

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KARAYOLU BAĞ KAPASİTE ARTIRIMLARININ
ÇEVRESEL FAKTÖRLER DİKKATE ALINARAK
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİMMET CAN ÖZDEMİR

DENİZLİ, TEMMUZ - 2021

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KARAYOLU BAĞ KAPASİTE ARTIRIMLARININ
ÇEVRESEL FAKTÖRLER DİKKATE ALINARAK
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİMMET CAN ÖZDEMİR

DENİZLİ, TEMMUZ - 2021

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Himmet Can Özdemir



ÖZET

**KARAYOLU BAĞ KAPASİTE ARTIRIMLARININ ÇEVRESEL
FAKTÖRLER DİKKATE ALINARAK BELİRLENMESİ**
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HİMMET CAN ÖZDEMİR
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ÖZGÜR BAŞKAN)

DENİZLİ, TEMMUZ - 2021

Bu çalışmada optimum bağ kapasite genişletme değerlerinin belirlenmesi sürekli ulaşım ağ tasarım problemi olarak formüle edilmiştir. Emisyon salınım miktarlarının dikkate alınarak optimum bağ kapasite genişletmelerinin hesaplanabilmesi için diferansiyel gelişim algoritması tabanlı iki seviyeli programlama modeli geliştirilmiştir.

Problemin çözümü için geliştirilen iki seviyeli modelde üst seviyedeki amaç fonksiyonu, ağdaki toplam seyahat süresi, bağ kapasitesi genişletmelerinin toplam yatırım maliyeti ve kirleticilerin oluşturduğu emisyon salınım maliyeti olarak tanımlanmıştır. Alt seviyede ise deterministik trafik atama problemi çözülmüştür.

Geliştirilen modelin etkinliğini gösterebilmek için Sioux-Falls karayolu ağında model test edilmiştir. Emisyon salınım maliyetinin sürekli ulaşım ağ tasarım problemine eklenmesinin etkilerinin daha iyi görülebilmesi için dört adet senaryo analiz edilmiştir. Senaryo 1’de amaç fonksiyonu olarak sadece emisyon salınımlarının oluşturduğu maliyet dikkate alınmıştır. İkinci senaryoda amaç fonksiyonu hesaplanırken emisyon salınımlarına ait maliyet ve ağdaki kapasite genişletmesine ilişkin yatırım maliyeti dikkate alınmıştır. Senaryo3’te toplam seyahat maliyeti ve yatırım maliyetleri amaç fonksiyonuna dahil edilmiş ve son senaryoda ise bu maliyetlere ek olarak emisyon salınım maliyetleri de göz önüne alınmıştır. Senaryolar karşılaştırıldığında emisyon salınım maliyetinin dikkate alınması durumunda elde edilen optimum bağ kapasite genişletmeleri değerlerinin sadece seyahat ve yatırım maliyetlerinin dikkate alındığı durumda elde edilen sonuçlara göre yaklaşık olarak %3,5 fazla olduğu bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Sürekli ulaşım ağ tasarımı, iki seviyeli programlama, diferansiyel gelişim algoritması, emisyon salınımı

ABSTRACT

DETERMINING OF ROAD LINK CAPACITY EXPANSIONS BY CONSIDERING ENVIRONMENTAL FACTORS

MSC THESIS

HİMMET CAN ÖZDEMİR

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. ÖZGÜR BAŞKAN)

DENİZLİ, JULY 2021

In this study, determining of optimum link capacity expansions is formulated as a continuous transportation network design problem. To calculate the optimum link capacity expansions by considering the emission, a bi-level programming model based on the differential evaluation algorithm has been developed. In the bi-level model, the upper-level objective function is defined as the total travel time in the network, the total investment cost of link capacity expansions, and the emission cost. The deterministic traffic assignment problem is solved at the lower level.

To demonstrate the effectiveness of the developed model, the model has been tested in the Sioux-Falls transportation network. Four scenarios are analysed to better understand the effect of adding the emission cost to the continuous transportation network design problem. In Scenario 1, only the emission cost is considered as the objective function. In the second scenario, the emission and the investment costs of link capacity expansions in the network are taken into account while calculating the objective function. In scenario 3, total travel costs and investment costs are included in the objective function, and in the last scenario, emission cost is also considered in addition to these costs. When the scenarios are compared, it was found that the optimum link capacity expansions obtained when the emission cost is considered, are approximately 3.5% higher than the results obtained when only travel and investment costs are taken into account.

KEYWORDS: Continuous network design problem, bi-level programming, differential evaluation algorithm, emission

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|-------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ | iv |
| TABLO LİSTESİ | v |
| SEMBOL LİSTESİ | vi |
| ÖNSÖZ | viii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Giriş | 1 |
| 1.2 Problem Tanımı | 2 |
| 1.3 Amaç | 3 |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI | 5 |
| 2.1 Ulaşım Ağ Tasarımı | 5 |
| 2.2 Motorlu Taşıt Emisyonları | 10 |
| 3. PROBLEM FORMÜLASYONU | 13 |
| 3.1 İki Seviyeli Programlama | 13 |
| 3.2 Sürekli Ulaşım Ağ Tasarımı | 14 |
| 3.3 Trafik Ataması | 16 |
| 3.4 Emisyon Miktarının Belirlenmesi | 19 |
| 4. MODEL GELİŞİMİ | 22 |
| 4.1 Giriş | 22 |
| 4.2 İki Seviyeli Programlama Modeli | 22 |
| 4.3 Senaryolar | 30 |
| 5. SAYISAL UYGULAMA | 32 |
| 5.1 Giriş | 32 |
| 5.2 Ulaşım Ağı | 32 |
| 5.3 Analizler | 35 |
| 5.4 Senaryoların Karşılaştırılması | 44 |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER | 47 |
| 6.1 Sonuçlar | 47 |
| 6.2 Gelecek Çalışmalar | 48 |
| 7. KAYNAKLAR | 49 |
| 8. EKLER | 55 |
| 8.1 EK A..... | 55 |
| 9. ÖZGEÇMİŞ | 58 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1: Trafik atama ve kapasite genişletme arasındaki ilişki | 4 |
| Şekil 3.1: Ulaştırma ağı topolojisi..... | 17 |
| Şekil 4.1: İki seviyeli programlama modeli | 23 |
| Şekil 4.2: Diferansiyel gelişim algoritması adımları..... | 24 |
| Şekil 4.3: DGA tabanlı İki Seviyeli Model Adımları | 25 |
| Şekil 4.4: Mutasyon Sonucu Üretilen Fark Kromozomu (d^m) | 28 |
| Şekil 5.1: Sioux-Falls karayolu ağı | 33 |
| Şekil 5.2: Sioux-Falls (Google Earth 2021)..... | 34 |
| Şekil 5.3: Senaryo 1 amaç fonksiyonu yakınsama grafiği | 37 |
| Şekil 5.4: Senaryo 2 amaç fonksiyonu yakınsama grafiği | 39 |
| Şekil 5.5: Senaryo 3 amaç fonksiyonu yakınsama grafiği | 41 |
| Şekil 5.6: Senaryo 4 amaç fonksiyonu yakınsama grafiği | 43 |

TABLO LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Tablo 4.1: Belirli emisyon faktörlerinin parasal değerlemesi | 27 |
| Tablo 5.1: Bağ kapasiteleri (c_i) | 35 |
| Tablo 5.2: Bağ kapasite genişletmelerinin maliyet parametreleri..... | 35 |
| Tablo 5.3: Senaryo 1 için trafik hacmi (x_i) ve maliyet (t_i) değerleri | 36 |
| Tablo 5.4: Optimum kapasite genişletme değerleri (c_i) (Senaryo 1) | 36 |
| Tablo 5.5: Senaryo 2 için trafik hacmi (x_i) ve maliyet (t_i) değerleri | 38 |
| Tablo 5.6: Optimum kapasite genişletme değerleri (c_i) (Senaryo 2) | 38 |
| Tablo 5.7: Senaryo 3 için trafik hacmi (x_i) ve maliyet (t_i) değerleri | 40 |
| Tablo 5.8: Optimum kapasite genişletme değerleri (c_i) (Senaryo 3) | 40 |
| Tablo 5.9: Senaryo 4 için trafik hacmi (x_i) ve maliyet (t_i) değerleri | 42 |
| Tablo 5.10: Optimum kapasite genişletme değerleri (c_i) (Senaryo 4) | 42 |
| Tablo 5.11: Senaryolara ait sezgisel algoritma sonuçları | 43 |
| Tablo 5.12: Senaryolara ait toplam emisyon maliyeti | 44 |
| Tablo 5.13: Senaryolara ait amaç fonksiyonu minimum değerleri | 44 |
| Tablo 5.14: Senaryolara ait kapasite genişletme miktarları | 45 |
| Tablo Ek.1: Sioux-Falls ağının B-V matrisi (bin araç/zirve saat)..... | 57 |

SEMBOL LİSTESİ

| | | |
|--------------------------|---|---|
| A | : | A bağlar kümesi |
| B-V | : | Başlangıç varış matrisi |
| c_i | : | i bağındaki kapasite |
| CH₄ | : | Metan gazı |
| CO | : | Karbon monoksit |
| CO₂ | : | Karbondioksit |
| CR | : | Çaprazlama oranı |
| d_{alt} | : | Kapasite genişletme alt sınırı |
| $d_{üst}$ | : | Kapasite genişletme üst sınırı |
| d_i | : | i bağındaki kapasite genişletme miktarı |
| $d_{i,pop}$ | : | pop kromozomunun i bağındaki rastgele kapasite genişletme miktarı |
| d_i^g | : | g kromozomundaki i bağındaki kapasite genişletmesi |
| d_i^m | : | i bağındaki mutasyona uğramış kapasite genişletmesi |
| d_i^n | : | i bağındaki çaprazlamaya uğramış kapasite genişletmesi |
| D_{rs} | : | r-s B-V çiftindeki trafik talebi |
| DGA | : | Diferansiyel gelişim algoritması |
| DKD | : | Deterministik kullanıcı dengesi |
| E_i | : | Bir aracın i bağında oluşturduğu toplam emisyon miktarı |
| F | : | Mutasyon faktörü |
| f_k^{rs} | : | r-s B-V çifti arasındaki k rotasındaki trafik hacmi |
| GA | : | Genetik algoritma |
| $g_i(d_i)$ | : | i bağındaki yatırım fonksiyonu |
| HC | : | Hidrokarbonlar |
| i | : | i bağı |
| K | : | Frank-Wolfe algoritması için durma koşulu |
| K_{rs} | : | r-s B-V çifti arasındaki rotaların kümesi |
| KUAT | : | Kesikli ulaşım ağ tasarımı |
| label_j | : | j düğümünün etiketi |
| labellist | : | Etiket Düzeltme algoritmasındaki etiket listesi |
| l_i | : | i bağının uzunluğu |
| LS | : | Bağ sayısı |
| NO_x | : | Nitrojen oksitler |
| N₂O | : | Azot protoksit |
| NS | : | Düğüm sayısı |
| pop | : | Popülasyon parametresi |
| prelist | : | Etiket Düzeltme algoritmasındaki önceki düğümler listesi |
| Q_i^k | : | i bağındaki K tipinde oluşan kirlilik miktarı |
| R | : | B-V çiftlerindeki başlangıçlar kümesi |
| S | : | B-V çiftlerindeki varışlar kümesi |
| \bar{S}_i | : | i bağındaki ortalama hız |
| seqlist | : | Etiket Düzeltme algoritmasındaki ardışık liste |
| SKD | : | Stokastik kullanıcı dengesi |
| SUAT | : | Sürekli ulaşım ağ tasarımı |
| t_i | : | i bağındaki trafik maliyeti |

| | | |
|------------------------|---|--|
| t_i^o | : | i bağındaki serbest akım maliyeti |
| $t_{i,g}^n$ | : | n. iterasyondaki g kromozomundaki i bağındaki trafik maliyeti |
| TEM | : | Toplam emisyon maliyeti |
| TYM | : | Toplam yatırım maliyeti |
| top | : | Durma koşulu için kullanılacak amaç fonksiyonu değeri |
| top_g | : | g kromozomunun amaç fonksiyonu değeri |
| TSM | : | Toplam seyahat maliyeti |
| u_i | : | i bağındaki maksimum kapasite genişletmesi |
| v_i | : | i bağındaki akış |
| x_i | : | i bağındaki trafik hacmi |
| $x_{i,g}^n$ | : | n. iterasyondaki g kromozomundaki i bağındaki trafik hacmi |
| $x_{j,i,G}$ | : | G jenerasyonunda i kromozomunun j geni |
| $y_{i,g}^n$ | : | n. iterasyondaki g kromozomundaki i bağındaki yardımcı eleman |
| Z | : | Üst seviye amaç fonksiyonu |
| Z_{son} | : | Üst seviye amaç fonksiyonu son değeri |
| ZPE | : | Zamanın para eşdeğerliği |
| z | : | Alt seviye amaç fonksiyonu |
| α_i, β_i | : | i bağıının maliyetinin fonksiyon parametreleri |
| α^n | : | Frank-Wolfe algoritmasının n. iterasyonundaki adım büyüklüğü |
| ϕ | : | Altın oran |
| ϕ^k | : | K tipindeki her bir birim kirleticinin parasal maliyeti |
| θ_i | : | i bağındaki birim kapasite genişletme miktarının parasal karşılığı |
| ρ | : | Dönüşüm faktörü |
| $\delta_{i,k}^{r,s}$ | : | Bağ-rota belirleme matrisi değişkeni |

ÖNSÖZ

“Karayolu Bağ Kapasite Artırımının Çevresel Faktörler Dikkate Alınarak Belirlenmesi” konulu bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalında “Yüksek Lisans Tezi” olarak hazırlanmıştır.

Çalışmam süresince hayata dair bilgi, tecrübe, fikir ve yardımlarını benden esirgemeyen, eğitimciliği ve çalışma azmiyle beni her daim motive eden çok kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Özgür BAŞKAN’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının başından sonuna kadar manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim, zor zamanlarımda koşulsuz yanımda olup bu çalışmanın her pozitif ilerlemesinde etkisini hissettiğim sevgili arkadaşım Yük. İnş. Müh. Müge ÇELİK’e teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında mutluluğu ve hüznü beraber yaşadığım, bu günlere beni getiren ve bu konuda her türlü fedakarlığı yapan aileme sonsuz teşekkürler.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Son yıllarda ekonomik, sosyal ve teknolojik imkanların artmasıyla birlikte yol kullanıcılarının hareketlilik ihtiyaçları da önemli derecede artış göstermiştir. Hareketliliğe bağlı olarak oluşan ulaşım talebindeki artış ise özellikle gelişmekte olan ülkelerde motorlu taşıt kullanımındaki artışı da beraberinde getirmiştir. Kentiçi ulaşım ağlarında özellikle son yıllarda giderek artan özel otomobil kullanımı sonucunda sürücüler trafik sıkışıklığı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan birçok olumsuz etki ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Bu olumsuz etkiler arasında seyahat süresinin artması, güvenlik düzeyi ve kapasite azalması gibi ölçülebilen etkilerin dışında sürücü psikolojilerindeki bozulma, çevresel etkiler ve enerji kaybı gibi ölçülmesi zor etkiler de bulunmaktadır (Başkan 2009). Bu olumsuz etkilerin en aza indirilebilmesi için kentiçi ulaşım ağlarının verimli bir biçimde işletilmesi gerekmektedir. Bilindiği gibi kentiçi ulaşım ağlarının performansının artırılması amacıyla mevcut bağların kapasitelerinin artırılması, ulaşım ağına yeni bağların eklenmesi, sinyal sürelerinin düzenlenmesi ve şerit yönlendirme gibi çözümler uygulanabilmektedir. Bu yaklaşımların içinde kapasite genişletmeleri birçok kentte yerel yöneticiler tarafından tercih edilebilmektedir. Ancak problemin çözümünün karmaşıklığı ve ekonomik kısıtlamalardan dolayı hayata geçirilmesinde zorluklarla karşılaşmaktadır.

Kentiçi ulaşım ağlarının kapasitesinin artırılması amacıyla ağa yeni bağların eklenmesi sonucunda sıkışıklığın kısa vadede azalması beklenmekle birlikte, bir süre sonra ağdaki taşıt sayısı artışı sebebiyle ulaşım ağında yeniden sıkışıklık etkisi görülebilmektedir. İnşa edilecek yeni bağların yüksek maliyetleri de dikkate alındığında, kullanıcılara yeni alternatif bağlar sunmak yerine, mevcut bağların kapasitelerinin iyileştirilmesi daha verimli bir çözüm olarak değerlendirilebilmektedir (Gülgeç 1998).

Dünyanın birçok ülkesinde olduğu gibi, ülkemizde de yüksek nüfus yoğunluğuna sahip olan kentler başta olmak üzere birçok kentte yerel yöneticilerin karşılaştığı en önemli sorunlardan birisi trafik problemidir. Trafik probleminden kaynaklı zaman kayıpları ile ortaya çıkan ekonomik ve çevresel zararları (egzoz emisyonları ve gürültü kirliliği) en aza indirmek için yerel yönetimler ve ulaştırma ağ karar vericileri yüksek maliyetli çözümler üretmek zorunda kalabilmektedirler (Çakıcı 2020).

Kentiçi ulaştırma ağlarında en fazla yatırım ve harcamanın yapıldığı altyapı uygulamalarından birisi bağ kapasitelerinin artırılması olarak ifade edilebilmektedir. Diğer taraftan ulaştırma ağlarında sıkışıklık sorunu yaşanan bağlar, özellikle durma ve kalkmaların, hızlanma ve yavaşlamaların en çok görüldüğü alanlar olduklarından dolayı bu bağlarda yakıt tüketimleri ve egzoz emisyonları oldukça yüksek olabilmektedir (Ma ve diğ. 2014). Bu sebeple, sıkışıklık etkisi altında hizmet veren ulaştırma ağları hem ekonomik hem de çevresel açıdan birtakım problemlere sebep olabilmektedir.

1.2 Problem Tanımı

Ulaşım ağ tasarımı, ağdaki ortalama taşıt gecikmelerinin azaltılması, enerji kaybının önlenmesi, emisyon azaltılması gibi iyileştirilmeleri hedeflemektedir. Kesikli Ulaşım Ağ Tasarımı (KUAT) problemi ve Sürekli Ulaşım Ağ Tasarımı (SUAT) problemi olarak iki ana başlıkta incelenebilmektedir. Kesikli ulaşım ağ tasarımı problemi, ağ tasarım probleminde ağa yeni bağlar ekleme/çıkarma problemini ele alırken, SUAT problemi ise ağın fiziki yapısından değişiklik yapılmadan ağdaki bağların kapasitelerini iyileştirmeyi hedeflemektedir.

Ulaşım ağ tasarımı, ulaştırma ağ tasarımcıları ile kullanıcılarının kararlarının etkileşim içinde olduğu varsayımı ile ulaştırma ağının performansının iyileştirilmesi olarak tanımlanabilmektedir. Bu tasarımın sonucunda ulaştırma ağına ait optimum ağ parametrelerinin bulunması ile ağ kullanıcılarının ulaştırma ağında en çok zaman kaybı yaşadığı bağlardaki gecikmeler minimum seviyeye indirgenebilmektedir (Başkan 2009).

Bu çalışmada iyileştirmeye aday bağların optimum kapasite genişletmelerinin belirlenmesi süreci SUAT problemi olarak ele alınmıştır. Çalışmada ele alınan SUAT probleminde mevcut ağın kapasitesini iyileştirecek şekilde bütçe kısıtları altında bağlara ait optimum genişletme miktarlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ulaşım ağ tasarımı probleminin çözümünde çok çeşitli tasarım parametreleri ile çalışıldığı için ulaştırma literatüründe ağ tasarım problemi kompleks bir problem türü olarak ifade edilmektedir. Tasarım sırasında probleme özgü karar değişkenleri için ilgili kısıtlar çerçevesinde en uygun değerlerin bulunması için birçok farklı algoritma ve yöntem kullanılmaktadır.

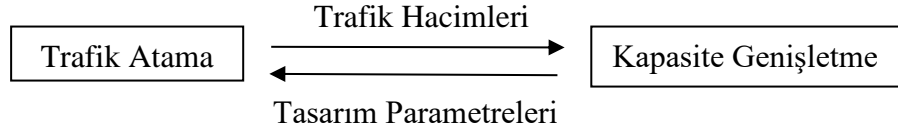
Kapasite genişletmelerini hesaplarken dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden birisi de ulaşım ağında oluşan emisyon miktarıdır. Literatürde farklı tasarım parametrelerini dikkate alan ve farklı yöntemlerle çözülmüş ulaşım ağ tasarımı problemi bulunmaktadır fakat ortaya çıkan sonuçların olumsuz çevresel etkileri çok az sayıda çalışmada dikkate alınmıştır. Yapılan iyileştirmenin faydalarının yanında bu iyileştirmelerden dolayı oluşacak çevresel kirliliğinde en aza indirilmesi gerekmektedir. Bunun için ağ tasarımı parametreleriyle birlikte emisyon miktarını da dikkate alarak ağ tasarımı probleminin çözülmesinin gerekliliği açıktır.

