

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKAME VE ÇOK ÜRÜNLÜ ENVANTER ROTALAMA
PROBLEMİNE BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

İrem ŞAHMUTOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Bölümü
Endüstri Mühendisliği Programı

Danışman
Prof. Dr. Alev Taşkın GÜMÜŞ

Temmuz, 2019

TÜRKİYE CUMHURİYETİ
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKAME VE ÇOK ÜRÜNLÜ ENVANTER ROTALAMA PROBLEMİNE BİR
ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

İrem ŞAHMUTOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 12.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Alev TAŞKIN GÜMÜŞ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Alev TAŞKIN GÜMÜŞ, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Selçuk ÇEBİ, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Emre ÇEVİKCAN, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Veri toplama ve kullanma prosedürleri sırasında gerekli yasal izinleri aldığımı, metin içi alıntılar yaptığımı ve referansları uygun şekilde alıntıladığımı, araştırma verilerini ve çalışmanın sonuçlarını yanlışlamadığımı ve / veya üretmediğimi beyan ederim. Tez çalışmam sırasında, danışmanım Prof. Dr. Alev Taşkın GÜMÜŞ tarafından denetlenen “İkame ve Çok Ürünlü Envanter Rotalama Problemine Bir Çözüm Yaklaşımı” başlığı altında, bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uyduğumu, yanlış beyanın keşfi durumunda, herhangi bir yasal sonucu kabul ediyorum.

İrem ŞAHMUTOĞLU

İmza



Aileme...

TEŞEKKÜR

Bu tezin tamamlanmasında öncelikle; desteğini ve tecrübesini esirgemeyen, tez danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Alev TAŞKIN GÜMÜŞ'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Tez sürecinde; çalışabileyim diye hep yardımcı olmaya çabalayan sevgili abim Muhammet ŞAHMUTOĞLU'na, teknik anlamda birçok konuda zamanını ayırıp yardımcı olan değerli arkadaşım Aykut KARAKAYA'ya, motivasyonumu üst düzeyde tutabilmemi sağlayan ve karamsarlığa düştüğüm anlarda bana olan inancıyla güç bulduğum sevgili annem Rahime ŞAHMUTOĞLU ve sevgili babam Dursun ŞAHMUTOĞLU'na teşekkür ederim. Ayrıca tez sürecinde benden desteklerini eksik etmeyen Arş. Gör. Durmuş Özkan ŞAHİN ve Arş. Gör. Ertuğrul AYYILDIZ'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

İrem ŞAHMUTOĞLU

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	VIII
KISALTMA LİSTESİ	XI
ŞEKİL LİSTESİ	XII
TABLO LİSTESİ	XIV
ÖZET	XV
ABSTRACT	XVII
1 Giriş	1
1.1 Literatür Özeti	4
1.1.1 Tek Ürünlü Envanter Rotalama Çalışmaları	5
1.1.2 Çok Ürünlü Envanter Rotalama Çalışmaları	24
1.2 Tezin Amacı	36
1.3 Orijinal Katkı	36
2 Envanter Rotalama	37
2.1 Envanter Rotalama Problemi	37
2.1.1 Envanter Rotalama Probleminin Tanımı	38
2.1.2 Envanter Rotalama Problemi Çözüm Yaklaşımları	39
2.1.3 Temel Matematiksel Model	40
2.2 Çok Ürünlü Envanter Rotalama Problemi	42
2.2.1 Çok Ürünlü Envanter Rotalama Probleminin Tanımı	43
2.2.2 Çok Ürünlü Envanter Rotalama Probleminin Matematiksel Modeli	43
3 İkame Ve Çok Ürünlü Envanter Rotalama Problemi	47
3.1 İkame ve Çok Ürünlü Envanter Rotalama Probleminin Yapısı	47
3.2 İkame ve Çok Ürünlü Envanter Rotalama Problemi Çözüm Yaklaşımı	48

3.3 Problemin Matematiksel Formülasyonu.....	49
3.4 Modelin GAMS Çözümü.....	56
3.4.1 İkame Ürün Gönderimi	61
3.4.2 Modelin ML ve OU Politikalarına Göre Sonuçların Karşılaştırılması ...	62
4 Sonuç ve Öneriler	65
A ML Politikasına Göre GAMS Çıktısı	67
B OU Politikasına Göre GAMS Çıktısı	81
Kaynakça	95
Tezden Üretilmiş Yayınlar	105

SİMGE LİSTESİ

ABC^{mt}	r^{mt} 'ye bağlı olan değişken
A_i^{mkt}	t zamanda k aracı ile i düğümüne gönderilen ikame m ürün miktarı atanır.
C_i	her bir müşteri için envanter tutuma kapasitesi
C_{ij}	i ve j noktaları arası taşıma maliyeti
d_i^{mt}	i müşterisinin t zamanda m ürününe olan talep miktarı
E_m	stoksuzluk maliyeti
F_0^{mt}	t zamanda m ürününün depodaki stok seviyesi
F_i^{mt}	t zamanda m ürününün i düğümündeki stok seviyesi
h_i	i. müşteri için envanter bulundurma maliyeti
h_i^m	dönem başına bir birim envanterin elde bulundurma maliyeti
h_m	bir birim envanterin elde bulundurma maliyeti
I_0^{mt}	t zamanda m ürününün depodaki stok seviyesi
I_{i0}	i. müşterinin başlangıç envanter düzeyi
I_i^{mt}	t zamanda m ürününün i düğümündeki stok seviyesi
i, j	müşteri düğümleri ve depo 0 kabul edilmiştir.
k	araçlar
L	ikame ürün gitmesinden oluşan maliyet
m	ürünler
n	toplam müşteri sayısı
P_i	her bir müşteri için maksimum envanter tutuma kapasitesi
Q	araç kapasitesi
QA_i^{mkt}	t zamanda k aracı ile i düğümüne gönderilen toplam m ürün miktarı

Q_i^{mkt}	t zamanda k aracı ile i düğümüne gönderilen normal m ürün miktarı
q_i^{mkt}	t zamanda k aracı ile i düğümüne gönderilen m ürününün miktarı
Q_k	k aracının kapasitesi
r_{0t}	depoda bulunan envanter düzeyi
r_{it}	müşteride bulunan envanter düzeyi
r^{mt}	tedarikçiden temin edilen ürün m miktarı
$sb(m)$	ikamesi olmayan ürünler
$si(m)$	ikame ürünler
SM^{mt}	toplam stoksuzluk maliyeti
$sub(m)$	ikame olarak giden ürünlerin dışındaki ürünler
$subi(m)$	ikamesi olan ürünler
t	zaman periyodu
u_i	alt tur kısıtı için gerekli pozitif sayı
U_i	i. müşterinin maksimum envanter düzeyi
X_{ij}^{kt}	eğer t zamanda ij düğümleri arasında k aracı ile taşıma yapılırsa 1, aksi halde 0 değeri atanır.
X_{ij}^{kt}	eğer t zamanda ij düğümleri arasında k aracı ile taşıma yapılırsa 1, aksi halde 0 değeri atanır.
X_{it}	müşteriye gönderilen miktar
y_{ij}^t	ij ayrıtı kullanılmışsa 1, diğer durumlarda 0 değeri atanır.
y_i^{kt}	eğer i düğümü t zamanda k aracı tarafından ziyaret edilirse 1, aksi halde 0 değeri atanır.
y_i^{kt}	eğer i düğümü t zamanda k aracı tarafından ziyaret edilirse 1, aksi halde 0 değeri atanır.
y^{mt}	her bir t zamanı ve her bir m ürünü için tüm müşteriler tarafından talep edilen toplam ürün miktarı

- z_{0t} t. günde en az 1 müşteriye dağıtım yapıp, depo ziyaret edilmişse 1 değeri atanır.
- z_{it} müşteri ziyaret edilmişse 1, diğer durumlarda 0 değeri atanır.
- z_{st} s. müşteriye dağıtım yapılmış ve o periyotta başka tura eklenmeme durumunda 1 değeri atanır.



KISALTMA LİSTESİ

ALNS	Uyarlamalı Büyük Mahalle Araması
ARP	Araç Rotalama Problemi
B-B	Bir-Bir
B-Ç	Bir-Çok
CARE	Kümeleme, Tahsis, Genişletilmiş Yönlendirme
Co-RIRP	Kooperatif Robust Envanter Rotalama Problemi
Ç	Çok
Ç-Ç	Çok-Çok
ÇO	Çoklu
DE	Deterministik
Dİ	Direkt
ERP	Envanter Rotalama Problemi
GAMS	General Algebraic Modeling System
GBH	GRASP Tabanlı Sezgisel
GRASP	Açgözlü Rastgele Uyarlamalı Arama Prosedürü
GS	Geri Sipariş
GVNS	Genel Değişken Mahalle Araması
HE	Heterojen
HGA	Hibrit Genetik Algoritma
HO	Homojen
İÇÜ-ERP	İkame ve Çok Ürünlü Envanter Rotalama Problemi
KS	Kayıp Satış
LNS	Büyük Komşuluk Araması

MILP	Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
ML	Maksimum Seviye
MTZ	Miller, Tucker, Zeplin
NSGA	Dominant Olmayan Sıralama Genetik Algoritması
OU	Fazla Sipariş
P	Pozitif
PSO	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
S	Serbest
SL	Sonlu
SS	Sonsuz
ST	Stokastik
SÜ	Sürekli
T	Tek
VNS	Değişken Mahalle Araması

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 İkame ürün gönderim miktarı	61
---	----



TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 ERP'nin yapısal değişkenleri (Anderson vd., 2010)	3
Tablo 1.2 Tek ürünlü ERP çalışmaları için yapılan yapısal değişken karşılaştırması.....	21
Tablo 1.3 Çok ürünlü ERP çalışmaları için yapılan yapısal değişken karşılaştırması.....	34
Tablo 3.1 Müşteriler arasındaki mesafe verileri (km)	57
Tablo 3.2 Her müşterinin maksimum envanter tutma kapasite bilgileri	58
Tablo 3.3 Her ürünün zamana göre tedarikçi stok durumu.....	59
Tablo 3.4 Müşterilerin ürünlere olan talep bilgisi	59
Tablo 3.5 ML politikasına göre araçların izlediği rota	62
Tablo 3.6 ML politikasına göre araçların izlediği rota	62
Tablo 3.7 ML ve OU politikası karşılaştırma verileri	62

İkame ve Çok Ürünlü Envanter Rotalama Problemine Bir Çözüm Yaklaşımı

İrem ŞAHMUTOĞLU

Endüstri Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Alev Taşkın GÜMÜŞ

Araç rotalama, bir veya birden fazla depodan, ürün veya hizmet talep eden müşterilere belirli kısıtlamalar altında dağıtım ya da toplama işleminin yapılmasıdır. Bu işlemler yapılırken firmalar stok seviyelerine de dikkat etmek durumundadır. Günümüzde rotalama ve işletmenin ihtiyacına uygun stok seviyesinin düzgün bir şekilde yönetilememesi işletmeler açısından büyük maliyetlere sebep olmaktadır. Bu iki maliyeti bir arada değerlendirip kâr marjını artırmak amacıyla envanter rotalama problemlerinden faydalanılmaktadır. Envanter rotalama, ürün veya hizmet veren işletmelerin envanter ve dağıtım faaliyetlerini tek bir çatı altında birleştirerek stok ve filo operasyonlarını bütünleşik olarak ele almaktadır. Aynı zamanda araçların rotalanması ve envanter yönetiminin entegre çözümünü sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında öncelikle envanter rotalama kavramı ve envanter rotalama probleminin hangi yapısal değişkenlere göre modellenebildiği literatürdeki çalışmalar incelenerek anlatılmaktadır. Daha sonra ikame ve çok ürünlü envanter rotalama problemi üzerinde çalışılmıştır. Önceden bilinen talepler tek bir tedarikçi tarafından, tek depodan, heterojen araçlar ile sonlu ufuk yapısında

karşılanmaktadır. İkame ve çok ürünli olan bu problem için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ile bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Modelin çözümü için ise GAMS paket programı kullanılmış ve optimum maliyeti verecek olan sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Çözüm sonuçları için duyarlılık analizleri yapılarak sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Envanter rotalama problemi, ikame ürün, çoklu ürün, karma tamsayılı programlama



Replacement and Multi Product Inventory Routing Problem: A Solution Approach

Irem SAHMUTOGLU

Department of Industrial Engineering

Master's Thesis

Advisor: Prof. Dr. Alev TASKIN GUMUS

Vehicle routing is the way to carry out the delivery or collection process to the customers who demanded product or services from one or multiple warehouses under some restrictions. Companies should pay attention to stock levels when these transactions are carried out. Nowadays, because the routing and stock level that the company needs can't be managed well, it costs a lot in terms of the company. In order to evaluate these two costs together and to increase the profit margin, inventory locating problems are utilized. Inventory routing examines stock and fleet operations integratedly by consolidating inventory and distribution activities of businesses that provide products or services under a single roof. It also provides an integrated solution for vehicle routing and inventory management.

Firstly, the concept of inventory routing and according to the which structural variables, inventory routing problem can be modeled is explained by reviewing the papers in literature. Then, the study of the problem of replacement product permits and multi-product inventory routing has been studied. Previously known demands are met by a single supplier at a finite horizon with heterogeneous vehicles from a single warehouse. A solution approach with mixed integer linear

programming model has been developed for this problem which has multi-product and replacement product permission. For the solution of the model, GAMS package program is used and the optimum cost result is tried to be obtained. Sensitivity analyzes are performed for solution results and the results are compared.

Keywords: Inventory routing problem, replacement product, multiple product, mixed integer programming



Günümüz küresel piyasasında yoğun rekabet, ürün çeşidi ve müşterilerin artan talepleri, işletmeleri dağıtım sistemlerine önem vermeye zorlamaktadır (Düzakın ve Demircioğlu,2009). Bu sayede işletmeler Araç Rotalama Problemleri (ARP) üzerine daha fazla düşmeye başlamıştır. ARP, bir veya birkaç depodan, homojen veya heterojen araç filosu ile belirli müşterilere ürün dağıtımının veya toplanmasının maliyetini minimum yapmak amacıyla taşınması işlemidir (Düzakın ve Demircioğlu,2009). Rotalama maliyetlerinin yanında günümüzde firmaların stok maliyetlerini yönetmede yaşadıkları zorluklar sebebiyle işletmeler yüksek maliyetlere maruz kalmaktadır. Bu sebeple rotalama ve envanter maliyetlerinin bir arada değerlendirilerek stok ve filo operasyonlarının bütünleştirilmesi envanter rotalama kavramını ortaya çıkartmaktadır. Envanter rotalama problemi (ERP), araç rotalama probleminin envanter yönetimi kısmını da kapsayan rotalama problemlerinin özel bir hali olarak bilinmektedir. Bu problem türü daha çok müşterilere teslimatın ne zaman ve ne miktarda yapılacağı ayrıca teslimatın güzergahının ne olacağı gibi hususlarla ilgilenmektedir (Kahraman ve Aydemir, 2017).

Envanter rotalama probleminin çalışılmaya başlanmasından bu yana yapısal olarak birçok çeşidi tanımlanmaktadır. Bu tanımlamaların belirli bir standardı olmamakla birlikte zaman içerisinde bu tanımlamalar genişletilmiştir (Coelho, Cordeau ve Laporte,2013). Yapılan sınıflandırmalara ek olarak Tablo 1.1’de genişletilmiş versiyonu verilmektedir.

Tablo 1.1’e göre ilk satırda ERP tarafından dikkate alınan zaman ufku bilgisi verilmektedir. Bu tablodaki bilgiler Andersson, Hoff, Christiansen, Hasle ve Lokketangen’in 2010 yılında yaptıkları çalışmadan uyarlanmaktadır. Zaman ufku sonlu veya sonsuz olabilmektedir. Aynı şekilde işletmeler tek ürün ya da birden fazla çeşitte ürün üretilip müşterilerinin taleplerini karşılayabilmektedir. Tedarikçilerin ve müşterilerin sayıları problemlere göre değişkenlik gösterir. Tek

bir müşteri olduğunda topoloji bir-bir; en sık kullanılan topoloji olan tek tedarikçiden birden fazla müşteriye dağıtım olması durumunda bir-çok; birden fazla tedarikçi ve birden fazla müşteri olması durumunda ise çok-çok topolojisi gerçekleşir. Talep kriteri ise müşterilerin isteklerinin işletme tarafından stokastik veya deterministik olarak bilindiği bilgisini vermektedir. Rotalama, rota başına yalnızca bir müşteri olduğunda direkt, aynı rotada birkaç müşteri olduğunda çoklu veya birkaç denizcilik uygulamasında olduğu gibi merkezi bir depo olmadığında sürekli olabilir. Envanter politikaları, ürün teslimatı hakkında önceden belirlenmiş kuralları tanımlar. En yaygın iki politika, maksimum seviye (ML) politikası ve fazla sipariş (OU) politikasıdır. Bir ML envanter politikası uyarınca ikmal seviyesi esnektir fakat her müşteri mevcut olan kapasite ile sınırlıdır. Bir OU politikası uyarınca ise ne zaman bir müşteri ziyaret edilirse, teslim edilen miktar maksimum stok seviyesine ulaşacak düzeydedir. Envanter kararları, stok yönetiminin nasıl modelleneceğini belirler. Envanterin negatif olmasına izin verilirse, geri sipariş durumu gerçekleşir ve karşılık gelen talep daha sonraki bir aşamada karşılanır; geri sipariş yoksa, fazladan talep, kayıp satış olarak kabul edilir. Her iki durumda da stok için bir ceza olabilir. Son olarak, son iki kriter filo büyüklüğü ve yapısı ile ilgilidir. Filo araçların sayısı birde sabitlenebilir, birden çok veya serbest olabilir. Ayrıca filo aynı araç kapasitesi ile homojen veya farklı araç kapasiteleri ile heterojen yapıda bulunabilir (Coelho vd.,2013).

Tablo 1.1 ERP'nin yapısal değişkenleri (Anderson vd., 2010)

Kriterler	Olası Seçenek	Kısaltması
Zaman Ufku	Sonlu	SL
	Sonsuz	SS
Talep	Stokastik	ST
	Deterministik	DE
Rotalama	Direkt	Dİ
	Çoklu	ÇO
	Sürekli	SÜ
Topoloji	Bir-Bir	B-B
	Bir-Çok	B-Ç
	Çok-Çok	Ç-Ç
Envanter Politikası	Maksimum Seviye	ML
	Fazla Sipariş	OU
Envanter Kararı	Pozitif	P
	Geri Sipariş	GS
	Kayıp Satış	KS
Filo Büyüklüğü	Tek	T
	Çok	Ç
	Serbest	S
Filo Yapısı	Homojen	HO
	Heterojen	HE

Bu çalışmada, ürün çeşidinin birden fazla olduğu ve müşterinin talep ettiği üründen bulunmadığı taktirde ikamesi olan bir ürünün gönderilmesine izin verilen, sonlu zaman ufuklu, heterojen araç filosuna sahip ve tek bir depodan çok sayıda müşteri kümesinin taleplerinin yerine getirildiği bir envanter rotalama çalışması üzerinde durulmaktadır. İkame ürün, birbirleri yerine geçebilen ve aynı amaç doğrultusunda kullanabilen ürünlerdir. Tercihe göre işletmeler veya müşteriler eğer talep ettikleri ürün yoksa o ürünün karşılığı olan ikame ürünü kabul edebilmektedir. Geçmiş envanter rotalama çalışmaları incelendiğinde ikame ürünün dahil olduğu bir envanter rotalama çalışmasına rastlamamak bu konunun seçiliş nedeni arasındadır. Bir diğer neden ise envanter rotalama problemlerinin gerçek hayata biraz daha yaklaştırılmasına yardımcı olmaktır. Bu durum aynı zamanda konunun önemini vurgulamaktadır.

Çalışmanın ilk bölümünde envanter rotalama kapsamında yapılmış önceki çalışmalar incelenerek tek ürünlü ve çok ürünlü ERP için kavramsal bir çerçevede karşılaştırma yapılmaktadır. Bu karşılaştırmadan ardından ikinci bölümde maliyetin minimizasyonunu hedefleyen en temel tek ürünlü envanter rotalama

probleminin matematiksel modeli ve çözüm yaklaşımları anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde ise ikinci bölümün devamı niteliğinde ve bu çalışmada baz alınacak temel çok ürünlü envanter rotalama modelinden bahsedilmektedir. Dördüncü bölümde ise geliştirilmiş olan karma tamsayılı modelin çözüm yaklaşımı ve geliştirilen bu modelin Gams çözümü ile yapılan duyarlılık analizi verilmektedir. Beşinci ve son bölümde ise çalışmanın sonuçları, literatüre katkısı ve ileriki çalışmalar üzerinde durulmaktadır.

1.1 Literatür Özeti

Envanter rotalama problemleri seksenli yıllardan beri çokça çalışılan bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle o yıllardan beri farklı kriterler ve kısıtlamalar içeren envanter rotalama problemleri ile karşılaşmaktayız. Bu bölümde yapılan literatür araştırması envanter rotalama alanındaki son 6 yılı içeren 84 adet makaleden oluşmaktadır. Çalışmanın son 6 yılı içermesinin nedeni ise Coelho ve diğerlerinin 2013 yılında gerçekleştirdiği ve 1980-2013 yılları arasında kapsayan detaylı bir envanter rotalama çalışması yapmış olmasından kaynaklanmaktadır. Çalışma, envanter rotalama sorununu yapısal değişkenler ve müşteri talebi bilgilerine göre kategorize ederek kapsamlı bir literatür taraması sunmaktadır (Coelho vd., 2013).

Bu çalışmada ise Coelho ve diğerlerinin (2013) yaptığı literatür çalışması incelenerek 2014-2019 yılları arasında 'envanter rotalama' anahtar kelimesi temelinde başlık veya anahtar sözcük olarak ortaklaşa bulunacak bir literatür araştırması yapılmaktadır. Bu araştırma için Türkçe ve İngilizce dillerinde yazılmış makaleler taranmıştır. Çalışma için gözden geçirilen veri tabanları şu şekildedir: Elsevier, Springer, Taylor & Francis, Wiley, IEEEExplore ve Google Scholar. Konferans takip kağıtları, kitap bölümleri, yayınlanmamış çalışma kağıtları, yüksek lisans ve doktora tezleri literatür taramasından çıkartılmıştır.

İlk olarak burada gözden geçirilen makaleler, Tablo 1.1'de verildiği gibi ERP'nin yapısal değişkenlerine göre kategorize edilmektedir. Öncelikle 2014-2019 yılları arasındaki tek ürünlü envanter rotalama çalışmaları daha sonra ise yine bu yıllar arasındaki çok ürünlü envanter rotalama çalışmaları bu yapısal değişkenler kullanılarak iki farklı başlık altında anlatılıp, iki farklı tablo halinde sunulmaktadır.

Bu literatür incelemesi operasyonel bir araştırma perspektifinden yapılmış olma ve Coelho ve diğerlerinin (2013) yaptığı çalışmanın devamı niteliğinde olma özelliğini taşımaktadır.

1.1.1 Tek Ürünlü Envanter Rotalama Çalışmaları

Tek ürünlü envanter rotalama problemi, belirli bir planlama ufkunda tek bir ürünün araç filosu aracılığıyla bir veya birden çok tesisten n adet müşteri kümesine tekrarlı dağıtımıdır. Burada amaç, müşterilerin stoksz kalmadan talep ettikleri ürün miktarlarına maliyeti minimum kılacak şekilde ulaştırılmasıdır. Tek ürünlü envanter rotalama üzerine birçok makale yayınlanmaktadır. Bu aşamada son yıllarda yayınlanan makaleler incelenmiştir. İncelenen makalelerin özetleri aşağıdaki şekilde sunulmuştur:

Rahim, Zhong, Aghezzaf ve Aouam (2014) ve Coelho, Cordeau ve Laporte (2014) ve Juan, Grasman, Caceres-Cruz ve Bektaş (2014) envanter rotalama probleminin stokastik talep versiyonunu çözmek için farklı sezgisel algoritmalar önermişlerdir. Rahim ve diğerleri (2014) tek bir deponun belirli bir sonlu ufukta bir homojen araç filosunu kullanarak stokastik sabit talep oranlarında tüketen bir dizi perakendeciye tek bir ürün dağıtıldığı çoklu seviyeli bir stok yönlendirme problemini araştırmıştır. Amaç, perakendecilere sunulacak optimum miktarları, teslimat süresini ve araç teslim yollarını tasarlamak, böylece toplam ulaştırma ve stok maliyetlerini en aza indirip her bir perakendecide planlama ufkunun her döneminde bir servis seviyesi garanti etmektir. Çok seviyeli olan problemi ayrıştırarak alt ve üst sınırları türetmek için ise Lagrangian yaklaşımı kullanılmıştır. Coelho ve diğerleri (2014) ERP'nin dinamik ve stokastik versiyonunu ele almak için farklı sezgisel politikalar önermiş, çeşitli çözüm politikalarını karşılaştırmak için rastgele oluşturulmuş örnekler üzerinde kapsamlı bir hesaplama analizi gerçekleştirmiştir. Çalışmanın sonucunda daha fazla bilgi işlem süresi gerekse de daha iyi çözümler üretmek için stokastik bilgiden faydalanmanın mümkün olduğunu göstermektedir. Juan ve diğerleri (2014) ERP'nin stokastik varyantını çözmek için simülasyonu buluşsal yöntemle birleştiren "simetrik" algoritmasını tanımlamaktadır. Bu stokastik varyant, araç rotalama problemi ve stokastik taleplerle nitelendirilen birkaç envanter problemi

ile bütünleşmiştir. Başlangıçtaki stok seviyeleri ve stoksuz kalma durumu düşünülerek her bir perakende merkezi için bir dizi alternatif yeniden doldurma politikası göz önünde bulundurulur. Amaç, her bir dönemde sistemin beklenen toplam maliyetini, yani envanter ve rota maliyetlerinin toplamını en aza indiren kişiselleştirilmiş yeniden doldurma politikalarını ve ilgili yönlendirme planını bulmaktır. Metodolojinin temel katkılarından biri, standart yeniden doldurma politikalarını kullanan diğer yaklaşımlara göre toplam maliyetleri önemli ölçüde azaltması ve yaklaşımın herhangi bir olasılık dağılımında kullanılabilecek olmasıdır.

