



**DEĞİŞKEN MALİYETLİ ÇİNLİ POSTACI
PROBLEMİ VE BİR UYGULAMA**

Ebrar ÖZBEY

Danışman: Doç. Dr. Mustafa YILMAZ
Yüksek Lisans Tezi
Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2022
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DEĞİŞKEN MALİYETLİ ÇİNLİ POSTACI PROBLEMİ VE BİR UYGULAMA
(Chinese Postman Problem With Variable Cost and A Case Study)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ebrar ÖZBEY

Danışman: Doç. Dr. Mustafa YILMAZ

Erzurum
Şubat, 2022



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

DEĞİŞKEN MALİYETLİ ÇİNLİ POSTACI PROBLEMİ VE BİR UYGULAMA

Doç. Dr. Mustafa YILMAZ danışmanlığında, Ebrar ÖZBEY tarafından hazırlanan bu çalışma, 08/02/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Dr. Öğr. Üyesi Betül TURANOĞLU ŞİRİN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Danışman:	Doç. Dr. Mustafa YILMAZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Nadide ÇAĞLAYAN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır.



TEZ BENZERLİK ORANI BEYAN FORMU¹

Öğrencinin Adı ve Soyadı	Ebrar ÖZBEY
Öğrencinin Numarası	18040802010
Ana Bilim Dalı	Endüstri Mühendisliği
Bilim Dalı	Endüstri Mühendisliği
Öğrencinin Kayıtlı Olduğu Program Türü	Yüksek Lisans
Tezin Adı	Değişken Maliyetli Çınlı Postacı Problemi ve Bir Uygulama

Yukarıda bilgileri verilen tezin intihal tespit yazılımıyla (Turnitin) yapılan tarama sonucunda elde edilen benzerlik oranları aşağıdaki gibidir. Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	6	30
Kuramsal Temeller	4	30
Materyal ve Yöntem	18	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	0	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	7	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Ebrar ÖZBEY	Doç. Dr. Mustafa YILMAZ
8.2.2022	8.2.2022
İmza: Aslı Islak İmzalıdır.	İmza: Aslı Islak İmzalıdır.

¹ Bu form bilgisayar ortamında doldurulmalı, çıktısı imzalanıp Tez Savunması Jüri Öneri Formu'yla birlikte Ana Bilim Dalı Başkanlığı aracılığıyla ÜBYS üzerinden Enstitüye iletilmelidir.

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans süresince ve tez çalışmamda her türlü desteği veren sevgili hocam ve danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa YILMAZ'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olup maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, motivasyonum düştüğünde varlıklarını her zaman yanımda hissettiren canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ebrar ÖZBEY



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DEĞİŞKEN MALİYETLİ ÇİNLİ POSTACI PROBLEMİ VE BİR UYGULAMA

Ebrar ÖZBEY

Danışman: Doç. Dr. Mustafa YILMAZ

Amaç: Çinli Postacı Problemi toplam hareket maliyetini en aza indirmeyi amaçlayan Ayrıt Rotalama Problemleri'nden biridir. Bununla birlikte şebeke üzerindeki her yoldan en az bir kez geçilmeli ve başlangıç noktasına geri dönülmesi gerekmektedir. Şebekede başlangıç noktasına geri dönülmesi şartından dolayı şebekedeki yolların bazılarında birkaç kez geçilmesi gerekebilmektedir ve şebeke üzerindeki geçiş maliyeti her geçiş için farklılık gösterebilmektedir. Bu problem türü Çinli Postacı Problemi türlerinden biri olan Değişken Maliyetli Çinli Postacı Problemi olarak adlandırılır. Bu tez çalışmasında Değişken Maliyetli Çinli Postacı Problemi'nin matematiksel modeli geliştirilip bir uygulama yapılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Çinli Postacı Problemi'nin matematiksel modeli ele alınarak yönetime başlanılmıştır. Kapalı formdaki bu matematiksel model üzerinden gerekli düzeltmeler yapılarak yeni matematiksel model geliştirilmiştir. Elde edilen bu model Değişken Maliyetli Çinli Postacı Problemi'nin matematiksel modelidir.

Bulgular: Elde edilen Değişken Maliyetli Çinli Postacı Problemi'nin matematiksel modelinin açık ve kapalı formları Gams Studio 34 programında kodlanmıştır ve modelin hatasız çalıştığını test etmek amacıyla 4 düğümden 500 düğüme kadar olan mevcuttaki test problemleri çözülmüştür.

Sonuç: Bu tezde Çinli Postacı Problemi çeşitlerinden biri olan Değişken Maliyetli Çinli Postacı Problemi'nin matematiksel modeli geliştirilmiştir, 500 düğüme kadar olan problemler çözülerek model test edilmiştir ve literatürde Çinli Postacı Problemi örneği olarak karşımıza çıkan bir örnek Değişken Maliyetli Çinli Postacı Problemi olarak ele alınıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra bir uygulama yapıp uygulamadaki en kısa mesafeyi oluşturan optimum sonuç bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: ayrıt rotalama problemleri, çinli postacı problemi, değişken maliyetli çinli postacı problemi

Şubat 2022, 63 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

CHINESE POSTMAN PROBLEM WITH VARIABLE COST AND A CASE STUDY

Ebrar ÖZBEY

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa YILMAZ

Purpose: The Chinese Postman Problem is one of the Edge Routing Problems that aims to minimize the total cost of movement. However, each road on the network must be crossed at least once and returned to the starting point. Due to the condition of returning to the starting point in the network, it may be necessary to cross some of the roads in the network several times, and the cost of the transition on the network may differ for each transition. This type of problem is called the Variable Cost Chinese Postman Problem, which is one of the types of the Chinese Postman Problem. In this thesis, it is aimed to develop the mathematical model of the Variable Cost Chinese Postman Problem and make an application.

Method: The method was started by considering the mathematical model of the Chinese Postman Problem. A new mathematical model was developed by making necessary corrections on this mathematical model in closed form. This model is the mathematical model of the Variable Cost Chinese Postman Problem.

Findings: The open and closed forms of the mathematical model of the Variable Cost Chinese Postman Problem were coded in the Gams Studio 34 program and the existing test problems from 4 nodes to 500 nodes were solved in order to test that the model works without errors.

Conclusion: In this thesis, the mathematical model of the Variable Cost Chinese Postman Problem, which is one of the variants of the Chinese Postman Problem, was developed, the model was tested by solving the problems up to 500 nodes, and an example in the literature as the Chinese Postman Problem was considered as the Variable Cost Chinese Postman Problem and the results were compared. Then, an application was made and the optimum result was found, which created the shortest distance in the application.

Keywords: edge routing problems, chinese postman problem, chinese postman problem with variable cost

February 2022, 63 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Rotalama Problemleri.....	4
Düğüm Rotalama Problemleri.....	4
Gezgin Satıcı Problemi (GSP)	4
Araç Rotalama Problemi (ARÇP).....	5
Ayrıt Rotalama Problemleri (ARP).....	6
Königsberg Köprü Problemi ve Euler Turu	6
Çinli Postacı Problemi	9
ÇPP Uygulama Alanları.....	10
Sokak temizliği	10
Tuz serpme	11
Kar temizleme	11
Yol bakımı.....	11
Lazer Kesim Makineleri.....	12
ÇPP Çeşitleri	12
Yönsüz ÇPP	13
Yönlü ÇPP.....	13
Karma ÇPP.....	14
k-ÇPP	14
Min-Max k-ÇPP	15
Hiyerarşik ÇPP.....	15
Kapasite kısıtlı ÇPP	15
Rüzgarlı ÇPP (hızlı ÇPP).....	16

Çalışma Özetleri.....	16
MATERYAL VE METOD	22
İşletme Hakkında Genel Bilgi.....	22
Problemin Tanımlanması	23
Değişken maliyetli çinli postacı problemi.....	23
ÇPP matematiksel modeli	24
DMÇPP matematiksel modeli.....	25
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	27
Literatürdeki Bir ÇPP'nin DMÇPP Olarak Ele Alınması ve Sonuçların	
Karşılaştırılması	27
Uygulama	30
İlk Geçiş Maliyet Matrisi	35
İkinci Geçiş Maliyet Matrisi	38
Bağlantı Matrisi.....	41
SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ.....	51

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Farklı Düzüm Dereceli Problemlerin Gams Studio 34 Program Sonuçları	27
Tablo 2. İlk Geçiş Maliyetleri.....	29
Tablo 3. İkinci Geçiş Maliyetleri	30
Tablo 4. Bağlantı Matrisi	30



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Gezgin satıcı problemi şebeke örneği	5
Şekil 2. Araç rotalama problemi şebeke örneği	6
Şekil 3. Königsberg'in yedi köprüsü.....	7
Şekil 4. Königsberg'in yedi köprüsünün şebeke gösterimi.....	7
Şekil 5. Euler turu şebeke gösterimi.....	8
Şekil 6. Yarı- euler turu şebeke gösterimi.....	8
Şekil 7. Yönsüz ÇPP şebeke örneği	13
Şekil 8. Literatürdeki bir ÇPP'nin şebeke gösterimi.....	28
Şekil 9. Literatürdeki problemin DMÇPP olarak şebeke gösterimi.....	29
Şekil 10. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların haritası	31
Şekil 11. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların şebeke gösterimi.....	32
Şekil 12. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların uzaklık matrisi	34
Şekil 13. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların ilk maliyet matrisi	37
Şekil 14. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların ikinci maliyet matrisi..	40
Şekil 15. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların bağlantı matrisi.....	43

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

ARÇP	: Araç Rotalama Problemi
ARP	: Ayrıt Rotalama Problemleri
ÇPP	: Çinli Postacı Problemi
DMÇPP	: Değişken Maliyetli Çinli Postacı
GSP	: Gezgin Satıcı Problemi
HÇPP	: Hiyerarşik Çinli Postacı Problemi
HKKÇPP	: Hiyerarşik Karışık Kırsal Çinli Postacı Problemi
KAÇPP	: Karma Ağlardaki Çinli Postacı Problemi
KÇPP	: Kırsal Çinli Postacı Problemi
MFÇPP	: Maksimum Faydalı Çinli Postacı Problemi
ÖTKPP	: Ödül Toplama Kırsal Postacı Problemi
Simgeler	
\$	: Dolar
C_{ij}	: (i,j) ayrıtının uzunluğu (mesafesi)
c_{ij}	: (i,j) ayrıtından ikinci geçiş maliyeti
d_{ij}	: (i,j) ayrıtından ilk geçiş maliyeti
x_{ij}	: i düğümünden j düğüme giderken (i,j) ayrıtından geçilme sayısı
x_{ji}	: j düğümünden i düğüme giderken (j,i) ayrıtından geçilme sayısı
y_{ij}	: i düğümünden j düğüme gidilip gidilmediğini kontrol eden ikil değişken
E	: Şebekedeki tüm yönsüz ayrıtlar kümesi
$G = (V,E)$	: V düğümler E ayrıtlardan oluşan bir şebeke
M	: Büyük bir sayı ($=10^6$)
n	: Şebekedeki toplam düğüm sayısı
V	: Şebekedeki tüm düğümler kümesi

GİRİŞ

Rotalama, herhangi bir taşıma işleminin başlangıç noktasından ulaştırılacak noktalara hangi sıra ve güzergah ile yapılacağını belirlemesidir. Geçmişten günümüze kadar birçok alanda rotalamaya ihtiyaç duyulmuştur. Örnek olarak kış aylarında belediyelerin yapmakta olduğu kar küreme çalışmaları, çöp toplama işlemi, kargo şirketinde çalışan bir kargocunun yaya veya araç ile kargo dağıtımı, postacının postaneden aldığı postaları dağıtımı, lojistik firmalarından ürün sevkiyatı yapılması, elektrik firmalarında elektrik dağıtımı ve sayaç okuma işlemlerinin yapılması, polis devriye araçlarının güzergahlarının belirlenmesi, öğrenci ve personel taşıma firmalarının servis planlaması, uçaklar için havaalanı güzergahının belirlenmesi verilebilir. Rotalamaya ihtiyaç duyulmasındaki temel etken; zaman, para, hammadde, iş gücü vb. gibi varlıkların işletmeler için sınırlı sayıda olmasıdır. Rotalama yaparken sınırlı sayıda bulunan bu varlıklardan minimum maliyetle maksimum fayda elde etmek amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusundaki ihtiyaçlar rotalama problemlerini oluşturmuştur (Dror, 2012).

Rotalama problemleri genel olarak 2 ana başlık altında toplanır. Bunlar Düğüm Rotalama Problemleri ve Ayrıt Rotalama Problemleri (ARP)'dir.

Düğüm Rotalama Problemleri'nde bir şebekenin düğümleri ele alınarak rotalama yapılır. Bu rotalama problemlerindeki asıl amaç şebekede bulunan her düğüme bir kere uğrayarak maliyeti en az olan en kısa tur veya turları bulmaktır. Düğüm Rotalama Problemleri'nin en bilindik örneği Gezgin Satıcı Problemi (GSP)'dir.

Ayrıt Rotalama Problemleri (ARP)'nde sadece ayrıtlara uğrayarak rotalama yapılır. ARP'de, bir şebekede bulunan ayrıtların tamamına en az bir kere uğranılır ve tekrar başlangıç noktasına geri dönerek en az maliyetli tur veya turlar bulunur. ARP'nin en bilindik örneği Çinli Postacı Problemi (ÇPP)'dir (Berbeglia *et al.* 2007).

ÇPP'nin ilk ortaya çıkışı 1960 yılına dayanır. Bu tarihte Çinli bir matematikçi olan Mei-Ko Kwan, bir postacının postaneden aldığı mektupları ulaştırması gereken tüm noktalara her yoldan en az bir kere geçerek en kısa mesafeyle ulaştırabilir mi düşüncesiyle bu problemi ele almıştır. Postacı postaları her noktaya ulaştırdıktan sonra postaneye tekrar geri dönmek zorundadır. ÇPP ilk olarak bir postacının posta dağıtımı üzerinde incelendiği için problemin ismi Çinli Postacı Problemi olarak kalmıştır (Corberán *et al.* 2021).

ÇPP'nin asıl amacı şebekedeki bütün yollardan en az bir kere geçip başlangıç noktasına

geri dönerek en kısa mesafenin bulunmasıdır. Büyük boyuttaki şebekelerin birçoğunda düğüm derecelerinden bazıları tek sayı olabilmektedir. Bu yüzden bu şebekelerin çözümü için yol tekrarının yapılması yani geçilen bir yoldan tekrar geçilmesi gerekmektedir. Yollardan geçiş maliyeti her geçiş için aynı olabileceği gibi farklı maliyetlerde de olabilmektedir.

Şebekede bulunan bir yoldan birkaç kez geçilmek zorunda kalındığında geçiş maliyetleri sabit olmayıp her geçiş için farklılık gösteren bu problemlerin çözümü için yeni bir ÇPP türü ortaya çıkmıştır. Bu ÇPP türü Değişken Maliyetli Çinli Postacı Problemi (DMÇPP)'dir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde DMÇPP ile ilgili şimdiye kadar sadece bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada problem direkt olarak DMÇPP olarak değil de Rüzgarlı Çinli Postacı Problemi olarak ele alınmıştır. DMÇPP'de şebekedeki ayrıtların yönlerine bakılmaksızın aynı ayrıttan geçiş sayısına göre maliyetler değişkenlik göstermektedir. Bu maliyetler ilk geçişten başlayarak her geçiş için azalarak oluşmaktadır.

