

**Gecikme Zamanlı Kapalı - Döngü Tedarik Zinciri Ağ Tasarımı için Çok - Amaçlı Karma - Tamsayı Programlama Modeli<sup>1</sup>**

**Ahmet ÇALIK**

Doktor Öğretim Üyesi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, KTO Karatay Üniversitesi, Konya, Türkiye, [ahmetcalik51@gmail.com](mailto:ahmetcalik51@gmail.com)

**Özet**

Son yıllarda, artan çevresel kaygılar nedeniyle işletmeler ürünlerin yeniden üretilmesi süresince farklı yollar aramaya başlamış ve bu süreçte kapalı döngü tedarik zinciri (KDTZ) optimizasyonu işletmeler için önemli bir anahtar haline gelmiştir. Ancak KDTZ optimizasyonunda maliyetin tek başına yeterli olmadığı karar vericilerin karbon emisyonu, uygun araç seçimi, zamanında teslimat ve üretimde esneklik gibi farklı özellikleri de bu optimizasyonun içinde beklediği görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada, en uygun kapalı döngü tedarik zinciri ağının belirlenmesi amacıyla tedarikçiler, fabrikalar, dağıtım merkezleri ve müşterilerden oluşan, müşterileri memnun edecek seviyede teslimat zamanını dikkate alan bir model geliştirilmiştir. Önerilen modelin amacı, stratejik ağ tasarımı kararlarını taktiksel malzeme akışı ile birleştirerek toplam maliyetlerin ve farklı taşıt kullanımından kaynaklanan gecikme süresinin minimum yapılması olmak üzere beş farklı parçadan oluşmaktadır. Toplam gecikme süresinin hesaplanabilmesi için üç farklı taşıtın olduğu ve taşıtların  $CO_2$  salınımlarının farklı olduğu varsayılmıştır. Önerilen modelde, toplam taşıma maliyetinin ve  $CO_2$  salınımlarından oluşan çevresel maliyet haricinde üzerinde durulan konular taşınacak miktar ve taşıma sıklığıdır. Müşterilerin beklentilerinin farklı olması teslimatın zamanında karşılanamamasına ve teslimatta gecikmelere yol açmaktadır. Bu nedenlerle bu çalışmada toplam gecikme süresinin minimize edilmesi ve hangi araçlarla taşıma yapılacağı hesaplanmıştır. Önerilen optimizasyon modelini çözmek için karma-tamsayılı doğrusal programlama modeli oluşturulmuş geliştirilen modelin önemini ve uygulanabilirliğini göstermek için senaryo analizleri yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı, Karma-tamsayılı doğrusal programlama, Gecikme zamanı.

---

<sup>1</sup> Makale Geliş/Kabul Tarihi: 04.05.18/ 25.10.18 – Araştırma Makalesi

## A Multi-Objective Mixed-Integer Programming Model for Closed-Loop Supply Chain Network Design with Delivery Tardiness

### Abstract

In recent years, due to increased environmental concerns, companies have begun to look for different ways during the remanufacturing of their products, and in this process Closed Loop Supply Chain (CLSC) optimization have become an important key for companies. However, it has been seen that cost is not sufficient for decision makers who expect different optimizations such as carbon emission, appropriate vehicle selection, on-time delivery and flexibility in production in the CLSC optimization. Therefore, in this study, a model is developed consists of suppliers, plants, distribution centres and customers that takes into account the delivery times of customers, in order to determine the most appropriate closed loop supply chain network. The objective of the developed model consists of five different parts which combining strategic network design decisions with tactical material flow through total cost and tardiness time of delay caused by different vehicle usage. It is assumed that there are three different vehicles to calculate the total tardiness time and the  $CO_2$  emissions of the vehicles are different. In the proposed model, the issues to be addressed are not only the environmental cost of  $CO_2$  transport and total transport cost but also the quantity to be transported and the transport frequency. Differences in customer expectations lead to delivery not being met on time and delays in delivery. For this reason, in this study, we calculate the total tardiness time and which vehicles are used for delivery. In order to solve the proposed optimization model, a mixed-integer linear programming model is constructed and scenario analyses are carried out to show the importance and applicability of the developed model and the results are examined.

**Keywords:** Closed Loop Supply Chain Network Design, Mixed Integer Linear Programming, Tardiness Time.

### GİRİŞ

İleri tedarik zinciri yönetimi, tedarikçilerden üreticilere, dağıtım merkezlerine ve sonunda müşterilere ürün gönderme ile ilgili faaliyetler ve akışların yönetimi olarak tanımlanmaktadır. Tersine tedarik zinciri yönetimi ise kullanıcılar tarafından geri dönen ve kullanılmış ürünlerin tekrar kullanılabilmesini olanak sağlayan lojistik faaliyetler olarak tanımlanmaktadır. İleri tedarik zinciri yönetimi hammaddelerin tedarik edilmesi, üretim, dağıtım ve tüketim işlemlerini kapsarken; tersine tedarik zinciri yönetimi kullanılmış ürünlerin toplanması, muayene, sıralama, geri kazanım, elden çıkarma ve

yeniden dağıtım işlemlerini içermektedir (Amin vd., 2017; Krikke vd., 2003; Fleischmann vd., 2001; Dutta vd., 2016).

Hammadde, hava, su, enerji ve verimli toprak gibi doğal kaynaklar, dünya üzerindeki yaşamımız için temel oluşturmaktadır. Bununla birlikte, insanlığın bu kaynakları hızlı tüketimi, arazi kullanım değişiklikleri, hava ve sudaki kirlilikler ve toksik atıkların üretilmesi gibi birçok etken çok ciddi çevresel hasarlara neden olmaktadır. Dahası, tüketicilerin tüketim kararlarında dahi çevresel ve sosyal etkiler farkındalık yaratmış ve tüketiciler satın alma kararlarını verirken çevresel ve sosyal etkileri dikkate almaya başlamışlardır. Bu nedenle, birçok işletme, çevre dostu ürünleri üretmeye ve ürün ömrünün sebep olduğu çevre zararlarının ortadan kaldırılması veya azaltılması için yeni yollar aramaya başlamışlardır. Bu bağlamda, kapalı döngü tedarik zinciri (KDTZ) yönetimi, ürünlerin geri dönüşümü, yeniden imalatı ve/veya yenilenmesi, onarımı ve yeniden kullanımı ile tedarik zincirini tasarlamak için kullanılan bir bütünlük bir süreçtir (Chen vd., 2017; Özceylan vd., 2017).

KDTZ, çevresel kaygılar, artan uluslararası düzenlemeler ve sosyal sorumluluk gibi nedenlerle son yıllarda akademi ve iş dünyasında giderek artan bir ilgi görmektedir. KDTZ bir ürünün tüm yaşam döngüsünü kapsayacak şekilde, ürünün üretilmesinden yok edilmesine kadar ileri ve tersine tedarik zincirindeki işlemleri birleştiren entegre bir ağıdır. Tersine lojistik ve kapalı döngü tedarik zincirleri 1990'larda çalışmaya başlanılsa da, tersine lojistik yapıları üzerindeki çalışmalar daha öncelere dayanmaktadır. Tersine lojistik alanında ilk çalışma Gultinan ve Nwokoye (1975), tarafından ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmada, sistemdeki aktörlere göre belirlenen 4 farklı tipte tersine toplama/dağıtım yolu tanımlanmıştır. Çalışma aynı zamanda; kullanılmış ürünler için alıcı ve potansiyel marketlerin tanımlanması, son kullanıcılarla iletişim halinde olunması, tamir-bakım politikalarının geliştirilmesi ve taşımada esnekliğin iyileştirilmesi gibi kavramlar üzerinde durarak daha sonra yapılan çalışmalar için bir takım anahtar kelimeler sunmuştur. Fleischmann vd. (1997), tersine lojistik ile ilgili yapılan çalışmaların artmasından ve araştırmacılara kılavuzluk etmesi açısından o zamana kadar geliştirilen kantitatif modeller ile ilgili geniş bir literatür taraması yapmışlardır. Çalışmalarını dağıtım planlaması, stok kontrolü ve üretim planlaması olmak üzere 3 temel başlık altında toplamışlardır. Her bir alan ile ilgili geliştirilen matematiksel modeller detaylı bir şekilde irdelenmiş ve gelecekteki araştırmacılar için birçok ipucuna yer verilmiştir. Daha sonraki yıllarda bu çalışmalardan hareketle birçok KDTZ çalışması gerçekleştirilmiştir (Savaşkan vd. (2004); . Pati vd. (2008); Demirel ve Gökçen (2008); Kannan vd. (2010); Fahimnia vd. (2013); Rezapour vd. (2015)).

KDTZ yönetimi ile sayısız araştırma gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, bu araştırmalar farklı bakış açılarıyla yürütülmüştür. Shih (2001), Tayvan'daki elektronik ve bilgisayar ürünlerinin geri dönüşüm lojistik faaliyetleri için karma tamsayı bir doğrusal programlama 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 yapıp, yorumlanmıştır. Hu vd. (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 bir yapıda model kurmuşlardır. Sistemdeki süreçler, atıkların toplanması, depolanması, işlenmesi ve dağıtılması olarak tanımlanmıştır. Demirel ve Gökçen (2008), hem ileri hem de tersine akışın olduğu bir tedarik zinciri ağı tasarımı için karma tamsayı bir doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Birden fazla ürünün ve imalatçı, dağıtım merkezi, toplama merkezi, müşteriler ve demontaj tesislerinin olduğu modelde satın alma, taşıma, geri dönüşüm ve açma kapama maliyetlerinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen model ağıdaki her bir tesisin sayıları ile oynanarak senaryo analizleri ile test edilmiştir. Zeballos vd. (2012), KDTZ tasarımında iade edilen ürünlerin miktarı ve kalitesindeki belirsizliği içeren iki aşamalı-senaryo temelli bir yaklaşım önermişlerdir. Kar maksimizasyonuna dayalı karma tamsayı doğrusal programlama problemi formüle edilmiş ve önerilen model Portekiz'de yer alan bir cam şirketi üzerinde test edilmiştir. Subulan vd. (2015) bir kurşun/asit akü endüstrisi için hem toplama hem de finansal amaçlardaki risk ölçülerini eş zamanlı dikkate alan yeni bir KDTZ ağı tasarım modeli geliştirmişlerdir. Önerilen modelde rasgelelik ve bulanıklık aynı anda ele alınmakta böylece gerçek hayat uygulamaları daha iyi yansıtılabilmektedir.