1.3 Amaç

Bu tez çalışmasının amacı, SUAT problemi olarak ifade edilen optimum bağ kapasite genişletmelerinin belirlenmesi amacıyla geliştirilen modele emisyon parametresini de dahil ederek farklı senaryolar altında değerlendirmeler yapmaktır. Çalışma sonuçları ile ulaştırma ağlarında bütçe kısıtları altında optimum bağ kapasite genişletmeleri belirlenirken kapasite artışı ile ortaya çıkacak olan ek emisyon değerlerinin de dikkate alınmasının gerekliliği vurgulanmak istenmektedir.

Bilindiği gibi bir ulaştırma ağındaki toplam seyahat süresi ve emisyon değerleri gibi parametreler ulaştırma ağını karakterize etmektedirler. Diğer taraftan ulaştırma ağında yapılan fiziksel, taktiksel ve işletimsel değişiklikler doğal olarak sürücü davranışlarını da etkilemekte ve değiştirmektedir. Ulaştırma ağında yapılan iyileştirmelerin sürücülerin rota seçim davranışlarına olan etkisini dikkate alabilmek için bu çalışmada SUAT problemi iki seviyeli programlama modeli olarak ifade

edilmiştir. İki seviyeli programlama modelinde alt seviyede trafik atama problemi çözülürken elde edilen denge bağ trafik hacimleri üst seviyedeki ağ tasarım problemine girdi olarak verilmektedir. Üst seviyede yeniden oluşturulan tasarım parametreleri de alt seviye problemi için bir girdi niteliği taşımaktadır. Üst ve alt seviye arasındaki etkileşim Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Trafik atama ve kapasite genişletme arasındaki ilişki



2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Ulaşım Ağ Tasarımı

Ulaşım ağ tasarımı problemi, ulaştırma ağı karar vericileri ve kullanıcıları olarak iki grup göz önüne alınarak karakterize edilebilmektedir. Her iki grubun kendine ait amaçları bulunmaktadır. Ağ kullanıcılarının bir kısmı kendi seyahat sürelerini (maliyet) minimuma indirmeyi amaçlamakta, bazı kullanıcılar ise seyahat maliyetini değil konforunu artırmayı amaçlamaktadırlar. Ağ karar vericileri ise ulaşım ağını maksimum performans elde edecek şekilde minimum maliyetle işletmek istemektedirler. Bilindiği gibi ulaşım ağ tasarımı sırasında kullanıcı tepkilerini dikkate alabilmek için çözülmesi gerekmektedir. Farklı kullanıcı amaçları doğrultusunda trafik atama problemi Deterministik Kullanıcı Dengesi (DKD) ve Stokastik Kullanıcı Dengesi (SKD) olarak iki şekilde formüle edilebilmektedir.

Wardrop (1952) tarafından öne sürülen DKD trafik atama modelinde herhangi bir B-V çiftini bağlayan tüm rotalardaki seyahat sürelerinin eşit ve kullanılmayan rotalardaki seyahat sürelerinden az ya da eşit olduğu kabulü yapılmaktadır. Bu durumda ağıdaki kullanıcıların tek taraflı olarak rotasını değiştirmesi durumunda kendi seyahat maliyetini azaltamamaktadırlar. Bu durum Wardrop'un ilk prensibi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu varsayıma göre ağ kullanıcılarının ulaşım ağı hakkında mükemmel bilgiye sahip olduğu ve B-V çiftleri arasında en az maliyetli rotayı tercih edeceği kabul edilmiştir. Ancak ağ kullanıcılarının yapacakları rota seçimlerinde birtakım hatalar olabileceği yaklaşımı altında öne sürülen SKD trafik atama modellerinin daha gerçekçi olduğu literatürde belirtilmektedir (Başkan 2009). Diğer bir ifadeyle sürücülerin bağ maliyetlerini algılamadaki farklılıklarına göre trafik atama modelleri deterministik ya da stokastik atama şeklinde ikiye ayrılmaktadır.

Ulaşım ağ tasarımı, minimum maliyetle ve ağın performansını maksimum yapacak şekilde ulaşım ağının işletilmesi olarak tanımlanabilmektedir. Herhangi bir ulaşım ağına yeni yollar eklenmesi veya mevcut yolların kapatılması şeklinde

tanımlanan KUAT problemi LeBlanc (1975) tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada, kentteki trafik tıkanıklığının en aza indirilebilmesi için hangi bağların iyileştirilmesi gerektiğini belirleme problemi ele alınmıştır. Bu problemi çözmek için doğrusal olmayan karışık tamsayı programlama modeli geliştirilmiştir.

Daganzo ve Sheffi (1977) çalışmalarında trafik atama modellerinin değerlendirmesini yapmış ve alternatif bir formülasyon önermiştir. Çalışmada SKD kavramı Wardrop'un (1952) kullanıcı dengesi teorisinin bir uzantısı olarak verilmiştir. Bu çalışma aynı zamanda mevcut stokastik trafik atama modellerinin zayıf yönlerini önerilen yaklaşımla iyileştirmeyi hedeflemektedir.

Abdulaal ve LeBlanc (1979) çalışmalarında ulaşım ağ tasarım problemini doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi olarak sürekli yatırım değişkenleri ile formüle etmişlerdir. Hesaplama sonuçlarında iyileştirmeler için örnek ulaşım ağında yaklaşık olarak önerilen tüm bağların mevcut kapasitesinin genişletilmesi, sıkışık bağlar için bu genişletmelerin çok daha yüksek olması gerektiği sonucunu ortaya koymuşlardır.

Sheffi ve Powell (1981) tarafından yapılan çalışmada deterministik ve stokastik trafik atama modellerinden elde edilen trafik hacimleri arasındaki benzerlik farklı tıkanıklık seviyelerinde incelenmiştir. Çalışmada denge şartlarını temsil etmek için Daganzo ve Sheffi (1977) tarafından önerilen probit tabanlı stokastik atama modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak küçük bir test ağında yaptıkları uygulama sonuçlarının en uygun atama metodolojisini seçebilmek için rehberlik edebileceği gösterilmiştir.

Davis (1994) tarafından yapılan çalışmada bağ trafik hacimlerinin SKD trafik ataması probleminin çözülmesi sonucu elde edilmesi gerektiği ifade edilerek SUAT problemi bir ulaşım ağında en uygun bağ kapasite genişletmelerinin belirlenmesi olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada SKD trafik ataması probleminin çözümü için azaltılmış eğim metodu ile quadratik programlama şeklinde iki farklı algoritma uygulanmıştır. Bu algoritmalar örnek ulaşım ağları üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar geliştirilen modelin herhangi bir ulaşım ağında optimum bağ kapasite genişletmelerinin belirlenmesi probleminin çözümünde SKD trafik atama modelinin kullanılmasının daha gerçekçi olduğunu göstermiştir.

Gao ve diğ. (2004) ulaşım ağ tasarımı probleminin çözümü için iki seviyeli programlama tekniğini kullanmışlardır. Bu çalışmada, üst seviye ulaşım ağı tasarımı modeli, alt seviye ise denge atama modeli olarak ifade edilmiştir. Önerilen model için duyarlılık analizine dayalı sezgisel bir çözüm algoritması tasarlanmıştır. Son olarak, modelin uygulamasını göstermek için basit bir sayısal örnek verilmiştir ve sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar duyarlılık analizi tabanlı sezgisel algoritmanın ağ tasarımı probleminin çözümünde oldukça etkili olduğunu göstermiştir.

Chiou (2005) çalışmasında iki seviyeli programlama tekniğinin SUAT probleminde optimum bağ kapasite genişletmelerinin hesaplanmasında kullanılabileceğini belirtmiştir. Üst seviyede karar değişkenleri olarak sistem performans kriterleri, seyahat maliyetleri ve kapasite genişletmesi için kullanılacak yatırım maliyetleri dikkate alınmış, alt seviyede ise deterministik kullanıcı dengesi bağ trafik hacimleri Wardrop (1952) dengesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Ağ kapasite probleminin çözümü için türev tabanlı iteratif bir yöntem kullanılarak oluşturulan iki seviyeli programlama modeli etkili bir yöntem olarak önerilmiştir. Sonuçlar geliştirilen modelin özellikle sıkışık ulaşım ağlarında denge atama problemlerinin çözümünde hesaplama verimliliği açısından önemli ölçüde iyileşme sağladığı gösterilmiştir.

Xu ve diğ. (2009) çalışmalarında SUAT problemini iki seviyeli bir program olarak formüle etmiştir. Üst seviyedeki amaç fonksiyonu, ağdaki toplam seyahat süresi ve bağ kapasitesi genişletmelerinin toplam yatırım maliyetleri olarak tanımlanmıştır. Alt seviyede ise problem, deterministik trafik atama modeli olarak formüle edilmiştir. Çalışmada Genetik Algoritma (GA) yöntemi diğer yöntemlerle kıyaslanmıştır. Sonuç olarak talebin az olduğu durumlarda GA'nın diğer kıyaslanılan yöntemlere göre çok daha uzun süreç gerektirdiği belirlenmiştir. Diğer yöntemlerin belirlenen optimum çözüme ulaşması için GA'dan daha fazla işlem yapacağı sonucu bulunmuştur.

Başkan (2013^b) çalışmasında Guguk Kuşu arama algoritmasını kullanarak ulaşım ağlarında optimum bağ kapasite genişletmelerini belirlemiştir. İki seviyeli programlama modeli kullanılarak, üst seviyede optimum bağ kapasite genişletmeleri bulunurken alt seviyede ise deterministik kullanıcı dengesi trafik ataması yapılarak denge bağ trafik hacimleri belirlenmiştir. Bu çalışmada, Guguk Kuşu arama

algoritması kompleks problemleri çözümedeki son zamanlardaki başarılı uygulamaları nedeniyle optimum bağ kapasitesi genişletmelerini bulmak için kullanılmıştır. Sayısal uygulamalar 16-bağ ve Sioux-Falls karayolu ağlarında yapılmış ve sonuçlar literatürdeki yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Guguk Kuşu arama algoritmasının herhangi bir ulaşım ağında optimum veya optimuma yakın bağ kapasite genişletmelerinin bulunmasında kullanılabileceğini göstermiştir.

Başkan ve Ceylan (2014) ulaşım ağ tasarımında Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) tabanlı çözüm yaklaşımlarını incelemiştir. Bu kapsamda, birleştirilmiş ulaşım ağ tasarımı ve kentiçi karayolu ağlarındaki yol kenarı park yerlerinin belirlenmesi problemlerinin çözümü için iki seviyeli programlama yaklaşımı ile DGA tabanlı modeller geliştirmişlerdir. Bu modellerde, optimum yatırım ve parklanma stratejileri üst seviyede araştırılırken, sürücü tepkilerini temsil eden trafik atama problemi ise Frank-Wolfe algoritması ve VISUM trafik modelleme yazılımı ile alt seviyede çözülmüştür. Problemin yapısından dolayı 0-1 ikili değişkenleri çözümde kullanılmıştır. Oluşturulan modelin etkinliğinin hesaplanabilmesi için elde edilen çözümler Sioux-Falls karayolu ağında test edilmiş ve sonuçlar DGA'nın ulaşım ağ tasarımında kullanılmaya uygun olduğunu göstermiştir.

Başkan (2014^a) çalışmasında ulaşım ağında optimum bağ kapasite genişletmelerini belirlemeye yönelik sezgisel yöntemleri değerlendirmiştir. Bu çalışmada, problemin çözümü için Armoni Araştırması, Yapay Arı Kolonisi ve DGA'nın performansları değerlendirilmiş ve örnek test ağlarında sayısal uygulamalar yapılmıştır. 18 bağdan oluşan ulaştırma ağı üzerinde tüm algoritmalar ile elde edilen sonuçlar, önceki çalışmalarda iki farklı sezgisel yöntemle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ek olarak, önerilen sezgisel yöntemlerin performansı, Sioux-Falls ağında literatürde bulunan diğer algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Sayısal uygulamalar, DGA'nın hem amaç fonksiyon değeri hem de gerekli hesaplama süresi açısından önerilen algoritmalarla karşılaştırıldığında iyi performans gösterdiğini açıkça göstermiştir.

Başkan (2014^b) tarafından yapılan çalışmada SUAT problemini çözmek için Armoni Araştırması algoritması kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen iki seviyeli programlama modelinin üst seviyesinde verilen amaç fonksiyonunu çözmek için

Armoni Araştırması algoritması kullanılmış, alt seviyede ise problem, trafik atama modeli olarak formüle edilmiş ve çözüm için Frank-Wolfe yöntemi kullanılmıştır. 18 bağlı ulaştırma ağı ve Sioux-Falls karayolu ağında sayısal uygulamalar yapılmıştır. Sonuçlar Armoni Araştırması algoritmasının, amaç fonksiyon değeri açısından optimum bağ kapasite genişletme değerlerinin belirlenmesinde her iki örnek ulaştırma ağında da karşılaştırılan diğer algoritmalarından daha etkili olduğunu göstermiştir.

Başkan ve Ozan (2015) sinyalize yol ağlarında bağ kapasite artırımı ile sinyal optimizasyonu problemlerini eşzamanlı olarak çözmüşlerdir. Bunun için iki seviyeli programlama tekniği kullanılarak üst seviyede ulaşım ağının toplam seyahat süresi ve yatırım fonksiyonundan oluşan amaç fonksiyonunun minimizasyonu yapılmıştır. Problemin çözümü için Armoni Araştırması Tekniği'nden faydalanılmıştır. Üst seviyeden sonuç olarak çıkan kapasite genişletmeleri ile alt seviyede trafik atama problemi çözülmüştür. Çalışmada Sioux-Falls test ulaşım ağındaki 24 kavşaktan 7 adedi ışıklı kavşak olarak kabul edilmiş ve bu kavşaklara bağlanan 16 bağ ise kapasite genişletmeye aday bağlar olarak belirlenmiştir. Sayısal uygulama sonucunda sinyal optimizasyonu ile bağ kapasite genişletme problemlerinin ortak çözümünün geliştirilen bu model ile yapılabileceği gösterilmiştir.

Ozan ve Başkan (2017) kentiçi ulaşım ağlarında en kısa rota uzunlukları kullanılarak tek yön düzenlemeleri üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmada trafik ataması sonucu ortaya çıkan rota seyahat sürelerine bağlı olarak elde edilen en kısa rota uzunlukları ve B-V taleplerini dikkate alan bir amaç fonksiyonu önerilmiştir. Her bir tek yön uygulaması için kullanıcıların tepkisini dikkate almak gerektiği çalışmada vurgulanmıştır. Bu sebeple bu çalışmada iki seviyeli sezgisel bir model geliştirilmiştir. Bu amaçla Armoni Araştırması Algoritması VISUM trafik yazılımına entegre edilmiştir. Doğrusal olmayan tamsayı programlama modeli olarak ifade edilen modelde bağların kullanılma durumu 0-1 kesikli değişkenleri ile temsil edilmiştir. Alt seviyede bu duruma bağlı olarak her bir farklı ulaşım ağı VISUM yazılımına aktarılıp trafik atama problemi çözümlenmiştir. Bu çözümlemenin sonucunda en kısa rota uzunlukları belirlenerek amaç fonksiyon değerleri hesaplanmıştır. Sayısal uygulama olarak literatürde sıkça kullanılan Sioux-Falls

karayolu ağı tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen modelin tek yön sistemlerinin planlanmasında kullanılabileceğini göstermiştir.

Başkan ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada SUAT probleminin çözümünde kullanılan iki seviyeli programlama modelinin performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla iki seviyeli modelin çözümü için Çoklu İyileştirme Stratejilerine Dayalı Diferansiyel Gelişim Algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma öncelikle küçük bir test ağında uygulanarak SUAT probleminin çözümünde global optimum çözüme ulaşabileceği gösterilmiştir. Ardından bu algoritmanın özellikle trafik hacminin fazla olduğu durumda performansını test etmek için 16 bağdan oluşan bir ulaştırma ağında uygulaması yapılmıştır. Son olarak Sioux-Falls ağı uygulaması yapılarak literatürdeki diğer algoritmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar bu algoritmanın diğer algoritmalarından çoğunlukla daha iyi sonuçlar verdiğini ve büyük ölçekli ulaşım ağlarında kullanılabileceğini göstermektedir.

2.2 Motorlu Taşıt Emisyonları

Penic ve Upchurh (1992) çalışmalarında geliştirdikleri program yardımıyla sinyal süre optimizasyonunu yapmayı hedeflemişlerdir. Geliştirilen program, sinyal sistemlerinin performansını gecikme ve en önemlisi yakıt tüketimi açısından iyileştirmek için kullanılmıştır. Çalışmada taşıt performansını dikkate alarak yakıt tüketimini tahmin etmek amaçlı bir model önerilmiştir. Geliştirilen model yakıt tüketimini göz önünde bulundurmanın yanı sıra, emisyon miktarları ve kullanıcı maliyetlerini de içerecek şekilde genişletilmiştir.

Szeto ve diğ. (2014) çalışmalarında bir ulaştırma ağının işletiminin yalnızca uygun maliyetli olması değil, aynı zamanda çevresel olarak sürdürülebilir olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu amaçla çalışmada hem taşıt emisyonlarını hem de gürültüyü dikkate alan yeni bir ağ tasarım problemi formüle edilmiştir. Önerilen ulaşım ağ tasarım problemi, iki seviyeli programlama modeli kullanılarak çözülmüştür. Alt seviye deterministik kullanıcı dengesi ataması olarak formüle edilmiştir. Üst seviye ise, bütçe kısıtları altında toplam emisyon, gürültü ve seyahat süresi maliyetlerini en aza indirmek için en uygun bağ kapasite genişletmelerinin

belirlenmesi olarak ifade edilmiştir. Geliştirilen algoritma, Kimyasal Reaksiyon Optimizasyonu (KRO) adlı yeni bir meta-sezgisel metot kullanılarak çözülmüştür. Geliştirilen çözüm algoritmasının performansını değerlendirmek için farklı talep seviyelerine sahip iki ulaştırma ağı kullanılmıştır. Sonuçlar ağ tasarım probleminin çözümünde emisyon, gürültü ve seyahat maliyetleri arasındaki ilişkilerin dikkate alınması gerektiğini ve KRO yönteminin çoğunlukla Genetik Algoritma yönteminden daha başarılı olduğunu göstermişlerdir.

Li ve diğ. (2014) çalışmalarında, sinyalize kavşaklardan oluşan ve sıkışıklık etkisi altındaki bir ulaştırma ağı için sürdürülebilir ve adil sinyal süre tasarımı için çok amaçlı iki seviyeli bir programlama modeli önermiştir. Önerilen modelin üst seviyesi, ağın yedek kapasitesini en üst düzeye çıkaran ve toplam emisyon miktarını en aza indirmeyi amaçlayan çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak önerilmiştir. Alt seviye ise deterministik kullanıcı dengesi problemi olarak temsil edilmiştir. Önerilen modelin çözümü için farklı birimlere sahip amaç fonksiyonlarını dikkate alabilmek amacıyla normalizasyon tekniği kullanılmış ve tavlama benzetimi yöntemi tabanlı sezgisel bir çözüm algoritması geliştirilmiştir.

Behnke ve diğ. (2017) çalışmalarında taşıt emisyonunu en aza indirme amaçlı olarak taşıt rotalama problemini formüle etmişler ve rota seçiminin etkilerini ortaya koymaya çalışmıştır. Yapay ve gerçek verilerle yapılan uygulamalar sonucunda, kent içi yollar ve otoyollar gibi farklı yol sınıfları göz önünde bulundurularak emisyon azaltılmasında rota seçiminin etkileri gösterilmiştir. Sonuçlar doğru rota planlaması ile ortalama olarak % 2-4 emisyon tasarrufu yapılabileceğini ortaya koymaktadır.

Yao ve diğ. (2018) izole kavşaklarda emisyon ve sinyal süre optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmada hız ve ivme verileri kullanılarak oluşturulan matematiksel ifadeler gecikme ve emisyon değerlerinin en küçüklenmesi sırasında kullanılmıştır. İlgili kısıtlar dikkate alınarak çok amaçlı optimizasyon modeli formüle edilmiştir. Üç adet talep seviyesi dikkate alınarak sayısal örnekler VISSIM programında çözülmüştür. Sonuçlar, kavşağa uygun olarak planlanan doğru bir sinyal süre planlamasının aynı anda taşıt gecikmesini ve emisyonları azaltabileceğini ortaya koymaktadır.