Bu çalışmada DMÇPP'nin matematiksel modeli geliştirilip GAMS Studio 34 programında kodlaması yapılmıştır. Mevcutta bulunan test problemlerinden 500 düğüme kadar olan birkaç problem programda çözülmüştür. Bu problemlerin çözüm sonuçları kontrol edildiğinde modelin sıkıntısız olarak çalıştığı görülmüştür. Daha sonra Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü'nde örnek bir uygulaması yapılmıştır. Uygulamanın en az maliyetli en iyi çözümü bulunmuştur.

Bu tez çalışması birbiriyle bağlantılı olarak dört ana bölümden oluşmaktadır.

İlk bölüm Kuramsal Temellerden oluşmaktadır. Bu bölümde okuyucuyu bilgilendirmek amacıyla ÇPP'nin ortaya çıkışı, mevcuttaki ÇPP çeşitleri ve ÇPP'nin yeni bir çeşiti olan DMÇPP'den bahsedilmiştir, ÇPP ve çeşitleri ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar, çalışma özetleri olarak ele alınıp incelenmiştir.

İkinci ana bölüm olan Materyal ve Metod bölümünde uygulamanın yapıldığı işletme hakkında genel bilgi verilmiştir. Daha sonra problemin tanımlanması yapıp ÇPP ve DMÇPP matematiksel modeli ele alınmıştır.

Üçüncü bölüm olan Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde 4 düğümlü basit bir şebeke probleminden başlayarak 500 düğümlüye kadar olan birkaç test problemi GAMS Studio 34 programında kodlanarak en iyilik sonuçları elde edilmiştir ve literatürde ÇPP örneği olarak karşımıza çıkan bir problem DMÇPP olarak ele alınmıştır. Daha sonra 75 düğümden oluşan Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü'nde yapılan uygulama ele alınmıştır.

Son olarak Sonuçlar ve Öneriler bölümünde ise bu tez çalışmasından çıkarılan sonuçlar

özetlenmiştir, uygulamanın sonucu değerlendirilmiştir ve okuyuculara gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.



KURAMSAL TEMELLER

Rotalama Problemleri

Rotalama Problemleri 2 ana başlığa ayrılır. Bunlar, müşterilerin bir şebekedeki düğümler tarafından temsil edilebildiği Düzüm Rotalama Problemleri ve verilecek hizmetin bir şebekedeki ayrıtlar üzerinde gerçekleştirildiği Ayrıtl Rotalama Problemleri'dir.

Rotalama Problemleri üzerine yapılan çalışmaların büyük bölümünde Düzüm Rotalama Problemleri ele alınmış olsa da Ayrıtl Rotalama Problemleri üzerine yapılan çalışmalarda her geçen gün artmakta ve bu problemler için tasarlanan algoritma sayısı ve verimliliği de son yıllarda önemli derecede artış göstermektedir. Ayrıca teknolojik yenilikler ve ulaştırma lojistiği içindeki değişiklikler yeni problemlerin tanımlanmasını ve mevcuttaki problemlere yeni yaklaşımların dahil edilmesini gerektirmektedir (Corberán *et al.* 2021).

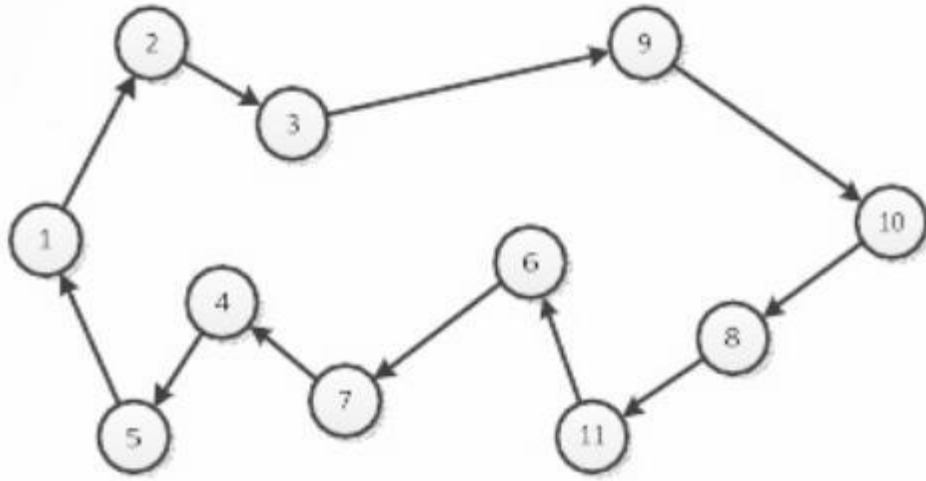
Düzüm Rotalama Problemleri

Rotalama problemlerinden biri olan Düzüm Rotalama Problemleri'nde bir şebekenin düğümleri ele alınarak rotalama yapılır. Bu rotalama problemlerindeki asıl amaç şebekede bulunan her düğüme bir kere uğrayarak maliyeti en az olan en kısa tur veya turları bulmaktır. Düzüm Rotalama Problemleri'ne Gezgin Satıcı Problemi (GSP)'ve Araç Rotalama Problemleri örnek olarak verilebilir.

Gezgin Satıcı Problemi (GSP)

GSP, bir seyyar satıcının elinde olan ürünleri n tane şehre en az maliyetli olan yolları kullanarak dağıtım yapmasıdır. Seyyar satıcı her şehre bir kere uğramalıdır ve başladığı yere geri dönmelidir. Seyyar satıcı başlangıçta n tane şehir arasında seçim yapmaktadır. Daha sonra uğradığı şehirden $(n-1)$ tane seçim yapmaktadır. Bu şekilde her uğradığı şehirden sonra gitmeye karar verdiği şehir sayısı bir azalmaktadır (Gönüloğlu, 2009).

Aşağıda GSP ile ilgili bir şebeke örneği verilmiştir.



Şekil 1. Gezgin satıcı problemi şebeke örneği

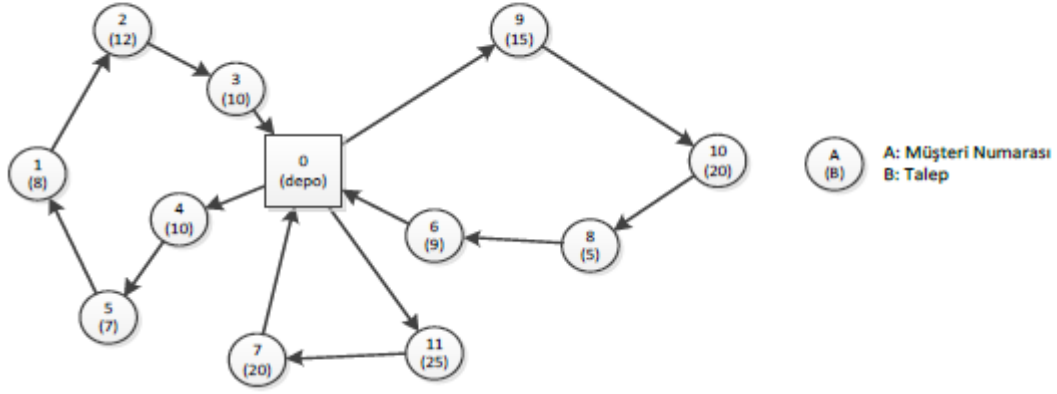
Araç Rotalama Problemi (ARÇP)

ARÇP, GSP'nin daha kapsamlı halidir. ARÇP'de aynı tip birden fazla araç kullanılır ve her aracın kapasitesi sınırlıdır. Buna ek olarak bazı kısıtlamalarda problemin modeline eklenebilir (Söyler & Fendoğlu, 2018).

ARÇP'de ürünlerin dağıtımı belirli bir zaman diliminde bir ya da daha fazla depoda bulunan bir araç dizisi tarafından müşterilere hizmet vermekle ilgilidir. Araçlar bir dizi sürücü tarafından çalıştırılır ve uygun bir yol güzergahı kullanarak rotalarını gerçekleştirirler. ARÇP'nin çözümü araç bir depodan çıkış yaparak tüm operasyonel kısıtlamalar altında müşterilerin tüm gereksinimlerini karşılayarak tekrardan başlangıç deposuna geri dönecek şekilde en az maliyetli rotanın bulunması düşüncesine dayanır. Ürünlerin taşınmasında kullanılan şebeke gösteriminde genellikle ayrıtlar yol bölümlerini şebekenin düğümleri ise depo ve müşteri konumlarını temsil eder. ARÇP'ler için çoğu zaman birbiriyle çelişen birçok hedef düşünülebilir. Bunların en yaygın olanları aşağıdaki gibi gösterilebilir (Toth & Vigo, 2002).

- Kat edilen toplam mesafeye veya toplam seyahat süresine ve kullanılmış araçlarla (ve araç sürücüleriyle) ilişkili sabit maliyetlere bağlı olarak toplam maliyetin en aza indirilmesi
- Tüm müşterilere hizmet vermek için gerekli araç ya da sürücü sayısının en aza indirilmesi
- Seyahat süresi ve araç yükü için rotaların dengelenmesi
- Müşterilerin hizmetlerinin tamamının karşılanmadığı durumlarda kısmi hizmet verilmesiyle ilgili cezaların en aza indirilmesi

Aşağıda ARÇP ile ilgili bir şebeke örneği verilmiştir.



Şekil 2. Araç rotalama problemi şebeke örneği

Ayrıt Rotalama Problemleri (ARP)

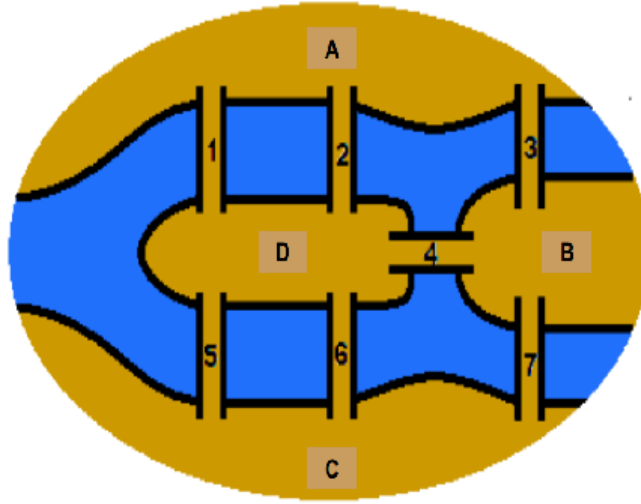
ARP, bazı kısıtlamalara tabi olarak bir şebekenin bazı ayrıtlarının en düşük maliyetli geçişini belirlemekten oluşur. Bu tür problemlerle yol veya sokak bakımı, çöp toplama, posta teslimi, okul otobüsü rotası, sayaç okuma vb. gibi çeşitli pratik durumlarda karşılaşılmaktadır. Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki ve optimizasyon tekniklerindeki artan yenilikler, karmaşık ayrıt rotalama yazılımlarının yayılmasına ve benimsenmesine katkıda bulunmuştur. Günümüzde ticari paketler, zengin veri tabanlarını, coğrafi bilgi sistemlerini yoğun olarak kullanmaktadırlar. Çoğunlukla danışmanlık firmaları tarafından gelişen bir ayrıt rotalama endüstrisi olduğu söylenebilir (Dror, 2012).

ARP, yönlendirilmiş ya da yönsüz ayrıtlardan geçerek belirli kısıtlamalar doğrultusunda en az maliyetli turun bulunması problemidir. Problemin ortaya çıkışı 1735 yılında Leonhard Euler tarafından çözölen Königsberg Köprü problemine dayanmaktadır (Berbeglia *et al.* 2007).

Königsberg Köprü Problemi ve Euler Turu

Ayrıt Rotalama Problemleri'nin kökeni İsviçreli bir matematikçi olan Leonhard Euler'in Königsberg Köprüleri problemini incelediği 18. yüzyıla kadar uzanmaktadır. Bu problem Kneiphof Adası'nı ve farklı arazi alanlarını birbirine bağlayan Königsberg'den (şu an Rusya'da Kaliningrad olarak bilinen yer) geçerken Pregel Nehri'nin kolları üzerindeki yedi köprünün düzenine dayanmaktadır (Corberán *et al.* 2021).

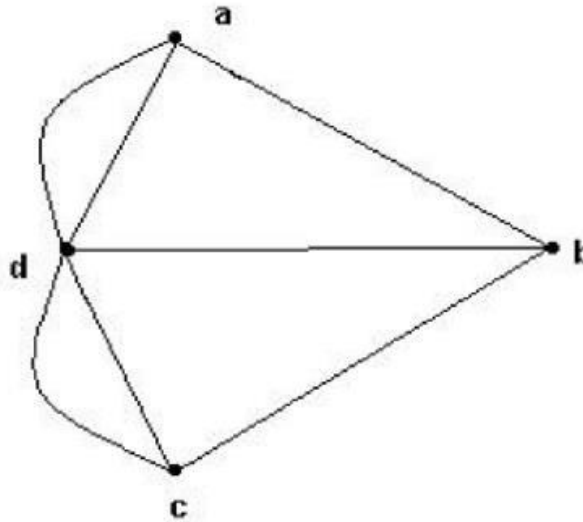
Aşağıdaki Şekil 3'te Königsberg'in yedi köprüsü gösterilmektedir (Emel *et al.* 2004).



Şekil 3. Königsberg'in yedi köprüsü

Problem, herhangi bir köprüyü birden fazla geçmeden yedi köprünün her birinden geçen kapalı bir yürüyüşün mümkün olup olmamasıyla ilgilidir. Euler, bu problemin temsili olarak bir şebekesini geliştirmiştir ve böyle bir yürüyüşün mümkün olmayacağını bulmuştur (Corberán *et al.* 2021).

Aşağıdaki Şekil 4'te Königsberg'in yedi köprüsünün şebeke gösterimi verilmiştir (Emel *et al.* 2004).



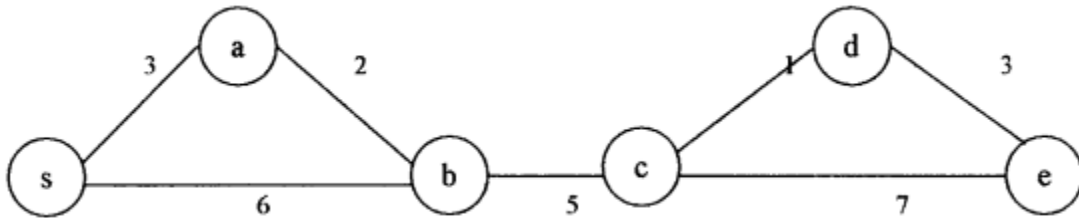
Şekil 4. Königsberg'in yedi köprüsünün şebeke gösterimi

Euler, yönüne bakılmaksızın yönsüz bir şebekede kapalı bir yürüyüş için şebekenin tüm düğümlerinin eşit derecede olması gerektiği sonucunu bulmuştur. Bu şekilde oluşan tura Euler Turu denilmiştir. Bir şebekedeki bir düğümün derecesi o düğüme bağlı olan ayrıtların sayısı ile hesaplanmaktadır (Corberán *et al.* 2021).

```

graph LR
    s((s)) ---|3| a((a))
    a ---|2| b((b))
    b ---|1| c((c))
    c ---|3| d((d))
    s ---|6| b
    b ---|7| d
  
```

Aşağıdaki Şekil 6.'da Yarı-Euler Turu için bir şebeke gösterimi verilmiştir.