Aksen, Kaya, Salman ve Tuncel (2014) ve Qin, Miao, Ruan ve Zhong (2014) teslimat süresi, miktarı ve yönlendirmesi için bir periyodik envanter yönlendirme sorununu ele almışlardır. Aksen ve diğerleri (2014) kullanılmış bitkisel yağları restoranlar, yemek şirketleri ve atık bitkisel yağ üreten oteller gibi kaynaklardan önemli miktarlarda toplayan bir biyodizel üretim tesisinin envanter rotalama sorununu çözmek amacıyla Uyarlamalı Büyük Mahalle Araması (ALNS) algoritmasını geliştirmiştir. Hammadde gereksinimlerini ve operasyonel kısıtlamaları karşılarken toplam tahsilat, stok ve satın alma maliyetlerini en aza indirmek amaçlanmaktadır. Qin ve diğerleri (2014) tedarikçinin her bir perakendecinin ikmal politikasından sorumlu olduğu bir dağıtım sisteminin periyodik ERP'ine odaklanmaktadır. Periyodik envanter sorununu iki alt soruna yani envanter ve araç rotalama problemine ayırmıştır. Envanter sorunu, teslimat miktarı ve perakendecinin talebi üzerine operatörler tarafından elde edilen yerel arama yöntemi önerilerek çözülmektedir. Yönlendirme sorununu çözmek için ise bir tabu arama yöntemi önerilmektedir.

Jia, X. Li, Wang ve N. Li (2014), Rahimi, Baboli ve Rekik (2014), Mirzaei ve Seifi (2015), Widyadana, Irohara ve Budiman (2016) ve Azadeh, Elahi, Farahani, Nasirian (2017) ve Crama, Rezaei, Savelsbergh, Woensel ve Van (2018) çabuk bozulan ürünlerin envanter ve rotalama problemini incelemektedir. Jia ve diğerleri (2014) sınırlı üretim kapasitesine sahip bir tedarikçinin, tek bir ürünü homojen araçlar kullanarak bir dizi perakendeciye dağıttığı entegre bir stok yönlendirme problemini araştırmıştır. Amaç, önceki araştırmalarda sıklıkla ihmal edilen bir

yükleme maliyetini göz önünde bulundurmaktır. Yükleme maliyetini ve araçların geri dönüş zaman aralığını dikkate alarak, ayrı bir zaman diliminde yeni bir üretim dağıtım ERP modelinin formülasyonu önerilmektedir. Ayrık zamanlar altında iki kademeli bir tedarik zinciri karışık tamsayılı programlama modeli önerilmiş ve iki fazlı bir algoritma geliştirilmiştir. Sonuçlar, çabuk bozulan ürünler için araçların yükleme maliyeti ve geri dönüş süresi aralığının karar değişkenleri üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ve tedarik zincirinin ortak toplam ilgili maliyetler göz önüne alındığında, önerilen modeli üretim ve dağıtım sistemlerinin işletilmesinde yararlı bir araç haline getireceğini göstermektedir. Rahimi ve diğerleri (2014) ise müşteri memnuniyet düzeyinin beklenen toplam maliyetin optimizasyonu altındaki etkisini araştırmaktadır. Toplam seyahat süresini göz önünde bulundurarak bir tedarikçiden birçok müşteriye bozulabilir ürünler için çoklu kapasiteye sahip araçları göz önünde bulundurarak yeni birçok amaçlı matematik modeli önermektedir. Optimizasyondaki ilk hedef, farklı stok ve dağıtım maliyetlerini en aza indirirken, ikinci hedef araçların gecikmelerine göre ölçülen müşteri memnuniyeti seviyesini göz önünde bulundurmaktır. Önerilen çerçeve Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) kullanılarak modellenmiş ve GAMS yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Mirzaei ve Seifi (2015) özellikle bozulabilir ürünlerin stoklarının tahsisi için matematiksel bir model sunmaktadır. Envanter yaşının müşteri talebi üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu ve bu sebeple bir sonraki teslimat zamanında satılmayan envanterin bir kısmının kayıp satış olarak kabul edildiği varsayılmaktadır. Model, çabuk bozulabilen malların aşırı yüklenmesini önlemek ve bozulan envanterin son müşterilerin talebi üzerine olumsuz etkisini hesaba katacak şekilde tasarlanmıştır. Modelde doğrusal olmayan terimler, CPLEX kullanarak çözebilmek için doğrusallaştırılmıştır. Ayrıca tavlama benzetimi ve tabu araştırmasına dayanan bu problem için iyi çözümler bulmak amacıyla verimli bir meta sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Önerilen meta sezgisel algoritma ile çıktıların lineer olarak arttığı görülürken, CPLEX tarafından bulunan optimalite boşluklarının problem büyüklüğü ile birlikte üstel olarak arttığı görülmektedir. Widyadana ve diğerleri (2016) her aracın birden fazla rotaya sahip olabileceği bozulabilen ürünler için ERP geliştirmiştir. Depoda birden fazla araç olduğu ve her aracın benzer maksimum kapasiteye sahip olduğu düşünülmektedir.

Problemi çözmek için Parçacık Sürüş Optimizasyonu metodu kullanılmıştır. Taşıt ve stoktaki bozulma oranı etkilerini ve toplam maliyetleri göstermek için sayısal bir örnek ve duyarlılık analizi yapılmıştır. Sonuçlar, saatteki maliyetin, envanter bozulma oranının taşımadaki bozulma oranından daha fazla değere karşı duyarlı olduğunu göstermektedir. Azadeh ve diğerleri (2017) bozulabilir ürünlerin yapısından dolayı müşterilerin ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla maksimum seviye (ML) politikası kullanmaktadır. Modelin zorluğu nedeniyle, problemi çözmek için genetik algoritmaya dayalı bir yaklaşım benimsemektedir. Genetik algoritma parametrelerini ayarlamak için bir Taguchi tasarım yöntemi uygulamaktadır. Ayrıca önerilen modelin ve algoritmanın geçerliliğini doğrulamak için sayısal bir örnek sunulmuştur. Crama ve diğerleri 2018 yılında stokastik talep altında bozulabilir ürün içeren problem için farklı çözüm yöntemleri geliştirmiştir. Sonuçlar, basit bir sipariş politikasının başarılı olmasına rağmen farklı çözüm yöntemlerinin istatistiksel ve ekonomik açıdan daha iyi sonuçlar elde ettiğini göstermektedir.

K. Li, Chen, Sivakumar ve Wu (2014) benzin dağıtım endüstrisindeki ERP'nin yeni bir çeşidini araştırmıştır. Bu sektörde, aracın yolculuk süresini en aza indirmeye odaklanmak için motive edici birkaç özel kısıtlama olduğu düşünülmektedir. Bu problem NP-Hard türünde olduğu için bir Tabu arama algoritması önerilmiş ve Tabu aramasının her iterasyonunda çözüm kalitesini artıran prosedürün bir parçası olarak uyarlanmış bir algoritma geliştirilmiştir. Amaç, literatürde değinilmeyen rota seyahat süresinin seviyesini en aza indirmektir. Önerilen yaklaşımın performansını değerlendirmek için Lagrangian yöntemi kullanılmıştır. Hesaplamalı sonuçlar uyarlanmış algoritmanın, tabu araştırmasının performansını önemli ölçüde arttırabileceği yönünde olmaktadır.

Vansteenkewegen ve Mateo (2014) tedarikçinin hem dağıtım maliyetlerini hem de müşterilerin stok maliyetlerini optimize ettiği tek araçlı sonlu ufuklu döngüsel bir envanter rotalama sorununu incelemiştir. Bu sorunun zorlu bir optimizasyon problemi olmasının nedeni, tek aracın birden fazla sürüş yapmak zorunda olmasıdır. Bu sebeple sadece bir müşteri seçimi yapılmasının yanı sıra, seçilen müşteriler de seyahatlere optimum şekilde ayrılmalıdır. Bunun için sorunun tipik

özelliklerini ve hesaplama süresini azaltma fırsatlarını kullanan tekrarlı bir yerel arama sezgiseli sunulmaktadır. 50 kriter örneğindeki deneysel sonuçlar, algoritmanın ortalama en iyi sonucun %16,02 iyileştirme olduğunu göstermektedir.

Archetti, Bianchessi, Irnich ve Speranza (2014) müşterilerin taleplerini yerine getirmek amacıyla sonlu zaman diliminde tek depodan dağıtım yapılan ERP için formülasyonlar sunup karşılaştırmalar yapmıştır. Sonuç olarak, ML ve OU politikaları kapsamında araç indeksli değişkenleri kullanan formülasyonların daha etkili olduğu yapılan kıyaslamalar sonucunda bulunmuştur. Kıyaslama dal ve kesim algoritması kullanılarak yapılmıştır. Adulyasak, Cordeau ve Jans (2014), Archetti ve diğerleri (2014) ile benzer bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma hem ML hem de OU stok ikmal politikaları altındaki sorunları çözmek için araç indeksi olan ve olmayan çok periyotlu bir ERP formülasyonlarını sunmaktadır. İlk çözümleri belirlemek için ALNS tekniğine dayalı bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir ve farklı formülasyonları çözmek için dal ve kesim algoritmaları önerilmiştir. Sonuç olarak araç endeksi formülasyonlarının optimal çözümler bulmada üstün olduğu, araç dışı endeks formülasyonların genellikle daha büyük durumlarda iyi düşük sınırlar sağlamada etkili olduğu bulunmuştur. Chow ve Nurumbetova (2015) seyahat talebi üzerine Lagrangian temelli bir yaklaşım önermiştir. Halim ve Moin (2014) ise geri sipariş envanter kararı ile ERP'ini çözmek için yapay arı kolonisi yöntemini önermiştir. Geri sipariş politikası sadece daha ekonomik ya da araç kapasitesinin yetersiz olduğu durumlarda dikkate alınır. Envanteri ve geri siparişi yönetmek için dönemler arasında geriye ve ileriye aktarımları içeren bir stok güncelleme mekanizması önerilmektedir.

Bertazzi, Bosco ve Lagana (2015) ve Brinkmann, Ulmer ve Mattfeld (2015) stokastik talep üzerinden çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Gerçekçi bir problemi çözebilen bir Rollout algoritmasının ve en iyi MILP modellerinin çözümünü içeren meta sezgisel bir yaklaşımın tasarlanıp uygulanması stokastik talebin yönetimi ile ilgili yönetimsel öngörüler sağlamaya yardımcı olmuştur (Bertazzi vd., 2015). Stokastik talep altında bisiklet kiralama sistemleri üzerine çalışmış olan Brinkmann ve diğerleri (2015) bu problemi çözmek için, her istasyonda verilen

hedef dolum seviyelerini beklenen düzeyde gerçekleştirmeyi planlamaktadır. Bu nedenle, hedef dolum seviyeleri üreten bilgi sistemleri kullanmışlardır. Uzun vadeli ve kısa vadeli yeniden yerleştirme politikaları sunulmaktadır. Uzun ve kısa vadeli politikalar, hizmet verilen istasyon sayısı ile yer değiştirme operasyonlarının ve ayrıca hizmet verilen istasyonların oranı arasında bir denge olduğunu göstermektedir.

Van Anholt, Coelho, Laporte ve Vis (2016), Desaulniers, Rakke ve Coelho (2016) ve Archetti, Christiansen ve Speranza (2018) optimum çözüme ulaşmak amacıyla dal ve kesim algoritmalarından faydalanmışlardır. Anholt ve diğerleri (2016) Hollanda'daki ATM makinalarının alma ve teslim etme işlemleri ile ilgili çok periyotlu bir ERP'ini modelleyip çözmektedir. Örnek olay incelemesinde, yeni teknolojiler bu makinelerle para yatırma ve banknotları takiben müşterilere yeniden gönderme ek işlevini sağlar. Öncelikle problem büyük ölçekli karma tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak formüle edilmiştir. Sorunun büyüklüğü ve karmaşıklığı göz önüne alındığında, kümeleme yöntemiyle problem alt sorunlara ayrıştırılmış ve bu alt sorunlar da Dal ve Kesim algoritması yardımıyla çözülmüştür. Anholt ve diğerlerinin (2016) çalışmasından farklı olarak Desaulniers ve diğerleri (2016) problemin çözümü için yenilikçi bir matematiksel formülasyon önerip çözümü için Dal, Fiyat ve Kesim algoritması geliştirmişlerdir. Kıyaslama örneklerinde Dal, Fiyat ve Kesim algoritmasının Dal ve Kesim algoritmasından daha iyi sonuç verdiği kanıtlanmıştır. Teslim alma ve teslim etme araç yönlendirme problemlerini ve envanter yönetimini entegre eden problemler sınıfına alıcılar ve teslimatlarla envanter yönlendirme problemleri denir (Archetti vd., 2018). Matematiksel eşitsizlikler ile birlikte problemin matematiksel bir formülasyonunu sunan Archetti ve diğerleri (2018), problemi dal ve kesim algoritması ile çözmüştür. Farklı problem formülasyonları üzerinde testler yaparak eşitsizliklerin etkinliği incelemiştir. Çalışmanın sonucunda, entegre olmayan bir politikanın ortalama maliyetinin entegre bir politikanın maliyetinden %35 daha yüksek olduğunu gösterilmiştir.

Satıcı yönetimli envanter rotalama modeli yenileme politikasına önceden karar verildiğinde ortaya çıkan bir envanter rotalama problemidir (Avella, Boccia ve

Wolsey, 2015). Avella ve diğerleri (2015) çalışmalarında satıcı yönetimli envanter rotalamasının hem ML hem de OU politikası ile ilgili önceden yapılan değişiklikleri sunmaktadır. Amaç, depolama ve dağıtım maliyetlerini minimum kılan ikmal kararlarını belirlemektir. Rotalama çalışmalarının çoğundan farklı olarak dağıtım tek bir araç ile gerçekleşmektedir. Archetti ve Speranza (2016) ise yine satıcı yönetimli envanter rotalama modelinin serbest filo ile entegre bir yaklaşımını incelemektedir. Bu çalışmada Archetti ve diğerlerinin 2014 yılında geliştirdikleri “state of the art” sezgisel metodunu kullanmaktadır. Çoğu sezgisel metotlar %10’un altında hata verirken kullanılan bu sezgisel yöntemin %1’den daha az hata verdiği gözlemlenmiştir.

Z. Li, C. Jiang ve L. Jiang (2016) petrokimya işletmesinin ikincil dağıtım sistemi ERP’ini incelemiştir. Sistemin toplam maliyetini en aza indirmek için bir depodan, tek tip ürünün araç gönderme maliyeti minimize edip araçların erken gelmesini sağlayan yumuşak zaman pençesi kısıtları da dikkate alınarak karma tamsayılı programlama (MIP) modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model Lingo yazılımı tarafından çözümlenmektedir. Farklı ağırlık katsayılarına sahip çözümlere dayanarak, toplam maliyet üzerindeki etkiyi araç atama maliyeti ve seyahat maliyeti ile analiz etmektedir. Çalışmanın sonucu, birden fazla terminal istasyonunun benzinli ikincil dağıtım problemini çözmek için temel oluşturmasıdır.

Raa (2015) ve Raa ve Dullaert (2017) yıllarında yaptığı çalışmalarda döngüsel bir envanter rotalama probleminin filo optimizasyonu ve tasarımı üzerine yoğunlaşmıştır. 2015 yılında döngü zamanları ayarlanabilen belirli bir rota setini periyodik olarak tekrarlamak için homojen bir filo tasarlama problemini incelemektedir. 2017 yılında ise deterministik talep oranlarına sahip tek bir depodan birden fazla müşteriye döngüsel dağıtım planlama için yeni bir çözüm yaklaşımı sunmaktadır.

Chitsaz, Divsalar ve Vansteenwegen (2016), Lappas, Manolis, Krikitos ve Ioannou (2017) ve Qamsari, Motlagh ve Jokar (2017) ve çalışmalarında optimal çözüm için iki aşamalı algoritma kullanmaktadır. Chitsaz ve diğerleri (2016) diğer iki çalışmadan farklı olarak iki aşamalı çözüm algoritması döngüsel ve sonsuz ufuklu bir problem ile ilgilidir. Bu literatür çalışmasındaki tek ürünlü problemler arasında

sonsuz ufuk çalışılmış tek makaledir. Makalede çözüm yaklaşımı tekrarlı olarak ele alınan rotalama ve zamanlama alt çözümlerinden oluşmaktadır. Her alt problem için yeni bir sezgisel önerilmektedir. Rotalama aşaması için sezgisel buluş en dik iniş konseptine dayanmaktadır. Yönlendirme aşaması için olan sezgisel algoritma ise alt programlarını günden güne araç planlarına göre çözmektedir. Çalışmanın literatüre katkısı, algoritmanın ilk tekrarının, 120 düğümlü problemler için yarım saniyeden daha kısa sürede karmaşık problemlere iyi başlangıç çözümleri üretebilmesidir. Lappas ve diğerleri (2017) literatürde fazlaca araştırılmamış olan zaman pencereleri ile ERP'ini çözmek için iki aşamalı bir çözüm algoritması önermektedir. Çözüm yaklaşımı için Değişken Mahalle Araması (VNS) algoritması kullanılmakta ve çözüm aşaması planlama ve rotalama olarak ikiye ayrılmaktadır. Çalışma, envanter ve araç yönlendirme kararlarının entegrasyonunun önemini vurgulamaktadır. Qamsari ve diğerleri (2017) ise çoklu depo ve çoklu araç envanter yönlendirme problemini çözmek için iki fazlı bir melez sezgisel yaklaşım önermektedir. Çalışmanın amacı, depolardaki, müşterilerdeki elde tutma maliyetinin ve rotalarla ilişkili taşıma maliyetlerinin toplamını en aza indirmektir. Önerilen hibrid sezgisel yöntemde, ilk aşama olan yapı aşamasından sonra ikinci aşamada olan iyileştirme aşamasında VNS algoritması kullanılır. Önerilen algoritmanın, hesaplama süresi içinde, önceki yayınlanmış çalışmalarda uygulanan yaklaşımların kazandığı birkaç çözümü bulabildiğini göstermektedir.

Markov, Bierlaire, Cordeau, Maknoon ve Varone (2018) ve Montagne, Gamache ve Gendreau (2018) sonlu planlama ufku üzerinden geri dönüştürülebilir atıkları toplama hakkında çalışma yürütmüşlerdir. Markov ve diğerleri (2018) belirli bir gözlem tarihini göz önüne alarak nokta talep tahminlerini ve belirsizlik düzeyini temsil eden bir tahmin hatası için tahmin modeli kullanılır. Sorun stokastik envanter rotalama şeklindedir. Sorun karma tamsayılı doğrusal olmayan program olarak yayınlanmakta ve bunu çözmek için, gerçek veriler üzerinde test edilmiş ve onaylanmış özel bir tahmin modelini bütünleştiren ALNS algoritması uygulanmaktadır. Algoritmanın literatürdeki envanter yönlendirme ve araç yönlendirme kriterleri üzerinde çok iyi performans gösterdiği test edilmiştir. Montagne ve diğerleri (2018) tarımsal gıda endüstrisindeki bir Kanadalı şirket için envanter yönlendirme probleminin gerçek bir vaka incelemesi üzerinde

çalışmıştır. Bitkisel yağın periyodik olarak kaynak noktalardan toplanması gereken bir envanter rotalama sorunudur. Problem iki farklı yaklaşımla ele alınmaktadır. Öncelikle, problemi yönlendirme kısıtlamaları olmadan çözmek için tamsayılı programlama teknikleri geliştirilmiş, daha sonra bölünmüş prosedürlerden yola çıkarak yapıcı bir sezgisel çözüm önerilmiştir. Performanslar, gerçek şirketin çözümüyle karşılaştırıldığında algoritmaların maliyet etkinliğini %20'ye kadar artırabildiğini göstermektedir.

Lefever, Aghezzaf ve Hadj-Hamou (2016) tek araçlı döngüsel envanter rotalama probleminin matematiksel yapısını ele almaktadır. Nakliye ve stok maliyetlerini en aza indirirken, tek bir depodan, seçilen bir perakendecinin alt kümesine kadar tekrar eden bir dağıtım planından oluşan bir optimizasyon problemidir. Mevcut formülasyonları kullanarak çözüm yöntemleri geliştirmedeki ana komplikasyonlardan biri, amaç fonksiyonunun dışbükey olmasıdır. Matematiksel özelliklerini daha da inceleyerek daha önce literatürde yaptığımız ifadelerle karşılaştırıp bundan yola çıkarak daha etkili bir çözüm algoritması önermektedir. Çalışmanın katkısı, 50 örnekten 22'si için en uygun çözümlerin, diğer 23 örnek için ise iyi bilinen çözüm seçeneklerinin yine iyi bilinen referanslar aracılığıyla sunulmasıdır.

Y. Park, Yoon ve H. Park (2016) ve Rahim, Iteng ve Ahmad (2017) sonlu zaman ufkuunda iki aşamalı bir tedarik zincirinde satıcı yönetimli envanter rotalama üzerine çalışmıştır. Park ve diğerleri (2016) tek bir üreticiden ve birden fazla perakendeciden oluşan, kayıp satışlarla ilgili stok yönlendirme problemi için bir genetik algoritma önermektedir. Önerilen genetik algoritma, sorunun optimizasyon modeli için CPLEX'in çözme mekanizmasından faydalanmıştır. Algoritma, ikmal sürelerini, miktarlarını ve araç rotalarını ayrıştırılmış bir şekilde belirler ve tedarik zinciri kârlarını en üst seviyeye çıkarır. Rahim ve diğerleri (2017) ise müşterilerin envanter ve nakliye maliyetlerini en aza indirmeyi hedefleyerek sonlu zaman ufkuuna sahip, tek dönemli, homojen filolu deterministik envanter yönlendirme problemi tanımlamaktadır. Sonuç olarak, probleminin çözümleri için doğrusal karışık tamsayı programı oluşturulmuştur.

Avella, Boccia ve Wolsey (2017) ve Lefever, Aghezzaf, Hadj-Hamou ve Penz (2018) yaptıkları çalışmalarda algoritma olarak dal ve kesim algoritmasından faydalanmaktadır. Avella ve diğerleri 2017 yılında yaptıkları çalışmada tek dönemlik bir altyapıdan elde edilen ML politikası kapsamında ERP reformlarını anlatmaktadır. Genel geçer tanımlanan eşitsizlikler ve daha sonra ihlal edilen eşitsizliklerin oluşması sorununun etkin bir şekilde çözülebileceği iki spesifik alt sınıf tanıtılır. Tek dönemli formülasyonların gücünü göstermek için ise temel bir Dal ve Kesim algoritması uygulanmaktadır. Lefever diğerleri (2018) ise deterministik bir problem için Dal ve Kesim algoritmasının formülasyonlarını inceleyerek dört farklı iyileştirme önermektedir. Öncelikle problem için bir dizi yeni geçerli eşitsizlik kümesi geliştirilmektedir. Bu yeni geçerli eşitsizlikler, ERP'nin lineer gevşemesini büyük ölçüde artırmaktadır. Formülasyonun yönlendirme bileşeni de incelenmekte ve bu bileşen için, çözümde doğrudan nakliye olasılığını kullanan daha güçlü bir formülasyon geliştirilmektedir. Sonuç olarak, yeni geçerli eşitsizliklerin, iyileştirilmiş sınırların, yeni yönlendirme bileşeninin ve gereksiz değişkenlerin ortadan kaldırılmasının optimalliği bulma konusundaki hesaplama yükünü büyük ölçüde azalttığını göstermektedir. Ayrıca optimal çözümün henüz bilinmediği iki örneğin optimal çözümü de bu çalışma ile bulunmaktadır.

Yadollahi, Aghezzaf ve Raa (2017) ve Gruler, Panadero, Armas, Perez ve Juan (2018) talebin belirsiz olduğu envanter rotalama sorunu üzerinde çalışma yapmaktadır. Yadollahi ve diğerlerinin (2017) amacı talep stokastik olduğunda, periyodik bir envanter rotalama sorununda emniyet stoğu ve servis seviyesini şans kısıtlı optimizasyon problemi olarak modellemektir. Deterministik eşdeğer bir model önerilmektedir. Önerilen deterministik modeller, perakendecilerin planlanan servis seviyelerine göre güvenlik stoğu seviyelerini optimize etmeye çalışmaktadır. Bu modellere dayanarak, güvenlik stoğu planlama ufku içindeki periyotlar boyunca sıfıra inecek ve periyot sayısı korelasyonel olarak artacaktır. Gruler ve diğerleri (2018) stokastik müşteri talepleri ile çok periyotlu problemi çözmek için VNS sezgiseli çerçevesinde Monte Carlo simülasyonunu bütünleştiren simülasyon sezgiseli yaklaşımını sunmaktadır. Simülasyon sezgiseli, her periyotta rassal taleplerin gerçekleşmesiyle ortaya çıkan dönemler arasındaki envanter

değişikliklerini dikkate almayı mümkün kılar. Bu yaklaşımın amacı ise her müşteri dönemi kombinasyonu için en uygun yeniden doldurma politikalarını oluşturmaktır. Bu da dönemler boyunca beklenen toplam maliyeti en aza indiren bireysel yeniden doldurma politikaları olmaktadır.

Tehlikeli maddeler içerdiği bileşenler nedeniyle hem çevreye hem de insan sağlığına zarar vermektedir. Fakat, endüstriyel yaşamın sürdürülebilirliği için gereklidir ve taşımacılığını yapmak oldukça zordur. Bir kaza meydana geldiğinde hasar genellikle çok büyük olduğu için, en iyi envanter yönlendirme kararlarını almak oldukça önemlidir (Hu, J. Li ve X. Li, 2018). Hu ve diğerlerinin 2017’de yaptıkları çalışma, bu tehlikeli maddelerin bulanık talepler altında üç seviyeli bir tedarik zinciri sistemi için ERP incelemesi ile ilgilidir. Amaç, risk ve maliyet arasındaki dengeyi sağlamaktır. Tehlikeli madde nakliyesi için yüklemeye bağlı bir risk ölçütü oluşturarak güvenilir bir hedef programlama modeli önerilmiş ve önerilen modele çözüm aramak için gelişmiş bir genetik algoritma tasarlanmıştır.

