



# ŞEHİRİÇİ ULAŞIM AĞLARININ ARMONİ ARAŞTIRMASI OPTİMİZASYON TEKNİĞİ İLE TASARIMI

Hüseyin CEYLAN

Ekim, 2009

DENİZLİ



**ŒEHİRİÇİ ULAŒIM AĞLARININ ARMONİ ARAŒTIRMASI  
OPTİMİZASYON TEKNİĞİ İLE TASARIMI**

**Pamukkale Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Taraından Kabul Edilen  
Doktora Tezi  
İnŒaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

---

**Hüseyin CEYLAN**


**Danışman: Doç. Dr. Halim CEYLAN**

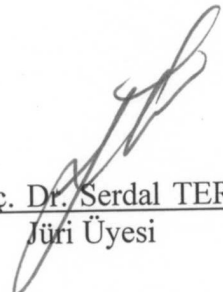
**Ekim, 2009**

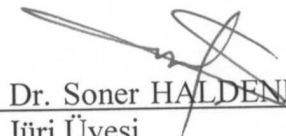
**DENİZLİ**


## DOKTORA TEZİ ONAY FORMU


Hüseyin CEYLAN tarafından Doç. Dr. Halim CEYLAN yönetiminde hazırlanan “Şehirçi Ulaşım Ağlarının Armoni Araştırması Optimizasyon Tekniği ile Tasarımı” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr. Mustafa KARASHAHİN  
Jüri Başkanı

  
Doç. Dr. Serdal TERZİ  
Jüri Üyesi

  
Doç. Dr. Soner HALDENBİLEN  
Jüri Üyesi

  
Yrd. Doç. Dr. Hakan ASLAN  
Jüri Üyesi

  
Doç. Dr. Halim CEYLAN  
Jüri Üyesi (Danışman)

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../.....tarih ve .....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Halil KARAHAAN**  
Müdür

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimimin başından, bu tez çalışmasının sonlandırılmasına kadar gerekli bütün yardım, tavsiye ve yönlendirmeleri yapan, karşılaştığım problemlerin çözümünde zengin bakış açısı ve deneyimleriyle beni aydınlatan değerli hocam sayın Doç. Dr. Halim CEYLAN'a gösterdiği özveri ve desteklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmasının her aşamasında, yapıcı önerileri ile ufukumun genişlemesine büyük katkılar sağlayan değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN'e, sayın Doç. Dr. Soner HALDENBİLEN'e, yüksek lisans eğitimimden bu yana yardımına ihtiyaç duyduğumda beni geri çevirmeyip vaktini ayıran çalışma arkadaşım Özgür BAŞKAN'a, tezin yazımı boyunca çalışma masasını benimle paylaşan değerli arkadaşım Yard. Doç. Dr. Mustafa Tamer AYVAZ'a, çalışma odasında beni misafir eden değerli arkadaşım Gürhan GÜRARSLAN'a, manevi desteklerinden dolayı sevgili dostum Dr. Ali Haydar KAYHAN'a ve tezle ilgili ofis çalışmalarında birçok kez sabaha kadar benimle çalışan değerli arkadaşım Mustafa SAĞIM'a teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen babam Halil CEYLAN'a, beni gözünden sakınarak büyüten kıymetli annem Sevim CEYLAN'a ve her zaman yanımda olan kardeşlerim Süleyman ile Ayşe Nur'a canı gönülden teşekkür ederim.

Hüseyin CEYLAN  
Denizli - 2009

*Canım anneme...*

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 atfedildiğini beyan ederim.

İmza



Öğrenci Adı Soyadı : Hüseyin CEYLAN

## ÖZET

# ŞEHİRİÇİ ULAŞIM AĞLARININ ARMONİ ARAŞTIRMASI OPTİMİZASYON TEKNİĞİ İLE TASARIMI

Ceylan, Hüseyin  
Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği ABD  
Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Halim CEYLAN

Ekim 2009, 129 Sayfa

Bu çalışmada, şehiriçi ulaşım ağlarındaki trafik sıkışıklıklarının azaltılabilmesi için ağda yapılacak fiziksel ve yönetsel iyileştirmeleri kapsayan Ayrık Ulaşım Ağ Tasarımı (AUAT) problemlerinin çözümü ele alınmaktadır. Bu amaçla, literatürde başlıca AUAT problemleri olarak bilinen şerit iyileştirme/ilavesi ve şerit yönlendirme problemleri, doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama (DOKTP) problemi olarak formülize edilmiştir. AUAT problemlerinin çözümü için son yıllarda sürekli ve ayrık optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanan sezgisel **AR**moni **AR**aştırması (ARAR) optimizasyon tekniği tabanlı **UL**aşım **Ağ** **T**asarım (ARARULAT) modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen ARARULAT modelleri ile herhangi bir şehiriçi karayolu ağındaki toplam seyahat süresi değerini en aza indirecek ağ yapılandırmasının elde edilmesi hedeflenmiştir. Modelleme aşamasında, sürücü güzergah seçim davranışlarını temsil eden trafik atama problemi, çalışma sayfası ve çözücü eklentisi kullanılarak çözülmüştür. ARARULAT modellerinin doğrulaması Sioux-Falls karayolu ağındaki şerit iyileştirme problemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Model uygulamaları, Nguyen-Dupuis test ağına uyarlanan şerit ilavesi ve şerit yönlendirme problemlerinin çözümü ile yapılmıştır. Sürücü davranışlarının ağ yapılandırması üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla şerit ilavesi probleminin çözümü deterministik kullanıcı dengesi (DKD) ve stokastik kullanıcı dengesi (SKD) yaklaşımlarını içeren farklı ARARULAT modelleri ile çözülmüştür. Ayrıca, önerilen çözüm yaklaşımının performansını ortaya koymak amacıyla şerit ilavesi problemi, literatürde UAT problemlerinin çözümünde kullanılan İki-Seviyeli İteratif (İSİ) modelleme yaklaşımı ile çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. ARARULAT modelleri, şerit ilavesi problemi için yaklaşık %13, şerit yönlendirme problemi için ise yaklaşık %29 iyileştirme sağlamıştır. Sonuçlar, ARARULAT modellerinin AUAT problemlerinin çözümünde etkin şekilde olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ayrık ulaşım ağ tasarımı; Doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama; Armoni Araştırması; Şehiriçi ulaşım ağları; Trafik ataması

Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN  
Doç. Dr. Serdal TERZİ  
Doç. Dr. Soner HALDENBİLEN  
Doç. Dr. Halim CEYLAN  
Yrd. Doç. Dr. Hakan ASLAN



## ABSTRACT

### DESIGN OF THE URBAN TRANSPORTATION NETWORKS USING HARMONY SEARCH OPTIMIZATION TECHNIQUE

Ceylan, Hüseyin  
PhD. Thesis in Civil Engineering  
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Halim CEYLAN

October 2009, 129 Pages

This study deals with the solution of Discrete Network Design Problem (DNDP) which includes the topological and operational improvements on urban transportation networks to reduce the traffic congestion. Thus, two common DNDP problems, which are lane improvement/addition and lane re-allocating, have been formulized as nonlinear mixed integer programming problems. For this purpose, meta-heuristic Harmony Search (HS) optimization algorithm based DNDP solution models (named ARARULAT) are developed. The main aim of the proposed models is determining the optimum lane improvement/addition or re-allocating configuration to minimize the total travel time on an urban road network. The traffic assignment problem, which represents the drivers' route choice behaviors, is solved using spreadsheets and solver add-in during the modeling process. The model validation is carried out by solving a lane improvement problem for Sioux-Falls road network. The performance of the proposed models is tested with lane addition and lane re-allocating problems on Nguyen-Dupuis test network. In order to investigate the effects of the drivers' behavior on the network design, the lane addition problem is solved under deterministic and stochastic user equilibrium conditions for different ARARULAT models. Besides, the lane addition problem is solved with bi-level iterative (so called mutually consistent) modeling approach to test the performance of the proposed models. ARARULAT models provide 13% and 29% improvements for lane addition and lane re-allocating problems, respectively. Results showed that the ARARULAT models can effectively be used to solve DNDPs.

**Keywords:** Discrete transportation network design, Nonlinear mixed integer programming, Harmony Search, Urban transportation networks, Traffic assignment

Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN  
Assoc. Prof. Dr. Serdal TERZİ  
Assoc. Prof. Dr. Soner HALDENBİLEN  
Assoc. Prof. Dr. Halim CEYLAN  
Assist. Prof. Dr. Hakan ASLAN

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ ONAY FORMU.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
BİLİMSEL ETİK SAYFASI .....	iv
ÖZET .....	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
TABLolar DİZİNİ .....	xi
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Problemin Tanımı .....	4
1.3. Amaç ve Kapsam .....	4
1.4. Tezin İçeriği .....	6
2. LİTERATÜR TARAMASI .....	7
2.1. Giriş.....	7
2.2. Ulaşım Ağ Tasarımı .....	7
2.2.1. Trafik ataması .....	8
2.2.1.1. DKD ataması.....	9
2.2.1.2. SKD ataması .....	13
2.2.2. Sürekli ulaşım ağ tasarımı .....	19
2.2.3. Ayrık ulaşım ağ tasarımı .....	21
2.3 Armoni Araştırması Optimizasyon Tekniği.....	26
2.4. ARARULAT Modellemesine Genel Bakış.....	28
2.5. Sonuçlar .....	30
3. ARMONİ ARAŞTIRMASI OPTİMİZASYON TEKNİĞİ .....	31
3.1. Giriş.....	31
3.2. ARAR Algoritmasına Genel Bakış .....	31
3.3. Optimizasyon Tekniği Performans Testleri .....	36
3.3.1. De Jong'un test fonksiyonu.....	36
3.3.2. Rastrigin'in test fonksiyonu .....	37
3.3.3. Michalewicz'in test fonksiyonu .....	39
3.3.4. Goldstein-Price'in test fonksiyonu.....	40
3.3.5. Schwefel'in test fonksiyonu .....	41
3.4. Sezgisel ARAR Optimizasyon Tekniği Tabanlı Çözüm Modeli: ARARULAT ..	43
3.4.1. Örnek uygulama .....	46
3.5. Sonuçlar .....	50
4. AUAT PROBLEM FORMÜLASYONLARI VE ARARULAT MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ .....	52
4.1. Giriş.....	52
4.2. AUAT Problem Formülasyonları.....	52
4.2.1. DKD problem formülasyonu ve çözümü .....	53
4.2.2. SKD problem formülasyonu ve çözümü .....	55
4.2.3. Şerit ilavesi/iyileştirme problemi .....	58
4.2.4. Şerit yönlendirme problemi .....	60
4.3. ARARULAT Modelleri Çözümü.....	60

4.3.1. ARARULAT-DKD-1 modeli.....	61
4.3.2. ARARULAT-SKD-1 modeli .....	64
4.3.3. ARARULAT-DKD-2 modeli.....	65
4.3.4. ARARULAT-İSİ modeli.....	66
4.3.5. ARARULAT-SKD-2 modeli .....	68
4.4. Sonuçlar .....	71
5. SAYISAL UYGULAMALAR .....	72
5.1. Giriş.....	72
5.2. ARARULAT Modelinin Doğrulanması (ARARULAT-DKD-1).....	72
5.3. ARARULAT Modellerine İlişkin Sayısal Uygulamalar.....	77
5.3.1. Nguyen-Dupuis test ağı.....	77
5.3.2. ARARULAT-SKD-1 modeli uygulamaları .....	78
5.3.3. ARARULAT-DKD-2 modeli uygulamaları .....	90
5.3.4. ARARULAT-İSİ modeli uygulamaları.....	94
5.3.5. ARARULAT-SKD-1, ARARULAT-DKD-2 ve ARARULAT-İSİ model performanslarının karşılaştırılması.....	95
5.3.6. ARARULAT-SKD-2 modeli uygulamaları .....	97
5.3.6.1. Senaryo 1: Tüm bağlar yönlendirmeye aday .....	98
5.3.6.2. Senaryo 2: İç bağlar yönlendirmeye aday .....	102
5.3.6.3. Senaryo 3: Kapalı bağlar dışındaki tüm bağlar yönlendirmeye aday ..	105
5.3.6.4. Senaryoların karşılaştırılması.....	110
5.4. Duyarlılık Analizleri .....	111
5.4.1. ARARULAT-SKD-1 modelinin şerit kapasitelerine duyarlılığı .....	112
5.4.2. ARARULAT-SKD-1 modelinin ARAR parametrelerine duyarlılığı .....	114
5.5. Sonuçlar .....	115
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	117
6.1. Sonuçlar .....	117
6.2. Öneriler .....	120
7. KAYNAKLAR .....	122
ÖZGEÇMİŞ .....	130

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 İki bağlı örnek ulaşım ağı .....	10
Şekil 2.2 Deterministik kullanıcı dengesi .....	10
Şekil 2.3 Deterministik kullanıcı dengesi ataması için tepki yüzeyi .....	11
Şekil 2.4 Stokastik kullanıcı dengesi .....	16
Şekil 2.5 SKD ataması için tepki yüzeyi.....	17
Şekil 2.6 ARAR tekniğinin AUAT problemine uygulanışı .....	29
Şekil 3.1 ARAR ile gerçek optimizasyon problemleri arasındaki bağlantı .....	32
Şekil 3.2 Ayrık değişkenler için yeni armoni vektörü üretimi.....	35
Şekil 3.3 De Jong'un test fonksiyonu .....	37
Şekil 3.4 De Jong'un test fonksiyon çözümünün yakınsama grafiği.....	37
Şekil 3.5 Rastrigin'in test fonksiyonu.....	38
Şekil 3.6 Rastrigin'in test fonksiyonunun yakınsama grafiği .....	38
Şekil 3.7 Michalewicz'in test fonksiyonu.....	39
Şekil 3.8 Michalewicz'in test fonksiyonunun yakınsama grafiği .....	40
Şekil 3.9 Goldstein-Price'in test fonksiyonu .....	41
Şekil 3.10 Goldstein-Price'in test fonksiyonunun yakınsama grafiği.....	41
Şekil 3.11 Schwefel'in test fonksiyonu.....	42
Şekil 3.12 Schwefel'in test fonksiyonunun yakınsama grafiği.....	42
Şekil 3.13 AUAT problemini çözümü için geliştirilen ARARULAT modeli .....	44
Şekil 3.14 Yönlendirme öncesinde test ağının görünümü .....	46
Şekil 3.15 Test ağı için şerit yönlendirme probleminin çözümü boyunca toplam seyahat süresinin değişimi .....	49
Şekil 3.16 Yönlendirme sonrasında test ağının görünümü .....	50
Şekil 4.1 DKD probleminin çalışma sayfası ve çözücü yardımıyla çözümü.....	54
Şekil 4.2 SKD probleminin çalışma sayfası ve çözücü yardımıyla çözümü.....	58
Şekil 4.3 ARARULAT-DKD-1 modeli .....	62
Şekil 4.4 Şerit ilavesi problemi için geliştirilen ARARULAT modeli .....	66
Şekil 4.5 İki-seviyeli iteratif çözüm yaklaşımı .....	67
Şekil 4.6 Şerit yönlendirme problemi için geliştirilen ARARULAT modeli .....	69
Şekil 5.1 Sioux-Falls test ağı.....	73
Şekil 5.2 ARARULAT-DKD-1 modeli çözüm sürecinin yakınsama grafiği .....	76
Şekil 5.3 Nguyen-Dupuis test ağı .....	78
Şekil 5.4 ARARULAT-SKD-1 modelinin 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için yakınsama grafiği .....	81
Şekil 5.5 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 modellemesi sonucunda çalışma ağının yeni yapısı.....	82
Şekil 5.6 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları .....	84

Şekil 5.7 ARARULAT-SKD-1 modelinin 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için yakınsama grafiği .....	85
Şekil 5.8 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları .....	87
Şekil 5.9 ARARULAT-SKD-1 modelinin 630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için yakınsama grafiği .....	87
Şekil 5.10 630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları .....	89
Şekil 5.11 ARARULAT-DKD-2 modeli çözüm sürecinin yakınsama grafiği .....	91
Şekil 5.12 ARARULAT-İSİ modeli çözüm sürecinin yakınsama grafikleri .....	95
Şekil 5.13 Senaryo 1 için ARARULAT-SKD-2 modeli çözüm sürecinin yakınsama grafiği .....	100
Şekil 5.14 Senaryo 1 için çalışma ağının yeni görünümü .....	100
Şekil 5.15 Senaryo 1 için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları .....	102
Şekil 5.16 Senaryo 2 için ARARULAT-SKD-2 modeli çözüm sürecinin yakınsama grafiği .....	103
Şekil 5.17 Senaryo 2 için çalışma ağının yeni görünümü .....	104
Şekil 5.18 Senaryo 2 için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları .....	105
Şekil 5.19 Senaryo 3 için çalışma ağının mevcut görünümü .....	106
Şekil 5.20 Senaryo 3 için ARARULAT-SKD-2 modeli çözüm sürecinin yakınsama grafiği .....	107
Şekil 5.21 Senaryo 3 için çalışma ağının yeni görünümü .....	108
Şekil 5.22 Senaryo 3 için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları .....	110
Şekil 5.23 ARARULAT-SKD-2 modeli ile senaryoların çözümü sonucunda elde edilen toplam seyahat süresi yakınsama grafiği .....	110
Şekil 5.24 Farklı şerit genişlikleri için ARARULAT-SKD-1 çözümü ile elde edilen toplam seyahat süresi değerleri .....	113
Şekil 5.25 Farklı şerit genişlikleri için Nguyen-Dupuis test ağındaki toplam seyahat süresi değerinde hesaplanan iyileşme oranları .....	114
Şekil 5.26 Duyarlılık analizine ilişkin yakınsama grafiği .....	115

## TABLOLAR DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 3.1 Test fonksiyonlarının çözümü için parametre değerleri .....	36
Tablo 3.2 ARAR ve GA modellerinin sonuçlarının değerlendirilmesi.....	43
Tablo 3.3 Test ağındaki bağlardaki serbest akım seyahat süreleri ve yönlendirme öncesi şerit sayıları .....	46
Tablo 3.4 Test ağındaki yapılandırma öncesi trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları .....	47
Tablo 3.5 Test ağının çözümü için oluşturulan başlangıç belleği.....	48
Tablo 3.6 Birinci iterasyonda üretilen çözüm vektörü ve amaç fonksiyonu değeri.....	48
Tablo 3.7 1, 10, 100 ve 373. iterasyonlar sonunda elde edilen en iyi çözüm vektörleri ve amaç fonksiyonu değerleri .....	50
Tablo 3.8 Test ağındaki yapılandırma sonrası trafik hacimleri.....	50
Tablo 4.1 ARARULAT modelleri .....	60
Tablo 5.1 Düğümler arasındaki seyahat matrisi (1000 araç/gün) .....	74
Tablo 5.2 Çalışma ağına ait bağ parametreleri ( $a$ ve $b$ ).....	75
Tablo 5.3 Yeni bağ parametreleri ( $a^*$ , $b^*$ ) ve proje maliyetleri.....	75
Tablo 5.4 Nguyen-Dupuis test ağına ilişkin sabit veriler.....	79
Tablo 5.5 Şerit ilavesi problemi için kullanılan B-V seyahat talepleri (taşıt/sa) .....	80
Tablo 5.6 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çalışma ağındaki mevcut saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları .....	81
Tablo 5.7 ARARULAT-SKD-1 modeli ile 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için elde edilen yeni yapılandırma .....	82
Tablo 5.8 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 modellemesi sonucunda çalışma ağındaki saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları.....	83
Tablo 5.9 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çalışma ağında hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri.....	83
Tablo 5.10 ARARULAT-SKD-1 modeli ile 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için elde edilen yeni yapılandırma .....	85
Tablo 5.11 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 modeli ile elde edilen saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları (M: Mevcut durum, Y: Yeni durum).....	86
Tablo 5.12 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çalışma ağında hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri.....	86
Tablo 5.13 ARARULAT-SKD-1 modeli ile 630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için elde edilen yeni yapılandırma .....	88
Tablo 5.14 630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 modeli ile elde edilen saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları (M: Mevcut durum, Y: Yeni durum).....	88
Tablo 5.15 630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çalışma ağında hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri.....	89
Tablo 5.16 Test ağının mevcut durumu için ARARULAT-DKD-2 modeli ile hesaplanan bağ trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları.....	90

Tablo 5.17 ARARULAT-DKD-2 modellemesi sonucunda elde edilen yapılandırma ...	92
Tablo 5.18 Test ağının yeni durumu için ARARULAT-DKD-2 modeli ile hesaplanan bağ trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları.....	93
Tablo 5.19 ARARULAT-DKD-2 modellemesi sonunda elde edilen toplam seyahat süresi, ortalama kapasite kullanım oranı ve gerekli yatırım bedeli değerleri (M: Mevcut durum, Y: Yeni durum).....	94
Tablo 5.20 ARARULAT-İSİ modeli ile hesaplanan toplam seyahat süresi değerleri ve iyileşme yüzdeleri ( M: Mevcut durum, Y: Yeni durum) .....	95
Tablo 5.21 ARARULAT-SKD-1, ARARULAT-DKD-2 ve ARARULAT-İSİ modelleri ile elde edilen toplam seyahat süreleri (taşıt-sa) ve iyileşme oranları (%) .....	96
Tablo 5.22 ARARULAT-SKD-1 ve ARARULAT-DKD-2 modelleri ile elde edilen ortalama kapasite kullanım oranları (%) ve iyileşmeler (%) .....	96
Tablo 5.23 Şerit yönlendirme problemi için kullanılan B-V seyahat talepleri (taşıt/sa)	98
Tablo 5.24 Senaryo 1 için çalışma ağındaki mevcut saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları .....	99
Tablo 5.25 Senaryo 1 için ARARULAT-SKD-2 modeli ile elde edilen bağ yönlendirme planı.....	100
Tablo 5.26 Senaryo 1'in ARARULAT-SKD-2 modeli ile çözümü sonrasında hesaplanan saatlik trafik hacimleri, bağ kapasiteleri ve kapasite kullanım oranları .....	101
Tablo 5.27 Senaryo 1 için çalışma ağında hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri .....	102
Tablo 5.28 Senaryo 2 için ARARULAT-SKD-2 modeli ile elde edilen bağ yönlendirme planı.....	103
Tablo 5.29 Senaryo 2'nin ARARULAT-SKD-2 modeli ile çözümü sonrasında hesaplanan saatlik trafik hacimleri, bağ kapasiteleri ve kapasite kullanım oranları (M: Mevcut durum, Y: Yeni durum) .....	104
Tablo 5.30 Senaryo 2 için çalışma ağında hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri .....	105
Tablo 5.31 Senaryo 3 için çalışma ağındaki mevcut saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları .....	107
Tablo 5.32 Senaryo 3 için ARARULAT-SKD-2 modeli ile elde edilen bağ yönlendirme planı.....	108
Tablo 5.33 Senaryo 3'ün ARARULAT-SKD-2 modeli ile çözümü sonrasında hesaplanan saatlik trafik hacimleri, bağ kapasiteleri ve kapasite kullanım oranları .....	109
Tablo 5.34 Senaryo 3 için çalışma ağında hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri .....	109
Tablo 5.35 Senaryoların çözümü sonucunda elde edilen toplam seyahat süresi, ortalama kapasite kullanım oranları ve bu değerlere ait iyileşme yüzdeleri.....	111
Tablo 5.36 ARARULAT-SKD-1 modelinin şerit kapasitelerine bağlı duyarlılık analiz sonuçları (M: Mevcut durum, Y: Yeni durum).....	113
Tablo 5.37 Armoni araştırması parametrelerine bağlı duyarlılık analizinde dikkate alınan durumlar ve çözüm sonuçları .....	114

## SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\alpha$	: Bağ seyahat süresi fonksiyonu parametresi
$A(j)$	: $j$ düğümünden çıkan bağların girdiği düğümler kümesi
ADO	: Ayrıştırılmış Denge Optimizasyonu
<b>ADK</b> (*,*)	: ARAR'da karar değişkenlerinin alabileceği değerler vektörü
ARAR	ARmoni Araştırması
ARARULAT	: ARmoni ARaştırması tabanlı ayrık ULaşım Ağ Tasarımı
AUAT	: Ayrık Ulaşım Ağ Tasarımı
$b_a$	$a$ bağına bir şerit ilavesi durumunda ortaya çıkacak maliyet
<b>b</b>	Bağ iyileştirme/ilave maliyetleri vektörü
$\beta$	: Bağ seyahat süresi fonksiyonu parametresi
$B(j)$	: $j$ düğümüne giren bağların çıktığı düğümler seti
B-V	: Başlangıç-Varış
$c_a$	$a$ bağının saatlik kapasitesi
<b>c</b>	: Bağ kapasiteleri vektörü
$Cb(\mathbf{b})$	Yol ağındaki en uygun şerit ilavesi/iyileştirme planının, yatırım bütçesinin aşılmadan aranması için geliştirilen ceza fonksiyonu
$CF_p^w$	: $P_w$ kümesinde bulunan tüm $p$ güzergahları arasındaki bağımlılığı
$Ch(\mathbf{v}, \mathbf{c})$	Bağ trafik hacimlerinin kapasiteyi aşmayacak şekilde çözüm uzayında araştırılması için geliştirilen ceza fonksiyonu
$D$	: ARAR'da ayrık değişkenler kümesi
DKD	: Deterministik kullanıcı dengesi
DOKTP	: Doğrusal Olmayan Karma Tamsayılı Programlama
<b><math>\delta</math></b>	: Bağ-güzergah belirleme matrisi
$f_p^w$	: $w$ B-V çifti arasındaki $p$ güzergahındaki saatlik trafik hacmi
GA	: Genetik Algoritmalar
$g_p$	: $p$ güzergahındaki seyahat süresi
$h_p$	: $p$ güzergahındaki trafik hacmi
<b>h</b>	: Güzergah SKD trafik hacimleri vektörünü
HM(*,*)	: Armoni belleği
HMCR	: Armoni belleğini dikkate alma oranı
HMS	: Armoni belleği kapasitesi
İSİ	: İki-Seviyeli İteratif
<b>K</b>	: Bağ seçim olasılıkları matrisidir



KKO	: Karınca Kolonisi Optimizasyonu
$L$	: Yol ağındaki bağlar kümesi
$\lambda$	: HM'deki en iyi ve en kötü amaç fonksiyonu değerlerinin farkı
$\Lambda$	: B-V-güzergah belirleme matrisini
$m_w$	: $w$ B-V çifti arasındaki minimum güzergah seyahat süresi
$N_a^w$	: $w$ B-V çifti arasında yer alan ve $a$ bağımlı kullanan güzergah sayısı
NADK	: ARAR'da karar değişkenlerinin alabileceği değerler vektörü sayısı
NDHV(*)	: Yeni ayırık armoni vektörü
PAR	: Ton ayarlama oranı
$Pr_p^w(g_p^w)$	: $w$ B-V çifti arasındaki $p$ güzergahının seçilme olasılığı
$P_w$	: $w$ B-V çifti arasındaki güzergahlar kümesi
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
$q_w$	: $w$ B-V çifti arasındaki toplam seyahat talebi
$q(j,s)$	: $j$ düğümünden $s$ düğümüne seyahat eden toplam trafik hacmi
$\mathbf{q}$	: B-V seyahat talepleri vektörünü
rst	: 0.0~1.0 aralığında rastgele sayı
$\rho$	Ölçek parametresi
SKD	: Stokastik kullanıcı dengesi
SUAT	: Sürekli Ulaşım Ağ Tasarımı
TA	Trafik Ataması
TB	Tavlama Benzetimi
$T(\mathbf{v}, \mathbf{t})$	: Ağ toplam seyahat süresi
$t_a(v_a)$	: $a$ bağındaki trafik hacminin bir işlevi olarak seyahat süresi
$t_a^0$	: $a$ bağındaki serbest akım seyahat süresi
$t_a$	: $a$ bağındaki seyahat süresi
$\mathbf{t}$	: Bağ seyahat süreleri vektörü
$tms()$	: Tamsayı
$\theta_0, \theta_1$	: Sürücü algılama düzeylerini temsil eden C-Logit model parametreleri
UAT	: Ulaşım Ağ Tasarımı
$u_a$	: $a$ bağıının iyileştirme sonrası durumunu temsil eden tamsayı değişkeni
$\mathbf{u}$	: $u$ değerleri vektörü
$v_a$	: $a$ bağındaki saatlik trafik hacmini
$\mathbf{v}$	: Bağ trafik hacimleri vektörünü
$v_a^*$	$a$ bağındaki denge trafik hacmi
$\mathbf{v}^*$	Bağ denge trafik hacimleri vektörü

- $v_a^s$  :  $a$  bağı boyunca  $s$  varışına seyahat eden trafik hacmi
- $w_{ap}^w$  :  $p \in P_w$  güzergahı için  $a$  bağının oransal ağırlığı
- $W$  : B-V çiftleri kümesi
- $y$  : Beklenen en düşük B-V seyahat süresini

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Giriş

Son yıllarda gelişmekte olan ülkelerde, hızlı nüfus artışı ve buna bağlı olarak artan özel araç kullanımı ile düzensiz kentleşmenin sonucunda şehiriçi karayolu ulaşım ağlarındaki trafik sıkışıklıkları hızla artmaktadır. Bu sıkışıklıklar, karayolu ağlarındaki seyahat talebi ve mevcut bağ kapasitelerine bağlı olarak belirli güzergahlarda gün boyunca, belirli güzergahlarda ise zirve saat trafik taleplerine bağlı olarak günün belirli saatlerinde ortaya çıkabilmektedir. Motorlu taşıt kullanımını tetikleyen parametrelerdeki artan eğilimin sürdüğü göz önünde bulundurulduğunda, şehiriçi yol ağlarının etkin bir şekilde kullanımı için yine etkin ve sürdürülebilir tasarım stratejilerinin geliştirilmesi ve uygulanması gerekmektedir.

Şehiriçi karayolu ulaşım ağlarında trafik sıkışıklıklarının azaltılması, özellikle trafik talebinin yoğun olduğu periyotlarda ağdaki seyahatlerin mümkün olan en kısa sürede yapılabilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu da, yol kullanıcı karakteristiklerinin iyi düzeyde temsil edildiği, yol ağındaki üretim ve çekim merkezleri arasındaki seyahat talebinin mümkün mertebede eksiksiz şekilde gözönünde bulundurulduğu, trafik karakteristikleri ve ağın fiziksel özelliklerine bağlı olarak kapasite kavramının dikkatle ele alındığı ve mali imkanların optimum şekilde kullanıldığı bir Ulaşım Ağ Tasarımı (UAT) ile mümkündür.

UAT, *belirlenen bir amaç doğrultusunda bir karayolu ağının yönetsel ve fiziksel olarak yapılandırılması* olarak tanımlanabilir. Bu yapılandırma gereksinimi, bir karayolu ağının hem planlama hem de işletme sürecinde ortaya çıkabilmektedir. İşletme sürecinde karşılaşılan önemli sorulardan bazıları şu şekildedir:

- Ulaşım ile ilgili (kontrol noktaları, bakım-onarım merkezleri, trafik kontrol merkezleri, vb.) altyapı tesisleri nerelere yerleştirilmelidir?
- Düzenli bir işletim için gerekli kaynaklar nelerdir?

Planlama sürecinde karşılaşılan temel UAT problemleri ise şu şekilde sıralanabilir:

- Hangi güzergahlarda ulaşım servisi verilmelidir?
- Güzergah/bağ kapasiteleri hangi düzeyde olmalıdır?
- Kullanılmayan araçların yerleştirilmesi gereken mekanlar nasıl tasarımılandırılmalı ve nerelere yerleştirilmelidir?
- Sinyalize kavşaklardaki sinyal parametreleri (ağ devre süresi, faz süreleri, kavşakların izole ya da koordineli çalışma durumları, vb.) nasıl tasarlanmalıdır?
- Sinyalize olmayan kavşaklar nasıl işletilmelidir?

Mevcut karayolu ağ kapasitelerinin daha etkin kullanımı ya da bu kapasitelerin artırılması için yapılacak yatırımlardan daha etkili sonuçlar alınabilmesi için belirlenen amaç ya da amaçlar doğrultusunda geliştirilen UAT problemlerinin çözülmesi gerekmektedir. UAT problemi, *sürekli ulaşım ağ tasarım* (SUAT) problemi ve *ayrık ulaşım ağ tasarım* (AUAT) olarak ikiye ayrılmaktadır. Her iki ağ tasarım yaklaşımında da temel amaç, yol kullanıcılarının güzergah seçim davranışlarını göz önünde bulundurarak sistem performansını arttırmaktır (Bell ve Iida 1997).

SUAT problemi, ulaşım ağına etki eden sürekli tasarım parametrelerinin optimum ya da yakın-optimum değerlerinin bulunmasını ele almaktadır. Başka bir deyişle SUAT problemi, yol ağının fiziksel özellikleri korunarak, ağın işletimi ile ilgili tasarım parametrelerinin optimizasyonu olarak tanımlanabilir. SUAT problemleri için şu örnekler verilebilir:

- Kavşaklardaki sinyal sürelerinin hesaplanması,
- Sıkışıklık fiyatlandırması ve kullanıcı ücretlendirmelerinin belirlenmesi (toplu taşıma ücretleri, park ve yol geçiş ücretleri, vb.).

AUAT ise ulaşım ağının topolojisi (fiziksel yapısı) ile ilgilidir ve bir karayolu ağına optimum performans kazandırmak için ağda yapılacak olan fiziksel ve yönetsel değişikliklerin tasarlandırılmasıdır. AUAT kapsamında ele alınabilecek başlıca problemler:

- Yol kapama planlarının hazırlanması,
- Yeni bir toplu taşıma servisinin hizmete sokulması (yeni bir bağ kümesi ilavesi olarak ele alındığında)
- Yeni karayolu-demiryolu hatları, köprü veya tünel inşaatları,
- Ulaşım ağını oluşturan bağlardaki şerit paylaşımlarının düzenlenmesi
- Güzergahlarda tek- çift yön uygulamalarının yapılabilirliğinin araştırılması olarak sıralanabilir.

Sanayileşme, nüfus ve araç sahipliği gibi sosyo-ekonomik faktörlerden önemli derecede etkilenen seyahat talebi, zaman zaman karayolu ağındaki mevcut işletim koşullarının (kavşaklarda sinyalizasyon tasarımı, yatay-düşey işaretlemeler, yaya geçitleri vb.) iyileştirilmesi ile karşılanamayabilir. Bu durumda, mevcut yol ağına yeni bağlar inşa edilmesi ya da mevcut bağların yeniden düzenlenerek kapasitelerinin artırılması kaçınılmaz hale gelebilmektedir. Özellikle kentsel yapılanmanın yoğun olduğu kesimlerde mevcut yol ağına yeni bağlar eklemek; konut ve işyeri yapılarının yoğun olduğu bölgede uygun arazi kesiminin bulunmaması ya da istiklak bedellerinin oldukça yüksek olmasından dolayı çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Bu durumda, mevcut ağın fiziksel özelliklerinin değiştirilmesi (yeni şerit ilaveleri, şerit genişliklerinin artırılması, tekyön uygulamaları, vb.), en uygun çözüm olarak tasarımcıların karşısına çıkmaktadır. Bu iyileştirmeleri gerçekleştirirken, bütçe kaynakları dahilinde ağ üzerindeki trafik sıkışıklıklarını en aza indirecek yatırım stratejilerinin belirlenmesi önem taşımaktadır (Ceylan ve Ceylan 2009b). Tüm bu iyileştirmeleri kapsayan AUAT, içerdiği tamsayı değişkenlerinden dolayı doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama (DOKTP) problemi olarak ele alınmakta ve günümüzde ulaştırma alanının en zor problemleri arasında yer almaktadır (Magnanti ve Wong 1984, Yang ve Bell 1998).

## 1.2. Problemin Tanımı

AUAT probleminin çözümü için literatürde kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda ele alınan problemlerin büyük bölümü, numaralandırma tabanlı dal-sınır yaklaşımları ile çözülmüştür (Steenbrink 1974, LeBlanc 1973, LeBlanc 1975, Poorzahedy ve Turnquist 1982, Chen ve Alfa 1991). Bunun yanında, AUAT problemlerinin çözümü için literatürde az sayıda sezgisel tabanlı yaklaşım bulunmaktadır (Drezner ve Weosolowsky 1997, Kim ve Kim 2006, Zhang ve Gao 2007, Duthie ve Waller 2008).