8

Çinli Postacı Problemi

ÇPP'yi ilk olarak Çinli bir Matematikçi olan Meigu Guan (Mei-Ko Kwan) ortaya koymuştur. 1960 yılındaki bu çalışmasında bir şebekenin her ayrıttan en az bir kere geçen bir postacı yürüyüşünün uzunluğunu en aza indirme problemini ele almıştır. Postacının postaneden aldığı mektupları kendisine görev olarak verilen bir dizi sokak bölümünün hepsini ziyaret ederek tekrardan postaneye geri gelmek şartı ile en kısa yürüme mesafesini bulmayı amaçlamıştır (Corberán *et al.* 2021).

Guan'ın yöntemi, şebekenin her zaman çift sayıda tek dereceli düğüm içerdiği ve tek dereceli düğümleri birbirine bağlamak için en kısa zincirlerin eklenmesi gerektiği ve böylece şebekenin Euler turu olduğu gözleminden hareket etmektedir.

Edmonds and Johnson (1973) yılındaki çalışmalarında ÇPP'yi optimum olarak çözen bir polinom algoritması bulmuşlardır. Bu algoritma ilk önce tüm tek dereceli düğüm çiftleri arasındaki en düşük maliyetli zincirleri hesaplayarak (her zaman çift sayıda vardır) daha sonra tek dereceli düğümler kümesi üzerinde bir minimum maliyet eşleştirme problemini çözerek ve bu maliyetleri kullanarak problemin verimli bir şekilde çözülebileceğini göstermektedir. Bu algoritma Edmonds'un daha önceki bir algoritmasına minimum eşleştirme uyguladığı algoritmadır. Ayrıca bu çalışma her bir yoldan geçen minimum mesafeli bir kapalı tur elde etmek için hangi ayrıtların ekleneceğine karar vermede taşıma algoritmasını kullanarak en iyi çözümün bulunabileceğini de göstermektedir.

Orloff (1974) ve Beltrami and Bodin (1974)'de yaptıkları çalışmalarda Edmonds and Johnson (1973)'un çalışmasından esinlenerek taşıma algoritmasını önermişlerdir.

Minieka (1978) yılındaki çalışmasında en iyi postacı problem turunu bulurken hangi düğümden başlanırsa başlansın toplam tur uzunluğunun aynı olacağını göstermiştir.

ÇPP, optimizasyon problemlerinden biri olması yönüyle GSP ile benzerlik göstermektedir. Fakat GSP'den önemli bir farkı vardır. GSP bir şebekedeki düğümleri ele almaktadır. Şebekede bulunan her bir düğüme sadece bir kez uğramak şartıyla en kısa mesafeli turun (Hamilton turu) bulunması şartına dayanan bir düğüm rotalama problemidir. ÇPP'de ise bir şebekede bulunan ayrıtların her birinden en az bir kez geçilmesi gerekmektedir. ÇPP'yi GSP'den ayıran özellik optimum çözümü bulmak için şebekenin düğümlerini değil de ayrıtlarını dikkate almasıdır (Eiselt *et al.* 1995). Uygulama tüm servislerin düğümlerde yer alacağı şekilde ise bu Düğüm Rotalama Problemi kategorisine girmektedir. Aksi durumda hizmet bağlantılarda bulunuyorsa bu Ayrıtlar Rotalama Problemi olarak ele alınır (Corberán *et al.* 2021).

ÇPP’de her ayrıttan bir kez geçilmesine rağmen yine de Euler turu oluşmamışsa geçilen yolların bazılarında birkaç kez geçilmesi gerekir.

ÇPP ile ilgili günlük hayatta DNA analizinden robotları yönlendirmeye kadar birçok uygulama vardır (Thimbleby, 2003). Bu uygulamaların en yaygınları sokak temizleme, kışın buzlanmayı önlemek için yollara tuz serpme, kar temizleme, yol işaretleme, sokak haritalama çalışmaları, yol bakımı ve çizici, yazıcı ve kesme makinelerinin rotdalanması işlemidir. Aşağıda bu uygulamalar daha detaylı olarak ele alınmıştır.

ÇPP Uygulama Alanları

ÇPP uygulamalarının tamamı, uygulamayı modellemek için kullanılan şebekede ayrıt veya yol boyunca bir hizmetin uygulandığı uygulamalardır (Corberán *et al.* 2021).

Sokak temizliği

Sokak temizleme işlemleri yol kenarındaki bordürlerin süpürülmesi ve çöp, atık vb. şeylerden temizlenmesi gereken yol süpürme işlemlerini içermektedir. Bu işlem genellikle bir tarafında dönen bir fırçası bulunan yol kenarında hareket edebilen ve yerdeki çöp, atık vb. şeyleri araçtaki bir bölüme süpürerek depolayan ve daha sonra bir atık sahasına boşaltabilen özel bir araç tarafından gerçekleştirilir.

Eğer aracın sadece bir tarafında fırça varsa modelleme, her yol kesiminin her hareket yönünde bir kez geçen aracın rotdalanmasıyla yapılmalıdır.

Eglese and Murdock (1991) yılındaki çalışmalarında modellemenin bu özelliğine dayanan bir formülasyon kullanarak kırsal bir alanda yol süpürme işlemi için bir buluşsal yöntem tanımlamışlardır.

Sokak temizliği işlemlerinde bazen daha karmaşık bir yöntem gerektiren farklı uygulamalarında modellenmesine ihtiyaç duyulabilir. Örnek olarak süpürülecek yolları kapatmak için sınırlı kapasiteye sahip birden fazla araca ihtiyaç duyulabilir. Böylece her aracın atıkları boşaltmak için atık sahasına gitmeden önce kullandığı yolun mesafesi sınırlandırılır (Corberán *et al.* 2021).

Bazı kentsel yerlerde zaman aralığı kısıtlaması olabilir. Bodin and Kursh (1978) yılındaki çalışmalarında New York’taki bazı caddelerin süpürülmesi işleminde o caddelerde park halinde olan araçlar caddeyi süpürecek olan süpürme aracını engellemektedir. Bu çalışmada park halindeki araçların süpürme aracını engellemesini önleyen park kısıtlamaları olduğunda süpürme aracının caddeleri süpürebildiği bir sokak süpürme uygulaması yapılmıştır.

Tuz serpmeye

Bu işlem, kışın yollardaki trafik için tehlikeli olan buz oluşumunu engellemede buz çözücü olarak bilinen tuzların yolların yüzeyine yayılması işlemidir. Bu işlemde merkezi bir bariyer olmadığı sürece kullanılan çoğu araç yolun her iki tarafına da tuz püskürtebilir. Burada amaç tuzlama yapan araçların rotalarını, toplam mesafeyi mümkün olduğunca en aza indirerek verimli bir şekilde planlamaktır (Corberán *et al.* 2021).

Yollara zamanında işlem yapılması gerekmektedir. Eğer sıcaklık azalmadan yollara çok erken tuzlama yapılırsa tuz havaya uçabilir. Yollara tuzlama işlemi çok geç yapılırsa henüz tuzlama yapılmamış yol bölümlerinde bulunan buzdan dolayı araçların kayması sonucu kazalar olabilir. Bu zaman kısıtları ARP modeline eklenmesi gereken önemli ek kısıtlardır. Tuzlama işlemi yaparken her yolun önem derecesi farklılık göstermektedir. Yüksek önem derecesine sahip yollara daha önce tuzlama işlemi yapılması gerekir (Letchford & Eglese, 1998).

Genelde tuzlama aracını kullanan operatörün hizmet vermesi gereken yollar için tuzlama rotaları önceden belirlenmiştir. Bununla beraber çevrimiçi sensörlerle birleştirilmiş termal haritalama belirlenmiş yolların o an ki hava durumu şartlarına bağlı olarak işlendiği durumlarda daha esnek bir dinamik yaklaşım fırsatı sunar (Handa *et al.* 2005).

Verilecek olan hizmetin zamanlamasına hava durumu şartları etki gösterebilir. Bu yüzden hizmet gecikebilmektedir ya da daha erken yapılabilir. Burada ilgili cezalarla birlikte hizmet maliyetinin zamana bağlı olduğu durumlar diğer bir varyasyon olarak ele alınabilir (Tagmouti *et al.* 2011).

Kar temizleme

Kışın yol bakımı ile ilgili olarak yapılan bir diğer işlem kar temizleme (kar küreme) işlemidir. Bazı durumlarda tuz serpmeye işlemi ile birleştirilse de bu iki işlem arasında önemli bir fark vardır. Kar küreme işleminde yolun sadece bir şeritine işlem yapılırken tuz serpmeye işlemi yolun tüm genişliğine tek seferde uygulanır. Bu yüzden kar temizleme işlemlerinde şebekeler yönlendirilmiş ayırtlardan oluşur ve bazen bir yol ilgili şerit sayısına bağlı olarak birkaç ayırıt ile temsil edilebilir (Corberán *et al.* 2021).

Kar temizleme aracının bir yoldan ilk geçiş maliyeti, ikinci geçiş maliyetinden her zaman daha fazladır (Dussault *et al.* 2013).

Yol bakımı

Yol bakımı, yolun görsel olarak durumunu kontrol etmek ve yolda herhangi bir hasarın olup olmadığını belirlemek için bir araç filosunun bir dizi yol ziyareti yapması işlemidir. Kısaca

yolun durumunu inceleme hizmetidir. Bakım yapan araçlarının her biri için bir süre kısıtı mevcuttur. Süre kısıtlamasından dolayı her bir rotanın mesafesi sınırlı olduğu için Kapasiteli Araç Rotalama Problemi olarak bir model oluşturulabilir (Corberán *et al.* 2021).

Chen *et al.* (2014) yılındaki çalışmalarında Şanghay’da günlük yol bakımı için en iyiye yakın rotayı belirlemek amacıyla bir model geliştirmişlerdir. Her yol bölümünün stokastik servis ve seyahat süreleri dikkate alınmıştır. Geliştirilen model dal ve kes algoritmasıyla çözülmüştür. Fakat bu algoritma küçük boyutlu problemleri çözmektedir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için uyarlanabilir bir komşuluk arama algoritması kullanmışlardır. Bu algoritmanın testini de birkaç örnek üzerinde göstermişlerdir.

Lazer Kesim Makineleri

Lazer kesim, sac, metal, ahşap ürünleri üretmede en çok kullanılan kesme işlemi yöntemidir. Kesme işlemlerinde oluşan kesme yolu problemleri de ÇPP’nin bir uygulama alanıdır.

Kesme yolu problemi sac, metal, ahşap vb. ürünlerden parçayı çıkarmak için kullanılan zamanın en hızlı şekilde en kısa olmasını amaçlayan problemidir (Dewil *et al.* 2016).

Kesme işlemi yapılırken kesme ucunun izleyeceği yol maliyet ve zaman açısından önem teşkil etmektedir. Kesme problemlerinin çoğu Kırsal Postacı Problemi’ne uyarlanarak kolayca çözülebilsede çözümleri çok zor olan problem çeşitleri de vardır.

Bunların arasında en genel kesme yolu problemi olan aralıklı kesme yolu probleminin çözümü oldukça zordur. Aralıklı kesme problemi, nesnenin parçalara ayrılabilmesi ve kesme ucunun giriş ya da çıkış noktası için herhangi bir kısıtlamanın olmadığı kesme yolu problemidir (Corberán *et al.* 2021).

ÇPP Çeşitleri

ÇPP’nin temel olarak üç çeşidi vardır. Bunlar Yönlü ÇPP, Yönsüz ÇPP ve yönlü ve yönsüz ayrıtların beraber bulunduğu Karma ÇPP’dir. Bu ayrımı yapmada başlıca ayrıtların yönleri dikkate alınmıştır. Bunlardan Yönsüz ÇPP ve Yönlü ÇPP, P sınıfına ait ÇPP türüdür, bu yüzden polinom zamanda algoritmalar ile çözülebilmektedir. Fakat Karma ÇPP NP-zor sınıfına ait olup polinom zamanda çözülememektedir (Florian, 1984).

Temel olarak üçe ayrılan bu ÇPP türlerine yeni kısıtlar eklenerek yeni ÇPP çeşitleri oluşmuştur. Bu ÇPP çeşitleri aşağıda verilmiştir (Ahr & Reinelt, 2002).

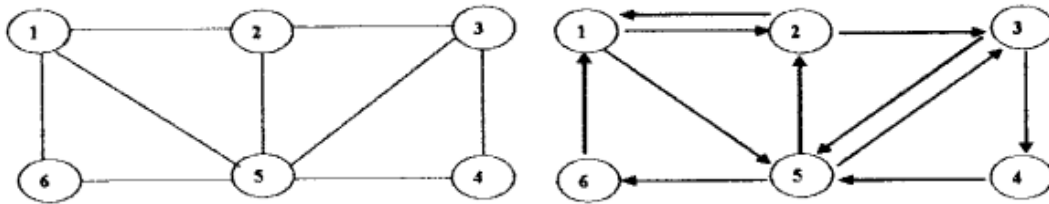
- Yönsüz ÇPP
- Yönlü ÇPP
- Karma ÇPP
- k-ÇPP
- Min-Max k-ÇPP
- Hiyerarşik ÇPP
- Kapasite Kısıtlı ÇPP
- Rüzgarlı ÇPP (Hızlı ÇPP)

Yönsüz ÇPP

Yönsüz ÇPP, bir şebekede bulunan ayrıtların yönüne bakılmadan her ayrıttan iki yönlü olarak en az bir kez geçiş izni olan ve başlanılan noktaya geri dönülme şartıyla en kısa mesafeli rotanın bulunmasını amaçlayan ÇPP türüdür. P sınıfına ait olan Yönsüz ÇPP problemini çözmek Yönlü ÇPP'ye göre daha karmaşıktır. Eğer şebeke Euler şebekesi ise yol tekrarı yapılmadan her yoldan en az bir kez geçerek (Euler turu bulunarak) problemin çözümü bulunur. Şebeke Euler şebekesi değilse optimum çözümü bulmak için yol tekrarı yapılması gerekir. Fakat burada yapılan yol tekrarının toplam mesafesi minimum yapılmaya çalışılır (Avriel & Golany, 1996) .

Yönsüz ÇPP problemini çözmek için kullanılan algoritma ve yöntemler şöyle sıralanabilir: Floyd algoritması, Dijkstra algoritması, En kısa mesafeli eşleştirme ve Euler turu (Emel *et al.* 2004).

Aşağıda Şekil 7'de bir Yönsüz ÇPP şebeke örneği verilmiştir (Florian, 1984).