Salim, Mounira ve Ouajdi (2018) bir zaman dilimi boyunca toplam mesafenin maliyetini en aza indirmeyi amaçlayan bir ERP’ine hibrit genetik algoritmanın uygulanmasını ele almaktadır. Hibrit algoritmanın sonuçları arasında, küçük ölçekli uygulamalar için en uygun çözümleri sağlayabilmesi ve büyük ölçekli uygulamalar için ise kaliteli çözümler geliştirebilmesi vardır.

Karoonsoontawong, Kobkiattawin ve Xie (2017) çalışmalarında zaman pencereleri, vardiya süresi sınırı ve kısa planlama ufku ve değişken teslim süresi ile çoklu yol envanter yönlendirme problemini çözmek için verimli ek sezgisel yöntemler önermektedir. Önerilen algoritmalar, iki geliştirmesi olan orijinal bir algoritmaya dayanarak geliştirilmiştir. İlk olarak, teslimat hacimleri, ilgili başlangıç teslimat zamanları ve kesin karlar hesaplanır. İkinci olarak, en iyi amaç ve uygulanabilir bir çözümü sonuçlandırma süreci geliştirilir. Bu sezgisel algoritmalar, toplam teslimat hacminin ve toplam seyahat süresinin kar fonksiyonunu en üst düzeye çıkarır. Toplam teslimat hacmi ile toplam seyahat süresi arasındaki değişimler ağırlık değerleri değişirken gözlenir. Hesaplamalı sonuçlar, araçların maliyetinin, teslimat hacmine ve toplam seyahat süresine ek olarak, kar fonksiyonuna açıkça dahil

edilmesi gerektiğini, böylece araç sayısının doğrudan en aza indirilebileceğini göstermektedir.

Alvarez, Munari ve Morabito (2018) tekrarlı yerel arama ve tavlama benzetimine dayalı bir ERP çözmek için iki meta sezgisel algoritma sunmaktadır. Her iki algoritmada da bir yapı sezgiseli ve bir randomize değişken mahalle inişi sezgiseli kullanılır. İki farklı nesnel işlev ele alınmaktadır. Birincisi, toplam maliyetin klasik olarak en aza indirilmesi, ikincisi ise seyahat maliyetleri ile lojistik toplam adı verilen toplam miktar arasındaki orandır. Standart maliyet minimizasyonu ile elde edilen sonuçlar, metotların özelliklerine göre farklı avantajlar sunduğunu göstermektedir. Lojistik oran için sonuçlar ise her iki meta sezgiselin de analiz edilen örneklerin çoğu için en uygun veya en yakın çözümleri bulabildiğini ve göstermektedir. Archetti, Coelho ve Speranza (2018) ERP için kesin algoritma yöntemini kullanmış ve Alvarez ve diğerleri (2018) gibi probleme lojistik oranını da dahil etmiştir. Lojistik oran, toplam taşıma maliyeti ile toplam teslimat miktarı arasındaki orandır. Kesin bir algoritma için ise 15 müşteriye kadar olan örnekleri çözdüğü bilinmektedir. Her iterasyonda, doğrusal ERP'nin çözüldüğü yinelemeli bir kesin algoritma önerilmektedir. Önerilen bu yinelemeli algoritma bilinen tek kesin yaklaşımla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, yeni algoritmanın, araç sayısı küçük olduğunda önerilen algoritmanın daha hızlı olduğunu ve daha fazla müşteri ve daha uzun bir planlama ufkuna sahip örnekleri çözebildiğini göstermektedir.

Guimaraes, Coelho, Schenekemberg ve Scarpin (2018) üç aşamalı ve çok depolu bir envanter rotalama problemi üzerine çalışma yapmıştır. Her bir kademe çok sayıda düğüm içerir ve topoloji olarak çok-çok yapısını kullanmasına rağmen teslimatları direkt olarak gerçekleştirmektedir. Sistemin tüm kararlarını idare edebilecek yeni bir matematiksel formülasyon önermiş ve problemi çözmek için dal ve kesim algoritmasından faydalanmışlardır. Alt problemlerin kesin çözümü için ise ALNS tabanlı bir meta sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Fabrikalarda stok yenileme sürecinin lojistik maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturduğu ve daha karmaşık bir lojistik sisteminin lojistik operasyonlarında daha fazla verimlilik sağladığı gösterilmiştir.

Jahangir, Mohammadi, Pasandideh ve Nobari (2018) sınırların alınmasına izin verilen, her aracın en çok bir kez kullanıldığı, tek merkez deponun tek bir ürünü artan bir teslimatla bir dizi müşteriye dağıttığı, her bir müşteriye sonlu bir planlama ufku boyunca en fazla bir kez sunulan ERP formüle etmiştir. Büyük boyutlu örnekleri verimli bir şekilde çözmek için iki meta sezgisel algoritma, genetik algoritma ve ayrık istilacı yabancı ot optimizasyonu önerilmiştir. Önerilen modeli doğrulamak için, GAMS yazılımı tarafından bulunan bazı küçük boyutlu örneklerin optimal çözümleri, meta sezgisel tarama ile elde edilen çözümlerle karşılaştırılır. Sonuçlar, GAMS tarafından elde edilen küçük boyutlu problemlerdeki çözümlerin uygunluğunun, önerilen iki algoritma tarafından elde edilen çözüme açıkça daha yakın olduğunu, bu nedenle meta sezgiselin daha büyük boyutlu problemlerin çözümü için kullanılabileceği sonucunu vermektedir. Algoritmaların parametrelerinin ayarlanması regresyon yaklaşımı ile gerçekleştirilir. ERP'ini çözmek için algoritmaların performansı, hesaplama süresi ve çözümlerin kalitesi açısından istatistiksel ve çok özellikli karar verme yaklaşımıyla karşılaştırılır. Yapılan deneyler, önerilen modelin çözümü için kesin yöntemlerin yetersiz olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, istatistiksel yaklaşımın sonuçlarına dayanarak genetik algoritma ve ayrık istilacı yabancı ot optimizasyonunun performansının farklı olduğu sonucuna varılamadığını göstermektedir.

Bertazzi, Coelho, De Maio ve Lagana (2019) homojen bir araç filosuna sahip çok depolu ERP sorununu incelemektedir. Çok depolu problem, envanter ve yönlendirme kararları arasındaki dengeyi bütünlük bir şekilde optimize eder. Bertazzi ve diğerleri (2019) problemi karma tamsayılı bir doğrusal programlama modeli olarak formüle etmekte ve sorunu çözmek için meta sezgisel algoritma tasarlayıp uygulamaktadır. Modelin çözümleri, klasik ERP örnekleri, yeni örnekler ve çok etkili olduğunu gösteren gerçek bir vaka çalışmasında, dal ve kesim algoritması ile karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşımdan çıkan sonuç ise iyi bir kümelenmenin ve karşılık gelen kümelenme yollarının, meta sezgiselin iyi bir performansını garanti etmek için yeterli olmadığı yönündedir. Ayrıca kullanılan yöntemin, dal ve kesim algoritmasını geride bıraktığı da gözlemlenmiştir. Fardi, Ghouschi ve Hafezalkotob (2019) de çok depolu bir ERP sorunu için tam sayılı bir

programlama modeli geliştirmektedir. Ayrıca, bazı meta sezgisel algoritmalar uygulayarak tedarikçileri birbirleriyle iş birliği yapabilen oyuncular olarak kabul etmektedirler. Her oyuncunun bir deposu ve mevcut piyasası olarak kabul edilen bazı perakendecileri vardır. Model, farklı mağazalardan tek bir ürünün farklı perakendecilere teslim edileceği bir koalisyon kurulduktan sonra birçok ağ yapısına sahip olacaktır. Ağdaki belirsizliği göz önüne alarak Co-RIRP adı verilen güçlü bir model oluşturulmaktadır. Problem çözüldükten sonra elde edilen sonuçları teşvik etmek için birkaç meta sezgisel algoritma geliştirilmektedir. Son olarak, oyuncular arasında olası maliyet tasarrufunu paylaşmak için birkaç ödeme dağıtım yöntemi uygulanmaktadır.

Chitsaz, Cordeau ve Jans (2019) bir tesiste bitmiş bir ürünün montajını aynı anda planlamaktan ve tedarikçiden malzeme toplayan araçların rotaya getirilmesiyle ortaya çıkan envanter gereksinimlerini karşılamak için genel bir model getirerek boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Sorun karma tamsayılı doğrusal programlama olarak formüle edilmiş ve farklı alt problemlerin yinelemeli çözümlüne dayanan üç fazlı bir ayrıştırma sezgiseli önerilmiştir. İlk aşama bir kurulum zamanlamasını belirlerken, ikinci aşama üretim miktarlarını, tedarikçi ziyaret zamanlarını ve sevkiyat miktarlarını optimize eder. Üçüncü aşama, planlama ufkunda her dönem için bir araç rotalama problemini çözer. Küçük test örneklerinde, önerilen sezgisel dal ve kesim yaklaşımının optimal çözümlerine kıyasla kaliteli çözümler sunar. Orta ve büyük ölçekli örneklerde, algoritma genellikle yüksek taşıma maliyetine sahip veri kümeleri dışında, dal ve kesim yaklaşımı en iyi düşük sınırlara kıyasla yüksek kaliteli çözümler sunmaktadır.

Zaman içinde bozulan gıda ve elektronik ürünler ve piyasadaki diğer birçok ürün bozulabilir özelliklere sahiptir. Maddeler stoklama döneminde sadece bozulmakla kalmamakta, aynı zamanda nakliye süresi boyunca da bozulabilmektedir. Bu nedenle Widyadana ve Irohara (2018) ve Timajchi, Seyed, Al-e-Hashem ve Rekik (2019) çalışmalarını bu tip bozulabilen ürünler üzerine yapmaktadır. Widyadana ve Irohara (2018) bozulma oranını ve zamanını belirlemek için, bozulan eşyaların zaman pencereleriyle birlikte bir envanter yönlendirme problemi geliştirmektedir. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) problemi çözmek için kullanılmaktadır, çünkü

PSO problemleri makul bir sürede ve optimum çözümlerle çözebilmektedir. Modeli göstermek için iki örnek kullanılmıştır. Duyarlılık analizinde maliyetleri etkileyen parametreler gösterilmiştir. Sonuçlar, stoktaki bozulma oranının araçtakilerden daha büyük etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Timajchi ve diğerleri (2019) ise sağlık hizmeti ağındaki tehlikeli ve bozulabilen ilaç maddeleri için bir ERP sorununu ele almaktadır. Her hastanenin talebinin belirli olduğu, ancak zamanın sınırlı bir planlama ufkuna göre değiştiği varsayılmaktadır. Talep, ana merkez eczaneden veya diğer ilgili hastanelerin eczanelerinden, aktarma seçeneğine izin verilerek sağlanabilir. İlaçlar depolama süresince sabit bir oranda bozulur. Önerilen model iki amaçlı bir karma tamsayılı matematiksel programlamadır. İlk hedef, sipariş, nakliye, teslimat, teslim alma, kırılganlık ve stok tutma maliyetleri dahil olmak üzere toplam lojistik maliyetini en aza indirmeyi amaçlar. İkinci hedef ise tüm periyotlar arasında dağıtım sırasında maksimum kaza kaybını en aza indirmeye çalışır. Kaza kaybını göz önüne almak için, her rota için, geçmiş verilere dayanarak iki temel parametre tahmin edilir; Kazanın oluşma olasılığı ve ciddiyet endeksi. Bu nedenle model, talebi ve masrafları aynı anda en aza indirirken talebi karşılamak için en iyi rota ve aktarma seçeneğinin yapılandırılmasını kullanmaya çalışır. Birkaç sayısal örnek CPLEX tarafından üretilir ve çözülür ve verimli bir Hibrit Genetik Algoritmanın (HGA) çözümleri ile karşılaştırılır. Sonuçlar, aktarma seçeneğinin sadece rotaları kaydederek ekonomik tedarik ağı performansını artırmak için bir kaldıraç olarak kullanılabileceğini değil, aynı zamanda sistemin riskli rotalardan kaçınmasına yardımcı olabileceğini göstermektedir.

Yadollahi, Aghezzaf, Walraevens, Raa ve Claeys (2019) ve Zanjani, Gholipour ve Rabbani (2019) belirsiz talep altında gerçekleşen ERP sorununu ele almaktadır. Yadollahi ve diğerleri 2019 yılında her perakendecinin talebinin önceden belirlenmiş bir servis seviyesine kadar karşılandığını garanti ederken, nakliye ve envanter maliyetlerini minimize etmek için iki çözüm yaklaşımını araştırmış ve karşılaştırmıştır. Birinci yaklaşım taleplerin değişkenliği ile başa çıkmak için emniyet stoğu tabanlı deterministik bir model kullanır. İkinci yaklaşım, örnek ortalama yaklaşımını kullanır. Emniyet stoğuna dayalı modelin parametrelerini nasıl ayarlanacağı ise uygun şekilde üretilmiş bir dizi örnek için emniyet stoğu temelli yaklaşımın iki versiyonunun ve örnek ortalama yaklaşımının performansı

karşılaştırarak yapılmaktadır. Ayrıca perakendecilerdeki emniyet stoğu seviyesini dönemler boyunca optimize etmek için ince ayarlı bir emniyet stoğu bazlı çözüm modeli sunulmaktadır. Sunulan sonuçlara göre, ince ayarlı bir emniyet stoğu bazlı çözüm modeli tüm göstergeler için en iyi sonucu elde etmektedir. Zanjani ve diğerleri (2019) ise belirsiz talep ve nakliye maliyetini dikkate alarak üç seviyeli dağıtım sistemlerinde sonlu zaman ufku ile sağlam stok yönlendirme problemini ortaya koymaktadır. Ürünler homojen kapasiteye sahip araçlar tarafından dağıtılır ve karar değişkenlerine bağlı olarak her dağıtım merkezine birden fazla araç atanır. Stoklar hem dağıtım merkezlerinde hem de müşteri bölgelerinde tutulur. Amaç, her bir müşterinin talebini sıkıntısız şekilde karşılarken ve gerçekleşen talepler ve nakliye maliyetlerinden bağımsız olarak fizibilite sağlamak için birleşik bir taşıma ve envanter stratejisi bulmak ve sistem maliyetini en aza indirmektir. Önerilen sistem, problemin deterministik durumu için karma bir tamsayılı doğrusal programlama formülasyonu ile entegre edilmiştir. Son olarak, büyük boyutlu problemlerin kırılabilirliği ile başa çıkmak için, genetik algoritma operatörleri tarafından emperyalist bir rekabet algoritması geliştirilmiştir.

Coelho ve diğerlerinin (2013) yaptığı literatür çalışmasında envanter rotalama problemini deterministik ve stokastik taleplere göre ayırıp farklı tablolar oluşturmaktadır. Biz bu çalışmada talep kriterini ortak olarak aldık ve tabloları ürün tiplerine göre ayırarak iki ayrı tablo haline getirdik. Tablo 1.2 'de 2014-2019 yılları arasında tek ürünlü envanter rotalama üzerine çalışılmış makaleleri sunuyoruz. Bu tabloda tek ürünlü problemler temelinde oluşturulan toplam 8 kriter ve bu kriterlerin olası 20 seçeneğine göre birbiri içerisinde karşılaştırılmıştır.

Tablo 1.2 Tek ürünli ERP çalışmaları için yapısal değişken karşılaştırması

	Zaman Ufku		Talep		Rotalama			Topoloji			Envanter Politikası		Envanter Kararı			Filo Büyüklüğü			Filo Yapısı	
Referans	SL	SS	ST	DE	Dİ	ÇO	SÜ	B-B	B-Ç	Ç-Ç	ML	OU	P	GS	KS	T	Ç	S	HO	HE
K. Li vd. (2014)	✓			✓		✓			✓			✓	✓				✓		✓	
Archetti vd. (2014)	✓			✓		✓			✓		✓	✓	✓				✓			✓
Coelho, Cordeau ve Laporte (2014)	✓		✓			✓			✓		✓	✓			✓	✓			✓	
Halim ve Moin (2014)	✓			✓		✓			✓		✓			✓			✓			✓
Jia vd. (2014)	✓			✓		✓			✓			✓			✓			✓	✓	
Rahimi, Baboli ve Rekik (2014)	✓			✓		✓			✓		✓			✓			✓			✓
Vansteenwegen ve Mateo (2014)	✓			✓		✓			✓		✓		✓			✓			✓	
Qin vd. (2014)	✓			✓		✓			✓		✓		✓				✓		✓	
Rahim vd. (2014)	✓		✓			✓			✓		✓		✓				✓		✓	
Adulyasak, Cordeau ve Jans (2014)	✓			✓		✓			✓		✓	✓	✓				✓		✓	
Avella, Boccia ve Wolsey (2015)	✓			✓		✓			✓		✓	✓	✓			✓			✓	
Mirzaei ve Seifi (2015)	✓			✓		✓				✓	✓				✓		✓		✓	
Z. Li, Jiang C. ve Jiang L. (2016)	✓			✓		✓			✓		✓		✓				✓		✓	
Archetti ve Speranza	✓			✓		✓			✓		✓		✓					✓	✓	

Tablo 1.2 Tek ürünli ERP çalışmaları için yapısal değişken karşılaştırması (devamı)

	Zaman Ufku		Talep		Rotalama			Topoloji			Envanter Politikası		Envanter Kararı			Filo Büyüklüğü			Filo Yapısı	
Referans	SL	SS	ST	DE	Dİ	ÇO	SÜ	B-B	B-Ç	Ç-Ç	ML	OU	P	GS	KS	T	Ç	S	HO	HE
Desaulniers, Rakke ve Coelho (2016)	✓			✓		✓				✓	✓		✓				✓		✓	
Widyadana, Irohara ve Budiman (2016)	✓			✓		✓			✓		✓		✓				✓		✓	
Chitsaz, Divsalar ve Vansteenwegen (2016)		✓		✓		✓			✓		✓		✓				✓		✓	
Lefever, Aghezzaf ve Hamou (2016)	✓			✓		✓			✓		✓			✓		✓			✓	
Park Y., Yoo ve Park H.	✓		✓			✓				✓	✓				✓		✓		✓	
Markov vd. (2016)	✓		✓			✓				✓		✓		✓			✓			✓
Avella, Boccia ve Wolsey (2017)	✓			✓		✓			✓		✓		✓				✓			✓
Azadeh vd. (2017)	✓			✓		✓			✓		✓		✓			✓			✓	
Karoonsoontawong, Kobkiattawin ve Xie	✓			✓		✓			✓		✓		✓					✓	✓	
Yadollahi, Aghezzaf ve Raa (2017)	✓		✓			✓			✓		✓		✓				✓			✓
Lappas, Krikitos ve Ioannou (2017)	✓			✓		✓			✓			✓	✓				✓		✓	
Rahim, Iteng ve Ahmad (2017)	✓			✓		✓			✓			✓	✓				✓		✓	

Tablo 1.2 Tek ürünli ERP çalışmaları için yapısal değişken karşılaştırması (devamı)

	Zaman Ufku		Talep		Rotalama			Topoloji			Envanter Politikası		Envanter Kararı			Filo Büyüklüğü			Filo Yapısı	
Referans	SL	SS	ST	DE	Dİ	ÇO	SÜ	B-B	B-Ç	Ç-Ç	ML	OU	P	GS	KS	T	Ç	S	HO	HE
Qamsari, Motlagh ve Jokar (2017)	✓			✓		✓				✓	✓		✓				✓		✓	
Salim, Mounira ve Ouajdi (2018)	✓			✓		✓			✓		✓		✓				✓		✓	
Alvarez, Munari ve Morabito (2018)	✓			✓		✓			✓		✓		✓				✓		✓	
Archetti, Christiansen ve Speranza (2018)	✓			✓		✓			✓			✓	✓			✓			✓	
Guimaraes vd. (2018)	✓			✓	✓					✓	✓	✓	✓				✓		✓	
Archetti, Coelho ve Speranza (2018)	✓			✓		✓			✓		✓		✓				✓		✓	
Jahangir vd. (2018)	✓			✓		✓			✓			✓		✓			✓			✓
Crama vd. (2018)	✓		✓			✓			✓			✓	✓				✓		✓	
Gruler vd. (2018)	✓		✓			✓			✓		✓			✓			✓		✓	
Widyadana ve Irohara	✓			✓		✓			✓			✓	✓				✓		✓	
Bertazzi vd. (2019)	✓			✓		✓				✓	✓		✓				✓		✓	
Fardi, Ghouschi ve Hafezalkotob (2019)	✓		✓			✓				✓		✓		✓			✓			✓
Timajchi vd. (2019)	✓			✓		✓				✓	✓			✓	✓		✓		✓	
Yadollahi vd. (2019)	✓		✓			✓			✓			✓		✓			✓		✓	

1.1.2 Çok Ürünlü Envanter Rotalama Çalışmaları

Çok ürünlü envanter rotalama problemi, gerçek yaşam problemlerine daha yakın olan problem türüdür ve belirli bir planlama ufkunda birden çok ürünün araç filosu aracılığıyla bir veya birden çok tesisten n adet müşteri kümesine tekrarlı dağıtımıdır. Burada amaç, müşterilerin stoksz kalmadan talep ettikleri ürün miktarlarına ve çeşitlerine maliyeti minimum kılacak şekilde ulaştırılmasıdır. Çok ürünlü envanter rotalama üzerine birçok makale yayınlanmaktadır. Bu aşamada son yıllarda yayınlanan makaleler incelenmiştir. İncelenen makalelerin özetleri aşağıdaki şekilde sunulmuştur:

Mjirda, Jarboui, Mladenovic, Wilbaut ve Hanafi (2014) ve Hasni, Toumi, Jarboui ve Mjirda (2017) çok ürünlü ERP'nin çözümü için Genel Değişken Mahalle Araması (GVNS) tabanlı meta sezgisel önermektedir. Her iki çalışma da tedarikçinin talebini deterministik olarak bilmekte ve iyi çözümler üretmek için, VNS sezgiseline dayanan bir algoritma geliştirmektedir. Hasni ve diğerlerinin 2017'de yaptıkları çalışmanın Mjirda ve diğerlerinin 2015'te yaptıkları çalışmadan bir farkı önerilen yöntem için dal ve kesim algoritması ile bir kıyaslama yapmaktadır. Her iki çalışmanın sonucunda da önerilen sezgiselin iyi çözümler üretebildiğini göstermektedir.

Lmariouh, Hachemi, Jamali ve Bouami (2014) ve Lmariouh ve diğerleri (2017) şişelenmiş suyun dağıtımındaki taşıma ve stok maliyetlerini en aza indirmeyi hedefleyen gerçek bir yaşam problemini sunmaktadır. Her iki çalışmada da filo yapısı homojen, filo büyüklüğü serbest olmaktadır. Lmariouh ve diğerleri 2014 yılındaki çalışmasında direkt teslimat işlemini gerçekleştirmekte ve sorunun çözümü için MILP modeli önermektedir. 2017 yılındaki çalışmada ise rotalama çoklu olmakta ve sorunun çözümü için ERP modellerinin, dal ve kesim algoritmalarının geçici bir modifikasyonunu önermektedir.

Cordeau, Lagana, Musmanno ve Vocaturo 2015 yılındaki çalışmasında sonlu planlama ufku üzerinden birkaç farklı ürünün bir araç filosu tarafından teslim edilmesi üzerine çalışmaktadır. Burada teslimatların ve tüketim oranlarının sürekli miktarlar olduğu varsayılmaktadır. Cordeau ve diğerleri (2015) satıcının karar

sürecine dayanan üç aşamalı bir sezgisel sunmaktadır. İlk aşamada, yenileme planları Lagrangian merkezli bir yöntem kullanılarak belirlenir. İkinci aşamada, araç güzergahlarını oluşturmak için basit bir prosedür kullanılır. Üçüncü aşamada ise stok ve yönlendirme kararlarının entegre sorununa iyi bir çözüm bulmayı amaçlayan MILP modeli önerilir.

Noufissa ve Mohamed (2016) taranan literatür içinde çok ürünlü çalışıp sonsuz planlama ufkuna sahip tek çalışmadır. Ayrıca her ürüne olan talep stokastiktir ve zamana göre değişmektedir. Konteyner terminalindeki ERP'ini çözmek için problem MIP modeli olarak formüle edilmiştir ve karınca koloni optimizasyonu olarak adlandırılan karınca davranışlarına dayanan optimizasyon metodolojisi kullanılmaktadır. Wong ve Moin (2014) de hem nakliye hem de stok maliyetlerini en aza indirmek için MIP modeli formüle eder ve algoritma olarak karınca kolonisinden faydalanır. Önerilen model, tedarikçi ya da toptancıdan market ve mağazaları teslimat süreci gibi birçok dağıtım işleminde uygulanabilmektedir.

Nolz, Absi ve Feillet (2014) ve Niakan ve Rahimi (2015) çalışmalarında çok amaçlı envanter rotalama sorununu incelemektedir. Çok amaçlı envanter rotalama problemi birden çok kriter fonksiyonun aynı anda en iyi yapılmaya çalışıldığı yöntemidir. Nolz ve diğerleri (2014) atık malzemelerindeki hızlı artış ve sağlık hizmeti atıklarının güvenli bir şekilde imha edilmemesinden dolayı bulaşıcı tıbbi atıklar için bir toplama sisteminin tasarımını ele almaktadır. Stokastik atık toplama sorunu, birbiriyle çelişen iki objektif fonksiyon göz önüne alınarak formüle edilmiştir. Gerçek dünyadaki motivasyonlu envanter yönlendirme problemini çözmek için üç sezgisel çözüm yaklaşımı önerilmektedir. Önerilen yöntemler gerçek veriler üzerinde test edilmekte ve performansları çeşitli kalite göstergeleri ile değerlendirilmektedir. Niakan ve diğerleri (2015) sağlık tesislerine tıbbi ilaç dağıtımını için çok amaçlı matematiksel model sunmaktadır. Amaç fonksiyonun ilk kısmında envanter ve taşıma ilgili maliyetleri en aza indirilmek istenir. İkinci kısım, talep tahmini hatalarının miktarını ve süresi dolmuş ilaçların miktarını en aza indirmeyi hedefler. Üçüncü kısım ise çeşitli araç tipleri tarafından salınan sera gazı emisyonunu minimum yapmaya çalışır. Gerçek hayat problemlerinde yüksek belirsizlikten dolayı önerilen modelin, talep, kıtlık ve nakliye maliyetleri açısından

belirsiz parametrelerle başa çıkabilme kapasitesini arttırılır. Bu nedenle hem dengeli hem de dengesiz çözümler bulmak için verimli bulanık bir yaklaşım uygulanır. Sonuçlar ve duyarlılık analizi, belirsiz parametreleri ele almada önerilen çözüm yaklaşımının gücünü göstermektedir.