AUAT problemlerinin çözümü için geliştirilen bu yöntemlerle ilgili başlıca eksiklikler, gerçek uygulamalarda çok sayıda ayırık tasarım parametresi içermesinden dolayı numaralandırma tabanlı algoritmaların etkin olarak kullanılamaması ve tasarım problemi için sezgisel çözüm yöntemi kullanılmasına rağmen bazı çalışmalarda sürücü davranışlarının yeterli düzeyde karakterize edilemediği deterministik kullanıcı dengesi (DKD) yaklaşımının kullanılmış olmasıdır. Ayrıca, stokastik kullanıcı dengesi (SKD) atama prosedürünün kullanıldığı çalışmalarda sonuçların çok küçük boyutlu test ağları için verilmiş olması, geliştirilen çözüm yöntemlerinin orta ve büyük ölçekli karayolu ağları için uygulanabilirliğini ortaya koymamaktadır. Bu nedenlerden dolayı, sürücü davranışlarını SKD yaklaşımı ile ele alan, tasarım probleminin çözümünde numaralandırma tekniklerinde karşılaşılabilecek olası sorunlardan uzak ve yeni sezgisel yaklaşımların avantajlarından yararlanan çözüm modellerinin geliştirilmesi gerekliliği vardır. Bu modellerin, şehiriçi ulaşım ağlarındaki trafiğin planlanması, yönetilmesi ve kontrolünde etkin şekilde kullanılabilirliğinin araştırılması gerekmektedir.

## 1.3. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın genel amacı, şehiriçi ulaşım ağlarındaki sürücü davranışlarını dikkate alan AUAT modelleri geliştirmektir. Bu amaçla, yol kullanıcı davranışlarını SKD prensipleri altında dikkate alan ve trafik sıklıklarının gözlemlendiği bir karayolu ağındaki toplam seyahat süresi değerini en aza indirmek için gerekli tasarımın belirlenebildiği sezgisel çözüm algoritmaları verilecektir. Model çözümleri, literatürde karayolu ağlarının tasarımında günümüze kadar uygulaması olmayan ve son yıllarda sürekli ve ayırık optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanan sezgisel

ARmoni ARaştırması (ARAR) optimizasyon tekniği ile gerçekleştirilecektir. Bu modeller, **ARAR** tabanlı ayrıık **UL**aşım **Ağ** **T**asarım (ARARULAT) modelleri olarak adlandırılacaktır.

Bu çalışmanın özel amaçları kapsamında:

- AUAT probleminin zm için literatürde geliştirilen çalışmaları kapsayan detaylı bir literatür çalışması gerçekleştirilecektir.
- ARAR tekniğinin AUAT problemlerinin zmndeki etkinliği araştırılacaktır.
- ARARULAT modellerinin performansları, dal-sınır yaklaşımı tabanlı üzümlerle karşılaştırarak model doğrulamasını gerçekleştirilecektir.
- Geliştirilecek ARARULAT modellerinin trafik yönetim tekniklerinden olan şerit iyileştirme/ilavesi ve trafik yönlendirme problemlerine uygulanabilirliği araştırılacaktır.
- Geliştirilen modellerin etkinliğini araştırmak amacıyla, AUAT kapsamında ele alınan şerit ilavesi probleminin üzümünü iki-seviyeli iteratif (İSİ) modelleme yaklaşımı ile gerçekleştirip sonuçlar karşılaştırılacaktır.
- DKD ve SKD yaklaşımlarıyla temsil edilebilen sürücü davranışlarının AUAT problemi üzerindeki etkisi test edilecektir.
- Literatürde kısıtlı optimizasyon problemi olarak ele alınan şerit ilavesi/iyileştirme problemindeki bütçe kısıtı, toplam seyahat süresi fonksiyonuna eklenen bir ceza fonksiyonu ile temsil edilerek bu problem kısıtsız optimizasyon problemine dönüştürülecektir.
- Çeşitli nedenlerle trafiğe kapalı bağlardan kaynaklanan trafik sıkışıklıklarını azaltmak için etkin bir şerit yönlendirme modeli oluşturulacaktır.
- Duyarlılık analizleri yaparak, farklı şerit genişliği değerleri ve ARAR parametrelerinin model performansı ve ağ seyahat süresi üzerindeki etkileri araştırılacaktır.

#### 1.4. Tezin İçeriği

Tez çalışmasının ilerleyen bölümleri aşağıdaki şekilde organize edilmiştir:

İkinci bölümde literatürde yapılan çalışmalar, trafik ataması (TA), UAT ve Armoni Araştırması (ARAR) optimizasyon tekniği başlıkları altında incelenmiştir. DKD ve SKD atama yaklaşımları arasındaki temel farklar ortaya koyulduktan sonra SUAT ve AUAT problemleri tanımlanmıştır. AUAT çalışmaları ile ilgili detaylı bir literatür bilgisi verilmiş ve ARARULAT modellerine genel bakış sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, ARAR optimizasyon tekniğinin çözüm aşamaları detaylı olarak anlatılmış ve performans testleri gerçekleştirilmiştir. Ardından, ARAR optimizasyon tekniğinin AUAT problemine uygulanışı açıklanmış ve geliştirilen ARARULAT modelinin örnek bir test ağına uygulanışı ayrıntılı şekilde verilmiştir.

Dördüncü bölümde, DKD ve SKD ataması problemlerinin çözüm formülasyonları verilmiş ve çalışma sayfası ve çözücü işlevi ile çözümleri anlatılmıştır. Daha sonra şerit ilavesi/iyileştirme ve şerit yönlendirme problemleri formülize edilmiştir. Son olarak, ARARULAT modelleri, kullandıkları TA yaklaşımları ve geliştirilme amaçlarına bağlı olarak sınıflandırılmış ve her modelin çözüm süreçleri detaylı olarak açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, ARARULAT modelleri ile ilgili sayısal uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle ARARULAT modellerinin doğrulamasını gerçekleştirilmiştir. Literatürde ele alınmış ve çözümü bilinen bir AUAT problemi için gerçekleştirilen doğrulama çözümünün ardından, şerit ilavesi/iyileştirme ve şerit yönlendirme problemleri ilgili ARARULAT model yaklaşımıyla çözülmüştür. Son olarak, şerit kapasiteleri ve ARAR parametrelerinin ARARULAT modellemesinin performansına olan etkisini araştırmak amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Altıncı bölümde, yapılan çalışmaya ait sonuçlar ve öneriler detaylı olarak verilmiştir.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1. Giriş

Bu bölümde, literatürde yapılan çalışmalar, ulaşım ağ tasarımı, trafik ataması, ve ARAR optimizasyon tekniği başlıkları altında incelenmiştir. Bu kapsamda TA problemine ilişkin formülasyonlar, DKD ve SKD başlıkları altında verilmiştir. DOKTP problemi olarak ele alınan AUAT problemlerinin çözümü için literatürde geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımları incelenmiştir. Son olarak, ARARULAT modellemesinin temel prensipleri verilmiştir.

### 2.2. Ulaşım Ağ Tasarımı

UAT problemi literatürde iki farklı şekilde ele alınmakla birlikte, tasarım parametrelerinin dikkate alınış şekline göre ayrılan SUAT ve AUAT problemleri arasında çok belirgin farklar bulunmamaktadır (Bell ve Iida, 1997). Örneğin, bağ kapasitelerinin sinyalizasyon düzenlemeleri ile arttırılmasının ele alındığı bir problemde kavşaklardaki yeşil süre değerleri, sürekli ya da ayrık karar değişkenleri olarak probleme dahil edilebilir. Bu durumda geleneksel bir SUAT problemi, AUAT problemi olarak formülize edilmiş olmaktadır.

Geleneksel UAT problemi, sistem maliyetinin ya da toplam seyahat süresinin en aza indirilmesi olarak ele alınmakta ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Sheffi 1985):

$$\sum_p f_p^w = q_w \quad (2.1)$$

$$f_p^w \geq 0 \quad (2.2)$$

kısıtlarına bağlı olarak,

$$\min Z(\mathbf{v}, \mathbf{t}) = \sum_a v_a t_a(v_a) \quad (2.3)$$

Burada  $f_p^w$ ,  $w$  başlangıç-varış (B-V) çifti arasındaki  $p$  güzergahındaki saatlik trafik hacmini,  $q_w$ ,  $w$  B-V çifti arasındaki toplam seyahat talebini,  $v_a$ ,  $a$  bağındaki saatlik trafik hacmini,  $\mathbf{v}$ , bağ trafik hacimleri vektörünü,  $t_a(v_a)$ ,  $a$  bağındaki trafik hacminin bir işlevi olarak seyahat süresini ve  $\mathbf{t}$ , bağ seyahat süreleri vektörünü temsil etmektedir.

UAT, talep ve arz arasındaki karşılıklı etkileşimi içermektedir. Oppenheim (1995) çalışmasında, tasarım sürecini iki-seviyeli programlama problemi olarak tanımlamaktadır. Bu tanımlamada üst seviyede arz problemi, alt seviyede ise talep problemi yer almaktadır. Tasarımcı (lider), yol kullanıcılarının (takipçiler) tepkilerini dikkate alarak tasarımı gerçekleştirmektedir. Liderin, takipçilerin reaksiyonları ile ilgili bir ön bilgiye sahip olması durumunda UAT problemi, oyun teorisinde Stackelberg oyunu olarak bilinmektedir (Fisk 1986). Eğer talep ve arz problemlerinden birinin çözümünde, sadece bir önceki iterasyonda elde edilen sonuç dikkate alınırsa bu iteratif çözüm yaklaşımı Cournot-Nash oyunu ile temsil edilmektedir (Allsop 1974).

UAT problemlerinin çözümü için geliştirilmiş olan yaklaşımlar ve matematiksel formülasyonlar farklılık göstermekle birlikte bu yaklaşımların tamamında ortak bir özellik, yol kullanıcı karakteristiklerinin tasarım sürecine olan etkisinin göz önünde bulundurulmasıdır.

### 2.2.1. Trafik ataması

TA, bir karayolu ağındaki B-V seyahat talebi matrisinin, ulaşım ağını oluşturan bağlara yüklenmesidir. Bunun için gerekli olan başlıca veriler, ulaşım ağının fiziksel özellikleri, bağ performans (seyahat süresi) fonksiyonları ve B-V seyahat talebi matrisidir (Sheffi 1985). TA'nın çözümü için ağ üzerinde seyahat eden sürücülerin güzergah seçim kararlarını hangi ilkeler doğrultusunda verdiklerinin belirlenmesi önem taşımaktadır.

TA, yol ağındaki trafiğin güzergahlara dağılımı sonrasında ulaşılan *denge* durumu ile tanımlanarak matematiksel olarak çözümlenebilmektedir. TA, literatürde iki farklı yaklaşımla ele alınmaktadır. Bu yaklaşımlardan birincisi, *hiçbir sürücünün güzergah seçimini değiştirerek kendi seyahat süresini azaltmaması* durumudur ve DKD olarak ifade edilmektedir. İkinci yaklaşım, sürücülerin güzergah seyahat sürelerini algılama

hatalarını dikkate alan SKD yaklaşımıdır. Bu durumda, *her sürücü, seyahat ettiği B-V çifti arasında algıladığı en düşük seyahat süreli güzergahı seçmektedir* (Sheffi 1985). Tanımlardan da anlaşılacağı üzere, her iki yaklaşım için de dengeye ulaşıldığında hiçbir sürücü güzergah seçimini değiştirmemektedir.

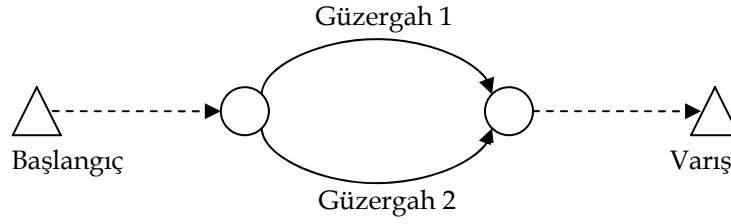
#### 2.2.1.1. DKD ataması

Bir yol ağındaki bağlar üzerinde seyahat eden trafik hacmini kestirebilmek için sürücü davranışları ile ilgili kabullerin öncelikle tanımlanması gerekmektedir. Ulaştırma ağlarının tasarımında atama probleminin çözümü için sıkça kullanılan kabullerden biri DKD yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, her sürücünün kendi başlangıç-varış (B-V) çifti arasındaki alternatif güzergahlardan en düşük seyahat süreli güzergahı seçtiği şeklindedir. Bir yol ağındaki tüm B-V çiftleri için kullanıcı dengesi durumundan söz edebilmek için Wardrop'un iki koşulunun sağlanması gerekmektedir (Wardrop 1952). Bu koşullar:

- i) Herhangi bir B-V çifti arasındaki alternatif güzergahlarda seyahat eden tüm sürücüler için seyahat süreleri eşittir.
- ii) Herhangi bir B-V çifti arasındaki kullanılmayan güzergahlardaki seyahat süreleri, seyahat edilen güzergahların seyahat sürelerine eşit ya da daha yüksektir.

Bu kabuller doğrultusunda dengeye ulaşıldığında hiçbir sürücünün güzergah seçimini değiştirerek kendi seyahat süresini azaltması mümkün değildir.

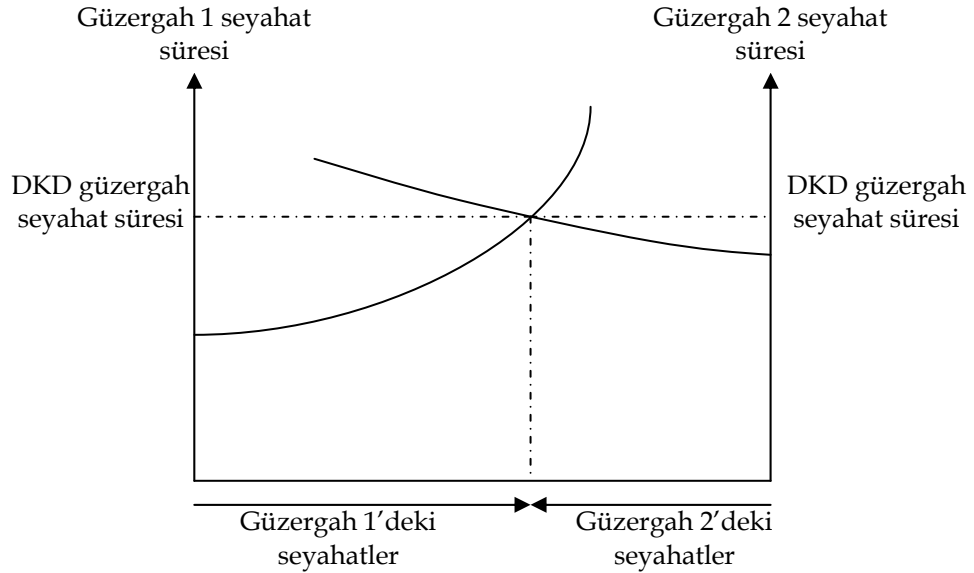
Deterministik yaklaşımda tüm yol kullanıcılarının, ulaşım ağının seyahat anındaki durumu hakkında kusursuz bilgiye sahip oldukları ve yine tüm kullanıcıların güzergah seçim algılamalarının aynı düzeyde olduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla trafik hacimlerini oluşturan tüm sürücülerin bir B-V çifti arasındaki en düşük maliyetli veya en kısa seyahat süreli güzergahı tercih ettikleri kabul edilmektedir. Şekil 2.1'de iki bağ ve iki güzergahtan oluşan örnek bir ulaşım ağı verilmiştir.



**Şekil 2.1** İki bağlı örnek ulaşım ağı

Şekil 2.1’de verilen iki güzergahlı örnek ağıdaki trafik için oluşması muhtemel denge noktası, verilen B-V çifti arasında kullanılan tüm alternatif güzergahların seyahat sürelerinin eşit olduğu durumdur.

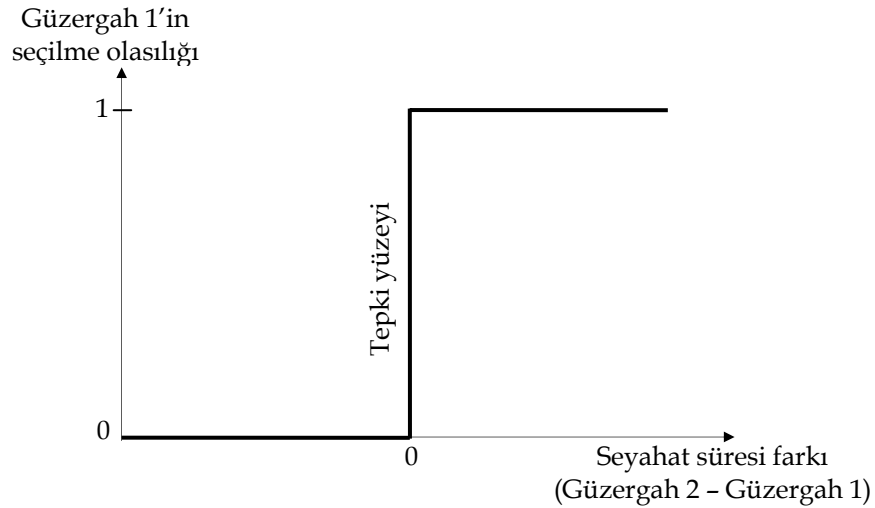
Şekil 2.2 incelendiğinde, denge noktasının sağında Güzergah 1’deki seyahat süresi daha düşüktür ve bu durum, trafiğin ikinci güzergahtan birinci güzergaha kaymasına neden olur. Bunun tersi, denge noktasının solu için de geçerlidir. Bu durumda, denge *kararlıdır* yani denge noktasından her sapma, dengeyi yeniden kurmak için teşvikte bulunmaktadır (Bell ve Iida 1997).



**Şekil 2.2** Deterministik kullanıcı dengesi

Deterministik kullanıcı dengesi ataması için tepki yüzeyi Şekil 2.3’te verilmiştir. Tepki yüzeyi grafiği incelendiğinde basamağın oluştuğu kısımda her iki güzergahın da seyahat sürelerinin eşit olduğu görülmektedir.

Şekil 2.3'ten görüldüğü üzere, güzergah seyahat sürelerinin birbirine eşit olduğu noktada güzergah seçim olasılığı tanımsızdır ve DKD yaklaşımının kullanımındaki başlıca zorluk bu durumdan kaynaklanmaktadır. Denge durumunda verilen bir B-V çifti arasındaki tüm güzergahların seyahat süreleri birbirine eşittir ve bu durumda alternatif güzergahlar arasındaki trafik paylaşımı tanımsızdır. Bu nedenle deterministik yaklaşımda, güzergah trafik hacimleri denge noktasında tekil değildir.



**Şekil 2.3** Deterministik kullanıcı dengesi ataması için tepki yüzeyi

Beckmann ve diğ. (1956), kullanıcı dengesi akımlarının, ortalama seyahat süresi fonksiyonunun akım boyunca integralinin toplamının minimum edilerek elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Eğer yol ağında  $n$  adet bağ,  $N$  adet düğüm noktası varsa ve  $s$  düğümlerinin başlangıç ve/veya varışları temsil ettiği düşünülürse Beckmann dönüşümü:

$$v_a = \sum_{s=1}^{s=p} v_a^s \quad (a = 1, 2, \dots, n) \quad (2.4)$$

$$v_a^s \geq 0 \quad (a = 1, 2, \dots, n, s = 1, 2, \dots, p) \quad (2.5)$$

$$q(j, s) + \sum_{a \in B(j)} v_a^s = \sum_{k \in A(j)} v_k^s \quad (j = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, p, j \neq s) \quad (2.6)$$

kısıtlarına bağlı olarak,

$$\min \sum_{a=1}^n \int_0^{v_a} t_a(x) dx \quad (2.7)$$

şeklindedir. Burada,  $v_a$ ,  $a$  bağındaki trafik hacmi (araç/sa),  $v_a^s$ ,  $a$  bağı boyunca  $s$  varışına seyahat eden trafik hacmi (araç/sa),  $q(j,s)$ ,  $j$  düğümünden  $s$  düğümüne seyahat eden toplam trafik hacmini (araç/sa) cinsinden temsil etmektedir. (2.4)-(2.6) nolu denklemler sırasıyla bağ akımlarının tanımlanması, pozitifliği ve ağdaki trafik hacminin korunumu ile ilgili kısıtlardır. (2.6) nolu bağıntıda  $B(j)$ ,  $j$  düğümüne giren bağların çıktığı düğümler seti,  $A(j)$ ,  $j$  düğümünden çıkan bağların girdiği düğümler kümesidir. Ortalama seyahat süresi fonksiyonunun,  $t_a(v_a)$ , trafik hacminin,  $v_a$ , artan bir işlevi olması durumunda kullanıcı dengesi akımlarının tekil çözümü mevcuttur (LeBlanc 1973).

DKD ataması probleminin çözümü için, Denklem (2.7)'teki eşitliğin çözümü olan tüm trafik hacim değerleri aynı zamanda denge şartlarını da sağlamalıdır. Bu noktada, her bir B-V çifti arasında kullanılan güzergahlardaki seyahat süreleri, kullanılmayan güzergahlardaki seyahat sürelerine eşit ya da daha düşük olmalıdır. Eşitlik şartları aşağıda verilmiştir:

$$h_p(g_p - m_w) = 0 \quad \forall p \in P_w, \forall w \in W \quad (2.8)$$

$$g_p - m_w \geq 0 \quad \forall p \in P_w, \forall w \in W \quad (2.9)$$

$$\sum_{p \in P_w} h_p = q_w \quad \forall w \in W \quad (2.10)$$

$$\forall p \in P_w, \forall w \in W \quad (2.11)$$

Burada  $m_w$ ,  $w$  ( $\forall w \in W$ ) B-V çifti arasındaki minimum güzergah seyahat süresi,  $g_p$ ,  $p$  güzergahındaki seyahat süresi,  $h_p$ ,  $p$  güzergahındaki trafik hacmi,  $q_w$ ,  $w$  B-V çifti arasındaki seyahat talebidir. Elde edilen atama çözümü DKD kısıtlarını sağlıyorsa, aşağıdaki ifadelerin kanıtlandığı söylenebilir:

- B-V çiftleri arasında trafik hacmi taşıyan güzergahlardaki seyahat süreleri, ilgili B-V çifti arasındaki minimum seyahat süresi değerine eşittir.
- Seçilmeyen güzergahlardaki seyahat süreleri, ilgili B-V çifti arasındaki minimum seyahat süresine eşit ya da daha büyüktür.

- Çözüm çıktısı olarak elde edilen akımları (2.8)-(2.11) nolu eşitlikleri sağlıyorsa, hiçbir sürücü güzergah seçimini değiştirerek kendi seyahat süresini azaltamaz.

Gerçekte tüm yol kullanıcılarının algılamalarının eşit ve kusursuz düzeyde olması beklenemez. Bu husustaki önemli etkenler, sürücülerin algılama seviyeleri, seyahat edilen ulaşım ağı hakkındaki bilgi düzeyleri ve alışkanlıklarıdır. Kullanıcıların seyahat süresi algılamalarının aynı kabul edilmesi ağ tasarımında hatalara neden olabilmektedir. UAT problemlerinin çözümünde DKD yaklaşımları geniş uygulama alanına sahiptir. Uygulama açısında DKD atamasının içerdiği kolaylıklara rağmen, SKD denge yaklaşımının sürücü davranışlarını daha iyi temsil etmektedir (Zhang ve Gao 2007). Bu nedenle, kullanıcı algılamalarını yumuşatan ve buna rastgelelik ekleyen bir yaklaşım olan SKD kavramı son yıllarda ulaşım ağ tasarımında sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır.

#### **2.2.1.2. SKD ataması**

Stokastik kullanıcı dengesi kavramı, DKD'nin genelleştirilmiş hali olarak kabul edilebilir. Eğer sürücüler tarafından algılanan güzergah seyahat süreleri tamamen doğruysa, stokastik kullanıcı dengesi, (deterministik) kullanıcı dengesi ile aynı hale gelmektedir (Sheffi 1985). Stokastik ve Wardrop kullanıcı dengeleri arasındaki fark, SKD modelinde bir yol kullanıcısının, diğerlerinin de düşündüğü ortak yolculuk seyahat süresini dikkate almak yerine kendine özgü bir seyahat süresi tanımlamasıdır. Stokastik atama, kullanıcıların seyahat süreleri konusundaki algılama çeşitliliğini ele alır. Bu durum, belirli bir güzergah üzerindeki algılanan seyahat süresi, kullanıcıların arasında dağıtılmış rastgele bir değişken olarak dikkate alarak gerçekleşir ve her bir kullanıcı için farklı seyahat süreleri modellenebilir.

Ortuzar ve Willumsen (1994) SKD için “Her bir kullanıcı, en düşük “algılanan” seyahat süresini dikkate alarak güzergah seçimini yapar; başka bir deyişle stokastik kullanıcı dengesi altında her kullanıcı en düşük “algılanan” seyahat süreli güzergahı kullanır ve hiçbir kullanıcı kendi güzergahını değiştirmez” tarifini yapmışlardır. SKD için bir diğer tanım, “yol kullanıcıları, karşılıklı olarak güzergah değişimi yapıldığında kendi seyahat sürelerinin iyileşmediğine inanırlar ve algılama düzeyleri doğrultusunda Wardrop dengesini kurmaya çalışırlar” şeklindedir (Daganzo ve Sheffi 1977)

SKD ataması için yaygın olarak kullanılan atama modelleri logit ve probit tabanlı modellerdir. Bu modellerle ilgili detaylı bilgiler Dial (1971), Bell ve Iida (1997), Sheffi (1985), Ortuzar ve Willumsen (1994) ve Ceylan (2002)'de bulunabilir.

Chriqui ve Robillard (1975) yaptıkları çalışmada, beklenen seyahat sürelerinin elde edilmesi için olasılık yaklaşımı kullanmışlardır. Güzergah seçim olasılıklarının hesabı için geliştirdikleri sezgisel yaklaşım ile bekleme ve araç içinde geçen süreleri minimum eden bir çözüm algoritması geliştirmişlerdir. Güzergah seçim olasılıklarının elde edilmesinde kullanılan probit yaklaşım, ilk olarak Nielsen (2000) tarafından denenmiş ve yol kullanıcı algılamaları SKD altında modellenmiştir. Bu çalışmada, yol kullanıcılarının fayda fonksiyonlarındaki varyasyonlar, sezgisel yolla modellenmiş ve çalışma sonucunda Kopenhag şehrindeki ulaşım servisleri için taşımacılık kapasitesinin araçlardaki koltuk kapasitelerine olan bağımlılığı modellenmiştir.

Nguyen ve diğ. (2001), yol kullanıcılarının güzergah seçim olasılıklarını üzerinde durmuşlardır. Bu çalışmada seyahat süreleri, algılanan süreler ile varış noktasına olan geç ulaşımından kaynaklanan ceza maliyetlerini içermektedir. Matematiksel olarak programlanan problem, DKD atamasındaki tanımsızlığın çözümü için varyasyonel eşitsizlik programı olarak kurulmuştur. Çözüm süreci iki seviyeli olarak oluşturulmuş ve ilk seviyede seyahat üretimi matrisleri oluşturulurken, ikinci seviyede amaç fonksiyonu doğrusal programlama yaklaşımı ile çözülmüştür.

De Cea ve Fernandez (1993) yaptıkları çalışmada, sıkışık ulaşım ağları için yeni bir atama formülasyonu geliştirmişlerdir. Birçok bağ ve düğümden oluşan bir karayolu ağında, sürücülerin seçmiş oldukları en düşük seyahat süreli bağlarda oluşan tıkanmalar, bu çalışmadaki temel problemi oluşturmaktadır. Yol ağındaki en çekici (en düşük seyahat süreli) güzergahlar üzerindeki ulaşım talebinin hızla artması, ağ üzerindeki seyahat talebinin yönetilmesini güçleştirmektedir. Kullanıcı dengesinin varyasyonel eşitsizlik problemi olarak tanımlandığı çalışmada, birçok örnek ağ üzerinde modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmaya benzer bir yaklaşım da, Lam ve diğ. (1999) tarafından ortaya atılmıştır. Yapılan çalışmada, kullanıcı algılamaları SKD altında modellenmiş ve atama probleminin çözümü için iteratif bir algoritma geliştirilmiştir. Cominetti ve Correa (2001) tarafından sıkışıklık ataması üzerine yapılan bir araştırmada, yol ağındaki sıkışıklığın yarattığı gecikmelerin modellenmesi



amaçlanmıştır. Çok sayıda B-V çifti içeren örnek bir ulaşım ağında, dinamik programlama yaklaşımı kullanılarak belirli bir başlangıçtan belirli bir varışa en kısa sürede ulaşımı sağlayacak bir model geliştirilmiştir.

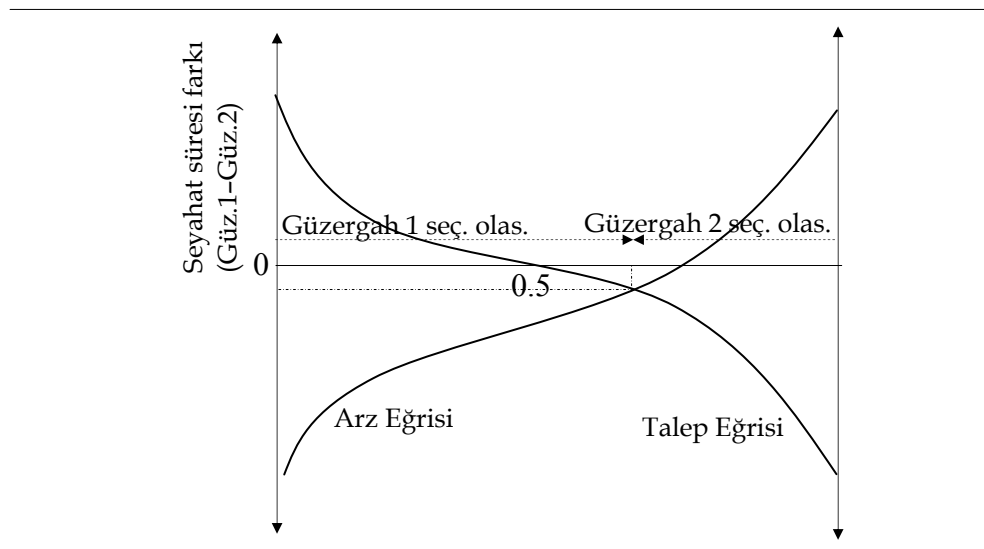
Birbirinden farklı iki atama modelinin karşılaştırıldığı bir çalışma De Cea ve diğ. (1988) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi, Speiss (1983) tarafından ortaya atılan model olup yolcuların, bir dizi alternatif arasından seçilen optimal strateji veya stratejileri kullanarak seyahatlerini gerçekleştirdiklerini varsaymaktadır. Çalışmadaki tek varsayım, toplu taşıma hizmetinden yararlanacak olan yolcuların, bekledikleri istasyona ilk olarak hangi otobüsün ulaşacağını biliyor olmalarıdır. Bu atama problemi, doğrusal programlama ile kurulmuştur. İkinci yaklaşım ise (Chriqui, 1974), yolcu davranışlarının çeşitli hipotezlere dayanarak modellenmesi temeline dayanmaktadır. Her iki yaklaşım incelenmiş ve sonuç olarak toplu taşıma talebinde bulunan yolcuların, zaman zaman efektif olmayan seçimler yapabildikleri ortaya konulmuştur.

SKD atamasının çözümü için bir model de Wu ve diğ. (1994) tarafından önerilmiştir. Modeldeki yaklaşım, en kısa seyahat süresini veren güzergahın bilinmesidir. En uygun stratejinin belirlenmesi için doğrusal programlama yaklaşımı kullanılmıştır. Ulaşım maliyeti, bekleme (durma noktalarındaki kuyruklar), hacim (seyahat konforundaki düşüş), erişim/transer bağları ve araç içindeki sürelerin toplamı olarak tanımlanmıştır. Atama modeli, varyasyonel eşitsizlik problemi olarak tanımlanmış ve iki farklı çözüm algoritması geliştirilmiştir. Doğrusal programlama yaklaşımının kullanıldığı diğer bir çalışmada, yol kullanıcılarının bir noktadan diğerine en kısa sürede ulaşmalarını amaçlayan bir atama modeli geliştirilmiş (Speiss ve Florian 1989). Düğüm noktalarındaki trafik hacmi, bu düğüme giren bağlardaki toplam hacim ile düğümde oluşan seyahat talebinin toplamı olarak alınmıştır. Geliştirilen algoritmada, ulaşım ağındaki mevcut trafik şartları için farklı bilgi düzeylerini gözönünde bulunduran stratejiler geliştirilmiştir. Sonuç olarak, yolcuların seyahatlerinin en kısa zaman diliminde gerçekleştirebilmelerini sağlayacak olan optimal strateji ortaya konulmuştur.

Ceylan (2002) yaptığı çalışmada trafik atama problemi için, SKD altında Genetik Algoritmalar (GA) yöntemi ile bir çözüm önerisi getirmiştir. Trafik kontrolü ile trafik ataması arasında iteratif bir optimizasyon algoritması geliştirilmiş ve sonuçta başlangıç

şartlarından bağımsız bir atama modeli elde edilmiş ve GA yaklaşımı ile geleneksel yaklaşımlara göre daha efektif çözümler elde edilebildiği vurgulanmıştır.

SKD yaklaşımında, deterministik yaklaşımdan farklı olarak bazı kullanıcıların seyahat esnasında yüksek seyahat süreli güzergahları seçtikleri kabul edilmektedir. Böylece yol ve trafik koşulları hakkındaki düşük bilgileri ya da alışkanlıkları nedeniyle yüksek seyahat süreli güzergahları seçen kullanıcıların varlığından söz edilebilmektedir. Dolayısıyla stokastik yaklaşım, deterministik yaklaşıma göre daha akılcıdır. Şekil 2.4'te stokastik kullanıcı denge atamasının temel mantığı görülmektedir. Deterministik kullanıcı dengesindeki güzergah seyahat sürelerinin eşit olması durumundaki belirsizlik yerine, burada bazı kullanıcıların denge noktası yakınlarında yüksek seyahat süreli güzergahları seçme eğiliminde olduğu görülmektedir.



**Şekil 2.4** Stokastik kullanıcı dengesi

Şekil 2.4'ten görüldüğü üzere, SKD durumunda DKD'den farklı olarak bazı kullanıcılar, yüksek seyahat süreli güzergahları seçmiş olabilirler. Arz eğrisi, trafik hacminin iki güzergaha olan dağılımını ve güzergahların seyahat sürelerini vermektedir. Güzergahlar ile onların göreceli seyahat süreleri arasındaki trafik bölümlerini vermektedir. Stokastik denge, iki arz ve talep eğrilerinin kesişimindeki nokta olarak tanımlanır. Şekil 2.5'te, verilen örnek ulaşım ağı için stokastik kullanıcı denge ataması tepki yüzeyi görülmektedir (Bell ve Iida, 1997).



**Şekil 2.5** SKD ataması için tepki yüzeyi

Şekil 2.5'teki tepki yüzeyi incelendiğinde, SKD ataması için güzergah 1'in seçilme olasılığı ile iki güzergah arasındaki seyahat sürelerinin farkı arasındaki ilişki görülmektedir. Bu durum, daha gerçekçi bir yaklaşım sağlamakla kalmayıp aynı zamanda bir takım avantajları da beraberinde getirmektedir. En belirgin avantajlardan birisi, DKD'nin aksine, denge durumunda güzergah akımları tekil olarak belirtilebilmektedir. Aynı B-V çiftini bağlayan güzergah akımlarının eşit olması durumunda, DKD'de yaşanan belirsizlik ile karşılaşılmaz. SKD probleminin formülasyonu ve çözümü için ayrıntılı bilgi 4. Bölüm'de verilecektir.

Sheffi (1985), SKD eşdeğer minimizasyon problemini beklenen minimum B-V seyahat sürelerine bağlı olarak tanımlamıştır. Bu problemin çözümünde kullanılan amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir (Bell ve Iida 1997):

$$\mathbf{q} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{h}, \mathbf{v} = \boldsymbol{\delta} \mathbf{h}, \mathbf{h} \geq 0 \quad (2.12)$$

kısıtlarına bağlı olarak,

$$\text{Min}_{\mathbf{v}} Z(\mathbf{v}) = -\mathbf{q}^T \mathbf{y}(\mathbf{v}) + \mathbf{v}^T \mathbf{t}(\mathbf{v}) - \sum_{a \in L} \int_0^{v_a} t_a(x) dx \quad (2.13)$$

Burada  $\mathbf{q}$ , B-V seyahat talebi vektörünü,  $\mathbf{\Lambda}$ , B-V-güzergah belirleme matrisini,  $\mathbf{h}$ , güzergah SKD trafik hacimleri vektörünü,  $\mathbf{v}$ , bağ SKD trafik hacimleri vektörünü,  $\boldsymbol{\delta}$ , bağ-güzergah belirleme matrisini,  $\mathbf{y}$ , beklenen en düşük B-V seyahat süresini,  $\mathbf{t}$ , bağ seyahat süreleri vektörünü ve  $t_a$ ,  $a \in L$  bağındaki seyahat süresini temsil etmektedir. Bağ seyahat süresi fonksiyonlarının bağ trafik hacimlerine bağlı olarak artış gösterdiği

varsayılırsa, bağ seyahat süresi fonksiyonları ters çevrilebilir. Bu durumda, her iki tarafın da integrali alındığında aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$\sum_{a \in L} \int_{c_{\min}}^{c_a} v_a(w) dw = \mathbf{v}^T \mathbf{t}(\mathbf{v}) - \sum_{a \in L} \int_0^{v_a} t_a(x) dx \quad (2.14)$$

Burada  $v_a$ ,  $a \in L$  bağındaki trafik hacmidir. Bağ trafik hacimleri, bağ seyahat sürelerinin bir fonksiyonu olarak ifade edildiğinde (2.14) nolu bağıntı aşağıdaki hale dönüşür:

$$Z(\mathbf{v}) = -\mathbf{q}^T \mathbf{y}(\mathbf{t}) + \sum_{a \in L} \int_{t_{\min}}^{t_a} v_a(x) dx \quad (2.15)$$

(2.15) nolu amaç fonksiyonunun bağ seyahat sürelerine göre türevi:

$$\Delta Z(\mathbf{v}) = -\mathbf{q}^T (\partial \mathbf{y} / \partial \mathbf{t}) + \mathbf{v}^T \quad (2.16)$$

şeklindedir. Beklenen en düşük B-V seyahat sürelerinin bağ seyahat sürelerine göre Jakobiyen'i bağ seçim olasılıklarına eşittir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\partial \mathbf{y} / \partial \mathbf{t} = \mathbf{K}^T \quad (2.17)$$

Burada  $\mathbf{K}$ , bağ seçim olasılıkları matrisidir. Denklem (2.17) incelendiğinde, bağ seyahat süresindeki değişimin beklenen B-V seyahat süresine olan etkisinin, ilgili bağın seçilme olasılığına bağlı olduğu görülmektedir.