Şekil 7. Yönsüz ÇPP şebeke örneği

Yönlü ÇPP

Yönlü ÇPP'de bir şebekedeki yönlendirilmiş ayrıtların her birinden en az bir kere geçerek başlangıç noktasına tekrar geri dönen en az maliyetli en kısa turun bulunması istenmektedir (Ahuja *et al.* 1993).

Bir şebekede Euler tur ile çözülebilmesi için bu şebekedeki düğümlerin iç derecesi, dış derecesine eşit olması gerekmektedir (Ford & Fulkerson, 1962).

Yönsüz ÇPP’de olduğu gibi tek dereceli düğümleri eşleştirmek yerine şebekeyi simetrik yapmak için taşıma algoritması kullanılır, yani her düğümün giriş ve çıkış dereceleri eşittir (Dror, 2012).

Karma ÇPP

Karma ÇPP, yönlü ÇPP ve yönsüz ÇPP’nin birleşiminden oluşur. Şebekede bulunan ayrıtların bazıları yön olarak serbest olup bazıları kısıtlandırılmıştır. Burada amaç yönlü ve yönsüz kısıtların her birinden en az bir kere geçerek başlangıç noktasına geri dönen en kısa ve en az maliyetli turu bulmaktır (Corberán *et al.* 2002).

Ford and Fulkerson (1962) yılındaki çalışmalarında karma bir şebekede tek yönlülük için gerekli yeterli koşulları ilk kez önermişlerdir. Bu koşullar şu şekildedir:

- Her düğüm noktası çift sayıda yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş ayrıta denk gelmelidir.
- Boş olmayan her V alt kümesi S için, S' ’den $V \setminus S$ ’ye yay sayısı ile $V \setminus S$ ’den S' ’ye yay sayısının mutlak değeri S ve $V \setminus S$ arasındaki ayrıt sayısından az veya buna eşit olmalıdır.

Bu şartları sağlamak veya büyütme problemini karma bir şebekede çözmek NP-zordur (Papadimitriou, 1976). Bu grafik düzlemsel olsa veya tüm C_{ij} katsayıları aynı değere sahip olsa bile problemi çözmek NP-zordur. Standart yaklaşım, büyütme problemini değişkenlerin, Euler turu yapmak için şebekeye dahil edilmesi gereken her yayın veya ayrıtın kopya sayısını temsil ettiği bir tamsayılı doğrusal program olarak formüle etmektir (Dror, 2012).

k-ÇPP

Normal ÇPP’den farklı olarak k tane (en az 2) postacı için en iyi rota bulunmaya çalışılır. Amaç k tane postacının rotasının toplam mesafesini minimum yapmaktır (Emel *et al.* 2004). k -ÇPP çoğu zaman NP-zor bir problemdir, fakat bazı çalışmalarda elde edilen algoritmalarla polinom zamanda da çözülebildiği gösterilmiştir.

Pearn (1994) yılındaki çalışmasında k -ÇPP problemini bir dizi k postacı rotası bulmak olarak tanımlamıştır. Böylece,

- Her postacının rotası merkez depo adı verilen bir başlangıç düğümünden başlar ve aynı düğümde biter.
- Şebekedeki her ayrıt tam olarak bir postacı tarafından ziyaret edilmelidir.
- Tüm k postacıları teslimat hizmetinde görev almalıdır.
- Kat edilen toplam mesafe en aza indirilmelidir.

Min-Max k-ÇPP

Bu ÇPP çeşiti k-ÇPP ile çok benzerdir. Burada toplam rota uzunluğu en küçükmek yerine en maliyetli olan rotalar en düşük yapılmaya çalışılır. Böylece hemen hemen birbirlerine yakın rotalar elde edilerek rotaların daha dengeli olması sağlanır. Bu ÇPP türü de NP-zor problem olup problemin çözümü için bazı sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir (Ahr & Reinelt, 2002).

Hiyerarşik ÇPP

ÇPP'nin özel bir çeşitidir. Bu problem türünde ayrıtlar öncelik sırasına göre sınıflandırılır. Hizmet verilmesi konusunda bazı yollar öncelikli olup bir hiyerarşik yapı söz konusudur. İlk olarak öncelik seviyesi yüksek olan ayrıtlara hizmet sağlanılıp daha sonra öncelik seviyesi az olan ayrıtlara hizmet verilir. Burada da amaç hiyerarşik yapıya uygun olarak tüm ayrıtlara hizmet sağladıktan sonra toplam rota uzunluğunu en aza indirmektir. (Dror *et al.* 1987)

Hiyerarşik ÇPP NP-zor problem türüdür. Fakat (Dror *et al.* 1987) yılındaki çalışmalarında polinom zamanda çözülebilen bir durum tanımlanmıştır. Bu çalışmalarında yolların bölünerek öncelik ilişkilerinin tanımlandığı bir şebekede en iyi turu bulmak için bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritma ile polinom zamanda çözülebileceğini göstermişlerdir. Fakat polinom zamanda çözülebilmesi için bazı özel şartlar vardır; bütün alt hiyerarşilerin birbirleriyle bağlantılı olması ve öncelik ilişkilerinin lineer olması gerekmektedir. Bu özel şartlar sağlanmazsa geliştirdikleri algoritma sonuç vermemektedir.

Hiyerarşik ÇPP'nin çözümü için bazı sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları (Lemieux & Gampagna, 1984), (Alfa & Liu, 1988) ve (Krishnamurthi & Damodaran, 1998) 'nin yapmış olduğu çalışmalardır.

Kapasite kısıtlı ÇPP

Kapasite Kısıtlı ÇPP, araçların ya da gezginin kapasiteleri dikkate alınarak oluşturulan ÇPP çeşitidir. ÇPP'de olduğu gibi şebekedeki her ayrıt en az bir kez ziyaret edilmelidir. Fakat ÇPP ile karşılaştırıldığında farklı olarak araçların/gezginin kapasitesinde bir sınırlama vardır. Tüm ayrıtlardan geçildiğinden ve her bir çevrim için kapasite kısıtının aşılmadığını kontrol etmek için birkaç çevrimin elde edilmesi gerekmektedir. Eğer aracın/gezginin kapasitesi şebekedeki toplam talepten büyük olursa kapasiteyi sınırlayacak bir kısıt olamaz. Bu yüzden problem Kapasite Kısıtlı ÇPP'den normal ÇPP haline dönüşür. Bu probleme örnek olarak kışın yol tuzlama işlemi verilebilir. Tuzlama işlemi, kapasitesi olan bir araç tarafından gerçekleştirilir (Eglese & Li, 1992).

Rüzgarlı ÇPP (hızlı ÇPP)

Yönsüz bir şebekede bulunan ayrıtların uzunluğu o ayrıttan geçiş yönüne göre değişmektedir (Eiselt *et al.* 1995).

Rüzgarlı ÇPP’de, rüzgarın yönüne ve rüzgara karşı olmak üzere her bir ayrıt ile iki maliyet ilişkilendirilir. Fakat her bir ayrıtı en az bir kez geçme şartı vardır. Yani bazı ayrıtlar için iki maliyet kullanıldığı gibi bazı ayrıtlar içinde tek geçiş maliyeti kullanılır (Dror, 2012).

Minieka (1979) yılındaki çalışmasında ilk kez Rüzgarlı ÇPP’yi tanıtmıştır.

Brucker (1980) yılındaki çalışmasında Rüzgarlı ÇPP’nin NP-zor problem olduğunu göstermiştir. Ancak şebeke Euler ise problem polinom zamanda da çözülebilir.

Çalışma Özetleri

Bu bölümde ÇPP ve ÇPP çeşitleri ile ilgili literatürde yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Pearn and Liu (1995) yılındaki çalışmalarında Karma Ağlardaki Çinli Postacı Problemi (KAÇPP)’nin gerçek dünyada birçok uygulamaya sahip olan ÇPP’nin pratik bir genellemesi olduğu tanımlanmıştır. KAÇPP’nin polinom zamanda çözülemeyen NP-zor problem olduğu gösterilmiştir. Problemi yaklaşık olarak çözmek için sezgisel çözüm yöntemleri önerilmiştir. KAÇPP’yi en iyilik sonucuna yakın bir şekilde çözmek için iki yeni algoritma tanıtılmıştır. Bu algoritmalar mevcuttaki çözüm prosedürleriyle karşılaştırılmıştır ve iki yeni algoritmanın mevcut çözüm yöntemlerinden önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiği kanıtlanmıştır.

Ghiani and Improta (2000) yılındaki çalışmalarında HÇPP’i ele almışlardır. HÇPP yayların kümelerine ayrıldığı ve kümelerin kendi içerisinde öncelik ilişkisi olduğu bir ÇPP türüdür. HÇPP genel olarak NP-zor bir problemdir. Fakat kümelerin kendi içerisindeki öncelik ilişkisi doğrusal ise ve her küme bağlı ise polinom zamanda çözülebilmektedir. Bu çalışmada önceki çalışmalardan daha az hesaplama gerektiren bir algoritma geliştirilmiştir.

Wang and Wen (2002) yılındaki bu çalışmalarında ÇPP’nin ana mantığı olan tüm sokakları dolaşmanın gerekliliği dışında postacı sayısı, postacının kapasitesi, cadde yönü vb. durumlarda dikkate alınmıştır. Problemin gerçek durumları simüle edebilmesi için ÇPP zaman penceresi kısıtlaması ile araştırılmıştır. Zaman kısıtlamaları kesin olmadığında bulanık zaman pencereli ÇPP’i çözmek için bulanık küme teorisi kavramı kullanılmıştır.

Yin *et al.* (2002) yılındaki bu çalışmada hesaplamanın problem boyutuyla birlikte katlanarak büyüyebildiği bir sınıf zorlu hesaplama problemlerini çözmek için yeni bir yöntem olan DNA hesaplaması geliştirilmiştir. Moleküler biyoloji teknikleri kullanılarak bir ÇPP çözülmüştür. DNA moleküllerinde küçük bir grafik kodlanmıştır ve hesaplama işlemleri

standart protokoller ve enzimlerle yapılmıştır.

Cabral *et al.* (2004) yılındaki çalışmada HÇPP, KÇPP'ye dönüştürülerek çözülmüştür. Çözüm için dal ve kes algoritması kullanılmıştır.

Tan *et al.* (2005) yılındaki çalışmalarında stokastik ağlardaki ÇPP incelenmiştir. ÇPP'nin genel tanımına uygun olarak bir düğümden diğer düğüme geçiş süresini belirtmek için yayların ağırlıkları yerine kenarların uzunlukları kullanılmıştır. Kenarlar tıkanık durumda olduğunda bir Euler turunun uzunluğunun çok büyük olacağı fark edilmiştir. Bu yüzden mevcut durumda yenisinin tur uzunluğunun daha kısa olması için sıkışık durumda olan kenarlardan hareket etmekten kaçınma şartı altında eskisinin yerine yeni bir çözümün ikame edilmesi olarak tanımlanan bir ikame çözümü sunulmuştur.

Korteweg and Volgenant (2006) yılındaki çalışmalarında HÇPP doğrusal sıralı sınıflarla çözen mevcut bir algoritmayı geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritma Dror *et al.* (1987) yılında yapmış oldukları çalışmadaki katman algoritmasıdır. Bu algoritmayı geliştirmek istemelerindeki amaç orijinal algoritmanın karmaşıklığıdır. Dror *et al.* (1987) önerilen öncelik kuralı çok katıdır. Bu durum toplam maliyeti azaltsa bile daha yüksek bir sınıftaki kenarların geçişine ya da servisine izin vermemektedir. Bu amaç doğrultusunda yayların servis veya geçişleri için farklı sıra ilişkileri atayabileceğimiz farklı işlemler olarak ele almışlardır ve yeni bir alternatif önermişlerdir. Burada bazı kenarlar için öncelik tanıyan HÇPP problemini 3 öncelik sınıfına ayırarak her sınıf için en iyi gezme mesafesini bulduktan sonra aynı şebeke problemini öncelik olmadan çözüp sonuçları karşılaştırmışlardır.

Fernandes *et al.* (2009) yılındaki bu çalışmada karışık grafikler, (yönsüz) kenarların yanı sıra (yönlendirilmiş) yaylar içerebilecekleri anlamında digraf ve grafik kavramı genelleştirilmiştir. Sınırlı ağaç genişliğine sahip karışık grafikler üzerinde ÇPP için bir polinom zaman algoritması sunulmuştur. Bu çalışmada benzer bir yapıya sahip olan ve daha karmaşık bir yaklaşım gerektiren sınırlı ağaç genişliği grafiklerindeki diğer problemler için algoritmaların tasarımı yardımcı olabilecek bir yaklaşım tanımlanmıştır.

Palma (2011) yılındaki bu çalışmasında Ödül Toplama Kırsal Postacı Problemi (ÖTKPP)'ni çözmek için Tabu Algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma sezgisel çözüm yöntemlerinden biridir. ÖTKPP'nin amacı geçilen kenarlardan maksimum kar döngüsünü bulmaktır. Corberán *et al.* (2013) Corberán *et al.* (2013) Corberán *et al.* (2013) Corberán *et al.* (2013) Corberán *et al.* (2013) Corberán *et al.* (2013) Corberán *et al.* (2013) Corberán *et al.* (2013)

Corberán *et al.* (2013) yılındaki bu çalışmada Maksimum Faydalı Çinli Postacı Problemi (MFÇPP) ele alınmıştır. MFÇPP NP-zor problemidir. Burada amaç maksimum fayda sağlayan kapalı bir yürüyüş bulmaktır. Yönsüz MFÇPP için formülasyon önerilmiştir. Ayrıca 1.000'e kadar tepe noktası ve 3.000 kenara sahip örnekler üzerinde hesaplama sonuçları sunan dal ve kes algoritması önerilmiştir. Uygulama kısmı bir şehrin sokaklarını ele alarak kar temizleme işlemi üzerinde yapılmıştır.

Dussault *et al.* (2013) yılındaki çalışmada kışın bir kar küreme aracının izlemesi gereken mesefeyi en az maliyete indirme amacıyla Rüzgarlı ÇPP ele alınmıştır. Kar küreme çalışmalarında bir yoldan tek seferde geçerek kar temizleme işleminin tamamlanacağı gibi yolda bulunan kar yoğunluğu nedeniyle bir yoldan birkaç kez geçilmesi gerekebilmektedir. Yoldaki karı yokuş yukarı sürmek her zaman daha maliyetlidir ve bundan kaçınılmak gerekmektedir. Bu problem çeşiti için bir başlangıç çözümü oluşturan, yerel bir arama ve yeniden başlatma prosedürü kullanarak onu tekrarlamalı olarak geliştiren bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritmanın ismi CPLS algoritması olarak adlandırılmıştır.

Shafahi and Haghani (2015) yılındaki çalışmalarında ÇPP'nin Maksimum Faydalı Çinli Postacı Problemi (MFÇPP) ve ÇPP'nin çoklu araç varyantı üzerinde bir genelleştirme yapılarak Maksimum Fayda K-Çinli Postacı Problemi elde edilmiştir. Bu problemin matematiksel modeli geliştirilip modelin farklı durumları tartışılmıştır.