Kou ve diğ. (2018) çalışmalarında taşıt emisyonlarını dikkate alarak sinyal sürelerini optimize etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, taşıt emisyonları ve gecikmeleri arasındaki etkileşim saha verilerine dayanılarak analiz edilmiştir. İlk olarak farklı seyir, hızlanma, yavaşlama ve rölantide çalışma aralıkları göz önüne alındığında, ağır ve hafif taşıtların emisyon oranlarını tahmin etmek için taşıtların konum verileri toplanarak bu verilerden emisyon miktarı çıkarımı yapılmıştır. İkinci olarak gecikmeyi, durmaları ve emisyonları en aza indirmek için genetik algoritma tabanlı çok amaçlı sinyal süre optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Sonuçlar, Karayolu Kapasite El Kitabı (HCM 2010) ile karşılaştırıldığında, bu çalışmada önerilen model tarafından optimize edilen sinyal sürelerinin, taşıt gecikmelerini ve emisyon miktarlarını önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir.

Başkan (2019) çevre dostu sinyal süreleri için DGA tabanlı çok amaçlı iki seviyeli bir programlama modeli üzerinde çalışmıştır. Çalışmada bir yol ağının yedek kapasitesi maksimize edilirken aynı zamanda çevre dostu sinyal sürelerini elde etmeyi amaçlayarak taşıt emisyonlarının en aza indirilmesini hedefleyen çok amaçlı iki seviyeli bir programlama modeli sunulmuştur. Üst seviyede, çok amaçlı modelin Pareto-optimal çözümleri geliştirilen DGA tabanlı algoritma ile bulunmuştur. Alt seviyede ise kullanıcı tepkilerini temsil edebilmek için stokastik trafik atama problemi çözülmüştür. Sayısal uygulama için iki farklı sinyalize ulaştırma ağı seçilmiştir. İki kavşaktan oluşan test ulaşım ağı, ağırlıklandırma faktörünün önerilen çok amaçlı model üzerindeki etkilerini göstermek amacıyla kullanılmıştır. 96 adet B-V çiftine ve 9 adet sinyalize kavşağa sahip diğer ulaştırma ağı, önerilen modelin daha büyük ulaştırma ağlarındaki performansını incelemek amacıyla kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarının, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir bir şekilde ulaştırma ağlarının işletilmesi noktasında yerel yöneticilere faydalı olacağı düşünülmektedir.

3. PROBLEM FORMÜLASYONU

3.1 İki Seviyeli Programlama

SUAT problemi olarak ele alınan kapasite genişletme problemi için iki seviyeli bir programlama modeli kullanılması durumunda, üst seviye bütçe kısıtı altında seyahat süresi ve yatırım harcamaları toplamının en aza indirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Ulaştırma ağı kullanıcılarının üst seviyede yapılan kapasite genişletmesine verdiği tepkiler ise alt seviyede değerlendirilmektedir. Diğer bir deyişle, iki seviyeli programlama modeli kullanılarak kullanıcılar ve karar vericiler arasındaki karşılıklı etkileşim dikkate alınabilmektedir (Başkan ve diğ. 2018).

İki optimizasyon probleminin birleştirilmesi ve aralarındaki karşılıklı etkileşimin dikkate alınması olarak tanımlanabilen iki seviyeli programlama tekniğinin üst seviyesinde bulunan çözüm alt seviyeye bir girdi olarak aktarılmaktadır. Bu girdi aracılığıyla çözümlenen alt seviye probleminin sonucu da üst seviyeye girdi olarak aktarılmaktadır. Bu süreç gerekli durma kriteri sağlanana kadar tekrarlanarak problem çözümlenebilmektedir. Bu teknik genel haliyle Denklem (3.1)-(3.4)'deki gibi ifade edilebilmektedir (Başkan 2009).

$$G(x, y) \leq 0 \quad (3.1)$$

Kısıtına göre;

$$\min_x F(x, y) \quad (3.2)$$

Burada y aşağıda verilen optimizasyon probleminin herhangi bir x için çözümüdür.

$$g(x, y) \leq 0 \quad (3.3)$$

Kısıtına göre;

$$\min_y f(x, y) \quad (3.4)$$

İki seviyeli programlama modelinde Denklem (3.2) üst seviye problemi olarak ifade edilirken Denklem (3.4) ise alt seviye problemini temsil etmektedir. Denklem (3.1) ve (3.3) her iki seviyeye ait kısıtları göstermektedir. Bu tez kapsamında üst seviyede emisyon parametresini de dikkate alarak optimum bağ kapasite genişletme probleminin çözümü yapılırken alt seviyede ise trafik atama probleminin çözümü gerçekleştirilmiştir.

3.2 Sürekli Ulaşım Ağ Tasarımı

Ulaşım ağ tasarımı, bir dizi alternatif tasarım arasından en uygun tasarımı seçerek ulaşım ağlarının performansının iyileştirilmesi olarak tanımlanabilmektedir. Ulaşım ağ tasarım probleminin çözümünde, bütçe kısıtları altında belirli tasarım parametrelerinin optimum değerleri bulunmaya çalışılmaktadır. n adet tasarım olması durumunda, her tasarım için bir kabul etme/reddetme kararı dikkate alındığında, karşılaştırılabilecek 2^n adet alternatif ulaşım ağı karşımıza çıkmaktadır. Böyle bir problemi birkaç alternatif arasından çözmek çok zaman almasa da boyut arttıkça çözüm süresi ve hesaplama yükü ciddi miktarda artmaktadır. Hesap süresi ve yükünü azaltmak açısından ulaşım ağ tasarımı problemini çözmek için çeşitli yaklaşımlar son yıllarda önerilmiştir. Bunlar arasında çoğunlukla yakın global çözümü bulmayı amaçlayan meta-sezgisel metotların kullanımının etkili olduğu kanıtlanmıştır.

Ulaşım ağ tasarımı, karar değişkenlerinin farklı şekilde kullanılmasına bağlı olarak KUAT ve SUAT problemleri olarak ifade edilebilmektedir. KUAT probleminde genellikle ulaştırma ağının fiziksel yapısı değiştirilerek yol ağının performansı iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Karar değişkeni olarak 0-1 ikili değişkenlerinin kullanılması KUAT probleminde global ya da yakın global çözümlerin bulunmasını zorlaştırmaktadır. KUAT probleminin çözümünde sistem performansının iyileştirilmesi ve ulaştırma ağındaki toplam seyahat maliyetinin en küçüklenmesi amaçlanmaktadır (Sheffi 1985; Ceylan ve Ceylan 2013).

Bilindiği gibi SUAT problemi, ulaştırma literatüründe en çok incelenen problemlerden birisidir. SUAT problemindeki zorluk, iki grup karar vericiyi (ulaştırma ağı planlayıcısı ve kullanıcıları) çoğunlukla çelişen amaçlar doğrultusunda

değerlendirme gereksiniminden kaynaklanmaktadır. Bu tez kapsamında ağ tasarımı problemini formüle etmek için iki seviyeli bir programlama modeli kullanılmıştır.

Üst seviyede, ulaştırma ağı planlayıcısı, toplam seyahat süresindeki gecikmeleri en aza indirmek için ağıdaki bağların en uygun kapasite genişletmelerini belirlemeye çalışmaktadır. Alt seviyede ise, kullanıcılar bireysel seyahat sürelerini en aza indirecek şekilde deterministik kabullere uygun olarak rota seçim davranışı sergilediği kabulü yapılmaktadır.

SUAT problemi olarak değerlendirilen ve literatürde yaygın olarak çalışılan problemlerden olan optimum bağ kapasite genişletmelerini belirleme sürecinde amaç ağ kullanıcılarının rota seçim davranışını göz önünde bulundurarak toplam sistem maliyetini en aza indirmektir. Optimum bağ kapasite genişletmelerinin belirlenmesi problemi aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$TSM = \min_d Z_1(x, d) = \sum_{i \in A} t_i(x_i, d_i) x_i \quad (3.5)$$

$$TYM = \min_d Z_2(d) = \sum_{i \in A} \rho g_i(d_i) \quad (3.6)$$

$$0 \leq d_i \leq u_i, \quad \forall i \in A \quad (3.7)$$

Denklem (3.5)'de Toplam Seyahat Maliyeti (TSM) ve Denklem (3.6)'da kapasite genişletmenin Toplam Yatırım Maliyeti (TYM) gösterilmektedir. Z_1 ve Z_2 amaç fonksiyonlarını, x_i A bağlar kümesindeki i bağındaki trafik hacmini, t_i i bağındaki seyahat süresini ifade etmektedir. d_i ise i bağındaki kapasite genişletmesini ifade etmektedir. Kapasite genişletmesine ait kısıtlar Denklem (3.7)'de verilmiştir. Burada u_i , i bağındaki maksimum kapasite genişletme miktarını temsil etmektedir. $g_i(d_i)$ ise i bağındaki genişletmeye ait yatırım fonksiyonudur. Bu yatırım fonksiyonu ρ dönüşüm faktörü ile çarpılarak seyahat süresine dönüştürülmektedir.

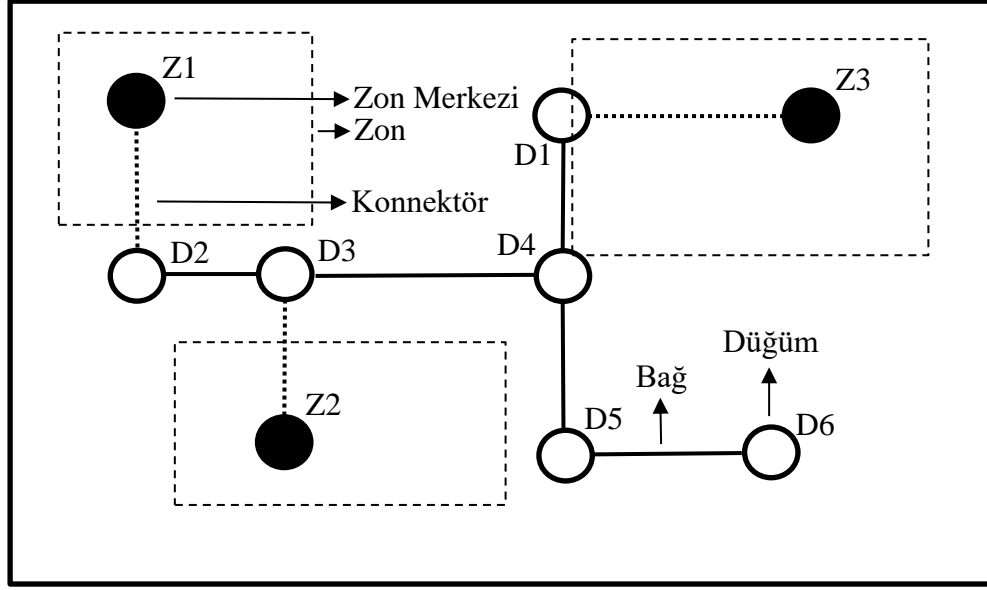
Denklem (3.5)-(3.6)'da verilen ifadeler iki seviyeli programlama modelinde üst seviyeyi temsil etmektedir. Emisyon parametresi ile dikkate alınacak olan bu üst seviye problemi, alt seviye problemine bağ kapasite genişletme değerlerini girdi olarak verecektir. Yeni tasarım parametreleri ile yapılan alt seviyedeki trafik

atamasının çözümü sonucu elde edilen denge bağ seyahat süreleri ve trafik hacimleri ise üst seviyeye girdi olarak verilecektir.

3.3 Trafik Ataması

Ulaştırma ağına başlangıç ve varış noktaları arasındaki seyahat edenlerin sayısının bilindiği ve B-V çiftlerinin farklı rotalarla bağlantılı olduğu varsayımı altında ulaşım talebinin rotalar arasında nasıl dağılacağı trafik atama probleminin çözümü ile belirlenmektedir (Sheffi 1985). Diğer bir deyişle ulaştırma ağındaki trafiğin ağına yüklenmesine trafik ataması denilmektedir. Trafik atamasının yapılmasında amaç, mevcut ulaştırma ağına durumunu belirlemek, ulaşım talebinin ağına yüklenmesinin ağına yaratacağı etkilerini analiz etmek ve gelecekte oluşacak olan seyahat talebinin ağına yüklendikten sonra ağına yapılacak iyileştirmelerin yapım önceliklerini ortaya koymak olarak özetlenebilmektedir. Diğer bir deyişle trafik atama probleminin çözümü ile mevcut ağına topolojisi ve B-V seyahat miktarına bağlı olarak bağ trafik hacimlerinin bulunması amaçlanmaktadır. Problemin çözümü için her bir ağına kullanıcısının B-V çiftleri arasındaki rotalar içinde en düşük maliyetli rotayı seçtiği yapıldığı varsayılmaktadır (Ceylan 2002).

Trafik ataması yapılırken B-V çiftleri arasındaki en kısa maliyetli rota seçilerek ulaşım talebi ilgili rota üzerine yüklenmektedir. Bu işlemlerin en uygun biçimde yapılabilmesi için tüm ulaşım ağına bağ ve düğümler olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Trafik ataması yapılırken iki çeşit düğüm bulunmaktadır. Bunlardan biri zon merkezi, diğeri de kavşak düğümleridir. Zon merkezleri, ulaştırma ağına içinde kendine ait karakteristiği olan, seyahat talebinin üretildiği merkezlerdir. B-V çiftleri zon merkezleri ile başlayıp zon merkezleri ile bitmektedir. Kavşak düğümleri ise ulaştırma ağındaki bağların birbirine bağlandığı yerlerdir. Düğümler ve bağlar örnek bir ulaştırma ağına Şekil 3.1'deki gibi gösterilebilmektedir.



Şekil 3.1: Ulaştırma ağı topolojisi

Seyahat süresini etkileyen faktörler, yolun fiziki yapısı, yoldaki trafik hacmi ve kavşaktaki gecikmeler olarak ifade edilebilmektedir. Bu faktörlerden dolayı mesafe olarak en kısa olan rota her zaman en düşük seyahat süresine sahip rota olamamaktadır. Mesafe olarak kısa olmasına rağmen üzerindeki gecikmelerden dolayı rotanın seyahat süresi daha fazla olabilmektedir. Bu durumda sürücüler daha uzun ama daha az süreli rotaları tercih edebilmektedirler (Başkan 2009).

Trafik atama problemi, ulaşım ağındaki seyahat edenlerin rotalara dağılımı sonrasında ulaşılan denge durumu şeklinde ifade edilerek matematiksel modeller kullanılarak çözümlenebilmektedir. Literatürde trafik atamasının iki farklı yaklaşımı bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan birincisi, B-V çiftleri arasında seyahat eden her bir sürücünün en düşük seyahat süresine sahip rotayı tercih ettiği Deterministik Kullanıcı Dengesi (DKD) olarak ifade edilen varsayımdır. Bu durumda denge koşulları altında herhangi bir B-V çiftindeki kullanılan tüm rotaların maliyetinin eşit olacağı, ayrıca bu rotaların maliyetinin kullanılmayan rotaların maliyetinden eşit ya da daha az olacağı kabulü yapılmaktadır. Diğer bir yaklaşım ise, sürücülerin rota seyahat sürelerini algılama hatalarını dikkate alan Stokastik Kullanıcı Dengesi (SKD) yaklaşımıdır. DKD kavramı deterministik trafik atamasının temelini oluşturmakta ve her sürücünün kendi B-V çifti arasındaki diğer kullanıcıların seçtiği rotaları da göz önüne alarak alternatif rotalardan en düşük seyahat süresine sahip rotayı seçmesi olarak tanımlanmaktadır. Wardrop'un (1952) iki koşulunun da sağlanması

durumunda bir ağdaki tüm B-V çiftlerinde deterministik kullanıcı dengesinden söz edilebilmektedir. Bu koşullar;

- ❖ Herhangi bir B-V çifti üzerindeki tüm kullanıcıların seyahat süreleri eşittir. Herhangi bir B-V çifti üzerindeki kullanılan tüm rotaların maliyeti kullanılmayan tüm rotaların maliyetinden eşit ya da daha azdır.
- ❖ Wardrop (1952)'un "sistem optimum" olarak bilinen ikinci ilkesi, denge koşulları altında ortalama seyahat süresinin minimum olacaktır. Bu durum, tüm sistemin en verimli şekilde kullanılmasını sağlamak için tüm kullanıcıların rotalarını seçerken işbirliği içinde hareket edeceği anlamına gelmektedir.

Bu kabullere göre ulaştırma ağı dengeye ulaştığında bir sürücünün kendi rotasını değiştirmesi ile seyahat süresini azaltması mümkün değildir. Diğer bir ifadeyle ulaştırma ağı hakkındaki tüm bilgilere ağ kullanıcılarının eşzamanlı olarak kusursuz bir biçimde erişebildiği düşüncesine deterministik yaklaşım denilmektedir. Ulaştırma ağı kullanıcılarının her bir B-V çifti için rota tercih seçim algılamalarının aynı seviyede olduğu kabul edilmektedir. Bu yüzden her B-V çifti arasındaki sürücülerin en düşük seyahat süreli rotayı tercih ettiği kabul edilmektedir (Ceylan 2009).

DKD yaklaşımı altında trafik atama problemi konveks olarak ifade edilebildiği için literatürde sıkça kullanılmaktadır. DKD yaklaşımı altında trafik atama problemi Beckman ve diğ. (1956) tarafından Denklem (3.8)'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\min_x z = \sum_{i \in A} \int_0^{x_i} t_i(w, d_i) dw \quad (3.8)$$

$$\sum_{k \in K} f_k^{rs} = D_{rs} \quad \forall r \in R, s \in S, k \in K_{rs} \quad (3.9)$$

$$x_i = \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} \delta_{i,k}^{rs} \quad \forall r \in R, i \in A, s \in S, k \in K_{rs} \quad (3.10)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall r \in R, s \in S, k \in K_{rs} \quad (3.11)$$

Burada z trafik atama probleminin temsil edildiği amaç fonksiyonudur. B-V çiftlerindeki başlangıçların kümesi R , varışların kümesi ise S olarak ifade edilmektedir. K_{rs} r - s B-V çifti arasındaki rotalar kümesini, f_k^{rs} r - s B-V çifti arasındaki k rotasındaki trafik hacmini ifade etmektedir. D_{rs} ise r - s B-V çiftindeki ulaşım talebini temsil etmektedir. Denklem (3.9) herhangi bir B-V çifti r - s arasında bulunan rotalardaki toplam trafik hacminin talebe eşit olması gerektiğini ifade etmektedir. $\delta_{i,k}^{rs}$ ise bağ-rota belirleme matrisi elemanıdır. Denklem (3.10) herhangi bir bağdaki trafik hacminin bu bağ kullanan rotalardaki trafik hacminin toplamına eşit olması durumunu göstermektedir. Denklem (3.11)'de ise tüm rota trafik hacimlerinin pozitiflik kısıtı verilmiştir.

Denklem (3.8)'de verilen t_i i bağının seyahat maliyetini temsil etmektedir. Bu değer Denklem (3.12)'de Amerikan Karayolları Bürosu tarafından belirlendiği şekliyle ifade edilmektedir (BPR 1964).

$$t_i(x_i, d_i) = \alpha_i + \beta_i \left(\frac{x_i}{d_i + c_i} \right)^4 \quad (3.12)$$

Burada c_i i bağının kapasitesini belirtirken α_i ve β_i bağ maliyet fonksiyonu parametreleri olarak ifade edilmektedir (Başkan 2015).

3.4 Emisyon Miktarının Belirlenmesi

Motorlu taşıtlar, insan sağlığını ve çevreyi etkilediği için ulaşım planlamacıları, sadece ulaşım ağının performansını artırmayı değil, aynı zamanda çevresel maliyetleri azaltma stratejilerini de karar verme sürecine dahil etmelidirler. Bir ulaştırma ağının tasarımı sadece düşük maliyetli olmamalı, aynı zamanda çevresel olarak sürdürülebilir olmalıdır. Sürdürülebilir bir ulaştırma ağına sahip olmak için, karayolu trafiğinin çevre üzerindeki etkilerinin probleme dahil edilmesi ve ulaştırma ağı tasarımında çevresel sürdürülebilirliğin dikkate alınması gerekmektedir (Szeto ve diğ. 2014).