Minimizasyon problemi için birinci mertebeden gerekli şartlar, minimum noktasında amaç fonksiyon değerinin sıfır olmasını gerektirmektedir.

$$\Delta Z(\mathbf{v}) = -\mathbf{q}^T (\partial \mathbf{y} / \partial \mathbf{t}) + \mathbf{v}^T = 0 \quad (2.18)$$

Bu durumda, (2.15) nolu amaç fonksiyonunun takım korunumu ve pozitiflik kısıtlarına bağlı olarak minimizasyonu, SKD noktasını vermektedir. Dolayısıyla, bu eşdeğer matematiksel programlama probleminin çözümü ile SKD denge trafik hacimleri

elde edilebilir. Tekillik kavramı göz önünde bulundurulduğunda, problemin tam olarak konveks yapısını ortaya koyabilmek için amaç fonksiyonunun Hessian matrisinin çözüm uzayı boyunca pozitif tanımlı olduğunu göstermek yeterli olacaktır. Denklem (2.15)'in Hessian'ı aşağıdaki gibidir:

$$\nabla^2 Z(\mathbf{v}) = \sum_{w \in W} -q_w (\partial y_w / \partial \mathbf{t} \partial \mathbf{t}) + \mathbf{J}^{-1} \quad (2.19)$$

Burada  $\mathbf{J} = \partial \mathbf{t} / \partial \mathbf{v}$ , Jakobiyendir. Bağ seyahat süresi fonksiyonunun düzenli artan yapısı dikkate alındığında, Jakobiyen pozitif tanımlıdır ve ters çevrilebilir.

Artan bağ seyahat süreleri için bağ seçim olasılıklarındaki düşüş, beklenen en düşük B-V seyahat sürelerinin artan bağ seyahat sürelerine göre değişim oranının sıfır ya da negatif olmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı  $w \in W$  B-V çifti için beklenen seyahat süresinin bağ seyahat sürelerine göre Hessian matrisi  $(\partial y_w / \partial \mathbf{t} \partial \mathbf{t})$  yarı-kesin negatif bir matristir. Buna bağlı olarak, yarı-kesin pozitif tanımlı matris serilerinin toplamı pozitif olduğundan dolayı, (2.15) nolu amaç fonksiyonunun Hessian'ı pozitif tanımlıdır ve tekil bir optimum değerle birlikte konvektir. Optimum değer:

$$\mathbf{q}^T (\partial \mathbf{y} / \partial \mathbf{t}) = \mathbf{q}^T \mathbf{K} = \mathbf{v}^T \quad (2.20)$$

noktasındadır ve  $Z(\mathbf{v})$  fonksiyonunun çözümüyle elde edilen SKD bağ denge akımları vektörü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{v} = \mathbf{Kq} \quad (2.21)$$

### 2.2.2. Sürekli ulaşım ağ tasarımı

SUAT problemi literatürde genellikle iki-seviyeli programlama problemi olarak ele alınmaktadır. Üst seviye, çok-amaçlı bir model (Friesz vd 1993, Fan ve Machemehl 2006) ya da ağdaki toplam seyahat süresi ile ifade edilebilmektedir (Friesz vd 1992, Chiou 2005, Karoonsoontawong ve Waller 2006, Xu vd 2009). Alt seviye problemi ise TA problemi olarak DKD (Friesz vd 1992, Chiou 2005, Ban vd 2006) ya da SKD (Davis 1994, Ceylan ve Bell 2004a, 2005, Chen vd 2006) yaklaşımları ile modellenebilmektedir.

Abdulaal ve LeBlanc (1979) çalışmalarında, SUAT probleminin çözümü geliştirdikleri Hooke-Jeeves algoritması tabanlı çözüm yöntemini orta-ölçekli bir gerçek karayolu ağına uygulamışlardır. Gershwin ve Tan (1979), SUAT problemini güzergah trafik hacimlerine bağlı bir kısıtlı optimizasyon problemi olarak ele almışlardır. Marcotte (1983) ve Marcotte ve Marquis (1992), SUAT probleminin çözümünü toplam ağ seyahat süresi minimizasyonu olarak ele almışlar ve çözüm için sezgisel yaklaşımlarda bulunmuşlardır. Geliştirdikleri yöntemlerin çeşitli test ağlarına uygulanmasıyla başarılı sonuçlar elde etmiş olmalarına karşın bu sezgisel yöntemler, büyük-ölçekli karayolu ağlarında test edilmemiştir.

SUAT probleminin çözümü için geliştirilen sezgisel yöntemlerden bir diğeri de Ayrıştırılmış Denge Optimizasyonu (ADO) yöntemidir (Suwansirikul vd 1987). ADO yöntemi, SUAT probleminin karşılıklı etkileşim içinde olan bir dizi optimizasyon problemine ayrıştırılması prensibine dayanmaktadır. Amaç fonksiyonunun, karar değişkenlerine göre birinci mertebeden türevinin kullanıldığı ADO yaklaşımında, SUAT probleminin çözümü için tek-boyutlu bir arama yöntemi kullanılmaktadır.

Ağdaki denge trafik hacimlerinin için gerçekleştirilen duyarlılık analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak, SUAT probleminin çözümü için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir (Tobin ve Friesz 1988, Friesz vd 1990, Suh ve Kim 1992). Meng ve diğ. (2001) çalışmalarında, alt seviye kullanıcı denge probleminin optimal değer fonksiyonu ile tanımlanan marjinal fonksiyonlar yardımıyla, iki-seviyeli SUAT problemini tek seviyeli sürekli ve türevlenebilir optimizasyon problemine dönüştürmüşlerdir.

Son yıllarda, SUAT problemlerinin çözümünde sezgisel yaklaşımların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Tasarım problemi için denge trafik hacimlerinin sinyal düzenlemelerine bağlılığının çözümü, Lee ve Machemehl (1998) ve Cree ve diğ.'nin (1999) yaptıkları çalışmalarda Genetik Algoritmalar (GA) tabanlı çözüm yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Seçilen amaç fonksiyonları, yeşil aralık ve bağ denge trafik hacimlerinin bir fonksiyonudur. İki-seviyeli SUAT modellemelerinde GA'ların kullanımına literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından devam edilmiştir (Yang ve Yagar 1994, Yin 2000, Ceylan 2002, Ceylan ve Bell 2004a, 2004b, 2004c, 2005). Bu çalışmanın kapsamı dışında olan sürekli tasarım problemleri, UAT literatürünün büyük kısmını oluşturmaktadır. Bunun yanında, literatürde AUAT problemlerinin ele alındığı sınırlı sayıda çalışma mevcuttur.

### 2.2.3. Ayrık ulaşım ağ tasarımı

UAT uygulamalarında, ilgilenilen problemin yapısına bağlı olarak sürekli tasarım parametrelerinin yanında, ayrık ve tamsayı tasarım değişkenleriyle de karşılaşmaktadır. Örneğin, inşası planlanan bir karayolundaki şerit sayısı, belirli bir güzergah üzerindeki otobüs durağı sayısı, bir yerleşim birimi için planlanan otopark sayısı ve bu otoparkların kapasiteleri ya da sinyalize bir kavşaktaki faz süreleri tamsayı değerleri ile temsil edilmektedir. Ayrıca sürekli tasarım problemleri, içerdikleri parametrelerin yapılarına bağlı olarak AUAT problemi olarak modellenebilmektedir (Bell ve Iida 1997).

AUAT problemi, içerdiği tamsayı değişkenlerinden dolayı doğrusal olmayan karma tamsayılı programlama (DOKTP) problemi olarak ele alınmaktadır. Bahsedilen tamsayı değişkenlerine örnek olarak, tasarım çalışması kapsamında bir bağın iyileştirilmesi durumunun 1, aksi durumun 0 değeriyle ya da zirve saatlerde uygulanması planlanan şerit yönlendirme uygulamaları kapsamında bir yönden diğer yöne çevrilmesi planlanan şerit sayısının tamsayı ile temsil edilmesi verilebilir. Tam sayı değişkenleri, eşitlik ve eşitsizlik kısıtları ile birlikte DOKTP problemi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\eta_i = 0, \quad i = 1, \dots, \eta_p \quad (2.22)$$

$$\mu_j \leq 0 \quad j = 1, \dots, \mu_m \quad (2.23)$$

$$x_i \in D_i, D_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{i\phi_i}), \quad i = 1, \dots, n_d \quad (2.24)$$

kısıtlarına bağlı olarak,

$$\min Z = f(x) \quad (2.25)$$

Burada  $f$ ,  $\eta_i$  ve  $\mu_j$  sırasıyla amaç ve kısıt fonksiyonlarını,  $\eta_p$ ,  $\mu_m$  ve  $n_d$  sırasıyla eşitlik kısıtı, eşitsizlik kısıtı ve tasarım parametresi sayılarını,  $n_d$ , ayrık tasarım parametresi sayısını,  $D_i$ ,  $i$ nci değişken için ayrık değişkenler kümesini ve  $\phi_i$ , izin verilebilir ayrık değişken sayısını temsil etmektedir.

DOKTP problemlerinin çözümü, herbir tasarım parametresi için olası ayrık değerlerin numaralandırılması ile her zaman mümkündür. Bu durumda,  $n_d$  adet tasarım parametresi ve her bir parametrenin alabileceği ayrık değer sayısı olan  $\phi_i$  için değerlendirilmesi gereken  $S_c$  adet kombinasyon sayısı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$S_c = \prod_{i=1}^{n_d} \phi_i \quad (2.26)$$

Denklem (2.26)'dan görüldüğü üzere, değerlendirilmesi gereken kombinasyon sayısı, tasarım parametresi ve parametrelerin alabileceği ayrık değer sayılarına bağlı olarak hızla artmaktadır. Bu durum, problemin çözümü için çok yüksek düzeyde hesap yükünü beraberinde getirmektedir (Arora 2004). Benzer şekilde, içerdiği çok sayıdaki tamsayı değişkenlerinden dolayı AUAT problemi, günümüzde ulaştırma alanının en zor problemleri arasında yer almaktadır (Magnanti ve Wong 1984, Yang ve Bell 1998).

DOKTP probleminin çözümü için geliştirilen birçok ayrık değişken optimizasyon yönteminde, çeşitli stratejiler ve sezgisel yaklaşımlarla arama uzayının daraltılması hedeflenmektedir. Bu yaklaşım, örtük numaralandırma olarak adlandırılmaktadır. Çözüm yöntemlerinin birçoğu, yalnızca doğrusal ve konveks yapıdaki problemlerin çözümünde global optimumu bulmada başarılı olmalarına rağmen, karar değişkeni sayısındaki artışa bağlı olarak global ya da yakın-global çözümler izin verilen hesaplama düzeyine bağlı olarak elde edilebilmektedir.

DOKTP problemlerinin çözümü için geliştirilen yöntemler, *sezgisel tabanlı* ve *numaralandırma tabanlı* olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmaktadır. Sezgisel tabanlı yaklaşımların başlıcaları, Tavlama Benzetimi (TB) ve GA'dır. Numaralandırma tabanlı yaklaşımlarda, tüm olası kombinasyonların numaralandırılması mümkündür ancak bu sınıftaki başlıca yöntemlerden biri olan dal-sınır yaklaşımında kısmi numaralandırma yaklaşımı kullanılmaktadır (Land ve Doig 1960). Dal-sınır yaklaşımı tabanlı çözüm algoritmaları, AUAT probleminin çözümünde literatürde sıkça kullanılmaktadır.

Dal-sınır yöntemi ile optimizasyon problemlerinin çözümünde işlemler alt guruplara ayrılarak çözüm aranır. Başlangıç olarak bir alt sınır bulunur. Alt gruplar içinde de alt sınırlar bulunur ve bazı alt gruplar işlem dışı bırakılabilir. Sadece kök düğümü içeren ve sıfır yol uzunluklu liste oluşturulur. Listedeki ilk eleman amaç düğümü olana ya da liste boşalana kadar listedeki ilk eleman silinir. Daha sonra, ilk yolun tüm komşulukları genişletilerek yeni yollar oluşturulur. Bu esnada, döngü oluşturacak yeni yollar reddedilir ve kalan yeni yollar listeye eklenir. En düşük yol maliyetine göre liste sıralanarak güncellenir. İncelenen düğüm, amaç düğüm ise başarılı aksi halde başarısız



olarak kabul edilir. Bu işlem, kalan herhangi bir alt kümeyi bulmak için alt sınırdan büyük olmayan amaç fonksiyon değerine sahip mümkün bir çözüm bulununcaya kadar defalarca tekrarlanır. Alt grupların hiçbiri daha iyi bir çözüm içermediği için bu çözüm optimum çözüm olarak kabul edilir (Hillier ve Lieberman 1986).

Steenbrink (1974) AUAT problemini incelediği çalışmasında, çözüm için kullanılan dal-sınır tekniklerini değerlendirmiştir. Çalışmada şehiriçi karayolu ağlarının tasarımı ve trafik atama problemine ilişkin çözüm teknikleri ile ilgili ayrıntılı incelemeler yer almaktadır. Önerilen çözüm yöntemi Hollanda karayolu ağına uygulanmış ancak bu tamsayı programlama tekniği tabanlı çözüm yönteminin her zaman yakınsama sağlayamadığı rapor edilmiştir.

Ayrık ulaştırma ağ tasarım problemini ilk olarak ele alan araştırmacılardan bir diğeri olan LeBlanc (1975) çalışmasında, tamsayı programlama problemi için geliştirdiği dal-sınır yaklaşımı tabanlı çözüm yöntemini kullanmıştır. Bu yaklaşımda iteratif olarak geliştirilen çözüm ağacı, yönlendirilmiş dallarla bağlanan düğümleri içermektedir. Ağaçtaki her düğüm noktası, problemin kısmi bir çözümünü temsil etmektedir. Olası çözüm vektörü sayısı kadar bağ elde edilene kadar yeni düğümler oluşturulmakta ve optimum çözüme iteratif olarak ulaşılmaktadır. Bahsi geçen dal-sınır yaklaşımı ile ilgili detaylı bilgi LeBlanc'ın diğeri bir çalışmasından edinilebilir (LeBlanc 1973).

Poorzahedy ve Turnquist (1982), AUAT probleminin çözümü için iki-seviyeli programlama modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde, üst seviye yeni bağ yatırımlarına bağlı olarak toplam sistem maliyetinin enaza indirilmesi, alt seviyede ise sabit trafik talebi altında kullanıcı dengesi probleminin çözümü amaçlanmış ve dal-sınır yaklaşımı tabanlı bir sezgisel algoritma ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Çalışmada iki-seviyeli modelin tek seviyeye indirgenerek çözümlenmesinden dolayı, bağ akımları ve önerilen ağ planlamaları arasındaki ilişki tanımlanamamaktadır. Bundan dolayı, model çözümlerinin yeterli hassasiyette olmadığı söylenebilir.

Chen ve Alfa (1991) çalışmalarında, AUAT problemini logit tabanlı stokastik atama yaklaşımı ile ele almışlar ve çeşitli yol ağları için tasarım probleminin çözümünü gerçekleştirmişlerdir. Sürücü davranışlarındaki gelişigüzel algılama hatalarının dikkate alan yaklaşımlarında, ayrık tasarım probleminin çözümün için dal-sınır yöntemini

kullanılmıştır. Ancak, ayrık değişkenli optimizasyon yöntemlerinin çözümünde başarılı sonuçlar veren dal-sınır yönteminin çeşitli dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları, çok sayıda karar değişkeni içeren problemler için yüksek bellek gereksinimi ve uzun çözüm sürelerine ihtiyaç duyulmasıdır (Heragu 1997, Pinedo 2008).

Drezner ve Weosolowsky (1997), şehiriçi karayolu ağlarındaki trafik sıkışıklıklarının en aza indirilebilmesi için, tek-yön uygulamalarını ele alan bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Problemin çözümü, dal-sınır yöntemi ve sezgisel TB yöntemi tabanlı iki algoritmayla ele alınmıştır. Algoritmaların verimliliğini test eden araştırmacılar, dal-sınır yaklaşımının sadece küçük ölçekli problemler için makul bir hesaplama süresinde problemi çözebildiğini göstermişlerdir. Bundan dolayı, orta ve büyük ölçekli problemlerin çözümünde sezgisel optimizasyon tekniklerinin gerekliliği vurgulanmıştır.

Gao ve diğerleri (2005), geliştirdikleri iki-seviyeli yaklaşımla AUAT problemini doğrusal ötesi programlama problemine dönüştürmüşlerdir. Bu yaklaşımda kullandıkları destek fonksiyonu sayesinde, karma tamsayı programlama problemi olan üst tasarım problemini, geleneksel doğrusal olmayan programlama problemine dönüştürmüşlerdir. Bu sayede problemin çözümü, birçok standart kısıtlı optimizasyon yöntemi ile gerçekleştirilebilir hale gelmiştir. Çalışmada verilen sayısal uygulamalar, geliştirilen yöntemin başarı ile kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Ancak bahsedilen destek fonksiyonları, için ileri düzeyde sayısal analiz ve programlama bilgisi gerektirmektedir.

Şehiriçi karayolu ağlarındaki trafikten kaynaklanan sosyal maliyetin minimize edilmesini ele alan diğer bir çalışmada, bağ kapasitelerinin optimum yapılandırması ele alınmaktadır (Kim ve Kim 2006). Bu çalışmada sosyal maliyet; ağdaki toplam seyahat süresi, taşıt işletme maliyetleri, kaza maliyetleri, bakım-onarım maliyetleri ve çevresel maliyetlerin toplamı olarak ele alınmıştır. Alt seviye atama probleminin çözümü Logit güzergah seçim modeli ile gerçekleştirilmiştir. Tasarım probleminin çözümü için GA optimizasyon yöntemi kullanılmış ve algoritma performansı küçük ölçekli bir test ağı üzerinde denenmiştir. Sonuçlar, geliştirilen çözüm yönteminin sosyal maliyetin en aza indirilmesinde etkili olduğunu göstermiştir. Ancak, optimizasyon sürecinde Braess' paradoksu ile karşılaşılma riskinin olduğuna dikkat çekilmiştir.

Braess (1969) çalışmasında, sürücüler güzergah seçimlerini yaparlarken bazı durumlarda kapasite ilavesinin ağ genel performansını düşürebildiğini belirtmiştir. Braess' paradoksu olarak bilinen bu durumda, ağda dengeye ulaşılan kadar bencil sürücüler, kendi seyahat sürelerini iyileştirmek için güzergah seçimlerini sürekli değiştirme eğilimindedirler ve dengeye ulaşıldığında elde edilen sonuç optimum yapılandırmayı temsil etmemektedir. Bu nedenle Braess' paradoksu, karayolu ağlarında yapılacak yatırımlar için gerekli sistematik analizlerin önemini ortaya koymaktadır (Sheffi 1985). Braess' paradoksuna ilişkin teori ve sayısal uygulamalar LeBlanc (1975) ve Sheffi (1985)'in çalışmalarında bulunabilir.

Literatürde gerçekleştirilen sayısal uygulamalar dışında, Braess' paradoksunun gerçek karayolu ağlarında da gözlemlendiği bilinmektedir. Stuttgart/Almanya'da şehiriçi karayoluna yapılan yatırımlardan sonra, ağ genelindeki sıkışıklıkların azaltılabilmesi için yeni inşa edilen bir yol kesiminin trafiğe kapatılması gerekmiştir. (Knodel 1969). 1990 yılında New York/ABD'de 42 nolu caddenin trafiğe kapatılmasından sonra aynı bölgede trafik sıkışıklıklarının azaldığı görülmüştür (Kolata 1990). Youn vd (2008) çalışmalarında, Boston/ABD, New York/ABD ve Londra/İngiltere'deki şehiriçi karayolu ağlarındaki trafik sıkışıklıklarının azaltılması için bazı yol kesimlerinin taşıt trafiğine kapatılabileceğini belirtmektedirler.

AUAT problemi üzerine yapılan diğer bir çalışmada Zhang ve Gao (2007), ayrık tasarım probleminin çözümünü sezgisel parçacık sürü optimizasyon (PSO) yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Çalışmada, zirve saatlerdeki trafik akım değerlerindeki asimetriden kaynaklanan sıkışıklığın önlenmesi için yönlere göre şerit paylaşımının değiştirilmesi esas alınmıştır. Basit bir test ağı üzerinde yapılan performans testleri, geliştirilen yöntemin optimum sonucun elde edilmesinde başarılı olduğunu göstermiştir. Ancak, orta ya da büyük ölçekli bir karayolu ağında uygulama gerçekleştirilmemiştir.

Büyük ölçekli ulaştırma ağları için en uygun yatırım stratejisinin belirlenmesi oldukça büyük bir strateji kümesi içinden seçim yapılmasını gerektirmektedir. Bu durum problemin, numaralandırma tabanlı yöntemlerle kabul edilebilir bir çözüm süresinde çözülemeyecek kadar büyümesine neden olabilmektedir. Ayrıca, alt seviyedeki TA probleminin konveks yapıda olmasına rağmen, ayrık ve tamsayı değişkenlerden kaynaklanan süreksizlikten dolayı üst seviyedeki tasarım probleminin

çözümü için sezgisel çözüm yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Duthie ve Waller 2008). Bununla birlikte, hem alt seviye hem de üst seviye konveks programlama problemleri içerse bile, UAT problemi konveks yapıda olmayabilir. Bu da, problemin birçok yerel optimum değere sahip olabileceğini göstermektedir (Bell ve Iida 1997). Gerek AUAT problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan dal-sınır yaklaşımlarının dezavantajları, gerekse problemin konveks olmayan yapısından dolayı yerel arama teknikleri ile çözümünün zor olmasından dolayı yeni çözüm yaklaşımlarına gereksinim vardır.

Bu çalışmada, son yıllarda sürekli ve ayrık optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaya başlanan sezgisel ARARULAT (**AR**moni **AR**aştırması tabanlı ayrık **UL**aşım **Ağ** **T**asarımı) modelleri geliştirilmiştir. Sezgisel ARAR optimizasyon tekniği ve ARARULAT modellemesine genel bakış sırasıyla Bölüm 2.3 ve 2.4'de verilmiştir.

### **2.3 Armoni Araştırması Optimizasyon Tekniği**

Sürekli ve ayrık tasarım parametreleri içeren optimizasyon problemlerinin çözümüne uygulanabilen sezgisel ARAR tekniğinin felsefesi, bir orkestradaki müzisyenlerin çaldıkları notalar ile armonik açıdan en iyi melodinin elde edilmesi prensibine dayanmaktadır (Geem vd 2001). Geliştirildiği yıldan bugüne birçok mühendislik probleminin çözümüne uygulanan yöntem, optimizasyon alanında çalışan araştırmacıların ilgisini çekmekte ve algoritmanın geliştirilmesi için çalışmalar halen devam etmektedir (Geem 2006, Mahdavi vd 2007, Cheng vd 2008, Omran ve Mahdavi 2008, Geem 2008, Coelho ve Bernert 2009). Bununla birlikte, ARAR tekniğinin diğer sayısal ve sezgisel optimizasyon yöntemleri ile birleştirildiği hibrit çözüm algoritmaları da literatürde yer almaktadır (Fesanghary vd 2008, Jang vd 2008, Lee ve Yoon 2009, Kaveh ve Talatahari 2009, Geem 2009, Ayvaz vd 2009).

Lee ve Geem (2004) çalışmalarında, yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünü ele almışlardır. Optimizasyon süreci boyunca global optimum değerini rastgele arayan ARAR algoritması, bu özelliğinden dolayı gradiyent ve türev bilgilerine ihtiyaç duymamaktadır. Bu sayede, hem ileri düzeyde sayısal modelleme hem de çözüm için iyi

başlangıç değerlerine gerek kalmadığı vurgulanmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, ayırık yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünde ARAR tekniği ile geleneksel matematiksel yöntemler ya da GA'lerden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Su dağıtım şebekelerinin optimum tasarımı için geliştirilen diğer bir ARAR tabanlı çözüm yönteminde, tüm çözüm kısıtlarını sağlayan en uygun boru çaplarının belirlenmesi hedeflenmiştir (Geem 2006). Geliştirilen yöntem, EPANET adlı bir hidrolik simülasyon ile birleştirilmiştir. Beş farklı su dağıtım şebekesi için yapılan testler sonucunda ARAR yöntemi ile elde edilen sonuçların, sezgisel GA ve TB yöntemlerine göre %0.28 ile %10.26 mertebesinde daha iyi olduğu görülmüştür.

Ayvaz (2007), piyezometrik gözlem kuyularından elde edilen gözlem değerleri yardımıyla akifer parametreleri ve zon yapılarının belirlenmesi üzerine bir çözüm yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada, zon yapılarının belirlenmesi için fuzzy c-means (FCM) kümeleme yöntemi ile birlikte optimizasyon tekniği olarak ARAR yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, ARAR parametrelerinin çözüm üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, geliştirilen çözüm yönteminin akifer parametrelerinin ve ilgili zon yapılarının eş zamanlı olarak belirlenmesinde etkili olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Degertekin (2008) yaptığı çalışmada, çelik çerçevelerin optimum tasarımını ele almaktadır. Geliştirilen çözüm yönteminde amaç, dayanım ve deplasman kısıtlarına bağlı olarak en uygun malzeme kesitlerini seçerek toplam yapı ağırlığını minimize etmektir. Algoritmanın etkinliğinin testi için, elde edilen sonuçlar GA ve karınca kolonisi optimizasyonu (KKO) tekniği tabanlı çözüm yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bulgular, ARAR tekniği ile çok daha hafif yapı tasarımları elde edilebildiğini ortaya koymuştur.

Ulaştırma sektörü için enerji talebinin modellenmesine ilişkin yapılan çalışmalarda, orta ve uzun vade için talep projeksiyonları gerçekleştirilmiştir (Ceylan vd 2008, Ceylan ve Ceylan 2009a). Geliştirilen modeller, doğrusal, üstel ve karesel fonksiyonlarla temsil edilmiş ve ulaştırma sektörü enerji tüketimine uygulanmıştır. ARAR'nın yakınsama davranışı, modelleme süresi boyunca elde edilen değerler ile gözlem değerlerinin karşılaştırılmasıyla test edilmiştir. Sonuçlar, ARAR yönteminin ulaştırma enerji talep modellenmesinde başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir.

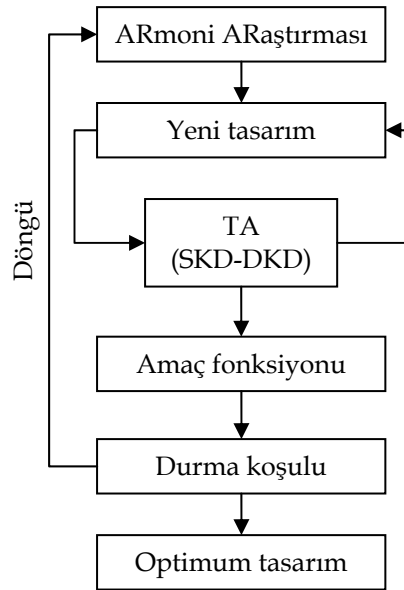
ARAR tekniği, GA'lara benzer şekilde global optimum çözümleri birçok çözümler vektörü ile aynı anda aramaktadır. Bunun yanında, ARAR ve GA yöntemleri arasındaki en büyük farklılık, yeni çözümler vektörünün üretilme aşamasıdır. GA'larda yeni birey üretiminde yalnızca iki ebeveyn kullanılırken; ARAR tekniğinde yeni armoni üretiminde, tüm mevcut çözümler vektörleri kullanılmaktadır. Ayrıca, ARAR tekniğinin bir iterasyonu GA'lara göre daha hızlı tamamlanmaktadır (Lee vd 2005, Lee ve Geem 2005).

AUAT problemlerinin çözümünde çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılan GA'ler ile ARAR tekniği arasındaki temel farklar yukarıda verilmiştir. Ayrıca, çeşitli mühendislik uygulamalarında bu iki yöntem için yapılan karşılaştırmalar, ARAR tekniğinin GA'lara göre daha iyi sonuçlar verebildiğini göstermektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen ARARULAT modellerinin ağ tasarımına uygulanışı bir sonraki kısımda açıklanmıştır.

#### **2.4. ARARULAT Modellemesine Genel Bakış**

Bir şehir içi karayolu ulaşım ağındaki toplam seyahat süresinin en aza indirilmesi amacıyla geliştirilen ARARULAT modelleri, ARAR tekniği ile tasarım probleminin TA probleminin çözümünden elde edilen denge trafik hacimlerine bağlı olarak çözümler prensibine dayanmaktadır. Model çözümlenmesi ARAR tekniğinin iteratif yapısına bağlı olarak, önceden tanımlanan bir durma koşulu sağlanana kadar en iyi ağ yapılandırması elde edilene devam etmektedir. Şekil 2.6'da ARARULAT modellemesi için ARAR optimizasyon tekniğinin AUAT problemine uygulanışına ilişkin akış diyagramı verilmektedir.

Şekil 2.66 incelendiğinde başlangıçta, ulaşım ağının yeni tasarımını temsil eden ayrıklı değişkenlerin armoni araştırması yöntemiyle üretildiği görülmektedir. Daha sonra, yeni tasarım için bağ denge trafik hacimleri hesaplanmaktadır. Modeldeki denge yaklaşımına göre bu alt seviye problemi DKD ya da SKD ataması problemi olarak ele alınmaktadır. Hesaplanan denge trafik hacimleri ve bağ seyahat süreleri için amaç fonksiyonu değeri Denklem (2.3)'te verilen fonksiyon yardımıyla hesaplanmaktadır. Yeni tasarım için elde edilen toplam seyahat süresi değeri önceden belirlenen durma koşulunu sağlayanaya kadar tasarım süreci tekrar ettirilir.



**Şekil 2.6** ARAR tekniğinin AUAT problemine uygulanışı

ARARULAT modellemesinde TA alt problemi, Genelleştirilmiş İndirgenmiş Gradyentler (GİG) yöntemi tabanlı GİG2 yöntemi ile çözülmüştür (Lasdon vd 1978). Türeve dayalı bu optimizasyon yöntemi, konveks ve fonksiyonun her noktasında türevlenebilir sürekli yapısından dolayı TA probleminin çözüme uygulanabilir. GİG2 yöntemi, amaç fonksiyonunun karar değişkenlerine göre birinci mertebeden kısmi türevlerini kullanmaktadır. Bu türevler, sonlu farklar yaklaşımı ile hesaplanmaktadır. GİG2 optimizasyonu iki adımdan oluşmaktadır:

**Adım 1:** Kullanıcı tarafından tanımlanan başlangıç çözümünün problem kısıtlarını sağlamaması durumunda amaç fonksiyonu, toplam kısıt ihlali ile gerçek amaç fonksiyonunun toplamı olarak alınır.

**Adım 2:** Başlangıç çözümünün kısıtları sağlaması durumunda kullanıcı tarafından tanımlanan amaç fonksiyonunun çözümüne başlanır ve her iterasyonda amaç fonksiyonunun değeri yerel aramalarla iyileştirilmeye çalışılır.

Son yıllarda geliştirilen “çalışma sayfası” tabanlı yazılımların birçoğu, içerdikleri “çözücü” eklentisi yardımıyla doğrusal ve doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin çözümünde etkin bir şekilde kullanılabilirler. Optimizasyon sürecinde GİG2 algoritmasını kullanan çözücü işlevi, doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin çözümünde ileri düzeyde matematiksel modelleme ve programlama bilgisi gerektirmeksizin kolaylıkla kullanılabilir (Stokes ve Plummer 2004). Bu

kapsamda, ARARULAT modellemelerinde TA problemleri, çalışma sayfası altında çözücü eklentisi yardımıyla hazırlanan bir alt modül ile çözülmüştür. ARARULAT modellerinin geliştirilmesi ve TA problemlerinin çözümü 4. Bölüm'de detaylı olarak açıklanacaktır.

## **2.5. Sonuçlar**

Bu bölümde, trafik ataması, ulaşım ağ tasarımı ve ARAR optimizasyon tekniği ile ilgili literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, UAT problemlerinin çözümünde sürücülerin güzergah seçimlerini temsil eden TA problemi ile ilgili temel kabuller verilmiştir. İçerdiği ayrık ve tamsayı değişkenlerden dolayı DOKTP problemi olarak ele alınan AUAT problemlerinin çözümünde kullanılan yaklaşımlar incelenmiştir. Son olarak, ARARULAT modellemesinin temel prensiplerinden bahsedilmiştir.



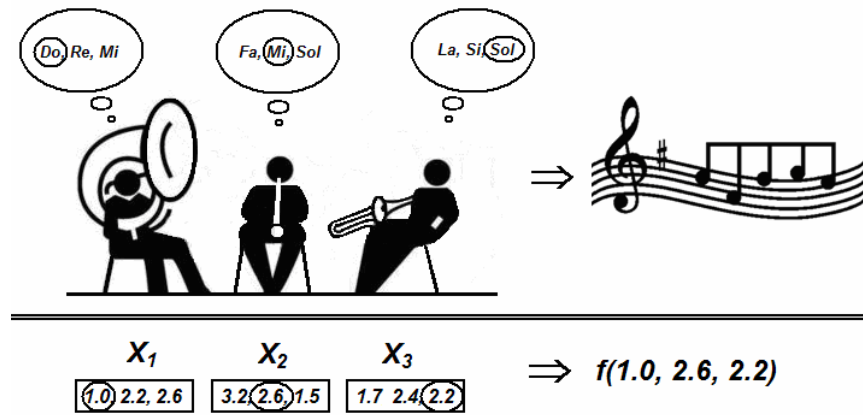
### **3. ARMONİ ARAŞTIRMASI OPTİMİZASYON TEKNİĞİ**

#### **3.1. Giriş**

Bu bölümde, AUAT probleminin çözümü için geliştirilen yöntemde optimizasyon tekniği olarak kullanılan sezgisel ARAR yönetiminin temel algoritması detaylı olarak anlatılmış ve literatürde sıklıkla kullanılan beş adet test fonksiyonu üzerinde performans testleri gerçekleştirilmiştir. Ardından, ARAR optimizasyon tekniğinin AUAT problemine uygulanışı açıklanmış ve geliştirilen modelin örnek bir test ağına uygulanışı ayrıntılı şekilde verilmiştir.

#### **3.2. ARAR Algoritmasına Genel Bakış**

Optimizasyon modeli olarak kullanılan ve ilk olarak Geem vd (2001) tarafından geliştirilen ARAR optimizasyon tekniği, bir orkestradaki müzisyenlerin çaldıkları notalar ile armonik açıdan en iyi melodinin elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. ARAR tekniğinde orkestra, ancak tüm orkestra elemanlarının birbirleri ile armonik açıdan uyumlu bir şekilde çalmaları ile en estetik melodiyi elde edebilirken, optimizasyon modellerinde en iyi çözüm ancak amaç fonksiyonunun global optimuma giderek yaklaşması sonucu elde edilebilmektedir. Farklı enstrümanlar ile çalınan nota ve tonların estetik kalitesi, müzik çalışmalarında pratik yaparak iyileştirilirken, fonksiyon çözümünde bu iyileştirme birbirini takip eden iterasyonlarla gerçekleştirilmektedir (Geem, 2006). Bir orkestradaki müzisyenlerin çaldıkları melodilerle gerçek optimizasyon problemleri arasındaki bağlantının nasıl kurulacağı Şekil 3.1’de detaylı olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.1** ARAR ile gerçek optimizasyon problemleri arasındaki bağlantı

Şekil 3.1'den görüleceği gibi, orkestrada toplam üç müzisyen bulunmakta ve her müzisyenin belleğinde üçer adet nota bulunmaktadır. Örnek olarak, birinci müzisyenin {Do}, ikinci ve üçüncü müzisyenin ise {Mi} ve {Sol} çalması durumunda {Do, Mi, Sol} kümesi bir armoni oluşturmaktadır. Oluşturulan bu armoni, müzisyenlerin belleklerindeki en kötü armoniden daha iyi ise bu armoni en kötü olanla değiştirilmekte ve bu işlem estetik açıdan en güzel armoni elde edilinceye kadar devam etmektedir. Diğer yandan, optimizasyon problemlerinin çözümü için her bir müzisyenin bir karar değişkeninin yerini alması durumunda, müzisyenlerin belleklerindeki her bir nota o karar değişkenine ait farklı bir çözüme karşılık gelmektedir. Örnek olarak, Şekil 3.1'de verildiği gibi karar değişkenlerinin belleklerinden {1.0}, {2.6} ve {2.2}'i seçmesi durumunda, yeni bir çözüm vektörü {1.0, 2.6, 2.2} elde edilmektedir. Bu çözüm vektörünün bellekteki en kötü çözümden daha iyi olması durumunda çözümler yer değiştirilmekte ve en iyi çözüm elde edilinceye kadar bu işleme devam edilmektedir. ARAR süreci 5 adımdan oluşmaktadır:

***Adım 1: Problemin kurulması ve algoritma parametrelerinin tanımlanması***

Denklem (3.1)'de verilen örnek bir optimizasyon problemi tanımlanmaktadır:

$$\min Z = f(x) \quad x_i \in \mathbf{X}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.1)$$

Burada,  $f(x)$  minimize edilecek olan amaç fonksiyonunu,  $x_i$  karar değişkenlerini (orkestradaki enstrümanları),  $\mathbf{X}_i$  her karar değişkeni için kullanılan çözüm uzayını,  $N$  ise toplam karar değişkeni sayısını (orkestra büyüklüğünü) göstermektedir.