Suil and West (2015) yılındaki bu çalışmada çoklu grafikteki ÇPP, tüm kenarları geçen en kısa kapalı yol bulma problemi olarak adlandırılmıştır. 1994 yılında çözüm için keskin bir üst sınır oluşturulmuştur. Bu çalışmada 3-düzenli grafikler ve 3-düzenli çoklu grafikler için sınırlarının basit kanıtları verilmiştir ve bu durumlarda eşitliğin ne zaman geçerli olduğu belirtilmiştir.

Summerfield *et al.* (2015) yılındaki bu çalışmada yoğun bir şehirde verilen park cezası idari uygulamasını bir gelir toplama faaliyeti olarak görmüşlerdir. Park izni denetim rotalarını tasarlama görevi modellenmiştir. Denetim rotaları tasarımlarının bekleyen geliri en üst düzeye çıkardığı gösterildikten sonra memurların park izinlerinin zamanlarına göre rotalarını çevrim içi olarak ayarlamalarına izin veren karar kuralları araştırılmıştır. Bunun sonucunda bir memurun izin süresi dolana kadar arabaların yanında seçici olarak beklemesine izin verilmesinin, beklenen gelirleri %10-%69 arasında artırdığını göstermişlerdir.

Colombi *et al.* (2017) yılındaki çalışmada Hiyerarşik Karışık Kırsal Çinli Postacı Problemi (HKKÇPP) ele alınmıştır. HKKÇPP hizmet gerektiren yayların ve kenarların hiyerarşik bir sırayla yani öncelik sırasına göre ele alındığı bir ÇPP çeşitidir. Bu çalışmada

HKKÇPP çok yönlü olarak analiz edilmiştir ve problemin çözümü için dal ve kes algoritması önerilmiştir.

Gutin, Jones, Sheng, *et al.* (2017) yılındaki bu çalışmada ÇPP kenar renkli çoklu grafiklerde ele alınmıştır. Kenar renkli çoklu grafiklerde her kenara bir renk ataması yapılmıştır. Bu renk atamasına multigraf denilmiştir. Kenar renkli grafiklerin hala polinom zamanda çözülebildiği kanıtlanmıştır.

Gutin, Jones and Sheng (2017) yılındaki çalışmalarında Karışık Çinli Postacı Problemi için kenar ağırlıklı bir grafik verilmiştir. Bu çalışmadaki amaç her bir kenarı ve yayı en az bir kez geçen minimum maliyetli bir kapalı yol bulmaktır. Kenar sayısı ile parametrelendirilen Karışık Çinli Postacı Problemi'nin sabit bir argüman kullanılarak sabit parametrelili izlenebilir olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada yay sayısı ile parametrelendirilen Karışık Çinli Postacı Problemi'nin de sabit parametrelili izlenebilir olduğu kanıtlanmıştır.

Lum *et al.* (2017) yılındaki çalışmada Zikzak Zaman Pencere Rüzgarlı Kırsal Çinli Postacı Problemi tanımlanmıştır. Aracın cadde ya da sokaktan geçerken her iki tarafa da aynı anda hizmet verebileceği zikzak hizmeti belirtilmiştir. Zikzak Zaman Pencere Rüzgarlı Kırsal Çinli Postacı Problemi için matematiksel model geliştirilmiştir. Bu problem türü için standart ekleme ve yerel arama tekniklerini tamsayı programlama ile birleştirerek bir buluşsal yöntem geliştirilmiştir.

Nossack *et al.* (2017) yılındaki çalışmada günün belirli saatlerinde zikzak sokak problemlerine ek olarak rüzgarlı kırsal postacı sorununa odaklanılmıştır. Bir cadde darsa ve trafik yoğun değilse zikzak yaparak sokağın her iki tarafına da hizmet vermenin mümkün olduğunu fakat bir cadde genişse ve trafik yoğunsa caddeye iki tek geçişle hizmet vermenin daha az maliyetli olduğunu belirtmişlerdir. Bazı caddeler için trafiğin yoğun olmadığı günün belirli saatlerinde zikzak çizilebileceği kısıtlaması da uygulanmıştır. Bu özel ayırıt yönlendirme problemi, zikzak seçenekleriyle ayırıt yönlendirme problemleri ve zamana bağlı ayırıt yönlendirme problemleri olan iki sınıf probleminin birleştirilmesiyle oluşmuştur. Eldeki problem için iki tamsayı programlama formülasyonu sunulup tartışılmıştır ve kesin çözüm yaklaşımları önerilmiştir. Ayrıca zikzak ve zaman penceresi seçeneklerinin amaç fonksiyonu üzerindeki etkileri analiz edilmiştir ve elde edilen çözüm yaklaşımları gerçek dünya örneklerinde test edilmiştir.

Corberán *et al.* (2018) yılında yaptıkları çalışmada ulaşım kirliliğini en aza indirme bakış açısından esinlenmişlerdir. Bu çalışmada normal ÇPP'den farklı olarak bir yoldan geçme maliyeti sadece yolun uzunluğuna değil ayrıca yoldan geçen aracın ağırlığını da bağlıdır. Çünkü ulaşım kirliliğine sebep olan bir aracın yaydığı kirlilik oranı aracın sadece seyahat uzunluğuna

bağlı değildir, diğer faktörler haricinde aracın yüküne de bağlıdır. Bu çalışmada problem tanımlanıp hesaplama karmaşıklığı incelenmiştir. İki matematiksel programlama formülasyonu sağlanmıştır ve çözüm için iki meta-sezgisel önerilmiştir.

Wang *et al.* (2018) yılındaki bu çalışmada 3B ağ işlemlerine dayalı bir kontur deformasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Birkaç 2B düzlem deforme olmuş 3B ağı keserek 2B kontur noktalar kümesi halinde yeniden düzenlenmek üzere sırasız noktalar ve çizgi parçaları oluşturmaktadır. Elde edilen yeniden düzenleme problemi sırasız noktalardan oluşturulmuş bir grafiği en düşük maliyetle geçme özelliğinden dolayı ÇPP çözmekle aynı olduğu belirtilmiştir. Göğüs kanseri olan 10 hastadan alınan akciğer ve kalp konturlarını kullanarak ağ tabanlı kontur deformasyon yaklaşımı doğrulanmıştır.

Yang *et al.* (2018) yılındaki bu çalışmada ÇPP çözmek için yeni bir hesaplama modeli olan bir prob makinesi modeli geliştirilmiştir. ÇPP bağlı bir G problemine karşılık gelmektedir. Köşe yapısına göre veri hücresi ve bağlantı probu oluşturulmuştur ve bu hesaplama platformuna konulmuştur. Hesaplamadan sonra problemin çözümü dedektör yardımıyla tespit edilmiştir.

Yılmaz (2018) yılındaki çalışmasında Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü' nün görev alanındaki yolların bakım çalışmasında kullanılan araçların, güzergahlarını belirlemek için Hiyerarşik Çinli Postacı Problemi yöntemini ele almıştır. Çalışmada yollar öncelik sırasına göre 2 alt şebekeye bölünmüştür. Trafığın yoğun olduğu devlet yolları, il yolları ve bazı ilçe yolları birinci öncelikli kalan yollar ise ikinci öncelikli olarak belirlenmiştir. Hiyerarşik ÇPP olarak çözülen bu problemde aracın turu tamamlaması için yaptığı yol tekrarı en aza indirilmiştir.

Keskin and Yılmaz (2019) yılındaki çalışmalarında değişken hizmet maliyetlerine sahip postacı problemi için bir matematiksel formülasyon sunmuşlardır. Ayrıtların geçiş maliyeti geçiş sayısına bağlı olduğu ve her geçiş için azaldığı varsayılmaktadır. Maliyetler simetrik ise değişken hizmet maliyetlerine sahip ÇPP olarak simetrik değilse değişken hizmet maliyetlerine sahip Rüzgarlı ÇPP olarak adlandırılmıştır. Değişken hizmet maliyetlerine sahip ÇPP polinom zamanda çözülebilir olduğu ve hiç yol tekrarı yapılmadan en iyi sonucun bulunduğu gösterilmiştir. Değişken hizmet maliyetlerine sahip Rüzgarlı ÇPP polinom zamanda çözülemeyen NP-zor problemdir. Bu problemin çözümü için Geçiş Yineleme Sezgiseli ve Lagrange Sezgiseli olarak 2 yöntem önerilmiştir. Büyük boyutlu örnekler için Lagrange Sezgiseli'nin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Majumder *et al.* (2019) yılında yapılan bu makale her verinin belli olduğu normal ÇPP değil de belirsizlik teorisi çerçevesinde çok amaçlı bir ÇPP problemini ele almaktadır. Bu çalışma yapılana kadar henüz belirsizlik teorisi çerçevesinde çok amaçlı bir ÇPP problemi ele alınmamıştır. Problemin amacı bir postacının toplam seyahat süresini en aza indirerek toplam

karı en üst seviyeye çıkarmaktır.

Bhuranda and Rizwanullah (2021) yılındaki çalışmalarında ÇPP' nin ek bir özelliği ile ilgili olarak stokastik ağların teorik ve matematiksel temellerini ele almışlardır. Bu ek özellik bir postacının ağı mümkün olan en kısa sürede birinci öncelikli düğümle ziyaret etmesidir. Bu çalışmada doğrusal programlama uygulaması ile yönlendirilmemiş tamamlanmamış stokastik ağlarda başlangıç ve bitiş düğümleri arasındaki beklenen en kısa uzunlukları bulmak için iki önemli algoritma ve bir alternatif metodoloji sunulmuştur. Algoritma olarak Fleury ve Dijkstra Algoritması kullanılmıştır. Fleury ve Dijkstra Algoritması, sırasıyla bir Euler yürüyüş hesaplaması yaparken minimum uzunluk rotaları oluşturmak için kullanılır. Günlük gerçek hayat problemlerinde belirli bir problemin ağını stokastik ağlara dönüştürmek için kullanılan bir başka metodoloji de ele alınmıştır. Bu metodoloji, ağlardaki maliyetin yanı sıra mesafeyi de optimize etmektedir.

Campbell *et al.* (2021) yılındaki çalışmalarında Uzunluk kısıtlı K-drones ayrıt yönlendirme problemleri ele alınmıştır. Dronlar şebekedeki kenarları takip etmeden herhangi iki nokta arasında uçabildiği için klasik postacı ayrıt yönlendirme problemlerinden farklıdır. Bu özelliğinden dolayı Dron ARP' ler, Postacı ARP' lerden daha iyi çözümlere sahiptirler. Burada dronların sınırlı kapasitede olmasından dolayı tek bir dron şebekenin tamamına hizmet veremeyeceği için bir dizi dron ele alınmıştır.

MATERYAL VE METOD

İşletme Hakkında Genel Bilgi

Karayolları, karada bulunan tüm yerleşim merkezleri arasında ulaşımı sağlayan bağlantılar olarak adlandırılır. Tarihin ilk zamanlarından beri, izlerin kullanımı sonucunda yollar ortaya çıkmıştır fakat son 100 yıldır kullanım popülerliği artmıştır.

1830 yıllarında demiryolları karayollarına göre kullanım açısından daha geniş bir alana sahipti. Ancak 1930 yıllarından itibaren kara nakil vasıtalarının gelişmesiyle karayolları tekrardan ön plana çıktı ve demiryollarını geride bıraktı.

Karayollarının ön planda olması demiryollarının tamamen bırakılması fikrini doğurdu. Fakat 1970’li yılların sonuna doğru çıkan petrol krizi ve bununla beraber oluşan enerji problemi demiryollarının önemini ortaya çıkardı ve tamamen bırakılması fikri gerçekleştirilmedi.

Günümüzde karayolları en yaygın ulaşım sistemini oluşturmaktadır. Mevcutta bulunan yolların bakım ve onarımı ile yeni yolların yapımı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmektedir. Karayolları her geçen gün büyümeye devam ederek ulaşımı daha da kolay hale getirmektedir. Her geçen gün büyüyen bu yol ağı avantajları ile birlikte birçok zorluğu da beraberinde getirmiştir. Bu zorlukların en bilindikleri yolların temizlenme işlemi, kışın yollara tuzlama ve kar küreme işlemlerinin yapılması, yol işaretleme işlemlerinin yapılması, sokak haritalama ve yol bakım çalışmalarıdır. Bu işlemlerin her biri için Karayolları Genel Müdürlüğü ciddi oranda harcama yapmaktadır. Plansız olarak yapılacak bu işlemlerin, maliyetleri çok daha fazla artırması bilindik bir gerçektir. Bu işlemlerin en az maliyetle yapılabilmesi için kullanılan araçların rotalanması gerekmektedir. Literatürde bu alanda yapılan birçok rotalama çalışması bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazıları Çalışma Özetleri kısmında ele alınmıştır.

Geniş ağ yapısına sahip olan karayolları hizmetlerinin daha iyi gerçekleştirilmesi için yol ağı bölgelere ayrılmıştır ve her bölge için Bölge Müdürlükleri kurulmuştur. Bu müdürlüklerin tamamı Karayolları Genel Müdürlüğü’ne bağlıdır.

Erzurum ilinde bulunan Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü Erzurum ve Ağrı illerinin tamamı ile Artvin, Bayburt, Erzincan ve Kars illerinin bir kısmını kapsamaktadır. Belirtilen bu illerdeki yol yapımı, bakım onarım hizmeti vb. Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır.

Diğer bölgeler ile karşılaştırdığımızda bu bölgenin coğrafi konumundan dolayı kışın meydana gelen kar yağışı ve buzlanma oldukça fazladır. Bu durum ulaşımı ciddi derecede etkilemektedir.

Vaktinde alınamayan önlemler kazaların meydana gelmesi gibi çok daha ciddi sonuçlara sebep olabilmektedir. Kar yağışı başladığı andan itibaren Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü yolların kapanmasının sebebiyet verdiği ulaşım aksaklığı ve kazaları önlemek için hemen yol çalışmalarına başlar. Yollardaki karlar kar küreme araçlarıyla temizlenip kar yağışından dolayı oluşan buzlanmayı engellemek için yollara tuzlama çalışmaları yapılır. Bu çalışmalarda meydana gelen maliyetleri en aza indirmek için problem, bir rotalama problemi olarak ele alınıp çözülebilmektedir.

Problemin Tanımlanması

Literatürde kar küreme ve tuzlama işlemleri için birçok rotalama problemi çalışması yapılmıştır. Bu tezde Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü'nün kar küreme işlemlerindeki maliyeti en aza indirmek için rotalama çalışması yapılmıştır. Literatürde bulunan çalışmalardan farklı olarak kar küreme problemi DMÇPP olarak ele alınmıştır. Kar küreme işlemlerinde bir kar küreme aracı yolu tek seferde temizleyemediği durumlarda o yoldan tekrar geçmek zorunda kalmaktadır, fakat ikinci geçiş maliyeti ilk geçiş maliyetine göre daha düşük olmaktadır. Çünkü yoldaki karı temizlemek için kar küreme aracı ilk seferde daha fazla enerji harcamaktadır, ikinci geçişte ise sadece birinci geçişten kalan karı temizlemek zorundadır. Bu durum kar küreme aracının ilk geçişten daha az zorlanacağı ve daha az yakıt tüketeceği anlamına gelmektedir. Literatürdeki kar küreme çalışmalarının hiçbirinde bu maliyet farkı göz önüne alınmamıştır. Bu çalışmamız Değişken Maliyetli ÇPP için ilk çalışma olmaktadır.