Enerji kullanımında önemli bir pay sahibi olan ulaştırma sektörünün, artan ulaşım talebi ile sera gazı emisyonlarındaki payı da giderek yükselmektedir. Türkiye'de 2018 yılında ulaştırma sektörü kaynaklı karbondioksit (CO₂) emisyonları

yaklaşık 82,7 milyon ton, metan gazı (CH₄) emisyonları yaklaşık 16 bin ton ve Azot Protoksit (N₂O) emisyonları da 4,4 bin tondur. Tüm bu emisyon miktarının toplam CO₂ eşdeğeri yaklaşık olarak 84,5 milyon tondur. Toplam sera gazı emisyonlarının 520,9 milyon ton karbondioksit eşdeğeri olduğu düşünüldüğünde ulaştırma sektörü kaynaklı emisyonlar yaklaşık %16,2 gibi ciddi bir paya sahiptir (TÜİK, 2020). Bu nedenle ulaştırma ağı karar vericilerinin mevcut ya da tasarlanacak ulaştırma ağına oluşacak toplam emisyon maliyetini hesaplaması birçok açıdan önemlidir. Bir ulaştırma ağındaki Toplam Emisyon Maliyeti (TEM) dolar cinsinden Szeto ve diğ. (2014) tarafından aşağıda verildiği gibi ifade edilebilmektedir.

$$TEM = \sum_{i \in A} E_i v_i \quad , \quad \forall i \in A \quad (3.13)$$

Burada E_i bir taşıtın i bağındaki toplam oluşturduğu emisyon miktarını ve v_i (ta/sa) i bağındaki trafik hacmini ifade etmektedir. A bağlar kümesinin i bağındaki emisyon miktarı olan E_i Denklem (3.14)'de verilmiştir.

$$E_i = \sum_{k \in A} \phi^k Q_i^k \quad , \quad \forall i \in A \quad (3.14)$$

Kirletici olarak hidrokarbonlar (HC), nitrojen oksitler (NO_x) ve karbon monoksit (CO) şeklinde üç çeşit kirlilik parametresi bulunmaktadır. Penic ve Upchurch (1992) farklı kirletici türlerinin miktarının bir i bağındaki ortalama hız \bar{S}_i ve bağı uzunluğuna (l_i) bağılı olarak değişiklik göstereceğini belirtmiştir. Her bir kirletici miktarı Denklem (3.15)-(3.17)'de verildiği şekliyle hesaplanabilmektedir.

$$CO \text{ için; } Q_i^{CO} = \frac{3.3963e^{0.014561\bar{S}_i l_i}}{1000\bar{S}_i} \quad , \quad \forall i \in A \quad (3.15)$$

$$HC \text{ için; } Q_i^{HC} = \frac{2.7843e^{0.015062\bar{S}_i l_i}}{10000\bar{S}_i} \quad , \quad \forall i \in A \quad (3.16)$$

$$NOx \text{ için; } Q_i^{NOx} = \frac{1.5718e^{0.040732\bar{S}_i l_i}}{10000\bar{S}_i} \quad , \quad \forall i \in A \quad (3.17)$$

Denklem (3.14)'deki ϕ^k , k tipindeki her bir birim kirliliğin parasal maliyetidir. Q_i^k ise A bağlar kümesindeki i bağındaki k tipinde oluşan kirlilik miktarıdır. İnsan sağlığına zararlı oldukları ve iklim değişikliğine neden oldukları için bunlar kirletici

olarak kabul edilmektedirler. CO, insanların kalp hastalıklarına sahip olma riskini artırmakta ve psikomotor fonksiyonları engelleyebilmektedir. HC, sağlığa zararlı etkilere ve sera gazı etkilerine neden olan yer seviyesinde ozon ve duman oluşturmaktadır. NOx, ise ciddi solunum problemlerine neden olan nitrik asit oluşturmaktadır (Szeto ve diğ. 2014).



4. MODEL GELİŞİMİ

4.1 Giriş

Bir ulaştırma ağında optimum bağ kapasite genişletmelerinin belirlenmesi amacıyla emisyon ile toplam ağ seyahat süresinin etkili parametreler olarak birlikte ele alınması sürdürülebilir bir ağ tasarımının sağlanabilmesi açısından oldukça önemlidir. Çalışmada optimum bağ kapasite genişletme değerleri belirlenirken emisyon miktarları da dikkate alınmış ve üst seviye amaç fonksiyonu Denklem (4.1)'de verilmiştir.

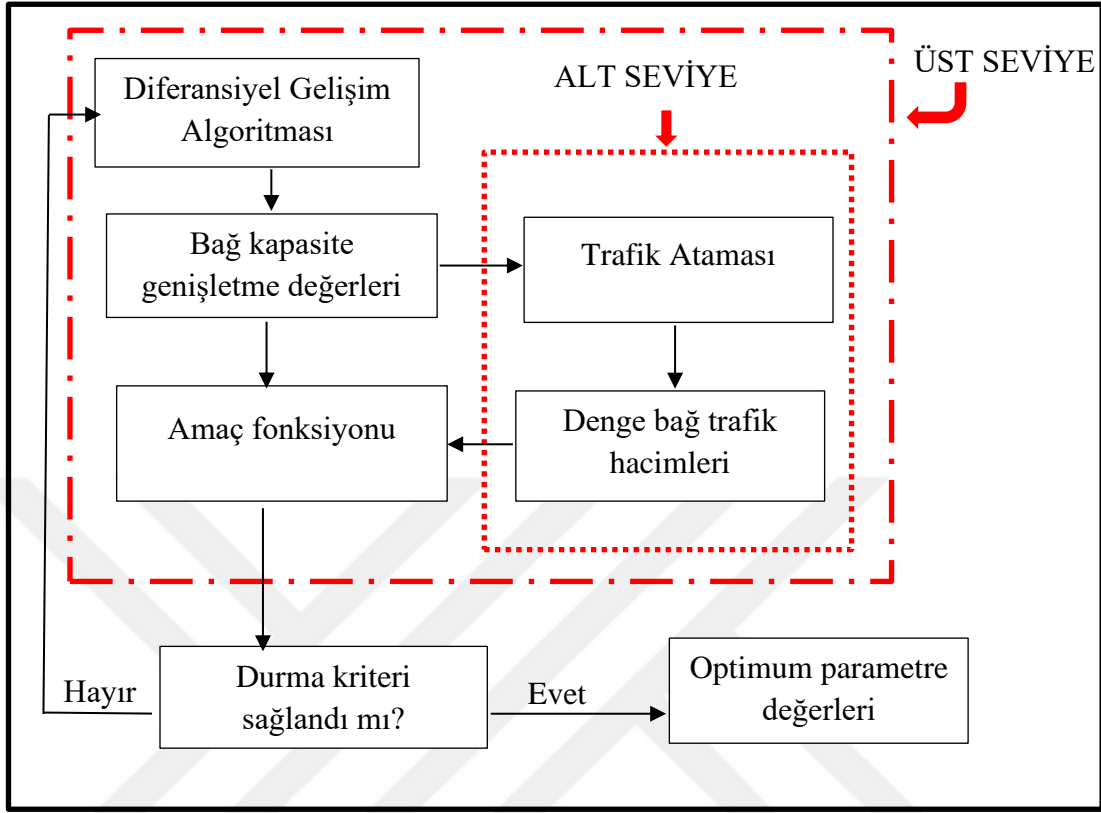
$$\min_d Z = TEM + ZPE * (TSM + TYM) \quad (4.1)$$

Burada TEM toplam emisyon maliyetini, TSM toplam seyahat maliyetini ve TYM ise toplam yatırım maliyetini ifade etmektedir. Toplam seyahat ve yatırım maliyetleri ile emisyon maliyetinin bir arada değerlendirilmesi için değişkenlerin birimleri açısından düzeltme yapılması gerekmektedir. Bu amaçla *ZPE* parametresi kullanılmıştır. Zamanın parasal eşdeğerliğini ifade eden *ZPE* parametresinin değeri 3,88 Amerikan doları olarak Calfee ve Winston (1998) tarafından yapılan çalışmada belirlenmiştir. Bu tez kapsamında bağ kapasite genişletmesi ve emisyon probleminin birlikte çözülebilmesi için DGA tabanlı iki seviyeli bir programlama modeli geliştirilmiştir.

4.2 İki Seviyeli Programlama Modeli

Bu bölümde SUAT problemini çevresel faktörleri de dikkate alarak çözmek için geliştirilen DGA tabanlı iki seviyeli programlama modeli detaylı olarak verilmiştir. İki seviyeli programlama modelinde alt seviyede trafik ataması yapılarak elde edilen denge trafik hacimleri üst seviyede girdi olarak kullanılmaktadır. Üst seviyede ise Denklem (4.1)'deki verilen amaç fonksiyonunun en küçük değerini

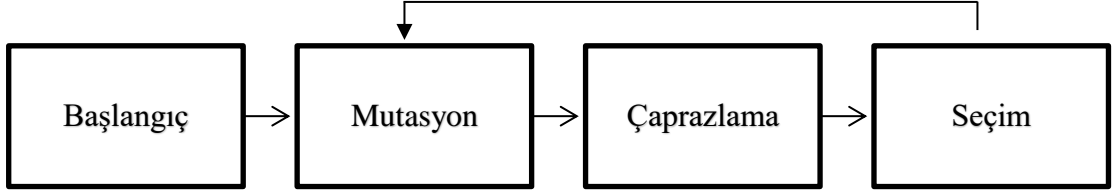
belirlemek amacıyla olası çözüm kümeleri içinde arama yapılmaktadır. Şekil 4.1’de geliştirilen iki seviyeli model verilmiştir.



Şekil 4.1: İki Seviyeli Programlama Modeli

Doğrusal olmayan problemlerin çözümü için geliştirilmiş birçok teknik literatürde mevcuttur. Özellikle veri tiplerine ve değişken sayısına bağlı olarak problemlerin zorluk dereceleri de artabilmektedir. Bu tip problemlerin deterministik yöntemlerle çözümü, problemin yapısına bağlı olarak hem çözüm sürecinde hem de modellemede zorluklar içerebilmektedir. Bunların üstesinden gelebilmek için sezgisel yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen iki seviyeli programlama modelinin çözümü için DGA kullanılmıştır. DGA, Storn ve Price (1995) tarafından geliştirilen, özellikle sürekli verilerin söz konusu olduğu problemlerde etkin sonuçlar verebilen, işleyiş ve operatörleri itibarıyla genetik algoritmaya benzeyen popülasyon temelli sezgisel optimizasyon tekniklerinden birisidir (Keskintürk 2006). Şekil 4.2’de gösterildiği gibi DGA’da çaprazlama, mutasyon ve seçim operatörleri kullanılmaktadır. Her bir operatör popülasyondaki tüm bireylere (çözüm vektörleri) sırayla uygulanmakta ve gelişime dayalı bir strateji ile problemin çözümüne kısa sürede ulaşılmaktadır. İlk olarak başlangıç popülasyonundan rastgele bireyler seçilip

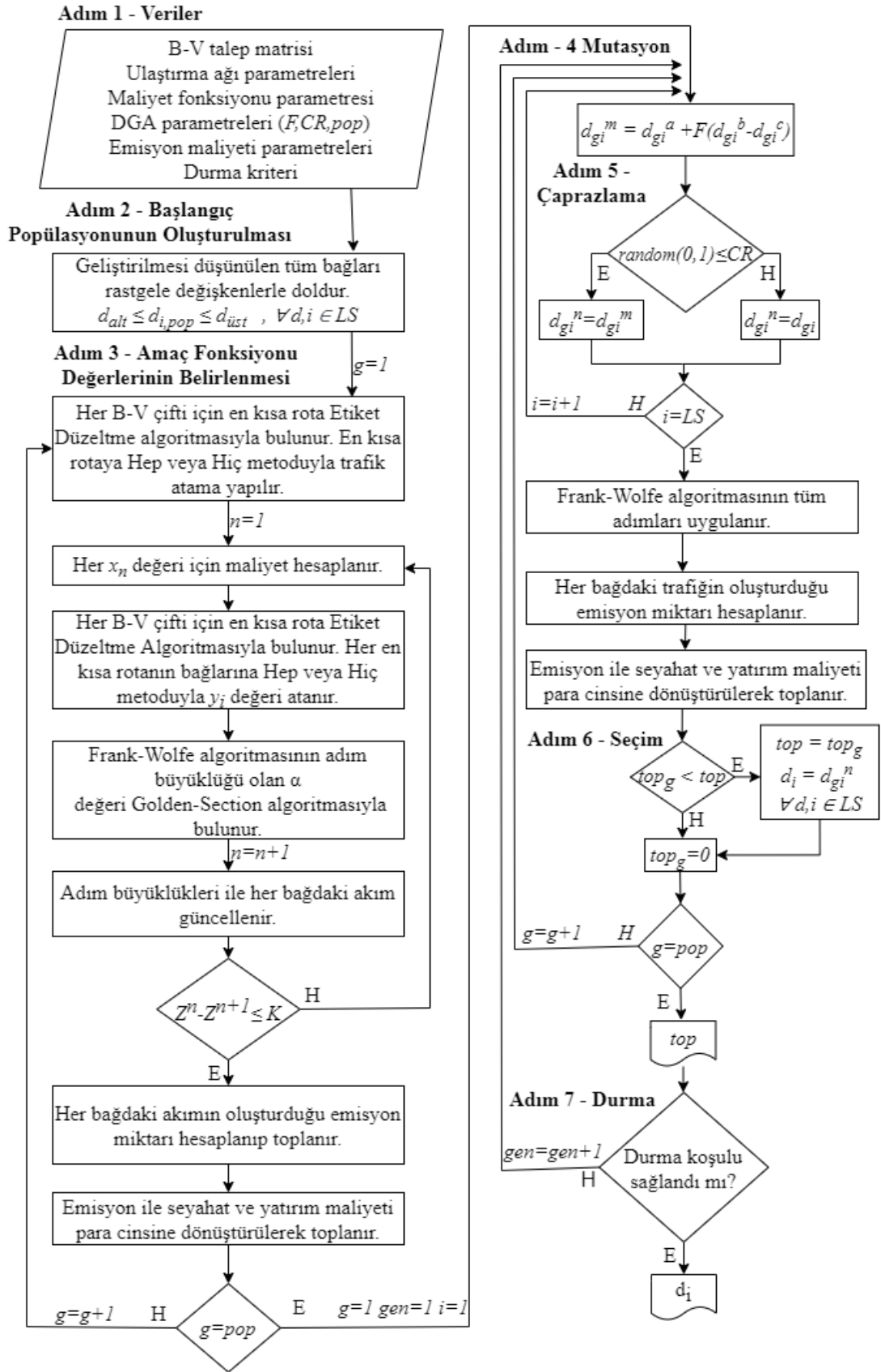
çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanılarak yeni bir birey elde edilmektedir. Mevcut çözüm vektörlerinin amaç fonksiyon değerleri ile yeni oluşturulan bireyin amaç fonksiyonu değeri karşılaştırılıp seçim operatörü de kullanılarak en iyi olan birey bir sonraki popülasyona aktarılmaktadır. Bu şekilde tüm popülasyon, istenilen durma koşuluna ulaşıncaya kadar mutasyon, çaprazlama ve seçim aşamalarından geçerek iyileştirilmeye çalışılmaktadır.



Şekil 4.2: Diferansiyel Gelişim Algoritması Adımları

Geliştirilen modele ait algoritma adımları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Adım 1 - Veriler: DGA çözüm sürecinde kontrol amaçlı olarak üç adet parametre kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi tüm toplum tabanlı sezgisel metotlarda kullanılan ve toplum büyüklüğünü temsil eden popülasyon parametresidir (pop). Bu değer, mevcut problem için gereken çözüm vektörlerinin sayısını ifade etmektedir. Bu tez kapsamında pop değeri 10 olarak alınmıştır. Algoritma içinde kullanılan ve mutasyon faktörünü ifade eden F ise toplum içinden rastgele seçilen ve birbirinden farklı 3 adet çözüm vektöründen yeni bir vektör üretilmesi amacıyla kullanılan bir parametredir. F parametresi için Storn ve Price (1995) kullanım aralığını [0.5-1] olarak tavsiye etmiştir. Bu tez kapsamında F parametresi 0,8 olarak kullanılmıştır. Son parametre olan çaprazlama oranı CR ise mutasyon sonucu elde edilen vektörün dikkate alınma oranı olarak kullanılmaktadır. CR parametresi için Storn ve Price (1995) kullanım aralığını [0.8-1] olarak tavsiye etmiştir. Bu tez kapsamında CR parametresi 0,8 olarak kullanılmıştır (Başkan 2013^a).



Şekil 4.3: DGA tabanlı İki Seviyeli Model Adımları

Adım 2 - Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması: DGA’da başlangıç popülasyonunun oluşturulması kullanıcıya bağlı olmaktadır. Ancak popülasyon sayısı (pop) 3 ya da daha az olamamaktadır. Çünkü mutasyon ve çaprazlama yapılabilmesi için bir birey dışında iki farklı bireye daha ihtiyaç bulunmaktadır. Başlangıç popülasyonu her bir parametrenin belirlenen alt ve üst sınırları dahilinde Denklem (4.2)’de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$d_{i,pop} = d_{alt} + rand_i(0,1) * (d_{üst} - d_{alt}) , \forall i \in A \quad (4.2)$$

Buradaki d_{alt} ve $d_{üst}$ karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını belirtmektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen modelde kullanılan karar değişkeni (d) kapasite genişletme miktarıdır. Bu kapasite genişletmesinin sınırları $d_{alt} = 0$, $d_{üst} = 10$ olacak şekilde kullanılmıştır. Genişletmeye aday bağ sayısı LS olarak ifade edilmektedir $i = \{1, 2, \dots, LS\}$. Bu şekilde toplamda $LS * pop$ kadar karar değişkeni alt ve üst sınırlar içinde rastgele oluşturulmaktadır.

Adım 3 – Amaç Fonksiyonu Değerlerinin Belirlenmesi:

Başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra popülasyonun içindeki çözüm vektörlerinin amaç fonksiyonu değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için mutasyona ve çaprazlamaya maruz kalmamış tüm bireylerin değerlendirilmesi ve rastgele oluşturulmuş bağ kapasite genişletmelerini kullanarak öncelikle DKD trafik atama probleminin çözülmesi ve denge bağ trafik hacimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla çalışmada Frank-Wolfe (FW) algoritması kullanılmıştır. FW algoritması, kısıtlı konveks optimizasyon problemleri için kullanılan iteratif birinci dereceden bir optimizasyon algoritmasıdır. Metot 1956 yılında Marguerite Frank ve Philip Wolfe tarafından önerilmiştir. Her bir iterasyonda, Frank-Wolfe algoritmasında amaç fonksiyonunu doğrusal hale getirilmekte ve fonksiyonun en küçük değeri iteratif olarak elde edilmektedir (Sheffi 1985). FW algoritması adımları aşağıda özetlenmiştir;

- *Adım 1:* Başlangıç. Bu adımda her bir B-V çifti arasındaki talep en kısa rotaya “Hep veya Hiç” (Bkz. Ek-A) metodu ile atanmaktadır. Bu amaçla B-V çiftleri arasındaki en kısa rotalar “Etiket Düzeltme” (Bkz. Ek-A) algoritması ile bulunmaktadır. Bu atama işleminin ardından $n=1$ olacak şekilde sayaç başlatılmakta ve Adım 2’ye geçilmektedir.

- *Adım 2: Güncelleme.* Adım 1’de yapılan atama sonucu elde edilen trafik hacimlerinin bağlı olarak bağ maliyetleri hesaplanmaktadır.

$$t_{i,g}^n = t_i^0(x_{i,g}^n) , \forall i \in A \quad (4.3)$$

t_i değeri i bağındaki x_i trafik hacminden dolayı oluşan seyahat maliyetini ifade etmektedir. t_i^0 değeri ise i bağının serbest akım maliyetidir. FW algoritmasının durma koşulu sağlanmadığında $n=n+1$ yapılarak bu adıma dönülmektedir.

- *Adım 3: Yön Bulma.* Adım 2’de oluşan bağ maliyetlerine göre “Hep veya Hiç” ataması yapılarak dışsal trafik akımları $y_{i,g}^n$ elde edilmektedir.
- *Adım 4: Adım büyüklüğü (α^n)* aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$\min \sum_i \int_0^{x_{i,g}^n + \alpha^n (y_{i,g}^n - x_{i,g}^n)} t_{i,g}^n(\omega) d\omega , \forall \alpha , 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (4.4)$$

Denklem (4.4)’i çözen α değerini hesaplamak için Golden Section algoritması (Bkz Ek-A) kullanılmıştır.