Diğer yandan sistemlerin iç içe girmesi, disiplinler arasında ilişkilerin fazlaşması, organizasyonlar arasındaki etkileşimin hızlanması ve ihtiyaçların artması nedeniyle karar verme problemlerinde tek amaç yerine birden fazla amacın düşünülmesi gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Karar vericiler birbiriyle çelişen amaçlar arasında doğru karar almaya zorlanmaktadır. Amaçlar birbirleriyle çeliştiği için, birinde yapılacak iyileşme diğer amaçlardan en az birinde kötüleşmeye yol açar. Bu tür problemlerde karar vericileri tatmin edecek çözümlere ulaşmaya çalışılmaktadır. Özceylan ve Paksoy (2014), maliyet katsayılarının, kapasite seviyelerinin bulanık olduğu bulanık çok amaçlı doğrusal olmayan karma tamsayı bir KDTZ modeli önermişlerdir. Bu modeli yardımcı kesin çok amaçlı modele dönüştürmek için, ağırlıklı ortalama yöntemini ve hibrid yöntemi kullanmışlardır. Elde edilen model, üç farklı etkileşimli bulanık programlama yöntemi ile çözülmüştür. Aydın vd. (2016) ürün hattındaki pazar

payını ve karı maksimize etmek için yeniden üretilmiş ürünlerin belirlenmesini içeren bir yeniden üretici, satıcı ve bir üreticinin koordinasyonuna dayalı bir metodoloji önermişlerdir. Önerilen metodoloji ile yeniden üretim için ürün geri dönüş oranı, tedarik zinciri üyelerinin fiyat kararları, yeni ve yeniden üretilen ürünlerin belirlenmesini içeren optimal sonuçlar elde edilebilmektedir. Igarashi vd. (2016) daha düşük demontaj maliyeti, yüksek geri dönüşüm, ve karbon dioksit tasarrufu için çevresel ve ekonomik parça seçimi ve sonraki demontaj hat dengeleme ile çok kriterli karar modeli oluşturmuşlardır. Wang vd. (2016) lojistik endüstrisinde Araç Rotalama Problemi (ARP)'nin özel bir hali olan eş zamanlı teslimat ve toplama ve zaman pencere ARPs ele alınmıştır. Öncelikle, beş amaçtan oluşan çok amaçlı ARP tanımlanmış ve gerçek-dünya verilerinden örnekler üretilmiştir. Son olarak çok amaçlı yerel arama ve çok amaçlı memetik algoritma ile uygulanmış ve simülasyon analizleri yapılmıştır. Tahirov vd. (2016) geri dönen ürün ve yedek parçaların geri kazanımını içeren bir KDTZ modeli geliştirmişlerdir. Geri dönen ürünler ve yedek parçalar yeniden üretim, geri dönüşüm ve atık süreçlerinin birinden geçerek geri kazandırılmaktadır. Bu çalışma ile yeniden üretim stratejisi, saf üretim stratejisi veya karma üretim stratejisinin daha geçerli olduğu araştırılmıştır. Çalık vd. (2017) müttefik tedarik zincirleri için entegre KDTZ ağ tasarımı için merkezi olmayan çok seviyeli karma-tamsayı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen modeli çözmek için bunlardan bir tanesi yeni bir yaklaşım olmak üzere dört farklı etkileşimli bulanık programlama yaklaşımı uygulanmıştır. Çalık vd. (2018) ortak tedarikçiler ve ortak toplama merkezleri de dahil olmak üzere iki farklı tedarik zinciri ile yeni bir müttefik KDTZ ağ tasarım modelini sunmuşlar ve modelde uzlaşık çözümü elde etmek için bulanık analitik hiyerarşi süreci yöntemini kullanan yeni bir etkileşimli bulanık programlama yaklaşımı önermişlerdir.

Özetle, literatürdeki tersine lojistik ve KDTZ ağı tasarımı konu eden çalışmalara bakıldığında gerek bağımsız (tersine) gerekse bütünsel (kapalı döngü) modellerin, çoğunlukla kapasite, talep, stok vb. kısıtlar altında maliyet minimizasyonu veya kar maksimizasyonu olarak ele alındığı görülmektedir. Ticaretin küreselleşmesine paralel olarak, işletmeler, toplam maliyetlerin düşürülmesi ve teslimat sürelerinin eş zamanlı olarak ele alınmasına odaklanmışlardır. Bu noktadan hareketle, bu çalışmada müşterilerin teslimat zamanında beklediği istekleri dikkate alan bir KDTZ ağı tasarım problemini incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, farklı taşıma sürelerine sahip taşıtların toplam gecikme süresi üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bunun için, taşıma, satın alma ve operasyon, sabit açılış, çevresel maliyet ve toplam gecikme süresinin de içinde yer aldığı beş farklı amaç oluşturulmuştur. Toplam teslimat süresinin etkinliği hipotetik verilere dayalı sayısal örnekler yardımıyla GAMS

paket programında çözülmüş ve elde edilen sonuçlar senaryo analizleri aracılığıyla yorumlanmıştır.

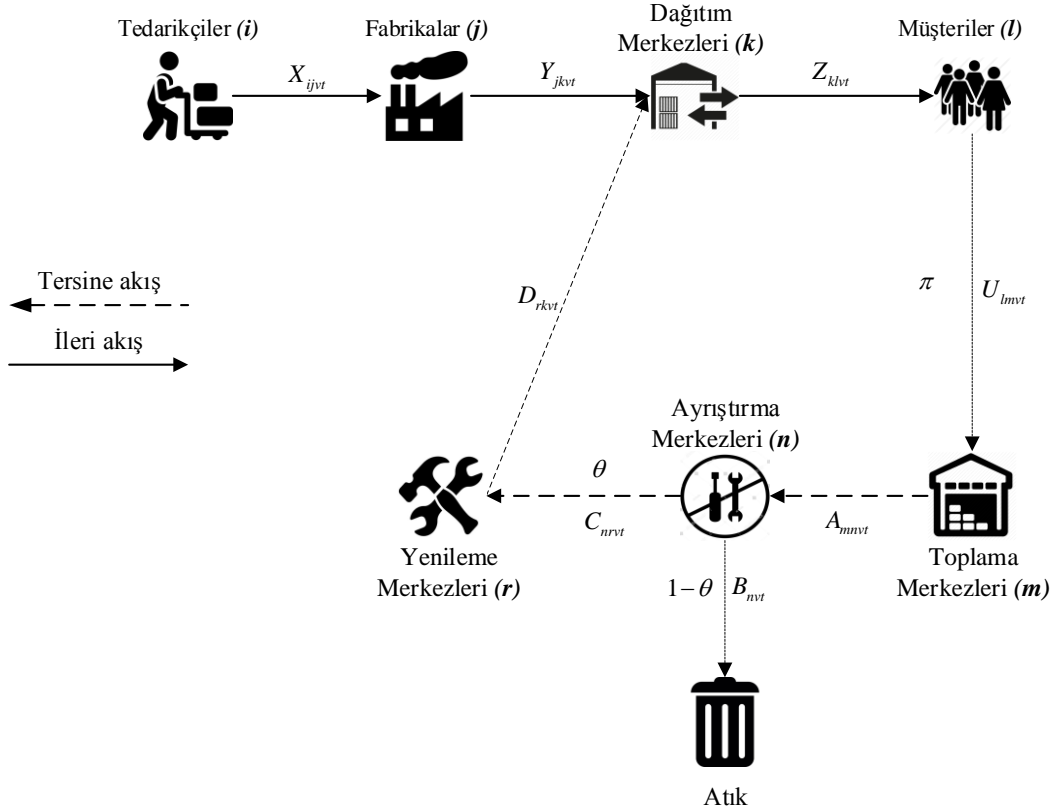
Bu çalışmanın ikinci bölümünde önerilen KDTZ modelinin tanımı yapılmıştır. Üçüncü aşamasında, önerilen modelin indisleri, parametreleri, değişkenleri, amaç fonksiyonları ve kısıtları açıklanmıştır. Üçüncü bölümde önerilen model sayısal örnekler ile test edilmiş ve senaryo analizleri yardımıyla sonuçlar yorumlanmıştır. Sonuç ve öneriler kısmı ile de çalışma sonuçlandırılmıştır.

### PROBLEM TANIMI

Bu çalışmada Şekil 1’de gösterilen KDTZ ağı ele alınmış ve ele alınan KDTZ ağı iki bölümden oluşmaktadır: İleri Tedarik Zinciri (İTZ) ve Tersine Tedarik Zinciri (TTZ). İTZ ürünün montajı için gerekli parçaların tedarikçilerden alınması ile başlamakta ve müşterilere teslim edilmesi ile sonlanmaktadır. TTZ ise müşterilerden kullanılmış ürünlerin toplanması ile başlamakta ve kullanılmış ürünlerin yenilenmesi ile sonlanmaktadır. İTZ sırasıyla dört aşamadan oluşmaktadır: tedarikçiler ( $i$ ), fabrikalar ( $j$ ), dağıtım merkezleri ( $k$ ) ve müşteriler ( $l$ ). Benzer olarak, TTZ üç aşamadan oluşmaktadır: toplama merkezleri ( $m$ ), yenileme merkezleri ( $n$ ) ve atık.