Değişken maliyetli çinli postacı problemi

Ayrıt rotalama problemlerinden biri olan Çinli Postacı Problemi toplam hareket maliyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bununla birlikte şebeke üzerindeki her yoldan en az bir kez geçilmeli ve başlangıç noktasına geri dönülmelidir. Şebeke eğer Euler şebeke ise yol tekrarı yapılmadan tur tamamlanmaktadır.

Şebeke Euler şebekesi değilse turun tamamlanabilmesi için yolların bazılarında birkaç kez geçilerek yol tekrarı yapılmak zorundadır. Yönsüz bir şebekede aynı yoldan birden fazla geçildiğinde oluşan geçiş maliyeti her geçiş için farklılık gösterebilmektedir. Yani aynı yoldan ilk geçiş maliyeti ile ikinci, üçüncü vb. geçiş maliyetleri birbirinden farklıdır. Bu problem türü Çinli Postacı Problemi türlerinden biri olan Değişken Maliyetli Çinli Postacı Problemi (DMÇPP) olarak adlandırılır.

DMÇPP özellikle kar küreme işlemlerinde karşımıza çıkmaktadır. Kar temizleme işlemi yaparken yollar genelde tek seferde kardan arındırılamaz. Kar küreme aracının birden fazla geçmesi gerekir. Aracın ilk geçiş maliyeti her zaman daha yüksektir. Çünkü kar yoğunluğu ne kadar fazla olursa aracın harcayacağı enerjide o kadar yüksek maliyetli olur. Bu problem türleri de yine DMÇPP'ye örnektir.

DMÇPP çelik ve mobilya sektöründe karşımıza çıkan kesme yolu belirleme problemine de uymaktadır. Günlük hayatımızda karşımıza çıkan nesnelerin birçoğu birkaç küçük parçadan oluşur. Genellikle bu parçalar daha büyük bir nesnenin (plaka) kesilmesinden oluşur. Parçaların bir plaka üzerindeki konumlarının belirlenmesi problemi literatürde Kesme ve Paketleme Problemi olarak ele alınır (Dyckhoff & Finke, 1992). Konumlar belirlendikten sonra belirli bir yerleşimin parçalarını kesmek için bir veya daha fazla kesme takımının izlemesi gereken minimum uzunluktaki yolu bulma problemi Kesme Yolu Belirleme Problemi olarak adlandırılır (Silva *et al.* 2019).

Silva *et al.* (2019) yılındaki çalışmalarında kesme yolu belirleme problemi için iki farklı strateji tanımlamışlardır. Bu stratejilerden birincisi Kırsal Çinli Postacı Problemi (KÇPP)'nin klasik formülasyonuna dayanmaktadır, diğeri ise Gezgin Satıcı Problemi olarak modellemektir. Burada KÇPP'nin bu problem için en iyi çözümü verdiği gösterilmiştir. KÇPP modeli, örtüşen kenarların alt bölümlerine izin verirken tüm örnekleri de çözmüştür.

ÇPP'nin yeni bir çeşiti olan DMÇPP'nin matematiksel modeli geliştirilirken ÇPP matematiksel modeli baz alınmıştır. Bu model üzerinden gerekli düzeltmeler ve eklemeler yapılarak DMÇPP matematiksel modeli elde edilmiştir. Aşağıda sırası ile ÇPP matematiksel modeli ve DMÇPP matematiksel modeli verilmiştir.

ÇPP matematiksel modeli

Çinli Postacı Problemi tamsayılı doğrusal programlama ile matematiksel modeli oluşturulup çeşitli algoritmalar yardımıyla çözülebilmektedir.

ÇPP matematiksel modeli ile verilen şebekede bulunan bütün ayrıtlardan en az bir kez geçecek şekilde en kısa tur bulunmaktadır (Eiselt *et al.* 1995).

Değişkenler:

x_{ij} : i düğümünden j düğümüne giderken (i,j) ayrıtımdan geçilme sayısı

x_{ji} : j düğümünden i düğümüne giderken (j,i) ayrıtımdan geçilme sayısı

Parametreler:

C_{ij} : (i,j) ayrıtının uzunluğu (mesafesi)

V : Şebekedeki tüm düğümler kümesi

E : Şebekedeki tüm yönsüz ayrıtlar kümesi

n : Şebekedeki toplam düğüm sayısı

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Minimum } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij}$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \forall i \in V \quad (1)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \geq 1 \quad \forall (i, j) \in E \quad (2)$$

$$x_{ij}, x_{ji} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad (3)$$

(1) nolu kısıt akış kısıtıdır. Bir düğüme gelindiğinde o düğümden çıkışı sağlar.

(2) nolu kısıt her yoldan en az bir kere geçmeyi kontrol eden kısıttır.

(3) nolu kısıt işaret kısıtıdır. Değişkenlerin her birinin 0 ve tamsayı olmasını garantileyen kısıttır.

DMÇPP matematiksel modeli

ÇPP matematiksel modeli ele alınarak literatürde henüz geliştirilmemiş olan DMÇPP matematiksel modeli geliştirilmiştir.

Aşağıda DMÇPP'nin matematiksel modeli verilmiştir. Modelin çalışma mantığında problemdeki her yoldan kesinlikle bir kez geçilecektir ve bu geçiş maliyetleri ilk geçiş maliyeti olarak alınmaktadır. Bazı yollardan ikinci kez geçilmesi durumunda ilk geçiş maliyetinden her zaman daha düşük olan ikinci geçiş maliyetleri alınmaktadır. DMÇPP matematik modelindeki amaç maliyetin en az olduğu en iyi çözümü bulmaktır.

Değişkenler:

x_{ij} : i düğümünden j düğüme giderken (i, j) ayrıtımdan geçilme sayısı

y_{ij} : i düğümünden j düğüme gidilip gidilmediğini kontrol eden ikil değişken

Parametreler:

d_{ij} : (i, j) ayrıtımdan ilk geçiş maliyeti

c_{ij} : (i, j) ayrıtımdan ikinci geçiş maliyeti

V : Şebekedeki tüm düğümler kümesi

E : Şebekedeki tüm yönsüz ayrıtlar kümesi

n : Şebekedeki toplam düğüm sayısı

M: Büyük bir sayı ($=10^6$)

Amaç Fonksiyonu:

Minimum $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [c_{ij}x_{ij} + (d_{ij} - c_{ij})y_{ij}]$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \forall i \in V \quad (4)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \geq 1 \quad i \leq j \quad \forall (i, j) \in E \quad (5)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \leq M y_{ij} \quad i \leq j \quad \forall (i, j) \in E \quad (6)$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall (i, j) \in E \quad (7)$$

$$y_{ij} \geq 0 \text{ veya } 1 \quad \forall (i, j) \in E \quad (8)$$

(4) nolu kısıt akış kısıtıdır. Bir düğüme gelindiğinde o düğümden çıkışı sağlar.

(5) nolu kısıt her yoldan en az bir kere geçmeyi kontrol eden kısıttır.

(6) nolu kısıt y_{ij} değişkenine bağlı olarak yollardan geçmeyi kontrol eden kısıttır.

(7) nolu kısıt işaret kısıtıdır. x_{ij} değişkeninin 0 ve tamsayı olmasını garantileyen kısıttır.

(8) nolu kısıtta işaret kısıtlarının bir diğeridir. i düğümünden j düğümüne gidilip gidilmediğini kontrol eden y_{ij} ikil değişkeninin 0 veya 1 olmasını garantileyen kısıttır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında DMÇPP matematiksel modeli geliştirilip modelin kapalı hali Gams Studio 34 Programında kodlanmıştır. 4 düğümlü basit bir şebeke probleminden başlayarak 500 düğüme kadar olan birkaç test problemi GAMS Studio 34 programında kodlanarak en iyilik sonuçları elde edilmiştir. Aşağıdaki Tablo.1’de bu sonuçlar yer almaktadır. Programda problemlerin çözümündeki GAP değerlerinin 0 olması en iyi sonuçların elde edildiğini göstermektedir.

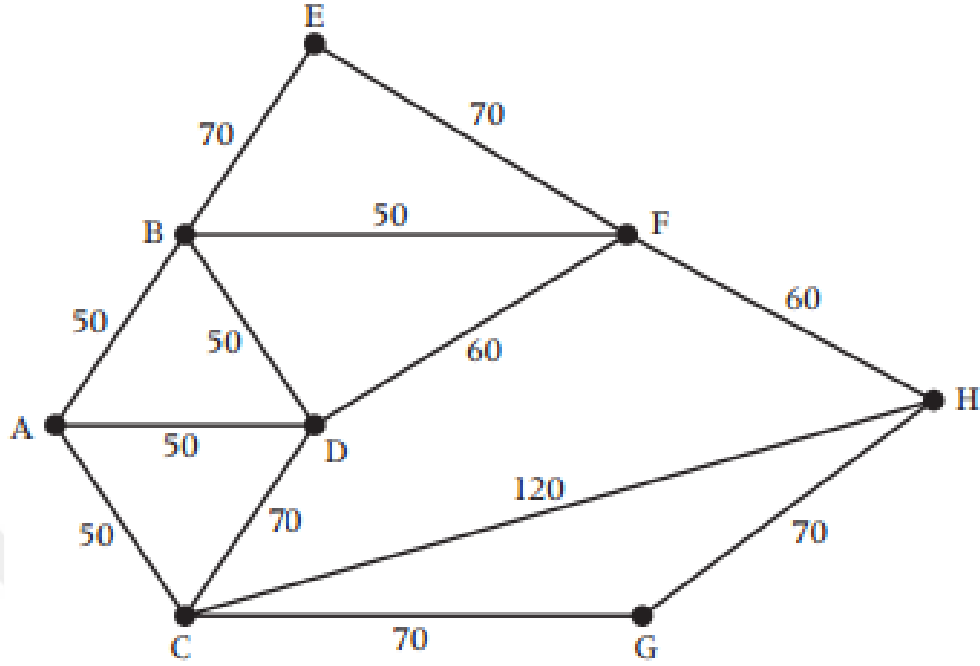
Tablo 1. Farklı Düğüm Dereceli Problemlerin Gams Studio 34 Program Sonuçları

Problem İsmi	Düğüm Sayısı	Bağlantı Sayısı	Optimum Sonuç	Çözüm Süresi (sn)	GAP Değeri
cpp_4	4	6	46	1,36	0
cpp_10	10	30	2.243,08	1,58	0
cpp_20	20	127	7.902,02	1,59	0
cpp_30	30	290	19.343,31	1,56	0
cpp_40	40	520	34.498,55	2,72	0
cpp_50	50	817	53.795,81	3,07	0
cpp_75	75	1850	120.829,83	4,31	0
cpp_100	100	3300	215.309,77	5,44	0
cpp_200	200	13267	860.329,21	27,03	0
cpp_300	300	29900	1.944.953,72	136,71	0
cpp_500	500	83167	5.413.466,88	473,43	0

Literatürdeki Bir ÇPP’nin DMÇPP Olarak Ele Alınması ve Sonuçların Karşılaştırılması

Literatürde ÇPP olarak bulunan 8 düğüm ve 13 ayrıttan oluşan bir örnek problem ele alınmıştır. Bu problemin ÇPP olarak çözüldüğündeki en iyi sonuç ve en iyi rota belirtilmiştir. Daha sonra aynı problem DMÇPP olarak ele alınıp her iki problemin en iyilik sonuçları karşılaştırılmıştır.

Aşağıdaki Şekil 8’de problemin şebeke gösterimi verilmiştir. Şebeke üzerinde belirtilen değerler ayrıntılar arasındaki maliyetleri göstermektedir.



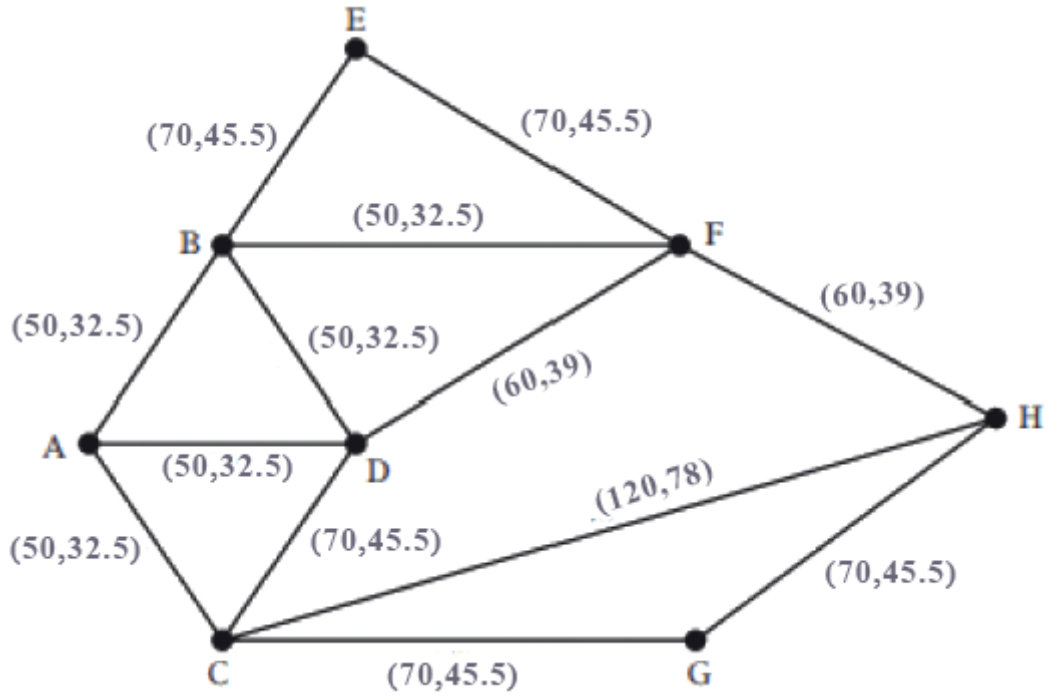
Şekil 8. Literatürdeki bir ÇPP’nin şebeke gösterimi

Bu ÇPP çözüldüğünde en iyi sonuç 1000 olarak bulunmuştur ve en iyi rotadan bir tanesi aşağıda belirtilmiştir. En iyi sonucu veren birden fazla rota mevcuttur.

En iyi rota : **A-D-C-G-H-C-A-B-D-F-B-E-F-H-F-B-A**

Aynı problem DMÇPP olarak ele alındığında ÇPP’den farklı olarak 2 çeşit maliyete ihtiyaç duyulur. Çünkü DMÇPP’de geçiş maliyetleri sabit olmayıp her geçiş için farklılık göstermektedir. Burada ilk geçiş maliyeti belirlenirken problemin ÇPP olarak ele alındığındaki geçiş maliyetleri baz alınmıştır. İkinci geçiş maliyeti, ilk geçiş maliyetinin 0,65 ile çarpımından elde edilmiştir. Bu değeri belirlerken Karayolları 12.Bölge Müdürlüğü’nde yapmış olduğumuz uygulama göz önünde bulundurulmuştur.