Bozulabilir ürünlerin son kullanma tarihini yönetme, gıda ürünlerin geri dönüşümü, yakıt tüketiminin ve çevrenin ve sosyal kriterlerin yönetilmesi gibi farklı kriterler ve kısıtlamaların dikkate alınması bozulabilir ürünlerin ERP'inde karmaşıklığa neden olur (Rahimi, Baboli ve Rekik, 2015, 2016). Rahimi ve diğerlerinin 2015 ve 2016 yıllarında yaptıkları çalışma ERP için çabuk bozulan ürünlerin probleme kattığı karmaşıklığı göz önüne alarak yeni matematiksel modeller önermektedir. Her iki çalışmada da problemin yapısal değişkenleri aynı olmaktadır. Yani sonlu bir ufukta, talebin bilindiği, geri sipariş envanter kararının olduğu ve heterojen filonun kullanıldığı bozulabilir ürün ERP'i çalışılmıştır. İki çalışmada da ekonomik ve sosyal yönler dikkate alınarak yeni bir model sunulmaktadır. Bozulabilir ürünlerin dağıtımında aracın hızının etkisini incelenir ve değerlendirme olarak teslimat süresini kısaltmaya izin verilir fakat bu sürücünün kaza riskini artırmaktadır. Bu konular arasında uyum bulmak için çok amaçlı matematiksel model önerilir. Modelde iki hedef vardır. İlki, geleneksel envanter ve dağıtım maliyetine, yaş ve fiyat stratejisine ve geri ödeme maliyetine odaklanmaktadır. İkinci hedef, sürücülerin farklı yollardaki araç hızını göz önüne alarak sürücü yaralanmasının en aza indirilmesine odaklanır. Her objektif fonksiyonun önemini ve maliyetini incelemek için kar ve sürücü zedelenmesi değişkenleri ile duyarlılık analizi yapılmıştır.

Abdelhalim, Eltawil ve Fors (2016), Shaabani ve Kamalabadi (2016) ve Hu, Toriello ve Dessouky (2018) yaptıkları çalışmalarında bozulabilir ürünler için stok ve nakliye entegre problemini incelemektedir. Abdelhalim ve diğerlerine göre (2016) üretim planlama, envanter kontrolü ve taşıma politikalarının etkin bir şekilde entegre edilmesi önemli tasarruflar sağladığından bu çalışmalarında entegre bir envanter ve dağıtım planlama modelini ele almaktadırlar. Optimum planı üretmek amacıyla önerilen MIP modeli geliştirilir ve model, farklı planlama dönemlerindeki üretim kapasitesini, araç kapasitesini, her bir ürünün talebini ve üretim, envanter

ve nakliye ile ilgili toplam maliyetleri dikkate alır. Shaabani ve diğerleri (2016) iki seviyeli tedarik zincirinde, ürünlerin tek bir üreticiden birden fazla perakendeciye, heterojen yapıda araç filosu kullanarak taşıma yapıldığı bir problemi ele almaktadır. Amaç, stoksuzluğu önleyerek toplam maliyeti en aza indirmektir. Popülasyon temelli bir simüle edilmiş tavlama (PBSA) algoritması önerilmiştir. PBSA algoritması, simüle edilmiş tavlama ve PBSA algoritmasının üstünlüğünü gösteren genetik algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Üst ve alt sınırların elde edilmesi için CPLEX çözücü, dal ve kesim ve Lagrangian gevşeme yöntemleri de kullanılmıştır. Hesaplamalı sonuçlar, PBSA algoritmasının yüksek verimliliğini göstermektedir. Hu ve diğerleri 2018 yılında yaptıkları çalışmada konsolide taşımacılıktan faydalanmaktadır. Konsolide taşımacılık, aynı müşteri ve aynı bölgeye sevkiyat durumu olduğunda ürünlerin bir süre bekletilip, birleştirilerek tek parça halinde nakliye işleminin gerçekleştirilmesine denir. Bu problem için konsolide işlemini gerçekleştiren iki aşamalı bir dağıtım problemi incelenmiştir. Alt problemlere ve optimizasyona dayalı tekrarlı bir çözüm çerçevesi önerilmiştir. Yaptıkları deneylerin sonucunda çözüm yaklaşımının oldukça verimli olduğunu ve zorlu örnekleri için etkili çözüm üretebildiği kanıtlanmıştır.

Noor ve Shuib (2015) ve Lagana, Longo ve Santoro (2015) problemlerinin çözümünde kümeleme tekniğinden yararlanmaktadır. Noor ve diğerleri (2015) ERP problemlerinde genellikle çalışmaların tek depo bazında olmasından dolayı çalışma alanını çoklu depo üzerinden yapmıştır. 15 test veri seti oluşturmak için 100 müşteri içeren 45 veri seti kullanılmıştır. Çoklu depo örneklerinin elde edilebildiğini ve kümelenme tekniklerinin, verilerin istenen sayıda kümeye ayrılmasına yardımcı olmaktadır. Lagana ve diğerleri (2015) bir tedarikçinin bir dizi heterojen ürününün ERP'i için süpermarket dağıtım endüstrisi kapsamında etkili bir metodoloji ile sunmaktadır. Bu bağlamda, her kategoride farklı envanter politikaları ile bağlantılı olarak müşteri başına çok kategorili ürünler için kümeleme tekniği kullanılmıştır. Stratejik kararlar vermek için sırasıyla satıcı ve müşteri olarak adlandırılan iki yeni MIP modeli önerilmiş ve analiz edilmiştir. Bir ayrışma yaklaşımı geliştirilmiş ve bu yaklaşımda gömülü iki optimizasyon modelinin davranışları karşılaştırılmıştır.

Liu, Lu ve Chung (2016) minimum maliyet kriterine dayanarak periyodik bir sürede gerçekleşen envanter ve taşıma maliyetleri için politikaları belirler. Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) çok boyutlu sorunların çözümü için iyi olarak bilindiğinden en uygun çözümü araştırmak amacıyla PSO kullanılarak hibrit sezgisel yöntem önerir. Bu hibrit yöntem, Büyük Komşuluk Araması'nın (LNS) PSO'ya entegre eder. Her bir partiküle farklı yinelemelerde yerel bir arama uygulanır. Daha sonra, her parçacık için yerel bir optimum parçacık elde edilir. Sonuçlar, önerilen hibrit sezgisel yöntemin iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Singh, Arbogast ve Neagu (2015) gazların depolanması için tanklara sahip müşterilere sıvılaştırılmış endüstriyel gazların dağıtıldığı endüstriyel gaz dağıtımında meydana gelen envanter yönlendirme problemini çözmektedir. Asıl sorundaki müşteri setini alt problemlere ayırmaya dayanan bir yaklaşım önerilir. En küçük alt problem, bir dizi müşteri kümesiyle birlikte en acil şekilde teslim edilmesi gereken müşteriden oluşur. Her alt problem, ardı ardına büyüyen müşteri sayısı ile çözülür. Her bir alt problem daha sonra bir randomize yerel arama sezgisel yöntemle çözülür. Çalışmada, özellikle endüstriyel gaz dağıtımında büyük ölçekli gerçek yaşam problemi örnekleri için uygun bir çözüm metodolojisi geliştirmek amaçlanmıştır.

Guemri, Bekrar, Beldjilali ve Trentesaux (2016) çok ürünlü ve çok araçlı ERP için geliştirilmiş bir Açgözlü Rastgele Uyarlamalı Arama Prosedürü (GRASP) tabanlı sezgiseli tanıtmaktadır. Probleme çözüm sağlamak için GRASP tabanlı bir sezgisel (GBH) geliştirilmiştir. Her GBH yinelemesi iki ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, envanter tutma maliyeti ile yönlendirme maliyeti arasındaki en iyi geçişin gözlendiği ve uygulanabilir çözümün geri döndüğü açgözlü rassallaştırılmış prosedürdür. İkinci aşama, GRASP için, ilk aşamada bulunan çözeltiyi geliştirmek amacıyla tabu arama meta sezgiselinin kullanılmasıdır. Bazı durdurulmuş kriterler karşılanana kadar GBH iki fazı tekrarlanır. Önerilen yöntem iki karşılaştırmalı veri kümesinde değerlendirilerek son teknolojiye sahip iki algoritma ile karşılaştırılmıştır.

Xiao ve Rao (2016) kısıtlı zaman penceresinde çalışmıştır. Çalışma bir tedarikçi, birden fazla müşteri, çoklu periyot ve satıcı yönetimli envanter kapsamında iki

aşamalı lojistik sisteminden oluşmaktadır. Modeli çözmek için bulanık genetik algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algoritmanın problem için etkili bir yaklaşım olduğu kanıtlanmıştır. Son olarak, algoritmanın ve optimizasyon modelinin etkinliği hesaplamalı deneylerin simülasyonu ile gösterilmiştir. Iassinovskaia, Limbourg ve Riane (2017) de sonlu planlama ufku boyunca kısıtlı zaman pencereleri içinde çalışmaktadır. Teslim alma ve dağıtım envanter rotalama için kapalı devre tedarik zincirlerinde karşılaşılan güncel bir sorunu incelemektedir. Karışık tamsayılı doğrusal bir program geliştirilmiştir. Problemden ayrıca iade edilebilir nakliye ürünleri kullanılmaktadır. Bu nedenle, maksimum depolama kapasitesi ile karakterize edilen hem boş hem de yüklü iade edilebilir ürünlerden oluşan bir depolama alanına mevcuttur. Geliştirilen karma tamsayılı programlama modeli küçük ölçekli örneklerde test edilmiştir. Daha gerçekçi büyük ölçekli sorunların üstesinden gelmek için, iki meta sezgisel önerilmiştir. Elde edilen sonuçların sezgisel ve kesin algoritmaları birleştiren daha uygun tekniklerin ve yeni prosedürlerin test edilmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Nambirajan, Mendoza, Pazhani, Narendran ve Ganesh (2016) farklı tedarikçilerden, bir merkezi depo ve bir dizi deponun birden fazla ürününü içeren ERP'ini incelemektedir. Tedarikçilerden merkezi depo ve bu depodan diğer depolara, belirli zaman diliminde nakliye programlarını uygun şekilde yapmak için entegre bir tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. CARE (Kümeleme, Tahsis, Genişletilmiş Yönlendirme) adı verilen üç fazlı bir sezgisel önerilmektedir. Araçların merkezi depodan diğer depolara yönlendirilmesi modellenir ve problem üç fazda çözülür. Önce düğümler kümelendir, daha sonra her bir düğüme atama işlemi gerçekleşir ve son olarak dağıtım araçları düğüm kümelerinden geçirilir. Genişletilmiş yönlendirme aşamasındaki değişikliklere bağlı olarak üç farklı sezgisel model önerilmektedir. Önerilen sezgisellerden elde edilen sonuçların, CPLEX üst sınırlarından istatistiksel olarak daha iyi olduğu kanıtlanmıştır.

Yeh ve Low (2017) tek depo ve sınırlı bir süre içinde birçok perakendeciye bölünmüş teslimatla dağıtım yapılmasına izin verilen çok ürünlü envanter rotalama problemini ele almıştır. Amaç, araç, envanter ve nakliye maliyeti dahil

olmak üzere toplam maliyetleri en aza indirmektir. Teslimat programı ve her bir perakendeci için her ürünün miktarı aynı anda kararlaştırılmalıdır. En iyi şekilde çözümlenecek bir matematik modeli sunulmakta ve örnek verilmektedir. Sunulan model, verilen örneği en iyi şekilde çözmesine rağmen, problem büyüklüğünün artmasıyla zaman kaybettirmektedir. Bu nedenle çalışmada, genetik tabanlı algoritmalar, partikül kümelenmesi gibi bazı meta sezgisel yöntemlerin büyük ölçekli problemin çözümü için gelecekteki çalışmalarda uygulanması vurgulanmaktadır.

Peres, Repolho, Martinelli ve Monteiro (2017) literatürde pek çalışılmamış olan ve perakende sektöründe aktarma ile yapılan çok aşamalı, çok ürünlü bir ERP tanıtmaktadır. Mevcut yaklaşımlara ilişkin yapılan yenilikler, aktarma hareketlerinin fabrikadan dağılan homojen araçlar tarafından gerçekleştirilmesi ve araçların zaman ve maliyet kısıtlamalarına tabi tutulmasıdır. Peres ve diğerleri (2017) çalışmasında kesin bir formülasyon sunmaktadır ve problem için meta sezgisel bir algoritma geliştirmektedir. Yöntemler, gerçek büyük ölçekli Brezilya perakende endüstrisine, mevcut operasyonlara kıyasla, lojistik maliyetlerde %9 ve stok seviyesinde %70'lik bir azalma sağlamaktadır.

Arab, Ghaderi ve Moghaddam (2018a) ve Arab, Ghaderi ve Moghaddam (2018b) bir dağıtıcı ve bir dizi müşteri grubundan oluşan iki seviyeli bir tedarik zincirinde çok aşamalı, çok amaçlı ve çok ürünlü bir ERP ele almaktadır. Arab ve diğerlerinin 2018 yılında yaptığı iki çalışmada benzer özellikler taşımaktadır. Bu benzerlikler arasında çok amaçlı ERP, heterojen filo, geri sipariş politikasına izin verilmesi, deterministik talep ve sonlu ufuk gibi kriterler vardır. Çok amaçlı modelleri doğrulamak ve problemleri çözmek için ϵ -kısıtlama yöntemi kullanılmıştır. İki modelde de amaç, sistemin toplam maliyetinin ve riske dayalı taşımanın en aza indirilmesidir. Problemin hesaplama karmaşıklığı nedeniyle, örnek problemler için ϵ -kısıtlama metodu ile birlikte Dominant Olmayan Sıralama Genetik Algoritması (NSGA-II) kullanılmış ve hesaplama sonuçları NSGA-II'nin iyi performans gösterdiğini kanıtlamıştır (Arab vd., 2018a). Diğer çalışmadaki model için de NP-Hard türünde olduğundan, iki meta sezgisel algoritma (yani MOICA ve NSGA-II)

düşünülmüştür. Çok amaçlı kriterler göz önünde bulundurulduğunda ise NSGA-II modeli çözmede daha etkili olmuştur (Arab vd., 2018b).

Ramadhan, Imran ve Rizana (2018) record to record seyahat algoritmasını kullanarak depoda bulunan homojen filo ile çoklu periyot, çoklu tedarikçi ve çoklu ürünü ele almaktadır. Ürünler sonlu ufukta tedarikçiden montaj tesisine taşınmaktadır. Ramadhan ve diğerleri (2018) iki aşamalı bir algoritma önermektedir. İlk aşamada çözüm, en düşük maliyetli ekleme algoritması kullanılarak elde edilir. İkinci aşamada, record to record seyahat algoritması ile geliştirilmektedir. Algoritma, literatürdeki veri kümeleri kullanılarak test edilmiş ve veriler, oluşturulan yazılım programı kullanılarak işlenmiştir. Önceki araştırmalara göre iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Çankaya, Ekici ve Özener (2018) diğer çalışmalardan farklı olarak insani yardım malzemelerinin dağıtımındaki sorunu incelemektedir. İnsani yardım malzemelerinin dağıtım faaliyetlerini inceleyerek, planlama ufku üzerinde düzenli olarak tüketilen hızlı, adil ve eşit dağıtımı sağlayan dağıtım yaklaşımları geliştirmişlerdir. Çankaya ve diğerlerinin (2018) çalışmasında, dağıtım programının doğruluğunu hesaplamak için, her bir dağıtım bölgesinin günlük kullanım oranını hesaplayarak, herhangi bir ek ikmal olmadan talebi karşılamak amacıyla yeterli olacak gün sayısı bakımından kıtlık seviyesi tanımlanır. Bu seviye gevşek olarak tanımlanır ve amaç, tüm dağıtım bölgeleri arasındaki minimum gevşek değeri en üst düzeye çıkaracak teslimat planını belirlemektir. Daha sonra, bu malzemeler etkilenen bölgelerde bulunan yerel dağıtım sitelerine dağıtılır. Bu dağıtım sorununu çözmek için üç aşamalı (kümelenme, yönlendirme ve iyileştirme) bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Yönlendirme ve tahsis kararları birbirlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Önerilen yöntem, eşit bir yardım malzemesi dağıtım planları üretmek için yönlendirme ve kaynak tahsis kararları arasındaki etkileşimi dikkate almaktadır.

Rohmer, Claassen ve Laporte (2019) bozulabilir ürünler için iki aşamalı bir envanter rotalama problemi sunmaktadır. Amaç toplam taşıma ve elde tutma maliyetlerini en aza indirmektir. Problem karma tamsayılı doğrusal programlama olarak formüle edilmekte ve azaltılmış bir formülasyonun çözümü ile birlikte

adaptif büyük komşuluk bölgesi arama metasezgiseli ile çözülmektedir. Sorunun iki aşamalı yapısı göz önüne alındığında, hesaplama sonuçları, en uygun çözüm yaklaşımını seçerken maliyet yapısını dikkate almanın önemini ve gerçekçi ebattaki örnekler için makul hesaplama sürelerinde önerilen sezgisel yöntemle çözülebildiğini göstermektedir.

Jafarian, Asgari, Mohri, Fatemi-Sadr ve Farahani (2019) araç arıza olasılığı olan bir ERP incelemektedir. Problem, çoklu dönem, çoklu ürün, stok maliyeti, serbest zaman pencereleri, çoklu heterojen araç, deterministik talep, değişken araç hızı (başarısızlıktan önce ve sonra) ve müşteri envanter politikasını (siparişe göre) ele almaktadır. Araç arızası problemi, envanter yönlendirme problemleri alanına girerek formüle edilir. Bu araştırmada alınan araç arızası stratejisi “sabit merkez” dir. Model NP-Hard türünde olduğundan, çözmek için dört senaryo ile uyarlanmış bir sosyal tabanlı algoritma tasarlanmıştır. Yerel optimum ve erken yakınsaklıkta yakalanma şansını azaltmak için “küresel savaş” prosedürü algoritmaya dahil edilmiştir. Algoritmanın duyarlılık analizleri akademisyenler ve uygulayıcılar için öngörü sağlar. Problem matematiksel olarak formüle edilir ve dört senaryo ile meta sezgisel algoritmalar uygulanarak çözülür. Önerilen algoritmaların etkinliğini ve verimliliğini değerlendirmek için, önerilen algoritmaları kıyaslama yöntemleriyle karşılaştırmaya yardımcı olacak bazı test problemleri üretilir. Kıyaslama yöntemleri SBA, ICA, HGS ve HPV gibi bazı popüler algoritmalar ve önerilen bir alt sınırdır. Algoritma 320 perakendeci, 24 farklı tipte araç ve 10 ürünle ilgili problemlere başarıyla uygulanmıştır. Hesaplamalı deneyler, toplam maliyet performansı ölçüsünde SBA, ICA, HGS ve HPV'den daha iyi performans gösterdiğini ve HPV'nin hesaplama süresi açısından diğerlerinden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Misra, Kapadi, Gudi ve Saxena (2019) Bu yazıda, paketlenmiş sıvılaştırılmış gaz halindeki ürünlerin tedarik zincirinin kaynak optimizasyonu ve envanter yönlendirmesi ele alınmakta ve bu tedarik zincirindeki tüm önemli nüanslarını uygun şekilde yakalayan MILP tabanlı bir çerçeve önerilmektedir. Sıvılaştırılmış gaz halindeki ürünler çeşitli yeniden kullanılabilir kaplar kullanılarak tedarik zinciri boyunca taşınır. Geleneksel envanter yönlendirmesinin yanı sıra, bu

makalede sunulan çerçeve, 1) kaynak tahmini, 2) araç kapasitesi kullanımı ve 3) envanter yönetimi gibi bazı temel hususları incelemektedir. Önerilen çerçeve, farklı talep senaryoları altında tedarik zincirinin birkaç nüansını temsil etmekte ve mevcut kaynakları kullanarak toplam taşıma maliyetini en aza indiren tüm tedarik zinciri için optimal bir teslimat programı oluşturmaktadır. Daha büyük operasyonel ufuklar için önerilen çerçeveyi başarılı bir şekilde uygulamak için bir yuvarlanma süresi ufkuna dayalı planlama stratejisi kabul edilmiştir. Misra ve arkadaşlarının (2019) önerdiği algoritma, mevcut tüm kaynakları etkin bir şekilde kullanır ve kesintisiz bir tedarik zincirini işletmek için gereken kaynakların optimal bir tahminini sağlar.

Tablo 1.2’de 2014-2019 yılları arasındaki tek ürünlü ERP çalışmalarının olduğu makaleleri sunduk ve yapısal değişkenlerini karşılaştırmalı olarak verdik. Tablo 1.3’de ise 2014-2019 yılları arasında çok ürünlü envanter rotalama üzerine çalışılmış makaleleri sunuyoruz. Bu tabloda çok ürünlü problemler temelinde oluşturulan toplam 8 kriter ve bu kriterlerin olası 20 seçeneğine göre birbiri içerisinde karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 1.3 Çok ürünli ERP çalışmaları için yapısal değişken karşılaştırması

	Zaman Ufku		Talep		Rotalama			Topoloji			Envanter Politikası		Envanter Kararı			Filo Büyüklüğü			Filo Yapısı	
Referans	SL	SS	ST	DE	Dİ	ÇO	SÜ	B-B	B-Ç	Ç-Ç	ML	OU	P	GS	K	T	Ç	S	HO	HE
Lmariouh vd. (2014)	✓			✓	✓					✓		✓	✓					✓	✓	
Mjirda vd. (2014)	✓			✓		✓					✓		✓					✓	✓	
Wong ve Moin (2014)	✓			✓		✓			✓		✓		✓					✓	✓	
Nolz, Absi ve Feillet (2014)	✓		✓			✓			✓		✓				✓	✓			✓	
Cordeau vd. (2015)	✓			✓			✓			✓	✓				✓		✓		✓	
Niakan ve Rahimi (2015)	✓		✓			✓			✓		✓			✓			✓			✓
Rahimi, Baboli ve Rekik (2015)	✓			✓		✓			✓		✓			✓			✓			✓
Singh, Arbogast ve Neagu (2015)	✓			✓		✓				✓	✓		✓				✓			✓
Lagana, Longo ve Santoro (2015)	✓			✓		✓				✓	✓		✓				✓		✓	
Abdelhalim, Eltawil ve Fors (2016)	✓			✓		✓			✓			✓	✓				✓		✓	
Nambirajan vd. (2016)	✓			✓		✓				✓		✓	✓				✓		✓	
Noufissa ve Mohamed (2016)		✓	✓			✓			✓			✓	✓					✓	✓	
Rahimi, Baboli ve Rekik (2016)	✓			✓		✓			✓		✓			✓			✓			✓

Tablo 1.3 Çok ürünlü ERP çalışmaları için yapısal değişken karşılaştırması
(devamı)

	Zaman Ufku		Talep		Rotalama			Topoloji			Envanter Politikası		Envanter Kararı			Filo Büyüklüğü			Filo Yapısı	
Referans	SL	SS	ST	DE	Dİ	ÇO	SÜ	B-B	B-Ç	Ç-Ç	ML	OU	P	GS	K	T	Ç	S	HO	HE
Shaabani (2016)	✓			✓		✓			✓		✓		✓				✓			✓
Xiao ve Rao (2016)	✓			✓		✓				✓		✓	✓				✓		✓	
Guemri vd. (2016)	✓			✓		✓			✓		✓		✓				✓		✓	
Iassinovskaia, Limbourg ve Riane (2017)	✓			✓		✓			✓		✓				✓		✓		✓	
Hasni vd. (2017)	✓			✓		✓			✓		✓		✓				✓			✓
Yeh ve Low (2017)	✓			✓		✓			✓			✓	✓				✓		✓	
Peres vd. (2017)	✓			✓		✓				✓	✓		✓				✓		✓	
Lmariouh vd. (2017)	✓			✓		✓				✓	✓		✓					✓	✓	
Arab, Ghaderi ve Moghaddam (2018a)	✓			✓		✓			✓			✓	✓				✓			✓
Arab, Ghaderi ve Moghaddam (2018b)	✓			✓		✓			✓			✓	✓				✓			✓
Çankaya, Ekici ve Özener (2018)	✓			✓		✓			✓			✓		✓			✓		✓	
Hu, Toriello ve Dessouky (2018)	✓			✓	✓				✓			✓	✓			✓	✓		✓	
Ramadhan, Imran ve Rizana (2018)	✓			✓		✓			✓			✓	✓				✓		✓	
Jafarian vd. (2019)	✓			✓		✓			✓			✓		✓			✓			✓

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde envanter ve rotalama problemlerinin bütünleşik olarak ele alınması şirketlere daha büyük karlar sağladığından envanter rotalama problemi tercih edilen bir çalışma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle bu çalışma temel olarak iki amaç içermektedir. Birinci amaç envanter rotalama alanında daha önce Coelho vd. 2013 yılında yaptıkları çalışmanın devamı niteliğinde kapsamlı bir tarama yaparak kavramsal çerçevede karşılaştırma yapmaktır. İkinci amaç ise literatürde karşımıza çıkması zor olan ikame ve çok ürünlü bir envanter rotalama problemine çözüm yaklaşımı sunmaktır. Bu nedenle bu çalışmanın, özellikle çok ürünlü envanter rotalama alanında yapılacak olan farklı akademik çalışmalar ve gerçek hayat problemleri için örnek teşkil etmesi de hedeflenmektedir.