ARAR çözüm sürecini kontrol eden 3 farklı parametre mevcuttur. Bunlar sırasıyla, ARAR'daki çözüm vektörü sayısını olan armoni belleği kapasitesi (Harmony Memory Size - *HMS*), armoni belleğinden yapılacak değişken seçimi oranı olan armoni belleğini dikkate alma oranı (Harmony Memory Considering Rate - *HMCR*) ve ton ayarlama oranıdır (Pitch Adjusting Rate - *PAR*).

### **Adım 2: Armoni belleğinin oluşturulması**

Armoni belleği, tüm çözüm vektörlerinin ve amaç fonksiyonunun aldığı değerlerin saklandığı bellektir. Fonksiyon değerleri sayesinde, ilgili çözüm vektörlerinin kalitesi değerlendirilmektedir. ARAR tekniğinde, aynı anda birçok çözüm vektörü GA tekniğine benzer şekilde gözönünde bulundurulmaktadır. ARAR optimizasyon tekniğinin, hesaplama mantığı bakımından GA ile benzerlikleri olmasına karşın, bu iki yöntem arasındaki en belirgin fark yeniden üretim aşamasındaki varsayımlardan kaynaklanmaktadır. GA ile yeni bir karar değişkeninin oluşturulmasında toplum içerisinde seçilen iki birey kullanılırken; ARAR'da oluşturulan yeni karar değişkeni toplum içerisindeki tüm bireylerin özelliklerini taşımaktadır. Ayrıca, ARAR'da bir iterasyonun tamamlanması GA'lara göre daha hızlıdır (Lee vd 2005).

Bu adımda, armoni belleği matrisi, rastgele üretilen çok sayıda çözüm vektörü ile doldurulur ve bu vektörler için ilgili amaç fonksiyonu değerleri Denklem (3.2)'deki gibi hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \cdots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \cdots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} f(x^1) \\ f(x^2) \\ \vdots \\ f(x^{HMS-1}) \\ f(x^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

### **Adım 3: Yeni armoninin oluşturulması**

Bu adımda, yeni armoni vektörü  $x' = (x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_N)$ , armoni belleğinde bulunan tonlara göre ve tamamen rastgele seçilen tonlara göre üretilmektedir. Armoni belleğinde bulunan tonlara göre, yeni armoni vektörüne ait ilk karar değişkeni ( $x'_1$ ) mevcut armoni belleği  $(x_1^1, \dots, x_1^{HMS})$  içerisindeki herhangi bir değerden rastgele olarak seçilmektedir.

Diğer karar değişkenlerinin  $(x'_2, x'_3, x'_4, \dots, x'_N)$  seçilmesi ise aynı şekilde yapılmaktadır. Değişkenlerin armoni belleğinden seçilip seçilmeyeceğinin belirlenmesi, değeri 0 ile 1 arasında değişen *HMCR* oranına göre yapılmaktadır. Burada, *HMCR* bir karar değişkeninin değerinin mevcut armoni belleğinden seçilme olasılığını gösterirken,  $(1 - \text{HMCR})$  oluşturulan yeni karar değişkeninin, ilgili değişkenin alabileceği değerler vektörü içerisinde rastgele olarak seçilmesine karşılık gelmektedir. Seçim işleminin nasıl yapıldığı Denklem (3.3)'te verilmiştir:

$$x'_i = \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1, x_i^2, x_i^3, \dots, x_i^{HMS}\} & \text{HMCR olasılığı durumu} \\ x'_i \in \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k_i)\} & (1 - \text{HMCR}) \text{ olasılığı durumu} \end{cases} \quad (3.3)$$

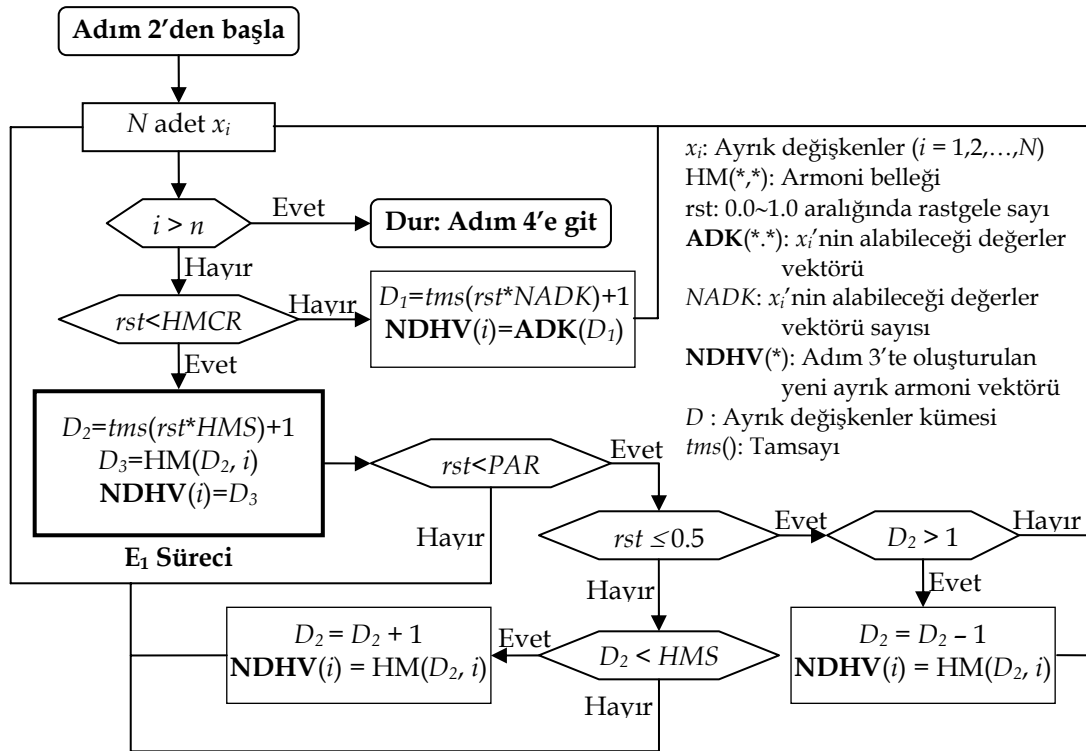
Burada  $k_i$ ,  $x_i$  değişkeninin alabileceği değerler vektöründe bulunan eleman sayısını göstermektedir. Bu aşamadan sonra, ton ayarlama işleminin gerekli olup olmadığının belirlenmesi için her karar değişkeninin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bu işlem ise ton ayarlama oranı olan *PAR* parametresi ile aşağıda verildiği şekilde yapılmaktadır:

$$x_i \text{ için ton ayarlaması} = \begin{cases} \text{Evet} & \text{PAR olasılığı durumu} \\ \text{Hayır} & (1 - \text{PAR}) \text{ olasılığı durumu} \end{cases} \quad (3.4)$$

Ton ayarlama işlemi, ancak armoni belleğinden bir değer seçilmesi durumunda gerçekleştirilmektedir. Örneğin algoritma, 0.40'lık bir *PAR* değeri için  $\%40 \times \text{HMCR}$  olasılığı ile vektör içinden bir komşu değer seçecektir. Eğer  $x_i$  değişkeni için ton ayarlaması yapılacaksa ve  $x_i$ 'nin karar değişkeninin alabileceği değerler vektörü içinde  $l$ . sıradaki değer olduğu varsayılırsa  $x_i(l)$ 'nin ayarlanmış yeni değeri;

$$x'_i \leftarrow x_i(l + c) \quad (3.5)$$

olur. Burada  $c \in \{-1, 1\}$  komşuluk indeksidir. Şekil 3.2'de ayrıık değişkenler için yeni armoni vektörü üretimine ilişkin akış şeması verilmiştir.



**Şekil 3.2** Ayrık değişkenler için yeni armoni vektörü üretimi

Dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta,  $HMCR$  ve  $PAR$  parametrelerinin, algoritmanın sırasıyla global ve lokal optimum çözümleri elde etmesinde tetikleyici rol almasıdır (Ayvaz 2007).  $HMCR$  ve  $PAR$  parametreleri için sırasıyla 0.7-0.95 ve 0.2-0.5 aralığındaki değerlerin seçilmesi önerilmektedir (Lee vd 2005).

#### **Adım 4: Armoni belleğinin güncellenmesi**

Bu adımda, armoni belleğindeki tüm amaç fonksiyonu değerleri en iyiden en kötüye doğru sıralanır. Daha sonra yeni armoni vektörü, armoni belleği içindeki en kötü vektör ile karşılaştırılır. Eğer yeni vektör, bellek içindeki en kötü vektörden daha iyi bir sonuç veriyorsa belleğe dahil edilir ve en kötü vektör bellekten çıkarılır. Bu karşılaştırma sonucunda yeni çözüm vektörünün belleğe dahil edilip edilmeyeceği kararı, aşağıda verilen prosedür ile verilir:

$$\mathbf{x}^{HMS} = \begin{cases} NDHV(i) & \text{eğer } f[NDHV(i)] < f(x)^{HMS} \\ \mathbf{x}^{HMS} & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (3.6)$$

### ***Adım 5: Durma koşulunun kontrolü***

Bu adımda verilen durma koşulunun sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Koşulun sağlanmaması durumunda, Adım 3 ile 5 arasındaki işlemler istenen koşul sağlanıncaya kadar tekrar edilir.

### **3.3. Optimizasyon Tekniği Performans Testleri**

Bu bölümde, önerilen optimizasyon tekniğinin performansını ölçmek amacıyla 5 adet test fonksiyonunun çözümü gerçekleştirilmiştir. Bu test fonksiyonları, literatürde performans testleri için sıkça kullanılmaktadır. Çözümler, ARAR parametrelerinin Tablo 3.1’de verilen değerleri için gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 3.1** Test fonksiyonlarının çözümü için parametre değerleri

<b>Parametre</b>	<b>Değer</b>
HMS	30
HMCR	0.95
PAR	0.45
Maksimum iterasyon sayısı	10,000

#### **3.3.1. De Jong’un test fonksiyonu**

ARAR tekniğinin performans değerlendirmesinde kullanılan ilk fonksiyon, sürekli ve konveks yapıda olan De Jong’un (1975) test fonksiyonudur. Fonksiyonun yapısı, çözüm uzayı ve global minimum noktası aşağıda verilmiştir.

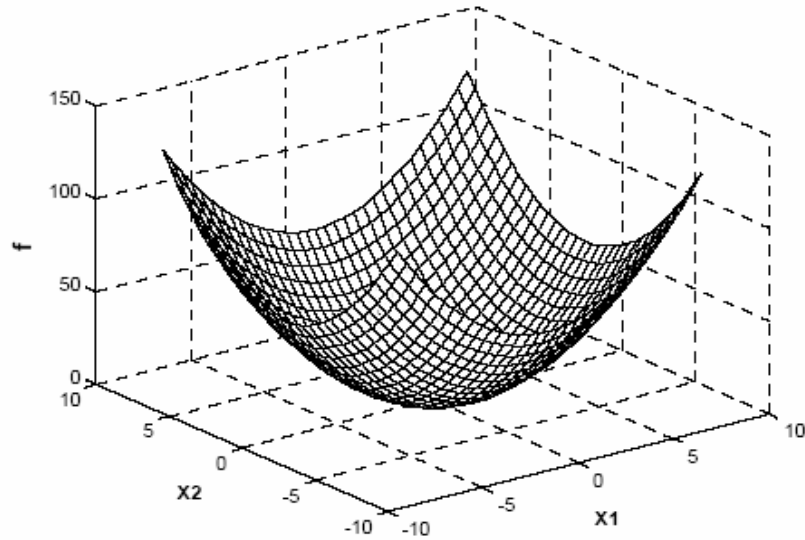
$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad -5.12 \leq x_i \leq 5.12 \quad (3.7)$$

$$\min f(x) = 0 \quad x_i = 0 \quad (3.8)$$

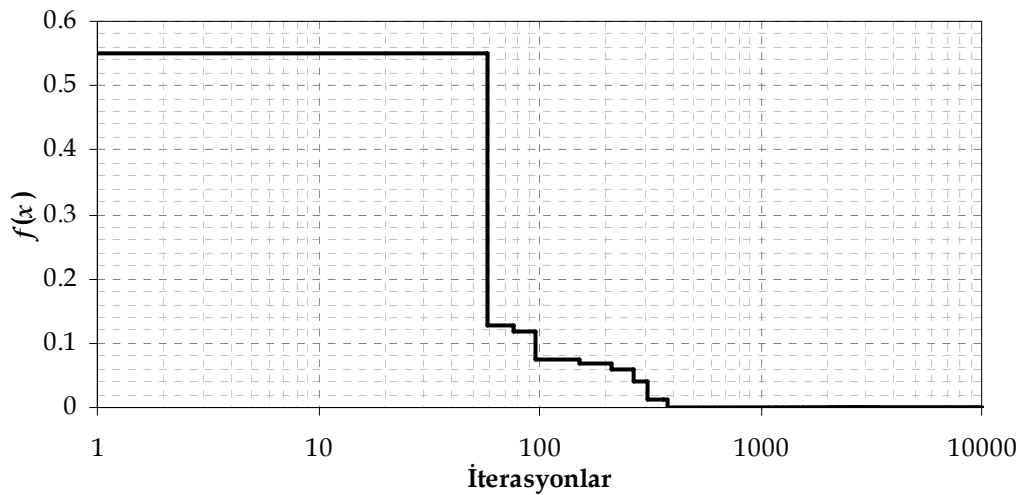
Denklemin çözümünde değişken sayısı 2 olarak kabul edilmiş ve 10,000 iterasyon sonucunda elde edilen sonuç aşağıda verilmiştir.

$$f(x) = 1.48227 \times 10^{-11} \quad x_1 = -2.3 \times 10^{-6}; \quad x_2 = 3.1 \times 10^{-6} \quad (3.9)$$

Şekil 3.3'te fonksiyonun 2 değişkenli kabul edilmesi durumunda yapısı, Şekil 3.4'te çözüm grafiği verilmiştir.



Şekil 3.3 De Jong'un test fonksiyonu



Şekil 3.4 De Jong'un test fonksiyon çözümünün yakınsama grafiği

### 3.3.2. Rastrigin'in test fonksiyonu

Denklem (3.10)'da verilen çözüm uzayı için birçok lokal (yerel) minimuma sahip olan Rastrigin'in 6. test fonksiyonunun (Rastrigin 1974) yapısı, çözüm uzayı ve global minimum noktası aşağıda verilmiştir.

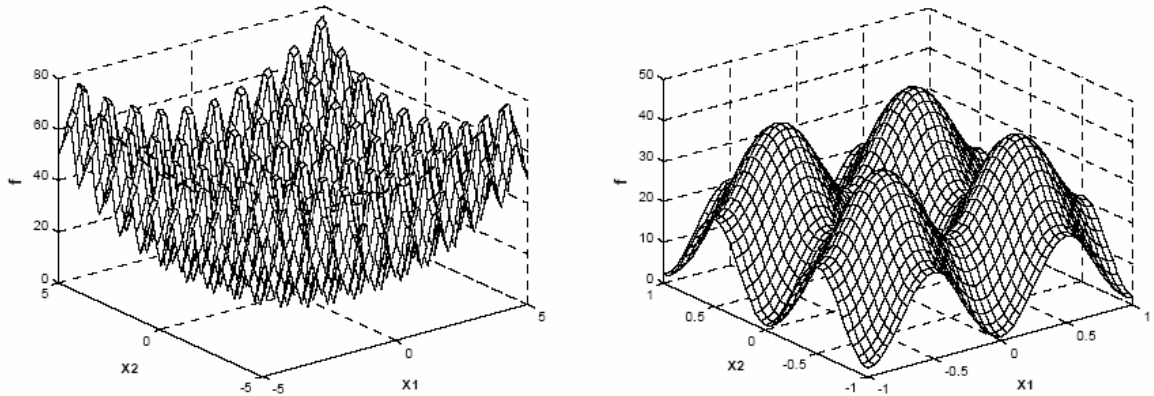
$$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)] \quad -5.12 \leq x_i \leq 5.12 \quad (3.10)$$

$$\min f(x) = 0 \quad x_i = 0 \quad (3.11)$$

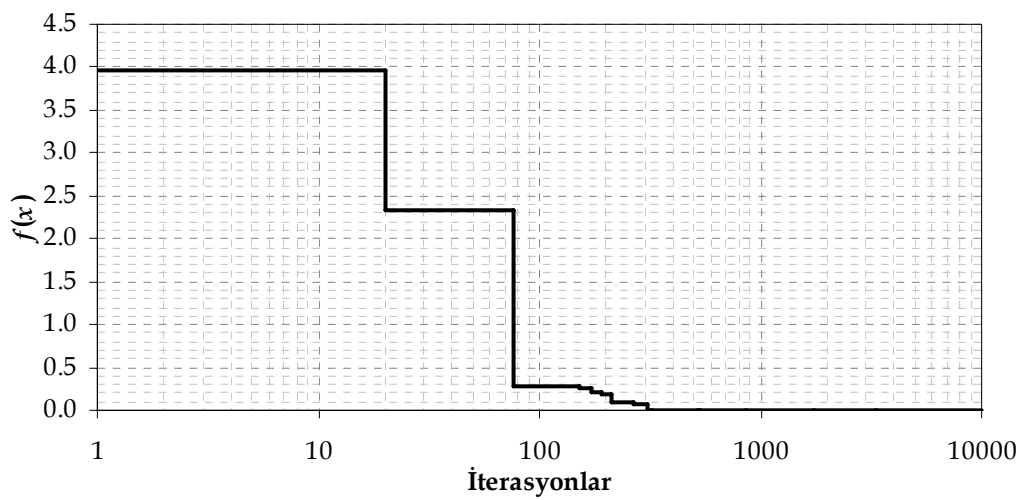
Problemin çözümünde elde edilen amaç fonksiyonu değeri ve bağımsız değişkenlerin aldığı değerler şu şekildedir:

$$f(x) = 1.21 \times 10^{-9} \quad x_1 = -1.79 \times 10^{-6}; \quad x_2 = -1.70 \times 10^{-6} \quad (3.12)$$

Şekil 3.5'te fonksiyonun 2 değişkenli kabul edilmesi durumunda yapısı, Şekil 3.6'da çözüm grafiği verilmiştir.



Şekil 3.5 Rastrigin'in test fonksiyonu



Şekil 3.6 Rastrigin'in test fonksiyonunun yakınsama grafiği



### 3.3.3. Michalewicz'in test fonksiyonu

Michalewicz'in 12. test fonksiyonu (Michalewicz 1992) Denklem (3.13)'de verilmiştir. Bu fonksiyon, yapısı itibariyle değişken sayısının faktöriyeli kadar lokal minimum içermektedir.

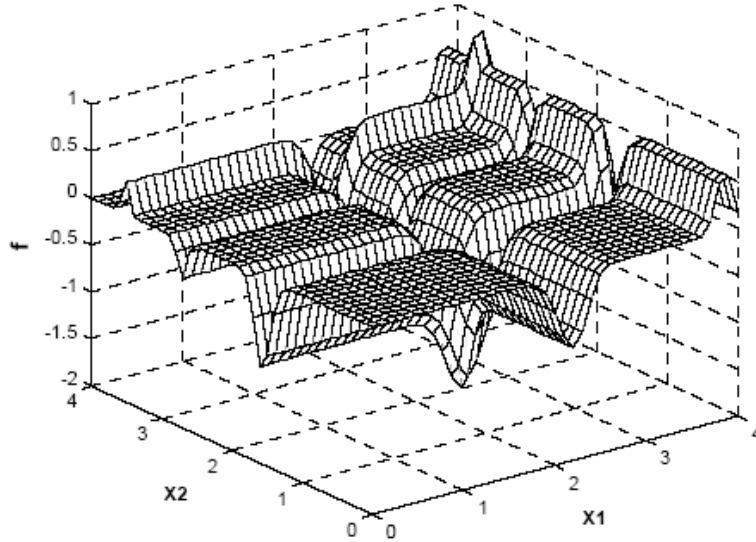
$$f(x) = -\sum_{i=1}^n \sin(x_i) \left[ \sin\left(\frac{i \times x_i^2}{\pi}\right) \right]^{2m} \quad m=10, 0 \leq x_i \leq \pi \quad (3.13)$$

$$\min f(x) = -4.68732 \quad (n=5) \quad (3.14)$$

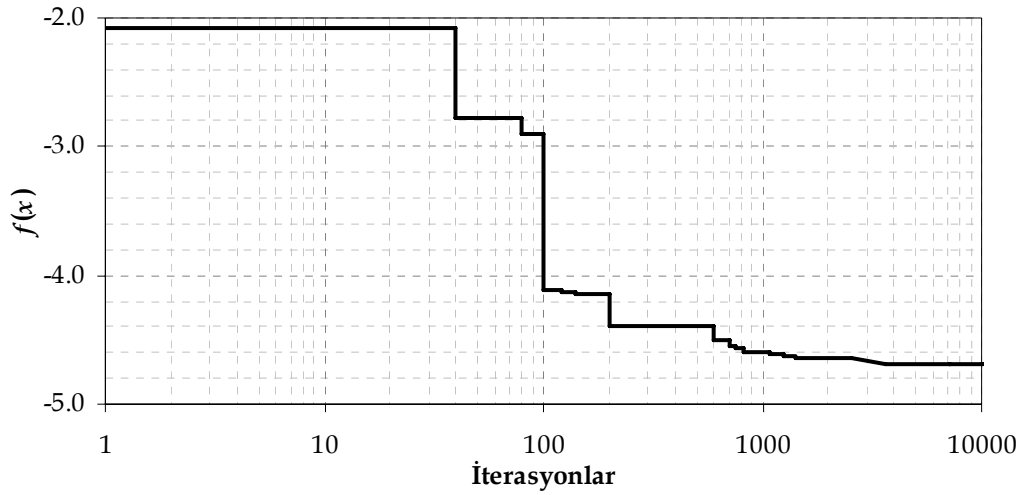
Test fonksiyonunun çözümünde bağımsız değişken sayısının 5 alınması durumunda hesaplanan sonuç aşağıdaki gibidir:

$$f(x) = -4.68765 \quad x_1 = 2.2029; x_2 = 1.5708; x_3 = 1.2850; x_4 = 1.9231; x_5 = 1.7205 \quad (3.15)$$

Şekil 3.7'de iki değişken için fonksiyonun grafiği ve Şekil 3.8'de ARAR tekniği ile çözüm sürecinin yakınsama grafiği verilmiştir.



Şekil 3.7 Michalewicz'in test fonksiyonu



Şekil 3.8 Michalewicz'in test fonksiyonunun yakınsama grafiği

### 3.3.4. Goldstein-Price'in test fonksiyonu

Goldstein-Price (1971) tarafından önerilen test fonksiyonunun yapısı, çözüm uzayı ve global minimum değeri şu şekildedir:

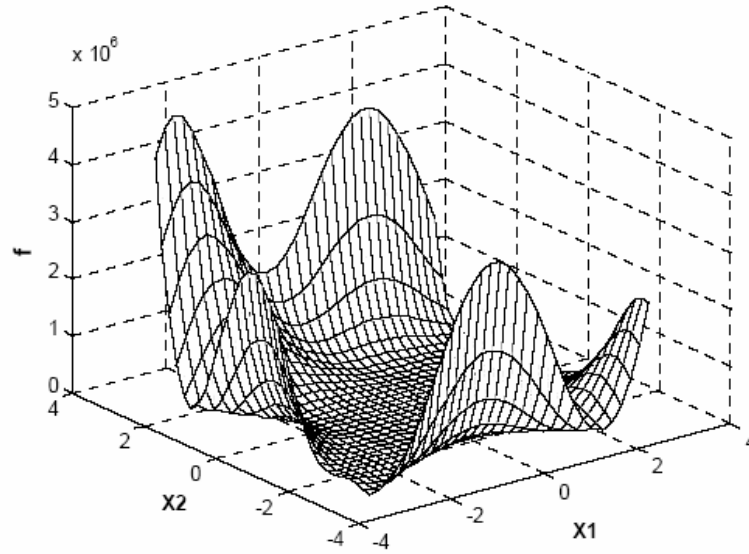
$$\begin{aligned}
 f(x_1, x_2) = & \left[ 1 + (x_1 + x_2 + 1)^2 \times (19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2) \right] \\
 & \times \left[ 30 + (2x_1 - 3x_2)^2 \times (18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2) \right] \quad (3.16) \\
 & -2 \leq x_i \leq 2
 \end{aligned}$$

$$\min f(x_1, x_2) = 3 \quad x_1 = 0; x_2 = -1 \quad (3.17)$$

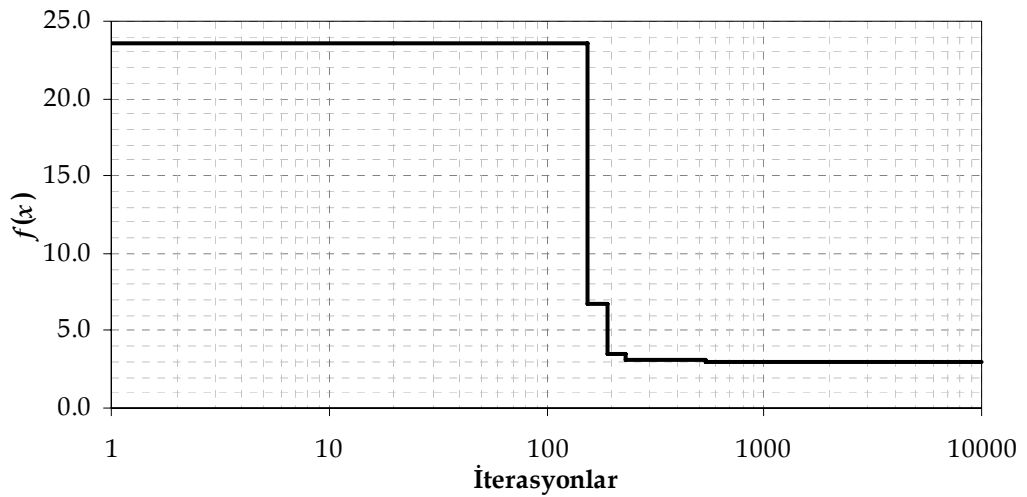
Test fonksiyonunun çözümü ile elde edilen sonuç aşağıdaki gibidir:

$$f(x_1, x_2) = 3 \quad x_1 = 0; x_2 = -1 \quad (3.18)$$

Şekil 3.9'da iki değişken için fonksiyonun grafiği ve Şekil 3.10'da ARAR tekniği ile çözüm sürecinin yakınsama grafiği verilmiştir.



Şekil 3.9 Goldstein-Price'in test fonksiyonu



Şekil 3.10 Goldstein-Price'in test fonksiyonunun yakınsama grafiği

### 3.3.5. Schwefel'in test fonksiyonu

Schwefel (1981) tarafından önerilen test fonksiyonunun yapısı, çözüm uzayı ve global minimum değeri şu şekildedir:

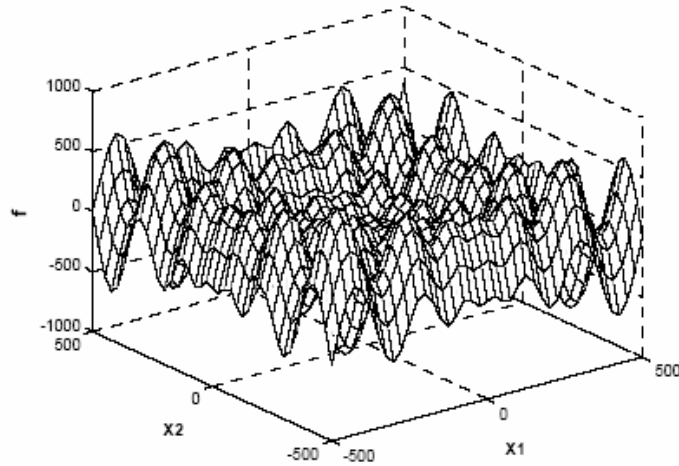
$$f(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \times \sin(\sqrt{|x_i|}) \quad -500 \leq x_i \leq 500 \quad (3.19)$$

$$\min f(x) = -n \times 418.9829 \quad x_i = 420.9687 \quad (3.20)$$

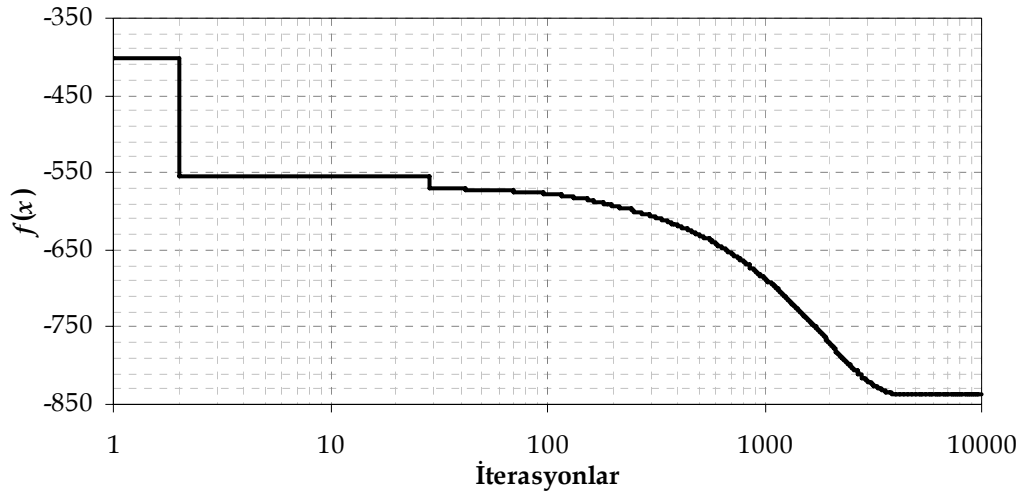
10,000 iterasyon sonucunda test fonksiyonu için elde edilen çözüm şu şekildedir:

$$f(x) = -837.9409 \quad x_1 = 420.9686; x_2 = 420.5248 \quad (3.21)$$

Şekil 3.11’de iki değişken için fonksiyonun grafiği ve Şekil 3.12’de ARAR tekniği ile çözüm sürecinin yakınsama grafiği verilmiştir.



Şekil 3.11 Schwefel’in test fonksiyonu



Şekil 3.12 Schwefel’in test fonksiyonunun yakınsama grafiği

Yukarıda verilen 5 farklı kısıtsız minimizasyon problemi için gerçekleştirilen çözümler sonucunda bulunan değerlerin, fonksiyonların global minimum değerlerine çok yakın ya da eşit olduğu görülmektedir. Aynı test fonksiyonları literatürde GA’lar ile

çözölmüş (Ayvaz 2008) ve elde edilen sonuçlar Tablo 3.2’de ARAR model sonuçları ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Tablodan göröleceğı gibi, iki farklı çözüm yaklaşımında Goldstein-Price test fonksiyonu için aynı sonuç elde edilirken, diğere 4 fonksiyonun çözümünde ARAR’la elde edilen sonuçlar GA çözümlerine göre global optimum değerele daha yakındır.

**Tablo 3.2** ARAR ve GA modellerinin sonuçlarının değereendirilmesi

Fonksiyon	Global Optimum		GA sonuçları		ARAR sonuçları	
	$f(x)$	$x_i$	$f(x)$	$x_i$	$f(x)$	$x_i$
<b>De Jong</b>	0	$x_1=0$	$4.77 \times 10^{-11}$	$x_1=-4.88 \times 10^{-6}$	$1.48 \times 10^{-11}$	$x_1=-2.3 \times 10^{-6}$
		$x_2=0$		$x_2=-4.88 \times 10^{-6}$		$x_2=3.1 \times 10^{-6}$
<b>Rastrigin</b>	0	$x_1=0$	$9.47 \times 10^{-9}$	$x_1=-4.88 \times 10^{-6}$	$1.21 \times 10^{-9}$	$x_1=-1.79 \times 10^{-6}$
		$x_2=0$		$x_2=-4.88 \times 10^{-6}$		$x_2=-1.70 \times 10^{-6}$
<b>Michalewicz</b>	-4.68732	---	-4.52721	$x_1=2.20895$	-4.68765	$x_1=2.2029$
				$x_2=1.57153$		$x_2=1.5708$
				$x_3=1.27608$		$x_3=1.2850$
				$x_4=1.91898$		$x_4=1.9231$
				$x_5=0.99552$		$x_5=1.7205$
<b>Goldstein-Price</b>	3	$x_1=0$	3.00000	$x_1=-0.00003$	3.00000	$x_1=0$
		$x_2=-1$		$x_2=-1.00000$		$x_2=-1.00000$
<b>Schwefel</b>	-837.96584	$x_1=420.9687$	-837.86140	$x_1=420.8982$	-837.94090	$x_1=420.9686$
		$x_2=420.9687$		$x_2=421.8751$		$x_2=420.5248$

### 3.4. Sezgisel ARAR Optimizasyon Tekniğı Tabanlı Çözüm Modeli: ARARULAT

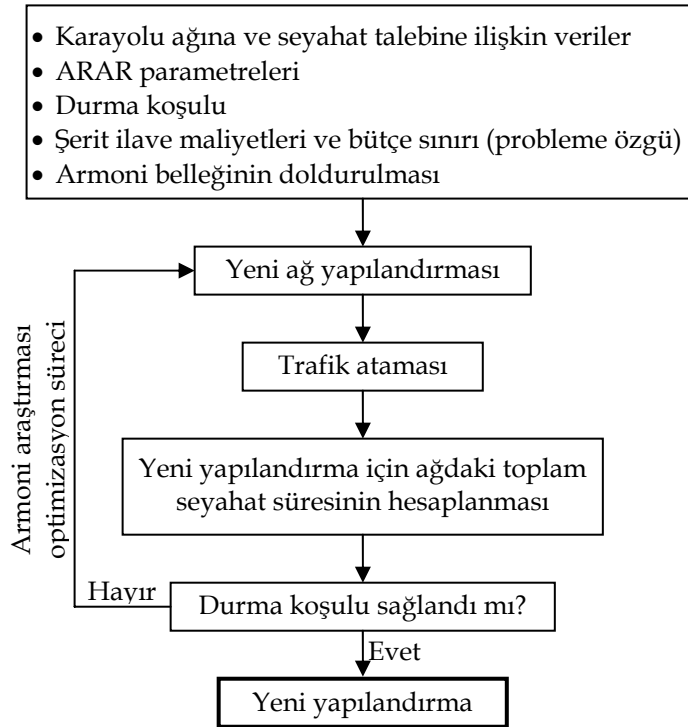
ARAR tekniğinin ayrıntılı olarak açıklanması ve performans testlerinin gerçekleştirilmesinden sonra bu bölümde, ARARULAT modelinin tasarım probleminin çözüme nasıl uygulandığı açıklanmıştır.