- *Adım 5: Hareket.* Adım 4’te hesaplanan α^n değeri ile her bir bağdaki trafik hacimleri Denklem (4.5) ile güncellenmektedir.

$$x_{i,g}^{n+1} = x_{i,g}^n + \alpha^n (y_{i,g}^n - x_{i,g}^n) , \quad \forall i \in A \quad (4.5)$$

- *Adım 6: Yakınsama Kontrolü.* Belirlenen durma kriteri sağlanırsa algoritma sonlanır. Aksi takdirde Adım 2’ye dönülerek tüm işlemler tekrarlanmaktadır.

$$\sum_i x_{i,g}^n - \sum_i x_{i,g}^{n+1} \leq K \quad (4.6)$$

FW algoritması sonlandırıldıktan sonra elde edilen denge bağ trafik hacimlerine göre emisyon miktarları Denklem (3.15)-(3.17) kullanılarak hesaplanmaktadır. Her kirleticinin ϕ^k değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir (Mathew 1999).

Tablo 4.1: Belirli emisyon faktörlerinin parasal değerlemesi

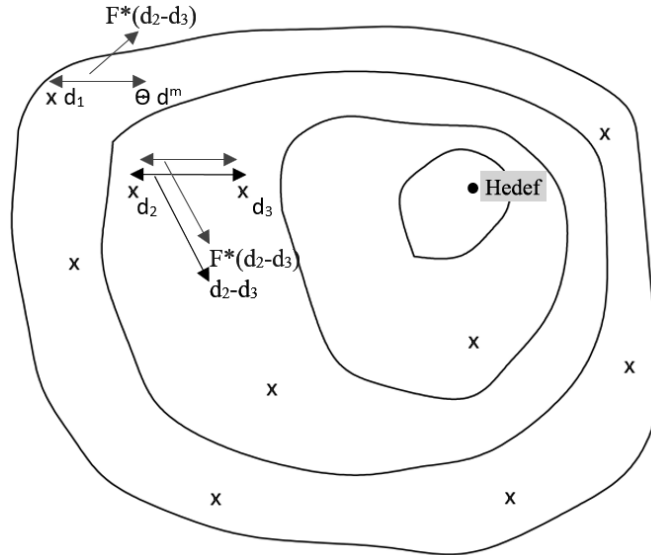
| | CO | HC | NO _x |
|---------------------|------|------|-----------------|
| ϕ^k (dolar/kg) | 0.51 | 1.36 | 1.03 |

Elde edilen emisyon miktarları, denge bağı trafik hacimleri ve bağı seyahat süreleri kullanılarak popülasyondaki tüm bireyler için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanmaktadır.

Adım 4 – Mutasyon: Mutasyon adımı, popülasyon içindeki bireylerin (kromozom) bazı genleri üzerinde değişiklikler yapılarak farklı bireyler oluşturulması amaçlanmaktadır. Bu değişiklikler sayesinde çözüm uzayı içinde optimum çözüme ulaşmak amacıyla arama yapılmaktadır. Mutasyona uğramış birey ile optimum sonuca ulaşılabilmesi için, doğru yönde ve doğru miktarda hareketi sağlayacak biçimde değişiklikler yapılması gerekmektedir. Mutasyon işlemi Denklem (4.8)'de verildiği gibi gösterilmektedir.

$$d_i^m = d_i^1 + F(d_i^2 - d_i^3), \quad \forall i \in A \quad (4.8)$$

DGA'da, mutasyona uğrayacak olan birey dışında ve birbirlerinden farklı olan üç adet birey popülasyon içinden rastgele olarak seçilmektedir (d_i^1, d_i^2, d_i^3). Seçilen bireylerden ikisinin farkı alınarak F parametresiyle çarpılmakta ve elde edilen ağırlıklandırılmış fark bireyi ile seçilen üçüncü birey (d_i^1) toplanmaktadır. Böylece mutasyon sonucu çaprazlamada kullanılacak olan yeni birey diğer bir ifadeyle mutasyona uğramış birey elde edilmektedir (Keskintürk 2006). Şekil 4.4'te mutasyon işlemi gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Mutasyon Sonucu Üretilen Fark Kromozomu (d^m)

Adım 5 – Çaprazlama: Mutasyon sonucu elde edilen yeni birey (d_i^m) ile mevcut bireylerden biri karıştırılarak çaprazlanmış birey elde edilmektedir. Bu birey CR olasılıkla mutasyona uğramış bireyden, $1-CR$ olasılıkla mevcut bireyden seçilmektedir. 0 ile 1 arasında üretilen rastgele sayı CR 'den küçükse çaprazlanmış kromozomdan (d_i^m), aksi takdirde mevcut bireyden seçilmektedir. Burada amaç olabildiğince genin mevcut bireyden daha çok mutasyona uğramış bireyden alınmasını sağlamaktır. Tüm genlerin mutasyona uğramayan bireyden alınmaması için çaprazlanma sırasında en az bir gen mutlaka mutasyona uğramış bireyden seçilmektedir. Çaprazlama işlemi Denklem (4.9)'da gösterilmiştir.

$$d_{g,i}^n \begin{cases} d_i^m & \text{eğer } rand[0,1] \leq CR \\ d_i^1 & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (4.9)$$

Popülasyon içindeki sırasıyla tüm bireylere (çözüm vektörleri) uygulanan mutasyon ve çaprazlama adımları sonrasında çaprazlanmış birey için amaç fonksiyonu değerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Adım 6 – Seçim: Seçim aşamasında mevcut birey ve çaprazlanmış bireyin amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırılarak daha küçük amaç fonksiyonu değeri veren birey popülasyona dahil edilmektedir. DGA'da karşılaştırma bire bir yapıldığından seçim için karmaşık prosedürü olan seçim operatörlerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Denklem (4.10)'da görüldüğü gibi eğer çaprazlanmış bireye ait amaç fonksiyonu değeri mevcut bireye ait değerden daha iyiyse bu birey mevcut bireyin yerine popülasyon içine dahil edilmektedir aksi halde mevcut bireyler yerini korumakta ve yeni bir mutasyonlu birey elde edebilmek için algoritma mutasyon aşamasına dönmektedir.

$$top \begin{cases} top_g, d_i^g = d_i^n & top_g \leq top \\ top & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (4.10)$$

Adım 7 – Durma: Bu tez kapsamında algoritmanın durma kriteri olarak $[(\max(top) - \text{ort}(top)) / \text{ort}(top)] \leq 0.0002$ ifadesi belirlenmiştir. Durma kriterinin sağlanmadığı durumda algoritmanın jenerasyon sayısı 1 artırılarak mutasyon

adımından tekrar başlanmaktadır. Durma kriteri sağlandığında her bir bağı kapasite genişletmesi miktarı çıktı olarak elde edilmektedir.

4.3 Senaryolar

Bu tez kapsamında DGA tabanlı geliştirilen iki seviyeli programlama modeli ile ağ toplam seyahat süresi, emisyon salınım değerleri ve bütçe kısıtları dikkate alınarak 4 farklı senaryo oluşturulmuştur. Geliştirilen senaryolara ilişkin amaç fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

- **Senaryo 1**

Bu senaryoda amaç fonksiyonu olarak sadece emisyon salınımlarının oluşturduğu maliyet dikkate alınmıştır. Amaç fonksiyonu Denklem (4.11)'de gösterilmiştir.

$$\min_d Z = TEM \quad (4.11)$$

Bu senaryonun uygulanmasının amacı bir ulaştırma ağında optimum bağ kapasite genişletmeleri hesaplanırken bütçe kısıtlamaları ve seyahat süresi değişkenleri dikkate alınmadığı durumda kapasite genişletme değerlerini elde etmektir.

- **Senaryo 2**

İkinci senaryoda amaç fonksiyonu hesaplanırken emisyon salınımlarına ait maliyet ve ağdaki kapasite genişletmesine ilişkin bütçe kısıtı dikkate alınmış ve amaç fonksiyonu Denklem (4.12)'de gösterilmiştir.

$$\min_d Z = TEM + ZPE * (TYM) \quad (4.12)$$

Senaryo 2 ile optimum bağ kapasite genişletmeleri hesaplanırken yatırım bütçe kısıtları altında ağdaki toplam emisyon salınımlarını en küçüklemek amaçlanmıştır. Ağdaki toplam seyahat süresinin dikkate alınmadığı bu senaryoda

bütçe ve çevresel koşullar dikkate alınarak optimum bağ kapasite genişletmeleri belirlenmiştir.

- **Senaryo 3**

Bu senaryoda kullanılan amaç fonksiyonunda emisyon salınımlarına ait maliyet değeri dikkate alınmamaktadır. Denklem (4.13)'de verilen Senaryo 3'de literatürde sıklıkla çözülen SUAT probleminin sonuçlarının elde edilmesi beklenmektedir.

$$\min_d Z = ZPE * (TSM + TYM) \quad (4.13)$$

- **Senaryo 4**

Bu senaryoda emisyon salınımları, bütçe kısıtları ve toplam seyahat süresi beraberce dikkate alınmıştır. Amaç fonksiyon Denklem (4.14)'de gösterilmiştir.

$$\min_d Z = TEM + ZPE * (TSM + TYM) \quad (4.14)$$

Bu tez çalışmasının ana amacı olan optimum bağ kapasite genişletmelerinin belirlenmesi aşamasında olumsuz çevresel etkilerin dikkate alınması durumu bu senaryoda dikkate alınmıştır. Bu amaçla Senaryo 4'de mevcut ulaşım talebine ek olarak talep değişimine karşı oluşacak farklı sonuçların analiz edilmesi amacıyla farklı talep seviyeleri altında çözümler tekrarlanmıştır. Senaryolara ait sayısal uygulamalar bir sonraki bölümde verilmiştir.

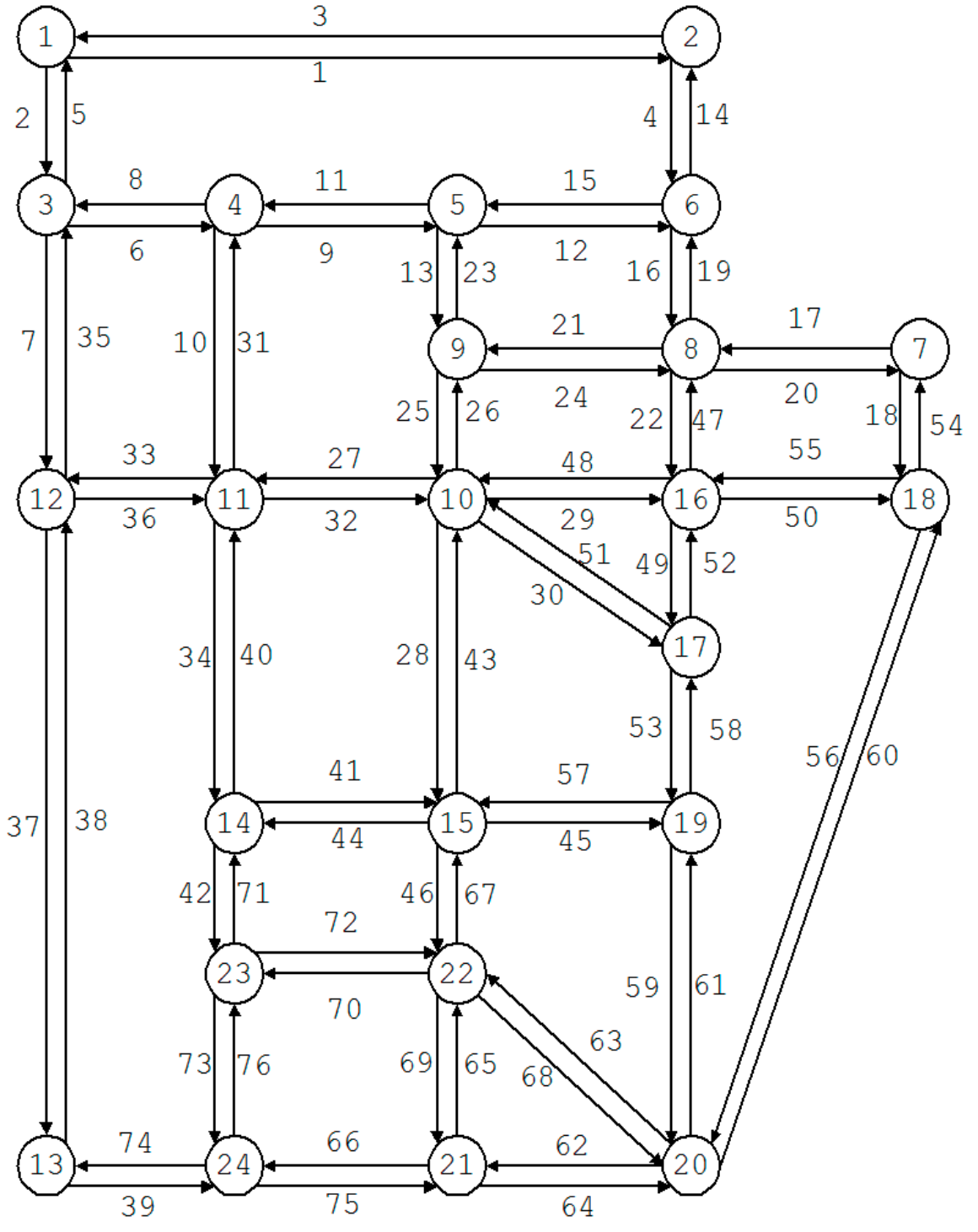
5. SAYISAL UYGULAMA

5.1 Giriş

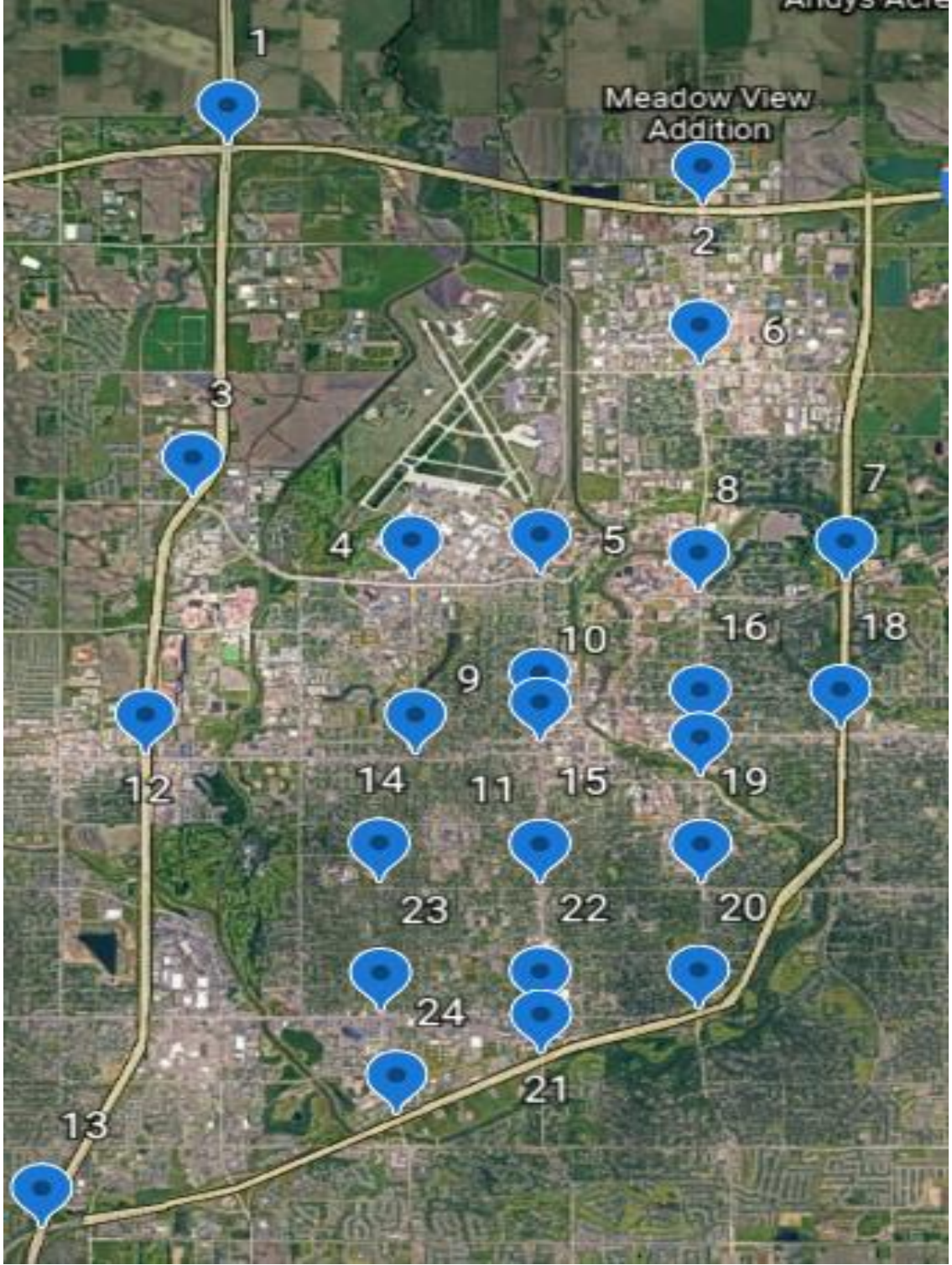
Bu bölümde SUAT problemini çevresel faktörleri dikkate alarak çözmek amacıyla geliştirilen DGA tabanlı iki seviyeli programlama modelinin sayısal uygulaması Sioux-Falls karayolu ağında yapılmıştır. Geliştirilen model kullanılarak elde edilen 4 adet senaryoya ait sonuçlar verilmiştir.

5.2 Ulaşım Ağı

Şekil 5.1 ve 5.2’de verilen Sioux-Falls kenti Amerika Birleşik Devletleri’nde, Güney Dakota eyaletinin güneydoğusunda, Minnehaha ilinin merkezinde bulunmaktadır. Araştırmacılar 1975 yılında Sioux-Falls kenti ulaştırma ağını test ağı olarak modellemişlerdir (LeBlanc ve diğ. 1975). 24 düğüm ve 76 bağdan oluşan bu test ağı 552 adet B-V çifti içermektedir. LeBlanc ve diğ. (1975) tarafından yapılan çalışmada sunulan B-V matrisi günlük ulaşım talebini göstermektedir ancak bu çalışmada Suwansirikul ve diğ. (1987) tarafından yapılan çalışmada kullanılan zirve saat ulaşım talebini dikkate alan B-V matrisi kullanılmış ve Tablo Ek.1’de gösterilmiştir. Sioux-Falls karayolu ağının birçok araştırmacı tarafından literatürde sıklıkla kullanılan bir test ağı olması ve elde edilecek sonuçların karşılaştırılma olasılığının yüksek olması nedeniyle bu çalışmada kullanılmıştır.



Şekil 5.1: Sioux-Falls karayolu ağı



Şekil 5.2: Sioux Falls (Google Earth 2021)

Sioux-Falls karayolu ağına ait bağ kapasiteleri (c_i) ve kapasite genişletilmesine aday bağların ait yatırım fonksiyonu parametreleri (θ_i) Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de gösterilmiştir (Suwansirikul ve diğ. 1987). Tablolarda verilen bağ numaraları Şekil 5.1'deki ulaşım ağında ve Şekil 5.2'deki harita üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 5.1: Bağ kapasiteleri (c_i)

| Bağ Nu. | c_i (ta/sa) | Bağ Nu. | c_i (ta/sa) | Bağ Nu. | c_i (ta/sa) | Bağ Nu. | c_i (ta/sa) |
|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|
| 1 | 25900 | 20 | 7842 | 39 | 5091 | 58 | 4824 |
| 2 | 23403 | 21 | 5050 | 40 | 4877 | 59 | 5003 |
| 3 | 25900 | 22 | 5046 | 41 | 5128 | 60 | 23403 |
| 4 | 4958 | 23 | 10000 | 42 | 4925 | 61 | 5003 |
| 5 | 23403 | 24 | 5050 | 43 | 13512 | 62 | 5060 |
| 6 | 17111 | 25 | 13916 | 44 | 5128 | 63 | 5076 |
| 7 | 23403 | 26 | 13916 | 45 | 14565 | 64 | 5060 |
| 8 | 17111 | 27 | 10000 | 46 | 9599 | 65 | 5230 |
| 9 | 17783 | 28 | 13512 | 47 | 5046 | 66 | 4885 |
| 10 | 4908 | 29 | 4855 | 48 | 4855 | 67 | 9599 |
| 11 | 17783 | 30 | 4994 | 49 | 5230 | 68 | 5076 |
| 12 | 4948 | 31 | 4909 | 50 | 19680 | 69 | 5230 |
| 13 | 10000 | 32 | 10000 | 51 | 4994 | 70 | 5000 |
| 14 | 4958 | 33 | 4909 | 52 | 5230 | 71 | 4925 |
| 15 | 4948 | 34 | 4877 | 53 | 4824 | 72 | 5000 |
| 16 | 4899 | 35 | 23403 | 54 | 23403 | 73 | 5079 |
| 17 | 7842 | 36 | 4909 | 55 | 19680 | 74 | 5091 |
| 18 | 23403 | 37 | 25900 | 56 | 23403 | 75 | 4885 |
| 19 | 4899 | 38 | 25900 | 57 | 14565 | 76 | 5079 |

Tablo 5.2: Bağ kapasite genişletmelerinin maliyet parametreleri

| Bağ Numarası | 16 | 17 | 19 | 20 | 25 | 26 | 29 | 39 | 48 | 74 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| θ_i (bin dolar) | 26.00 | 40.00 | 26.00 | 40.00 | 25.00 | 25.00 | 48.00 | 34.00 | 48.00 | 34.00 |

5.3 Analizler

DGA tabanlı iki seviyeli programlama modeli kullanılarak geliştirilen algoritma MATLAB 2016a programında kodlanmış ve çalıştırılmıştır. Bu algoritma Intel Core i7 birinci nesil işlemci ile 8 GB DDR3 RAM bulunan Windows 7 işletim sistemli bir bilgisayar tarafından çözülmüştür.