1.3 Orijinal Katkı

Bu çalışmanın literatüre iki ayrı katkısı bulunmaktadır. İlk olarak Coelho ve diğerlerinin 2013 yılında gerçekleştirdiği ve 1980-2013 yılları arasını kapsayan detaylı envanter rotalama çalışmasının devamı niteliğinde bu çalışmada aynı kapsama sahip son 6 yıllık dönem için literatür çalışması gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak ise taranan veri tabanları doğrultusunda, ikame ürün ve envanter rotalama çalışmasının bir arada olduğu bir çalışmaya rastlanmamıştır ve bunun sonucunda literatüre katkı olarak ikame ve çok ürünlü ERP ele alınmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada Coelho ve Laporte'nin (2013) çok ürünlü envanter rotalama modeli geliştirilerek modele ikame ürün gönderimi için ayrıca kısıtlar eklenmiştir. Bu kısıtlar sayesinde ikame ürün gönderimine izin verilen işletmelerde üründen yeteri miktarda bulunamadığı taktirde eğer o ürünün karşılığını alabilecek başka bir ürün var ise müşteriye o ürünün gönderimi gerçekleşmektedir. Bu ekleme literatüre yapılan ikinci katkı olmaktadır.

Bu bölümde öncelikle temel envanter rotalama problemi hakkında bilgi verilmektedir. Tek ürünlü temel envanter rotalama problemin tanımı, ERP çözüm yaklaşımları ve son olarak envanter rotalama probleminin çözümünde kullanılan temel matematiksel model verilmektedir.

2.1 Envanter Rotalama Problemi

Rotalama sorunu işletmelerin taşıma işlemlerini gerçekleştirirken yaşadıkları birtakım zorluklar ve maliyetler sonucunda ortaya çıkmıştır. Envanter sorunu ise üretim yapan her işletmenin zaruri olarak karşılaştığı problem türlerindendir. Bu iki problem birbirinden bağımsız görünse de bütünleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan kâr marjı oldukça yüksek olmaktadır. Bu entegre çalışmanın sonucunda ortaya çıkan envanter rotalama kavramı tüm sistem üzerinde oldukça önemli bir etki yaratmaktadır.

ERP birçok sektörde çalışma alanı olarak tercih edilmektedir. Bu sektörler arasında;

- Tüketici malları ve perakende
- Taşımacılık
- Kimya endüstrisi
- Sağlık endüstrisi
- Kamu hizmetleri gibi sektörler yer almaktadır.

Bu sektörlerde, farklı sınırlamalar ve varsayımlar altında yapılan çalışmaların her biri elde edilen sonuçları ortak bir faydada toplamaktadır. Bu faydalara genel bir çerçeveden bakılacak olursa;

- Sevkiyatların doğru zamanda yapılarak stoksuzluğun azalması
- Hem envanter hem rota süreçlerinin bir arada değerlendirilerek kâr marjının artırılması
- Optimum sevkiyat miktarlarının hesaplanması

- Araç kapasitesine sığmayan siparişlerin optimum dağıtımının yapılarak müşteri memnuniyet seviyesinin korunması
- Siparişlerin araç kapasitelerine ve teslimat pencerelerine uyumlu olarak planlanması ile, uygulama planlarında daha az değişiklik yapılması her bir sektör için elde edilecek faydaların sadece bir kısmıdır.

2.1.1 Envanter Rotalama Probleminin Tanımı

Envanter rotalama problemi, araç rotalama probleminin alt başlıklarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. ERP genel olarak, araç güzergahı ve teslimat çizelgelemesini belirli kısıtlamalar altında eşzamanlı olarak optimize etmek için ürünlerin bir dizi müşteriye teslimini sağlar. Ayrıca envanter rotalama problemi iki önemli lojistik değer bileşeni olan envanter yönetimi ve araç yönlendirmesinin bütünleştirilmesi ve koordinasyonu ile ilgilenir. Bu problem temel olarak şu 3 soru başlığına cevap arama niteliğindedir (Campbell, Clarke, Kleywegt ve Savelsbergh, 1998). Bu başlıklar;

1. Müşteriye ürün teslimi ne zaman gerçekleşecek?
2. Teslim edilecek ürün miktarı ne kadar olacak?
3. Ürün teslimi için hangi rotalar kullanılacak?

Bu sorular ERP'lerinin ne kadar etkili ve başarılı olacağı hususunda bilgiler vermektedir. Bu temel soru başlıklarının yanı sıra envanter rotalama problemlerinde problemin türüne göre bazı sınırlamalar bulunmaktadır. Bunlar sınırlamalar genel olarak zaman ve kapasite kısıtı şeklinde olmaktadır. Zaman kısıtı ürün teslimatının ne zaman gerçekleştirileceği ve ürün teslimi için hangi rotaların kullanılacağı sorusuna cevap aranırken probleme dahil olabilmektedir. Kapasite kısıtı ise teslim edilecek ürün miktarının toplamının ne olması sorusunun cevabı ile birlikte karşımıza çıkabilmektedir. Bu şekilde problemlere farklı sınırlamalar getirilerek gerçek hayat problemlerine daha fazla yaklaşılrken problemlerin çözümü de zorlaşmaya başlamaktadır. Gerçek hayat problemlerinde ERP için sınırlamalar zaman ve kapasite ile kalmamaktadır. Araçlar, müşteriler, envanter ve daha birçok kısıt problemlere dahil edilebilmektedir.

Envanter rotalama problemlerinde kabul edilen genel geçer varsayımlar bulunmaktadır. Bu varsayımlar kullanılan probleme göre değişiklik gösterebilmektedir. Genel olarak kabul edilen varsayımlara göre (Andersson vd., 2010);

- Her müşterinin talebinin karşılanacağı,
- Her bir müşterinin sadece bir aracın rotasında olacağı,
- Müşterilerin talebinin o rotada bulunan araç kapasitesinden düşük olacağı,
- Her sevkiyat işleminin depodan başlayıp yine depoda son bulacağı,
- Envanter seviyesinin negatif olamayacağı,
- Araç kapasitesinin aşılamayacağı,
- Yapılan teslimatların müşterilerde stok oluşturmayacağı,
- Envanter seviyesinin her müşteri için maksimum kapasiteyi aşmayacağı varsayılmaktadır.

Problemin bu yapısal değişkenlere göre olan çözümü, tedarikçinin araçlarını kullanarak her bir dönemde hangi müşterilerin hizmet vereceğini, ziyaret edilen her müşteriye her bir ürünün ne kadar teslim edileceğini ve hangi yolları kullanacağını belirlemelidir.

2.1.2 Envanter Rotalama Problemi Çözüm Yaklaşımları

Envanter rotalama problemleri çözülmesi oldukça zor olan, dinamik ve uzun dönemli problemlerdir. Bu nedenle bu alanda yapılan çalışmalarda kullanılan yaklaşımlar genellikle kısa dönemli olmaktadır (Campbell vd., 1998). Envanter rotalama problem türünün çözümünün zor olmasının nedeni NP-Hard problem türüne dahil olmasıdır. NP-Hard, deterministik olmayan yani net bir formülle bağımlı ve bağımsız değişkenlerin ifade edilemediği problemlerdir (Woeginger, 2003). Bu problemler için çözüm yöntemlerinin optimal çözüme ulaşımına göre kesin çözüm yöntemleri ve sezgisel yöntemler bulunmaktadır. ERP için kesin çözüm yöntemleri, gezgin satıcı problemlerinde yöntemlerin geliştirilmesi ile oluşturulmuştur (Düzakın ve Demircioğlu, 2009). Bu çözüm yöntemleri, en iyi çözümü bulmayı garanti etmektedir. Fakat çözüm süresi problemin boyutu arttıkça üstel olarak artmaktadır. Genel olarak kesin çözüm

yöntemleri (dal sınır, dinamik programlama, tam sayılı ve karma tam sayılı programlama vb.) küçük ve orta boyutlu problemlerde uygun çözümlerin bulunmasını gerçekleştirebilmektedir. Büyük boyutlu olan envanter rotalama problemlerinde ise tam başarıyla çözen bir kesin çözüm yöntemi bulunmamaktadır (Campbell vd., 1998). Bu nedenle gerçek hayat problemlerinde problemin boyutunun büyük olması nedeniyle sezgisel çalışmalar kullanılmaktadır. ERP için sezgisel yöntemler; klasik sezgisel ve meta sezgisel yöntemler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Sezgisel ve meta sezgisel çözüm yöntemleri, zor problemleri başarıyla çözen güçlü ve esnek yöntemlerdir. Sezgisel ve meta sezgisel algoritmalar makul hesaplama zamanlarında kaliteli çözümler üretmeyi ve pratik amaçlar için yeterince iyi olmayı amaçlamaktadır. Sezgisel yöntemler daha çok probleme bağlı olan tekniklerdir. Bu nedenle, genellikle elde bulunan probleme adapte edilirler ve bu problemin özelliklerinden tam olarak yararlanmaya çalışırlar. Bununla birlikte, genellikle yerel olarak optimum bir durumda tutulurlar ve bu nedenle çoğunlukla küresel optimum çözümü elde etmede başarısız olurlar. Meta sezgisel yöntemler (tavlama benzetimi, genetik algoritma vb.) ise problemten bağımsız olan yöntemlerdir. Bu nedenle, sorunun herhangi bir özelliğinden yararlanamazlar ve bu nedenle küresel optimum çözümü elde etmede daha başarılılardır.

2.1.3 Temel Matematiksel Model

Envanter rotalama problemi için kullanılan birden fazla matematiksel model bulunmaktadır. Probleme en temel açıdan bakmak için tek bir ürün, tek bir araç ve sadece bir günü kapsayacak sonlu bir ufukta basit ve temel olan matematiksel model verilmektedir. Bu model aşağıda verildiği gibi olmaktadır (Bertazzi ve Speranza, 2013):

İndisler

t : zaman periyodu (T : planlama ufku)

i, j : müşteri düğümleri ve depo 0 kabul edilmiştir. (N : düğüm kümesi, N' : müşteri kümesi)

Parametreler

c_{ij} : i ve j noktaları arası taşıma maliyeti

U_i : i. müşterinin maksimum envanter düzeyi

Q : araç kapasitesi

h_i : i. müşteri için envanter bulundurma maliyeti

Değişkenler

r_{0t} : depoda bulunan envanter düzeyi

r_{it} : müşteride bulunan envanter düzeyi

I_{i0} : i. müşterinin başlangıç envanter düzeyi

z_{it} : Müşteri ziyaret edilmişse 1, diğer durumlarda 0 değeri atanır.

X_{it} : Müşteriye gönderilen miktar

y_{ij}^t : ij ayrıtı kullanılmışsa 1, diğer durumlarda 0 değeri atanır.

z_{0t} : t. günde en az 1 müşteriye dağıtım yapıp, depo ziyaret edilmişse 1 değeri atanır.

z_{it} : t. günde en az 1 müşteriye dağıtım yapıp, o müşteri ziyaret edilmişse 1 değeri atanır.

z_{st} : s. müşteriye dağıtım yapılmış ve o periyotta başka tura eklenmeme durumunda 1 değeri atanır.

Matematiksel Model

$$\min Z = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} h_i I_{it} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j > i} c_{ij} y_{ij}^t \quad (2.1)$$

$$I_{0t} = I_{0,t-1} + r_{0t} - \sum_{i \in N'} X_{it} , \quad t \in T \quad (2.2)$$

$$I_{it} = I_{i,t-1} + X_{it} - r_{it} , \quad i \in N', t \in T \quad (2.3)$$

$$I_{it} \geq 0 , \quad i \in N, t \in T \quad (2.4)$$

$$I_{0t} \leq U_i , \quad i \in N', t \in T \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in N'} X_{it} \leq Qz_{0t} , \quad t \in T \quad (2.6)$$

$$X_{it} \leq U_i z_{it} , \quad i \in N', t \in T \quad (2.7)$$

$$\sum_{j \in N, j > i} y_{ij}^t + \sum_{j \in N, j < i} y_{ij}^t = 2z_{it} , \quad i \in N, t \in T \quad (2.8)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S, j > i} y_{ij}^t \leq \sum_{i \in S} z_{it} - z_{st} , \quad S \subseteq N', s \in S, t \in T \quad (2.9)$$

$$X_{it} \geq 0 , \quad i \in N', t \in T \quad (2.10)$$

$$y_{ij}^t \in \{0,1\} , \quad i \in N', j \in N', j > i, t \in T \quad (2.11)$$

$$y_{0j}^t \in \{0,1,2\} , \quad j \in N', t \in T \quad (2.12)$$

$$z_{it} \in \{0,1\} , \quad i \in N, t \in T \quad (2.13)$$

Kısıt (2.1) envanter ve taşıma maliyetlerini minimum olmasını hedefleyen amaç fonksiyonudur. Kısıt (2.2) ve (2.3) müşterilerin ve deponun envanter düzeyini belirleyen kısıtlardır. (2.4) numaralı kısıt stoksuzluğu engellemektedir. (2.5) numaralı kısıt ise müşterilerin ML politikasına göre belirlenen maksimum düzeylerini aşmasını engelleyen kısıttır. Kısıt (2.6) ise gönderilen miktarların araç kapasitesini aşmasını engelleyen kısıttır. Kısıt (2.7) ise i. müşterinin rotada olma durumuna göre o müşteriye dağıtım yapıp yapılmayacağını belirleyen kısıttır. (2.8) ve (2.9) kısıtları ise rotalama kısıtlarıdır. (2.10) kısıtı negatif olmama kısıtıdır. (2.11), (2.12) ve (2.13) numaralı kısıtlar karar kısıtlarıdır.

2.2 Çok Ürünlü Envanter Rotalama Problemi

Bu bölümde öncelikle çok ürünlü envanter rotalama probleminin tanımı yapılarak çok ürünlü ERP için olan matematiksel model ve notasyonlar sunulmaktadır. Daha

sonra çok ürünli ERP'nin tek ürünli ERP'den ne gibi farklılıkları olduğu üzerinde durulmaktadır.

2.2.1 Çok Ürünli Envanter Rotalama Probleminin Tanımı

ERP, bir veya birden fazla ürünün, tek ya da çoklu tesisten, T uzunluğundaki belirli bir planlama ufkuna, sonsuz da olabilir, bir m müşteri grubuna tekrarlı olarak dağıtılması ile ilgilidir. Bununla birlikte, ERP'lerinin hepsi bazı temel özelliklere sahiptir. Müşteriler ürünü günlük belli bir oranda tüketir ve ürünün envanterini bir seviyeye kadar koruyabilir. Ürünün dağıtımı için belirli kapasitelerde homojen veya heterojen araç filosu mevcuttur. Amaç, planlama döneminde dağıtım maliyetlerini herhangi bir müşteri stoksz kalmadan en aza indirmektir.

2.2.2 Çok Ürünli Envanter Rotalama Probleminin Matematiksel Modeli

Problemin içerdiği yapısal değişkenler doğrultusunda probleme uygun bir matematiksel model kullanılmaktadır. Bu çalışmada Coelho ve Laporte'nin 2013 yılında tek ürünli envanter rotalama modelinden geliştirilmiş olan çok ürünli ERP karma tam sayılı doğrusal programlama modelinin matematiksel formülasyonları baz alınmaktadır. Problem $G = \{V, A\}$ grafiğinde tanımlanır, burada $V = \{0, \dots, n\}$ tepe noktasıdır ve A yay kümesidir. 0, tedarikçiyi temsil eder ve $V' = V \setminus \{0\}$ müşterileri temsil eder. Tedarikçi, $m = \{1, \dots, M\}$ ürün grubunu müşterilere dağıtmaktan sorumludur. Sorunun çözümü, tedarikçinin araçlarını kullanarak her bir dönemde hangi müşterilerin hizmet vereceğini, ziyaret edilen her müşteriye her bir ürünün ne kadar teslim edileceğini ve hangi yolları kullanacağını belirlemektedir. Bu çok ürünli ERP'nin amacı ise her bir müşteri talebini karşılarken toplam stok dağıtım maliyetini en aza indirmektir. Problem aşağıdaki varsayımlara tabi olarak ilerlemektedir. Bu varsayımlar:

- Her müşterideki envanter seviyesi asla maksimum kapasitesini aşamaz,
- Envanter seviyelerinin negatif olmasına izin verilmemektedir,
- Firmanın araçlarının her biri, her dönem için en fazla bir rota gerçekleştirebilir; her rota depoda başlar ve depoda biter,
- Taşıt kapasiteleri aşılamaz.

Bu varsayımlar doğrultusunda ilk olarak indekslerin, parametrelerin ve değişkenlerin tanımları belirtilmektedir. Daha sonra modelin matematiksel fonksiyonları verilmektedir. Son olarak bu indisler, parametreler, değişkenler ve matematiksel fonksiyonlara bağlı olan kısıtlar açıklanmaktadır. (Coelho ve Laporte, 2013):

İndisler

m : ürünler

t : zaman ufku

k : araçlar

i, j : müşteri düğümleri ve depo 0 olarak kabul edilmiştir.

Parametreler

h_i^m : dönem başına bir birim envanterin elde bulundurma maliyeti

c_{ij} : i ve j düğümleri arasındaki taşıma maliyeti

r^{mt} : tedarikçiden temin edilen ürün m miktarı

d_i^{mt} : i müşterisinin t zamanda m ürününe olan talep miktarı

C_i : her bir müşteri için envanter tutuma kapasitesi

Q_k : araç kapasitesi

Değişkenler

I_i^{mt} : t zamanda m ürününün i düğümündeki stok seviyesi

I_0^{mt} : t zamanda m ürününün depodaki stok seviyesi

X_{ij}^{kt} : eğer t zamanda ij düğümleri arasında k aracı ile taşıma yapılırsa 1, aksi halde 0 değeri atanır.

q_i^{mkt} : t zamanda k aracı ile i düğümüne gönderilen m ürününün miktarı

y_i^{kt} : eğer i düğümü t zamanda k aracı tarafından ziyaret edilirse 1, aksi halde 0 değeri atanır.

Matematiksel Model

$$\min Z = \sum_{i \in V} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} h_i^m I_i^{mt} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, i < j} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} C_{ij} X_{ij}^{kt} \quad (2.14)$$

$$I_0^{mt} = I_0^{m,t-1} + r^{mt} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in V'} q_i^{mkt} , \quad m \in M , t \in T \quad (2.15)$$

$$I_i^{mt} = I_i^{m,t-1} + \sum_{k \in K} q_i^{mkt} - d_i^{mt} , \quad m \in M , i \in V' , t \in T \quad (2.16)$$

$$I_i^{mt} \geq 0 , \quad i \in V' , m \in M , t \in T \quad (2.17)$$

$$\sum_{m \in M} I_i^{mt} \leq C_i , \quad i \in V' , t \in T \quad (2.18)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{k \in K} q_i^{mkt} \leq C_i - \sum_{m \in M} I_i^{m,t-1} , \quad i \in V' , t \in T \quad (2.19)$$

$$q_i^{mkt} \leq C_i y_i^{kt} , \quad i \in V' , m \in M , k \in K , t \in T \quad (2.20)$$

$$\sum_{i \in V'} \sum_{m \in M} q_i^{mkt} \leq Q_k y_0^{kt} , \quad k \in K , t \in T \quad (2.21)$$

$$\sum_{j \in V, i < j} X_{ij}^{kt} + \sum_{j \in V, j < i} X_{ji}^{kt} = 2y_i^{kt} , \quad i \in V , k \in K , t \in T \quad (2.22)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S, i < j} X_{ij}^{kt} \leq \sum_{i \in S} y_i^{kt} - y_g^{kt} , \quad S \subseteq V' , k \in K , t \in T , g \in S \quad (2.23)$$

$$q_i^{mkt} \geq 0 , \quad i \in V' , k \in K , t \in T \quad (2.24)$$

$$X_{i0}^{kt} \in \{0,1,2\} , \quad i \in V' , k \in K , t \in T \quad (2.25)$$

$$X_{ij}^{kt} \in \{0,1\} , \quad i, j \in V' , k \in K , t \in T \quad (2.26)$$

$$y_i^{kt} \in \{0,1\} , \quad i \in V , k \in K , t \in T \quad (2.27)$$

Kısıt (2.14) envanter ve taşıma maliyetlerinin minimum olmasını hedefleyen amaç fonksiyonu kısıtıdır. Kısıt (2.15) ve (2.16), firmanın ve müşterilerin stoklarını tanımlamaktadır. Kısıt (2.17) stoksuzluğu engellemektedir. Kısıt (2.18) işletmede kullanılan ML envanter politikasının gerçekleşmesini sağlamaktadır. Kısıt (2.19) ve (2.20), ortalama ile ilgili değişkenlere iletilen miktarları birbirine bağlamaktadır. Özellikle, müşterinin k aracı tarafından ziyaret edilmesi durumunda o aracın müşteriye herhangi bir ürünü teslim etmesine izin vermektedir. Kısıt (2.21), taşıt kapasitelerine uyulmasını sağlarken, kısıt (2.22) ve (2.23) sırasıyla derece kısıtlamaları ve alt turların oluşumunu engelleyen kısıtlamalardır. Kısıt (2.24) - (2.27) değişkenler üzerinde bütünlük ve olumsuzluk şartlarını sağlamaktadır.



İkame ve Çok Ürünlü Envanter Rotalama Problemi

Bu bölümde, ürün çeşidinin birden fazla olduğu ve müşterinin talep ettiği üründen bulunmadığı takdirde ikamesi olan bir ürünün gönderilmesine izin verilen, sonlu zaman ufuklu, heterojen araç filosuna sahip ve tek bir depodan çok sayıda müşteri kümesinin taleplerinin yerine getirildiği bir envanter rotalama çalışması anlatılmaktadır. İkame ürün, birbirleri yerine geçebilen ve aynı amaç doğrultusunda kullanabilen ürünlerdir (Ceylan, 2014). Tercihe göre işletmeler veya müşteriler eğer talep ettikleri ürün yoksa o ürünün karşılığı olan ikame ürünü kabul edebilmektedir. İkame ve çok ürünlü envanter rotalama çalışmasının literatürdeki eksikliğinden kaynaklı olarak bu problem tercih edilmektedir. Dördüncü bölümde aynı zamanda geliştirilen karma tamsayılı matematiksel modelin ML ve OU envanter politikalarına göre GAMS programında çözümü verilerek karşılaştırma yapılmaktadır.

3.1 İkame ve Çok Ürünlü Envanter Rotalama Probleminin Yapısı

Envanter rotalama problemlerinin yapısının sorunun türüne göre değişkenlik gösterdiğinden giriş bölümünde bahsetmiştik. Tablo 1.1’de bulunan kriterlere göre problemin hangi yapısal değişkenleri içerdiğini aşağıda vermekteyiz. Bu çalışmadaki ikame ve çok ürünlü ERP (İÇÜ-ERP) yapısal değişkenleri şu şekildedir:

- İşletme ambalaj ev dışı tüketim ve gıda ürünlerini barındırdığından çoklu ürün hizmeti veren işletme kapsamındadır. Bu nedenle çalışılan ERP’de çok ürünlü olmaktadır.
- Müşterilerin talep ettikleri ürünler sürekli ve düzenli olarak tüketilen tüketim malları grubuna dahil olduğundan sonlu zaman ufkunda çalışılmaktadır.
- Müşteriler talep ettikleri ürünlerin miktarlarını günlük olarak şirkete mail attığından talep yapısı deterministik olmaktadır.
- İşletmede bir araç birden fazla müşteriye hizmet verebildiğinden topoloji kriteri birçok şekilde olmaktadır.

- Rotalama kriteri açısından bakacak olursak işletme tek bir depodan birden fazla müşteriye sevkiyat işlemini gerçekleştirdiği için rotalama çoklu olmaktadır.
- Envanter politikası için ise şirket normalde müşterilerin talep ettiği miktar kadar ürün yollamakta, fakat işletme müşterilere yollayacağı ürünler hakkında değişim yapma inisiyatifine sahip olduğundan ve müşteri kapasitesi aşılamayacağından bu problem kapsamında ML politikası kullanılmaktadır.
- Envanter kararı stok seviyesinin 0'ın altına düşmemesi (yani negatif olmaması) yönündedir.
- İşletmede araç sayısı birden fazla olduğu için filo büyüklüğü çok ve araç kapasiteleri birbirinden farklı olduğu için filo yapısı heterojen olmaktadır.

3.2 İkame ve Çok Ürünlü Envanter Rotalama Problemi Çözüm Yaklaşımı

Problemin içerdiği yapısal değişkenler doğrultusunda probleme uygun bir karma tamsayılı matematiksel model kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan envanter rotalama modeli tek bir depodan birden fazla müşteriye, sonlu zaman ufkunda, deterministik talep ile, heterojen araç ve iki farklı envanter politikasına göre yapılmaktadır. Uygulama için Coelho ve Laporte'nin (2013) çok ürünlü ve çok araçlı olan modeli baz alınarak yeni bir model geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan modeldeki temel amaç envanter, rota, stoksuzluk ve ikame ürün gitmesinden kaynaklı maliyetlerin minimum yapılmasıdır. Problem $G = \{V, A\}$ grafiğinde tanımlanır, burada $V = \{0, \dots, n\}$ tepe noktasıdır ve A yay kümesidir. 0, depoyu temsil eder ve $V' = V \setminus \{0\}$ müşterileri temsil eder. Sonlu zaman ufku $t = \{1, \dots, T\}$ bulunmaktadır. Araçların $k = \{1, \dots, K\}$ belirli kapasiteleri vardır. Tedarikçi, $m = \{1, \dots, M\}$ ürün grubunu müşterilere dağıtmaktan sorumludur. Her ürün kümesinin tüm m ürünleri ile ilişkisi şöyledir:

$si(m)$: ikame ürünler

$sub(m)$: ikame olarak giden ürünlerin dışındaki ürünler

subi(m) : ikamesi olan ürünler

sb(m) : ikamesi olmayan ürünler

Sorunun çözümü, tedarikçinin araçlarını kullanarak her bir dönemde hangi müşterilerin hizmet vereceğini, ziyaret edilen her müşteriye her bir ürünün ne kadar teslim edileceğini ve hangi yolları kullanacağını belirlemektedir. Bu çok İÇÜ-ERP'nin amacı ise her bir müşteri talebini karşılarken toplam envanter, dağıtım, stoksuzluk ve ikame ürün gitmesinden kaynaklı maliyeti en aza indirmektir. Problem aşağıdaki kısıtlamalara göre ilerlemektedir. Bu kısıtlamalar:

- Her müşterideki envanter seviyesi asla maksimum kapasitesini aşamaz,
- Envanter seviyelerinin negatif olmasına izin verilmemektedir,
- Firmanın araçlarının her biri, her dönem için en fazla bir rota gerçekleştirebilir; her rota depoda başlar ve depoda biter,
- Taşıt kapasiteleri aşılamaz.
- Her müşteriye sadece bir kez ve bir araç tarafından gidilebilir.