Şekil 1’de gösterildiği gibi, ileri akış düz çizgi ile temsil edilirken, tersine akış kesikli çizgilerle gösterilmektedir. İleri akış tedarikçilerle başlamakta ve fabrikalarda parçaların montajı ile üretilen nihai ürünler dağıtım merkezlerine gönderilmekte ve müşteri taleplerine göre nihai ürünler müşterilere sevk edilmektedir. Tersine akış, müşterilerin kullanmış olduğu ürünlerin toplanmasıyla başlamakta ve fabrikalar veya atıf merkezi ile bitmektedir. Bir dönemlik kullanımdan sonra, kullanılmış ürünler toplama merkezlerinde toplanmakta ve ayrıştırma merkezlerine sevk edilmektedir. Daha sonra ürünler durumlarına göre yenileme merkezlerine veya atıf merkezine gönderilmektedir. Ağdaki tüm taşıma işlemlerinin farklı motorlara sahip kamyonlarla yürütüldüğü varsayılmıştır. Tedarik zinciri ağındaki tüm yaylardaki taşıma kararlarını optimize etmek için, karar vericiler küçük kamyon, orta kamyon ve büyük kamyonlardan oluşan seçenekleri dikkate almalıdırlar. Önerilen modelde, farklı kamyon seçenekleri olduğu için kamyonların kapasiteleri ve  $CO_2$  salınımları birbirlerinden farklıdır. Taşıma maliyetleri büyük boy kamyonlar seçilerek azaltılabilir, ancak küçük boyutlu kamyonlarla karşılaştırıldığında daha fazla olumsuz çevresel etkilere neden olurlar. Çevreye duyarlı bir KDTZ ağı tasarlamak için, karar vericiler taşıma miktarlarını küçük yüklemelerle mi yoksa büyük yüklemelerle mi yapacaklarına karar vermek zorundadırlar. Ancak, küçük yüklemelerle yani küçük kamyonlarla çok fazla sefer yapılır buda daha

fazla  $CO_2$  salınımına sebep olur. Ancak bu çelişkili bir amaçtır. Taşıma için küçük boyutlu kamyonlar seçilirse bu karar daha yüksek taşıma maliyetine neden olur. Bu nedenlerden dolayı, önerilen modelde çelişkili bu iki bakış açısı arasında uzlaşmaya varılmış bir çözüm bulmaya çalışılmıştır.



Şekil. 1. Tasarlanan KDTZ ağ tasarım modeli

### MODEL FORMÜLASYONU

Bu çalışmada göz önüne alınan KDTZ ağ tasarımı modeli, yedi aşamadan oluşan çok aşamalı bir ağıdır: çoklu tedarikçiler, üretim merkezleri, dağıtım merkezleri, müşteriler, toplama merkezleri, yenileme merkezleri ve atık. Problemin çözümü için formülasyonda kullanılan indisler, parametreler, değişkenler, amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıda sunulmaktadır:

**İndisler**

$i$	Tedarikçiler kümesi	$i = \{1, 2 \dots I\}$ ,
$j$	Fabrikalar kümesi	$j = \{1, 2 \dots J\}$ ,
$k$	Dağıtım merkezleri kümesi	$k = \{1, 2 \dots K\}$ ,
$l$	Müşteriler kümesi	$l = \{1, 2 \dots L\}$ ,
$m$	Toplama/ayırıştırma merkezleri kümesi	$m = \{1, 2 \dots M\}$ ,
$n$	Ayırıştırma merkezleri kümesi	$n = \{1, 2 \dots N\}$ ,
$r$	Yenileme merkezleri kümesi	$r = \{1, 2 \dots R\}$ ,
$v$	Taşıt seçenekleri kümesi	$v = \{1, 2 \dots V\}$ ,
$t$	Dönem kümesi	$t = \{1, 2 \dots T\}$ ;

**Parametreler***Uzaklıklar ve birim taşıma maliyeti*

$d_{ij}$	tedarikçi 'i' ile fabrika 'j' arasındaki uzaklık (km)
$d_{jk}$	fabrika 'j' ile dağıtım merkezi 'k' arasındaki uzaklık (km)
$d_{kl}$	dağıtım merkezi 'k' ile müşteri 'l' arasındaki uzaklık (km)
$d_{lm}$	müşteri 'l' ile toplama merkezi 'm' arasındaki uzaklık (km)
$d_{mn}$	toplama merkezi 'm' ile ayırıştırma merkezi 'n' arasındaki uzaklık (km)
$d_{nr}$	ayırıştırma merkezi 'n' ile yenileme merkezi 'r' arasındaki uzaklık (km)
$d_{rk}$	yenileme merkezi 'r' ile dağıtım merkezi 'k' arasındaki uzaklık (km)
$d_n$	ayırıştırma merkezi 'n' ile atık arasındaki uzaklık (km)
$c_v$	Taşıt 'v' nin birim taşıma maliyeti ( $TL/ton \cdot km$ )
$ts_{kl}$	dağıtım merkezi 'k' den müşteri 'l' ye teslim süresi
$bts_{lt}$	müşteri 'l' tarafından 't' döneminde beklenen teslim süresi
$D_t = \{k \mid ts_{kl} \geq bts_{lt}\}$	't' döneminde

*Kapasiteler*

$kap_{it}$	'i' tedarikçisinin 't' döneminde kapasitesi (ton)
$kap_{jt}$	'j' fabrikasının 't' döneminde kapasitesi (ton)
$kap_{dm_{kt}}$	'k' dağıtım merkezinin 't' döneminde kapasitesi (ton)
$kap_{to_{mt}}$	'm' toplama merkezinin 't' döneminde kapasitesi (ton)
$kap_{ay_{nt}}$	'n' ayırıştırma merkezinin 't' döneminde kapasitesi (ton)
$kap_{y_{rt}}$	'r' yenileme merkezinin 't' döneminde kapasitesi (ton)

*Talep*



## A.Calık Gecikme Zamanlı Kapalı – Döngü Tedarik Zinrici...

$tal_{it}$  'l' müşterisinin 't' döneminde talebi (ton)

### *Sabit Açılış Maliyetleri*

$smf_{jt}$  'j' fabrikasının 't' döneminde sabit açılış maliyeti (TL)  
 $smt_{omt}$  'm' toplama merkezinin 't' döneminde sabit açılış maliyeti (TL)  
 $smay_{nt}$  'n' ayrıştırma merkezinin 't' döneminde sabit açılış maliyeti (TL)  
 $sm_{rt}$  'r' yenileme merkezinin 't' döneminde sabit açılış maliyeti (TL)

### *Satın alma ve işletme maliyetleri*

$samt_i$  'i' tedarikçisinden birim parça satın alma maliyeti (TL/ton)  
 $um_j$  'j' fabrikasında birim ürün üretim maliyeti (TL/ton)  
 $top_{lm}$  'l' müşterisinden 'm' toplama merkezinin birim ürün toplama maliyeti (TL/ton)  
 $yen_r$  'r' yenileme merkezinde birim ürün yenileme maliyeti (TL/ton)  
 $dc$  Atık merkezinde birim ürün bertaraf etme maliyeti (TL/ton)  
 $tasm_r$  'r' yenileme merkezinde birim ürün maliyet tasarrufu (TL/ton)

### *CO<sub>2</sub> emisyonları ve ilgili parametreler*

$cep_j$  'j' fabrikasında bir ton ürünün üretilmesinden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonu (gr/ton)  
 $C_{CO_2}$  CO<sub>2</sub> emisyonunun birim maliyeti (TL/gr)  
 $cet_v$  Bir ton yükün taşıt 'v' ile taşınmasıyla bir kilometrede oluşan CO<sub>2</sub> emisyonu (gr/ton·km)

### *Oranlar ve yüzdeler*

$\pi$  Toplama merkezleri tarafından toplanan ürün yüzdesi (%)  
 $\theta$  Ayrıştırma merkezlerinden yenileme merkezlerine gönderilen ürün yüzdesi (%)  
 $1 - \theta$  Ayrıştırma merkezlerinden atığa gönderilen ürün yüzdesi (%)

### *Değişkenler*

$X_{ijvt}$  'i' tedarikçisinden 'j' fabrikasına 'v' taşıtı ile 't' döneminde taşınan miktar (ton)  
 $Y_{jkvt}$  'j' fabrikasından 'k' dağıtım merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde taşınan miktar (ton)