- **Senaryo 1**

Sadece emisyon salınımlarına ait maliyetin dikkate alındığı bu senaryoda geliştirilen algoritma 103 jenerasyonda durma koşulunu sağlamıştır. Popülasyonda amaç fonksiyonu minimum değeri yaklaşık olarak 1,54 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak bağlardaki trafik hacmi (x_i) ve seyahat süreleri (t_i) Tablo 5.3'te, bağların

kapasite genişletmeleri Tablo 5.4'te verilmiştir. Amaç fonksiyonlarındaki değişim Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.3: Senaryo 1 için trafik hacmi (x_i) ve maliyet (t_i) değerleri

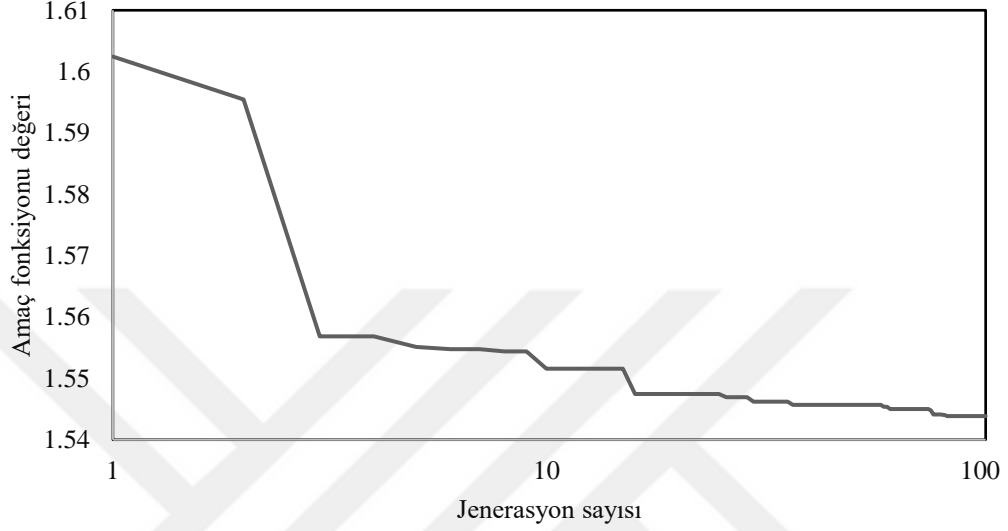
| Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) | Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) | Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) |
|---------|---------------|------------|---------|---------------|------------|---------|---------------|------------|
| 1 | 5242 | 0,0600 | 27 | 18174 | 0,1318 | 53 | 7912 | 0,1556 |
| 2 | 7671 | 0,0401 | 28 | 20639 | 0,1090 | 54 | 10914 | 0,0769 |
| 3 | 5205 | 0,0600 | 29 | 22236 | 0,6075 | 55 | 9877 | 0,0727 |
| 4 | 6999 | 0,0798 | 30 | 7852 | 0,1533 | 56 | 15941 | 0,0206 |
| 5 | 7707 | 0,0401 | 31 | 6364 | 0,0854 | 57 | 19319 | 0,0342 |
| 6 | 18629 | 0,0484 | 32 | 18180 | 0,1319 | 58 | 22796 | 0,0454 |
| 7 | 14872 | 0,0410 | 33 | 8197 | 0,1300 | 59 | 16870 | 0,0381 |
| 8 | 18847 | 0,0488 | 34 | 9050 | 0,1112 | 60 | 9842 | 0,0720 |
| 9 | 22761 | 0,0281 | 35 | 14691 | 0,0409 | 61 | 8272 | 0,0849 |
| 10 | 6268 | 0,0839 | 36 | 8440 | 0,1387 | 62 | 22718 | 0,0453 |
| 11 | 22992 | 0,0284 | 37 | 19201 | 0,0314 | 63 | 8325 | 0,0860 |
| 12 | 8900 | 0,1028 | 38 | 19374 | 0,0314 | 64 | 7039 | 0,0937 |
| 13 | 16026 | 0,0995 | 39 | 16745 | 0,0715 | 65 | 7797 | 0,0918 |
| 14 | 6963 | 0,0792 | 40 | 9018 | 0,1102 | 66 | 6980 | 0,0926 |
| 15 | 8782 | 0,0995 | 41 | 9360 | 0,1333 | 67 | 9394 | 0,0512 |
| 16 | 18318 | 0,0361 | 42 | 8288 | 0,0881 | 68 | 10702 | 0,1336 |
| 17 | 12463 | 0,0534 | 43 | 20831 | 0,1108 | 69 | 18214 | 0,0883 |
| 18 | 16101 | 0,0207 | 44 | 9300 | 0,1311 | 70 | 7722 | 0,0902 |
| 19 | 18163 | 0,0380 | 45 | 16782 | 0,0379 | 71 | 9444 | 0,0519 |
| 20 | 12623 | 0,0315 | 46 | 18281 | 0,0892 | 72 | 9926 | 0,1332 |
| 21 | 5031 | 0,1148 | 47 | 7428 | 0,0852 | 73 | 8317 | 0,0888 |
| 22 | 7647 | 0,0896 | 48 | 22553 | 0,0723 | 74 | 9833 | 0,1298 |
| 23 | 16376 | 0,1039 | 49 | 11010 | 0,0789 | 75 | 9184 | 0,0521 |
| 24 | 5255 | 0,1176 | 50 | 19126 | 0,0340 | 76 | 16807 | 0,0763 |
| 25 | 5242 | 0,0497 | 51 | 18174 | 0,1318 | | | |
| 26 | 7671 | 0,0434 | 52 | 20639 | 0,1090 | | | |

Tablo 5.4: Optimum kapasite genişletme değerleri (c_i) (Senaryo1)

| Bağ Numarası | 16 | 17 | 19 | 20 | 25 | 26 | 29 | 39 | 48 | 74 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| c_i | 9,943 | 9,462 | 9,906 | 7,480 | 9,641 | 9,490 | 9,964 | 9,477 | 9,980 | 9,525 |

Tablo 5.4'ten görülebileceği gibi Senaryo 1'de kapasite genişletme problemine ait bütçe kısıtları dikkate alınmadığı için bağ kapasite genişletmeleri seçilen maksimum değere yakın olarak elde edilmiştir. Amaç fonksiyonunda bütçe kısıtı bulunmadığı için kapasite genişletmelerinin maksimum değerine yakın elde edilmesi beklenen bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Ulaştırma ağındaki

kapasite genişletmeye aday bağların kapasitesi maksimum değere yakın bir şekilde artırıldığı için yapılarak ağdaki toplam seyahat süresi azalmış ve bu nedenle emisyon salınım değerleri de azalmıştır. Algoritmanın öngörülen durma koşulu daha hassas olacak şekilde düzenlenirse elde edilecek optimum bağ kapasite genişletmelerinin maksimuma daha yakın değerler olacağı öngörülebilmektedir.



Şekil 5.3: Senaryo 1 amaç fonksiyonu yakınsama grafiği

Senaryo 1 için yapılan analizler sonucunda ilk jenerasyonda yaklaşık olarak 1,62 olan amaç fonksiyonu değerinin 103 jenerasyon sonunda yaklaşık olarak 1,54 değerine düştüğü ve geliştirilen algoritma sayesinde amaç fonksiyonu değerinde yaklaşık olarak %5 iyileşme sağlandığı görülmektedir.

- **Senaryo 2**

Amaç fonksiyonu olarak emisyon salınımlarına ait maliyet ve kapasite genişletme bütçe kısıtının yer aldığı bu senaryoda algoritma 248 jenerasyonda durma koşulunu sağlamıştır. Popülasyonda amaç fonksiyonu minimum değeri yaklaşık olarak 1,71 olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda bu senaryodaki toplam emisyon maliyeti 1,70 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak bağlardaki trafik hacmi (x_i) ve seyahat süreleri (t_i) Tablo 5.5’de bağların optimum kapasite genişletmeleri Tablo 5.6’da verilmiştir. Amaç fonksiyonlarındaki değişim Şekil 5.4’te gösterilmiştir.

Tablo 5.5: Senaryo 2 için trafik hacmi (x_i) ve maliyet (t_i) değerleri

| Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) | Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) | Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) |
|---------|---------------|------------|---------|---------------|------------|---------|---------------|------------|
| 1 | 6098 | 0,0600 | 27 | 19242 | 0,1318 | 53 | 10135 | 0,0727 |
| 2 | 10189 | 0,0401 | 28 | 25576 | 0,1090 | 54 | 18262 | 0,0206 |
| 3 | 6225 | 0,0600 | 29 | 11945 | 2,6497 | 55 | 19253 | 0,0342 |
| 4 | 6428 | 0,0798 | 30 | 8904 | 0,1533 | 56 | 22446 | 0,0454 |
| 5 | 10061 | 0,0401 | 31 | 6006 | 0,0854 | 57 | 20458 | 0,0381 |
| 6 | 16857 | 0,0484 | 32 | 19200 | 0,1319 | 58 | 10209 | 0,0720 |
| 7 | 12366 | 0,0410 | 33 | 8867 | 0,1300 | 59 | 9326 | 0,0849 |
| 8 | 16770 | 0,0488 | 34 | 10603 | 0,1112 | 60 | 22476 | 0,0453 |
| 9 | 21051 | 0,0281 | 35 | 12325 | 0,0409 | 61 | 9361 | 0,0860 |
| 10 | 5951 | 0,0839 | 36 | 8881 | 0,1387 | 62 | 6958 | 0,0937 |
| 11 | 21020 | 0,0284 | 37 | 14653 | 0,0314 | 63 | 7750 | 0,0918 |
| 12 | 8824 | 0,1028 | 38 | 14735 | 0,0314 | 64 | 6913 | 0,0926 |
| 13 | 17955 | 0,0995 | 39 | 11838 | 0,7266 | 65 | 9135 | 0,0512 |
| 14 | 6556 | 0,0792 | 40 | 10712 | 0,1102 | 66 | 11056 | 0,1336 |
| 15 | 8819 | 0,0995 | 41 | 9767 | 0,1333 | 67 | 19614 | 0,0883 |
| 16 | 14028 | 0,5863 | 42 | 9083 | 0,0881 | 68 | 7752 | 0,0902 |
| 17 | 14060 | 0,0586 | 43 | 25501 | 0,1108 | 69 | 9132 | 0,0519 |
| 18 | 18202 | 0,0207 | 44 | 9945 | 0,1311 | 70 | 10313 | 0,1332 |
| 19 | 14151 | 0,5424 | 45 | 20496 | 0,0379 | 71 | 9014 | 0,0888 |
| 20 | 14000 | 0,0596 | 46 | 19583 | 0,0892 | 72 | 10343 | 0,1298 |
| 21 | 7848 | 0,1148 | 47 | 9167 | 0,0852 | 73 | 8471 | 0,0521 |
| 22 | 9137 | 0,0896 | 48 | 12059 | 2,7886 | 74 | 11810 | 0,7405 |
| 23 | 17929 | 0,1039 | 49 | 12255 | 0,0789 | 75 | 11014 | 0,1295 |
| 24 | 7882 | 0,1176 | 50 | 19172 | 0,0340 | 76 | 8431 | 0,0512 |
| 25 | 23909 | 0,0823 | 51 | 8915 | 0,1556 | | | |
| 26 | 24027 | 0,0887 | 52 | 12317 | 0,0769 | | | |

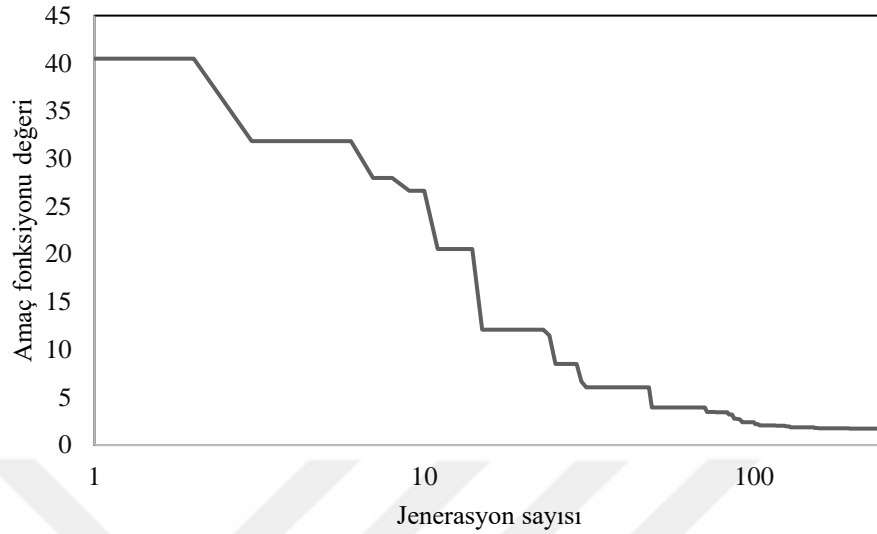
Tablo 5.6: Optimum kapasite genişletme değerleri (c_i) (Senaryo 2)

| Bağ Numarası | 16 | 17 | 19 | 20 | 25 | 26 | 29 | 39 | 48 | 74 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| c_i | 0,043 | 0,005 | 0,101 | 0,041 | 0,060 | 0,022 | 0,014 | 0,029 | 0,020 | 0,022 |

Senaryo 1’de elde edilen ve Tablo 5.4’te verilen optimum bağ kapasite genişletmeleri seçilen maksimum değere yakın olarak elde edildiği halde, Senaryo 2’de bu durumun tam tersi bir sonuç elde edilmiştir. Tablo 5.6’da görüldüğü gibi elde edilen optimum bağ kapasite genişletme değerleri minimum değere oldukça yakındır.

Bunun başlıca sebebi bu senaryoda amaç fonksiyonunda emisyon salınımlarına ait maliyetin yanında kapasite genişletmelerine ait bütçe kısıtlarının bulunmasıdır. Yatırım maliyetleri toplam maliyetler içinde emisyon salınımlarından

dolayı oluşan maliyetlere göre oldukça yüksek bir paya sahip olduğundan dolayı kapasite genişletme değerleri minimum değere yakın olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.4: Senaryo 2 amaç fonksiyonu yakınsama grafiği

Senaryo 2 için yapılan analizler sonucunda başlangıçta yaklaşık olarak 40,48 olan amaç fonksiyonu değeri 248 jenerasyon sonunda 1,71 olarak elde edilmiştir. Jenerasyonlar boyunca elde edilen amaç fonksiyon değerindeki iyileşmenin yaklaşık olarak %24,2'si ilk 10 jenerasyonda elde edilmiştir.

- **Senaryo 3**

Ulaştırma ağı toplam seyahat maliyetleri ile bütçe kısıtlamalarının toplamının birlikte dikkate alındığı bu senaryoda algoritma 127 jenerasyonda durma koşulunu sağlamıştır. Popülasyonda amaç fonksiyonu en iyi değeri 310,64 olarak elde edilmiştir. Amaç fonksiyonunda kullanılan seyahat maliyetleri ve bütçe kısıtları diğer senaryolar ile karşılaştırma yapılabilmesi için *ZPE* parametresi ile çarpılmıştır. Elde edilen bu amaç fonksiyonu değeri *ZPE* değerine bölüldüğünde yaklaşık olarak 80,06 şeklinde hesaplanmaktadır. Aynı zamanda bu senaryodaki toplam emisyon maliyeti yaklaşık olarak 1,57 olarak elde edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen bağ trafik hacimleri (x_i) ve seyahat süreleri (t_i) Tablo 5.7'de, bağ kapasite genişletmeleri Tablo 5.8'de verilmiştir. Amaç fonksiyonlarındaki değişim Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

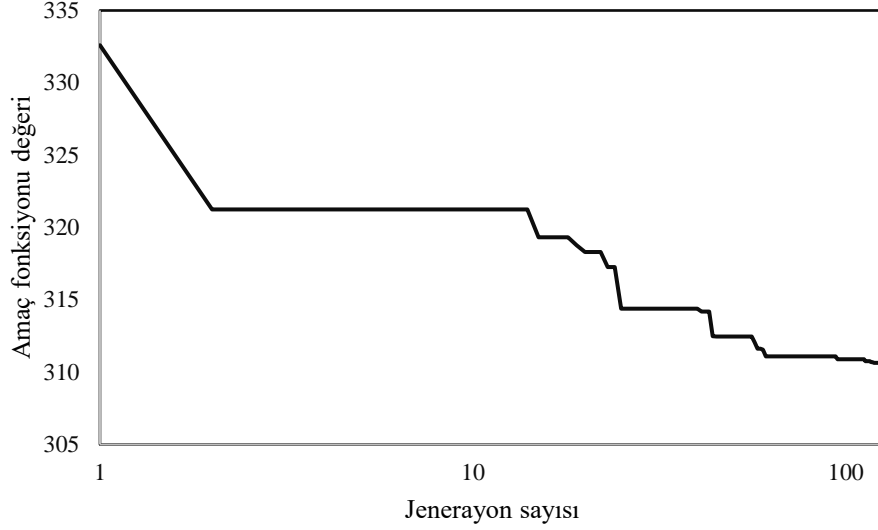
Tablo 5.7: Senaryo 3 trafik hacmi (x_i) ve maliyet (t_i) değerleri

| Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) | Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) | Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) |
|---------|---------------|------------|---------|---------------|------------|---------|---------------|------------|
| 1 | 6444 | 0,0600 | 27 | 18081 | 0,1302 | 53 | 10262 | 0,0814 |
| 2 | 9415 | 0,0402 | 28 | 21013 | 0,1126 | 54 | 18260 | 0,0211 |
| 3 | 6590 | 0,0600 | 29 | 15358 | 0,1303 | 55 | 19978 | 0,0348 |
| 4 | 7290 | 0,0851 | 30 | 8413 | 0,1767 | 56 | 23821 | 0,0464 |
| 5 | 9269 | 0,0401 | 31 | 6109 | 0,0816 | 57 | 19203 | 0,0436 |
| 6 | 18651 | 0,0485 | 32 | 18028 | 0,1292 | 58 | 10267 | 0,0816 |
| 7 | 15167 | 0,0411 | 33 | 8355 | 0,1355 | 59 | 8932 | 0,1010 |
| 8 | 18697 | 0,0486 | 34 | 9111 | 0,1131 | 60 | 24029 | 0,0467 |
| 9 | 22831 | 0,0282 | 35 | 14976 | 0,0410 | 61 | 8859 | 0,0990 |
| 10 | 6073 | 0,0811 | 36 | 8442 | 0,1387 | 62 | 6574 | 0,0857 |
| 11 | 22951 | 0,0283 | 37 | 17368 | 0,0309 | 63 | 7714 | 0,0900 |
| 12 | 9112 | 0,1090 | 38 | 17374 | 0,0309 | 64 | 6583 | 0,0858 |
| 13 | 15831 | 0,0971 | 39 | 16098 | 0,0813 | 65 | 9296 | 0,0499 |
| 14 | 7436 | 0,0879 | 40 | 9116 | 0,1133 | 66 | 10583 | 0,1291 |
| 15 | 9150 | 0,1102 | 41 | 9244 | 0,1292 | 67 | 18306 | 0,0895 |
| 16 | 18805 | 0,0558 | 42 | 8354 | 0,0897 | 68 | 7731 | 0,0904 |
| 17 | 14219 | 0,0481 | 43 | 21008 | 0,1126 | 69 | 9371 | 0,0509 |
| 18 | 17802 | 0,0210 | 44 | 9262 | 0,1298 | 70 | 9807 | 0,1288 |
| 19 | 18989 | 0,0592 | 45 | 19281 | 0,0438 | 71 | 8341 | 0,0894 |
| 20 | 13761 | 0,0486 | 46 | 18324 | 0,0898 | 72 | 9880 | 0,1315 |
| 21 | 5982 | 0,1295 | 47 | 8134 | 0,1006 | 73 | 9001 | 0,0496 |
| 22 | 8322 | 0,1055 | 48 | 15425 | 0,1225 | 74 | 15995 | 0,0769 |
| 23 | 15913 | 0,0981 | 49 | 11829 | 0,0985 | 75 | 10517 | 0,1266 |
| 24 | 5895 | 0,1279 | 50 | 20118 | 0,0349 | 76 | 9061 | 0,0504 |
| 25 | 24747 | 0,0510 | 51 | 8399 | 0,1760 | | | |
| 26 | 24852 | 0,0524 | 52 | 11848 | 0,0990 | | | |

Tablo 5.8: Optimum kapasite genişletme değerleri (c_i) (Senaryo 3)

| Bağ Numarası | 16 | 17 | 19 | 20 | 25 | 26 | 29 | 39 | 48 | 74 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| c_i | 5,240 | 2,124 | 5,242 | 2,118 | 2,642 | 2,680 | 3,023 | 4,878 | 3,135 | 4,921 |

Tablo 5.8'den görülebileceği gibi elde edilen optimum bağ kapasite genişletme değerleri literatürde verilen SUAT problemi zm sonuçlarına (Başkan 2014^b; Başkan ve diğ. 2018) oldukça benzerdir bu sonuçlar aynı zamanda geliştirilen algoritmanın doğrulaması olarak da değerlendirilebilmektedir.