Bir karayolu ulaşım ağındaki trafik sıkışıklıklarının ve dolayısıyla ağ üzerindeki toplam seyahat süresinin en aza indirilmesini ifade eden bağıntı şu şekilde tanımlanabilmektedir:

$$\min T(\mathbf{v}, \mathbf{t}) = \sum_{a \in L} v_a t_a(v_a) \quad (3.22)$$

Burada,  $T(\mathbf{v}, \mathbf{t})$  ağ toplam seyahat süresini,  $\mathbf{v}$  bağ trafik hacimleri vektörünü,  $\mathbf{t}$  bağ seyahat süreleri vektörünü,  $v_a$  ve  $t_a(v_a)$  ( $\forall a \in L$ ) sırasıyla  $a$  bağındaki saatlik trafik hacmini ve bu hacim değerine bağlı seyahat süresini ifade etmektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, AUAT probleminin hangi şekilde ele alındığıdır. Örneğin, mevcut bir karayolu ağındaki seyahat süresi minimizasyonu için ağa yeni bağlar ekleme planlaması ve aynı amaçla ağıdaki bağlarda şerit yönlendirme planlaması arasında bir takım farklılıklar bulunmaktadır. Birinci yaklaşımda, planlama sonrasında yine tüm bağlar başlangıçtaki şekilleriyle seyahat talebine hizmet vereceklerdir. İkinci durumda ise, bazı bağlarda tek yön uygulamasına gidilmesi durumunda başlangıçta 2 yöne hizmet veren bağ, planlama sonrasında bir yöne hizmet vermeyecektir. Bu durumda, o yöndeki şeritlerin kapasiteleri sıfır olacaktır. Ayrıca, birinci problemde karayoluna ilave edilecek şeritler için bir ekonomik yatırım gerekliliği ve bununla birlikte bir bütçe kısıtı söz konusu olmaktadır. Bu da problemi, bir kısıtlı optimizasyon problemi haline dönüştürmektedir. Adı geçen problemler ve bu problemler için geliştirilen çözüm yaklaşımları 4. Bölüm'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Şekil 3.13'te AUAT probleminin çözümü için geliştirilen ARARULAT modelinin akış şeması verilmektedir.



Şekil 3.13 AUAT problemini çözümü için geliştirilen ARARULAT modeli

Şekil 3.13'ten görüldüğü üzere, AUAT probleminin çözümüne başlanırken öncelikle karayoluna ait verilerin (ağ yapısı, şerit/bağ kapasiteleri, bağ serbest akım seyahat süreleri, vb.), seyahat talebine ilişkin verilerin (B/V çiftleri ve B/V seyahat talepleri), ARAR parametrelerinin ( $HMS$ ,  $HMCR$ ,  $PAR$ ) ve çözüm sürecinin sonlandırılması için gerekli durma koşulunun tanımlanması gerekmektedir. Probleme ilişkin veri ve parametrelerin tanımlanmasından sonra optimizasyon süreci başlamaktadır. Öncelikle armoni belleğinde bulunan ve sayısı  $HMS$  parametresi ile tanımlanan armoni vektörleri, probleme ilişkin karar değişkeni ( $N$ ) sayısı kadar rastgele değer ile doldurulur. Armoni belleğindeki herbir vektör, ağ için yeni bir yapılandırmayı temsil etmektedir. Denklem (3.23)'de  $N$  adet tasarıma aday bağ için armoni belleği görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} u_1^1 & u_2^1 & \cdots & u_{N-1}^1 & u_N^1 \\ u_1^2 & u_2^2 & \cdots & u_{N-1}^2 & u_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_1^{HMS-1} & u_2^{HMS-1} & \cdots & u_{N-1}^{HMS-1} & u_N^{HMS-1} \\ u_1^{HMS} & u_2^{HMS} & \cdots & u_{N-1}^{HMS} & u_N^{HMS} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} T(\mathbf{v}, \mathbf{t}(\mathbf{v}, \mathbf{u}))^1 \\ T(\mathbf{v}, \mathbf{t}(\mathbf{v}, \mathbf{u}))^2 \\ \vdots \\ T(\mathbf{v}, \mathbf{t}(\mathbf{v}, \mathbf{u}))^{HMS-1} \\ T(\mathbf{v}, \mathbf{t}(\mathbf{v}, \mathbf{u}))^{HMS} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

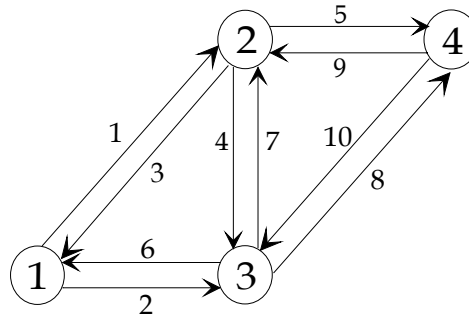
Burada  $u_a \in \mathbf{u}$ ,  $a$  bağının iyileştirme sonrası durumunu temsil eden tamsayı değerdir. Örneğin şerit ilavesi problemi gözönüne alındığında,  $a$  bağına yeni bir şerit ilavesi yapılacaksa  $u_a = 1$ , aksi halde  $u_a = 0$  olmaktadır. Dolayısıyla,  $u_a \in \{0,1\}$  şeklinde bir ikili değişkendir. Şerit yönlendirme probleminde ise  $n_a$ ,  $a$  bağındaki şerit sayısı olmak üzere  $u_a$ ,  $[-n_a, n_a]$  aralığında bir tam sayı değer almaktadır. Bu durumda,  $a$  bağına  $u_a$  adet şeridin yönlendirilmesi için karşı yöndeki  $a'$  bağından  $u_a$  adet şeridin çıkarılması gerekmektedir ( $u_{a'} = -u_a$ ). Bağ trafik hacimleri ile bu hacimler ve yapılandırmalara bağlı olan bağ seyahat sürelerinin bir işlevi olan  $T(\mathbf{v}, \mathbf{t}(\mathbf{v}, \mathbf{u}))$ , her bir armoni vektöründe saklanan yapılandırmalar dikkate alınarak yapılan trafik atamasından sonra hesaplanmaktadır.

Armoni belleğindeki çözüm vektörlerinin ve herbir vektöre karşılık gelen amaç fonksiyon değerlerinin hesaplanmasından sonra yeni çözüm vektörü üretimi, ARAR'nın 3. adımına uygun şekilde yapılmaktadır. Daha sonra, bu yapılandırma için trafik ataması yapılarak bağ trafik hacimleri elde edilmektedir. İlgili trafik hacimleri göz önüne alınarak ağ toplam seyahat süresi, Denklem (3.23)'de verildiği üzere hesaplanır. Son

olarak, daha önceden tanımlanmış olan durma koşulu kontrol edilir. Koşul sağlanmışsa algoritma sonlandırılır ve elde edilen yapılandırma ile AUAT probleminin çözümü tamamlanmış olur. Aksi halde, yeni bir çözüm vektörü üretilerek ARAR sürecine devam edilir.

### 3.4.1. Örnek uygulama

Bu bölümde, ARAR optimizasyon yönteminin şerit yönlendirme probleminin çözümüne uygulanışı, basit bir çift yönlü ağ üzerinde gösterilmiştir. Ağın yönlendirme öncesindeki yapısı Şekil 3.14’te verilmiştir.



**Şekil 3.14** Yönlendirme öncesinde test ağının görünümü

Tablo 3.3’de test ağına ilişkin serbest akım seyahat süreleri ( $t_a$ ) ve bağlardaki şerit sayıları ( $n_a$ ) verilmiştir.

**Tablo 3.3** Test ağındaki bağlardaki serbest akım seyahat süreleri ve yönlendirme öncesi şerit sayıları

Bağlar	$t_a^0$ (s)	$\alpha$	$n_a$	$\beta$
1 ve 3	4	0.6	2	4
2 ve 6	6	0.9	2	4
4 ve 7	2	0.3	3	4
5 ve 9	5	0.75	2	4
8 ve 10	3	0.45	2	4

Test ağında 2 adet B/V çifti bulunduğu ve bunların sırasıyla düğüm 1’den düğüm 4’e ve düğüm 4’ten düğüm 1’e olduğu farzedilmiştir. Sabah zirve saatindeki seyahat talepleri ise birinci B/V çifti için 100 taşıt/sa, ikinci B/V çifti için ise 60 taşıt/sa ve ağ genelinde şerit kapasitesi 20 taşıt/sa olarak alınmıştır. Tablo 3.4’de, test ağındaki yapılandırma öncesi saatlik trafik hacimleri verilmiştir. SKD ataması probleminin



çözümünün ayrıntıları 4. Bölüm’de verilmiş olup, örnek uygulamada bağ seyahat sürelerinin hesaplanmasında kullanılan fonksiyon aşağıda verildiği gibidir:

$$t_a(v_a) = t_a^0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{v_a}{20 \cdot n_a} \right)^\beta \right] \quad (3.24)$$

**Tablo 3.4** Test ağındaki yapılandırma öncesi trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları

Bağlar	Trafik hacmi ( $v_a$ )	Bağlar	Trafik hacmi ( $v_a$ )
1	56	3	38
2	44	6	22
4	20	7	25
5	43	9	21
8	57	10	39
Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)			0.513

Tablo 3.4’de görüldüğü üzere, mevcut durumda ağıdaki toplam seyahat süresi 0.52 taşıt-sa olarak hesaplanmıştır. ARAR yöntemi için verilen 5 adım izlenerek problemin çözümü aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

**Adım 1:** *Problemin kurulması ve algoritma parametrelerinin tanımlanması:* Toplam seyahat süresi minimizasyonu probleminin tanımı Denklem (3.23)’de tanımlanmış ve *HMS*, *HMCR* ve *PAR* parametreleri sırasıyla 10, 0.95 ve 0.45 alınmıştır.

**Adım 2:** *Armoni belleğinin oluşturulması:* Tablo 3.5’de, 10 adet çözüm vektörü için oluşturulan başlangıç belleği verilmiştir. Bağlara yönlendirilecek olan şerit sayılarını ifade eden  $u_a$  değişkenleri, ilgili bağlardaki şerit sayıları göz önüne alınarak  $[-n_a, n_a]$  aralığında rastgele bir tamsayı olarak rastgele üretilmiştir. Ayrıca, yeni yapılandırmaları temsil eden her bir vektör için ağıdaki amaç fonksiyonu (toplam seyahat süresi) değerleri hesaplanmış ve çözüm vektörleri, amaç fonksiyonunun aldığı değerlere göre en iyiden en kötüye doğru sıralanmıştır.  $u_a$  değerleri rastgele doldurulurken, aynı düğümler arasında fakat farklı yönlerdeki bağların durumu dikkate alınmıştır.

Tablo 3.5 incelendiğinde, çalışma ağındaki 10 adet bağ için  $u_a$  değerleri görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, ağı oluşturan 10 bağdan 5’i için  $u_a$  üretildiğidir. Aynı düğümler arasında yer alan ters yöndeki bağlardan sadece biri için

$u_a$  üretilmesi durumunda diğer bağ için  $u_a$  değeri ( $u_{a'} = -u_a$ ) bağıntısı ile elde edilmekte ve negatif değerler, yönlendirme sonrasında ilgili bağın kaybettiği şerit sayılarını temsil etmektedir. Yani, bu problem için karar değişkeni sayısı  $N = 5$ 'tir.

**Tablo 3.5** Test ağının çözümü için oluşturulan başlangıç belleği

$u_1$	$u_2$	$u_4$	$u_5$	$u_8$	$u_3$	$u_6$	$u_7$	$u_9$	$u_{10}$	$T(\mathbf{v}, \mathbf{t}(\mathbf{v}, \mathbf{u}))$
1	1	3	0	2	-1	-1	-3	0	-2	0.488
-1	2	3	-2	2	1	-2	-3	2	-2	0.493
0	0	-1	1	1	0	0	1	-1	-1	0.512
0	-1	1	1	0	0	1	-1	-1	0	0.519
0	1	-1	2	-1	0	-1	1	-2	1	0.533
-1	2	0	-1	-1	1	-2	0	1	1	0.530
1	0	-3	-1	0	-1	0	3	1	0	0.547
0	1	-2	2	2	0	-1	2	-2	-2	0.554
2	0	2	0	-1	-2	0	-2	0	1	0.562
-2	-2	0	2	1	2	2	0	-2	-1	0.588

**Adım 3:** *Yeni armoninin oluşturulması:* Birinci iterasyonda yeni çözüm vektörünün üretimi, *HMCR* ve *PAR* parametrelerinin yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yeni yapılandırmayı temsil eden çözüm vektörü ve bu yapılandırma için hesaplanan toplam seyahat süresi Tablo 3.6'da verilmiştir.

**Tablo 3.6** Birinci iterasyonda üretilen çözüm vektörü ve amaç fonksiyonu değeri

$u_1$	$u_2$	$u_4$	$u_5$	$u_8$	$u_3$	$u_6$	$u_7$	$u_9$	$u_{10}$	$T(\mathbf{v}, \mathbf{t}(\mathbf{v}, \mathbf{u}))$
0	1	3	0	0	0	-1	-3	0	0	0.494

**Adım 4:** *Armoni belleğinin güncellenmesi:* Tablo 3.6 incelendiğinde, yeni yapılandırma sonucunda elde edilecek toplam seyahat süresi değeri 0.494 taşıt-sa'dır. Bu değer, Tablo 3.5'te verilen armoni belleği içindeki en kötü toplam seyahat süresi değeri olan 0.588'den daha düşük olduğu için yeni vektör belleğe dahil edilir ve 0.588 taşıt-sa değerini veren vektör bellekten çıkarılır.

**Adım 5:** *Durma koşulunun kontrolü:* Bu adımda, algoritmanın istenen düzeyde bir iyileşme sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmektedir. Problemin çözümü için göz önüne alınan durma parametresi ve koşulu aşağıdaki gibidir:

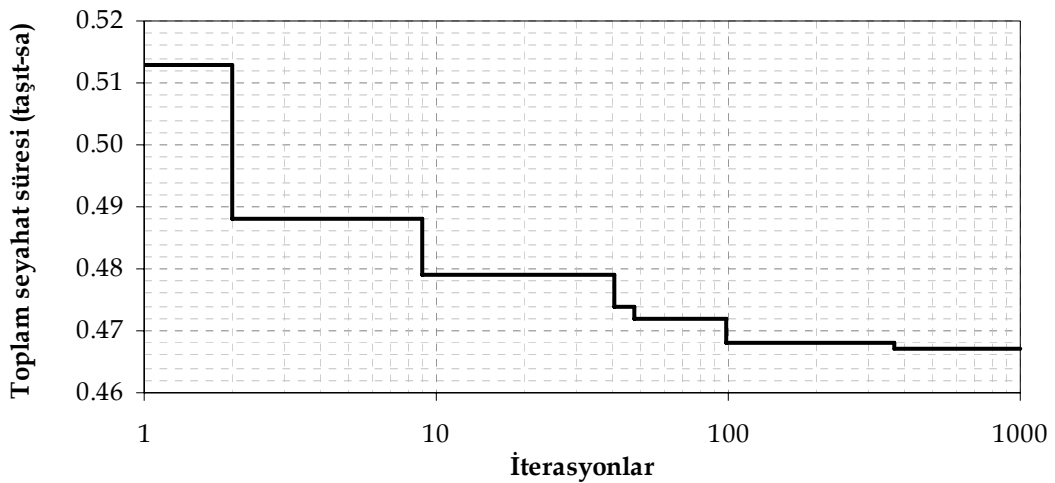
$$\lambda = T(\mathbf{v}, \mathbf{t}(\mathbf{v}, \mathbf{u}))^{HMS} - T(\mathbf{v}, \mathbf{t}(\mathbf{v}, \mathbf{u}))^1 \quad (3.25)$$

(3.25) bağıntısında  $\lambda$  değeri, armoni belleğinin güncellenmesinden sonra en iyi ve en kötü amaç fonksiyonu değerlerinin farkı olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değer 0.002'ye eşit ya da küçükse durma koşulunun sağlandığı kabul edilmiştir. Birinci iterasyon sonunda bu değer,

$$\lambda = 0.588 - 0.488 = 0.1 \text{ taşıt-sa}$$

olarak bulunmuştur. Bu değer, 0.002 taşıt-sa'ten büyük olduğu için algoritma ikinci iterasyonu gerçekleştirmek için *Adım 3*'e dönecek ve yeni bir çözüm vektörü üretecektir.

Verilen test ağı için şerit yönlendirme probleminin çözümü 373 iterasyonda tamamlanmış ve çözüm sürecinin yakınsama grafiği Şekil 3.15'te verilmiştir. 1, 10, 100 ve 373. iterasyonlardaki en iyi çözüm vektörleri ve bu yapılandırmalara karşılık gelen toplam seyahat süresi değerleri de Tablo 3.7'de verilmektedir.



**Şekil 3.15** Test ağı için şerit yönlendirme probleminin çözümü boyunca toplam seyahat süresinin değişimi

Tablo 3.7 incelendiğinde, 373. iterasyonun sonunda elde edilen yönlendirme planı ile ağdaki toplam seyahat süresinin 0.467 taşıt-sa değerine düşürüldüğü görülmektedir. Başlangıçta 0.513 taşıt-sa olan toplam seyahat süresi değerindeki iyileşme % 8.80 mertebesindedir. Çözüm sonunda, 1-3 ve 8-10 nolu bağlarda yönlendirme yapılmazken, 2-5 ve 5-9 nolu bağlarda 1 şerit karşı yönlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca, 4 nolu bağdaki üç şerit 7 nolu bağa yönlendirilmiş ve 4-7 bağı tek yönlü trafiğe ayrılmıştır.

**Tablo 3.7** 1, 10, 100 ve 373. iterasyonlar sonunda elde edilen en iyi çözüm vektörleri ve amaç fonksiyonu değerleri

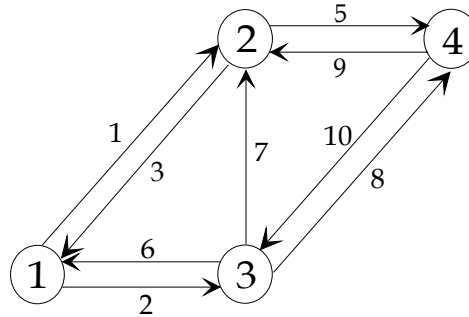
İterasyon	$u_1$	$u_2$	$u_4$	$u_5$	$u_8$	$u_3$	$u_6$	$u_7$	$u_9$	$u_{10}$	$T(\mathbf{v}, \mathbf{t}(\mathbf{v}, \mathbf{u}))$
1	1	1	3	0	2	-1	-1	-3	0	-2	0.488
10	1	1	-1	0	0	-1	-1	1	0	0	0.479
100	0	1	-2	1	0	0	1	2	-1	0	0.468
373	0	1	-3	1	0	0	-1	3	-1	0	0.467

Tablo 3.8’de yönlendirme sonrasında bağlardaki saatlik trafik hacimleri verilmiştir.

**Tablo 3.8** Test ağındaki yapılandırma sonrası trafik hacimleri

Bağlar	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağlar	Trafik hacmi (taşıt/sa)
1	50	3	40
2	50	6	20
4	---	7	20
5	50	9	20
8	50	10	40
Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)		0.467	

Şekil 3.16’da test ağının çözüm sonrası görünümü verilmiştir.



**Şekil 3.16** Yönlendirme sonrasında test ağının görünümü

### 3.5. Sonuçlar

Bu bölümde, sezgisel ARAR optimizasyon tekniğinin temel felsefesi açıklanmış ve algoritma adımları detaylı olarak anlatılmıştır. Algoritma, çözüm performansının ortaya konması amacıyla literatürde sıkça kullanılan 5 farklı test fonksiyonuna uygulanmıştır. Ardından, ARAR tekniğinin AUAT probleminin çözümüne uyarlanması hakkında bilgi verilmiş ve örnek bir test ağı üzerinde detaylı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

ARAR optimizasyon tekniği kullanılarak 5 farklı kısıtsız optimizasyon problemi için gerçekleştirilen analizler sonunda, incelenen fonksiyonların optimum/yakın-optimum değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla, sezgisel ARAR optimizasyon tekniği, s¼rekli yapısına rağmen birçok yerel optimum değer sahip olan ve bu nedenle t¼reve dayalı optimizasyon algoritmaları ile çözümü oldukça zor olan problemlerin çözümünde etkili sonuçlar verebilmektedir.

AUAT probleminin çözümü için geliştirilen yöntemin örnek test ağına uygulanması sonucunda elde edilen sonuçların, yöntemin probleme uygulanabilirliğini ortaya koyduğu söylenebilir. Ayrıca, içerdiği ayrık değişkenlerden dolayı bu uygulama, ARAR yöntemi için diğer bir performans göstergesi olarak kabul edilebilir.

Örnek uygulaması verilen AUAT problemleri ile ilgili detaylı form¼lasyonlara bir sonraki bölümde yer verilmiştir.

## **4. AUAT PROBLEM FORMÜLASYONLARI VE ARARULAT MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

### **4.1. Giriş**

Bu bölümde, AUAT problem formülasyonları verilmiş ve ARARULAT modelleri geliştirilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle DKD ve SKD ataması problemlerinin çözümü literatürde ilk defa “çalışma sayfası” ve çözücü eklentisi ile yapılmıştır. Daha sonra, AUAT kapsamında ele alınan şerit ilavesi/iyileştirme ve şerit yönlendirme problemleri formülize edilmiştir. Ardından ARARULAT modelleri, kullandıkları TA yaklaşımları ve geliştirilme amaçlarına bağlı olarak sınıflandırılmış ve her modelin çözüm süreçleri detaylı olarak açıklanmıştır. Bu modeller, ARARULAT yaklaşımının doğrulanması için geliştirilen ARARULAT-DKD-1, şerit ilavesi probleminin çözümü için geliştirilen ARARULAT-SKD-1, ARARULAT-DKD-2, ARARULAT-İSİ (İki-Seviyeli İteratif yaklaşım) ve şerit yönlendirme probleminin çözümü için geliştirilen ARARULAT-SKD-2 modelleridir.

### **4.2. AUAT Problem Formülasyonları**

Bu bölümde, çalışma kapsamında ele alınan AUAT problemlerinin tanım ve formülasyonları verilmiştir. İlk olarak, karayolu ağı üzerindeki bağlarda oluşacak trafik hacimlerinin belirlenmesi için çözülmesi gereken TA problemi tanımlanmış ve bu problemin çözümü için kullanılan yaklaşımlar açıklanmıştır. Daha sonra, çalışma kapsamında ele alınan şerit ilavesi/iyileştirme ve şerit yönlendirme problemleri detaylı olarak açıklanmıştır.

#### 4.2.1. DKD problem formülasyonu ve çözümü

DKD probleminin çözümünde kullanılan Beckmann dönüşümü 2. Bölüm'de verilmişti. Beckmann problemi AUAT kapsamında iyileştirilmesi muhtemel bağlar göz önüne alınarak yeniden uyarlanmıştır. Herhangi bir yol ağındaki bağlar kümesi  $L = L_1 \cup L_2$ , iyileştirme planı dışında kalan bağlar kümesi  $L_1 = \{l : l = 1, 2, \dots, n\}$  ve iyileştirilmeye aday bağlar kümesi  $L_2 = \{l : l = n + 1, n + 2, \dots, n + m\}$  olsun. Bu durumda Beckmann problemi aşağıdaki şekilde revize edilebilir:

$$v_a = \sum_{s=1}^{s=p} v_a^s \quad (a = 1, 2, \dots, n) \quad (4.1)$$

$$v_a^s \geq 0 \quad (a = 1, 2, \dots, n, s = 1, 2, \dots, p) \quad (4.2)$$

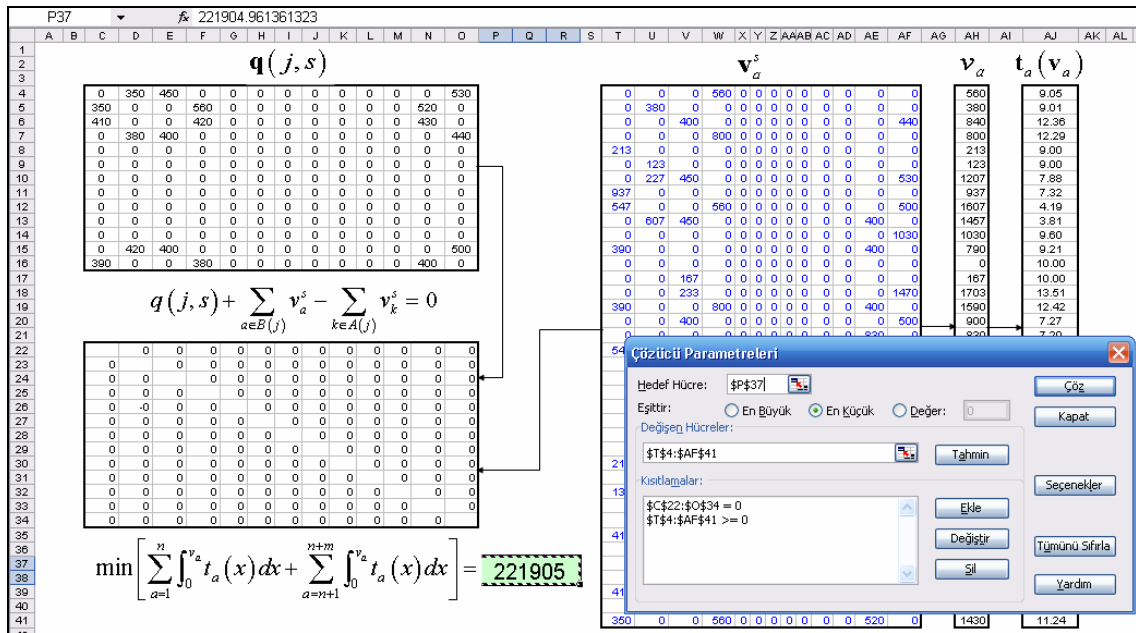
$$q(j, s) + \sum_{a \in B(j)} v_a^s = \sum_{k \in A(j)} v_k^s \quad (j = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, p, j \neq s) \quad (4.3)$$

kısıtlarına bağlı olarak,

$$\min \left[ \sum_{a=1}^n \int_0^{v_a} t_a(x) dx + \sum_{a=n+1}^{n+m} \int_0^{v_a} t_a(x) dx \right] \quad (4.4)$$

şeklinindedir. Burada  $v_a$ ,  $a$  bağındaki trafik hacmi (araç/sa),  $t_a(v_a)$ ,  $a$  bağındaki trafik hacminin bir işlevi olarak seyahat süresi (sa),  $v_a^s$ ,  $a$  bağı boyunca  $s$  varışına seyahat eden trafik hacmi (araç/sa),  $q(j, s)$ ,  $j$ - $s$  B-V çifti arasındaki seyahat talebidir (araç/sa). (4.1)-(4.3) nolu denklemler sırasıyla bağ akımlarının tanımlanması, pozitifliği ve ağdaki trafik hacminin korunumu ile ilgili kısıtlardır. (4.3) nolu bağıntıda  $B(j)$ ,  $j$  düğümüne giren bağların çıktığı düğümler seti,  $A(j)$ ,  $j$  düğümünden çıkan bağların girdiği düğümler setidir.

DKD probleminin amaç fonksiyonu olan (4.4) nolu bağıntının (4.1)-(4.3) arasında verilen kısıtlara bağlı çözümü Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 DKD probleminin çalışma sayfası ve çözücü yardımıyla çözümü

Şekil 4.1 incelendiğinde, B-V taleplerinin, ağdaki bağlardan her düğüme seyahat eden trafik hacimlerinin sırasıyla  $q(j,s)$  ve  $v_a^s$  matrisleri ile ifade edildiği görülmektedir. Bağ trafik hacimleri vektörü, (4.1) bağıntısıyla hesaplanmaktadır. (4.2) nolu kısıt,  $v_a^s$  matrisinin tüm elemanlarının pozitif olmasını gerektirmektedir. (4.3) nolu akım korunumu kısıtı, ifade kolaylığı açısından aşağıdaki şekilde revize edilmiştir:

$$q(j,s) + \sum_{a \in B(j)} v_a^s - \sum_{k \in A(j)} v_k^s = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, N, s = 1, 2, \dots, p, j \neq s) \quad (4.5)$$

(4.5) nolu denklem ile verilen dönüşüm sayesinde akım korunum kısıtı, çözücüye bir eşitlik kısıtı olarak dahil edilmiş ve amaç fonksiyonun çözümü gerçekleştirilmiştir. Bağ seyahat sürelerinin hesaplanması için kullanılan fonksiyonların yapıları çözümü yapılan probleme göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle, ARARULAT modellemesinde kullanılan bağ seyahat süresi fonksiyonları 5. Bölüm'de bulunabilir.

ARARULAT-DKD-1 ve ARARULAT-DKD-2 modelleri ile çözüm sırasında bu işlem bir alt modül olarak çalıştırılmak üzere saklanmıştır.



#### 4.2.2. SKD problem formülasyonu ve çözümü

SKD atamasının temel prensibi, ulaştırma ağını oluşturan güzergahların sürücüler tarafından belli olasılıklarla seçildiği şeklindedir. Bu olasılıkları hesaplayabilmek için çeşitli güzergah seçim modelleri kullanılmaktadır. Literatürde sıkça kullanılan modeller, *Logit*, *C-Logit* ve *Probit* modellerdir. Logit modelde tüm güzergah alternatifleri istatistiksel olarak bağımsızmış gibi düşünülürken, C-logit ve probit modellerde alternatif güzergahlar arasındaki bağımlılık dikkate alınmaktadır (Cantarella ve Sforza 1991). SKD ataması, trafik hacim uzayında sabit-nokta problemi olarak tanımlanmaktadır (Daganzo 1983, Cantarella 1997). Bu tanımlamaya göre SKD denge akımları aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$f_p^w = \Pr_p^w(g_p^w)q_w, \quad \forall p \in P_w, \forall w \in W \quad (4.6)$$

Burada  $f_p^w$ ,  $w$  B-V çifti arasındaki  $p$  güzergahındaki saatlik trafik hacmini,  $g_p^w$ ,  $p$  güzergahındaki seyahat süresini,  $\Pr_p^w(g_p^w)$ ,  $p$  güzergahının seçilme olasılığını,  $q_w$ ,  $w$  B-V çifti arasındaki seyahat talebini,  $P_w$ ,  $w$  B-V çifti arasındaki güzergahlar kümesini ( $\forall p \in P_w$ ),  $W$  ise B-V çiftleri kümesini temsil etmektedir ( $\forall w \in W$ ).

Ulaşım ağındaki bağ trafik hacimlerini veren eşitlik, akım korunum ve pozitiflik kısıtları işe aşağıda verilmiştir.

$$v_a = \sum_{w \in W} \sum_{p \in P_w} f_p^w \delta_{ap}^w, \quad \forall a \in L \quad (4.7)$$

$$\sum_{p \in P_w} f_p^w = q_w, \quad \forall a \in L \quad (4.8)$$

$$f_p^w \geq 0, \quad \forall p \in P_w, \forall w \in W \quad (4.9)$$

Burada  $v_a$ ,  $a$  bağındaki saatlik trafik hacmini,  $L$  yol ağındaki bağlar kümesini ( $\forall a \in L$ ) ve  $\delta_{ap}^w$ , bağ/güzergah belirleme matrisinin ilgili elemanını temsil etmektedir. Bağ/güzergah matrisinin oluşturulma prensibi Denklem (4.10)'da verilmiştir:

$$\delta_{ap}^w = \begin{cases} 1 & \text{eğer } w \text{ B-V çiftindeki } p \text{ güzergahı } a \text{ bağıını kullanıyorsa} \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (4.10)$$

Denklem (4.8)'de verilen ifade,  $w$  B-V çifti arasındaki alternatif güzergahları kullanan trafik taleplerinin toplamının, yine  $w$  B-V çifti arasındaki seyahat talebine eşit olması gerektiğini gösteren akım konurum eşitliğidir. Denklem (4.9) ise ağ üzerindeki herhangi bir bağıdaki trafik hacminin negatif olamayacağını gösteren pozitiflik kısıtını ifade etmektedir. Güzergah ve bağı trafik hacimlerinin hesaplanması için bu çalışma kapsamında kullanılan C-Logit modelin fonksiyonel yapısı Denklem (4.11)'de verilmiştir (Cascetta ve diğ., 1996).

$$\Pr_p^w(g^w) = \frac{e^{(-\theta_0 g_p^w - \theta_l CF_p^w)}}{\sum_{i \in P_w} e^{(-\theta_0 g_i^w - \theta_l CF_i^w)}}, p \in P_w, w \in W \quad (4.11)$$

Burada,  $\theta_0$  ve  $\theta_l$  sürücü algılama düzeylerini temsil eden C-Logit model parametreleri ve  $CF_p^w$ ,  $P_w$  kümesinde bulunan tüm  $p$  güzergahları arasındaki bağımlılığı temsil eden benzerlik faktörüdür.  $\theta_0$  ve  $\theta_l$  parametreleri için sırasıyla 0.05 ve 0.5 değerleri önerilmektedir (Yin ve Madanat 2005).  $CF_p^w$  parametresinin hesabı için kullanılan bağıntı şu şekildedir:

$$CF_p^w = \sum_{a \in A} \delta_{ap}^w w_{ap}^w \ln N_a^w, p \in P_w, w \in W \quad (4.12)$$

Burada,  $N_a^w$ ,  $w \in W$  Başlangıç-Variş (B-V) çiftini bağlayan ve  $a \in L$  bağıını ortak kullanan güzergah sayısını,  $w_{ap}^w$  ise  $p \in P_w$  güzergahı için  $a$  bağıının oransal ağırlığını temsil etmektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$w_{ap}^w = \frac{t_a}{g_p^w} \quad (4.13)$$

Burada,  $t_a$ ,  $a$  bağıındaki seyahat süresi ve  $g_p^w$ ,  $p$  güzergahındaki toplam seyahat süresidir ve (4.14) nolu bağıntı ile hesaplanabilir.

$$g_p^w = \sum_{a \in L} t_a(v_a) \delta_{ap}^w, p \in P_w, w \in W \quad (4.14)$$

Denklem (4.14)'de bilinmeyen olarak karşımıza çıkan  $v_a$  bağ trafik hacim değeri,  $a$  bağımlı kullanan güzergahlardaki trafik hacim değerlerinin bir işlevi Denklem (4.7)'de verilmiştir.

(4.7)-(4.14) arasındaki bağıntılara göre, güzergah akımları ve seyahat süreleri içsel bağımlılık göstermektedir ve SKD akımlarının hesaplanabilmesi için bir kapalı-fonksiyon çözümü gerekmektedir. Bu durumda SKD ataması problemi, Denklem (4.10)'de görülen amaç fonksiyonunun minimizasyonu ile elde edilebilir:

$$\min F(f_p^w, f_p^{*w}) = \sum_{w \in W} \sum_{p \in P_w} (f_p^w - f_p^{*w})^2 + Ch(\mathbf{v}, \mathbf{c}) \quad (4.15)$$

Burada,  $f_p^w$  her bir B-V çifti arasındaki güzergah  $p$ 'ye atanan trafik hacmini,  $f_p^{*w}$  güzergah  $p$ 'deki hesaplanan trafik hacmini göstermektedir.  $\mathbf{v}$  bağ trafik hacimleri vektörü ve  $\mathbf{c}$  bağ kapasiteleri vektörü olmak üzere,  $Ch(\mathbf{v}, \mathbf{c})$  bağ trafik hacimlerinin kapasiteyi aşmayacak şekilde çözüm uzayında araştırılması için geliştirilen ceza fonksiyonudur. Bu fonksiyonun yapısı,

$$Ch(\mathbf{v}, \mathbf{c}) = \begin{cases} \sum_{a \in L} \theta(v_a - c_a) & \text{eğer } v_a > c_a \text{ ise} \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (4.16)$$

şeklindedir. Burada,  $\theta$  ölçek parametresidir. (4.15) nolu bağıntıdaki karesel ifade, sonucun negatif olmasını önlemektedir. Fonksiyonun global çözümü sonunda tüm güzergahlardaki atanan ve hesaplanan trafik hacimleri eşit olduğunda  $(f_p^w - f_p^{*w})$  SKD denge hacimleri elde edilmiş olmaktadır.

SKD probleminin amaç fonksiyonu olan (4.15) nolu bağıntının çalışma sayfası ve çözücü yardımıyla çözümü, DKD probleminin çözümüne benzer şekilde Şekil 4.2'de verilmiştir.



$$u_a = \begin{cases} 1 & \text{eğer } a \text{ bağındaki iyileştirme yapılacaksa} \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (4.17)$$

ARARULAT modelleri ile ayrık tasarım probleminin çözümünde sistem performansının iyileştirilmesi, yol ağındaki toplam seyahat süresinin en aza indirgenmesi olarak ifade edilebilir (Sheffi 1985). Bu durumda, yol ağı üzerindeki tüm bağılardaki denge trafik hacimlerinin bilinmesi durumunda sistem performansını en iyileyecek amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\min T(\mathbf{v}^*, \mathbf{t}) = \sum_{a \in L} v_a^* t_a(v_a^*) + Cb(\mathbf{b}) \quad (4.18)$$

Burada  $v_a^*$ ,  $a$  bağındaki SKD denge trafik hacmi ve  $\mathbf{v}^*$ , bağı SKD denge hacimleri vektörüdür.  $Cb(\mathbf{b})$ , ağıdaki en uygun şerit ilavesi/iyileştirme yapılandırmasının bu planlama için ayrılan yatırım bütçesinin aşılardan aranması için geliştirilen ceza fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$Cb(\mathbf{b}) = \begin{cases} \rho \cdot \left[ \left( \sum_{a \in L} b_a \right) - B \right] & \text{eğer } \sum_{a \in L} b_a > B \text{ ise} \\ 0 & \text{eğer } \sum_{a \in L} b_a \leq B \text{ ise} \end{cases} \quad (4.19)$$

$$b_a = \begin{cases} b_a & \text{eğer } u_a = 1 \text{ ise} \\ 0 & \text{eğer } u_a = 0 \text{ ise} \end{cases} \quad (4.20)$$

Burada  $\rho$ , uygulanacak ceza değeri için ölçek parametresidir. İyileştirilmesi planlanan bağılar için yapılacak toplam harcamanın bütçe kısıtını aşmaması durumunda ceza değeri sıfır olacaktır. Şerit ilavesi/iyileştirme problem formülasyonuna ilave edilen bu ceza yaklaşımı ile problem, Boyce (1984), Magnanti ve Wong (1984) ile Yang ve Bell (1998)'in çalışmalarında tanımladıkları kısıtlı ayrık optimizasyon probleminden, kısıtsız ayrık optimizasyon problemine dönüştürülmüştür.