$Z_{klvt}$	'k' dağıtım merkezinden 'l' müşterisine 'v' taşıtı ile 't' döneminde taşınan miktar (ton)
$U_{lmvt}$	'l' müşterisinden 'm' toplama merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde taşınan miktar (ton)
$A_{mnvt}$	'm' toplama merkezinden 'n' ayrıştırma merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde taşınan miktar (ton)
$B_{nvt}$	'n' ayrıştırma merkezinden atığa 'v' taşıtı ile 't' döneminde taşınan miktar (ton)
$C_{nrvt}$	'n' ayrıştırma merkezinden 'r' yenileme merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde taşınan miktar (ton)
$D_{rkvt}$	'r' yenileme merkezinden 'k' dağıtım merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde taşınan miktar (ton)
$XX_{ijvt}$	Eğer 'i' tedarikçisinden 'j' fabrikasına 'v' taşıtı ile 't' döneminde parça taşınırsa 1; aksi halde, 0
$YY_{jkvt}$	Eğer 'j' fabrikasından 'k' dağıtım merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde ürün taşınırsa 1; aksi halde, 0
$ZZ_{klvt}$	Eğer 'k' dağıtım merkezinden 'l' müşterisine 'v' taşıtı ile 't' döneminde ürün taşınırsa 1; aksi halde, 0
$UU_{lmvt}$	Eğer 'l' müşterisinden 'm' toplama merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde ürün taşınırsa 1; aksi halde, 0
$AA_{mnvt}$	Eğer 'm' toplama merkezinden 'n' yenileme merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde ürün taşınırsa 1; aksi halde, 0
$BB_{nvt}$	Eğer 'n' ayrıştırma merkezinden atığa 'v' taşıtı ile 't' döneminde ürün taşınırsa 1; aksi halde, 0
$CC_{nrvt}$	Eğer 'n' ayrıştırma merkezinden 'r' yenileme merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde ürün taşınırsa 1; aksi halde, 0
$DD_{rkvt}$	Eğer 'r' yenileme merkezinden 'k' dağıtım merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde ürün taşınırsa 1; aksi halde, 0
$XINT_{ijvt}$	'i' tedarikçisinden 'j' fabrikasına 'v' taşıtı ile 't' döneminde yapılan tur sayısı
$YINT_{jkvt}$	'j' fabrikasından 'k' dağıtım merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde yapılan tur sayısı
$ZINT_{klvt}$	'k' dağıtım merkezinden 'l' müşterisine 'v' taşıtı ile 't' döneminde yapılan tur sayısı
$UINT_{lmvt}$	'l' müşterisinden 'm' toplama merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde yapılan tur sayısı
$AIN T_{mnvt}$	'm' toplama merkezinden 'n' yenileme merkezine 'v' taşıtı ile 't' döneminde yapılan tur sayısı
$BINT_{nvt}$	'n' ayrıştırma merkezinden atığa 'v' taşıtı ile 't' döneminde yapılan tur sayısı

## A.Calık Gecikme Zamanlı Kapalı – Döngü Tedarik Zinrici...

$CINT_{nrvt}$  'n' ayrıştırma merkezinden 'r' yenileme merkezine 'v' taşıtı ile 't' yapılan tur sayısı

$DINT_{rkvt}$  'r' yenileme merkezinden 'k' dağıtım merkezine 'v' taşıtı ile 't' yapılan tur sayısı

$OP_{jt}$  Eğer 'j' fabrikası 't' döneminde açılırsa 1; aksi halde, 0

$OC_{mt}$  Eğer 'm' toplama merkezi 't' döneminde açılırsa 1; aksi halde, 0

$OD_{nt}$  Eğer 'n' ayrıştırma merkezi 't' döneminde açılırsa 1; aksi halde, 0

$OR_{rt}$  Eğer 'r' yenileme merkezi 't' döneminde açılırsa 1; aksi halde, 0

### *Amaç fonksiyonları*

Oluşturulan amaç fonksiyonu toplam maliyetlerin ve taşıtlardan kaynaklanan gecikme süresinin minimum yapılması olmak üzere beş parçadan oluşmakta ve aşağıdaki formüller ile hesaplanmaktadır.

$TM$ : Taşıma Maliyeti

$SOM$ : Satın alma ve operasyon maliyeti

$SM$ : Sabit açılış maliyeti

$\ÇM$ : Çevresel maliyet

$TGZ$ : Toplam Gecikme Zamanı

$$\text{Min } Z = TM + SOM + SM + \ÇM + TGZ \quad (1)$$

Tesisler arasındaki taşıma maliyeti, birim taşıma maliyetinin tesisler arasındaki uzaklık ile toplam taşınan miktarların çarpılması ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$TM = c_v \cdot (\sum_i \sum_j \sum_v \sum_t d_{ij} \cdot X_{ijvt} + \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t d_{jk} \cdot Y_{jkvt} + \sum_k \sum_l \sum_v \sum_t d_{kl} \cdot Z_{klvt} + \sum_l \sum_m \sum_v \sum_t d_{lm} \cdot U_{lmvt} + \sum_m \sum_n \sum_v \sum_t d_{mn} \cdot A_{mnvt} + \sum_n \sum_v \sum_t B_{nvt} \cdot d_n + \sum_n \sum_r \sum_v \sum_t d_{nr} \cdot C_{nrvt} + \sum_r \sum_k \sum_v \sum_t d_{rk} \cdot D_{rkvt}) \quad (2)$$

Satın alma ve operasyon maliyeti satın alma, üretim, toplama, yenileme, yok etme maliyetleri ve yenilenmiş ürünlere bağlı tasarruf maliyeti, ilgili tüm maliyetlerin toplanmasıyla aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$SOM = \sum_i \sum_j \sum_v \sum_t \text{samt}_i \cdot X_{ijvt} + \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t \text{um}_j \cdot Y_{jkvt} + \sum_l \sum_m \sum_v \sum_t \text{top}_{lm} \cdot U_{lmvt} + \sum_n \sum_r \sum_v \sum_t \text{yen}_r \cdot C_{nrvt} + \sum_n \sum_v \sum_t \text{dc} \cdot B_{nvt} - \sum_r \sum_k \sum_v \sum_t \text{tasm}_r \cdot D_{rkvt} \quad (3)$$

'j' fabrikasının sabit açılış maliyeti, 'l' toplama merkezinin sabit açılış maliyeti ve 'n' yenileme merkezinin sabit açılış maliyeti aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$SM = \sum_j \sum_t smf_{jt} \cdot OP_{jt} + \sum_m \sum_t smto_{mt} \cdot OC_{mt} + \sum_n \sum_t smay_{nt} \cdot OD_{nt} + \sum_r \sum_t smy_{rt} \cdot OR_{rt} \quad (4)$$

Tesisler arasında taşımalarından kaynaklı salınımlar ve fabrikalarda üretimin yol açtığı salınımlar sebebiyle çevre maliyeti şu şekilde hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} \zeta M = C_{CO_2} \cdot [cet_v \cdot (\sum_i \sum_j \sum_v \sum_t d_{ij} \cdot X_{ijvt} + \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t d_{jk} \cdot Y_{jkvt} + \\ \sum_k \sum_l \sum_v \sum_t d_{kl} \cdot Z_{klvt} + \sum_l \sum_m \sum_v \sum_t d_{lm} \cdot U_{lmvt} + \sum_m \sum_n \sum_v \sum_t d_{mn} \cdot \\ A_{mnvt} + \sum_n \sum_v \sum_t B_{nvt} \cdot d_n + \sum_n \sum_r \sum_v \sum_t d_{nr} \cdot C_{nrvt} + \sum_r \sum_k \sum_v \sum_t d_{rk} \cdot \\ D_{rkvt}) + \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t cep_j \cdot Y_{jkvt} ] \end{aligned} \quad (5)$$

Son amaç fonksiyonu müşteriler için toplam gecikme zamanının minimum yapılmasını amaçlamaktadır:

$$TGZ = \sum_t \sum_v \sum_l \sum_k (ts_{kl} - bts_{lt}) \cdot Z_{klvt} \quad (6)$$

### Kısıtlar

#### Kapasite kısıtları

Tedarikçilerden fabrikalara gönderilen toplam malzeme miktarı, herhangi bir dönem boyunca bu tedarikçilerin kapasitesine eşit veya daha az olmalıdır.

$$\sum_j \sum_v X_{ijvt} \leq kapt_{it} \quad \forall_{i,t} \quad (6)$$

Fabrikalardan dağıtım merkezlerine gönderilen toplam ürün miktarı, herhangi bir dönem boyunca bu fabrikaların kapasitesine eşit veya daha az olmalıdır.

$$\sum_k \sum_v Y_{jkvt} \leq kapf_{jt} \cdot OP_{jt} \quad \forall_{j,t} \quad (7)$$

Dağıtım merkezlerinden müşterilere gönderilen toplam ürün miktarı, herhangi bir dönem boyunca bu dağıtım merkezlerinin kapasitesine eşit veya daha az olmalıdır.

$$\sum_l \sum_v Z_{klvt} \leq kapdm_{kt} \quad \forall_{k,t} \quad (8)$$

Müşterilerden toplama merkezlerine gönderilen kullanılmış ürünlerin toplam miktarı, herhangi bir dönem boyunca toplama merkezlerinin kapasitesine eşit veya daha az olmalıdır.

## A.Calık Gecikme Zamanlı Kapalı – Döngü Tedarik Zinrici...

$$\sum_l \sum_v U_{lmvt} \leq kapto_{mt} \cdot OC_{mt} \quad \forall_{m,t} \quad (9)$$

Ayrıştırma merkezlerinden yenileme merkezlerine ve atığa gönderilen kullanılmış ürünlerin toplam miktarı, herhangi bir dönem ayrıştırma merkezlerinin kapasitesine eşit veya daha az olmalıdır.

$$\sum_v B_{nvt} + \sum_r \sum_v C_{nrvt} \leq kapay_{nt} \cdot OD_{nt} \quad \forall_{n,t} \quad (10)$$

Yenileme merkezlerinden dağıtım merkezlerine gönderilen toplam ürün miktarı, herhangi herhangi bir dönem boyunca yenileme merkezlerinin kapasitesine eşit veya daha az olmalıdır.

$$\sum_k \sum_v D_{rkvt} \leq kapy_{rt} \cdot OR_{rt} \quad \forall_{r,t} \quad (11)$$

### *Talep Kısıtları*

Tüm müşterilerin talepleri tam olarak karşılanmalı ve müşterilere sevk edilen toplam ürün miktarı, herhangi bir dönemde müşterilerin talebine eşit veya daha büyük olmalıdır.

$$\sum_k \sum_v Z_{klvt} \geq tal_{lt} \quad \forall_{l,t} \quad (12)$$

### *Parçalı Lineer Taşıma Kısıtları*

Aşağıdaki kısıtlar, her yay için minimum yük seviyesi aralığını sağlamaktadır.