Şekil 5.5: Senaryo 3 amaç fonksiyonu yakınsama grafiği

Şekil 5.5'ten görülebileceği gibi ilk jenerasyon sonunda amaç fonksiyonu değeri yaklaşık 332,59 olarak elde edilirken, 127 jenerasyon sonunda amaç fonksiyonu değerinde yaklaşık olarak %6,6 iyileşme sağlanarak 310,64 değeri elde edilmiştir.

- **Senaryo 4**

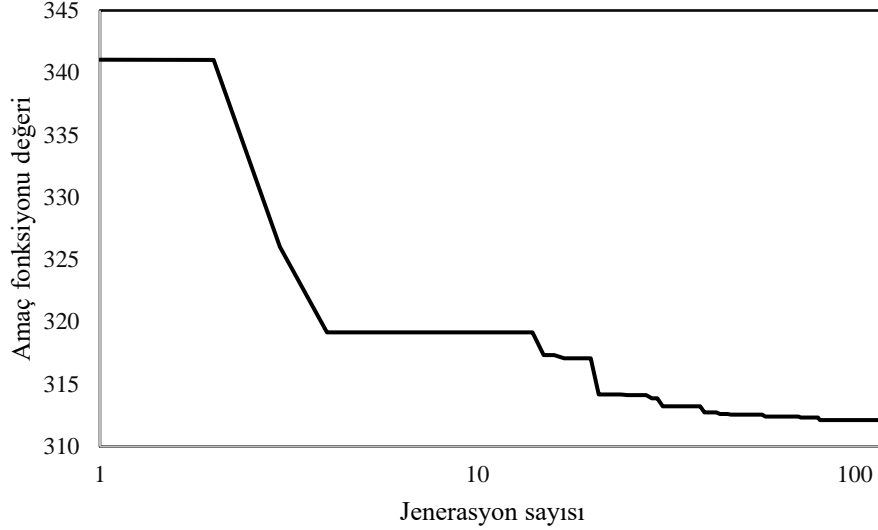
Ulaştırma ağına ait toplam seyahat maliyeti, bütçe kısıtları ve emisyon salınım maliyetinin birlikte dikkate alındığı bu senaryo sonucunda algoritma 120 jenerasyonda durma koşulunu sağlamıştır. Popülasyonda amaç fonksiyonu son değeri yaklaşık olarak 312,12 olarak elde edilmiş ve bu senaryodaki emisyon miktarı yaklaşık olarak 1,55 olarak hesaplanmıştır. Bu senaryonun sonucunda elde edilen bağlardaki trafik hacmi (x_i) ve seyahat süreleri (t_i) Tablo 5.9'da, aday bağlara kapasite genişletmeleri Tablo 5.10'da verilmiştir. Amaç fonksiyonlarındaki değişim Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

Tablo 5.9: Senaryo 4 trafik hacmi (x_i) ve maliyet (t_i) değerleri

| Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) | Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) | Bağ Nu. | x_i (ta/sa) | t_i (sa) |
|---------|---------------|------------|---------|---------------|------------|---------|---------------|------------|
| 1 | 6512 | 0,0600 | 27 | 18087 | 0,1318 | 53 | 10246 | 0,0727 |
| 2 | 9230 | 0,0401 | 28 | 21108 | 0,1090 | 54 | 17896 | 0,0206 |
| 3 | 6465 | 0,0600 | 29 | 15045 | 0,4577 | 55 | 20297 | 0,0342 |
| 4 | 7480 | 0,0798 | 30 | 8422 | 0,1533 | 56 | 23887 | 0,0454 |
| 5 | 9277 | 0,0401 | 31 | 6135 | 0,0854 | 57 | 19146 | 0,0381 |
| 6 | 18632 | 0,0484 | 32 | 17958 | 0,1319 | 58 | 10277 | 0,0720 |
| 7 | 15017 | 0,0410 | 33 | 8376 | 0,1300 | 59 | 8940 | 0,0849 |
| 8 | 18556 | 0,0488 | 34 | 9100 | 0,1112 | 60 | 24030 | 0,0453 |
| 9 | 22880 | 0,0281 | 35 | 15141 | 0,0409 | 61 | 8879 | 0,0860 |
| 10 | 6109 | 0,0839 | 36 | 8364 | 0,1387 | 62 | 6570 | 0,0937 |
| 11 | 22889 | 0,0284 | 37 | 17251 | 0,0314 | 63 | 7747 | 0,0918 |
| 12 | 9217 | 0,1028 | 38 | 17473 | 0,0314 | 64 | 6528 | 0,0926 |
| 13 | 15774 | 0,0995 | 39 | 15917 | 0,0929 | 65 | 9298 | 0,0512 |
| 14 | 7433 | 0,0792 | 40 | 9118 | 0,1102 | 66 | 10544 | 0,1336 |
| 15 | 9176 | 0,0995 | 41 | 9215 | 0,1333 | 67 | 18248 | 0,0883 |
| 16 | 19189 | 0,0480 | 42 | 8344 | 0,0881 | 68 | 7761 | 0,0902 |
| 17 | 13930 | 0,0421 | 43 | 20914 | 0,1108 | 69 | 9306 | 0,0519 |
| 18 | 18175 | 0,0207 | 44 | 9261 | 0,1311 | 70 | 9908 | 0,1332 |
| 19 | 19100 | 0,0486 | 45 | 19238 | 0,0379 | 71 | 8316 | 0,0888 |
| 20 | 14209 | 0,0414 | 46 | 18414 | 0,0892 | 72 | 9763 | 0,1298 |
| 21 | 5892 | 0,1148 | 47 | 8233 | 0,0852 | 73 | 9104 | 0,0521 |
| 22 | 8252 | 0,0896 | 48 | 15667 | 0,3769 | 74 | 16029 | 0,0940 |
| 23 | 15824 | 0,1039 | 49 | 11797 | 0,0789 | 75 | 10494 | 0,1295 |
| 24 | 6102 | 0,1176 | 50 | 19765 | 0,0340 | 76 | 8932 | 0,0512 |
| 25 | 24602 | 0,0550 | 51 | 8382 | 0,1556 | | | |
| 26 | 24971 | 0,0603 | 52 | 11869 | 0,0769 | | | |

Tablo 5.10: Optimum kapasite genişletme değerleri (c_i) (Senaryo 4)

| Bağ Numarası | 16 | 17 | 19 | 20 | 25 | 26 | 29 | 39 | 48 | 74 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| c_i | 5,428 | 2,538 | 5,255 | 2,325 | 2,785 | 2,677 | 3,219 | 4,954 | 2,746 | 4,905 |



Şekil 5.6: Senaryo 4 amaç fonksiyonu yakınsama grafiği

Senaryo 4'e ait amaç fonksiyonu yakınsama grafiği Şekil 5.5'te verilen Senaryo 3'ün yakınsama grafiğine benzer şekilde oluşmuştur. Amaç fonksiyonu değeri ilk jenerasyon sonunda yaklaşık 341 iken 120 jenerasyon sonunda yaklaşık olarak 312 değerine düşmüş ve %8,5 değerinde bir iyileşme görülmüştür. Amaç fonksiyonu değerindeki toplam iyileşmenin yaklaşık %75'i 10 jenerasyon sonunda elde edilmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen sezgisel algoritmanın performansını değerlendirebilmek için her senaryo 20 defa çalıştırılmıştır. Elde edilen minimum, maksimum, ortalama amaç fonksiyonu değerleri ve standart sapma değerleri Tablo 5.11'de gösterilmiştir.

Tablo 5.11: Senaryolara ait sezgisel algoritma sonuçları

| | Minimum | Maksimum | Ortalama | Standart Sapma |
|-----------|----------|----------|----------|----------------|
| Senaryo 1 | 1,5427 | 1,5439 | 1,5435 | 0,000447 |
| Senaryo 2 | 1,7126 | 1,7155 | 1,7137 | 0,000667 |
| Senaryo 3 | 310,6120 | 310,7281 | 310,6718 | 0,039894 |
| Senaryo 4 | 312,0609 | 312,2958 | 312,1632 | 0,069280 |

Tablo 5.11'de gösterilen değerler, her bir senaryonun 20 defa çalıştırıldıktan sonra sonuçlarının değerlendirilmesi ile elde edilmiştir. Minimum ve maksimum amaç fonksiyonu değerlerinin birbirine yakınlığı ve standart sapmanın oldukça düşük çıkması geliştirilen algoritmanın performansının tutarlı olduğunu göstermektedir.

5.4 Senaryoların Karşılaştırılması

Önerilen senaryolara ait Bölüm 5.3'te yapılan analizler sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değerleri içindeki emisyon salınımlarına ait maliyet değerleri Tablo 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.12: Senaryolara ait toplam emisyon maliyeti

| | Senaryo 1 | Senaryo 2 | Senaryo 3 | Senaryo 4 |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| TEM | 1,54 | 1.70 | 1,57 | 1,55 |

Tüm senaryolar karşılaştırıldığında sadece emisyon salınımlarına ait maliyetlerin dikkate alındığı Senaryo 1'de emisyon salınım maliyetinin minimum değeri elde edilmiştir. Senaryo 1'de elde edilen bağ kapasite genişletmelerinin verilen üst sınır değerine oldukça yakın olması bu durumu açıklamaktadır. Diğer taraftan emisyon salınım maliyetiyle beraber bağ kapasite genişletme yatırım maliyetlerinin de dikkate alındığı Senaryo 2'de maksimum emisyon salınım maliyeti değerleri elde edilmiştir. Toplam yatırım maliyetinin emisyon salınım maliyetinden çok daha yüksek bir etkiye sahip olması bu duruma neden olarak gösterilebilmektedir. Sonuç olarak elde edilen bağ kapasite genişletmeleri öngörülen alt limit değerlerine oldukça yakın olduğu için toplam emisyon salınım maliyeti değerinin de diğer senaryo sonuçlarına kıyasla en yüksek değeri verdiği belirlenmiştir.

Emisyon salınım maliyeti dikkate alınmadan sadece yatırım maliyeti ve ulaştırma ağı toplam seyahat maliyetinin birlikte dikkate alındığı Senaryo 3'te ise tüm maliyetlerin dikkate alındığı Senaryo 4'e göre emisyon maliyetinin bir miktar fazla olduğu görülmektedir. Tüm senaryolar için amaç fonksiyonu son değerleri (Z_{son}) Tablo 5.13'te verilmiştir.

Tablo 5.13: Senaryolara ait amaç fonksiyonu minimum değerleri

| | Senaryo 1 | Senaryo 2 | Senaryo 3 | Senaryo 4 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Z_{son} | 1,54 | 1,71 | 310,64 | 312,12 |

Tablo 5.13'te verilen değerler tüm senaryolar için amaç fonksiyonlarına ait elde edilen minimum değerlerdir. Senaryo 1'de amaç fonksiyonu içinde sadece emisyon salınım maliyeti dikkate alındığı için Tablo 5.12 ve 5.13'te Senaryo 1 için

verilen değerlerin aynı olduğu görülmektedir. Tablo 5.6'dan görülebileceği gibi Senaryo 2'de yapılan analizler sonucu elde edilen bağ kapasite genişletmeleri öngörülen alt limit değerine oldukça yakın olduğundan dolayı yatırım maliyeti değerlerinin de sifıra yakın olduğu görülebilmektedir. Sonuç olarak amaç fonksiyonu değerinin büyük kısmı Senaryo 2'de emisyon salınım maliyetlerinden oluşmaktadır.

Senaryo 3'te emisyon salınım maliyetinin dikkate alınmaması sebebiyle oluşan amaç fonksiyonu son değerini ağ seyahat maliyeti ile yatırım maliyetlerinin toplamı oluşturmaktadır. Bu senaryonun amacı emisyon salınımları dikkate alınmadan yapılan tasarımının oluşturacağı emisyon maliyeti miktarını diğer senaryolar ile karşılaştırabilmektir. Tablo 5.13'de verilen amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırıldığında Senaryo 4'e ait değer en yüksek olduğu görülebilmektedir. Bunun nedeni bu senaryoda tüm maliyetlerin amaç fonksiyonuna dahil edilerek analizlerin yapılması olarak ifade edilebilir. Tüm senaryolar için Sioux-Falls ulaştırma ağında aday bağlarda elde edilen optimum kapasite genişletme değerleri Tablo 5.14'te verilmiştir.

Tablo 5.14: Senaryolara ait kapasite genişletme miktarları

| Bağ Numarası | 16 | 17 | 19 | 20 | 25 | 26 | 29 | 39 | 48 | 74 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Senaryo 1 | 9,943 | 9,462 | 9,906 | 7,480 | 9,641 | 9,490 | 9,964 | 9,477 | 9,980 | 9,525 |
| Senaryo 2 | 0,043 | 0,005 | 0,101 | 0,041 | 0,060 | 0,022 | 0,014 | 0,029 | 0,020 | 0,022 |
| Senaryo 3 | 5,240 | 2,124 | 5,242 | 2,118 | 2,642 | 2,680 | 3,023 | 4,878 | 3,135 | 4,921 |
| Senaryo 4 | 5,428 | 2,538 | 5,255 | 2,325 | 2,785 | 2,677 | 3,219 | 4,954 | 2,746 | 4,905 |

Tablodan görülebileceği gibi sadece emisyon salınımlarının dikkate alındığı Senaryo 1'de kapasite genişletme yatırım maliyetleri dikkate alınmadığı için optimum genişletme değerleri öngörülen üst limit değerine oldukça yakın elde edilmiştir. Emisyon salınım ile yatırım maliyetlerinin birlikte ele alındığı Senaryo 2'de ise optimum bağ kapasite genişletmeleri alt limit değerine yakın belirlenmiştir. Bu durum Senaryo 2'ye ait amaç fonksiyonu içinde yatırım maliyetinin oldukça büyük bir etkiye sahip olması ile açıklanabilmektedir. Geliştirilen algoritma emisyon salınım maliyetlerini dikkate almadan yatırım maliyeti değerini minimum yapan kapasite genişletme değerlerini belirlemektedir. Böylece Senaryo 2'de elde edilen optimum bağ kapasite genişletme değerlerinin öngörülen alt limit değerine yakın olduğu görülmektedir.

Seyahat maliyeti ile yatırım maliyetlerinin birlikte ele alındığı Senaryo 3'te optimum bağ kapasite genişletmeleri emisyon salınımları dikkate alınmadan hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerin literatürde verilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.

Senaryo 4'te aday bağlara ait elde edilen optimum kapasite genişletme değerleri Senaryo 3'te elde edilen genişletme miktarlarından fazla olmasının nedeni amaç fonksiyonu içerisinde emisyon salınım maliyetinin de bulunması olarak ifade edilebilmektedir. Ulaştırma ağında bağ kapasite genişletmelerinin yapılması aynı zamanda emisyon salınım maliyetini de azalttığı için aday bağların içindeki 7 adet bağda Senaryo 3'e göre daha fazla kapasite genişletmeleri yapılmıştır. Sonuç olarak Senaryo 4'te elde edilen bağ kapasite genişletmelerinin Senaryo 3 sonuçlarına göre yaklaşık %3,5 arttığı belirlenmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde tez çalışması ile elde edilen sonuçlar ve gelecekte yapılması düşünülen çalışmalara yer verilmiştir.

6.1 Sonuçlar

Birinci bölümde tez kapsamında kent içi ulaştırma ağlarındaki sorunlardan ve mevcut çözümlerden bahsedilmiştir. Bu tez kapsamında çözülecek olan problemin tanımı ve amacı ifade edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ulaşım ağ tasarımı ve motorlu taşıt emisyonları ile ilgili yapılan önceki çalışmalarla birlikte bu çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir. SUAT problemi ile tez çalışmasında problemin çözümü amacıyla kullanılan Diferansiyel Gelişim Algoritması, İki Seviyeli Programlama Modeli ve trafik ataması modelleri ile ilgili çalışmalar ve sonuçları incelenmiştir. Literatürden görüldüğü üzere SUAT probleminin çözümü için birçok farklı yaklaşım mevcuttur. Bu çalışmalarda genel olarak farklı çözüm yöntemlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Emisyon salınımlarının dikkate alındığı çalışmalarda temel amaç olarak ulaştırma ağındaki salınım miktarlarının minimize edilmesi amaçlanmıştır.

Üçüncü bölümde çalışmada ele alınan probleme ait formülasyonlar verilmiştir. İlk olarak SUAT probleminin çözümünde sıkça kullanılan iki seviyeli programlama modeli hakkında bilgi verilmiştir. Alt ve üst seviye formülasyonlarından ve iki seviye arasındaki veri alışverişi hakkında açıklamalar verilmiştir. Ayrıca SUAT probleminde kullanılacak toplam yatırım ve toplam seyahat maliyetlerine ait açıklamalar bu bölümde gösterilmiştir. İki seviyeli programlama modelinin alt seviyesinde kullanılan trafik ataması için çalışmada kullanılan formülasyon ve çözüm metotları verilmiştir. Son olarak emisyon salınım maliyeti formülasyonları bu bölümde sunulmuştur.

Çalışmanın dördüncü bölümünde geliştirilen modelin çalışma prensibi hakkında bilgi verilmiştir. İki seviyeli programlama modelinin nasıl oluşturulduğu ve DG algoritmasının geliştirilen modele nasıl entegre edildiği açıklanmıştır. DGA'nın adımları ve bu adımların içerikleri bu bölümde verilmiştir. Geliştirilen iki seviyeli programlama modeli ile 4 farklı senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryoların hepsi amaç fonksiyonundaki farklı maliyet fonksiyonlarının kombinasyonu şeklinde elde edilmiştir. Senaryolara ait amaç fonksiyonları bu bölümde verilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde geliştirilen algoritmanın sayısal uygulaması verilmiştir. Sayısal uygulamada Sioux-Falls test karayolu ağı kullanılmıştır. Tüm senaryoların sonucunda elde edilen bağ trafik hacmi, bağ seyahat maliyeti, optimum kapasite genişletme değerleri, emisyon salınım maliyetleri ve amaç fonksiyonu yakınsama grafikleri bu bölümde verilmiştir. Analizler sonucunda amaç fonksiyonunda yatırım maliyetleri dikkate alınmamasından dolayı optimum bağ kapasite genişletme miktarları en fazla Senaryo 1'de elde edilmiştir. Senaryo 2'de amaç fonksiyonuna Senaryo 1'den farklı olarak yatırım maliyeti eklenmiştir. Emisyon salınım maliyeti bağ kapasite genişletme maliyetinden çok daha az etkili olduğundan elde edilen optimum kapasite genişletme değerleri alt limit değerine oldukça yakın elde edilmiştir. Senaryo 3'te seyahat maliyeti ve yatırım maliyetleri dikkate alınarak analizler yapılmış ve literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Son senaryo olan dördüncü senaryoda yapılan analizlerde emisyon salınım, seyahat ve yatırım maliyetleri birlikte dikkate alınmıştır. Çalışmanın ana amacını temsil eden Senaryo 4'te elde edilen optimum bağ kapasite genişletme değerlerinin Senaryo 3 sonuçlarına göre yaklaşık %3,5 fazla olduğu belirlenmiştir.

