12 (3), 423–436.

Zarandi, M.H.F., Sisakht, A.H. and Davari, S., 2011, Design of a closed-loop supply chain model using an interactive fuzzy goal programming, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56 (5-8), 809–821.

Zhang, Z.-H., Jiang, H. and Pan, X., 2012, A lagrangian relaxation based approach for the capacitated lot sizing problem in closed-loop supply chain, *International Journal of Production Economics*, 140 (1), 249–255.

Zhou, C. and Zhang, P., 2007, Research on reverse logistics system based on circular economy, *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 3744–3746.

Zimmermann, H.J., 1976, Description and optimization of fuzzy systems, International *Journal of General Systems*, 2 (4), 209–215.

Zimmermann, H.J., 1978, Fuzzy programming and linear programming with several objective functions, *Fuzzy Sets and Systems*, 1 (1), 45–55.

EKLER

EK-1 Demontaj hattı dengeleme problemine ait LINGO 13.0 kodları.

Toplam istasyon sayısının minimize edilmesi (*Eşitlik 3.1)*

```
MIN=1*F1+2*F2+3*F3;
```

Birinci yapay düğüme ait kısıt (Kısıt 3.2)

```
Z1+Z2+Z3=1;
```

Diğer yapay düğümlere ait kısıt (Kısıt 3.3)

```
Z4+Z5-Z1=0;
Z6+Z7-Z3=0;
Z8-Z2-Z4=0;
Z9-Z5-Z6=0;
Z10-Z2-Z7=0;
```

Görevlerin iş istasyonlarına atanması ile ilgili kısıt (Kısıt 3.4)

```
X11+X12+X13-Z1=0;
X21+X22+X23-Z2=0;
X31+X32+X33-Z3=0;
X41+X42+X43-Z4=0;
X51+X52+X53-Z5=0;
X61+X62+X63-Z6=0;
X71+X72+X73-Z7=0;
X81+X82+X83-Z8=0;
X91+X92+X93-Z9=0;
X101+X102+ X103-Z10=0;
```

Görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin sağlandığı kısıt (Kısıt 3.5)

```
1*X11+2*X12+3*X13-1*X41-2*X42-3*X43-1*X51-2*X52-3*X53<=0;
1*X31+2*X32+3*X33-1*X61-2*X62-3*X63-1*X71-2*X72-3*X73<=0;
1*X21+2*X22+3*X23+1*X41+2*X42+3*X43-1*X81-2*X82-3*X83<=0;
1*X51+2*X52+3*X53+1*X61+2*X62+3*X63-1*X91-2*X92-3*X93<=0;
```

1*X21+2*X22+3*X23+1*X71+2*X72+3*X73-1*X101-2*X102-3*X103<=0;

Çevrim zamanı kısıtı (Kısıt 3.6)

12*X11+7*X21+9*X31+6*X41+8*X51+11*X61+6*X71+7*X81+6*X91+10*X101-13*F1<=0;

12*X12+7*X22+9*X32+6*X42+8*X52+11*X62+6*X72+7*X82+6*X92+10*X102-13*F2<=0;

12*X13+7*X23+9*X33+6*X43+8*X53+11*X63+6*X73+7*X83+6*X93+10*X103-13*F3<=0;

0-1 karar değişkenleri işaret kısıtı (Kısıt 3.7)

@BIN (X_{ij}), @BIN (F_j), @BIN (Z_i)

EK-2 Model 5'e ait matematiksel formülasyonun konveksliğinin ispatı.

Önerme. (3.120)-(3.146) ile gösterilen matematiksel model konvekstir.

İspat. Model 5'e ait matematiksel modelin kolay anlaşılabilmesi amacıyla kısıtlar (3.143) ve (3.144) ayrı ayrı gösterilmiştir. Ancak, modelin çözümü sırasında söz konusu kısıtlar birleştirilerek yine doğrusal olmayan tek bir kısıt halinde aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\sum_{t\in T} M_{tsdp} d_{B_t} \leq (W_{time}/(\sum_{j\in J}\sum_{c\in C} Z_{djcp} + \sum_{c\in C} F_{dcp}) N_{sdp} \qquad \forall_{s,d,p} \tag{E.1}$$

(E.1) numaralı doğrusal olmayan kısıtın konveksliği gösterilirse, (3.120)-(3.146) ile gösterilen matematiksel modelin konveks olduğu ispatlanır. $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ değişkenlerinden oluşan bir f fonksiyonu için aşağıdaki eşitsizlik sağlanır ise f fonksiyonu konvekstir denir (Bazaraa ve ark. 2006).

$$f(\delta x_1 + (1-\delta)x_2) \leq \delta f(x_1) + (1-\delta) f(x_2) \;\; \forall\, \delta \in [0,1] \tag{E.2}$$

Her $s \in S, d \in D, p \in P$ için eşitlik (E.1)'deki karar değişkenlerini $M = \sum_{t\in T} M_{tsdp}$, $Z = \sum_{j\in J}\sum_{c\in C} Z_{djcp}$, $F = \sum_{c\in C} F_{dcp}$ ve $N = N_{sdp}$ şeklinde eşitlersek, kısıt (E.1) aşağıda gösterilen fonksiyona dönüşür.

$$f(M, N, Z, F) = M d_{B_t}(Z + F) - W_{time} N \tag{E.3}$$

$x_1 = (M_1, N_1, Z_1, F_1)$ ve $x_2 = (M_2, N_2, Z_2, F_2)$ için (E.2) numaralı eşitsizlik aşağıdaki gibi olur.