$$X_{ij1t} - M \cdot XX_{ij1t} \leq 0 \quad \forall_{i,j,t} \quad (13)$$

$$X_{ij1t} - M \cdot XX_{ij1t} \geq 0.001 - M \quad \forall_{i,j,t} \quad (14)$$

$$X_{ij2t} - M \cdot XX_{ij2t} \leq 0 \quad \forall_{i,j,t} \quad (15)$$

$$X_{ij2t} - M \cdot XX_{ij2t} \geq 10 - M \quad \forall_{i,j,t} \quad (16)$$

$$X_{ij3t} - M \cdot XX_{ij3t} \leq 0 \quad \forall_{i,j,t} \quad (17)$$

$$X_{ij3t} - M \cdot XX_{ij3t} \geq 20 - M \quad \forall_{i,j,t} \quad (18)$$

$$Y_{jk1t} - M \cdot YY_{jk1t} \leq 0 \quad \forall_{j,k,t} \quad (19)$$

$$Y_{jk1t} - M \cdot YY_{jk1t} \geq 0.001 - M \quad \forall_{j,k,t} \quad (20)$$

$$Y_{jk2t} - M \cdot YY_{jk2t} \leq 0 \quad \forall_{j,k,t} \quad (21)$$

$$Y_{jk2t} - M \cdot YY_{jk2t} \geq 10 - M \quad \forall_{j,k,t} \quad (22)$$

$$Y_{jk3t} - M \cdot YY_{jk3t} \leq 0 \quad \forall_{j,k,t} \quad (23)$$

$$Y_{jk3t} - M \cdot YY_{jk3t} \geq 20 - M \quad \forall_{j,k,t} \quad (24)$$

$$Z_{kl1t} - M \cdot ZZ_{kl1t} \leq 0 \quad \forall_{k,l,t} \quad (25)$$

$$Z_{kl1t} - M \cdot ZZ_{kl1t} \geq 0.001 - M \quad \forall_{k,l,t} \quad (26)$$

$$Z_{kl2t} - M \cdot ZZ_{kl2t} \leq 0 \quad \forall_{k,l,t} \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
Z_{kl2t} - M \cdot ZZ_{kl2t} &\geq 10 - M & \forall_{k,l,t} & (28) \\
Z_{kl3t} - M \cdot ZZ_{kl3t} &\leq 0 & \forall_{k,l,t} & (29) \\
Z_{kl3t} - M \cdot ZZ_{kl3t} &\geq 20 - M & \forall_{k,l,t} & (30) \\
U_{lm1t} - M \cdot UU_{lm1t} &\leq 0 & \forall_{l,m,t} & (31) \\
U_{lm1t} - M \cdot UU_{lm1t} &\geq 0.001 - M & \forall_{l,m,t} & (32) \\
U_{lm2t} - M \cdot UU_{lm2t} &\leq 0 & \forall_{l,m,t} & (33) \\
U_{lm2t} - M \cdot UU_{lm2t} &\geq 10 - M & \forall_{l,m,t} & (34) \\
U_{lm3t} - M \cdot UU_{lm3t} &\leq 0 & \forall_{l,m,t} & (35) \\
U_{lm3t} - M \cdot UU_{lm3t} &\geq 20 - M & \forall_{l,m,t} & (36) \\
A_{mn1t} - M \cdot AA_{mn1t} &\leq 0 & \forall_{m,n,t} & (37) \\
A_{mn1t} - M \cdot AA_{mn1t} &\geq 0.001 - M & \forall_{m,n,t} & (38) \\
A_{mn2t} - M \cdot AA_{mn2t} &\leq 0 & \forall_{m,n,t} & (39) \\
A_{mn2t} - M \cdot AA_{mn2t} &\geq 10 - M & \forall_{m,n,t} & (40) \\
A_{mn3t} - M \cdot AA_{mn3t} &\leq 0 & \forall_{m,n,t} & (41) \\
A_{mn3t} - M \cdot AA_{mn3t} &\geq 20 - M & \forall_{m,n,t} & (42) \\
B_{n1t} - M \cdot BB_{n1t} &\leq 0 & \forall_{n,t} & (43) \\
B_{n1t} - M \cdot BB_{n1t} &\geq 0.001 - M & \forall_{n,t} & (44) \\
B_{n2t} - M \cdot BB_{n2t} &\leq 0 & \forall_{n,t} & (45) \\
B_{n2t} - M \cdot BB_{n2t} &\geq 10 - M & \forall_{n,t} & (46) \\
B_{n3t} - M \cdot BB_{n3t} &\leq 0 & \forall_{n,t} & (47) \\
B_{n3t} - M \cdot BB_{n3t} &\geq 20 - M & \forall_{n,t} & (48) \\
C_{nr1t} - M \cdot CC_{nr1t} &\leq 0 & \forall_{n,r,t} & (49) \\
C_{nr1t} - M \cdot CC_{nr1t} &\geq 0.001 - M & \forall_{n,r,t} & (50) \\
C_{nr2t} - M \cdot CC_{nr2t} &\leq 0 & \forall_{n,r,t} & (51) \\
C_{nr2t} - M \cdot CC_{nr2t} &\geq 10 - M & \forall_{n,r,t} & (52) \\
C_{nr3t} - M \cdot CC_{nr3t} &\leq 0 & \forall_{n,r,t} & (53) \\
C_{nr3t} - M \cdot CC_{nr3t} &\geq 20 - M & \forall_{n,r,t} & (54) \\
D_{rk1t} - M \cdot DD_{rk1t} &\leq 0 & \forall_{r,k,t} & (55) \\
D_{rk1t} - M \cdot DD_{rk1t} &\geq 0.001 - M & \forall_{r,k,t} & (56) \\
D_{rk2t} - M \cdot DD_{rk2t} &\leq 0 & \forall_{r,k,t} & (57) \\
D_{rk2t} - M \cdot DD_{rk2t} &\geq 10 - M & \forall_{r,k,t} & (58) \\
D_{rk3t} - M \cdot DD_{rk3t} &\leq 0 & \forall_{r,k,t} & (59) \\
D_{rk3t} - M \cdot DD_{rk3t} &\geq 20 - M & \forall_{r,k,t} & (60) \\
D_{rk1t} - M \cdot DD_{rk1t} &\leq 0 & \forall_{r,k,t} & (61)
\end{aligned}$$

Aşağıdaki kısıtlar, her yaydaki araç türüne ilişkin tur sayısını hesaplamaktadır.

$$XINT_{ijvt} \geq (X_{ijvt} / u_v) \quad \forall_{i,j,v,t} \quad (62)$$

## A.Calık Gecikme Zamanlı Kapalı – Döngü Tedarik Zinrici...

$$YINT_{jkvt} \geq (Y_{jkvt} / u_v) \quad \forall_{j,k,v,t} \quad (63)$$

$$ZINT_{klvt} \geq (Z_{klvt} / u_v) \quad \forall_{k,l,v,t} \quad (64)$$

$$UINT_{lmvt} \geq (U_{lmvt} / u_v) \quad \forall_{l,m,v,t} \quad (65)$$

$$AINT_{mnvt} \geq (A_{mnvt} / u_v) \quad \forall_{m,n,v,t} \quad (66)$$

$$BINT_{nvt} \geq (B_{nvt} / u_v) \quad \forall_{n,v,t} \quad (67)$$

$$CINT_{nrvt} \geq (C_{nrvt} / u_v) \quad \forall_{n,r,v,t} \quad (68)$$

$$DINT_{rkvt} \geq (D_{rkvt} / u_v) \quad \forall_{r,k,v,t} \quad (69)$$

### *Denge Kısıtları (Kirchhoff Yasası)*

Kirchoff korunum eşitliklerinin prensibine göre, KDTZ ağ tasarımında, bir düğüme gelen akım miktarı o düğümden çıkan akım miktarına eşit olmak zorundadır.

Kısıt (70) 'j' fabrikasındaki parça akış dengesini sağlamaktadır.

$$\sum_i \sum_v X_{ijvt} - \sum_k \sum_v Y_{jkvt} = 0 \quad \forall_{j,t} \quad (70)$$

Kısıt (71) 'k' dağıtım merkezindeki ürün akış dengesini sağlamaktadır.

$$\sum_j \sum_v Y_{jkvt} + \sum_r \sum_v D_{rkvt} - \sum_l \sum_v Z_{klvt} = 0 \quad \forall_{k,t} \quad (71)$$

Kısıt (72) bir dönem kullanımdan sonra toplanan ürünlerin akış dengesini sağlamaktadır.

$$\pi \cdot (\sum_k \sum_v Z_{klvt}) - \sum_m \sum_v U_{lmv(t+1)} = 0 \quad \forall_{l,t} \quad (72)$$

Kısıt (73) toplama merkezlerindeki ürünlerin akış dengesini sağlamaktadır.

$$\sum_l \sum_v U_{lmvt} - \sum_n \sum_v A_{mnvt} = 0 \quad \forall_{m,t} \quad (73)$$

Kısıt (74) ve (75) ayrıştırma merkezlerinde yenilenmiş ve geri dönüştürülmüş ürünlerin akış dengesini sağlamaktadır.

$$\theta \cdot \sum_m \sum_v A_{mnvt} - \sum_n \sum_v C_{nrvt} = 0 \quad \forall_{n,t} \quad (74)$$

$$(1 - \theta) \cdot \sum_m \sum_v A_{mnvt} - \sum_v B_{nvt} = 0 \quad \forall_{n,t} \quad (75)$$

Kısıt (76) yenilenme merkezlerinde yenilenmiş ürünlerin akış dengesini sağlamaktadır.

$$\sum_n \sum_v C_{nrvt} - \sum_k \sum_v D_{rkvt} = 0 \quad \forall_{r,t} \quad (76)$$

*Negatif Olmama Kısıtları*

Aşağıdaki kısıtlar karar değişkenlerinin negatif değer almasını önleyen pozitiflik kısıtlarıdır.