Bu kısıtlamalar doğrultusunda ilk olarak indekslerin, parametrelerin ve değişkenlerin tanımları belirtilmektedir. Daha sonra modelin fonksiyonları ve kısıtları açıklanmaktadır. Son olarak bu girdilere göre modelin çıktısı belirlenmektedir.

3.3 Problemin Matematiksel Formülasyonu

İndisler

t : zaman periyodu

k : araçlar

i, j : müşteri düğümleri (0 depo olarak kabul edilmektedir)

m : ürünler

si(m) : ikame ürünler

sub(m) : ikame olarak giden ürünlerin dışındaki ürünler

$subi(m)$: ikamesi olan ürünler

$sb(m)$: ikamesi olmayan ürünler

Parametreler

h_m : bir birim envanterin elde bulundurma maliyeti

c_{ij} : i ve j düğümleri arasındaki taşıma maliyeti

r^{mt} : tedarikçiden temin edilen ürün m miktarı

d_i^{mt} : i müşterisinin t zamanda m ürününe olan talep miktarı

y_t^{mt} : her bir t zamanı ve her bir m ürünü için tüm müşteriler tarafından talep edilen toplam ürün miktarı

P_i : her bir müşteri için maksimum envanter tutuma kapasitesi

O_k : k aracının kapasitesi

L : ikame ürün gitmesinden oluşan maliyet

E_m : stoksuzluk maliyeti

n : toplam müşteri sayısı

Değişkenler

F_i^{mt} : t zamanda m ürününün i düğümündeki stok seviyesi

F_0^{mt} : t zamanda m ürününün depodaki stok seviyesi

A_i^{mkt} : t zamanda k aracı ile i düğümüne gönderilen ikame m ürün miktarı

Q_i^{mkt} : t zamanda k aracı ile i düğümüne gönderilen normal m ürün miktarı

QA_i^{mkt} : t zamanda k aracı ile i düğümüne gönderilen toplam m ürün miktarı

X_{ij}^{kt} : eğer t zamanda ij düğümleri arasında k aracı ile taşıma yapılırsa 1, aksi halde 0 değeri atanır.

y_i^{kt} : eğer i düğümü t zamanda k aracı tarafından ziyaret edilirse 1, aksi halde 0 değeri atanır.

SM^{mt} : toplam stoksuzluk maliyeti

u_i : alt tur kısıtı için gerekli pozitif sayı

ABC^{mt} : r^{mt} 'ye bağlı olan değişken

Matematiksel Model

$$\min Z = \sum_{i \in V} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} h^m F_i^{mt} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} c_{ij} X_{ij}^{kt} + \quad (3.1)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} LA_i^{mkt} + \sum_{sb(m) \in M} \sum_{t \in T} SM^{mt} \quad (3.1)$$

$$F_0^{mt} = F_0^{m,t-1} + ABC^{mt} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in V'} QA_i^{mkt}, \quad sub(m) \in M, t \in T \quad (3.2)$$

$$F_i^{mt} = F_i^{m,t-1} + \sum_{k \in K} QA_i^{mkt} - d_i^{mt}, \quad sub(m) \in M, i \in V', t \in T \quad (3.3)$$

$$\sum_{k \in K} QA_i^{mkt} \geq d_i^{mt}, \quad i \in V', t \in T \quad (3.4)$$

$$\sum_{sub(m) \in M} F_i^{mt} \leq P_i, \quad i \in V', t \in T \quad (3.5)$$

$$\sum_{sub(m) \in M} \sum_{k \in K} QA_i^{mkt} \leq P_i - \sum_{sub(m) \in M} F_i^{m,t-1}, \quad i \in V', t \in T \quad (3.6)$$

$$\sum_{sub(m) \in M} QA_i^{mkt} \leq P_i y_i^{kt}, \quad i \in V', k \in K, t \in T \quad (3.7)$$

$$\sum_{sub(m) \in M} \sum_{k \in K} QA_i^{mkt} \geq P_i \sum_{k \in K} y_i^{kt} - \sum_{sub(m) \in M} F_i^{m,t-1}, \quad i \in V', t \in T \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in V'} \sum_{m \in M} QA_i^{mkt} \leq O_k y_0^{kt}, \quad k \in K, t \in T \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in V, i \neq j} X_{ij}^{kt} + \sum_{j \in V, i \neq j} X_{ji}^{kt} = 2y_i^{kt}, \quad i \in V, k \in K, t \in T \quad (3.10)$$

$$u_i - u_j + n \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} X_{ij}^{kt} \leq n - 1, \quad i, j > 0 \text{ ve } i \neq j \quad (3.11)$$

$$u_i \geq 1, \quad i \in V' \quad (3.12)$$

$$u_i \leq n - 1, \quad i \in V' \quad (3.13)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} y_i^{kt} = 1, \quad i \in V' \quad (3.14)$$

$$\sum_{k \in K} y_i^{kt} \leq 1, \quad i \in V', t \in T \quad (3.15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V'} X_{0j}^{kt} \leq K, \quad t \in T \quad (3.16)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V'} X_{i0}^{kt} \leq K, \quad t \in T \quad (3.17)$$

$$\sum_{j \in V'} X_{0j}^{kt} \leq 1, \quad k \in K, t \in T \quad (3.18)$$

$$\sum_{j \in V'} X_{j0}^{kt} \leq 1, \quad k \in K, t \in T \quad (3.19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V'} X_{0j}^{kt} \geq 1, \quad t \in T \quad (3.20)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V'} X_{i0}^{kt} \geq 1, \quad t \in T \quad (3.21)$$

$$\sum_{j \in V'} X_{0j}^{kt} - \sum_{j \in V'} X_{j0}^{kt} = 0, \quad k \in K, t \in T \quad (3.22)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq b} X_{ib}^{kt} - \sum_{j \in V, b \neq j} X_{bj}^{kt} = 0, \quad b \in V, k \in K, t \in T \quad (3.23)$$

$$A_i^{mkt} + Q_i^{mkt} = Q A_i^{mkt}, \quad i \in V, sub(m) \in M, k \in K, t \in T \quad (3.24)$$

$$\sum_{i \in V'} \sum_{k \in K} A_i^{subi(m)kt} \leq r^{si(m)t}, \quad sub(m) \in M, si(m) \in M, t \in T \quad (3.25)$$

$$f(iprime(i), sub(m), t) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k \in K} A_i^{mkt} = d_i^{mt}, \quad yt(m, t) > r(m, t) \\ \sum_{k \in K} Q_i^{mkt} = d_i^{mt}, \quad yt(m, t) < r(m, t) \end{array} \right\} \quad (3.26)$$

$$f(sb(m), t) = \left\{ \begin{array}{l} SM^{mt} = [(yt^{mt} - r^{mt})]E_m, \quad yt(m, t) > r(m, t) \\ SM^{mt} = 0, \quad yt(m, t) < r(m, t) \end{array} \right\} \quad (3.27)$$

$$f(sb(m), t) = \left\{ \begin{array}{l} ABC^{mt} = r^{mt}, \quad yt(m, t) < r(m, t) \\ ABC^{mt} = r^{m,t+1}, \quad yt(m, t) > r(m, t) \end{array} \right\} \quad (3.28)$$

$$f(subi(m), si(m), t) = \left\{ \begin{array}{l} ABC^{subi(m)t} = r^{subi(m)t}, \quad yt(m, t) < r(m, t) \\ ABC^{subi(m)t} = r^{si(m),t+1}, \quad yt(m, t) > r(m, t) \end{array} \right\} \quad (3.29)$$

$$QA_i^{mkt} \geq 0, \quad i \in V', k \in K, t \in T \quad (3.30)$$

$$Q_i^{mkt} \geq 0, \quad i \in V', k \in K, t \in T \quad (3.31)$$

$$A_i^{mkt} \geq 0, \quad i \in V', k \in K, t \in T \quad (3.32)$$

$$X_{ij}^{kt} \in \{0,1\}, \quad i, j \in V', k \in K, t \in T \quad (3.33)$$

$$y_i^{kt} \in \{0,1\}, \quad i \in V, k \in K, t \in T \quad (3.34)$$

$$F_i^{mt} \geq 0, \quad i \in V', sub(m) \in M, t \in T \quad (3.35)$$

$$SM^{mt} \geq 0, \quad sb(m) \in M, t \in T \quad (3.36)$$

$$ABC^{mt} \geq 0, \quad sub(m) \in M, t \in T \quad (3.37)$$

Amaç fonksiyonu kısıtı olan (3.1) denklemi envanter, rota, stoksuzluk ve ikame ürün gitmesinden kaynaklı maliyetleri minimum yapmayı hedefler. Amaç fonksiyonunun ilk toplamı ürünlerin toplam elde bulundurma maliyetini; ikinci toplam taşıma maliyetini; üçüncü toplam ikame ürün gitmesinden kaynaklı oluşan

maliyeti; dördüncü toplam ise stokta hiç ürün olmaması durumunda oluşan stoksuzluk maliyetini vermektedir.

Kısıt (3.2) ve (3.3) sırasıyla tedarikçi ve müşterideki envanter miktarını veren kısıtlardır. (3.2) denkleminde Coelho ve Laporte'nin kısıtından farklı olarak bu kısıtta r^{mt} parametresi yerine ABC^{mt} değişkeni kullanılmaktadır. Bunun sebebi ikame ürünün gitmesi gereken durumda modelin ikamesi olan ürünün yerine ikame olarak gidecek ürünün stoğundan düşmesi ve o ürünü göndermesi gerektiği için ABC^{mt} değişkeni ikame ürünün gidip gitmemesine bağlı olarak doğru bir şekilde r^{mt} parametresinin verilerinden faydalanmaktadır. (3.3) eşitliğinde ise t dönemi sonunda, i müşterisindeki, m ürününün envanter seviyesinin bilgisi yer almaktadır.

Kısıt (3.4) giden toplam ürün miktarının müşterinin talep ettiği düzeyden az olamayacağını belirten kısıttır. Bu kısıt sayesinde her bir müşterinin talep ettiği miktar eksiksiz olarak karşılanmış olur.

Kısıt (3.5) her bir müşterinin maksimum envanter tutma kapasitelerinin olduğunu ve bu kapasitelerin aşılmayacağını anlatır.

Kısıtlar (3.6) – (3.8) eğer müşteri ziyaret edilmiş ise teslim edilen miktarın maksimum stok seviyesine ulaşılacak şekilde olmasını öngören OU politikası gerekliliklerini sağlar. Eğer kısıt (3.8) modelden çıkartılacak olursa model ML politikasının gerekliliklerine göre hareket eder. ML politikasında ise ikmal seviyesi OU politikasına göre esnektir fakat ML politikası için her müşteri kapasite ile sınırlıdır.

Kısıt (3.9) eğer araç kullanılmış gönderilen toplam miktarın araç kapasitesini aşmamasını sağlar.

Kısıt (3.10) her bir zaman dilimindeki, her bir araç ve her bir ij düğümü için derece kısıtlarıdır. Bu kısıt sayesinde i'den j'ye gidiliyor ise tekrar j'den i'ye gidilmemesi sağlanır.

Kısıtlar (3.11) – (3.13) alt tur oluşumunu engelleyen kısıtlardır. Bu kısıt için Miller, Tucker ve Zemlin kısıtları olarak bilinen MTZ alt tur engelleme kısıtı kullanılmıştır.

Araç rotalama problemleri için kullanılan bu kısıt ilk olarak gezgin satıcı problemlerinde Miller vd. tarafından geliştirilmiştir (Miller, Tucker ve Zemlin, 1960). Çok büyük boyutlu problemler için Miller vd. geliştirdiği alt tur kısıtı yetersiz kalmaktadır. Büyük boyutlu problemler için farklı alt tur kısıtları kullanılmalıdır.

Kısıt (3.14) eğer her bir i müşterisi için ziyaret gerçekleşmişse tüm t zamanı ve tüm araçlar için o müşteriye sadece bir kez gidilebilmesini sağlamaktadır. Kısıt (3.15) ise her bir müşteri ve her bir zaman için filodaki tüm araçların o müşteriye ya gideceği ya da gitmeyeceği olasılığını sayısallaştırmaktadır.

Kısıt (3.16) ve (3.17) sırasıyla depodan çıkan ve depoya giren araç sayısının tüm müşteriler için filodaki araç sayısından fazla olamamasını sağlar.

Kısıt (3.18) ve (3.19) sırasıyla her bir araç ve her zaman periyodunda o periyottaki tüm müşteriler için depodan çıkış ve depoya girişin tek bir müşteri üzerinden olmasını sağlar. Aynı zamanda bölünmüş talep engellenmiş olur.

Kısıt (3.20) ve (3.21) sırasıyla her bir t zamanında filodaki tüm araçlar ve tüm müşteriler için depodan kesinlikle aracın çıkılmasını ve depoya kesinlikle girilmesini sağlar.

Kısıt (3.22) ise (3.18) – (3.21) arasındaki kısıtları destekler niteliktedir. Kısıt (3.23) ile eğer k aracı ile t zamanda i müşterisinden b müşterisine gidilmişse aynı aracın aynı zamanda b müşterisinden j müşterisine gitmesi sağlanır.

Kısıt (3.24) ile her bir i müşterisi, her bir m ürünü, her bir t zamanı ve her bir k aracı için taşınan ikame (A_i^{mkt}) ve normal (Q_i^{mkt}) ürünün toplam ürüne QA_i^{mkt} eşit olması sağlanır.

Kısıt (3.25) ise ikamesi olan ürünün gitmesi durumunda ikame olarak giden ürünün miktarının elde bulunan kullanılabilir miktardan fazla olamayacağını anlatmaktadır.

Kısıt (3.26)'da eğer toplam talep kullanılabilir miktardan fazla ise ikame ürünün gitmesi gerektiği değil ise normal ürünün gitmesi gerektiği anlatılmaktadır.

Kısıt (3.27) ikame ürünü olmayan ürünler için toplam talebin kullanılabilir miktardan fazla olması durumunda stoksuzluk maliyetinin hesaplanmasını aksi durumda ise stoksuzluk maliyetinin 0 yapılmasını sağlar.

Kısıt (3.28)'de ikamesi olan ürünler ve ikame ürünlerin dışındaki ürünler için r^{mt} parametresi yerine ABC^{mt} değişkeni kullanılmaktadır. Bunun sebebi ikame ürünün gitmesi gereken durumda modelin ikamesi olan ürünün yerine ikame olarak gidecek ürünün stoğundan düşmesi ve o ürünü göndermesi gerektiği için ABC^{mt} değişkeni ikame ürünün gidip gitmemesine bağlı olarak doğru bir şekilde r^{mt} parametresinin verilerinden faydalanmaktadır. Bu kısıtta toplam talebin kullanılabilir miktardan fazla olması durumunda ABC^{mt} 'nin r^{mt} 'ye eşit olması aksi taktirde ABC^{mt} için verinin bir sonraki t zamanından alınması gerektiği gösterilmektedir.

Kısıt (3.29)'da ise ikamesi olan ürünler için eğer toplam talep kullanılabilir miktardan fazla ise ikamesi olan ürünün kullanılabilir miktarı ikame olarak gidecek ürünün kullanılabilir miktarından küçük olmalıdır diğer durumda ise zaten ikame ürün talebi karşıladığından ürünün kendi kullanılabilir miktarı parametre olarak alınır.

Kısıtlar (3.30) – (3.32) sırasıyla taşınan toplam ürün, normal ürün ve ikame ürün miktarlarının 0'a eşit veya 0'dan büyük olmasını sağlar.

Kısıt (3.33) ve (3.34) 0 ve 1 değişken ataması yapan kısıtlardır.

Kısıtlar (3.35) – (3.37) sırasıyla stok miktarının, stoksuzluk maliyetinin ve ABC^{mt} değişkeninin 0'a eşit veya 0'dan büyük olmasını sağlar.

3.4 Modelin GAMS Çözümü

Geliştirilen İÇÜ-ERP için bir tedarik firmasının dağıtım ve envanter sistemi baz alınarak model çalıştırılmıştır. Firma İstanbul Anadolu yakasındaki deposundan yine aynı bölgedeki müşterilere dağıtım yapmaktadır. Firmanın talep ettiği gizlilik nedeniyle müşteri bilgileri gizli tutulacaktır. 3 günlük zaman periyodunda ürünlerin dağıtımı gerçekleşecektir. Ürünlerin dağıtımı için kapasiteleri birbirinden farklı olan iki araç kullanılmaktadır. Aynı zamanda işletmede 2000'den

fazla ürün olması ve müşteri sayısının çok fazla olması GAMS modeli için zor olacağından 20 müşteri, 9 ürün ve bu 9 ürünün içerisindeki 4 ürünün ikamesi olan ayrıca 4 ikame ürün ele alınmaktadır. 20 müşterinin mesafe bilgileri gerçek olmakla birlikte Tablo 3.1’te verilmektedir. Mesafe bilgisi Google Maps üzerinden sağlanmıştır ve mesafe bilgisi kilometre (km) bazında verilmektedir.

Tablo 3.1 Müşteriler arasındaki mesafe verileri (km)

km	Depo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
Depo		6,9	6,6	43,1	15,6	41,7	5,8	16,6	16	6,6	2,1	22,9	18,9	41,3	58,2	7	14,5	21	4,1	9,9	14
M1			3,4	43	15,7	36,1	5,6	6,4	5,9	5,6	6,6	19,7	16,5	36,4	52,5	8,7	16,5	27	10,9	10,2	8,2
M2				40	12	33	2,1	9,2	8,7	5,7	4,7	17,5	12	33	49	8,3	14	25	10	6,8	7,4
M3					29,1	5,3	39,6	33,2	32,7	41,9	41,9	19,8	22,5	8	21,1	52,4	24,7	49,3	49,8	32,8	47,3
M4						24	10	23	22,5	16,8	17	9,1	7,8	25	41	19	11	22	21	6,1	18
M5							36	45	44,6	37,8	38,1	26	29,7	5,3	19	48	42	44,5	46	29	43,1
M6								5,6	5,1	2,7	5,1	23	19	36	52	55,8	20	25	9,3	13	6,7
M7									0,4	11,8	14,7	16,6	13,4	45,5	61,8	15,5	13,4	42,3	15,9	13,1	13,3
M8										11,2	11,2	16,1	12,9	45	51,4	14,9	12,8	41,8	15,4	12,6	12,8
M9											5,6	31,2	47,5	25,4	8,2	41	27,6	41	27,6	18,1	24,9
M10												21	17	40,8	58	9,1	17	21	6,6	8	4,1
M11													5,6	31	38	25	8,2	41	28	18	25
M12														27,9	44,2	20,2	5,7	36,1	22,4	12,9	19,7
M13															22	39	41	44	45	28	42
M14																58,9	48,1	64,3	64,8	47,7	58,4
M15																	24,8	26,5	8,1	13,3	5,3
M16																		35,5	26,2	24,9	23,2
M17																			23,6	20,5	21,1
M18																				12,5	3,1
M19																					9,9
M20																					

Ürün envanter bilgileri ise 2000 üründen temel 13 ürün baz alındığından gerçek verileri içermemektedir. Bu temel 13 ürünün seçilme nedeni ise talep miktarlarının benzer oluşu ve ürünlerin tüketim süreleri ile ilişkili olarak talep aralığının birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin çok sık kullanılmayan bir ürün için işletmenin ürün kaleminde olsa bile ayda ya da yılda 1 ya da 2 kez talep edilebildiğinden bu tür ürünlerin modele dahil edilmesi modelin çözümü ve verdiği çıktı açısından sorun oluşturacaktır. Bu nedenle en çok talep edilen ve en sık kullanılan ürünler bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Araç kapasitesi, müşteri kapasitesi, tedarikçi stok durumu ve talep bilgileri belirli aralıklara ve ortalamaya sahip olacak şekilde bilgisayar üzerinden rassal olarak üretilmiştir. Tablo 3.2’te maksimum müşteri kapasitesi bilgileri ve Tablo 3.3’da tedarikçi stok envanter seviyesi verileri bulunmaktadır. Tablo 3.4’de ise

müşterilerin talep bilgileri yer almaktadır. Birinci araç için kapasite 15000 br iken ikinci araç için 8000 br'dir.

İkame ürün süreci hakkında ise verilen bilgiler şu şekilde olmaktadır:

- Modelde verilen tüm müşterilerin ikame ürün kabul ettiği varsayılmaktadır.
- Eğer toplam talep tedarikçi stok seviyesinden fazla ise ikame ürün gönderimi gerçekleşecektir.
- İkame ürünü bulunan ürünler Ü2, Ü3, Ü4 ve Ü6'dır.
- Eğer ikame ürünün gitmesi gereken bir durum olursa Ü2 yerine Ü11; Ü3 yerine Ü13; Ü4 yerine Ü10 ve Ü6 yerine Ü12 gidecektir.
- Eğer toplam o gün olan talep tedarikçi stok seviyesinden fazla ise tüm müşterilerin talebi istenilen ürünün yerine geçebilen ikame ürünler tarafından karşılanacaktır. Bir müşteriye normal ürün diğer müşteriye ikame ürün gönderimi yapılamayacaktır.

Envanter rotalama problemleri genellikle NP-Hard türünde olduklarından çözümlenmesi oldukça zordur. Yani gerçek zamanda problemin çözülmesi mümkün değildir. Bu nedenle ikame ve çok ürünlü ERP için kullanılan parametreler gerçek zamanda bir çıktı verebilmesi için deterministik probleme dönüştürülmüştür. Yapılan çalışmada kullanılan tüm bilgiler doğrultusunda modele eklenen kısıtlar baz alınarak ikame ve çok ürünlü ERP matematiksel modeli GAMS 25.1.1 arayüzünde kodlanmış ve CPLEX çözücü tarafından çözdürülmüştür. ML ve OU politikasına göre iki ayrı çözüm elde edilmiştir. Çıkan sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.2 Her müşterinin maksimum envanter tutma kapasite bilgileri

	<i>Müşteri Kapasitesi</i>
M1	2500
M2	3000
M3	2000
M4	2500
M5	3350
M6	2000
M7	1900
M8	2000
M9	2000
M10	2000
M11	2100
M12	1800
M13	2700
M14	2900
M15	4000
M16	3800
M17	2100
M18	2200
M19	2700
M20	1700

Tablo 3.3 Her ürünün zamana göre tedarikçi stok durumu

<i>Stok Durumu</i>	T1	T2	T3
Ü1	600	4000	4000
Ü2	3500	3500	3500
Ü3	3000	3000	3000
Ü4	400	2900	2900
Ü5	3400	3400	3400
Ü6	3100	3100	3100
Ü7	3500	3500	3500
Ü8	4200	4200	4200
Ü9	5900	5900	5900
Ü10	3800	3800	3800
Ü11	5200	5200	5200
Ü12	4500	4500	4500
Ü13	5500	5500	5500

Tablo 3.4 Müşterilerin ürünlere olan talep bilgisi

<i>TALEP</i>	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9
M1	90	150	150	88	91	74	102	79	211
M2	95	180	79	77	80	66	145	104	254
M3	90	120	97	110	100	86	132	140	255
M4	92	160	123	60	132	80	97	148	229
M5	88	100	61	75	79	105	154	119	209
M6	100	210	107	50	99	108	90	139	207
M7	60	220	130	91	81	74	99	127	220
M8	56	140	99	81	88	92	132	107	247
M9	150	160	104	107	76	73	149	67	210
M10	100	80	54	71	123	52	130	93	215
M11	48	90	73	98	92	90	137	108	226
M12	90	130	141	91	83	79	124	142	238
M13	68	110	91	83	107	84	160	138	257
M14	75	155	85	67	78	50	119	106	233
M15	75	145	142	76	86	52	143	77	210
M16	84	165	105	52	109	59	168	86	208
M17	92	150	69	59	106	70	126	89	241
M18	102	170	150	72	83	55	133	118	222
M19	68	130	76	84	116	75	137	135	208
M20	108	190	66	116	93	78	120	79	250

Tablo 3.1, Tablo 3.2, Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’de verilen bilgiler doğrultusunda karma tamsayılı matematiksel model GAMS arayüzüne bu bilgiler ile birlikte kodlanarak en optimum maliyeti verecek olan sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaç ile

birlikte modelin farklı durumlar söz konusu olduğunda ve ikame ürünün gitmesi gereken bir durumla karşılaştığında nasıl bir sonuç göstereceğini görmek amacıyla da ML ve OU envanter politikalarına göre iki ayrı model uygulanmıştır. Uygulanan modeller rota, iterasyon sayısı, çözüm süresi, kaynak kullanımı, toplam maliyet ve kullanılan araç bilgisine göre birbiri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca modelin ML ve OU politikasına göre yaptığı ikame ürün gönderimi durumu incelenmiştir. Bu kıyaslama sonucunda elde edilen bilgiler Tablo 3.5, Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’de detaylı bir şekilde gösterilmektedir.