$$\delta^2 d_{B_1} M_1 Z_1 + \delta^2 d_{B_1} M_1 F_1 - \delta W_{time} N_1 + (1-\delta)^2 d_{B_2} M_2 Z_2 + (1-\delta)^2 d_{B_2} M_2 F_2 - (1-\delta) W_{time} N_2 \leq \delta\left(d_{B_1} M_1 Z_1 + d_{B_1} M_1 F_1 - W_{time} N_1\right) + (1-\delta)(d_{B_2} M_2 Z_2 + d_{B_2} M_2 F_2 - W_{time} N_2) \tag{E.4}$$

Bir takım sadeleştirmeler sonucunda aşağıdaki eşitsizliğe ulaşılır.

$$(\delta - 1)(d_{B_1} M_1 Z_1 + d_{B_1} M_1 F_1 + d_{B_2} M_2 Z_2 + d_{B_2} M_2 F_2) \leq 0 \qquad \text{(E.5)}$$

$\delta \in [0, 1]$ olduğu için eşitsizlik (E.5) sağlanmıştır. Dolayısıyla kısıt (E.1) konvekstir.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Eren ÖZCEYLAN
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Ankara, 17 Eylül 1985
Telefon	**:**	+90 505 452 21 85
Faks	**:**	+90 332 241 06 35
E-mail	**:**	erenozceylan@gmail.com, eozceylan@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	**:**	Alanya A.M.E. Anadolu Lisesi, Alanya, Antalya	2003
Üniversite	**:**	Selçuk Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, Konya	2007
Yüksek Lisans	**:**	Selçuk Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, Konya	2010
Doktora	**:**	Selçuk Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği, Konya	Devam

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2008-devam	Selçuk Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü	Arş. Gör.

UZMANLIK ALANI

Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi, Üretim/Dağıtım Sistemleri Planlaması, Bulanık Küme Teorisi, Yeşil Tedarik Zinciri, Uygulamalı Matematiksel Modelleme.

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Paksoy, T., Pehlivan, N.Y., Özceylan, E., 2010, Application of fuzzy mathematical programming approach to the aggregate production/distribution planning in a supply chain network problem, *Scientific Research and Essays*, 5 (22), 3384–3397.

Paksoy, T., Bektaş, T., Özceylan, E., 2011, Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain, *Transportation Research Part E*, 47 (4), 532–546.

Paksoy, T., Özceylan, E., Gökçen, H., 2012, Supply chain optimization with assembly line balancing, *International Journal of Production Research*, 50 (11), 3115–3136.

Paksoy, T., Pehlivan, N. Y., Özceylan, E., 2012, Application of fuzzy optimization to a supply chain network design: Case study of an edible vegetable oils manufacturer, *Applied Mathematical Modelling*, 36 (6), 2762–2776.

Kıran, M.S., Özceylan, E., Gündüz, M., Paksoy, T., 2012, A novel hybrid approach based on particle swarm optimization and ant colony algorithm to forecast energy demand of Turkey, *Energy Conversion and Management*, 53 (1), 75–83.

Paksoy, T., Özceylan, E., 2012, Supply chain optimization with U-Typed assembly line balancing, *International Journal of Production Research*, 50 (18), 5085–5105.

Paksoy, T., Pehlivan, N.Y., Özceylan, E., 2012, Fuzzy multi objective optimization of green supply chain network with risk management of included environmental hazards, *Human and Ecological Risk Assessment*, 18 (5), 1121–1152.

Kıran, M.S., Özceylan, E., Gündüz, M., Paksoy, T., 2012, Swarm intelligence approaches to estimate electricity energy demand of Turkey, *Knowledge-Based Systems*, 36, 93–103.

Özceylan, E., Paksoy, T., 2013, A mixed integer programming model for a closed-loop supply chain network, *International Journal of Production Research*, 51 (3), 718–734 (Doktora tezinden).

Fahimnia, B., Reisi, M., Paksoy, T., Özceylan, E., 2013, The implications of carbon pricing in Australia: an Iindustrial logistics planning case study, *Transportation Research Part D*, 18, 78–85.

Paksoy, T., Pehlivan, N.Y., Özceylan, E., 2013, A new trade of model for fuzzy supply chain network design and optimization, *Human and Ecological Risk Assessment*, 19 (2), 492–514.

Paksoy, T., Özceylan, E., Weber, G.–W., 2013, Profit oriented supply chain network optimization, *Central European Journal of Operational Research*, 21 (2), 455–478.

Özceylan, E., Paksoy, T., 2013, Fuzzy multi objective linear programming approach for optimizing a closed-loop supply chain network, *International Journal of Production Research*, 51 (8), 2443–2461 (Doktora tezinden).

Özceylan, E., Paksoy, T., 2013, Reverse supply chain optimization with disassembly line balancing, *International Journal of Production Research*, 51 (20), 5985–6001 (Doktora tezinden).

Paksoy, T., Güngör, A., Özceylan, E., Hancılar, A., 2013, Mixed model disassembly line balancing problem with fuzzy goals, *International Journal of Production Research*, 51 (20), 6082–6096 (Doktora tezinden).

Paksoy, T., Özceylan, E., 2013, Environmentally conscious optimization of supply chain networks, *Journal of Operational Research Society*, doi:10.1057/jors.2012.95.

Gündüz, M., Kıran, M.S., Özceylan, E., 2013, A hierarchic approach based swarm intelligence to traveling salesman problem, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, doi: 10.3906/elk-1210-147.

Özceylan, E., Paksoy, T., 2013, Fuzzy mathematical programming approaches for reverse supply chain optimization with disassembly line balancing, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, doi: 10.3233/IFS-130875 (Doktora tezinden).