6.2 Gelecek Çalışmalar

Gelecek çalışmalarda teknolojinin ilerlemesi sonucu ortaya çıkabilecek farklı kirletici tiplerinin neden olacağı emisyon salınım maliyetleri dikkate alınarak yapılacak analiz sonuçlarının karşılaştırılması düşünülmektedir. Emisyon salınımlarının olumsuz çevresel etkilerine benzer şekilde etkisi olduğu kabul edilen gürültü kirliliği maliyetinin de kirletici hesabına dahil edilerek daha çevre dostu kapasite genişletme uygulamalarının yapılabileceği öngörülmektedir.

7. KAYNAKLAR

Abdulaal, M., and LeBlanc, L., "Continuous equilibrium network design models", *Transportation Research Part B.*, 13, 19-32, (1979).

Başkan, Ö., "Karıncı Kolonisi Optimizasyonu İle Ulaşım Ağ Tasarımı", Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2009).

Başkan, Ö., "Birleştirilmiş Ulaşım Ağ Tasarım Probleminin Diferansiyel Gelişim Algoritması ile Çözümü", *10. Ulaştırma Kongresi*, İzmir, sf. 301-311, (2013^a).

Başkan, Ö., "Determining Optimal Link Capacity Expansions in Road Networks Using Cuckoo Search Algorithm with Lévy Flights", *Journal of Applied Mathematics*, 2013, 1-11, (2013^b).

Başkan, Ö., "An Evaluation of Heuristic Methods for Determining Optimal Link Capacity Expansions on Road Network", *International Journal of Transportation* Vol.2, 77-94, (2014^a).

Başkan, Ö., "Harmony Search Algorithm for Continuous Network Design Problem with Link Capacity Expansions", *Journal of Civil Engineering*, 18, 273-283, (2014^b).

Başkan, Ö., Ceylan, H., "Ulaşım Ağ Tasarımı Problemlerinin Çözümünde Diferansiyel Gelişim Algoritması Tabanlı Çözüm Yaklaşımları" *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(9), 324-331, (2014).

Başkan, Ö., Ozan, C., "Sinyalize Yol Ağlarında Bağ Kapasite Artırımı ve Sinyal Optimizasyonu Problemlerinin Eşzamanlı Çözümü", *11. Ulaştırma Kongresi*, İstanbul, sf. 117-127, (2015).

Başkan Ö., ve diğ., “Improving the performance of the bilevel solution for the continuous network design problem”, *Promet Traffic & Transportation*, 30(6), 709-720, (2018).

Başkan, Ö., “A multiobjective bilevel programming model for environmentally friendly traffic signal timings”, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, Article ID 1638618, 1-13, (2019).

Bazaraa, M.S., ve diğ., *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*, USA: John Wiley & Sons publishing company, (1993).

Beckmann, M.J.,ve diğ., *Studies in Economics of Transportation*, Yale University Press, New Haven, (1956).

Bhenke, M. and Kirschstein, T., “The impact of path selection on GHG emissions in city logistics“, *Transportation Research Part E*, 106, 320–336, (2017).

BPR, Traffic Assignment Manual: Bureau of Public Roads, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., (1964).

Calfee, J., and Winston. C., “The value of automobile travel time: implications for congestion policy”, *Journal of Public Economics*, 69, 83–102, (1998).

Ceylan, H., “A Genetic Algorithm Approach to the Equilibrium Network Design Problem”, PhD Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, England, (2002).

Ceylan, H., “Şehiriçi Ulaşım Ağlarının Armoni Araştırması Optimizasyon Tekniği İle Tasarımı”, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2009).

Ceylan, H., ve Ceylan, H., “Şehiriçi Karayolu Ağlarının Sezgisel Harmoni Araştırması Optimizasyon Yöntemi ile Ayrık Tasarımı.”, İMO Teknik Dergi, 24(1), 6211-6231, (2013).

Chiou, S.W., “Bi-level programming for the continuous transport network design problem” *Transportation Research Part B*, 39, 361-383, (2005).

Çakıcı, Z., “Sinyalize Kavşaklar İçin Optimizasyon Tabanlı Trafik Yönetim Modeli”, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2020).

Daganzo, C., and Sheffi, Y., “On stochastic models of traffic assignment”, *Transportation Science*, 11, 253-274, (1977).

Davis, G.A., “Exact Local Solution Of The Continuous Network Design Problem Via Stochastic User Equilibrium Assignment”, *Transportation Research Part B*, 28, 61-75, (1994).

Frank, M., and Wolfe, P., “An algorithm for quadratic programming”, *Naval Research Logistic Quarterly, University of Michigan*, 3, 95-110, (1956).

Gao, Z., ve diğ., “A continuous equilibrium network design model and algorithm for transit systems”, *Transportation Research Part B*, 38, 235-250, (2004).

Google Earth, 2001, Google, (2021).

Gülgeç, İ., Ulaşım Planlaması, Ankara: Özsan Matbaacılık Sanayi ve Ltd. Şti., (1998).

Kou, W., ve diğ., “Multiobjective optimization model of intersection signal timing considering emissions based on field data: A case study of Beijing” *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68, 8, 836-848, (2018).

Keskintürk, T., “Diferansiyel Gelişim Algoritması”, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Bahar/1, 85-99, (2006).

LeBlanc, L.J., “An algorithm for the discrete network design problem”, *Transportation Science*, 9, 183-199, (1975^a).

LeBlanc L.J., ve diğ., “An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem”, *Transportation Research*, 9, 309-318, (1975^b).

Li, Z.C., and Ge, X.Y., “Traffic signal timing problems with environmental and equity considerations”, *Journal of Advanced Transportation*, 8, 1066-1086, (2014).

Ma, X., ve diğ., “Multi-Criteria Analysis of Optimal Signal Plans using Microscopic Traffic Models”, *Transport Res D-Tr E*, 32, 1-14, (2014).

Matthews, H. S., “The external costs of air pollution and the environmental impact of the consumer in the U.S. economy.”, Doktora Tezi, Carnegie Mellon University, Pittsburg, PA., (1999).

MATLAB R2016b, Mathworks, (2016).

Ozan, C., Başkan, Ö., “Şehiriçi Ulaşım Ağlarında En Kısa Rota Uzunlukları Kullanılarak Tek Yön Düzenlemelerinin Yapılması”, *12. Ulaştırma Kongresi*, Adana, sf. 49-58, (2017).

Penic, M.A., and Upchurch, J., “TRANSYT-7F: Enhancement for fuel consumption, pollution emissions and user costs”, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1360, 104-111, (1992).

Sheffi, Y., and Powell, W., “A comparison of stochastic and deterministic traffic assignment over congested networks”, *Transportation Research Part B*, 15, 53-64, (1981).

Sheffi, Y., ve diğ., *Urban Transport Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, USA, New Jersey: Prentice-Hall Inc., (1985).

Storn, R., and Price, K., “Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces” *Journal of Global Optimization*, 23, 1-15, (1995).

Storn, R., “System design by constraint adaptation and differential evolution”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3, 22-34, (1999).

Suwansrikul, C., and Friesz, T.L., “Equilibrium decomposed optimization a heuristic for the continuous equilibrium network design problem” *Transportation Science*, 4, 254-263, (1987).

Szeto, W.Y., ve diğ., “The chemical reaction optimization approach to solving the environmentally sustainable network design problem”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2, 140-158, (2014).

Türkiye İstatistik Kurumu, “National Inventory Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change”, (13 Nisan 2020), <https://unfccc.int/documents/223580>, (2020).

Wardrop, J.G., “Some theoretical aspect of road traffic research”, *Proceedings Institute Civil Engineers Part II*, 325-378, (1952).

Xu, T., ve diğ., “Study on continuous network design problem using simulated annealing and genetic algorithm”, *Expert Systems and Applications*, 36, 1322-1328, (2009).

Yao, R., ve diğ., “Emission factor calibration and signal timing optimisation for isolated intersections”, *Institution of Engineering and Technology*, 12, 2, 158-167, (2018).



EKLER

8. EKLER

8.1 EK A

Etiket Düzeltme Algoritması: Bu algoritma en kısa rota hesaplamalarında kullanılmaktadır. Tüm düğümleri başlangıç noktası olacak şekilde tarayarak tüm B-V çiftleri için en kısa rotaları hesaplamaktadır. Algoritmanın adımları şu şekildedir;

- Adım 1: Hazırlık. Her düğüm sayısı (NS) için bir tane olacak şekilde $I*NS$ kadarlık maliyet ve önceki düğümler listesi oluşturulur (labellist, prelist). Boş bir küme olarak ardışık liste oluşturulur (seqlist).
- Adım 2: Başlangıç. İlk olarak bir B-V çifti seçilir. Ağdaki tüm düğümlerin etiketi " ∞ " olacak şekilde düzenlenir (labellist = ∞). Önceki düğümler listesi de tamamı 0 olacak şekilde düzenlenir (prelist = 0). Seçilen B-V çiftinin başlangıç düğümü ardışık listeye eklenir (seqlist = ilk).
- Adım 3: Etiket Güncelleme. Başlangıç düğümü etiketi sıfır olarak atanır (labellist (ilk) = 0). Başlangıç düğümünden ulaşılan tüm düğümler değerlendirilir. Ulaşılan düğümün etiketi, önceki düğümün etiketi ile bu iki düğümün arasındaki bağıın maliyetinin toplamından büyükse, ulaşılan düğümün etiketi güncellenir (Denklem E.1) ve ulaşılan düğüm ardışık listeye eklenir (seqlist (j+1)).

$$label_{j+1} \begin{cases} label_j + t_i & label_j + t_i \leq label_{j+1} \\ label_{j+1} & \text{aksi halde} \end{cases}, \forall i, j \in A \quad (E.1)$$

- Adım 4: Durma Kriteri. Adım 3'deki işlem ardışık listede son düğüm kalana kadar yapılır. Ardından ardışık listedeki son düğümün adı silinir ve algoritma durur. Her bir B-V çifti için bu işlem bittiğinde önceki düğümler listesinde en kısa rotalar elde edilir.

Hep veya Hiç Metodu: En basit trafik ataması yöntemi olan Hep yada Hiç atama metodunda, sürücülerin ulaşım ağı hakkında mükemmel bir bilgiye sahip olduğu diğer bir deyişle tüm sürücülerin en kısa rotaları bildiği kabulü yapılmaktadır. Ayrıca bağ seyahat maliyetinin sabit kabul edildiği bu durum ise ağıdaki sıkışıklık etkisinin dikkate alınmadığı anlamına gelmektedir. Hep veya hiç metodu adımları aşağıda verilmiştir.

- Adım 1: B-V varış çiftleri arasındaki en kısa rotaların belirlenmesi
- Adım 2: En kısa rotalara talebin yüklenmesi ve her linkte oluşan toplam trafik hacminin belirlenmesi.

Golden Section metodu: Golden Section metodunun temeli İtalyan matematikçi Fibonacci (1202) tarafından atılmıştır. Golden Section metodu, belirli bir aralık içindeki bir fonksiyonun ekstremumunu bulmak için kullanılan bir tekniktir. *“Golden Section arama metodu, önceden belirlenmiş değerler aralığı üzerinden tek modlu sürekli fonksiyonun minimum / maksimumunu belirleme yöntemidir. Altın oran (0.618) ile belirlenen iki noktada fonksiyon değerleri hesaplanır. Daha sonra aralık, fonksiyon değerlerine göre art arda daraltılır. (Bazara ve diğ., 1993).”*

Metot algoritmanın üç aralık genişliği $2-\phi$: $2\phi-3$: $2-\phi$ oranında olan dört nokta için fonksiyon değerlerini belirlemesinden türemiştir. Bu oranlar her bir yineleme için korunmaktadır. Sınır noktaları haricinde, bir ekstremumu ararken, merkezi nokta her zaman dış noktalardan küçüktür veya bunlara eşittir, böylece dış noktalar arasında bir ekstremum bulunması sağlanmaktadır. Önemli olan kaç noktanın değerlendirildiğine bakılmaksızın, ekstremumun şu ana kadar değerlendirilen en düşük/yüksek değere sahip noktanın bitişiğindeki iki nokta tarafından tanımlanan aralık içinde olduğunu gözlemlemektir.

Tablo EK.1: Sioux-Falls ağı B-V matrisi (bin taşıt/zirve saat)

| Düğüm | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 0 | 0.11 | 0.11 | 0.55 | 0.22 | 0.33 | 0.55 | 0.88 | 0.55 | 1.43 | 0.55 | 0.22 |
| 2 | 0.11 | 0 | 0.11 | 0.22 | 0.11 | 0.44 | 0.22 | 0.44 | 0.22 | 0.66 | 0.22 | 0.11 |
| 3 | 0.11 | 0.11 | 0 | 0.22 | 0.11 | 0.33 | 0.11 | 0.22 | 0.11 | 0.33 | 0.33 | 0.22 |
| 4 | 0.55 | 0.22 | 0.22 | 0 | 0.55 | 0.44 | 0.44 | 0.77 | 0.77 | 1.32 | 1.54 | 0.66 |
| 5 | 0.22 | 0.11 | 0.11 | 0.55 | 0 | 0.22 | 0.22 | 0.55 | 0.88 | 1.1 | 0.55 | 0.22 |
| 6 | 0.33 | 0.44 | 0.33 | 0.44 | 0.22 | 0 | 0.44 | 0.88 | 0.44 | 0.88 | 0.44 | 0.22 |
| 7 | 0.55 | 0.22 | 0.11 | 0.44 | 0.22 | 0.44 | 0 | 1.1 | 0.66 | 2.09 | 0.55 | 0.77 |
| 8 | 0.88 | 0.44 | 0.22 | 0.77 | 0.55 | 0.88 | 1.1 | 0 | 0.88 | 1.76 | 0.88 | 0.66 |
| 9 | 0.55 | 0.22 | 0.11 | 0.77 | 0.88 | 0.44 | 0.66 | 0.88 | 0 | 3.08 | 1.54 | 0.66 |
| 10 | 1.43 | 0.66 | 0.33 | 1.32 | 1.1 | 0.88 | 2.09 | 1.76 | 3.08 | 0 | 4.4 | 2.2 |
| 11 | 0.55 | 0.22 | 0.33 | 1.65 | 0.55 | 0.44 | 0.55 | 0.88 | 1.54 | 4.29 | 0 | 1.54 |
| 12 | 0.22 | 0.11 | 0.22 | 0.66 | 0.22 | 0.22 | 0.77 | 0.66 | 0.66 | 2.2 | 1.54 | 0 |
| 13 | 0.55 | 0.33 | 0.11 | 0.66 | 0.22 | 0.22 | 0.44 | 0.66 | 0.66 | 2.09 | 1.1 | 1.43 |
| 14 | 0.33 | 0.11 | 0.11 | 0.55 | 0.11 | 0.11 | 0.22 | 0.44 | 0.66 | 2.31 | 1.76 | 0.77 |
| 15 | 0.55 | 0.11 | 0.11 | 0.55 | 0.22 | 0.22 | 0.55 | 0.66 | 1.1 | 4.4 | 1.54 | 0.77 |
| 16 | 0.55 | 0.44 | 0.22 | 0.88 | 0.55 | 0.99 | 1.54 | 2.42 | 1.54 | 4.84 | 1.54 | 0.77 |
| 17 | 0.44 | 0.22 | 0.11 | 0.55 | 0.22 | 0.55 | 1.1 | 1.54 | 0.99 | 4.29 | 1.1 | 0.66 |
| 18 | 0.11 | 0 | 0 | 0.11 | 0 | 0.11 | 0.22 | 0.33 | 0.22 | 0.77 | 0.22 | 0.22 |
| 19 | 0.33 | 0.11 | 0 | 0.22 | 0.11 | 0.22 | 0.44 | 0.77 | 0.44 | 1.98 | 0.44 | 0.33 |
| 20 | 0.33 | 0.11 | 0 | 0.33 | 0.11 | 0.33 | 0.55 | 0.99 | 0.66 | 2.75 | 0.66 | 0.55 |
| 21 | 0.11 | 0 | 0 | 0.22 | 0.11 | 0.11 | 0.22 | 0.44 | 0.33 | 1.32 | 0.44 | 0.33 |
| 22 | 0.44 | 0.11 | 0.11 | 0.44 | 0.22 | 0.22 | 0.55 | 0.55 | 0.77 | 2.86 | 1.21 | 0.77 |
| 23 | 0.33 | 0 | 0.11 | 0.55 | 0.11 | 0.11 | 0.22 | 0.33 | 0.55 | 1.98 | 1.43 | 0.77 |
| 24 | 0.11 | 0 | 0 | 0.22 | 0 | 0.11 | 0.11 | 0.22 | 0.22 | 0.88 | 0.66 | 0.55 |

Tablo EK.1(devam): Sioux-Falls ağının B-V matrisi (bin taşıt/zirve saat)

| Düğüm | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 0.55 | 0.33 | 0.55 | 0.55 | 0.44 | 0.11 | 0.33 | 0.33 | 0.11 | 0.44 | 0.33 | 0.11 |
| 2 | 0.33 | 0.11 | 0.11 | 0.44 | 0.22 | 0 | 0.11 | 0.11 | 0 | 0.11 | 0 | 0 |
| 3 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.22 | 0.11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.11 | 0.11 | 0 |
| 4 | 0.66 | 0.55 | 0.55 | 0.88 | 0.55 | 0.11 | 0.22 | 0.33 | 0.22 | 0.44 | 0.55 | 0.22 |
| 5 | 0.22 | 0.11 | 0.22 | 0.55 | 0.22 | 0 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.22 | 0.11 | 0 |
| 6 | 0.22 | 0.11 | 0.22 | 0.99 | 0.55 | 0.11 | 0.22 | 0.33 | 0.11 | 0.22 | 0.11 | 0.11 |
| 7 | 0.44 | 0.22 | 0.55 | 1.54 | 1.1 | 0.22 | 0.44 | 0.55 | 0.22 | 0.55 | 0.22 | 0.11 |
| 8 | 0.66 | 0.44 | 0.66 | 2.42 | 1.54 | 0.33 | 0.77 | 0.99 | 0.44 | 0.55 | 0.33 | 0.22 |
| 9 | 0.66 | 0.66 | 0.99 | 1.54 | 0.99 | 0.22 | 0.44 | 0.66 | 0.33 | 0.77 | 0.55 | 0.22 |
| 10 | 2.09 | 2.31 | 4.4 | 4.84 | 4.29 | 0.77 | 1.98 | 2.75 | 1.32 | 2.86 | 1.98 | 0.88 |
| 11 | 1.1 | 1.76 | 1.54 | 1.54 | 1.1 | 0.11 | 0.44 | 0.66 | 0.44 | 1.21 | 1.43 | 0.66 |
| 12 | 1.43 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.66 | 0.22 | 0.33 | 0.44 | 0.33 | 0.77 | 0.77 | 0.55 |
| 13 | 0 | 0.66 | 0.77 | 0.66 | 0.55 | 0.11 | 0.33 | 0.66 | 0.66 | 1.43 | 0.88 | 0.88 |
| 14 | 0.66 | 0 | 1.43 | 0.77 | 0.77 | 0.11 | 0.33 | 0.55 | 0.44 | 1.32 | 1.21 | 0.44 |
| 15 | 0.77 | 1.43 | 0 | 1.32 | 1.65 | 0.22 | 0.88 | 1.21 | 0.88 | 2.86 | 1.1 | 0.44 |
| 16 | 0.66 | 0.77 | 1.32 | 0 | 3.08 | 0.55 | 1.43 | 1.76 | 0.66 | 1.32 | 0.55 | 0.33 |
| 17 | 0.55 | 0.77 | 1.65 | 3.08 | 0 | 0.66 | 1.87 | 1.87 | 0.66 | 1.87 | 0.66 | 0.33 |
| 18 | 0.11 | 0.11 | 0.22 | 0.55 | 0.66 | 0 | 0.33 | 0.44 | 0.11 | 0.33 | 0.11 | 0 |
| 19 | 0.33 | 0.33 | 0.88 | 1.43 | 1.87 | 0.33 | 0 | 1.32 | 0.44 | 1.32 | 0.33 | 0.11 |
| 20 | 0.66 | 0.55 | 1.21 | 1.76 | 1.87 | 0.44 | 1.32 | 0 | 1.32 | 2.64 | 0.77 | 0.44 |
| 21 | 0.66 | 0.44 | 0.88 | 0.66 | 0.66 | 0.11 | 0.44 | 1.32 | 0 | 1.98 | 0.77 | 0.55 |
| 22 | 1.43 | 1.32 | 2.86 | 1.32 | 1.87 | 0.33 | 1.32 | 2.64 | 1.98 | 0 | 2.31 | 1.21 |
| 23 | 0.88 | 1.21 | 1.1 | 0.55 | 0.66 | 0.11 | 0.33 | 0.77 | 0.77 | 2.31 | 0 | 0.77 |
| 24 | 0.77 | 0.44 | 0.44 | 0.33 | 0.33 | 0 | 0.11 | 0.44 | 0.55 | 1.21 | 0.77 | 0 |