$$X_{ijvt} \geq 0 \quad \forall_{i,j,v,t} \quad (77)$$

$$Y_{jkvt} \geq 0 \quad \forall_{j,k,v,t} \quad (78)$$

$$Z_{klvt} \geq 0 \quad \forall_{k,l,v,t} \quad (79)$$

$$U_{lmvt} \geq 0 \quad \forall_{l,m,v,t} \quad (80)$$

$$A_{mnvt} \geq 0 \quad \forall_{m,n,v,t} \quad (81)$$

$$B_{nvt} \geq 0 \quad \forall_{n,v,t} \quad (82)$$

$$C_{nrvt} \geq 0 \quad \forall_{r,r,v,t} \quad (83)$$

$$D_{rkvt} \geq 0 \quad \forall_{r,k,v,t} \quad (84)$$

*Tam Sayı Değişken Kısıtları*

Aşağıdaki eşitlikler ilgili karar değişkenlerinin tam sayı değer almasını sağlayan kısıtlarıdır.

$$OP_{jt} = \{0,1\} \quad \forall_{j,t} \quad (85)$$

$$OC_{mt} = \{0,1\} \quad \forall_{m,t} \quad (86)$$

$$OR_{nt} = \{0,1\} \quad \forall_{n,t} \quad (87)$$

$$XX_{ijvt} = \{0,1\} \quad \forall_{i,j,v,t} \quad (88)$$

$$YY_{jkvt} = \{0,1\} \quad \forall_{j,k,v,t} \quad (89)$$

$$ZZ_{klvt} = \{0,1\} \quad \forall_{k,l,v,t} \quad (90)$$

$$UU_{lmvt} = \{0,1\} \quad \forall_{l,m,v,t} \quad (91)$$

$$AA_{mnvt} = \{0,1\} \quad \forall_{m,n,v,t} \quad (92)$$

$$BB_{nvt} = \{0,1\} \quad \forall_{n,v,t} \quad (93)$$

$$CC_{nrvt} = \{0,1\} \quad \forall_{n,r,v,t} \quad (94)$$

$$DD_{rkvt} = \{0,1\} \quad \forall_{r,k,v,t} \quad (95)$$

**SAYISAL ÖRNEKLER VE YÖNETİMSEL ÇIKARIMLAR**

Bu bölümde, önerilen modelin geçerliliğini göstermek ve çeşitli yönetsel çıkarımlar elde etmek için rastgele oluşturulmuş sayısal örnekler sunulmuştur. Öncelikle problemde kullanılan veriler ayrıntılı bir biçimde açıklanmış ve daha sonra sonuçlar açıklanmıştır.



## Veriler

Bu bölümde, Tablo 1'de açıklanan rasgele oluşturulmuş test verileri üzerinde yapılan sayısal bir örnek sunulmuştur. Tüm hesaplama işlemleri için önerilen karma-tamsayı doğrusal programla modeli dizüstü bilgisayarda GAMS kullanılarak çözülmüştür. Geliştirilen çoklu taşıma seçenekli ve çok dönemli doğrusal programlama modeli, dört tedarikçi, üç fabrika, üç dağıtım merkezi, dört müşteri, iki toplama merkezi, üç ayrıştırma merkezi ve üç yenileme merkezinden oluşan bir tedarik zincirinde test edilmiştir. Ele alınan örnekte üç farklı taşıt olduğu kabul edilmiş ve taşıtların birim taşıma maliyeti ( $c_v$ ) 10, 20 ve 30, atık merkezinde birim ürün bertaraf etme maliyeti ( $dc$ ) 50,  $CO_2$  emisyonunun birim maliyeti ( $C_{CO_2}$ ) 0.112, bir ton yükün taşıtlar ile taşınmasıyla bir kilometrede oluşan  $CO_2$  emisyonu ( $cet_v$ ) 800, 1350 ve 2450, taşıtların taşıyabileceği yük en fazla 10, 20 ve 30,  $\pi = 0.80$   $\theta = 0.60$  olarak varsayılmıştır. Diğer parametreler aşağıda tablo içinde gösterilmiştir.

Tablo 1. Rasgele üretilen parametreler ve aralıkları

Parametreler	Rasgele dağılım
$d_{ij}$	~ Düzgün (100, 300)
$d_{jk}$	~ Düzgün (150, 300)
$d_{kl}, d_{lm}, d_{mn}$	~ Düzgün (175, 375)
$d_n$	~ Düzgün (50, 150)
$d_{nr}, d_{rk}$	~ Düzgün (150, 400)
$ts_{kl}$	~ Düzgün (12, 20)
$bts_{lt}$	~ Düzgün (3, 9)
$kapt_{it}$	~ Düzgün (5000, 10000)
$kapf_{jt}$	~ Düzgün (1000, 3500)
$kapdm_{kt}, kapto_{mt}, kapy_{rt}$	~ Düzgün (7000, 10000)
$kapay_{nt}$	~ Düzgün (3000, 3500)
$tal_{lt}$	~ Düzgün (75, 250)
$smf_{jt}$	~ Düzgün (750000, 1150000)
$smt_{mt}$	~ Düzgün (400000, 600000)
$smay_{nt}$	~ Düzgün (300000, 500000)
$smy_{rt}$	~ Düzgün (350000, 600000)
$samt_i$	~ Düzgün (150, 300)
$um_j$	~ Düzgün (500, 700)
$top_{lm}$	~ Düzgün (50, 100)
$yen_r$	~ Düzgün (75, 90)

$tasm_r$	~ Düzgün (350,500)
$cep_j$	~ Düzgün (5000,5500)

### Sayısal problemin çözümü

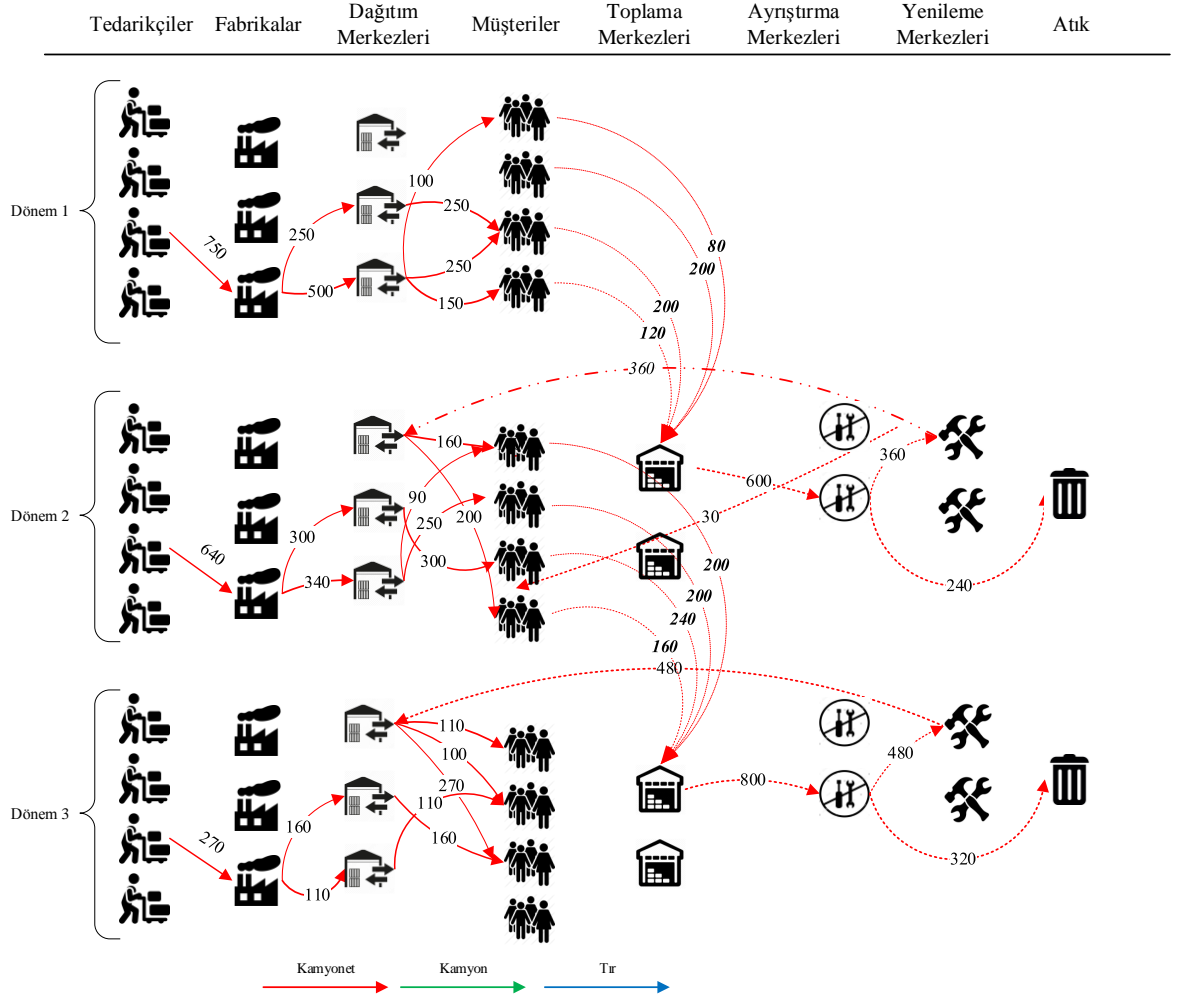
Geliştirilen KDTZ modeli ve sayısal veriler kodlandıktan sonra, GAMS-CPLEX çözücüsü kullanılarak 2.67 GHz işlemci ve 3 GB RAM içeren bir PC'de çözüm gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen model öncelikle tek amaçlı model olarak amaç fonksiyonunun minimizasyonu için çözülmüştür. Taşıma, satın alma, yenileme ve sabit işletme maliyetlerinden oluşan toplam amaç fonksiyonu 209,198,092 TL olarak elde edilmiştir.