#### 4.2.4. Şerit yönlendirme problemi

Bu problemde şerit ilavesi/iyileştirme probleminden farklı olarak, yönlendirme yapılacak herhangi bir bağın durumunu gösteren  $u_a$  değişkeni, ( $n_a$ ,  $a$  bağındaki şerit sayısı olmak üzere)  $[-n_a, n_a]$  aralığında bir tam sayı değerini almaktadır. Söz konusu durum,  $a$  bağına  $u_a$  adet şeridin yönlendirilmesi için karşı yöndeki  $a'$  bağından  $u_a$  adet şeridin çıkarılması anlamına gelmektedir ( $u_{a'} = -u_a$ ). Ayrıca, şerit yönlendirme uygulamaları için şerit ilavesindeki kadar büyük çaplı yatırımlara ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu nedenle, çalışma kapsamında şerit yönlendirme çalışmaları için gerekli yatırımlar göz önünde bulundurulmamıştır.

Şerit yönlendirme probleminin çözümü için yine sistem performans optimizasyonu, toplam seyahat süresi değerinin minimum edilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu durumda amaç fonksiyonu,

$$\min Y(\mathbf{v}^*, \mathbf{t}) = \sum_{a \in L} v_a^* t_a(v_a^*) \quad (4.21)$$

şeklindedir. Burada  $v_a^*$ ,  $a$  bağındaki SKD denge trafik hacmi ve  $\mathbf{v}^*$ , bağ SKD denge hacimleri vektörüdür.

#### 4.3. ARARULAT Modelleri Çözümü

AUAT problemlerinin çözümü için geliştirilen 5 farklı ARARULAT modelleri, bu modellerde kullanılan TA yaklaşımları ve her modelin geliştirilme amacı Tablo 4.1'de verilmiştir.

**Tablo 4.1** ARARULAT modelleri

Model no	Model adı	Geliştirilme amacı	TA yaklaşımı
1	ARARULAT-DKD-1	ARARULAT model doğrulaması	DKD
3	ARARULAT-DKD-2		DKD
2	ARARULAT-SKD-1	Şerit ilavesi probleminin çözümü	SKD (C-logit)
4	ARARULAT-İSİ		SKD (C-logit)
5	ARARULAT-SKD-2	Şerit yönlendirme probleminin çözümü	SKD (C-logit)

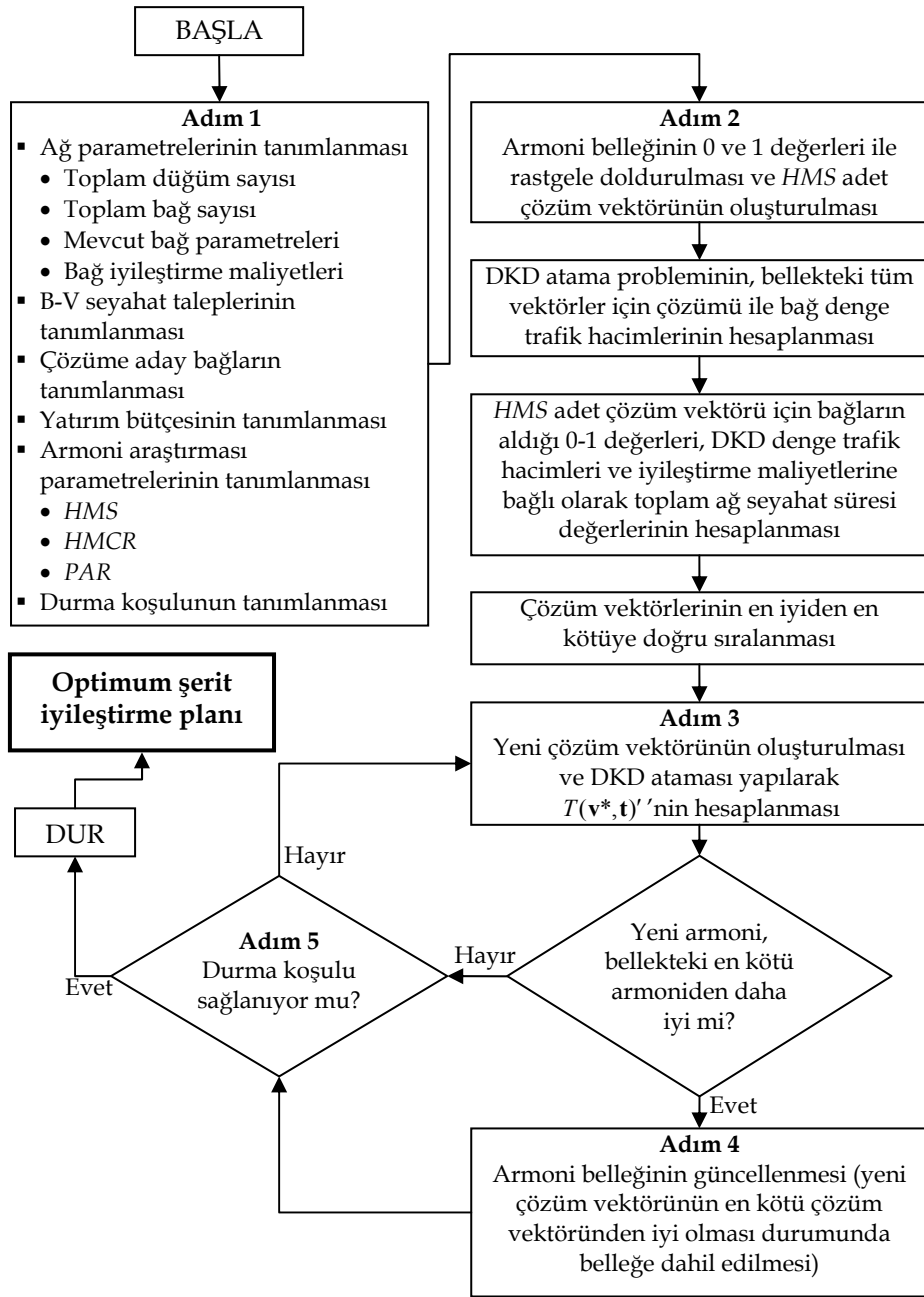
Tablo 4.1’de temel özellikleri özetlenen ARARULAT modellerinin yapıları ve tasarım problemlerine uygulanış biçimleri bu bölümde detaylı olarak açıklanmaktadır.

#### 4.3.1. ARARULAT-DKD-1 modeli

ARARULAT-DKD-1 modeli, AUAT probleminin çözümü için geliştirilen ARAR optimizasyon tekniği tabanlı model yaklaşımlarının doğrulanması amacıyla geliştirilmiştir. Bu kapsamda, LeBlanc (1975) ve Gao ve diğ. (2005) tarafından AUAT probleminin çözümü için geliştirilen iki farklı çözüm yönteminin performansları ile ARARULAT-DKD-1 model performansının karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Her iki çalışmada da aynı parametreler ile ele alınan sayısal uygulama, bu çalışma kapsamında geliştirilen ARARULAT-DKD-1 modeli ile çözülecektir. Doğrulama için kullanılması planlanan bu modelde DKD yaklaşımı kullanılmasının nedeni, bahsedilen iki çalışmada da aynı yaklaşımın kullanılmış olmasıdır.

ARARULAT-DKD-1 modellemesi, bir karayolu ağındaki toplam seyahat süresi değerinin mevcut bağlarda (şerit genişliklerinin artırılması, yüzey yenilemesi, vb.) iyileştirmelere gidilerek azaltılması prensibine dayanmaktadır. Bu amaçla, bağlarda yapılacak iyileştirmeleri temsil eden en uygun 0-1 ikili tamsayı değişken kombinasyonunun elde edilmesi gerekmektedir. Bütçe limitinin de göz önünde bulundurulduğu bu problemin, (4.18) nolu bağıntıda verilen amaç fonksiyonunun minimizasyonu ile çözülmektedir. 5 temel adımdan oluşan ARARULAT-DKD-1 modelinin akış diyagramı Şekil 4.3’de verilmiştir.

Şekil 4.3 incelendiğinde, birinci adımda ağın fiziksel özelliklerinin, B-V seyahat taleplerinin, şerit iyileştirme maliyetleri ve bütçe kısıtının, ARAR parametrelerinin ve durma koşulunun tanımlandığı görülmektedir. Problem parametrelerinin tanımlanmasından sonra, ikinci adımda farklı şerit iyileştirme planlarını temsil eden  $HMS$  adet çözüm vektörü rastgele  $u_a = [0,1]$  değerleri ile doldurulur ve ardından her bir çözüm vektörü için DKD ataması problemi çözülür. Bağ denge akımlarının ve seyahat sürelerinin elde edilmesinden sonra bellekteki her bir çözüm vektörüne karşılık gelen amaç fonksiyonu değeri Denklem (4.18)’de verildiği gibi hesaplanır ve sonuçlara bağlı olarak bellekteki çözüm vektörleri en iyi (en düşük) değerden en kötü (en yüksek) değere doğru sıralanır. Bu işlem sonucunda oluşturulan armoni belleği Denklem (4.22)’deki gibidir.



Şekil 4.3 ARARULAT-DKD-1 modeli

$$\begin{bmatrix} u_1^1 & u_2^1 & \cdots & u_{m-1}^1 & u_m^1 \\ u_1^2 & u_2^2 & \cdots & u_{m-1}^2 & u_m^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_1^{HMS-1} & u_2^{HMS-1} & \cdots & u_{m-1}^{HMS-1} & u_m^{HMS-1} \\ u_1^{HMS} & u_2^{HMS} & \cdots & u_{m-1}^{HMS} & u_m^{HMS} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} T(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^1 \\ T(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^2 \\ \vdots \\ T(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^{HMS-1} \\ T(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^{HMS} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$



Üçüncü adımda, ARAR tekniği ilkeleri doğrultusunda mevcut bellek yardımıyla yeni bir çözüm vektörü oluşturulur. Yeni şerit iyileştirme planını temsil eden bu vektör için yeniden DKD ataması yapılır ve ilgili amaç fonksiyonu değeri hesaplanır. Yeni yapılandırmayı ve toplam seyahat süresini içeren armoni vektörü aşağıda verilmiştir:

$$\mathbf{u}' = [u'_1 \quad u'_2 \quad \dots \quad u'_{m-1} \quad u'_m] \Rightarrow [T(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})'] \quad (4.23)$$

Oluşturulan yeni çözüm vektörü için hesaplanan amaç fonksiyon değeri, armoni belleğinde en altta bulunan çözüm vektörü için hesaplanmış olan amaç fonksiyon değeri ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucunda yeni çözüm vektörünün belleğe dahil edilip edilmeyeceği kararı, aşağıda verilen prosedür ile yapılır:

$$\mathbf{u}^{HMS} = \begin{cases} \mathbf{u}' & \text{eğer } T(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})' < T(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^{HMS} \\ \mathbf{u}^{HMS} & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (4.24)$$

Denklem (4.24)'den de görüldüğü üzere, yeni üretilen çözüm vektörüne ilişkin amaç fonksiyonu değerinin armoni belleğindeki en kötü değerden daha iyi olması durumunda, yeni vektör belleğe alınır ve en kötü vektör bellekten çıkarılır. Dördüncü adımda, armoni belleği güncellemesi gerçekleştirilir ve çözüm vektörleri en iyiden en kötüye doğru tekrar sıralanır. Beşinci adımda, önceden tanımlanmış olan durma koşulu kontrol edilerek problemin yeterli hassasiyette çözülüm çözülmediği kontrol edilir. Maksimum iterasyon sayısı, amaç fonksiyonun aldığı değer belli sayıda iterasyonlar boyunca değişmemesi, armoni belleğindeki amaç fonksiyon değerlerinin ortalamasının değişimi, bellekteki en kötü ve en iyi amaç fonksiyon değeri arasındaki fark, vb. gibi çeşitli durma koşulları çözümün yeterliliğinin kontrolü için tanımlanabilir. Tüm ARARULAT modelleri için ortak kullanılan durma koşulu, bellekteki en kötü ve en iyi amaç fonksiyon değeri arasındaki farkın önceden tanımlanan  $\lambda$  gibi sabit bir değer altında kalması olarak kabul edilmiştir. Bu ifade, aşağıdaki bağıntı ile tanımlanmıştır:

$$\text{Durma koşulu} \rightarrow \begin{cases} \text{Dur} & \text{eğer } T(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^{HMS} - T(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^1 \leq \lambda \\ \text{Adım 3'e dön} & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (4.25)$$

(4.25) nolu bağıntının sağlanması durumunda, armoni belleğindeki tüm çözüm vektörlerinin optimum/yakın-optimum değer etrafında toplandığı söylenebilir. Bunun

sonucunda elde edilen en iyi çözüm vektörü, yol ağı için gerçekleştirilecek şerit iyileştirme planını temsil etmektedir. Durma koşulunun sağlanmaması durumunda, Adım 3'e dönülerek toplam seyahat süresi değeri en iyileninceye kadar armoni araştırması prosedürü devam ettirilir.

ARARULAT model doğrulaması amacıyla geliştirilen ARARULAT-DKD-1 modelinin uygulaması ve elde edilen sonuçlar, diğer sayısal uygulamalarla birlikte 5. Bölüm'de verilmiştir.

#### 4.3.2. ARARULAT-SKD-1 modeli

Şerit ilavesi probleminin çözümü için geliştirilen ARARULAT-SKD-1 modeli, Denklem (4.18)'de tanımlanan problemin çözümü ile bir karayolu ağına şerit ilavelerini temsil eden 0-1 kombinasyonunu araştırmaktadır. Bu modelin ARARULAT-DKD-1 modelinden temel farkı, bağ denge trafik hacimlerinin SKD yaklaşımı ile hesaplanmasıdır. Ayrıca, şerit ilavelerinden kaynaklanan kapasite değişimlerinin hem SKD denge trafik hacimlerinin hem de ağ toplam seyahat süresinin hesaplanmasında dikkate alınması gerekmektedir. ARARULAT-SKD-1 modelinin akış şeması Şekil 4.4'de verilmiştir.

ARARULAT-SKD-1 modelinin çözüm aşamaları 5 adımda özetlenebilir:

**Adım 1:** Problem parametrelerinin tanımlanması,

- Ağ parametreleri (düğüm ve bağlar, bağ parametreleri, şerit ilave maliyetleri),
- B-V seyahat talepleri,
- Çözüme aday bağlar,
- Yatırım bütçesi,
- ARAR parametreleri (*HMS*, *HMCR*, *PAR*)
- Durma koşulu.

**Adım 2:** Armoni belleğinin rastgele  $u_a = [0,1]$  değişkenleri ile doldurularak başlangıç çözüm vektörlerinin oluşturulması, şerit ilave yapılandırılmalarını temsil eden bu vektörler için SKD ataması probleminin çözülerek bağ denge trafik hacimlerinin ve Denklem (4.18)'de verilen amaç fonksiyonu değerlerinin hesaplanması, çözüm vektörlerinin en iyiden en kötüye doğru sıralanması,

**Adım 3:** ARAR tekniği ilkeleri doğrultusunda mevcut bellek yardımıyla yeni bir çözüm vektörünün oluşturulması, bu vektör için SKD ataması probleminin çözümlenerek bağ denge trafik hacimlerinin ve Denklem (4.18)'de verilen amaç fonksiyonu değerinin hesaplanması, yeni vektörün bellekteki en kötü vektörle karşılaştırılması,

**Adım 4:** Armoni belleğinin güncellenmesi (yeni çözüm vektörünün en kötü çözüm vektöründen iyi olması durumunda belleğe dahil edilmesi),

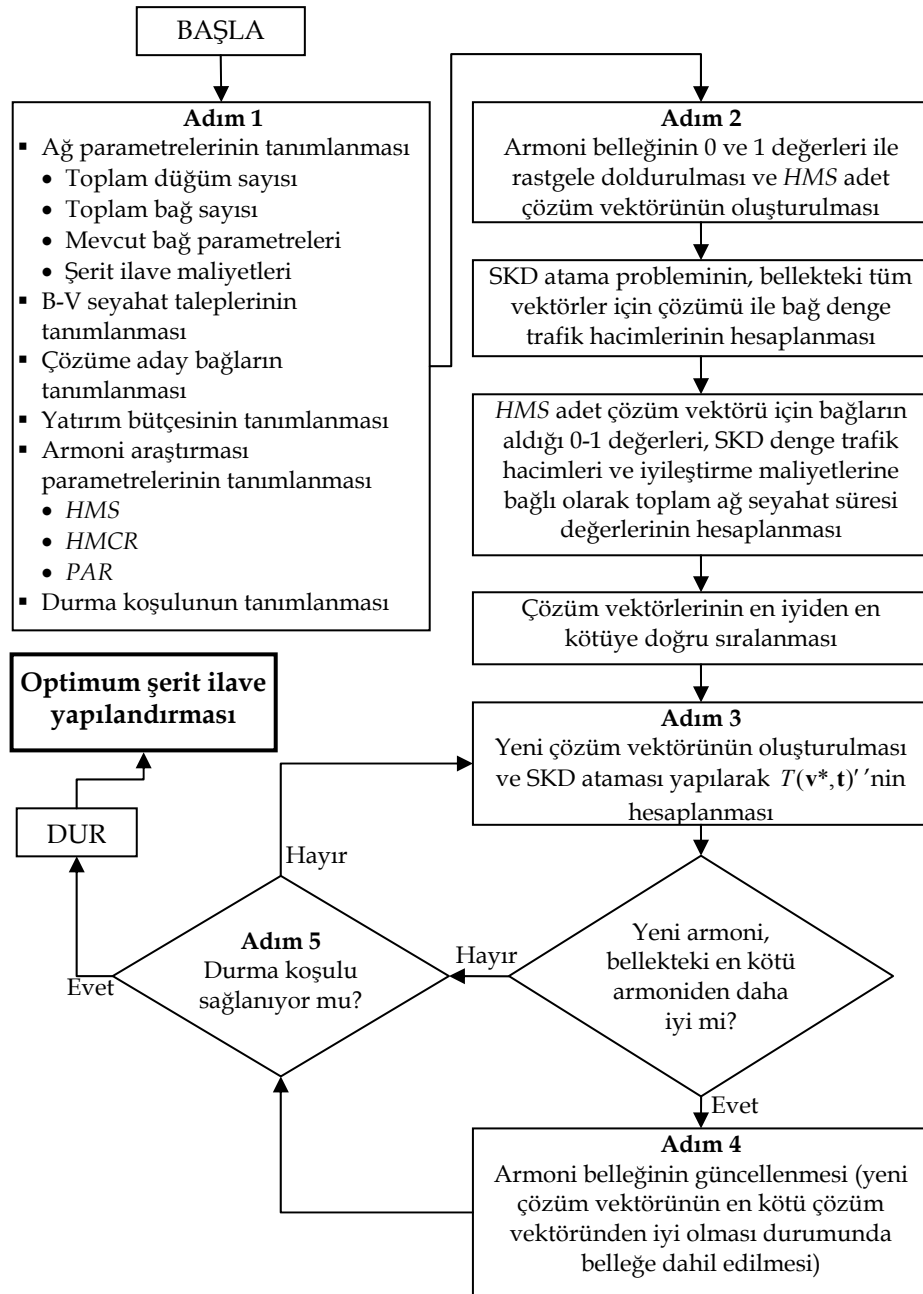
**Adım 5:** Durma koşulunun kontrolü. Koşul sağlanıyorsa algoritmanın durdurulması, aksi halde *Adım 3*'e dönülmesi.

Yukarıda verilen adımların uygulanması sonucunda (4.25) nolu bağıntıda verilen durma koşulu sağlandığında armoni belleğindeki en iyi çözüm vektörü, optimum şerit ilave yapılandırması olarak alınır.

#### **4.3.3. ARARULAT-DKD-2 modeli**

Şerit ilavesi probleminde sürücü karakteristiklerini DKD yaklaşımı ile temsil eden ARARULAT-DKD-2 modeli, ARARULAT-DKD-1 modeli ile aynı çözüm sistemi üzerine kurulmuştur. İki model arasında uygulamaya yönelik farklılıklar bulunmaktadır. Detayları 5. Bölüm'de verilecek olan bu farklılıklar, iki modelin kullandığı bağ seyahat süresi fonksiyonları ve uygulamaların gerçekleştirildiği test ağlarından kaynaklanmaktadır.

ARARULAT-DKD-2 modelinin geliştirilme amacı, ARARULAT-SKD-1 modeli ile elde edilen çözümler göz önünde bulundurularak, şerit ilavesi probleminin çözümünün determinist ve stokastik kullanıcı dengesi yaklaşımları altında nasıl farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktır.



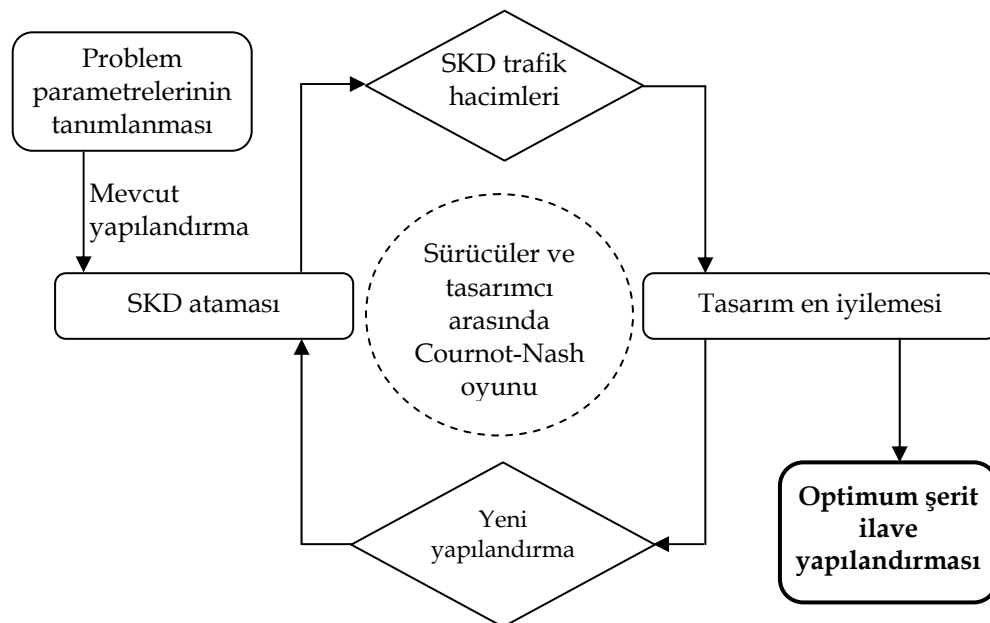
Şekil 4.4 Şerit ilavesi problemi için geliştirilen ARARULAT modeli

#### 4.3.4. ARARULAT-İSİ modeli

UAT probleminin çözümü için geliştirilen yaklaşımlardan biri olan ARARULAT-İSİ modelleme yaklaşımı, tasarım probleminin değişkenlerinin sabit tutularak atama probleminin çözülmesi ve sonrasında atama probleminin değişkenlerinin sabit tutularak tasarım probleminin çözülmesi prensibine dayanmaktadır. Bu iteratif tasarım-atama algoritması, trafik kontrol probleminin çözümü için Allsop (1974) ve Gartner (1976), diğer UAT problemlerinin çözümü için Steenbrink (1974) tarafından önerilmiştir. ARARULAT-İSİ modelinde bir problemin çözümü, önceki iterasyonda çözülen diğer

problemin çözümünü dikkate aldığından dolayı bu yaklaşım Cournot-Nash oyununa uymaktadır (Bell ve Iida, 1997). TA ve tasarım problemlerinin ardışık olarak çözüldüğü ARARULAT-İSİ modeli Şekil 4.5’de verilmiştir.

Şekil 4.5 incelendiğinde, atama ve tasarım çözümleri arasındaki ilişki görülmektedir. Karşılıklı olarak yapılan çözümler boyunca, oyunun bir tarafının çıktısı, diğeri için girdi verisi olarak kullanılmaktadır. ARARULAT-İSİ modeli, SKD prensibi açısından ARARULAT-SKD-1 modeli ile benzerlik göstermesine rağmen, iki modelin çözüm yaklaşımları birbirinden farklıdır.



Şekil 4.5 İki-seviyeli iteratif çözüm yaklaşımı

ARARULAT-İSİ modelinin çözüm adımları aşağıda verildiği gibidir:

**Adım 1:** Problem parametrelerinin tanımlanması,

- Ağ parametreleri (düğüm ve bağlar, bağ parametreleri, şerit ilave maliyetleri),
- B-V seyahat talepleri,
- Çözüme aday bağlar,
- Yatırım bütçesi,
- ARAR parametreleri (*HMS*, *HMCR*, *PAR*)
- Durma koşulu.

**Adım 2:** SKD ataması probleminin çözümü,

**Adım 3:** Adım 2’de hesaplanan SKD denge trafik hacimleri için en iyi şerit ilave yapılandırmasının ARAR optimizasyon tekniği ile belirlenmesi,

**Adım 4:** Durma koşulunun kontrolü. Koşul sağlanmışsa algoritmanın durdurulması. Aksi halde Adım 3'ye dönülerek, armoni belleğindeki en iyi çözüm vektörü için SKD ataması probleminin çözümü.

ARARULAT-İSİ modeli, ARARULAT-SKD-1 ve ARARULAT-DKD-2 modelleri ile birlikte AUAT kapsamında ele alınan şerit ilavesi probleminin çözümü amacıyla geliştirilmiştir. Her üç modelin de performansları, 5. Bölüm'de verilecek sayısal uygulamalar ile ortaya koyulacaktır. Bu sayede, şerit ilavesi problemi için hem deterministik/stokastik denge kabullerinin hem de farklı çözüm yaklaşımlarının nasıl sonuçlar verdiği ortaya koyulabilecektir.

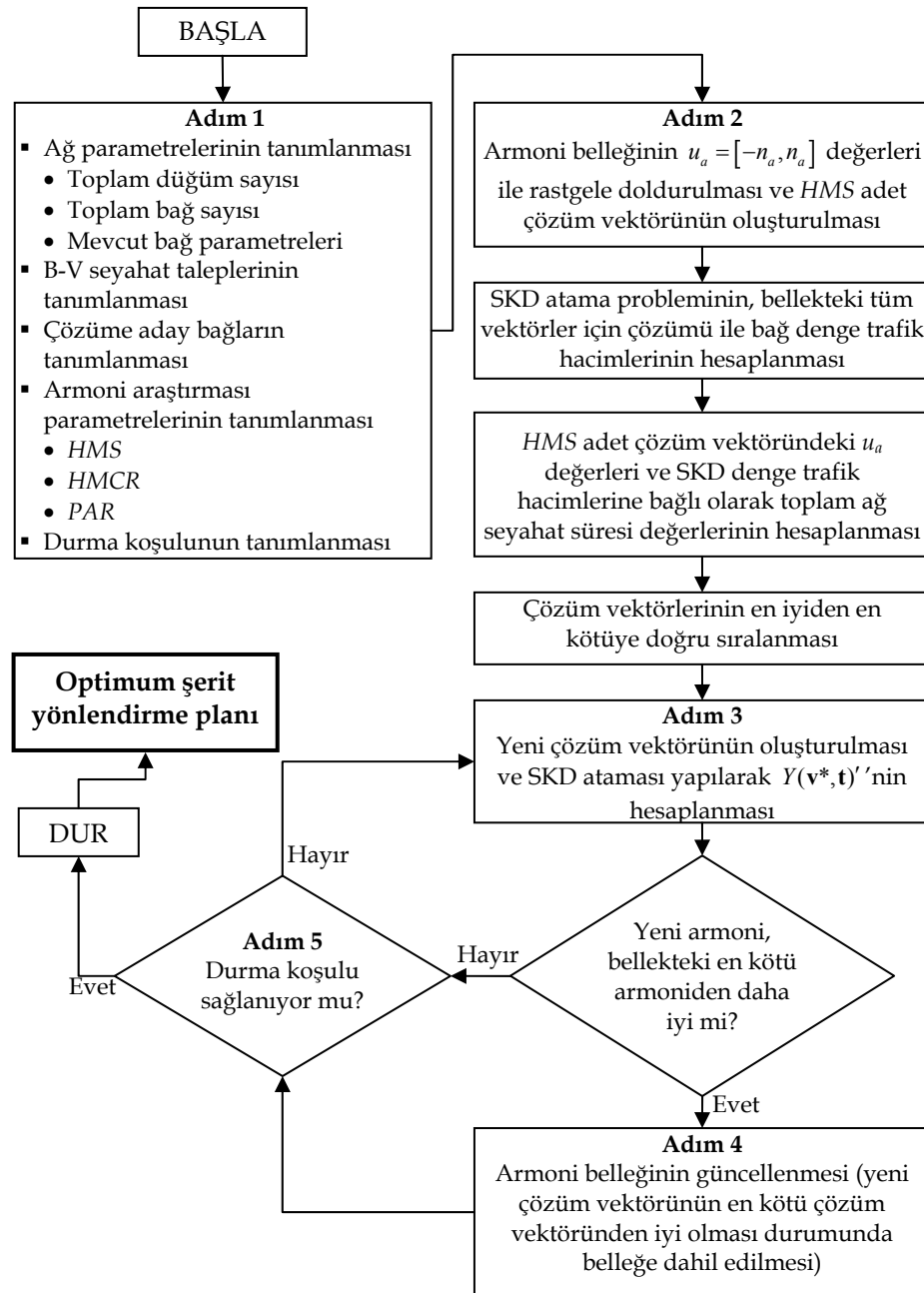
#### 4.3.5. ARARULAT-SKD-2 modeli

ARARULAT-SKD-2 modeli, yol ağındaki zirve saat trafik hacimlerinin yönlere göre asimetri göstermesinden kaynaklanan trafik sıkışıklıklarının (ve dolayısıyla ağdaki toplam seyahat süresinin), düşük trafik yoğunluğuna sahip bazı bağlardaki şeritlerin, trafiğin yoğun olduğu güzergahlara yönlendirilerek azaltılması amacıyla geliştirilmiştir. Şerit yönlendirme probleminin çözümü, Denklem (4.21)'de tanımlanan minimizasyon probleminin çözümü gerçekleştirilmektedir. ARARULAT-SKD-2 modelinin akış diyagramı Şekil 4.6'da verilmiştir.

Şekil 4.6 incelendiğinde, sırasıyla şerit ilavesi ve şerit yönlendirme problemleri için geliştirilen ARARULAT-SKD-1 ve ARARULAT-SKD-2 modellerinin üç temel farklılık dışında benzer prosedürlere sahip oldukları göze çarpmaktadır. Bu farklılıklar şu şekilde sıralanabilir:

- ARARULAT-SKD-2 modelinin çözümünde, yol ağındaki şerit yönlendirmeleri için yapılacak ekonomik yatırımın göz ardı edildiği varsayılmaktadır. Bundan dolayı, problem girdi parametrelerinin tanımlanmasında herhangi bir maliyet ve bütçe parametresi tanımlanmamaktadır. Bu nedenle, şerit yönlendirme probleminin çözümünde kullanılan amaç fonksiyonu herhangi bir ceza maliyeti içermemektedir.
- Çözüme aday bağların, yönlendirme sonrası durumlarını temsil eden  $u_a$  parametresi, herhangi bir  $a$  bağı için  $[-n_a, n_a]$  aralığında bir tamsayı değer almaktadır.

- Şerit yönlendirme problemindeki karar değişkeni sayısı, yönlendirmeye aday bağ sayısının yarısı kadardır ( $n/2$ ). Bunun nedeni, herhangi bir  $i$  düğümünden başlayıp  $j$  düğümüne bağlanan  $a$  bağı için  $u_a$  parametresine bir değer atandığında, ters yöndeki ( $j-i$ ) arasındaki  $a'$  bağı için  $u_{a'} = -u_a$  durumunun gerçekleşmesidir.



Şekil 4.6 Şerit yönlendirme problemi için geliştirilen ARARULAT modeli

ARARULAT-SKD-2 modellemesi, çözümde kullanılacak girdi verileri olan yol ağı karakteristikleri, armoni araştırması parametreleri ve durma koşulunun tanımlanması ile

başlamaktadır. Problem parametrelerinin tanımlanmasından sonra, farklı şerit yönlendirme planlarını temsil eden  $HMS$  adet çözüm vektörü, rastgele  $u_a = [-n_a, n_a]$  değerleri ile doldurulur ve ardından her bir çözüm vektörü için SKD ataması problemi çözülür. Bağ denge akımlarının ve seyahat sürelerinin hesaplanmasından sonra bellekteki her bir çözüm vektörüne karşılık gelen amaç fonksiyonu değeri Denklem (4.21)'de verildiği gibi hesaplanır ve sonuçlara bağlı olarak bellekteki çözüm vektörleri en iyi (en düşük) değerden en kötü (en yüksek) değere doğru sıralanır. Oluşturulan armoni belleği Denklem (4.26)'da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} u_1^1 & \cdots & u_{m/2}^1 & u_1^1 & \cdots & u_{(m/2)'}^1 \\ u_1^2 & \cdots & u_{m/2}^2 & u_1^2 & \cdots & u_{(m/2)'}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_1^{HMS-1} & \cdots & u_{m/2}^{HMS-1} & u_1^{HMS-1} & \cdots & u_{(m/2)'}^{HMS-1} \\ u_1^{HMS} & \cdots & u_{m/2}^{HMS} & u_1^{HMS} & \cdots & u_{(m/2)'}^{HMS} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} Y(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^1 \\ Y(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^2 \\ \vdots \\ Y(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^{HMS-1} \\ Y(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^{HMS} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Armoni belleğinin oluşturulmasından sonra, mevcut bellek yardımıyla yeni bir çözüm vektörü oluşturulur. Yeni yönlendirme planını temsil eden bu vektör için SKD ataması yapılır ve ilgili amaç fonksiyonu değeri hesaplanır. Yeni yapılandırmayı ve toplam seyahat süresini içeren armoni vektörü aşağıda verilmiştir:

$$\mathbf{u}' = [u_1' \quad \dots \quad u_{m/2}' \quad u_1' \quad \dots \quad u_{(m/2)'}'] \Rightarrow [Y(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})'] \quad (4.27)$$

Yeni çözüm vektörünün belleğe dahil edilip edilmeyeceği kararı, aşağıda verilen prosedür ile yapılmaktadır:

$$\mathbf{u}^{HMS} = \begin{cases} \mathbf{u}' & \text{eğer } Y(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})' < Y(\mathbf{v}^*, \mathbf{t})^{HMS} \\ \mathbf{u}^{HMS} & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (4.28)$$

Yeni çözüm vektörünün belleğe dahil edilmesinden sonra (4.25) nolu bağıntıda verilen durma koşulu kontrol edilir. Bu koşul sağlanıyorsa armoni belleğindeki en iyi çözüm vektörü optimum şerit ilave yapılandırması olarak alınır. Aksi halde, yeni bir çözüm vektörünün oluşturulduğu adıma dönülür.



#### 4.4. Sonuçlar

Bu bölümde, AUAT problemlerinin zm için geliştirilen ARARULAT modelleri ve bu modellerin zm süreçleri detaylarıyla verilmiştir. 3 farklı amaç doğrultusunda oluşturulan modellerden ARARULAT-DKD-1 modeli, ARARULAT yaklaşımının doğrulanması; ARARULAT-SKD-1, ARARULAT-DKD-2 ve ARARULAT-İSİ modelleri, şerit ilavesi probleminin zm ve ARARULAT-SKD-2 modeli, şerit yönlendirme probleminin zm için geliştirilmiştir. şerit ilavesi probleminin zm için 3 farklı model geliştirilmesinin nedeni, AUAT problemlerinin zmnn TA denge kabul ve üzüm yaklaşımından nasıl etkilendiğini ortaya koymaktır. Ayrıca, tüm ARARULAT modellerinde aynı şekilde ele alınan DKD ve SKD ataması problemlerinin formülasyonları ve bu problemler için geliştirilen zm yaklaşımları bu bölümde verilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan AUAT problemleri için geliştirilen modellerin doğrulanması ve performans testleri 5. Bölüm'e bırakılmıştır.