3.4.1 İkame Ürün Gönderimi

Modelde verilen parametreler doğrultusunda model çalıştırıldığında hem ML hem OU politikasına göre yaptığı ikame ürün gönderim miktarı aynı olmaktadır. Şekil 3.1’de modelin sonucu olarak A_i^{mkt} değişkenin hangi miktarda gönderildiği verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi $A(i,m,k,t)$ parametresi için ilk olarak sırasıyla 1. müşteriye talep edilen 4. ürün için 1. araç ile 1. günde 88 birim gönderim yapılmıştır. Aynı şekilde son olarak 18. müşteriye talep edilen 4. ürün için 2. araç ile 1. günde 72 birim gönderim yapılmıştır. Bu şekilden yola çıkarak 1. gün (T1) ve 4. ürün (Ü4) için elde bulunan stok durumu 400 birim olduğundan 1. gün (T1) gönderilecek toplam talebi (593 birim) karşılayamadığından ikame ürün gönderimi gerçekleşmiştir.

```

----      268 VARIABLE A.L
INDEX 1 = 1
      1
4 .1      88.000
INDEX 1 = 8
      1
4 .1      81.000
INDEX 1 = 9
      1
4 .1      107.000
INDEX 1 = 10
      1
4 .1      71.000
INDEX 1 = 11
      1
4 .1      98.000
INDEX 1 = 15
      1
4 .1      76.000
INDEX 1 = 18
      1
4 .2      72.000

```

Şekil 3.1 İkame ürün gönderim miktarı

3.4.2 Modelin ML ve OU Politikalarına Göre Sonuçların Karşılaştırılması

ML ve OU politikalarına göre İÇÜ-ERP matematiksel modeli için iki ayrı senaryo değerlendirmesi yapılmaktadır. Yapılan bu değerlendirme Tablo 3.5'te ML politikasına tüm gün ve tüm araçlar için izlenen rota, Tablo 3.6'te ise OU politikasına tüm gün ve tüm araçlar için izlenen rota verilmektedir. Tablo 3.7'da ise ML ve OU politikaları uyarınca çözüm süresi, toplam maliyet, iterasyon sayısı, kaynak kullanımı ve kullanılan araç durumuna göre kıyaslama yapılmıştır.

Tablo 3.5 ML politikasına göre araçların izlediği rota

ML POLİTİKASINA GÖRE İZLENEN ROTA		
Gün	1. Araç	2. Araç
1	0→9→1→15→11→10→18→8→0	
2	0→12→16→20→7→2→19→6→17→0	
3	0→5→14→3→13→4→0	

Tablo 3.6 OU politikasına göre araçların izlediği rota

OU POLİTİKASINA GÖRE İZLENEN ROTA		
Gün	1. Araç	2. Araç
1	0→15→1→11→8→9→10→0	0→18→0
2	0→6→7→16→12→19→0	0→17→20→2→0
3	0→3→13→14→5→4→0	

Tablo 3.7 ML ve OU politikası karşılaştırma verileri

	ML Politikası	OU Politikası
Çözüm Süresi (sn)	0.17	0.28
Toplam Maliyet	12308.4230	12279.9880
İterasyon Sayısı	516	912
Kaynak Kullanım Yüzdesi	0.184	0.300
Kullanılan Araçlar	1. Gün → 2. Araç 2. Gün → 1. Araç 3.Gün → 2. Araç	1. Gün → 1. ve 2. Araç 2. Gün → 1. ve 2. Araç 3.Gün → 1. Araç

Yapılan kıyaslamalar sonucunda OU politikasının ML politikasına göre daha optimum bir sonuç verdiği gözlemlenmiştir. ML politikası uygulandığında maliyet 12308.4230 iken OU politikası kapsamında toplam maliyet 12279.9880 bulunmuştur. Toplam maliyet bilgisi dışında diğ er verilere bakıldığında ise ML politikasının daha az iterasyon sonucunda çıkt ıyı bulduğu ve sonuca daha kısa sürede ulaşt ığı görölmüştür. Kullanılan araçların durumuna bakıldığında ise ML politikasında her gün bir araç talebi karşılamaya yeterken OU politikasında 1. ve 2. günler için iki araçta talebi karşılamak için dağıtıma çıkması gerekmiştir. Modelde kullanılan parametreler doğ rultusunda ML ve OU politikalarına göre değ işkenlerin aldıkları değ erler sırasıyla EK A ve EK B’de verilmektedir.



Günümüzde rotalama ve işletmenin ihtiyacına uygun stok seviyesinin düzgün bir şekilde yönetilememesi işletmeler açısından büyük maliyetlere sebep olmaktadır. Bu iki maliyeti bir arada değerlendirip kâr marjını artırmak amacıyla envanter rotalama problemlerinden faydalanılmaktadır. Envanter rotalama, ürün veya hizmet veren işletmelerin envanter ve dağıtım faaliyetlerini tek bir çatı altında birleştirerek stok ve filo operasyonlarını bütünleşik olarak ele almaktadır. Aynı zamanda araçların rotalanması ve envanter yönetiminin entegre çözümünü sağlamaktadır.

Yapılan çalışmada ilk olarak envanter rotalama kapsamında yapılmış önceki çalışmalar incelenerek tek ürünlü ve çok ürünlü ERP için kavramsal bir çerçevede karşılaştırma yapılmıştır. Literatürde ikame ürün gönderimi yapan envanter rotalama probleminin eksikliğini fark ederek yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model sayesinde ikame ürün gönderimi gerçekleşen işletmelerde üründen yeteri miktarda bulunmadığı taktirde eğer o ürünün karşılığını alabilecek başka bir ürün var ise müşteriye o ürünün gönderimi gerçekleşmektedir. Modeli test etmek amacıyla 3 günlük zaman diliminde, tek bir depodan, birden fazla müşteriye, kapasiteleri birbirinden farklı iki araçla ML ve OU politikalarına göre dağıtım işlemi gerçekleştiren bir sistem modele uyarlanmıştır. Uyarlanan bu model GAMS arayüzünde kodlanarak CPLEX çözücü yardımı ile çözülmüştür. Daha sonra çıkan sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi ve farklı envanter politikalarına göre karşılaştırma yapılabilmesi için iki politikaya göre kıyaslama gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlara göre minimum maliyet hedefi için OU politikası ML politikasına göre daha iyi bir sonuç vermektedir. Ayrıca 4. ürüne olan talep elde bulunan stok yetersizliği sebebiyle karşılanamadığı için o ürünün ikamesi olan ürün gönderimi geliştirilen model sayesinde gönderilebilmektedir. Bu sayede müşterilerin talebi eksiksiz olarak karşılanabilmektedir.

Bu çalışma, ikame ve çok ürünlü sistemin daha büyük boyutlu problemlerde uygulanabilmesi için ilerideki çalışmalara kaynak niteliğindedir. Ayrıca ilerideki

alışmalar için envanter rotalama problemine sadece envanter ve dağıtım zincirinin getirdiği maliyetleri değil bunun yanında ikame ürün, trafik durumu, acil sipariş, müşteri önceliği gibi farklı maliyetler oluşturabilecek sistemler dahil edilebilir.



ML Politikasına Göre GAMS Çıktısı

GAMS 25.1.1 r66732 Released May 19, 2018 LEX-LEG x86 64bit/Linux
06/17/19 13:27:01 Page 4

General Algebraic Modeling System
Execution

```

-----      268 VARIABLE z.L                      =      12308.423

-----      268 VARIABLE X.L  used on the route of vehicle k in period t

INDEX 1 = 1
          1
15.2      1.000
INDEX 1 = 2
          2
19.1      1.000
INDEX 1 = 3
          3
13.2      1.000
INDEX 1 = 4
          3
0 .2      1.000
INDEX 1 = 5
          3
14.2      1.000
INDEX 1 = 6
          2
17.1      1.000
INDEX 1 = 7

```

2
2 .1 1.000

INDEX 1 = 8

1
0 .2 1.000

INDEX 1 = 9

1
1 .2 1.000

INDEX 1 = 10

1
18.2 1.000

INDEX 1 = 11

1
10.2 1.000

INDEX 1 = 12

2
16.1 1.000

INDEX 1 = 13

3
4 .2 1.000

INDEX 1 = 0

	1	2	3
5 .2			1.000
9 .2	1.000		
12.1		1.000	

INDEX 1 = 14

3
3 .2 1.000

INDEX 1 = 15

1
11.2 1.000

INDEX 1 = 16

2

20.1 1.000

INDEX 1 = 17

2

0 .1 1.000

INDEX 1 = 18

1

8 .2 1.000

INDEX 1 = 19

2

6 .1 1.000

INDEX 1 = 20

2

7 .1 1.000

----- 268 VARIABLE QA.L Total quantity of product transported

INDEX 1 = 1

1

1.2 90.000

2.2 150.000

3.2 150.000

4.2 88.000

5.2 91.000

6.2 74.000

7.2 102.000

8.2 79.000

9.2 211.000

INDEX 1 = 2

2

1.1 95.000

2.1 180.000

3.1 79.000

4.1 77.000

5.1 80.000

6.1 66.000

7.1 145.000

8.1	104.000
9.1	254.000

INDEX 1 = 3

3

1.2	90.000
2.2	120.000
3.2	97.000
4.2	110.000
5.2	100.000
6.2	86.000
7.2	132.000
8.2	140.000
9.2	255.000

INDEX 1 = 4

3

1.2	92.000
2.2	160.000
3.2	123.000
4.2	60.000
5.2	132.000
6.2	80.000
7.2	97.000
8.2	148.000
9.2	229.000

INDEX 1 = 5

3

1.2	88.000
2.2	100.000
3.2	61.000
4.2	75.000
5.2	79.000
6.2	105.000
7.2	154.000
8.2	119.000
9.2	209.000

INDEX 1 = 6

2

1.1	100.000
2.1	210.000
3.1	107.000
4.1	50.000
5.1	99.000
6.1	108.000
7.1	90.000
8.1	139.000
9.1	207.000

INDEX 1 = 7

2

1.1	60.000
2.1	220.000
3.1	130.000
4.1	91.000
5.1	81.000
6.1	74.000
7.1	99.000
8.1	127.000
9.1	220.000

INDEX 1 = 8

1

1.2	56.000
2.2	140.000
3.2	99.000
4.2	81.000
5.2	88.000
6.2	92.000
7.2	132.000
8.2	107.000
9.2	247.000

INDEX 1 = 9

1

1.2	150.000
2.2	160.000
3.2	104.000
4.2	107.000
5.2	76.000
6.2	73.000
7.2	149.000
8.2	67.000
9.2	210.000

INDEX 1 = 10

1

1.2	100.000
2.2	80.000
3.2	54.000
4.2	71.000
5.2	123.000
6.2	52.000
7.2	130.000
8.2	93.000
9.2	215.000

INDEX 1 = 11

1

1.2	48.000
2.2	90.000
3.2	73.000
4.2	98.000
5.2	92.000
6.2	90.000
7.2	137.000
8.2	108.000
9.2	226.000

INDEX 1 = 12

2

1.1	90.000
2.1	130.000
3.1	141.000
4.1	91.000
5.1	83.000
6.1	79.000
7.1	124.000
8.1	142.000
9.1	238.000

INDEX 1 = 13

3

1.2	68.000
2.2	110.000
3.2	91.000
4.2	83.000
5.2	107.000
6.2	84.000
7.2	160.000
8.2	138.000
9.2	257.000

INDEX 1 = 14

3

1.2	75.000
2.2	155.000
3.2	85.000
4.2	67.000
5.2	78.000
6.2	50.000
7.2	119.000
8.2	106.000
9.2	233.000

INDEX 1 = 15

1

1.2	75.000
2.2	145.000

3.2	142.000
4.2	76.000
5.2	86.000
6.2	52.000
7.2	143.000
8.2	77.000
9.2	210.000

INDEX 1 = 16

2

1.1	84.000
2.1	165.000
3.1	105.000
4.1	52.000
5.1	109.000
6.1	59.000
7.1	168.000
8.1	86.000
9.1	208.000

INDEX 1 = 17

2

1.1	92.000
2.1	150.000
3.1	69.000
4.1	59.000
5.1	106.000
6.1	70.000
7.1	126.000
8.1	89.000
9.1	241.000

INDEX 1 = 18

1

1.2	102.000
2.2	170.000
3.2	150.000
4.2	72.000
5.2	83.000
6.2	55.000
7.2	133.000
8.2	118.000
9.2	222.000

INDEX 1 = 19

2

1.1	68.000
2.1	130.000
3.1	76.000
4.1	84.000
5.1	116.000

6.1	75.000
7.1	137.000
8.1	135.000
9.1	208.000

INDEX 1 = 20

2

1.1	108.000
2.1	190.000
3.1	66.000
4.1	116.000
5.1	93.000
6.1	78.000
7.1	120.000
8.1	79.000
9.1	250.000

----- 268 VARIABLE A.L replacement product quantity

INDEX 1 = 1

1

4 .2	88.000
------	--------

INDEX 1 = 8

1

4 .2	81.000
------	--------

INDEX 1 = 9

1

4 .2	107.000
------	---------

INDEX 1 = 10

1

4 .2	71.000
------	--------

INDEX 1 = 11

1

4 .2	98.000
------	--------

INDEX 1 = 15

1

4 .2	76.000
------	--------

INDEX 1 = 18

1
 4 .2 72.000

---- 268 VARIABLE Q.L normal product quantity

INDEX 1 = 1

1
 1.2 90.000
 2.2 150.000
 3.2 150.000
 5.2 91.000
 6.2 74.000
 7.2 102.000
 8.2 79.000
 9.2 211.000

INDEX 1 = 2

2
 1.1 95.000
 2.1 180.000
 3.1 79.000
 4.1 77.000
 5.1 80.000
 6.1 66.000
 7.1 145.000
 8.1 104.000
 9.1 254.000

INDEX 1 = 3

3
 1.2 90.000
 2.2 120.000
 3.2 97.000
 4.2 110.000
 5.2 100.000
 6.2 86.000
 7.2 132.000
 8.2 140.000
 9.2 255.000

INDEX 1 = 4

3
 1.2 92.000
 2.2 160.000
 3.2 123.000
 4.2 60.000
 5.2 132.000
 6.2 80.000

7.2	97.000
8.2	148.000
9.2	229.000

INDEX 1 = 5

3

1.2	88.000
2.2	100.000
3.2	61.000
4.2	75.000
5.2	79.000
6.2	105.000
7.2	154.000
8.2	119.000
9.2	209.000

INDEX 1 = 6

2

1.1	100.000
2.1	210.000
3.1	107.000
4.1	50.000
5.1	99.000
6.1	108.000
7.1	90.000
8.1	139.000
9.1	207.000

INDEX 1 = 7

2

1.1	60.000
2.1	220.000
3.1	130.000
4.1	91.000
5.1	81.000
6.1	74.000
7.1	99.000
8.1	127.000
9.1	220.000

INDEX 1 = 8

1

1.2	56.000
2.2	140.000
3.2	99.000
5.2	88.000
6.2	92.000
7.2	132.000
8.2	107.000
9.2	247.000

INDEX 1 = 9

1

1.2	150.000
2.2	160.000
3.2	104.000
5.2	76.000
6.2	73.000
7.2	149.000
8.2	67.000
9.2	210.000

INDEX 1 = 10

1

1.2	100.000
2.2	80.000
3.2	54.000
5.2	123.000
6.2	52.000
7.2	130.000
8.2	93.000
9.2	215.000

INDEX 1 = 11

1

1.2	48.000
2.2	90.000
3.2	73.000
5.2	92.000
6.2	90.000
7.2	137.000
8.2	108.000
9.2	226.000

INDEX 1 = 12

2

1.1	90.000
2.1	130.000
3.1	141.000
4.1	91.000
5.1	83.000
6.1	79.000
7.1	124.000
8.1	142.000
9.1	238.000

INDEX 1 = 13

3

1.2	68.000
2.2	110.000

3.2	91.000
4.2	83.000
5.2	107.000
6.2	84.000
7.2	160.000
8.2	138.000
9.2	257.000

INDEX 1 = 14

3

1.2	75.000
2.2	155.000
3.2	85.000
4.2	67.000
5.2	78.000
6.2	50.000
7.2	119.000
8.2	106.000
9.2	233.000

INDEX 1 = 15

1

1.2	75.000
2.2	145.000
3.2	142.000
5.2	86.000
6.2	52.000
7.2	143.000
8.2	77.000
9.2	210.000

INDEX 1 = 16

2

1.1	84.000
2.1	165.000
3.1	105.000
4.1	52.000
5.1	109.000
6.1	59.000
7.1	168.000
8.1	86.000
9.1	208.000

INDEX 1 = 17

2

1.1	92.000
2.1	150.000
3.1	69.000
4.1	59.000
5.1	106.000
6.1	70.000

7.1	126.000
8.1	89.000
9.1	241.000

INDEX 1 = 18

1

1.2	102.000
2.2	170.000
3.2	150.000
5.2	83.000
6.2	55.000
7.2	133.000
8.2	118.000
9.2	222.000

INDEX 1 = 19

2

1.1	68.000
2.1	130.000
3.1	76.000
4.1	84.000
5.1	116.000
6.1	75.000
7.1	137.000
8.1	135.000
9.1	208.000

INDEX 1 = 20

2

1.1	108.000
2.1	190.000
3.1	66.000
4.1	116.000
5.1	93.000
6.1	78.000
7.1	120.000
8.1	79.000
9.1	250.000

---- 268 VARIABLE y.L equal to one if and only if node i is
visited by vehi

cle k in period t

1

2

3

1 .2	1.000		
2 .1		1.000	
3 .2			1.000
4 .2			1.000
5 .2			1.000
6 .1		1.000	
7 .1		1.000	

8 .2	1.000		
9 .2	1.000		
10.2	1.000		
11.2	1.000		
12.1		1.000	
13.2			1.000
0 .1		1.000	
0 .2	1.000		1.000
14.2			1.000
15.2	1.000		
16.1		1.000	
17.1		1.000	
18.2	1.000		
19.1		1.000	
20.1		1.000	

---- 268 VARIABLE F.L the inventory levels of product m at the end of perio

d t at customer i

	1	2	3
0 .1	3379.000	6682.000	10269.000
0 .2	2565.000	4690.000	7545.000
0 .3	2228.000	4455.000	6998.000
0 .4	3207.000	5487.000	7992.000
0 .5	2761.000	5394.000	8298.000
0 .6	2612.000	5103.000	7798.000
0 .7	2574.000	5065.000	7903.000
0 .8	3551.000	6850.000	10399.000
0 .9	4359.000	8433.000	13150.000

---- 268 VARIABLE ABC.L

	1	2	3
1	4000.000	4000.000	4000.000
2	3500.000	3500.000	3500.000
3	3000.000	3000.000	3000.000
4	3800.000	2900.000	2900.000
5	3400.000	3400.000	3400.000
6	3100.000	3100.000	3100.000
7	3500.000	3500.000	3500.000
8	4200.000	4200.000	4200.000
9	5900.000	5900.000	5900.000

---- 268 VARIABLE SM.L total stock out cost

	1
1	210.000

EXECUTION TIME = 0.035 SECONDS 4 MB 25.1.1 r66732
LEX-LEG

OU Politikasına Göre GAMS Çıktısı

GAMS 25.1.1 r66732 Released May 19, 2018 LEX-LEG x86 64bit/Linux
06/17/19 13:21:59 Page 4

G e n e r a l A l g e b r a i c M o d e l i n g S y s t e m
E x e c u t i o n

```

-----      268 VARIABLE z.L                      =      12279.988

-----      268 VARIABLE X.L   used on the route of vehicle k in period t

INDEX 1 = 1
              1
11.1         1.000
INDEX 1 = 2
              2
0 .2         1.000
INDEX 1 = 3
              3
13.1         1.000
INDEX 1 = 4
              3
0 .1         1.000
INDEX 1 = 5
              3
4 .1         1.000
INDEX 1 = 6
              2
7 .1         1.000
INDEX 1 = 7
              2

```

16.1 1.000

INDEX 1 = 8

1

9 .1 1.000

INDEX 1 = 9

1

10.1 1.000

INDEX 1 = 10

1

0 .1 1.000

INDEX 1 = 11

1

8 .1 1.000

INDEX 1 = 12

2

19.1 1.000

INDEX 1 = 13

3

14.1 1.000

INDEX 1 = 0

1

2

3

3 .1

1.000

6 .1

1.000

15.1 1.000

17.2

1.000

18.2 1.000

INDEX 1 = 14

3

5 .1 1.000

INDEX 1 = 15

1

1 .1 1.000

INDEX 1 = 16

2

12.1 1.000

INDEX 1 = 17

2

20.2 1.000

INDEX 1 = 18

1

0 .2 1.000

INDEX 1 = 19

2

0 .1 1.000

INDEX 1 = 20

2

2 .2 1.000

----- 268 VARIABLE QA.L Total quantity of product transported

INDEX 1 = 1

1

1.1 90.000

2.1 150.000

3.1 150.000

4.1 88.000

5.1 91.000

6.1 74.000

7.1 1567.000

8.1 79.000

9.1 211.000

INDEX 1 = 2

2

1.2 95.000

2.2 180.000

3.2 79.000

4.2 77.000

5.2 80.000

6.2 66.000

7.2	145.000
8.2	2024.000
9.2	254.000

INDEX 1 = 3

3

1.1	90.000
2.1	120.000
3.1	97.000
4.1	110.000
5.1	100.000
6.1	86.000
7.1	132.000
8.1	1010.000
9.1	255.000

INDEX 1 = 4

3

1.1	92.000
2.1	160.000
3.1	123.000
4.1	60.000
5.1	132.000
6.1	80.000
7.1	1476.000
8.1	148.000
9.1	229.000

INDEX 1 = 5

3

1.1	88.000
2.1	100.000
3.1	61.000
4.1	75.000
5.1	2439.000
6.1	105.000
7.1	154.000
8.1	119.000
9.1	209.000

INDEX 1 = 6

2

1.1	100.000
2.1	210.000
3.1	107.000
4.1	50.000
5.1	99.000
6.1	108.000
7.1	980.000
8.1	139.000
9.1	207.000

INDEX 1 = 7

2

1.1	60.000
2.1	220.000
3.1	130.000
4.1	91.000
5.1	879.000
6.1	74.000
7.1	99.000
8.1	127.000
9.1	220.000

INDEX 1 = 8

1

1.1	56.000
2.1	140.000
3.1	99.000
4.1	81.000
5.1	1046.000
6.1	92.000
7.1	132.000
8.1	107.000
9.1	247.000

INDEX 1 = 9

1

1.1	150.000
2.1	160.000
3.1	104.000
4.1	107.000
5.1	980.000
6.1	73.000
7.1	149.000
8.1	67.000
9.1	210.000

INDEX 1 = 10

1

1.1	1182.000
2.1	80.000
3.1	54.000
4.1	71.000
5.1	123.000
6.1	52.000
7.1	130.000
8.1	93.000
9.1	215.000

INDEX 1 = 11

1

1.1	48.000
2.1	90.000
3.1	73.000
4.1	98.000
5.1	92.000
6.1	90.000
7.1	137.000
8.1	108.000
9.1	1364.000

INDEX 1 = 12

2

1.1	772.000
2.1	130.000
3.1	141.000
4.1	91.000
5.1	83.000
6.1	79.000
7.1	124.000
8.1	142.000
9.1	238.000

INDEX 1 = 13

3

1.1	68.000
2.1	110.000
3.1	91.000
4.1	83.000
5.1	107.000
6.1	84.000
7.1	160.000
8.1	138.000
9.1	1859.000

INDEX 1 = 14

3

1.1	75.000
2.1	155.000
3.1	85.000
4.1	67.000
5.1	78.000
6.1	50.000
7.1	119.000
8.1	106.000
9.1	2165.000

INDEX 1 = 15

1

1.1	75.000
-----	--------

2.1	145.000
3.1	142.000
4.1	76.000
5.1	86.000
6.1	52.000
7.1	143.000
8.1	77.000
9.1	3204.000

INDEX 1 = 16

2

1.1	2848.000
2.1	165.000
3.1	105.000
4.1	52.000
5.1	109.000
6.1	59.000
7.1	168.000
8.1	86.000
9.1	208.000

INDEX 1 = 17

2

1.2	92.000
2.2	150.000
3.2	69.000
4.2	59.000
5.2	106.000
6.2	70.000
7.2	126.000
8.2	89.000
9.2	1339.000

INDEX 1 = 18

1

1.2	102.000
2.2	170.000
3.2	150.000
4.2	72.000
5.2	951.000
6.2	55.000
7.2	133.000
8.2	118.000
9.2	449.000

INDEX 1 = 19

2

1.1	68.000
2.1	130.000
3.1	76.000
4.1	84.000

5.1	116.000
6.1	75.000
7.1	137.000
8.1	135.000
9.1	1879.000

INDEX 1 = 20

2

1.2	108.000
2.2	190.000
3.2	66.000
4.2	116.000
5.2	93.000
6.2	78.000
7.2	120.000
8.2	79.000
9.2	850.000

---- 268 VARIABLE A.L replacement product quantity

INDEX 1 = 1

1

4 .1	88.000
------	--------

INDEX 1 = 8

1

4 .1	81.000
------	--------

INDEX 1 = 9

1

4 .1	107.000
------	---------

INDEX 1 = 10

1

4 .1	71.000
------	--------

INDEX 1 = 11

1

4 .1	98.000
------	--------

INDEX 1 = 15

1

4 .1	76.000
------	--------

INDEX 1 = 18

1

4 .2 72.000

----- 268 VARIABLE Q.L normal product quantity

INDEX 1 = 1

1

1.1	90.000
2.1	150.000
3.1	150.000
5.1	91.000
6.1	74.000
7.1	1567.000
8.1	79.000
9.1	211.000

INDEX 1 = 2

2

1.2	95.000
2.2	180.000
3.2	79.000
4.2	77.000
5.2	80.000
6.2	66.000
7.2	145.000
8.2	2024.000
9.2	254.000

INDEX 1 = 3

3

1.1	90.000
2.1	120.000
3.1	97.000
4.1	110.000
5.1	100.000
6.1	86.000
7.1	132.000
8.1	1010.000
9.1	255.000

INDEX 1 = 4

3

1.1	92.000
2.1	160.000
3.1	123.000
4.1	60.000
5.1	132.000

6.1	80.000
7.1	1476.000
8.1	148.000
9.1	229.000

INDEX 1 = 5

3

1.1	88.000
2.1	100.000
3.1	61.000
4.1	75.000
5.1	2439.000
6.1	105.000
7.1	154.000
8.1	119.000
9.1	209.000