Toplam çevresel maliyet (181,684,832 TL) toplam maliyetin %86.85'ini kapsarken, toplam taşıma maliyeti (20,163,200 TL) ise %9.63'ünü karşılamaktadır. İlk üç tedarikçinin kapasiteleri yeterli geldiğinden dördüncü ve beşinci tedarikçiler ile herhangi bir işlem gerçekleşmemiştir. Taleplerin karşılanması için ilk üç tedarikçiden toplam 11100 adet birinci komponent, 3700 adet ikinci komponent ve 7400 adet üçüncü komponent temin edilmiştir. Tedarikçilerden toplanan tüm komponentler birinci fabrika hariç diğer üç fabrika tarafından montajlanarak toplamda 3700 adet nihai ürüne dönüştürülmüştür.

Tablo 2. Her bir amaç fonksiyonu değeri ve yüzdesi

	Performans Göstergesi (PG)	Değer (TL)	Toplam Amaç Fonksiyonu İçindeki (%)
PG	Toplam amaç fonksiyonu	209,198,092	100
PG1	Toplam taşıma maliyeti	20,163,200	9.63
PG2	Toplam satın alma ve operasyon maliyeti	1,470,640	0.70
PG3	Toplam sabit açılış maliyeti	5,850,000	2.80
PG4	Toplam çevresel maliyet	181,684,832	86.85
PG5	Toplam gecikme zamanı	29,420	0.01

Optimal dağıtım planı aşağıda verilmiştir:



Şekil 2. Optimal dağıtım planı

Şekil 2'ye göre tedarikçilerden montajlanmak üzere toplamda sırasıyla 750, 640 ve 270 ton satın alma gerçekleşmiştir. Her bir dönemde her fabrikadan birer adet açılması uygun görülmüştür. Müşterilerden toplanan ürün oranı %80 olarak belirlendiğinden 1750 ton nihai ürünün 1400 tonu müşterilerden toplama merkezlerine gönderilmiştir. Ayrıştırma merkezlerinde değerlendirilen ürünlerden 840 tonluk kısmı bir yenilenmiş ürün olarak dağıtım merkezlerine gönderilmiştir. Ağdaki tüm taşıma işleminin küçük kamyonlarla gerçekleştirildiği görülmektedir.

*Senaryo Analizleri*

Bu bölümde, önerilen modelin potansiyelini ve değerini daha iyi anlamaya yönelik senaryo analizlerinin sonuçları sunulmuştur. Her senaryo bir önceki bölümde açıklanan sayısal örneği temel alan açıklamalara dayanmış ve aynı bilgisayarda GAMS-CPLEX çözücüsünü kullanarak optimum çözüme ulaşılmıştır.

## Karbon salınımlarının etkisi (Senaryo 1)

İlk senaryo analizi olası  $CO_2$  salınımlarının performans göstergeleri üzerindeki etkisini ölçmek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla, başlangıç problemine ait  $CO_2$  salınımlarının değerleri %10, %25 ve %50 oranında artırılmış ve azaltılmıştır. Tablo 3 bu değişimler sonucunda elde edilen her bir amaç fonksiyonu değeri ve toplam amaç fonksiyonu içindeki yüzdelere göstermektedir.

Tablo 3. Senaryo 1'e göre elde edilen sonuçlar

Karbon Salınımı	Performans Göstergesi (PG)						Toplam Amaç Fonksiyonu İçindeki Yüzde (%)					
	PG	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5	PG	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5
-%50	118852406.00	20240700.00	1423390.00	5500000.00	91658896.00	29420.00	100.00	17.03	1.20	4.63	77.12	0.02
-%25	164094192.00	20171100.00	1471720.00	5850000.00	136572352.0	29020.00	100.00	12.29	0.90	3.57	83.23	0.02
-%10	191131864.80	20163200.00	1470640.00	5850000.00	163618604.8	29420.00	100.00	10.55	0.77	3.06	85.61	0.02
Başlangıç Çözümü	209198092.00	20163200.00	1470640.00	5850000.00	181684832.0	29420.00	100.00	9.64	0.70	2.80	86.85	0.01
+%10	227264319.20	20163200.00	1470640.00	5850000.00	199751059.2	29420.00	100.00	8.87	0.65	2.57	87.89	0.01
+%25	254377140.00	20164300.00	1470640.00	5850000.00	226862720.0	29480.00	100.00	7.93	0.58	2.30	89.18	0.01
+%50	299529228.00	20163200.00	1470640.00	5850000.00	272015968.0	29420.00	100.00	6.73	0.49	1.95	90.81	0.01

Tablo 3'deki verilere göre,  $CO_2$  salınımindaki artış çevresel maliyette diğer maliyetlere oranla daha fazla artışa neden olmuştur. Mevcut  $CO_2$  salınımlarının %50 oranında artırılması toplam taşıma, satın alma ve operasyon maliyeti, sabit açılış maliyeti ve gecikme zamanlarında herhangi bir değişikliğe sebep olmazken çevresel maliyette %49.72 oranında artışa yol açmıştır. Görüldüğü gibi en yüksek artış çevresel maliyette gerçekleşmiştir. Toplam amaç fonksiyonu içinde çevresel maliyetin payı,  $CO_2$  salınımlarının %50 azaltmaya göre %196.77'lik bir artışa sebep olmuştur.  $CO_2$  salınımlarının -%50'den %50'ye değiştirmek toplam amaç fonksiyonu içinde taşıma maliyetinin payının azalmasına neden olmuştur. Sonuç olarak,  $CO_2$  salınımlarını ile elde edilebilecek bir değişiklik durumunda çevresel maliyete çok önem verilirken, diğer maliyetlere daha az önem verildiği, taşıma maliyeti ve çevresel maliyet arasında karar vericilerin dikkat etmesi gereken bir konu olduğu görülmüştür.

**Taşıma maliyetlerinin etkisi (Senaryo 2)**

İkinci senaryo, taşıma maliyetlerinin performans göstergeleri üzerindeki etkilerinin ölçülmesi için gerçekleştirilmiştir. Taşıma maliyetleri %10, %2 ve %50 oranlarında azaltılarak ve artırılarak taşıma maliyetlerindeki değişimin performans göstergeleri üzerindeki etkilerinin ölçülmüştür.

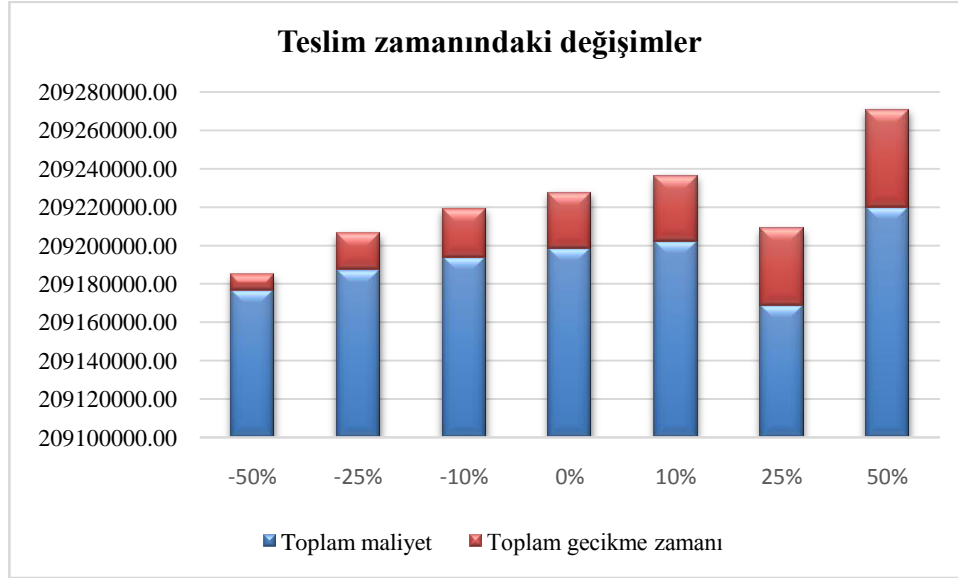
Tablo 4. Senaryo 2'e göre elde edilen sonuçlar

Taşıma Maliyeti	Performans Göstergesi (PG)						Toplam Amaç Fonksiyonu İçindeki Yüzde (%)					
	PG	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5	PG	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5
-%50	98516810.00	10096500.00	1453630.00	5000000.00	81936720.00	29960.00	100.00	10.25	1.48	5.08	83.17	0.03
-%25	103157292.00	15122400.00	1470640.00	4850000.00	81684832.00	29420.00	100.00	14.66	1.43	4.70	79.18	0.03
-%10	107181772.00	18146880.00	1470640.00	5850000.00	81684832.00	29420.00	100.00	16.93	1.37	5.46	76.21	0.03
Başlangıç Çözümü	209198092.00	20163200.00	1470640.00	5850000.00	81684832.00	29420.00	100.00	9.64	0.70	2.80	39.05	0.01
+%10	111414412.00	22179520.00	1570640.00	5950000.00	81684832.00	29420.00	100.00	19.91	1.41	5.34	73.32	0.03
+%25	114508892.00	25204000.00	1590640.00	6000000.00	81684832.00	29420.00	100.00	22.01	1.39	5.24	71.33	0.03
+%50	119551456.00	30256650.00	1660170.00	5850000.00	81755616.00	29020.00	100.00	25.31	1.39	4.89	68.39	0.02

Tablo 4'e göre taşıma maliyetinin düşmesi çevresel maliyeti artırmaktadır. Diğer bir ifade ile taşıma maliyetinin azaltılması küçük kamyonların daha fazla kullanılmasına sebep olmakta, böylece çevresel maliyetin toplam amaç fonksiyonu içerisinde payını artırmaktadır. Ancak, taşıma maliyetinin %50 oranında artırılması küçük kamyonların kullanımını azaltmakta ve çevresel maliyette toplam amaç fonksiyonu içerisinde azalmaya yol açmaktadır. %50'lik artış taşıma maliyetinde %50.06'lık bir artışa sebep olmuştur. Bu durum, toplam amaç fonksiyonu içerisinde taşıma maliyetinin payının %9.64'den %25.31'e çıkmasıyla da görülebilmektedir.