## 5. SAYISAL UYGULAMALAR

### 5.1. Giriş

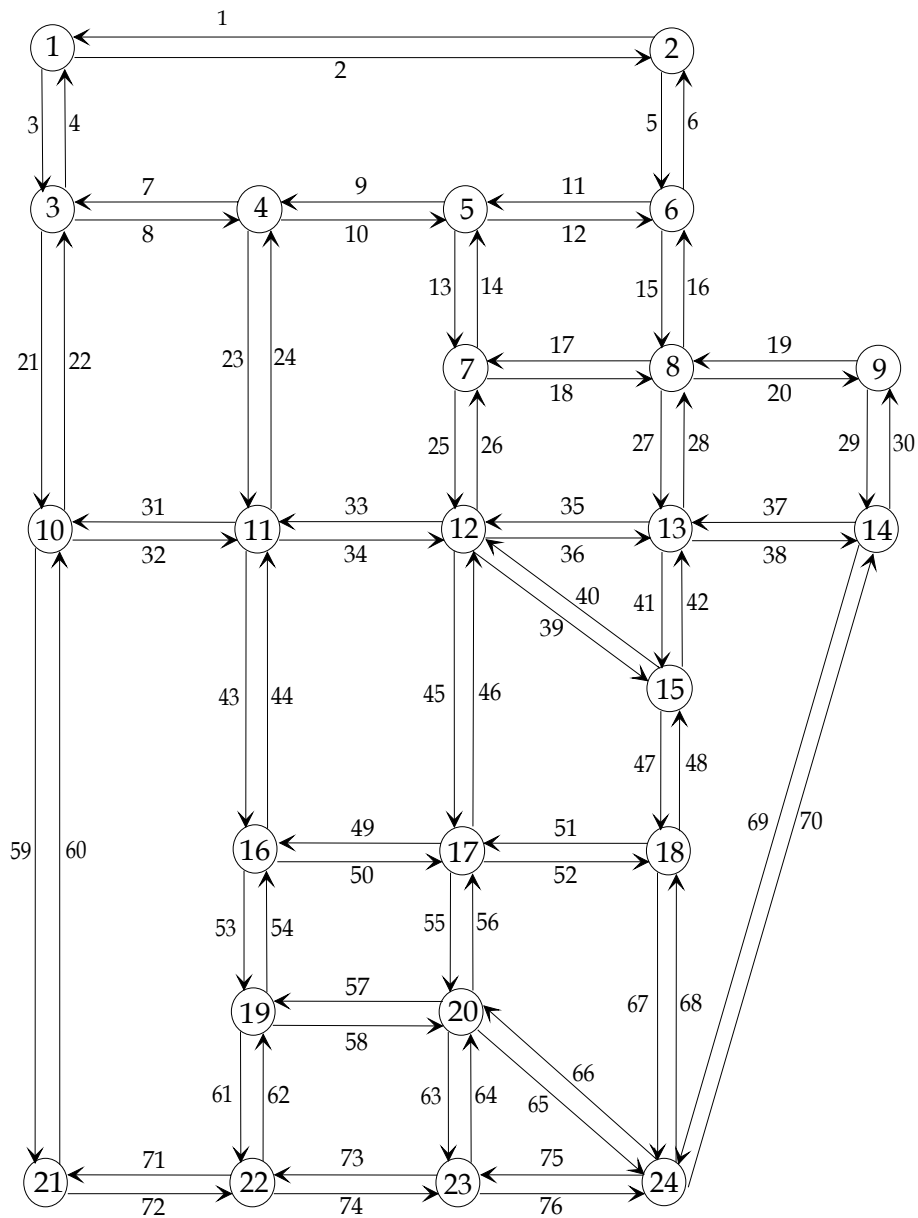
Bu bölümde, AUAT probleminin çözümü için geliştirilen ARARULAT modelleri ile ilgili sayısal uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle ARARULAT modellerinin doğrulamasını gerçekleştirmek amacıyla literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından çözümü gerçekleştirilmiş olan ve çözümü bilinen bir örnek problem ARARULAT-DKD-1 modeli ile çözülmüştür. Doğrulama için kullanılan problem, Sioux-Falls test ağında gerçekleştirilmesi planlanan bağ kapasite artırımlarını ele almaktadır. Model doğrulamasının gerçekleştirilmesinden sonra, tüm ARARULAT modellerinin uygulamalarının yapıldığı Nguyen-Dupuis test ağı tanıtılmıştır. Daha sonra, test ağı için şerit ilavesi problemi ARARULAT-SKD-1 modeli ile çözülmüş ve sonuçlar, model performansının ortaya koyulabilmesi için ARARULAT-DKD-2 ve ARARULAT-İSİ modellerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Diğer bir AUAT problemi olan şerit yönlendirme problemi, formülasyon ve gelişim aşamaları 4. Bölüm’de verilmiş olan ARARULAT-SKD-2 modeli ile 3 farklı senaryo altında çözülmüştür. Bu senaryolar, genel yönlendirme, kısmi yönlendirme ve ağ üzerinde trafiğe kapalı bağlar olması durumunda diğer bağlar için yönlendirme planlarını temsil etmektedir. Son olarak, şerit kapasiteleri ve ARAR parametrelerinin ARARULAT modellemesinin performansına olan etkisini araştırmak amacıyla ARARULAT-SKD-1 modeli için duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiş ve bulgular, sonuçlar bölümünde irdelenmiştir.

### 5.2. ARARULAT Modelinin Doğrulaması (ARARULAT-DKD-1)

Bu bölümde, Güney Dakota/ABD’de bulunan Sioux-Falls şehrinin orijinal yol ağını temsil eden test ağında gerçekleştirilmesi planlanan iyileştirme çalışmalarını ele alan ve literatürde, LeBlanc (1975) ve Gao ve diğ. (2005) tarafından çözümü gerçekleştirilen AUAT problemi ARARULAT-DKD-1 modeli ile çözülmüştür. Çalışma kapsamında

geliştirilen ARARULAT-SKD modellerinin doğrulaması, optimum çözümü bilinen bu problemde elde edilen sonuçlarla gerçekleştirilmiştir.

ARARULAT-DKD-1 modellemesinde ayrı tasarım gerçekleştirilecek olan Sioux-Falls test ağının fiziksel yapısı, B-V çiftleri arasındaki seyahat talepleri, ağın mevcut durumu için bağ parametreleri ve iyileştirmeye aday bağlar için yeni parametreler ile yatırım maliyetleri bu bölümde verilmiştir. 24 düğüm ve 76 bağdan oluşan test ağının yapısı, bağ yönlendirmeleri ile düğüm ve bağ numaraları Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 Sioux-Falls test ağı

Ele alınan problemde, Sioux-Falls karayolundaki trafik sıkışıklıklarının azaltılabilmesi için 5 proje yatırım planı altında yol ağında yer alan (15-16), (19-20), (25-26), (35-36) ve (71-72) nolu bağlarda kapasite artırımına gidilmesi planlanmaktadır. Bu iyileştirmeler, yüzey yenilemesi, şerit genişletmeleri ya da şerit ilaveleri olarak düşünülebilir. Ancak, ekonomik imkanlar çerçevesinde, yukarıda bahsedilen tüm bağların iyileştirilmesi mümkün değildir. Bu nedenle, çözüm sonrasında ağ genelindeki toplam seyahat süresi değerinin en aza indiren ve maliyeti, toplam yatırım bütçesi sınırını aşmayan optimum iyileştirme stratejisinin belirlenmesi gerekmektedir.

Analiz çıktılarının, literatürde yapılan iki çalışma ile aynı düzlemde değerlendirilebilmesi ve ARARULAT model doğrulamasının gerçekleştirilebilmesi açısından, trafik talebi ve ekonomik yatırım parametreleri için LeBlanc (1975) ve Gao ve diğ. (2005)'nin yaptıkları çalışmalarda kullanılan veriler dikkate alınmıştır. Tablo 5.1'de, B-V seyahat talepleri verilmiştir.

**Tablo 5.1** Düşümler arasındaki seyahat matrisi (1000 araç/gün)

Başlangıç düşümleri	Varış düşümleri																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	1	1	5	2	3	5	8	5	13	5	2	5	3	5	5	4	1	3	3	1	4	3	1
2	1	0	1	2	1	4	2	4	2	6	2	1	3	1	1	4	2	0	1	1	0	1	0	0
3	1	1	0	2	1	3	1	2	1	3	3	2	1	1	1	2	1	0	0	0	0	1	1	0
4	5	2	2	0	5	4	4	7	7	12	14	6	6	5	5	8	5	1	2	3	2	4	5	2
5	2	1	1	5	0	2	2	5	8	10	5	2	2	1	2	5	2	0	1	1	1	2	1	0
6	3	4	3	4	2	0	4	8	4	8	4	2	2	1	2	9	5	1	2	3	1	2	1	1
7	5	2	1	4	2	4	0	10	6	19	5	7	4	2	5	14	10	2	4	5	2	5	2	1
8	8	4	2	7	5	8	10	0	8	16	8	6	6	4	6	22	14	3	7	9	4	5	3	2
9	5	2	1	7	8	4	6	8	0	28	14	6	6	6	9	14	9	2	4	6	3	7	5	2
10	13	6	3	12	10	8	19	16	28	0	40	20	19	21	40	44	39	7	18	25	12	26	18	8
11	5	2	3	15	5	4	5	8	14	39	0	14	10	16	14	14	10	1	4	6	4	11	13	6
12	2	1	2	6	2	2	7	6	6	20	14	0	13	7	7	7	6	2	3	4	3	7	7	5
13	5	3	1	6	2	2	4	6	6	19	10	13	0	6	7	6	5	1	3	6	6	13	8	8
14	3	1	1	5	1	1	2	4	6	21	16	7	6	0	13	7	7	1	3	5	4	12	11	4
15	5	1	1	5	2	2	5	6	10	40	14	7	7	13	0	12	15	2	8	11	8	26	10	4
16	5	4	2	8	5	9	14	22	14	44	14	7	6	7	12	0	28	5	13	16	6	12	5	3
17	4	2	1	5	2	5	10	14	9	39	10	6	5	7	15	28	0	6	17	17	6	17	6	3
18	1	0	0	1	0	1	2	3	2	7	2	2	1	1	2	5	6	0	3	4	1	3	1	0
19	3	1	0	2	1	2	4	7	4	18	4	3	3	3	8	13	17	3	0	12	4	12	3	1
20	3	1	0	3	1	3	5	9	6	25	6	5	6	5	11	16	17	4	12	0	12	24	7	4
21	1	0	0	2	1	1	2	4	3	12	4	3	6	4	8	6	6	1	4	12	0	18	7	5
22	4	1	1	4	2	2	5	5	7	26	11	7	13	12	26	12	17	3	12	24	18	0	21	11
23	3	0	1	5	1	1	2	3	5	18	13	7	8	11	10	5	6	1	3	7	7	21	0	7
24	1	0	0	2	0	1	1	2	2	8	6	5	7	4	4	3	3	0	1	4	5	11	7	0

Gerçekleştirmeye aday 5 projenin bulunduğu yol ağı için, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’de sırasıyla mevcut bağ parametreleri ve iyileştirilmesi planlanan bağlar için yeni parametreler verilmektedir. Ayrıca Tablo 5.3’de, her projenin uygulanması durumunda yapılacak harcamalar da görülmektedir. Bu iyileştirme çalışması için 3,000,000 \$’lık yatırım bütçesi öngörülmektedir.

**Tablo 5.2** Çalışma ağına ait bağ parametreleri ( $a$  ve  $b$ )

Bağlar	Parametreler		Bağlar	Parametreler	
	$a$	$b$		$a$	$b$
	(100 saat)	$\left( \frac{100\text{saat}}{(1000 \text{ araç/gün})^4} \right)$		(100 saat)	$\left( \frac{100\text{saat}}{(1000 \text{ araç/gün})^4} \right)$
1, 2	6	$2.0 \times 10^{-06}$	39, 40	8	$1.9 \times 10^{-03}$
3, 4	4	$2.0 \times 10^{-06}$	41, 42	2	$4.0 \times 10^{-04}$
5, 6	5	$1.2 \times 10^{-03}$	43, 44	4	$1.1 \times 10^{-03}$
7, 8	4	$7.0 \times 10^{-06}$	45, 46	6	$2.7 \times 10^{-05}$
9, 10	2	$3.0 \times 10^{-06}$	47, 48	2	$5.5 \times 10^{-04}$
11, 12	4	$1.0 \times 10^{-03}$	49, 50	5	$1.1 \times 10^{-03}$
13, 14	5	$7.5 \times 10^{-05}$	51, 52	4	$1.0 \times 10^{-05}$
15, 16	2	$5.2 \times 10^{-04}$	53, 54	4	$1.0 \times 10^{-03}$
17, 18	10	$2.3 \times 10^{-03}$	55, 56	4	$5.3 \times 10^{-05}$
19, 20	3	$1.2 \times 10^{-04}$	57, 58	4	$9.6 \times 10^{-04}$
21, 22	4	$2.0 \times 10^{-06}$	59, 60	3	$1.0 \times 10^{-06}$
23, 24	6	$1.6 \times 10^{-03}$	61, 62	2	$4.5 \times 10^{-04}$
25, 26	3	$1.2 \times 10^{-05}$	63, 64	2	$4.0 \times 10^{-04}$
27, 28	5	$1.2 \times 10^{-03}$	65, 66	5	$1.1 \times 10^{-03}$
29, 30	2	$1.0 \times 10^{-06}$	67, 68	4	$9.6 \times 10^{-04}$
31, 32	6	$1.6 \times 10^{-03}$	69, 70	4	$2.0 \times 10^{-06}$
33, 34	5	$7.5 \times 10^{-05}$	71, 72	4	$8.9 \times 10^{-04}$
35, 36	5	$1.1 \times 10^{-03}$	73, 74	3	$7.9 \times 10^{-04}$
37, 38	3	$3.0 \times 10^{-06}$	75, 76	6	$1.4 \times 10^{-03}$

**Tablo 5.3** Yeni bağ parametreleri ( $a^*$ ,  $b^*$ ) ve proje maliyetleri

Proje No.	Maliyetler (\$)	Bağlar	Yeni Parametreler	
			$a^*$	$b^*$
			(100 saat)	$\left( \frac{100\text{saat}}{(1000 \text{ araç/gün})^4} \right)$
1	650,000	15, 16	1.3	$1.6 \times 10^{-04}$
2	625,000	25, 26	1.6	$3.7 \times 10^{-06}$
3	850,000	71, 72	2.2	$2.7 \times 10^{-05}$
4	1,200,000	35, 36	2.7	$3.2 \times 10^{-04}$
5	1,000,000	19, 20	1.5	$3.6 \times 10^{-05}$

Göz önünde bulundurulmuş projeler için 5 adet 0-1 değişkeni ( $u_i$ ), 76 sürekli bağ akım değişkeni ( $x_i$ ),  $76 \times 24 = 1824$  bağlardan düğümlere olan sürekli akım değişken ( $x_i^s$ ) ve

$2^5=32$  farklı yatırım stratejisi söz konusudur. Ayrıca atama problemi, 76 tanımsal,  $76 \times 24=1824$  pozitiflik ve 552 akım korunum kısıtı içermektedir. Her proje, varolan iki yönlü bir bağ çiftinin iyileştirilmesini kapsamakta ve bu sayede ilgili bağların iyileştirme öncesine göre daha fazla trafik hacmi taşınması planlanmaktadır. Bu problemin çözümünde kullanılan bağ seyahat süresi fonksiyonu ve parametreleri aşağıdaki gibidir:

$$t_a(v_a) = r_a + z_a \cdot v_a^4 \quad (5.1)$$

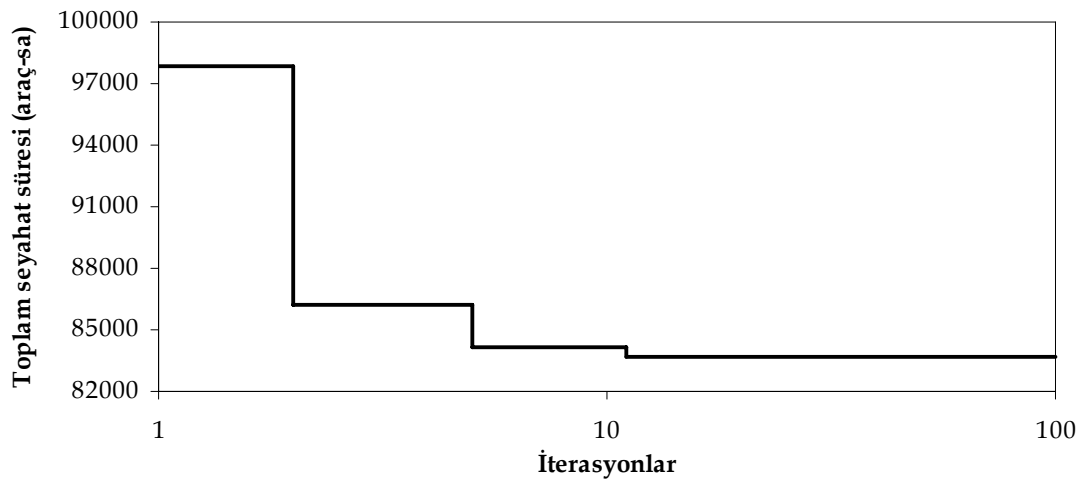
$v_a$ :  $a$  bağındaki trafik hacmi (1000 araç/gün)

$t_a(v_a)$ :  $a$  bağındaki ortalama seyahat süresi (saat)

$r_a$ : Bağ parametresi (100 saat)

$z_a$ : Bağ parametresi  $\left( \frac{1000 \text{ saat}}{(1000 \text{ araç/gün})^4} \right)$

Sioux-Falls ağına ilişkin problemin çözümünde ARAR parametreleri olan *HMS*, *HMCR* ve *PAR* sırasıyla 100, 0.95 ve 0.45 olarak alınmıştır. Durma kriteri olan  $\lambda \leq 500$  olarak kabul edilmiştir. ARARULAT-DKD-1 modeli ile yapılan analiz sonucunda elde edilen yakınsama grafiği logaritmik  $x$  ekseninde Şekil 5.2’de verilmiştir.



**Şekil 5.2** ARARULAT-DKD-1 modeli çözüm sürecinin yakınsama grafiği

Şekil 5.2 incelendiğinde, 11 iterasyon sonunda yakınsamanın sağlandığı ve en iyi çözümün elde edildiği görülmektedir. Başlangıçta 98,000 araç-sa mertebesinde olan ağ

toplam seyahat süresi değeri çözüm sonunda 83,700 araç-sa olarak hesaplanmıştır. Ağ için optimum iyileştirme planı, 1, 3 ve 4 nolu projelerin gerçekleştirilmesi gerektiğini temsil eden (1, 0, 1, 1, 0) çözüm vektörüdür. Bu sonuç, 2,675,000 \$'lık yatırım bedeli ile optimum yatırım stratejisinin gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.

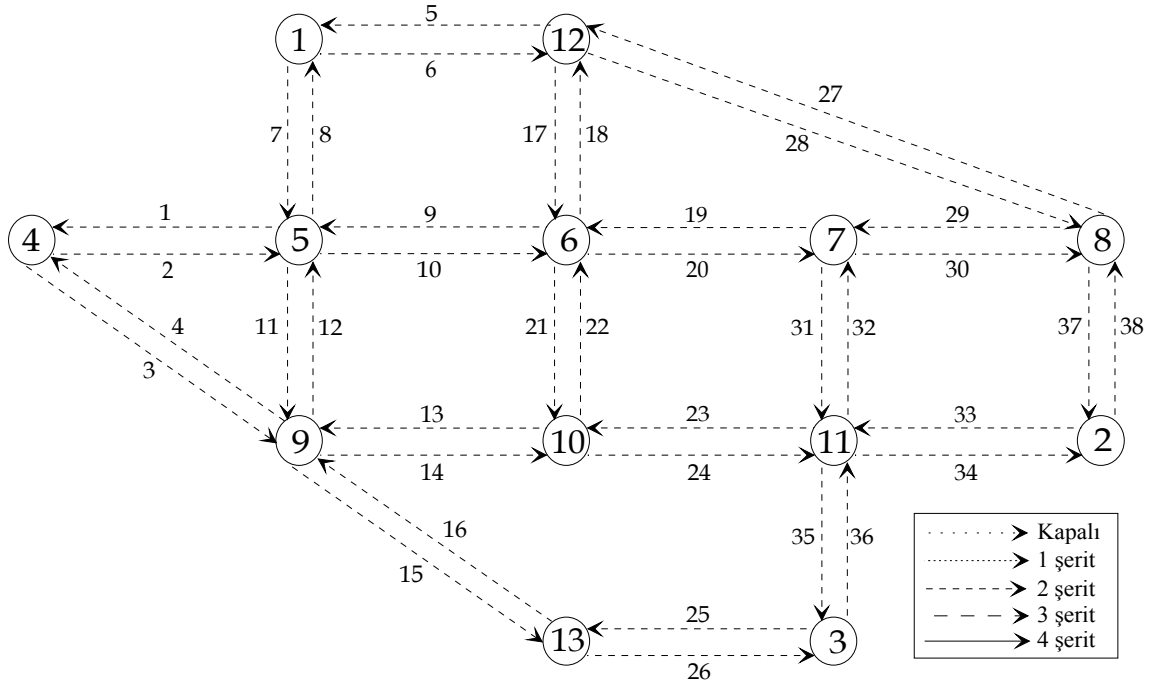
Elde edilen optimum yatırım stratejisi, 32 alternatif içindeki global optimum değerdir ve Le Blanc (1975) ile Gao ve diğ. (2005)'nin sonuçlarıyla aynıdır. Bununla birlikte, ARAR tekniğine dayalı ARARULAT-DKD-1 modelinin kullanılması ile dezavantajları 2. Bölüm'de belirtilen dal-sınır yaklaşımının ve ileri düzey matematiksel formülasyon ve hesap kapasitesi gerektiren destek fonksiyonu yaklaşımları ile aynı sonuçların elde edilebileceği görülmektedir.

### **5.3. ARARULAT Modellerine İlişkin Sayısal Uygulamalar**

Geliştirilen SKD tabanlı ARARULAT çözüm modellerinin, sayısal veriler ışığında uygulamaları literatürde UAT uygulamalarında sıklıkla kullanılan Nguyen-Dupuis test ağında gerçekleştirilmiştir. Şerit ilavesi probleminin çözümü için geliştirilen ARARULAT-SKD-1 modelinden elde edilen sonuçlar, stokastik/deterministik denge yaklaşımları arasındaki farkı ortaya koymak amacıyla ARARULAT-DKD-2, çözüm yaklaşımının etkinliğini ortaya koymak amacıyla da ARARULAT-İSİ modellerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, şerit yönlendirme problemi için geliştirilen ARARULAT-SKD-2 modelinin uygulamaları 3 farklı senaryo altında gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolar sırasıyla, genel yönlendirme, kısmi yönlendirme ve belli güzergahların trafiğe kapalı olması durumunda yapılacak AUAT tasarımlarını içermektedir. Son olarak, ARAR parametrelerinin ve şerit kapasitesi değerlerinin çözüm ve sonuçlar üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, ARARULAT-SKD-1 modeli tabanlı duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

#### **5.3.1. Nguyen-Dupuis test ağı**

Nguyen ve Dupuis (1984) tarafından geliştirilen test ağının fiziksel yapısı Şekil 5.3'de verilmiştir.



**Şekil 5.3** Nguyen-Dupuis test ağı

13 düğüm ve 38 bağdan oluşan test ağında, 1, 2, 3, 4, 12 ve 13 numaralı düğümlerin oluşturduğu 18 B-V çifti bulunduğu ve tüm bağların iki şerit içerdiği kabul edilmiştir.

Şehir içi karayolu ağlarında fiziksel şartlar ya da kullanım amacına göre değişkenlik gösteren şerit genişlikleri ve kapasiteleri göz önünde bulundurularak, ARARULAT-SKD-1 modeline ilişkin analizler 3 farklı şerit genişliği değeri için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tüm analizlerde ARAR parametreleri  $HMS=100$ ,  $HMCR=0.95$ ,  $PAR=0.45$  olarak alınmış ve durma koşulu  $\lambda \leq 0.1$  olarak kabul edilmiştir. Tablo 5.4'de çalışma ağına ait bağ ve şerit karakteristikleri verilmektedir.

### 5.3.2. ARARULAT-SKD-1 modeli uygulamaları

ARARULAT-SKD-1 modeli ile şerit ilavesi probleminin çözümünde, çalışma ağındaki tüm bağların yeni şerit ilavesine uygun olduğu kabul edilmiştir. Herhangi bir bağ için bu işlemin gerçekleştirilmesi durumunda yeni kapasitenin, bağa ilave edilen şerit genişliğine bağlı olarak artış göstermesi beklenmektedir. Ek şeritler için yatırım maliyeti, ilgili bağın serbest akım seyahat süresinin bir işlevi olarak öngörülmüş ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$b_a(t_a^0) = u_a \cdot t_a^0 \quad (5.2)$$



**Tablo 5.4** Nguyen-Dupuis test ağına ilişkin sabit veriler

Bağ no	$t^0$ (s)	$k_a^{3.05}$ (taşıt/sa)	$k_a^{3.35}$ (taşıt/sa)	$k_a^{3.65}$ (taşıt/sa)	Bağ no	$t^0$ (s)	$k_a^{3.05}$ (taşıt/sa)	$k_a^{3.35}$ (taşıt/sa)	$k_a^{3.65}$ (taşıt/sa)
1	9				20	5			
2	9				21	13			
3	12				22	13			
4	12				23	6			
5	9				24	6			
6	9				25	11			
7	7				26	11			
8	7				27	14			
9	3				28	14			
10	3	450	555	650	29	5	450	555	650
11	9				30	5			
12	9				31	9			
13	10				32	9			
14	10				33	9			
15	9				34	9			
16	9				35	8			
17	7				36	8			
18	7				37	9			
19	5				38	9			

Tablo 5.4’de  $t^0$ , saniye cinsinden bağ serbest akım seyahat süresini,  $k$ ,  $a \in L$  şeridinin saatlik kapasitesini ve  $k_a^{3.05}$ ,  $k_a^{3.35}$ ,  $k_a^{3.65}$  sırasıyla 3.05 m, 3.35 m, ve 3.65 m şerit genişlikleri için saatlik şerit kapasitelerini ifade etmektedir (The Highways Agency 1999).

Denklem (5.2)’de  $t_a^0$ ,  $a$  bağına ilişkin serbest akım seyahat süresini (s),  $u_a$ , bağına yeni şerit ilave yapılıp yapılmayacağını gösteren ikili değişkeni,  $b_a(t_a^0)$  ise bağına eklenecek yeni bir şerit için gerekli yatırım maliyetini (birim) temsil etmektedir. Bu bağıntı göz önüne alındığında, çalışma ağındaki tüm bağlara yeni birer şerit eklenmesi durumunda gerekli yatırım bedeli  $\sum_a b_a(t_a^0) = 328$  birim olmasına karşın, toplam proje yatırım bütçesi  $B=150$  birim olarak kabul edilmiştir. Bu durumda, yatırım kararlarına bağlı olarak tüm bağların iyileştirmeye aday olduğu düşünüldüğünde  $2^{19} = 2.75 \cdot 10^{11}$  alternatif çözüm içeren çözüm uzayı içinden en iyi yatırım planının seçilmesi gerekmektedir.

SKD ataması probleminin çözümü için C-Logit model parametreleri olan  $\theta_0$  ve  $\theta_1$  sırasıyla 0.05 ve 0.5 olarak alınmış ve Bölüm 4’te açıklanan alt modül kullanılmıştır

(Yin ve Madanat 2005). Ayrıca, bağ seyahat sürelerinin hesaplanması için seyahat süresi ile hacim/kapasite oranı arasında doğrusal ötesi bir ilişki olduğu kabulünü esas alan Bureau of Public Roads (BPR) seyahat süresi fonksiyonu kullanılmıştır (BPR, 1964) ve Denklem (5.3)'de verilmiştir.

$$t_a(v_a) = t_a^0 \left[ 1 + 0.15 \left( \frac{v_a}{c_a} \right)^4 \right] \quad (5.3)$$

Denklem (5.3)'de  $t_a(v_a)$ ,  $a$  bağındaki saatlik trafik hacmine bağlı seyahat süresini,  $v_a$ ,  $a$  bağındaki saatlik trafik hacmini (taşıt/sa),  $c_a$  ise  $a$  bağının saatlik kapasitesini (taşıt/sa) temsil etmektedir.

Tablo 5.5'de, çalışma ağındaki B-V çiftlerine ilişkin saatlik seyahat talepleri verilmektedir.

**Tablo 5.5** Şerit ilavesi problemi için kullanılan B-V seyahat talepleri (taşıt/sa)

Başlangıç/Varış	1	2	3	4	12	13	Başlangıç Toplamı
1	---	350	450	0	0	530	1330
2	350	---	0	560	520	0	1430
3	410	0	---	420	430	0	1260
4	0	380	400	---	0	440	1220
12	0	420	400	0	---	500	1320
13	390	0	0	380	400	---	1170
<b>Varış Toplamı</b>	1150	1150	1250	1360	1350	1470	7730

#### **450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 çözümü**

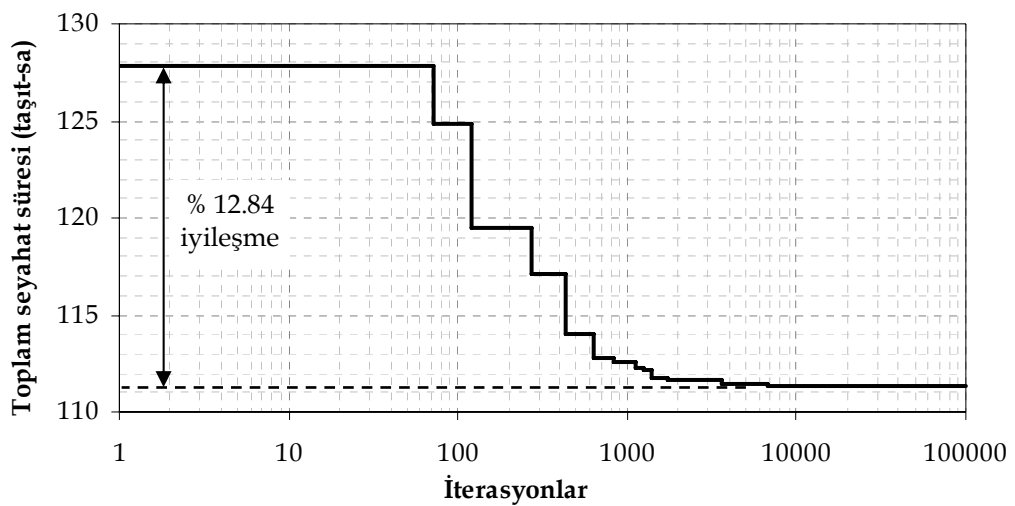
Şerit ilavesi probleminin çözümü için geliştirilen ARARULAT-SKD-1 yönteminin etkinliğini görebilmek amacıyla öncelikle ağın mevcut hali için başlangıç çözümü yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6 incelendiğinde, çalışma ağını oluşturan 38 bağdan 31'inde saatlik trafik hacimlerinin kapasite üzerinde olduğu, dolayısıyla bu bağlarda kapasite kullanım oranının % 100'ün üzerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, ağdaki ortalama kapasite kullanım oranı % 120 ve toplam seyahat süresi yaklaşık 128 taşıt-saat olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.4’de problemin çözümü sonucunda elde edilen yakınsama grafiği logaritmik ölçekte verilmektedir.

**Tablo 5.6** 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çalışma ağındaki mevcut saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları

Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)	Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)
1	984	900	109	20	1278	900	142
2	1089	900	121	21	880	900	98
3	851	900	95	22	846	900	94
4	887	900	99	23	1158	900	129
5	1067	900	119	24	1204	900	134
6	1010	900	112	25	728	900	81
7	1251	900	139	26	1040	900	116
8	1128	900	125	27	864	900	96
9	1430	900	159	28	879	900	98
10	1483	900	165	29	999	900	111
11	1077	900	120	30	1083	900	120
12	1006	900	112	31	1058	900	118
13	999	900	111	32	1019	900	113
14	1080	900	120	33	901	900	100
15	1433	900	159	34	1082	900	120
16	1046	900	116	35	1458	900	162
17	1226	900	136	36	1284	900	143
18	1183	900	131	37	907	900	101
19	1233	900	137	38	1006	900	112
<b>Ortalama kapasite kullanım oranı (%)</b>							120.34
<b>Ağıdaki toplam seyahat süresi (taşıt-sa)</b>							127.80



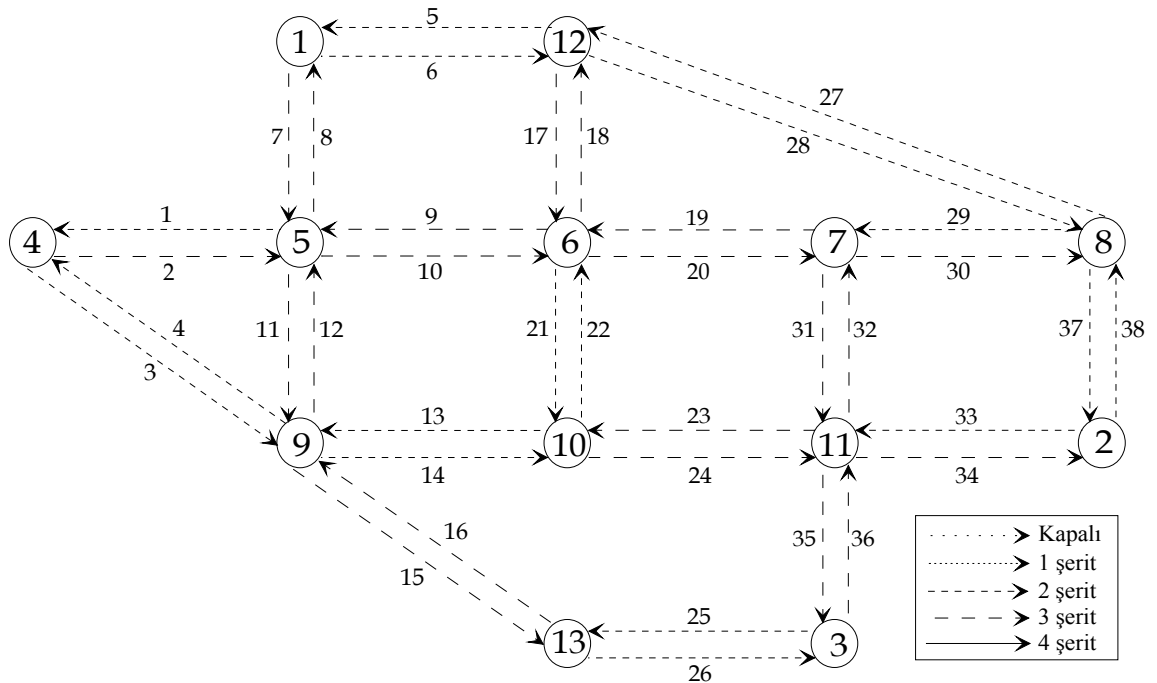
**Şekil 5.4** ARARULAT-SKD-1 modelinin 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için yakınsama grafiği

Şekil 5.4 incelendiğinde, yaklaşık 7000 iterasyon sonunda durma kriterinin sağlandığı ve ağdaki toplam seyahat süresinde başlangıç durumuna göre yaklaşık % 13'lük bir iyileşme gerçekleştiği görülmektedir. Tablo 5.7'de 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 model çözümü sonucunda elde edilen yeni yapılandırma ve gerekli yatırım bedeli verilmektedir. Tabloda, şerit ilavesi yapılacak bağlar  $u_a = 1$ , mevcut halde kalacak bağlar  $u_a = 0$  değerini almaktadır.

**Tablo 5.7** ARARULAT-SKD-1 modeli ile 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için elde edilen yeni yapılandırma

<b>Bağ no</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$u_a$	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
$b_a$	0	9	0	0	0	0	7	7	3	3	9	9	0	0	9	9	7	7	5
<b>Bağ no</b>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
$u_a$	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0
$b_a$	5	0	0	6	6	0	0	0	0	0	5	9	9	0	9	8	8	0	0
<b>Gerekli yatırım bedeli (birim)</b>																			
149																			

Elde edilen yeni yapılandırma için çalışma ağının yeni görünümü Şekil 5.5'de, yeni bağ trafik hacimleri, kapasiteleri ve kapasite kullanım oranları Tablo 5.8'de verilmiştir.