INDEX 1 = 6

2

1.1	100.000
2.1	210.000
3.1	107.000
4.1	50.000
5.1	99.000
6.1	108.000
7.1	980.000
8.1	139.000
9.1	207.000

INDEX 1 = 7

2

1.1	60.000
2.1	220.000
3.1	130.000
4.1	91.000
5.1	879.000
6.1	74.000
7.1	99.000
8.1	127.000
9.1	220.000

INDEX 1 = 8

1

1.1	56.000
2.1	140.000
3.1	99.000
5.1	1046.000
6.1	92.000
7.1	132.000
8.1	107.000
9.1	247.000

INDEX 1 = 9

1

1.1	150.000
2.1	160.000
3.1	104.000
5.1	980.000
6.1	73.000
7.1	149.000
8.1	67.000
9.1	210.000

INDEX 1 = 10

1

1.1	1182.000
2.1	80.000
3.1	54.000
5.1	123.000
6.1	52.000
7.1	130.000
8.1	93.000
9.1	215.000

INDEX 1 = 11

1

1.1	48.000
2.1	90.000
3.1	73.000
5.1	92.000
6.1	90.000
7.1	137.000
8.1	108.000
9.1	1364.000

INDEX 1 = 12

2

1.1	772.000
2.1	130.000
3.1	141.000
4.1	91.000
5.1	83.000
6.1	79.000
7.1	124.000
8.1	142.000
9.1	238.000

INDEX 1 = 13

3

1.1	68.000
-----	--------

2.1	110.000
3.1	91.000
4.1	83.000
5.1	107.000
6.1	84.000
7.1	160.000
8.1	138.000
9.1	1859.000

INDEX 1 = 14

3

1.1	75.000
2.1	155.000
3.1	85.000
4.1	67.000
5.1	78.000
6.1	50.000
7.1	119.000
8.1	106.000
9.1	2165.000

INDEX 1 = 15

1

1.1	75.000
2.1	145.000
3.1	142.000
5.1	86.000
6.1	52.000
7.1	143.000
8.1	77.000
9.1	3204.000

INDEX 1 = 16

2

1.1	2848.000
2.1	165.000
3.1	105.000
4.1	52.000
5.1	109.000
6.1	59.000
7.1	168.000
8.1	86.000
9.1	208.000

INDEX 1 = 17

2

1.2	92.000
2.2	150.000
3.2	69.000
4.2	59.000
5.2	106.000

6.2	70.000
7.2	126.000
8.2	89.000
9.2	1339.000

INDEX 1 = 18

1

1.2	102.000
2.2	170.000
3.2	150.000
5.2	951.000
6.2	55.000
7.2	133.000
8.2	118.000
9.2	449.000

INDEX 1 = 19

2

1.1	68.000
2.1	130.000
3.1	76.000
4.1	84.000
5.1	116.000
6.1	75.000
7.1	137.000
8.1	135.000
9.1	1879.000

INDEX 1 = 20

2

1.2	108.000
2.2	190.000
3.2	66.000
4.2	116.000
5.2	93.000
6.2	78.000
7.2	120.000
8.2	79.000
9.2	850.000

---- 268 VARIABLE y.L equal to one if and only if node i is
visited by vehi

cle k in period t

1

2

3

1 .1	1.000		
2 .2		1.000	
3 .1			1.000
4 .1			1.000
5 .1			1.000
6 .1		1.000	

7 .1		1.000	
8 .1	1.000		
9 .1	1.000		
10.1	1.000		
11.1	1.000		
12.1		1.000	
13.1			1.000
0 .1	1.000	1.000	1.000
0 .2	1.000	1.000	
14.1			1.000
15.1	1.000		
16.1		1.000	
17.2		1.000	
18.2	1.000		
19.1		1.000	
20.2		1.000	

---- 268 VARIABLE F.L the inventory levels of product m at the end of perio

	d t at customer i		
	1	2	3
1 .7	1465.000	1465.000	1465.000
2 .8		1920.000	1920.000
3 .8			870.000
4 .7			1379.000
5 .5			2360.000
6 .7		890.000	890.000
7 .5		798.000	798.000
8 .5	958.000	958.000	958.000
9 .5	904.000	904.000	904.000
10.1	1082.000	1082.000	1082.000
11.9	1138.000	1138.000	1138.000
12.1		682.000	682.000
13.9			1602.000
0 .1	2297.000	2154.000	5741.000
0 .2	2565.000	4690.000	7545.000
0 .3	2228.000	4455.000	6998.000
0 .4	3207.000	5487.000	7992.000
0 .5	31.000	1866.000	2410.000
0 .6	2612.000	5103.000	7798.000
0 .7	1109.000	2710.000	4169.000
0 .8	3551.000	4930.000	7609.000
0 .9		705.000	1888.000
14.9			1932.000
15.9	2994.000	2994.000	2994.000
16.1		2764.000	2764.000
17.9		1098.000	1098.000
18.5	868.000	868.000	868.000
18.9	227.000	227.000	227.000
19.9		1671.000	1671.000
20.9		600.000	600.000

---- 268 VARIABLE ABC.L

1	2	3
---	---	---

1	4000.000	4000.000	4000.000
2	3500.000	3500.000	3500.000
3	3000.000	3000.000	3000.000
4	3800.000	2900.000	2900.000
5	3400.000	3400.000	3400.000
6	3100.000	3100.000	3100.000
7	3500.000	3500.000	3500.000
8	4200.000	4200.000	4200.000
9	5900.000	5900.000	5900.000

----- 268 VARIABLE SM.L total stock out cost

1

1 210.000

EXECUTION TIME = 0.035 SECONDS 4 MB 25.1.1 r66732
LEX-LEG

- Abdelhalim, A., Eltawil, A., & Fors, M. N. (2016). The multiple vehicle inventory routing problem for perishable products. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2016-January, 1169–1173. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385832>
- Adulyasak, Y., Cordeau, J. F., & Jans, R. (2014). Formulations and branch-and-cut algorithms for multivehicle production and inventory routing problems. *INFORMS Journal on Computing*, 26(1), 103–120. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2013.0550>
- Aksen, D., Kaya, O., Sibel Salman, F., & Tüncel, Ö. (2014). An adaptive large neighborhood search algorithm for a selective and periodic inventory routing problem. *European Journal of Operational Research*, 239(2), 413–426. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.043>
- Alvarez, A., Munari, P., & Morabito, R. (2018). Iterated local search and simulated annealing algorithms for the inventory routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 25(6), 1785–1809. <https://doi.org/10.1111/itor.12547>
- Andersson, H., Hoff, A., Christiansen, M., Hasle, G., & Lokketangen, A., 2010. Industrial aspects and literature survey: Combined inventory management and routing. *Comput. Oper. Res.* 37 (9), 1515–1536. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.009>
- Arab, R., & Ghaderi, S. F. & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). Solving a New Multi-objective Inventory-Routing Problem by a Non-dominated Sorting Genetic Algorithm. *International Journal of Engineering*, 31(4), 588–596. <https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.04a.10>
- Arab, R., Ghaderi, S. F., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). Bi-objective inventory routing problem with backhauls under transportation risks: two meta-heuristics. *Transportation Letters*, 00(00), 1–17. <https://doi.org/10.1080/19427867.2018.1533624>
- Archetti, C., & Speranza, M. G. (2016). The inventory routing problem: The value of integration. *International Transactions in Operational Research*, 23(3), 393–407. <https://doi.org/10.1111/itor.12226>
- Archetti, C., Bianchessi, N., Irnich, S., & Speranza, M. G. (2014). Formulations for an inventory routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 21(3), 353–374. <https://doi.org/10.1111/itor.12076>

- Archetti, C., Christiansen, M., & Grazia Speranza, M. (2018). Inventory routing with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 268(1), 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.010>
- Archetti, C., Coelho, L. C., & Speranza, M. G. (2018). An Exact Algorithm for the Inventory Routing Problem with Logistic Ratio
- Avella, P., Boccia, M., & Wolsey, L. (2015). Single-item reformulations for a vendor managed inventory routing problem: Computational experience with benchmark instances. *Special Issue on Recent Trends in Routing*. 65(2), 129–138
- Avella, P., Boccia, M., & Wolsey, L. A. (2017). Single-Period Cutting Planes for Inventory Routing Problems. *Transportation Science*, 52(3), 497–508. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0729>
- Azadeh, A., Elahi, S., Farahani, M. H., & Nasirian, B. (2017). A genetic algorithm-Taguchi based approach to inventory routing problem of a single perishable product with transshipment. *Computers and Industrial Engineering*, 104, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.019>
- Bertazzi, L., & Speranza, M. G. (2013). Inventory routing problems with multiple customers. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2(3), 255–275. <https://doi.org/10.1007/s13676-013-0027-z>
- Bertazzi, L., Bosco, A., & Laganà, D. (2015). Managing stochastic demand in an Inventory Routing Problem with transportation procurement. *Omega (United Kingdom)*, 56, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.09.010>
- Bertazzi, L., Coelho, L. C., De Maio, A., & Laganà, D. (2019). A matheuristic algorithm for the multi-depot inventory routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122(January), 524–544. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.01.005>
- Brinkmann, J., Ulmer, M. W., & Mattfeld, D. C. (2015). Short-term strategies for stochastic inventory routing in bike sharing systems. *Transportation Research Procedia*, 10(July), 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.086>
- Campbell A., Clarke L., Kleywegt A., & Savelsbergh M. (1998) The Inventory Routing Problem. In: Crainic T.G., Laporte G. (eds) *Fleet Management and Logistics*. Centre for Research on Transportation. Springer, Boston, MA.
- Çankaya, E., Ekici, A., & Özener, O. Ö. (2018). Humanitarian relief supplies distribution: an application of inventory routing problem. *Annals of Operations Research*, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2781-7>

- Ceylan, O. (2014). Piyasa Rehberi. 9 Temmuz 2019 tarihinde <http://piyasarehberi.org/sozluk/ikame-mal> adresinden erişildi.
- Chitsaz, M., Cordeau, J. F., & Jans, R. (2019). A unified decomposition matheuristic for assembly, production, and inventory routing. *INFORMS Journal on Computing*, 31(1), 134–152. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2018.0817>
- Chitsaz, M., Divsalar, A., & Vansteenwegen, P. (2016). A two-phase algorithm for the cyclic inventory routing problem. *European Journal of Operational Research*, 254(2), 410–426. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.056>
- Chow, J. Y. J., & Nurumbetova, A. E. (2015). A multi-day activity-based inventory routing model with space-time-needs constraints. *Transportmetrica A: Transport Science*, 11(3), 243–269. <https://doi.org/10.1080/23249935.2014.958120>
- Coelho, L. C., & Laporte, G. (2013). A branch-and-cut algorithm for the multi-product multi-vehicle inventory-routing problem. *International Journal of Production Research*, 51(23–24), 7156–7169. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.757668>
- Coelho, L. C., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2014). Heuristics for dynamic and stochastic inventory-routing. *Computers and Operations Research*, 52(PART A), 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.07.001>
- Coelho, L. C., Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2013). Thirty Years of Inventory Routing. *Transportation Science*, 48(1), 1–19. <https://doi.org/10.1287/trsc.2013.0472>
- Cordeau, J. F., Laganà, D., Musmanno, R., & Vocaturo, F. (2015). A decomposition-based heuristic for the multiple-product inventory-routing problem. *Computers and Operations Research*, 55, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.007>
- Crama, Y., Rezaei, M., Savelsbergh, M., & Woensel, T. Van. (2018). Stochastic Inventory Routing for Perishable Products. *Transportation Science*, 52(3), 526–546. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0799>
- Desaulniers, G. (2016). Routing Problem A Branch-Price-and-Cut Algorithm for the Inventory-Routing Problem, (February 2018).
- Düzakin, E., & Demircioğlu, M. (2009). Araç Rotalama Problemleri ve Çözüm Yöntemleri. *Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi*, 68–87.
- Fardi, K., Jafarzadeh Ghouschi, S., & Hafezalkotob, A. (2019). An extended robust approach for a cooperative inventory routing problem. *Expert Systems with Applications*, 116, 310–327. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.09.002>

- Gholami Zanjani, S. M., Rabbani, M., & Gholipour, S. (2019). An integrated approach for robust inventory routing problem in a three-echelon distribution system. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 32(3/4), 414. <https://doi.org/10.1504/ijlsm.2019.10019765>
- Gruler, A., Panadero, J., de Armas, J., Pérez, J. A. M., & Juan, A. A. (2018). A variable neighborhood search simheuristic for the multiperiod inventory routing problem with stochastic demands. *International Transactions in Operational Research*, 00, 1–22. <https://doi.org/10.1111/itor.12540>
- Guemri, O., Bekrar, A., Beldjilali, B., & Trentesaux, D. (2016). GRASP-based heuristic algorithm for the multi-product multi-vehicle inventory routing problem. *4or*, 14(4), 377–404. <https://doi.org/10.1007/s10288-016-0315-1>
- Guimaraes, T. A., Coelho, L. C., Schenekemberg, C. M. & Scarpin, T. C., (2018). The Three-Echelon Multi-Depot Inventory-Routing Problem, (February).
- Halim, H. Z. A., & Moin, N. H. (2014). Solving inventory routing problem with backordering using Artificial Bee Colony. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2015–January, 913–917. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2014.7058771>
- Hasni, S., Toumi, S., Jarboui, B., & Mjirda, A. (2017). GVNS based heuristic for solving the multi-product multi-vehicle inventory routing problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 58, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2017.03.010>
- Hu, H., Li, J., & Li, X. (2018). A credibilistic goal programming model for inventory routing problem with hazardous materials. *Soft Computing*, 22(17), 5803–5816. <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2663-y>
- Hu, W., Toriello, A., & Dessouky, M. (2018). Integrated inventory routing and freight consolidation for perishable goods. *European Journal of Operational Research*, 271(2), 548–560. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.034>
- Iassinovskaia, G., Limbourg, S., & Riane, F. (2017). The inventory-routing problem of returnable transport items with time windows and simultaneous pickup and delivery in closed-loop supply chains. *International Journal of Production Economics*, 183, 570–582. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.024>
- Jafarian, A., Asgari, N., Mohri, S. S., Fatemi-Sadr, E., & Farahani, R. Z. (2019). The inventory-routing problem subject to vehicle failure. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 126(April), 254–294. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.04.009>
- Jahangir, H., Mohammadi, M., Pasandideh, S. H. R., & Nobari, N. Z. (2018). Comparing performance of genetic and discrete invasive weed optimization algorithms for solving the inventory routing problem with an incremental

- delivery. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1–27.
<https://doi.org/10.1007/s10845-018-1393-z>
- Jia, T., Li, X., Wang, N., & Li, R. (2014). Integrated Inventory Routing Problem with Quality Time Windows and Loading Cost for Deteriorating Items under Discrete Time. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1–14.
<https://doi.org/10.1155/2014/537409>
- Juan, A. A., Grasman, S. E., Caceres-Cruz, J., & Bektaş, T. (2014). A simheuristic algorithm for the Single-Period Stochastic Inventory-Routing Problem with stock-outs. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 46, 40–52.
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.11.008>
- Kahraman, Ö. U., & Aydemir, E. (2017). Envanter Rotalama Problemleri İçin Yeni Araştırma Alanları. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(1), 383–392.
<https://doi.org/10.21923/jesd.31401>
- Karoonsoontawong, A., Kobkiattawin, O. & Xie (2017), Efficient Insertion Heuristic Algorithms for Multi-Trip Inventory Routing Problem with Time Windows, Shift Time Limits and Variable Delivery Time. *C. Networks Spatial Economics*, 1-49. <https://doi.org/10.1007/s11067-017-9369-7>
- Laganà, D., Longo, F., & Santoro, F. (2015). Multi-product inventory-routing problem in the supermarket distribution industry. *International Journal of Food Engineering*, 11(6), 747–766. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0052>
- Lefever, W., Aghezzaf, E. H., & Hadj-Hamou, K. (2016). A convex optimization approach for solving the single-vehicle cyclic inventory routing problem. *Computers and Operations Research*, 72, 97–106.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.02.010>
- Lefever, W., Aghezzaf, E. H., Hadj-Hamou, K., & Penz, B. (2018). Analysis of an improved branch-and-cut formulation for the Inventory-Routing Problem with Transshipment. *Computers and Operations Research*, 98, 137–148.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.05.023>
- Li, K., Chen, B., Sivakumar, A. I., & Wu, Y. (2014). An inventory-routing problem with the objective of travel time minimization. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 936–945.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.07.034>
- Liu, S. C., Lu, M. C., & Chung, C. H. (2016). A hybrid heuristic method for the periodic inventory routing problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(9–12), 2345–2352.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-8081-3>
- Lmariouh, J., Hachemi, N. El, Jamali, A., & Bouami, D. (2014). The multi-vehicle mutli-product inventory-routing problem: A case study. 2014 International

- Conference on Advanced Logistics and Transport, ICALT 2014, 319–323.
<https://doi.org/10.1109/ICAdLT.2014.6866332>
- Markov, I., Bierlaire, M., Cordeau, J. F., Maknoon, Y., & Varone, S. (2018). A unified framework for rich routing problems with stochastic demands. *Transportation Research Part B: Methodological*, 114, 213–240.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.05.015>
- Miller, C. E., Tucker, A. W., & Zemlin, R. A., “Integer programming formulations and traveling salesman problems”, *Journal of the ACM*, 7, 326–329, 1960.
- Mirzaei, S., & Seifi, A. (2015). Considering lost sale in inventory routing problems for perishable goods. *Computers and Industrial Engineering*, 87(May), 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.05.010>
- Misra, S., Kapadi, M., Gudi, R. D., & Saxena, D. (2019). Resource Optimization and Inventory Routing of the Packaged Liquefied Gas Supply Chain. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(18), 7579–7592.
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05604>
- Mjirda, A., Jarboui, B., Mladenović, J., Wilbaut, C., & Hanafi, S. (2014). A general variable neighbourhood search for the multi-product inventory routing problem. *IMA Journal of Management Mathematics*, 27(1), 39–54.
<https://doi.org/10.1093/imaman/dpu020>
- Montagné, R., Gamache, M., & Gendreau, M. (2018). A shortest path-based algorithm for the inventory routing problem of waste vegetable oil collection. *Journal of the Operational Research Society*, 5682, 1–12.
<https://doi.org/10.1080/01605682.2018.1476801>
- Nambirajan, R., Mendoza, A., Pazhani, S., Narendran, T. T., & Ganesh, K. (2016). CARE: Heuristics for two-stage multi-product inventory routing problems with replenishments. *Computers and Industrial Engineering*, 97, 41–57.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.04.004>
- Niakan, F., & Rahimi, M. (2015). A multi-objective healthcare inventory routing problem; a fuzzy possibilistic approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 80, 74–94.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.04.010>
- Nolz, P. C., Absi, N., & Feillet, D. (2014). A bi-objective inventory routing problem sustainable waste management under uncertainty. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 21(5-6). <https://doi.org/10.1002/mcda.1519>
- Noor, N. M., & Shuib, A. (2015). Multi-Depot Instances for Inventory Routing Problem Using Clustering Techniques. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, 3(2), 97–101. <https://doi.org/10.12720/jiii.3.2.97-101>

- Noufissa, C., & Mohamed, E. M. (2016). A hybrid ant colony for solving Inventory Routing Problem. *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Logistics Operations Management, GOL 2016*. <https://doi.org/10.1109/GOL.2016.7731685>
- Pantelis Z. Lappas, Manolis N. Kritikos, & George D. Ioannou. (2017). A Two-phase Solution Algorithm for the Inventory Routing Problem with Time Windows. *Journal of Mathematics and System Science*, 7(9), 237–247. <https://doi.org/10.17265/2159-5291/2017.09.001>
- Park, Y. B., Yoo, J. S., & Park, H. S. (2016). A genetic algorithm for the vendor-managed inventory routing problem with lost sales. *Expert Systems with Applications*, 53, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.01.041>
- Peres, I. T., Repolho, H. M., Martinelli, R., & Monteiro, N. J. (2017). Optimization in inventory-routing problem with planned transshipment: A case study in the retail industry. *International Journal of Production Economics*, 193, 748–756. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.09.002>
- Qamsari, A. N., & Jokar, A. (2017). A Two-Phase Hybrid Heuristic Method for a Multi-Depot Inventory-Routing Problem, 4(4), 287–304.
- Qin, L., Miao, L., Ruan, Q., & Zhang, Y. (2014). A local search method for periodic inventory routing problem. *Expert Systems with Applications*, 41(2), 765–778. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.100>
- Raa, B. (2015). Fleet optimization for cyclic inventory routing problems. *International Journal of Production Economics*, 160, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.10.006>
- Raa, B., & Dullaert, W. (2017). Route and fleet design for cyclic inventory routing. *European Journal of Operational Research*, 256(2), 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.009>
- Rahim, M. K. I. A., Iteng, R., & Ahmad, M. A. (2017). A deterministic inventory routing model for the single-period problems with finite time horizon. *International Journal of Supply Chain Management*, 6(2), 196–201.
- Rahim, M. K. I. A., Zhong, Y., Aghezzaf, E. H., & Aouam, T. (2014). Modelling and solving the multiperiod inventory-routing problem with stochastic stationary demand rates. *International Journal of Production Research*, 52(14), 4351–4363. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.883470>
- Rahimi, M., Baboli, A., & Rekik, Y. (2014). A bi-objective inventory routing problem by considering customer satisfaction level in context of perishable product. *IEEE SSCI 2014 - 2014 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence - CIPLS 2014: 2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in*

- Production and Logistics Systems, Proceedings, 91–97.
<https://doi.org/10.1109/CIPLS.2014.7007166>
- Rahimi, M., Baboli, A., & Rekik, Y. (2015). Inventory routing problem for perishable products by considering social issue. 10th IEEE Int. Conf. on Service Operations and Logistics, and Informatics, SOLI 2015 - In Conjunction with ICT4ALL 2015, 116–121. <https://doi.org/10.1109/SOLI.2015.7367604>
- Rahimi, M., Baboli, A., & Rekik, Y. (2016). Sustainable Inventory Routing Problem for Perishable Products by Considering Reverse Logistic. IFAC-PapersOnLine, 49(12), 949–954. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.898>
- Ramadhan, F., Imran, A., & Rizana, A. F. (2018). A record-to-record travel algorithm for multi-product and multi-period inventory routing problem. 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2018, 274–278. <https://doi.org/10.1109/IEA.2018.8387109>
- Rohmer, S. U. K., Claassen, G. D. H., & Laporte, G. (2019). A two-echelon inventory routing problem for perishable products. Computers and Operations Research, 107, 156–172. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.03.015>
- Salim, A. S. M., Mounira, T., & Ouajdi, K. (2018). A hybrid genetic algorithm for the inventory routing problem. Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA, 2017–October, 987–994. <https://doi.org/10.1109/AICCSA.2017.25>
- Shaabani, H., & Kamalabadi, I. N. (2016). An efficient population-based simulated annealing algorithm for the multi-product multi-retailer perishable inventory routing problem. Computers and Industrial Engineering, 99, 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.07.022>
- Singh, T., Arbogast, J. E., & Neagu, N. (2015). An incremental approach using local-search heuristic for inventory routing problem in industrial gases. Computers and Chemical Engineering, 80, 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.05.023>
- Timajchi, A., Mirzapour Al-e-Hashem, S. M. J., & Rekik, Y. (2019). Inventory routing problem for hazardous and deteriorating items in the presence of accident risk with transshipment option. International Journal of Production Economics, 209, 302–315. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.01.018>
- Van Anholt, R. G., Coelho, L. C., Laporte, G., & Vis, I. F. A. (2016). An Inventory-Routing Problem with Pickups and Deliveries Arising in the Replenishment of Automated Teller Machines. Transportation Science, 50(3), 1077–1091. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0637>
- Vansteenwegen, P., & Mateo, M. (2014). An iterated local search algorithm for the single-vehicle cyclic inventory routing problem. European Journal of

- Operational Research, 237(3), 802–813.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.020>
- Widyadana, G. A., & Irohara, T. (2018). Modelling Multi Tour Inventory Routing Problem for Deteriorating Items with Time Windows. *Scientia Iranica*, 0(0), 0–0. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.20178>
- Widyadana, G. A., Budiman, S. D., & Eading, I. I. N. H. (2016). Inventory Routing Problem for Deteriorating Items with Multi Tours, 2526–2537.
- Woeginger, G. J. (2003). Exact Algorithms for NP-Hard Problems: A Survey, 185–207. https://doi.org/10.1007/3-540-36478-1_17
- Wong, L., & Moin, N. H. (2014). Ant colony optimization for one-to-many network inventory routing problem. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2015–January, 877–881. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2014.7058764>
- Xiao, N., & Rao, Y. L. (2016). Multi-product multi-period inventory routing optimization with time window constrains. *International Journal of Simulation Modelling*, 15(2), 352–364. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM15\(2\)C08](https://doi.org/10.2507/IJSIMM15(2)C08)
- Yadollahi, E., Aghezzaf, E. H., & Raa, B. (2017). Managing inventory and service levels in a safety stock-based inventory routing system with stochastic retailer demands. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 33(4), 369–381. <https://doi.org/10.1002/asmb.2241>
- Yadollahi, E., Aghezzaf, E. H., Walraevens, J., Raa, B., & Claeys, D. (2019). Evaluating approximate solution models for the stochastic periodic inventory routing problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 50(December 2017), 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.11.001>
- Yeh, Y., & Low, C. (2017). Mathematical Modelling for a Multi-Product Inventory Routing Problem with Split Delivery. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 05(09), 1607–1612. <https://doi.org/10.4236/jamp.2017.59132>
- Zhenping Li, Lulu Jiang, & Chongyu Jiang. (2016). An inventory routing problem with soft time windows, 5 .-5 . <https://doi.org/10.1049/cp.2015.0614>

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: irem.sahmutoglu@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. Şahmutoğlu, İ. & Taşkın Gümüş, A. (2018). “Çok Ürünlü Envanter Rotalama Problemi: Kavramsal Bir Yaklaşım”. 34. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Kongresi (YAEM2018) Bildiri Özetleri Dergisi 34-96.