### Teslim zamanlarının etkisi (Senaryo 3)

Şekil 3 teslim zamanının -%50 ve %50 arasında %25 artışlarla değiştiği varsayımında elde edilen toplam maliyet ve toplam gecikme zamanının değişimini vermektedir.



Şekil 3. Senaryo 3'e göre elde edilen sonuçlar

Buna göre, teslim süresinin artması toplam maliyet değerinde değişmeye neden olmazken toplam gecikme zamanını %72.96 oranında artırmaktadır. Başlangıç çözümünde birinci araç ile 210, ikinci araç ile 20 sefer gerçekleştirilirken, teslim zamanını %50 artırdığımızda ikinci araç ile 30 sefer üçüncü araç ile 60 sefer gerçekleştirilmiştir. Yani teslim zamanının artışı küçük kamyonlar yerine büyük tırların kullanılması sonucunu doğurmuştur. Aynı miktarı küçük kamyonlarla çok sefer yapmak yerine büyük kamyonlar ile daha az sefer yaparak çözüme ulaşılmıştır.

### SONUÇ

Bu çalışmada, taşıma sorunlarını ele alan bir KDTZ modeli üzerinde durulmuştur. Geliştirilen model hem ileri hem de tersine akışların eş zamanlı optimize edildiği KDTZ ağ tasarımı için geliştirilen karma tamsayılı bir modeldir. Bu modelde üç farklı araç türünden kaynaklanan toplam çevresel maliyetler ve toplam gecikme zamanının da yer aldığı bir karma tamsayılı

doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Model taşıma maliyeti ve karbondioksit emisyonundan kaynaklı çevresel maliyet arasındaki ilişkiyi ele almaktadır. Geliştirilen model sayısal bir veri kümesi üzerinde çözülmüş ve çeşitli parametre değerleri değiştirilerek senaryo analizleri yapılmıştır. Maliyet kalemleri içerisinde en baskın maliyet çevresel maliyet iken, bunu taşıma maliyeti izlemektedir. Modelin, toplam taşıma maliyetini en aza indirmek için küçük boyutlu kamyonları seçme eğiliminde olduğunu gözlemlenmiştir. Taşıma maliyetinin azaltılması küçük kamyonların daha fazla kullanılmasına sebep olmuş ve çevresel maliyetin toplam amaç fonksiyonu içerisindeki payını artmıştır.  $CO_2$  salınımındaki artış çevresel maliyette diğer maliyetlere oranla daha fazla artışa neden olmuştur. Ayrıca teslim süresinin artması toplam maliyet değerinde değişmeye neden olmazken toplam gecikme zamanını önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Optimal çözüm de çevresel maliyetlere az öncelik vererek optimal çözüme ulaşıldığı görülmektedir.

Geliştirilen model hipotetik verilere dayalı sayısal örnekler üzerinde test edilmiştir. Ancak gerçek hayattaki problemlere uygulanması önerilebilir. Gelecekte kapasite, talep gibi parametrelerin bulanık değerler halinde ele alınmasıyla modele bulanık yaklaşım uygulanabilir. Değişik sezgisel yöntemler kullanılarak daha etkin çözüm yöntemlerinin olup olmadığı araştırılabilir. Modelde tek amaç yerine birden fazla amacın optimize edilmesi ve çelişen amaçlarla başa çıkmak için hedef programlama ya da etkileşimli programlama yöntemleri uygulanabilir.



**KAYNAKLAR**

- Amin, Saman Hassanzadeh, Zhang, Guoqing Akhtar, Pervaiz. (2017). **“Effects of uncertainty on a tire closed-loop supply chain network”**, Expert Systems with Applications 73, pp. 82–91
- Aydin, R., Kwong, C. K., Ji, P. (2016). **“Coordination of the closed-loop supply chain for product line design with consideration of remanufactured products”**, Journal of Cleaner Production, 114, pp. 286-298.
- Chen, Yi-Wen, Wang, Li-Chih, Wang Allen, Chen, Tzu-Li, (2017). **“A particle swarm approach for optimizing a multi-stage closed loop supply chain for the solar cell industry”**, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 43111–123
- Çalık, A., Paksoy, T., Yıldızbaşı A., Pehlivan, N. Y. (2017). **“A decentralized model for allied closed-loop supply chains: comparative analysis of interactive fuzzy programming approaches”**, International Journal of Fuzzy Systems, 19, 2, pp. 367–382.
- Çalık, A., Pehlivan, N. Y., Paksoy, T., Weber, G. W. (2018). **“A novel interactive fuzzy programming approach for optimization of allied closed-loop supply chain”**, International Journal of Computational Intelligence Systems, 11, 1, pp. 672-691.
- Demirel, Neslihan Özgün, Gökçen, Hadi. (2008). **“A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment”**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 39 (11), pp. 1197-1206.
- Dutta, Pankaj, Das, Debabrata, Schultmann, Frank, Fröhling, Magnus, (2016). **“Design and planning of a closed-loop supply chain with three way recovery and buy-back offer”**, Journal of Cleaner Production 135, pp.604-619
- Fahimnia, Behnam, Sarkis, Joseph, Dehghanian, Farzad, Banihashemi, Nahid, Rahman, Shams. (2013). **“The impact of carbon pricing on a closed-loop supply chain: An Australian case study”**, Journal of Cleaner Production, 59, pp. 210-225.
- Fleischmann, Moritz, Beullens, Patrick, Bloemhof-Ruwaard, Jacqueline M., Wassenhove, Luk N. (2001). **“The impact of product recovery on**

- logistics network design**", Production and Operations Management. 10 (2), pp. 156-173.
- Fleischmann, Moritz, Bloemhof-Ruwaard, Jacqueline M., Dekker, Rommert, van der Laan, Erwin, van Nunen, Jo A. E. E., Van Wassenhove, Luk N. (1997). "**Quantitative models for reverse logistics: A review**", European Journal of Operational Research, 103 (1), pp. 1-17.
- Gultinan, Joseph P., Nwokoye, Nonyelu G. (1975). "**Developing distribution channels and systems in the emerging recycling industries**", International Journal of Physical Distribution, 6 (1), pp. 28-38.
- Hu, T.-L., Sheu, J.-B., Huang, K.-H. (2002). "**A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes**", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 38 (6), pp. 457-473
- Igarashi, Kento, Yamada, Tetsuo, Gupta, Surendra M., Inoue, Masato, Itsubo, Norihiro. (2016). "**Disassembly system modeling and design with parts selection for cost, recycling and CO<sub>2</sub> saving rate using multicriteria optimization** ", Journal of Manufacturing Systems, 38, pp. 151-164.
- Kannan, G., Sasikumar, P., Devika, K. (2010). "**A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling**", Applied Mathematical Modelling, 34 (3), pp. 655-670.
- Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, Jacqueline M., Van Wassenhove, Luk N., (2003). "**Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators**", International Journal of Production Research. 41 (16), pp. 3689-3719.
- Özceylan, Eren, Demirel, Neslihan, Çetinkaya, Cihan, Demirel, Eray. (2017). "**A closed-loop supply chain network design for automotive industry in Turkey**", Computers & Industrial Engineering, 113, pp. 727-745.
- Özceylan, Eren, Paksoy, Turan. (2014). "**Interactive fuzzy programming approaches to the strategic and tactical planning of a closed-loop supply chain under uncertainty**", International Journal of Production Research, 52 (8), pp. 2363-2387.

- Pati, Rupesh Kumar, Vrat, Prem, Kumar, Pradeep. (2008). "**A goal programming model for paper recycling system**", Omega, 36 (3), pp. 405-417.
- Rezapour, Shabnam, Farahani, Reza Zanjirani, Fahimnia, Behnam, Govindan, Kannan, Mansouri, Yalda. (2015). "**Competitive closed-loop supply chain network design with price-dependent demands**", Journal of Cleaner Production, 93, pp. 251-272.
- Savaşkan, R. Canan, Bhattacharya, Shantanu, Van Wassenhove Luk, N. (2004). "**Closed-Loop supply chain models with product remanufacturing**", Management Science, 50 (2), pp. 239-252.
- Shih, L.-H. (2001). "**Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan**", Resources, Conservation and Recycling, 32 (1), pp. 55-72.
- Subulan, Kemal, Baykasoğlu, Adil, Özsoydan, Fehmi B., Taşan, A. Serdar, Selim, Hasan. (2015). "**A case-oriented approach to a lead/acid battery closed-loop supply chain network design under risk and uncertainty**", Journal of Manufacturing Systems, 37, pp. 340-361.
- Tahirov, Nail, Hasanov, Parviz, Jaber, Mohamad Y. (2016). "**Optimization of closed-loop supply chain of multi-items with returned subassemblies**", International Journal of Production Economics, 174, pp. 1-10.
- Wang, Jiahai, Zhou, Ying, Wang, Yong, Zhang, Jun, Chen, C. L. Philip, Zheng, Zhibin. (2016). "**Multi objective Vehicle Routing Problems with Simultaneous Delivery and Pick up and Time Windows: Formulation, Instances, and Algorithms**", IEEE Transactions on Cybernetics, 46 (3), pp. 582-594.
- Zeballos, L. J., Gomes, M. I., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q. (2012). "**Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains**", Computers & Chemical Engineering, 47, pp. 237-247.