Aşağıdaki Şekil 9’da problemin şebeke gösterimi verilmiştir. Şebeke gösterimindeki ilk değerler ilk geçiş maliyetini, ikinci değerler ikinci geçiş maliyetini belirtmektedir.



Şekil 9. Literatürdeki problemin DMÇPP olarak şebeke gösterimi

Problemi DMÇPP olarak çözmek için Gams Studio 34 programına veri olarak 3 matrisin aktarılması gerekmektedir. Bunlar;

- 1) İlk geçiş maliyet matrisi
- 2) İkinci geçiş maliyet matrisi
- 3) Bağlantı matrisi

dir.

İlk geçiş maliyet matrisi, problemin ÇPP olarak ele alındığındaki geçiş maliyetlerinden oluşturulmuştur. İkinci geçiş maliyet matrisi ilk geçiş maliyet matrisinin 0,65 ile çarpımından elde edilen maliyet matrisidir. Bağlantı matrisi ise 2 düğüm arasında bağlantının olup olmadığını gösteren matristir. Matrisler tamamı aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Tablo 2. İlk Geçiş Maliyetleri

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	50	50	50	0	0	0	0
2	50	0	0	50	70	50	0	0
3	50	0	0	70	0	0	70	120
4	50	50	70	0	0	60	0	0
5	0	70	0	0	0	70	0	0
6	0	50	0	60	70	0	0	60
7	0	0	70	0	0	0	0	70
8	0	0	120	0	0	60	70	0

Tablo 3. İkinci Geçiş Maliyetleri

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	32,5	32,5	32,5	0	0	0	0
2	32,5	0	0	32,5	45,5	32,5	0	0
3	32,5	0	0	45,5	0	0	45,5	78
4	32,5	32,5	45,5	0	0	39	0	0
5	0	45,5	0	0	0	45,5	0	0
6	0	32,5	0	39	45,5	0	0	39
7	0	0	45,5	0	0	0	0	45,5
8	0	0	78	0	0	39	45,5	0

Tablo 4. Bağlantı Matrisi

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	1	0	0	0	0
2	1	0	0	1	1	1	0	0
3	1	0	0	1	0	0	1	1
4	1	1	1	0	0	1	0	0
5	0	1	0	0	0	1	0	0
6	0	1	0	1	1	0	0	1
7	0	0	1	0	0	0	0	1
8	0	0	1	0	0	1	1	0

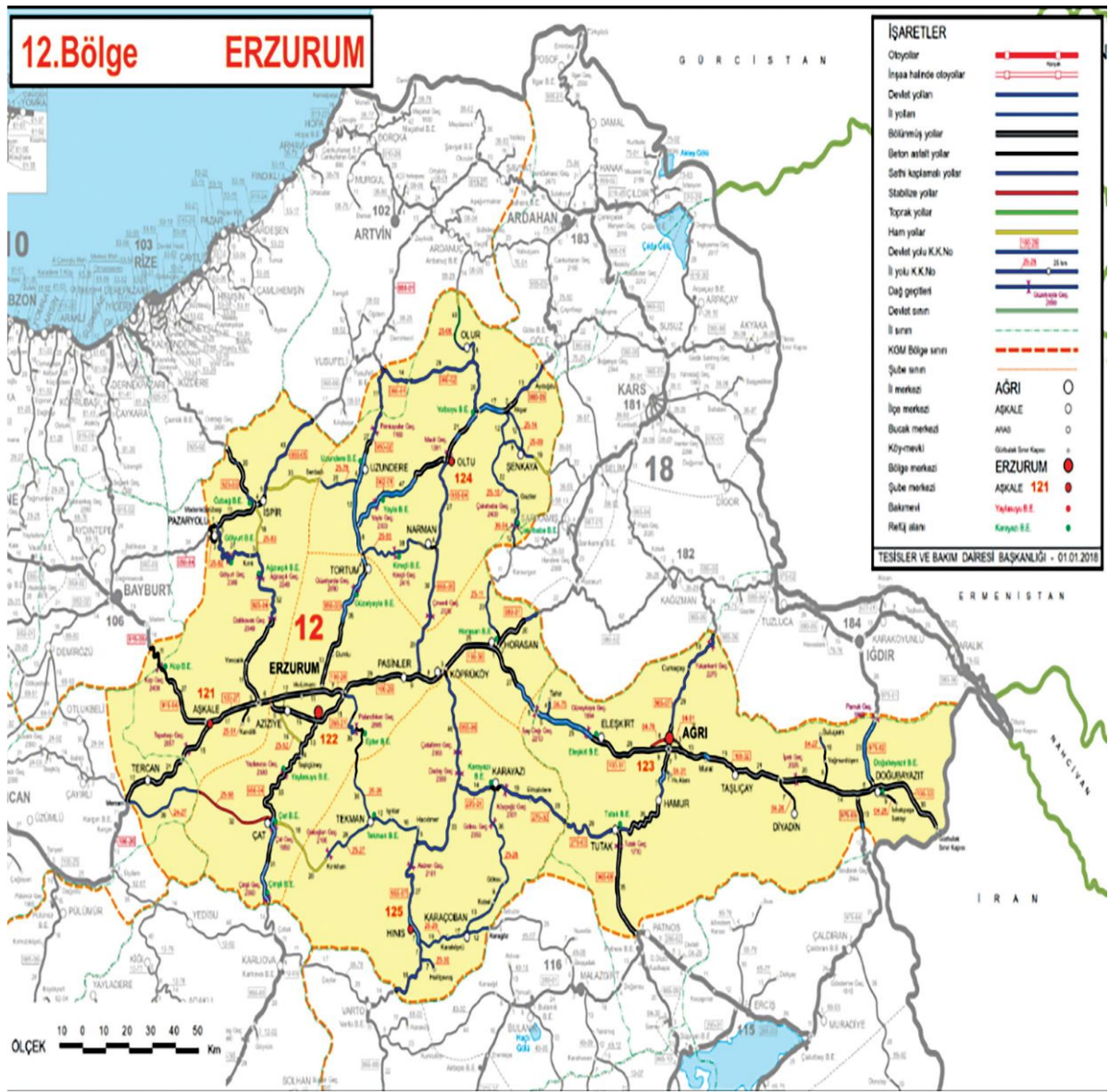
Problem Gams Studio 34 programında çözüldüğünde en iyi sonuç 944 olarak bulunmuştur ve en iyi rotadan bir tanesi de aşağıdaki gibidir.

En iyi rota : **A-B-E-F-B-A-D-B-F-H-G-C-D-F-H-C-A**

Problemin DMÇPP olarak çözümünden elde edilen sonuç (944), ÇPP ile çözümünden elde edilen sonuçtan (1000) daha iyi çıkmıştır. Sonuçları karşılaştırdığımızda %5,6 oranında bir iyileştirme olduğu görülmüştür.

Uygulama

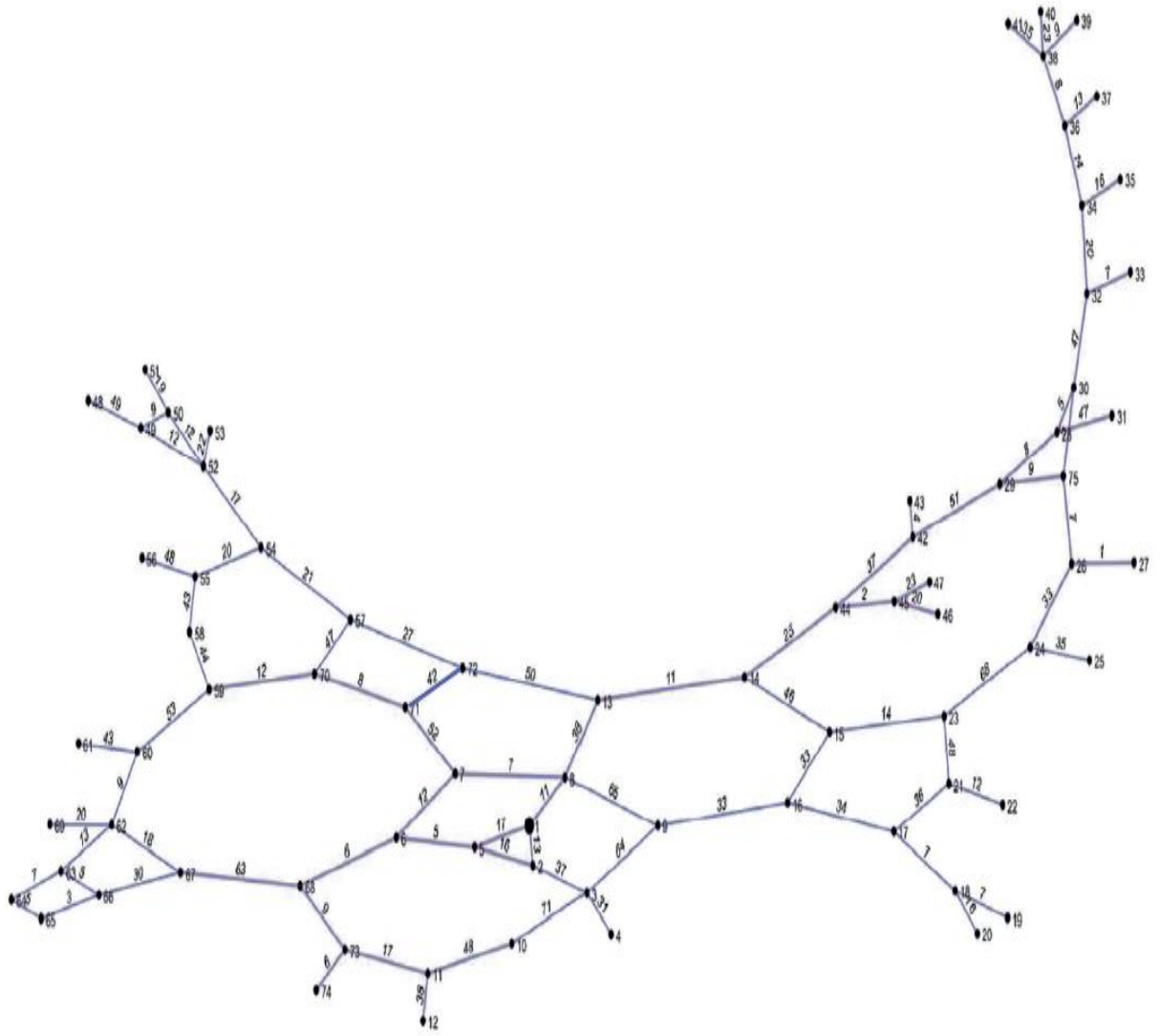
Modelin 500 düğüme kadar sıkıntısız çalıştığı görüldükten sonra 8 düğümlü bir ÇPP örneğini DMÇPP olarak ele alıp sonuçları karşılaştırdık. Bu bölümde Karayolları 12.Bölge Müdürlüğü görev alanındaki yollar kullanılarak DMÇPP için uygulama yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 10'da Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü görev alanındaki yolların haritası verilmiştir (Yılmaz, 2018).



Şekil 10. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların haritası

Yukarıda verilen yol haritasında karayolları, ana yollar, yan yollar ve kavşaklardan oluşmaktadır. Bu harita $G = (V, E)$ olacak şekilde ÇPP'nin uygulanabileceği bir şebekeye dönüştürülebilir. Şebekede V düğümler kümesini, E ayrıtlar kümesini göstermektedir (Yılmaz, 2018).

Aşağıdaki Şekil 11'de Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü görev alanındaki yolların şebeke gösterimi verilmiştir. Başlangıç düğüm noktası olarak Erzurum merkez alınarak tüm kavşaklar numaralandırılmıştır ve yolların tamamı yönsüz olarak ele alınmıştır. Yolların uzunlukları km olarak verilmiştir.



Şekil 11. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların şebeke gösterimi

Karayolları 12. Bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların şebekesi 75 düğümden oluşturmaktadır. Şekil.8’de gösterilen şebekedeki yolların uzunluklarının matris olarak gösterimi ile uzaklık matrisi oluşturulmuştur.

Şebekenin Gams Studio 34 programında kodlanabilmesi için 3 matrise ihtiyaç duyulmuştur. Bunlar;

- 4) İlk geçiş maliyet matrisi
- 5) İkinci geçiş maliyet matrisi
- 6) Bağlantı matrisi

dir. Bu matrislerin elde edilmesinde iki düğüm arasındaki uzaklığı gösteren uzaklık matrisi kullanılmıştır. Aşağıdaki Şekil 12’de uzaklık matrisi verilmiştir.

[illegible]

Şekil 12. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların uzaklık matrisi

İlk Geçiş Maliyet Matrisi

İlk geçiş maliyet matrisi belirlenirken uzaklık matrisi ile ilk geçiş maliyeti çarpılmıştır. İlk geçiş maliyetini belirleyen unsurlar:

- Kar küreme aracında kullanılan yakıt
- Kar küreme aracının yıpranma payı
- İşçinin alışma ücreti

dir. Bu maliyetler göz önüne alınarak ilk geçiş maliyeti km başına 15\$ olarak belirlenmiştir. Yani ilk geçiş maliyet matrisi uzaklık matrisinin 15 ile çarpımından oluşmaktadır. Aşağıdaki Şekil 13’te ilk geçiş maliyet matrisi verilmiştir.



[illegible]

[illegible]

Şekil 13. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların ilk maliyet matrisi

İkinci Geçiş Maliyet Matrisi

İkinci geçiş maliyet matrisi, ilk geçiş maliyet matrisi 0,65 ile çarpılarak elde edilmiştir. Bu değer belirlenirken yoldaki kar oranının ikinci geçişte daha az olduğuna dikkat edilmiştir. Yoldaki karın daha az olması kar küreme aracının daha az enerji harcayacağı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla araç daha az yakıt tüketecektir ve aracın daha az yıpranma payı olacaktır. Aşağıdaki Şekil 14’te ikinci geçiş maliyet matrisi verilmiştir.



[illegible]

Şekil 14. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların ikinci maliyet matrisi

Bağlantı Matrisi

Bağlantı matrisi yolların birbiriyle bağlantılarının olup olmadığını gösteren matristir. Bu matris, iki düğüm arasında geçiş yolu var ise 1, geçiş yolu yok ise 0 değeri alınarak oluşturulmuştur. Aşağıdaki Şekil 15’te bağlantı matrisi verilmiştir.



[illegible]

[illegible]

Şekil 15. Karayolları 12. bölge müdürlüğü görev alanındaki yolların bağlantı matrisi

Bu 3 matris Microsoft Office Excel 2007 programında oluşturulmuştur. Daha sonra Gams Studio 34 programında kapalı hali oluşturulan model için bu veriler Microsoft Office Excel 2007 programından çekilerek çalıştırılmıştır. Gams Studio 34 programında model, 3,008 saniye gibi çok kısa bir sürede çözülmüştür ve sonucu 40.845\$ olarak bulunmuştur. Modelin GAP değeri 0 elde edilmiştir. Yani bulunan sonuç en iyi sonuçtur.



SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ARP'nin, en bilinen örneği olan ÇPP incelenmiştir. ÇPP, şebekedeki bütün yollardan en az bir kere geçip başlangıç noktasına geri dönerek en kısa mesafenin bulunmasını amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda ÇPP'ye bazı kısıtlar eklenerek oluşturulan farklı ÇPP çeşitleri vardır. Bu ÇPP çeşitleri incelenmiştir ve gerçek hayattaki uygulama alanlarından bahsedilmiştir.

Büyük boyuttaki şebekelerin birçoğunda ve tek dereceli düğüm bulunan şebekelerde turun tamamlanabilmesi için yol tekrarı yapılması yani geçilen bir yoldan tekrar geçilmesi gerekmektedir. Yollardan geçiş maliyeti her geçiş için aynı olabileceği gibi farklı maliyetlerde de olabilmektedir. Şebekede bulunan bir yoldan birkaç kez geçilmek zorunda kalındığında geçiş sayısının arttıkça geçiş maliyetinin giderek azaldığı yeni bir ÇPP türü ortaya çıkmıştır. Bu ÇPP türü Değişken Maliyetli Çinli Postacı Problemi (DMÇPP) olarak tanımlanmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendikten sonra DMÇPP ile ilgili şimdiye kadar sadece bir çalışmanın yapıldığı, bu çalışmada direkt olarak DMÇPP değil de Rüzgarlı ÇPP olarak ele alındığı görülmüştür.

ÇPP'nin matematiksel modeli baz alınarak gerekli düzenlemeler ve eklemeler yapılarak DMÇPP'nin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Modelin çalışma mantığında bir ayrıttan ilk geçişte ilk maliyetler baz alınmaktadır. Turun tamamlanabilmesi için eğer aynı ayrıttan tekrar geçilmek durumunda kalınırsa bu sefer ilk geçiş maliyetinden daha az olan ikinci geçiş maliyeti baz alınmaktadır. İkinci kez geçilme ihtiyacı olmayan ayrıtlar için sadece ilk geçiş maliyeti kullanılmaktadır. Sonuç olarak en az maliyetli en iyi çözüm bulunmaktadır.

Matematiksel model geliştirildikten sonra Gams Studio 34 programında kodlanmıştır. Modelin sıkıntısız çalıştığını görmek için 4 düğümden 500 düğüme kadar olan mevcuttaki birkaç test problemi programda çözülmüştür ve bu problemlerin en iyi sonuçları bulunmuştur. Programın çalışma mantığını daha yakından incelemek ve ÇPP ile olan farkı daha iyi görmek için literatürde bulunan 8 düğümlü bir ÇPP örneği DMÇPP olarak ele alınıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü'nde örnek bir uygulaması yapılmıştır. Uygulama kısmında 75 düğümden oluşan Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü'nün görev alanındaki yolların şebeke gösterimi elde edilmiştir. Yolların tamamı yönsüz alınmıştır. Daha sonra modelin çözülmesi için ihtiyaç duyulan matrisler oluşturulmuştur. Gams Studio 34 programında model sorunsuz olarak 3,008 saniyede çözülmüştür ve modelin sonucu 40.845\$ olarak bulunmuştur. Elde edilen sonucun en iyi sonuç olduğu modelin çözüm sonucunda

belirtilen GAP değerinin 0 olması dolayısıyla kesinleşmiştir.

Bu çalışmada yönsüz şebekeden oluşan DMÇPP'nin matematiksel modeli geliştirilmiştir. Uygulama yapılarak modelin sorunsuz olarak çalıştığı görölmektedir. Sonraki çalışmalar için öneri olarak DMÇPP'nin matematiksel modeli şebekedeki yolların yönlü veya karma olduğu diğer şebeke problemleri için uygulanabilir. Bu çalışmada araç sayısı 1 alınmıştır, sonraki çalışmalar için araç sayısı birden fazla alınarak farklı şebeke problemlerine DMÇPP'nin matematiksel modeli uygulanabilir. DMÇPP, Hiyerarşik ÇPP ya da ÇPP'nin diğer çeşitleri ile birleştirilerek yeni ÇPP çeşitleri oluşturulabilir. Literatürde karşımıza çıkan Kesme Yolu Belirleme Problemleri'ne de DMÇPP matematiksel modeli uygulanabilir.



KAYNAKLAR

- Ahr, D., & Reinelt, G. (2002). New heuristics and lower bounds for the min-max k-Chinese postman problem. European symposium on algorithms,
- Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., & Orlin, J. B. (1993). Network flows: Theory, applications and algorithms. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA* Arrow, KJ (1963). *Social Choice and Individual Values*, Wiley, New York. Gibbard, A. (1973). "Manipulation of Voting Schemes: A general result", *Econometrica*, 41, 587-602.
- Alfa, A. S., & Liu, D. Q. (1988). Postman routing problem in a hierarchical network. *Engineering optimization*, 14(2), 127-138.
- Avriel, M., & Golany, B. (1996). *Mathematical programming for industrial engineers* (Vol. 20). CRC Press.
- Beltrami, E. J., & Bodin, L. D. (1974). Networks and vehicle routing for municipal waste collection. *Networks*, 4(1), 65-94.
- Berbeglia, G., Cordeau, J.-F., Gribkovskaia, I., & Laporte, G. (2007). Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *Top*, 15(1), 1-31.
- Bhuranda, L. K., & Rizwanullah, M. (2021). Optimization of stochastic chinese postman networks problem using priorities. *Journal of Physics: Conference Series*,
- Bodin, L. D., & Kursh, S. J. (1978). A computer-assisted system for the routing and scheduling of street sweepers. *Operations Research*, 26(4), 525-537.
- Brucker, P. (1980). The Chinese postman problem for mixed graphs. International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science,
- Cabral, E. A., Gendreau, M., Ghiani, G., & Laporte, G. (2004). Solving the hierarchical Chinese postman problem as a rural postman problem. *European Journal of Operational Research*, 155(1), 44-50.
- Campbell, J. F., Corberán, Á., Plana, I., Sanchis, J. M., & Segura, P. (2021). Solving the length constrained K-drones rural postman problem. *European Journal of Operational Research*, 292(1), 60-72.
- Chen, L., Hà, M. H., Langevin, A., & Gendreau, M. (2014). Optimizing road network daily maintenance operations with stochastic service and travel times. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 64, 88-102.
- Colombi, M., Corberán, Á., Mansini, R., Plana, I., & Sanchis, J. M. (2017). The Hierarchical Mixed Rural Postman Problem: Polyhedral analysis and a branch-and-cut algorithm. *European Journal of Operational Research*, 257(1), 1-12.
- Corberán, Á., Eglese, R., Hasle, G., Plana, I., & Sanchis, J. M. (2021). Arc routing problems: A review of the past, present, and future. *Networks*, 77(1), 88-115.
- Corberán, Á., Erdoğan, G., Laporte, G., Plana, I., & Sanchis, J. M. (2018). The Chinese Postman Problem with load-dependent costs. *Transportation Science*, 52(2), 370-385.
- Corberán, A., Martí, R., & Sanchis, J. M. (2002). A GRASP heuristic for the mixed Chinese postman problem. *European Journal of Operational Research*, 142(1), 70-80.
- Corberán, Á., Plana, I., Rodríguez-Chía, A. M., & Sanchis, J. M. (2013). A branch-and-cut

- algorithm for the maximum benefit Chinese postman problem. *Mathematical Programming*, 141(1), 21-48.
- Dewil, R., Vansteenwegen, P., & Cattrysse, D. (2016). A review of cutting path algorithms for laser cutters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5), 1865-1884.
- Dror, M. (2012). *Arc routing: theory, solutions and applications*. Springer Science & Business Media.
- Dror, M., Stern, H., & Trudeau, P. (1987). Postman tour on a graph with precedence relation on arcs. *Networks*, 17(3), 283-294.
- Dussault, B., Golden, B., Groër, C., & Wasil, E. (2013). Plowing with precedence: A variant of the windy postman problem. *Computers & operations research*, 40(4), 1047-1059.
- Dyckhoff, H., & Finke, U. (1992). *Cutting and packing in production and distribution: A typology and bibliography*. Springer Science & Business Media.
- Edmonds, J., & Johnson, E. L. (1973). Matching, Euler tours and the Chinese postman. *Mathematical Programming*, 5(1), 88-124.
- Eglese, R. W., & Li, L. (1992). Efficient routeing for winter gritting. *Journal of the Operational Research Society*, 43(11), 1031-1034.
- Eglese, R. W., & Murdock, H. (1991). Routeing road sweepers in a rural area. *Journal of the Operational Research Society*, 42(4), 281-288.
- Eiselt, H. A., Gendreau, M., & Laporte, G. (1995). Arc routing problems, part I: The Chinese postman problem. *Operations Research*, 43(2), 231-242.
- Emel, G. G., Taşkın, Ç., & Dinç, E. (2004). Yönsüz Çinli Postacı Problemi: Polis Devriye Araçları İçin Bir Uygulama.
- Fernandes, C. G., Lee, O., & Wakabayashi, Y. (2009). Minimum cycle cover and Chinese postman problems on mixed graphs with bounded tree-width. *Discrete Applied Mathematics*, 157(2), 272-279.
- Florian, M. (1984). AN INTRODUCTION TO NETWORK MODELS USED IN TRANSPORTATION PLANNING. *Transportation Planning Models: Proceedings of the Course Given at the International Center for Transportation Studies (ICTS), Amalfi, Italy, October 11-16, 1982*, 137.
- Ford, L. R., & Fulkerson, D. R. (1962). *Flows in networks*. Princeton university press.
- Ghiani, G., & Improta, G. (2000). An algorithm for the hierarchical Chinese postman problem. *Operations Research Letters*, 26(1), 27-32.
- Gönülol, S. (2009). *Gezgin satıcı problemi için veri madenciliği tabanlı sezgisel bir yaklaşım* [Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Gutin, G., Jones, M., & Sheng, B. (2017). Parameterized complexity of the k-arc chinese postman problem. *Journal of Computer and System Sciences*, 84, 107-119.
- Gutin, G., Jones, M., Sheng, B., Wahlström, M., & Yeo, A. (2017). Chinese postman problem on edge-colored multigraphs. *Discrete Applied Mathematics*, 217, 196-202.
- Handa, H., Chapman, L., & Yao, X. (2005). Dynamic salting route optimisation using evolutionary computation. 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation,
- Keskin, M. E., & Yılmaz, M. (2019). Chinese and windy postman problem with variable service costs. *Soft Computing*, 23(16), 7359-7373.
- Korteweg, P., & Volgenant, T. (2006). On the hierarchical Chinese postman problem with

- linear ordered classes. *European Journal of Operational Research*, 169(1), 41-52.
- Krishnamurthi, M., & Damodaran, P. (1998). A modified postman tour heuristic for efficient snow removal planning. Proceedings of 7th Industrial Engineering Research Conference, Banff, Canada,
- Lemieux, P. F., & Gampagna, L. (1984). The snow ploughing problem solved by a graph theory algorithm. *Civil Engineering Systems*, 1(6), 337-341.
- Letchford, A. N., & Eglese, R. W. (1998). The rural postman problem with deadline classes. *European Journal of Operational Research*, 105(3), 390-400.
- Lum, O., Zhang, R., Golden, B., & Wasil, E. (2017). A hybrid heuristic procedure for the windy rural postman problem with zigzag time windows. *Computers & operations research*, 88, 247-257.
- Majumder, S., Kar, S., & Pal, T. (2019). Uncertain multi-objective Chinese postman problem. *Soft Computing*, 23(22), 11557-11572.
- Minieka, E. (1978). Optimization Algorithms for Networks and Graphs, Mercel Dekker Inc. New York.
- Minieka, E. (1979). The Chinese postman problem for mixed networks. *Management Science*, 25(7), 643-648.
- Nossack, J., Golden, B., Pesch, E., & Zhang, R. (2017). The windy rural postman problem with a time-dependent zigzag option. *European Journal of Operational Research*, 258(3), 1131-1142.
- Orloff, C. (1974). A fundamental problem in vehicle routing. *Networks*, 4(1), 35-64.
- Palma, G. (2011). A tabu search heuristic for the prize-collecting rural postman problem. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 281, 85-100.
- Papadimitriou, C. H. (1976). The NP-completeness of the bandwidth minimization problem. *Computing*, 16(3), 263-270.
- Pearn, W. L. (1994). Solvable cases of the k-person Chinese postman problem. *Operations Research Letters*, 16(4), 241-244.
- Pearn, W. L., & Liu, C. (1995). Algorithms for the Chinese postman problem on mixed networks. *Computers & operations research*, 22(5), 479-489.
- Shafahi, A., & Haghani, A. (2015). Generalized maximum benefit multiple Chinese postman problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 261-272.
- Silva, E. F., Oliveira, L. T., Oliveira, J. F., & Toledo, F. M. B. (2019). Exact approaches for the cutting path determination problem. *Computers & operations research*, 112, 104772.
- Söyler, H., & Fendoğlu, E. (2018). Malatya Büyükşehir Belediyesi İlaçlama Araçlarının Güzergâhlarının Optimizasyonu. *Alphanumeric Journal*, 6(1), 13-24.
- Suil, O., & West, D. B. (2015). Sharp bounds for the Chinese Postman Problem in 3-regular graphs and multigraphs. *Discrete Applied Mathematics*, 190, 163-168.
- Summerfield, N. S., Dror, M., & Cohen, M. A. (2015). City streets parking enforcement inspection decisions: The Chinese postman's perspective. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 149-160.
- Tagmouti, M., Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2011). A dynamic capacitated arc routing problem with time-dependent service costs. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(1), 20-28.
- Tan, G., Cui, X., & Zhang, Y. (2005). Chinese postman problem in stochastic networks. Joint

- International Conference on Autonomic and Autonomous Systems and International Conference on Networking and Services-(icas-isns' 05),
- Thimbleby, H. (2003). The directed chinese postman problem. *Software: Practice and Experience*, 33(11), 1081-1096.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*. SIAM.
- Wang, H.-F., & Wen, Y.-P. (2002). Time-constrained Chinese postman problems. *Computers & Mathematics with applications*, 44(3-4), 375-387.
- Wang, J., Zhang, Y., Zhang, L., Dong, L., Balter, P. A., Court, L. E., & Yang, J. (2018). Solving the “Chinese postman problem” for effective contour deformation. *Medical physics*, 45(2), 767-772.
- Yang, J., Yin, Z., Cui, J., Zhang, Q., & Tang, Z. (2018). The Chinese Postman Problem Based on the Probe Machine Model. *International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications*,
- Yılmaz, M. (2018). Karayolları bakım çalışmasında kullanılan araçların güzergâhlarının hiyerarşik Çinli postacı problemi kullanılarak düzenlenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 8(4), 107-115.
- Yin, Z., Zhang, F., & Xu, J. (2002). A Chinese Postman Problem based on DNA computing. *Journal of chemical information and computer sciences*, 42(2), 222-224.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Ebrar ÖZBEY
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği (2018)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı (2022)
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	