**Şekil 5.5** 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 modellemesi sonucunda çalışma ağının yeni yapısı

**Tablo 5.8** 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 modellemesi sonucunda çalışma ağındaki saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları

Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)	Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)
1	993	900	110	20	1390	1350	103
2	1153	1350	85	21	857	900	95
3	850	900	94	22	861	900	96
4	830	900	92	23	1184	1350	88
5	1065	900	118	24	1278	1350	95
6	1021	900	113	25	770	900	86
7	1322	1350	98	26	1033	900	115
8	1187	1350	88	27	824	900	92
9	1539	1350	114	28	819	900	91
10	1637	1350	121	29	1027	900	114
11	1125	1350	83	30	1115	1350	83
12	1050	1350	78	31	1120	1350	83
13	1011	900	112	32	1117	1350	83
14	1101	900	122	33	943	900	105
15	1434	1350	106	34	1140	1350	84
16	997	1350	74	35	1524	1350	113
17	1272	1350	94	36	1418	1350	105
18	1263	1350	94	37	893	900	99
19	1305	1350	97	38	976	900	108
<b>Ortalama kapasite kullanım oranı (%)</b>							98.18
<b>Ağıdaki toplam seyahat süresi (taşıt-sa)</b>							111.39

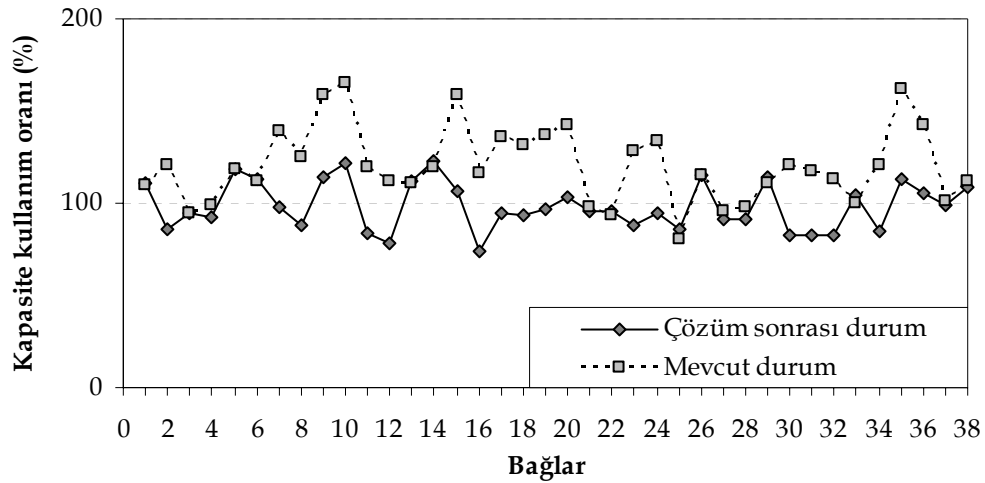
Tablo 5.8 incelendiğinde, şerit ilave probleminin 450 taşıt/şerit-sa'lik şerit kapasitesine göre çözümü sonunda elde edilen yeni yapılandırmaya göre 15 bağda kapasite kullanım oranının % 100'ün üzerinde olacağı görülmektedir. Ağın mevcut durumu ve yeni yapılandırma durumu için ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 5.9'da verilmiştir.

**Tablo 5.9** 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çalışma ağında hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri

	Mevcut durum	Yeni yapılandırma	İyileşme (%)
<b>Ortalama Kapasite kullanım oranı (%)</b>	120.34	98.18	18.41
<b>Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)</b>	127.80	111.39	12.84

Tablo 5.9 incelendiğinde, yeni yapılandırma sonrasında ağıdaki ortalama kapasite kullanım oranının yaklaşık % 98'a, toplam seyahat süresinin ise yaklaşık 111 taşıt-sa değerine düştüğü görülmektedir. 149 birimlik toplam yatırım bedeli ile toplam seyahat süresinde yaklaşık % 13'lük, ortalama kapasite kullanım oranında ise yaklaşık %18'lik iyileşmeler elde edilmiştir.

Şekil 5.6'da çalışma ağını oluşturan bağlardaki mevcut ve yeni yapılandırma sonrasındaki kapasite kullanım oranları görülmektedir. Geliştirilen çözüm yönteminin uygulanmasından sonra ağ genelindeki birçok bağdaki trafik hacmi, bağ kapasite değerinin altında kalacağı için ağ üzerindeki hizmet düzeyinin, sürücüler için daha iyi hale geldiği düşünülebilir.

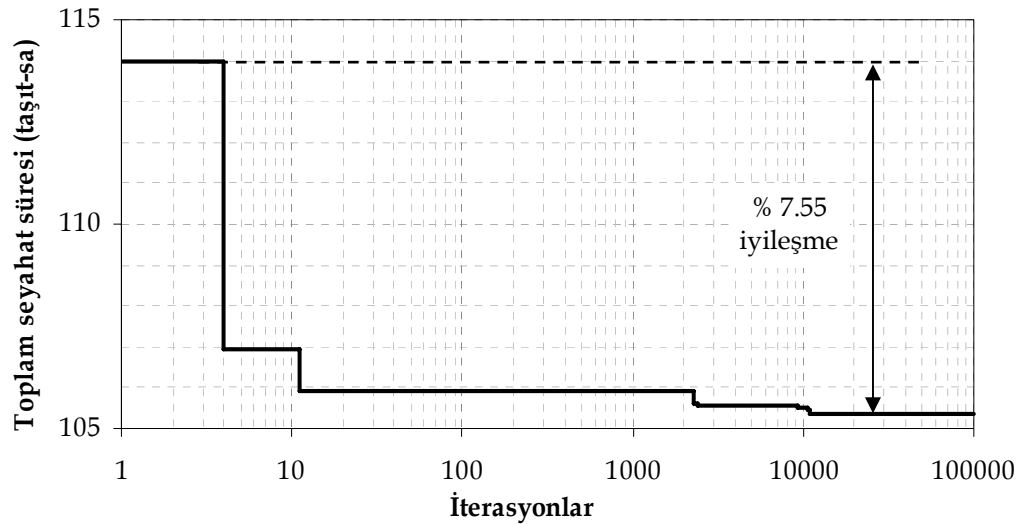


Şekil 5.6 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları

#### 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 çözümü

Şerit ilavesi probleminin 555 taşıt/şerit-sa'lık kapasite değeri için çözümü sonucunda elde edilen yakınsama grafiği Şekil 5.7'de logaritmik ölçekte verilmiştir.

Şekil 5.7 incelendiğinde, durma koşulunun yaklaşık 10,000 iterasyon sonunda sağlanarak toplam seyahat süresinde yaklaşık %8'lik iyileşme sağlayan yeni yapılandırmanın elde edildiği görülmektedir. Tablo 5.10'da, ağın yeni yapılandırması ve gerekli yatırım bedeli, Tablo 5.11'de ise ağ üzerindeki trafik talebine ilişkin mevcut ve yeni değerler karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



**Şekil 5.7** ARARULAT-SKD-1 modelinin 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için yakınsama grafiği

**Tablo 5.10** ARARULAT-SKD-1 modeli ile 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için elde edilen yeni yapılandırma

<b>Bağ no</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$u_a$	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1
$b_a$	0	9	0	0	9	0	7	7	3	3	9	0	0	10	9	0	7	7	5
<b>Bağ no</b>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
$u_a$	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0
$b_a$	5	0	0	6	6	0	0	0	0	0	5	9	9	0	9	8	8	0	0
<b>Gerekli yatırım bedeli (birim)</b>																			
150																			

Tablo 5.10 incelendiğinde, elde edilen yeni yapılandırmanın gerçekleştirilebilmesi için 150 birimlik yatırıma ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu değer de, problemin çözümü için gözönüne alınan toplam yatırım bütçesine eşittir.

Tablo 5.11 incelendiğinde, çözüm öncesinde kapasite üstü trafik hacimlerinin gözlendiği bağların tamamına yeni şerit ilavelerinin yapıldığı ve kapasitelerinin %50 oranında artırıldığı görülmektedir. Ayrıca, çözüm sonrasında ağdaki hiçbir bağda kapasite kullanım oranının %100'ün üzerinde olmadığı görülmektedir. 555 taşıt/şerit-sa'lık kapasite değeri için şerit ilavesi probleminin çözümü sonucunda elde edilen ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri ile iyileşme yüzdeleri Tablo 5.12'de verilmiştir.

**Tablo 5.11** 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 modeli ile elde edilen saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları (M: Mevcut durum, Y: Yeni durum)

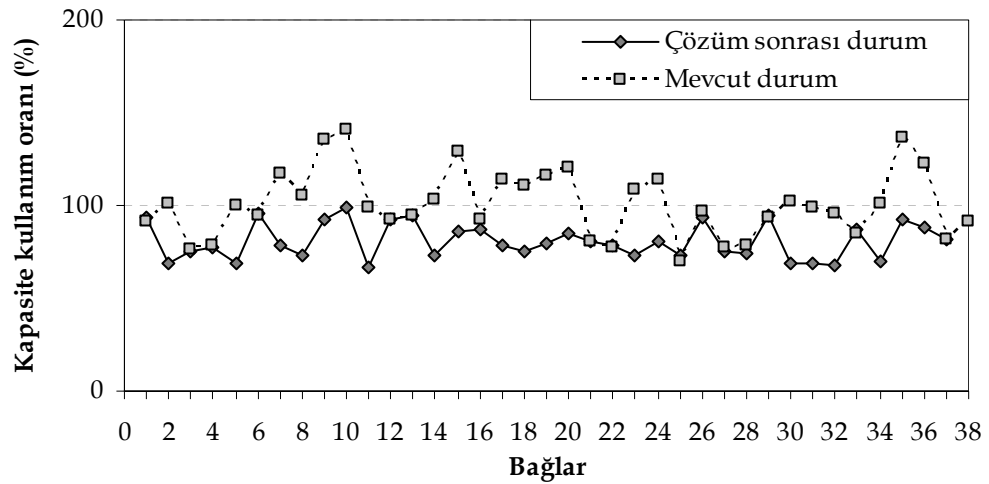
Bağ no	Kapasite (taşıt/sa)		Trafik hacmi (taşıt/sa)		Kapasite kullanım oranı (%)		Bağ No	Kapasite (taşıt/sa)		Trafik hacmi (taşıt/sa)		Kapasite kullanım oranı (%)	
	M	Y	M	Y	M	Y		M	Y	M	Y	M	Y
1	1110	1110	1018	1035	92	93	20	1110	1665	1339	1410	121	85
2	1110	1665	1127	1151	102	69	21	1110	1110	896	898	81	81
3	1110	1110	843	830	76	75	22	1110	1110	865	873	78	79
4	1110	1110	875	854	79	77	23	1110	1665	1200	1211	108	73
5	1110	1665	1111	1150	100	69	24	1110	1665	1266	1346	114	81
6	1110	1110	1054	1059	95	95	25	1110	1110	771	806	69	73
7	1110	1665	1295	1315	117	79	26	1110	1110	1071	1044	96	94
8	1110	1665	1172	1226	106	74	27	1110	1110	854	840	77	76
9	1110	1665	1503	1548	135	93	28	1110	1110	866	828	78	75
10	1110	1665	1564	1653	141	99	29	1110	1110	1040	1053	94	95
11	1110	1665	1100	1108	99	67	30	1110	1665	1128	1154	102	69
12	1110	1110	1025	1031	92	93	31	1110	1665	1097	1139	99	68
13	1110	1110	1050	1050	95	95	32	1110	1665	1061	1119	96	67
14	1110	1665	1146	1211	103	73	33	1110	1110	942	967	85	87
15	1110	1665	1427	1425	129	86	34	1110	1665	1122	1158	101	70
16	1110	1110	1028	964	93	87	35	1110	1665	1510	1541	136	93
17	1110	1665	1264	1304	114	78	36	1110	1665	1359	1465	122	88
18	1110	1665	1224	1255	110	75	37	1110	1110	913	910	82	82
19	1110	1665	1287	1329	116	80	38	1110	1110	1012	999	91	90

**Tablo 5.12** 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çalışma aşında hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri

	Mevcut durum	Yeni yapılandırma	İyileşme (%)
<b>Ortalama kapasite kullanım oranı (%)</b>	100.63	81.13	19.38
<b>Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)</b>	113.99	105.38	7.55

Tablo 5.12 incelendiğinde, çözüm sonrasında ortalama kapasite kullanım oranında yaklaşık % 20, toplam seyahat süresinde ise yaklaşık % 8'lik iyileşmelerin elde edildiği görülmektedir. Şekil 5.8'de çalışma ağını oluşturan bağlardaki mevcut ve yeni yapılandırma sonrasındaki kapasite kullanım oranları görülmektedir.

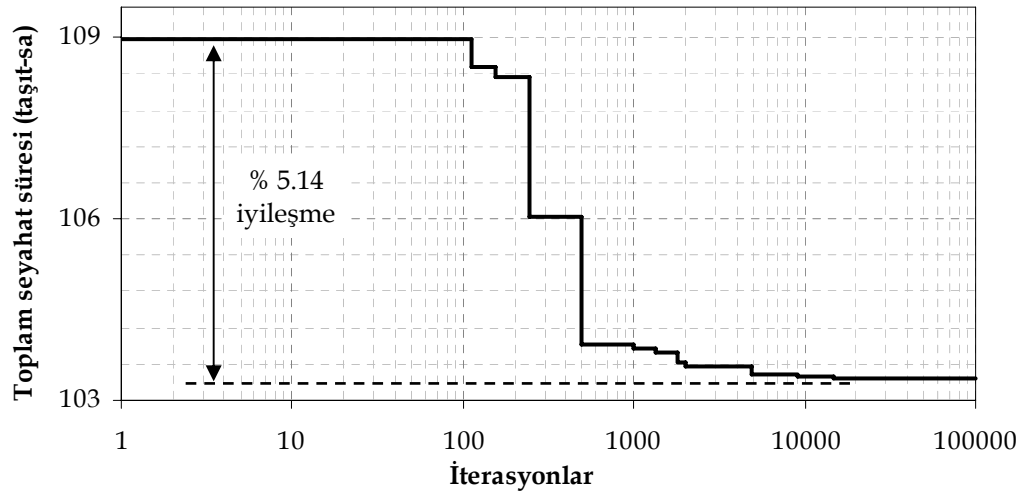




**Şekil 5.8** 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları

### **630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 çözümü**

Şerit ilavesi probleminin aynı çalışma ağına 630 taşıt/şerit-sa'lık kapasite değeri için çözümü sonucunda elde edilen yakınsama grafiği Şekil 5.9'da logaritmik  $x$  ekseninde verilmiştir.



**Şekil 5.9** ARARULAT-SKD-1 modelinin 630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için yakınsama grafiği

Şekil 5.9 incelendiğinde, yaklaşık 15,000 iterasyon sonunda yeni yapılandırmanın elde edildiği görülmektedir. Tablo 5.13'de, ağın yeni yapılandırması ve gerekli yatırım bedeli verilmiştir.

**Tablo 5.13** ARARULAT-SKD-1 modeli ile 630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için elde edilen yeni yapılandırma

<b>Bağ no</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$u_a$	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1
$b_a$	0	9	0	0	9	0	7	7	3	3	9	0	0	10	9	0	7	7	5
<b>Bağ no</b>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
$u_a$	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0
$b_a$	5	0	0	6	6	0	0	0	0	0	5	9	9	0	9	8	8	0	0
<b>Gerekli yatırım bedeli (birim)</b>																			
150																			

Tablo 5.13 incelendiğinde, ağ genelindeki 630 taşıt/şerit-sa'lık bağ kapasitesi değeri için yapılan analizler sonucunda elde edilen şerit ilavesi planının, 150 birimlik yatırım bedeli ile gerçekleştirilebileceği görülmektedir. Tablo 5.14'de ağ üzerindeki trafik talebine ilişkin mevcut ve yeni değerler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Tablo 5.14** 630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 modeli ile elde edilen saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları (M: Mevcut durum, Y: Yeni durum)

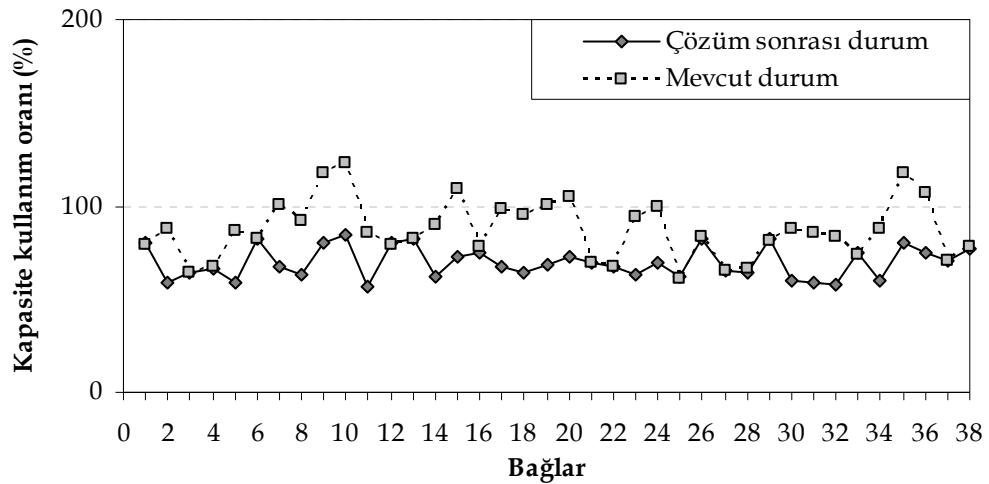
Bağ no	Kapasite (taşıt/sa)		Trafik hacmi (taşıt/sa)		Kapasite kullanım oranı (%)		Bağ No	Kapasite (taşıt/sa)		Trafik hacmi (taşıt/sa)		Kapasite kullanım oranı (%)	
	M	Y	M	Y	M	Y		M	Y	M	Y	M	Y
1	1300	1300	1030	1041	79	80	20	1300	1950	1363	1410	105	72
2	1300	1950	1140	1155	88	59	21	1300	1300	901	903	69	69
3	1300	1300	839	830	65	64	22	1300	1300	873	877	67	67
4	1300	1300	869	856	67	66	23	1300	1950	1218	1225	94	63
5	1300	1950	1128	1154	87	59	24	1300	1950	1293	1348	99	69
6	1300	1300	1070	1072	82	82	25	1300	1300	786	808	60	62
7	1300	1950	1311	1324	101	68	26	1300	1300	1082	1065	83	82
8	1300	1950	1190	1226	92	63	27	1300	1300	849	842	65	65
9	1300	1950	1531	1562	118	80	28	1300	1300	859	834	66	64
10	1300	1950	1595	1652	123	85	29	1300	1300	1056	1064	81	82
11	1300	1950	1106	1110	85	57	30	1300	1950	1145	1163	88	60
12	1300	1300	1032	1036	79	80	31	1300	1950	1114	1143	86	59
13	1300	1300	1069	1068	82	82	32	1300	1950	1078	1116	83	57
14	1300	1950	1173	1217	90	62	33	1300	1300	957	974	74	75
15	1300	1950	1420	1415	109	73	34	1300	1950	1138	1163	88	60
16	1300	1300	1016	971	78	75	35	1300	1950	1534	1558	118	80
17	1300	1950	1278	1304	98	67	36	1300	1950	1393	1465	107	75
18	1300	1950	1240	1260	95	65	37	1300	1300	916	915	70	70
19	1300	1950	1309	1338	101	69	38	1300	1300	1014	1006	78	77

Tablo 5.14 incelendiğinde, ARARULAT-SKD-1 modellemesi sonucunda bağ trafik hacimlerinin kapasite altında kaldığı görülmektedir. Son şerit ilavesi probleminin çözümü sonucunda elde edilen kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri ile iyileşme yüzdeleri Tablo 5.15’de verilmektedir.

**Tablo 5.15** 630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çalışma ağında hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri

	Mevcut durum	Yeni yapılandırma	İyileşme (%)
Ortalama kapasite kullanım oranı (%)	86.84	69.58	19.88
Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)	108.96	103.36	5.14

Tablo 5.15 incelendiğinde, 630 taşıt/şerit-sa’lık kapasite değeri için uygulanan çözüm sonrasında ortalama kapasite kullanım oranında mevcut duruma göre yaklaşık % 20, toplam seyahat süresinde ise yaklaşık % 5’lik bir iyileşmelerin elde edildiği görülmektedir. Şekil 5.10’da çalışma ağını oluşturan bağlardaki mevcut ve yeni yapılandırma sonrasındaki kapasite kullanım oranları görülmektedir.



**Şekil 5.10** 630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları

Şekil 5.10 incelendiğinde, 630 taşıt/şerit-sa’lık kapasite değeri için ARARULAT-SKD-1 modelinin test ağına uygulamasının ardından bağ trafik hacimlerinin tamamının kapasite değerinin altına indiği görülmektedir.

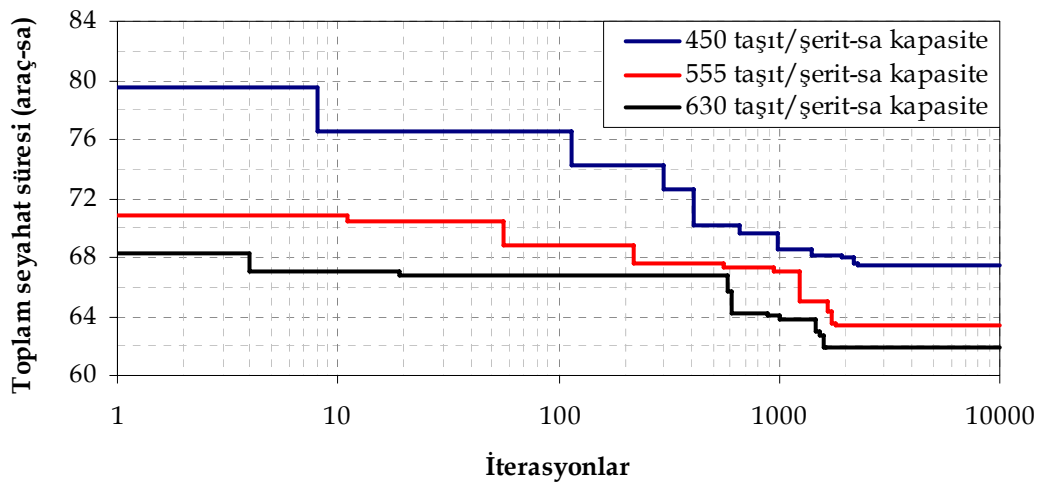
### 5.3.3. ARARULAT-DKD-2 modeli uygulamaları

Şerit ilavesi probleminin çözümünde sürücü davranışlarını DKD kabulü ile ele alan ARARULAT-DKD-2 modeli, test ağının mevcut durumuna uygulanmış ve hesaplanan bağ trafik hacimleri ile kapasite kullanım oranları Tablo 5.16'da verilmiştir.

**Tablo 5.16** Test ağının mevcut durumu için ARARULAT-DKD-2 modeli ile hesaplanan bağ trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları

Bağ no	450 taşıt/şerit-sa kapasite			555 taşıt/şerit-sa kapasite			630 taşıt/şerit-sa kapasite		
	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Kapasite (taşıt/sa)	Kapasite kullanım oranı (%)	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Kapasite (taşıt/sa)	Kapasite kullanım oranı (%)	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Kapasite (taşıt/sa)	Kapasite kullanım oranı (%)
1	359	900	40	513	1110	46	560	1260	44
2	368	900	41	380	1110	34	380	1260	30
3	852	900	95	840	1110	76	840	1260	67
4	1001	900	111	847	1110	76	800	1260	63
5	348	900	39	306	1110	28	213	1260	17
6	350	900	39	262	1110	24	123	1260	10
7	980	900	109	1068	1110	96	1207	1260	96
8	802	900	89	844	1110	76	937	1260	74
9	1271	900	141	1467	1110	132	1607	1260	128
10	1218	900	135	1318	1110	119	1457	1260	116
11	1030	900	114	1030	1110	93	1030	1260	82
12	790	900	88	790	1110	71	790	1260	63
13	448	900	50	132	1110	12	0	1260	0
14	412	900	46	300	1110	27	167	1260	13
15	1470	900	163	1570	1110	141	1703	1260	135
16	1343	900	149	1505	1110	136	1590	1260	126
17	900	900	100	900	1110	81	900	1260	71
18	830	900	92	830	1110	75	830	1260	66
19	1201	900	133	1397	1110	126	1537	1260	122
20	1218	900	135	1318	1110	119	1457	1260	116
21	0	900	0	0	1110	0	0	1260	0
22	0	900	0	0	1110	0	0	1260	0
23	448	900	50	132	1110	12	0	1260	0
24	412	900	46	300	1110	27	167	1260	13
25	173	900	19	335	1110	30	420	1260	33
26	0	900	0	100	1110	9	233	1260	19
27	868	900	96	826	1110	74	733	1260	58
28	770	900	86	682	1110	61	543	1260	43
29	361	900	40	557	1110	50	697	1260	55
30	368	900	41	468	1110	42	607	1260	48
31	850	900	94	850	1110	77	850	1260	67
32	840	900	93	840	1110	76	840	1260	67
33	201	900	22	47	1110	4	0	1260	0
34	12	900	1	0	1110	0	0	1260	0
35	1250	900	139	1150	1110	104	1017	1260	81
36	1087	900	121	925	1110	83	840	1260	67
37	1138	900	126	1150	1110	104	1150	1260	91
38	1229	900	137	1383	1110	125	1430	1260	113

Tablo 5.16 incelendiğinde, üç farklı şerit genişliği için de, ağın mevcut durumunda 21 ve 22 nolu bağlarda trafik hacmi olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte, 26 nolu bağın 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için, 34 nolu bağın 555 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için ve 13-23-33-34 nolu bağların da 630 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için sürücüler tarafından kullanılmadığı görülmektedir. Bu duruma tezat olarak, her üç analiz sonucunda da, birçok bağda kapasite kullanım oranının %100'ün üzerinde olduğu görülmektedir. Bu iki durum değerlendirildiğinde, ağ genelinde bazı bağlar hiç kullanılmazken, bazı bağlardaki trafik hacimlerinin kapasite değerinin oldukça üstünde olmasından dolayı DKD yaklaşımının sürücü davranışlarını yeterli düzeyde yansıtmadığı düşünülebilir. ARARULAT-DKD-2 modeli ile yapılan analizler sonucunda ağdaki toplam seyahat süresinin değişimini gösteren grafik Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11 ARARULAT-DKD-2 modeli çözüm sürecinin yakınsama grafiği

Şekil 5.11 incelendiğinde, ARARULAT-DKD-2 modellemesi sonunda ağdaki toplam seyahat süresi değerinin her üç durumda için de istenen yakınsama koşulunu sağlayacak düzeyde azaldığı görülmektedir. 450, 555 ve 630 taşıt/şerit-sa'lik kapasite değerleri için sırasıyla yaklaşık 2200, 1800 ve 1600 iterasyon sonunda çözümler elde edilmiş ve yeni ağ yapılandırma planları Tablo 5.17'de verilmiştir.

Şerit ilave probleminin ARARULAT-DKD-2 modeli ile çözümü sonunda test ağındaki bağlarda oluşacak trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları Tablo 5.18'de verilmiştir.

**Tablo 5.17** ARARULAT-DKD-2 modellemesi sonucunda elde edilen yapılandırma

Kapasite (taşıt/şerit-sa)							Kapasite (taşıt/şerit-sa)						
450		555		630			450		555		630		
Bağ no	$u_a$	$b_a$	$u_a$	$b_a$	$u_a$	$b_a$	Bağ no	$u_a$	$b_a$	$u_a$	$b_a$	$u_a$	$b_a$
1	0	0	0	0	0	0	20	1	5	1	5	1	5
2	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	12	1	12	22	0	0	0	0	0	0
4	1	12	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0
7	1	7	1	7	1	7	26	0	0	0	0	0	0
8	1	7	1	7	1	7	27	0	0	0	0	0	0
9	1	3	1	3	1	3	28	0	0	0	0	0	0
10	1	3	1	3	1	3	29	1	5	1	5	1	5
11	1	9	1	9	1	9	30	0	0	0	0	0	0
12	1	9	1	9	1	9	31	1	9	1	9	1	9
13	0	0	0	0	0	0	32	1	9	1	9	1	9
14	0	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0	0
15	1	9	1	9	1	9	34	0	0	0	0	0	0
16	1	9	1	9	1	9	35	1	8	1	8	1	8
17	1	7	1	7	1	7	36	1	8	1	8	1	8
18	1	7	1	7	1	7	37	1	9	1	9	1	9
19	1	5	1	5	1	5	38	1	9	1	9	1	9

Tablo 5.18 incelendiğinde, ağın yapılandırma sonrası durumunda 13-14-21-22-23-24-33-34 nolu bağlarda trafik hacmi olmadığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, 450 taşıt/şerit-sa'lık kapasite değeri için sürücüler tarafından kullanılan 5 ve 6 nolu bağların, 555 ve 630 taşıt/şerit-sa'lık kapasite değerleri için yine hiçbir sürücü tarafından tercih edilmediği görülmektedir. ARARULAT-DKD-2 modellemesi için test ağının mevcut ve yeni durumları karşılaştırıldığında, gerçekleştirilen kapasite ilaveleri sonrasında daha fazla sayıda bağın kullanım dışı kaldığı dikkati çekmektedir. Aynı zamanda, Tablo 5.16'daki duruma benzer şekilde, çözüm sonrasında da özellikle 450 ve 555 taşıt/şerit-sa'lık kapasite değerleri için birçok bağın kapasite üstü kullanımı söz konusudur. SKD tabanlı yaklaşımdan farklı olarak sürücülerin rota seçimlerini deterministik kabul yaptıkları durumlarda, ağ genelindeki trafik dağılımının daha düzensiz olduğu söylenebilir.

**Tablo 5.18** Test ağının yeni durumu için ARARULAT-DKD-2 modeli ile hesaplanan bağ trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları

Bağ no	450 taşıt/şerit-sa kapasite			555 taşıt/şerit-sa kapasite			630 taşıt/şerit-sa kapasite		
	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Kapasite (taşıt/sa)	Kapasite kullanım oranı (%)	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Kapasite (taşıt/sa)	Kapasite kullanım oranı (%)	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Kapasite (taşıt/sa)	Kapasite kullanım oranı (%)
1	560	900	62	560	1110	50	560	1260	44
2	470	900	52	380	1110	34	380	1260	30
3	750	900	83	840	1665	50	840	1890	44
4	800	1350	59	800	1110	72	800	1260	63
5	89	900	10	0	1110	0	0	1260	0
6	88	900	10	0	1110	0	0	1260	0
7	1242	1350	92	1330	1665	80	1330	1890	70
8	1061	1350	79	1150	1665	69	1150	1890	61
9	1731	1350	128	1820	1665	109	1820	1890	96
10	1583	1350	117	1580	1665	95	1580	1890	84
11	1030	1350	76	1030	1665	62	1030	1890	54
12	790	1350	59	790	1665	47	790	1890	42
13	0	900	0	0	1110	0	0	1260	0
14	0	900	0	0	1110	0	0	1260	0
15	1780	1350	132	1870	1665	112	1870	1890	99
16	1590	1350	118	1590	1665	95	1590	1890	84
17	900	1350	67	900	1665	54	900	1890	48
18	830	1350	61	830	1665	50	830	1890	44
19	1661	1350	123	1750	1665	105	1750	1890	93
20	1583	1350	117	1580	1665	95	1580	1890	84
21	0	900	0	0	1110	0	0	1260	0
22	0	900	0	0	1110	0	0	1260	0
23	0	900	0	0	1110	0	0	1260	0
24	0	900	0	0	1110	0	0	1260	0
25	420	900	47	420	1110	38	420	1260	33
26	310	900	34	400	1110	36	400	1260	32
27	609	900	68	520	1110	47	520	1260	41
28	508	900	56	420	1110	38	420	1260	33
29	821	1350	61	910	1665	55	910	1890	48
30	642	900	71	730	1110	66	730	1260	58
31	940	1350	70	850	1665	51	850	1890	45
32	840	1350	62	840	1665	50	840	1890	44
33	0	900	0	0	1110	0	0	1260	0
34	0	900	0	0	1110	0	0	1260	0
35	940	1350	70	850	1665	51	850	1890	45
36	840	1350	62	840	1665	50	840	1890	44
37	1150	1350	85	1150	1665	69	1150	1890	61
38	1430	1350	106	1430	1665	86	1430	1890	76

Yapılandırma öncesi ve sonrasında ağdaki toplam seyahat süresi ve ortalama kapasite kullanım oranlarının değişimi ile şerit ilaveleri için gerekli yatırım bedelleri Tablo 5.19’da verilmiştir.

**Tablo 5.19** ARARULAT-DKD-2 modellemesi sonunda elde edilen toplam seyahat süresi, ortalama kapasite kullanım oranı ve gerekli yatırım bedeli değerleri (M: Mevcut durum, Y: Yeni durum)

	450 taşıt/şerit-sa			555 taşıt/şerit-sa			630 taşıt/şerit-sa		
	M	Y	İyileşme (%)	M	Y	İyileşme (%)	M	Y	İyileşme (%)
<b>Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)</b>	79.56	67.49	15.17	70.89	63.37	10.60	68.22	61.85	9.34
<b>Ortalama kapasite kullanım oranı (%)</b>	79.47	58.87	25.93	64.89	47.79	26.36	57.74	42.11	27.07
<b>Gerekli yatırım bedeli (birim)</b>		149			149			149	

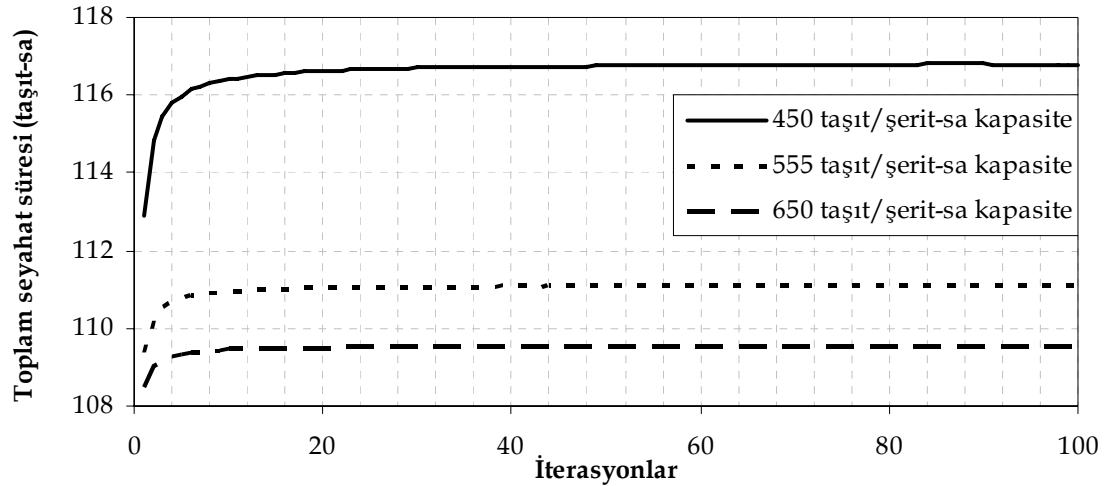
Tablo 5.19 incelendiğinde, toplam seyahat süresi değerindeki en yüksek iyileşme değeri 450 taşıt/şerit-sa'lık kapasite için yaklaşık %15 olarak elde edilirken, en yüksek kapasite değeri olan 630 taşıt/şerit-sa değeri için en düşük iyileşme yaklaşık %9 olarak hesaplanmıştır. Ortalama kapasite kullanım oranları incelendiğinde, gözlenen iyileşmelerin bağ kapasitelerinin artışına bağlı olarak artış gösterdiği göze çarpmaktadır. Her üç kapasite değeri için de birbirine yakın olan ortalama kapasite kullanım oranındaki iyileşme değeri ARARULAT-DKD-2 modellemesi sonucunda %26~27 mertebesinde dir. Şerit ilaveleri için gerekli yatırım bedelleri her üç kapasite değeri için de 149 birim olarak hesaplanmıştır.

#### 5.4.4. ARARULAT-İSİ modeli uygulamaları

AUAT problem türlerinden biri olan şerit ilavesi probleminin çözümü için geliştirilen yöntemin performansını daha net bir şekilde ortaya koymak amacıyla aynı problem, ARARULAT-İSİ modeli ile çözülmüştür. Detayları 4. Bölümde açıklanan bu iteratif yaklaşım, 3 farklı şerit genişliği için şerit ilave problemine uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiksel olarak Şekil 5.12'de verilmiştir.

Şekil 5.12 incelendiğinde, ARARULAT-İSİ modeli ile şerit ilave probleminin çözümünde, toplam seyahat süresinin azalan bir eğilim göstermediği açıkça görülmektedir. ARARULAT-İSİ modeli ile hesaplanan toplam seyahat süresi değerleri ve bu değerlerdeki iyileşme oranları Tablo 5.20'de verilmiştir.





Şekil 5.12 ARARULAT-İSİ modeli çözüm sürecinin yakınsama grafikleri

Tablo 5.20 ARARULAT-İSİ modeli ile hesaplanan toplam seyahat süresi değerleri ve iyileşme yüzdeleri ( M: Mevcut durum, Y: Yeni durum)

Kapasite (taşıtlar/şerit-sa)	Toplam seyahat süresi (taşıtlar)		İyileşme (%)
	M	Y	
450	112.89	116.79	-3.46
555	109.35	111.12	-1.62
630	108.45	109.55	-1.01

Tablo 5.20 incelendiğinde, ARARULAT-İSİ modellemesi ile elde edilen yeni toplam seyahat süresi değerlerinin, ağıın mevcut durumundaki değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu da, son sütunda verilen iyileşme değerlerinin neden negatif işaretli olduğunu açıklamaktadır. Yapılan analizler doğrultusunda, AUAT kapsamında ele alınan şerit ilavesi probleminin çözümünde iki-seviyeli iteratif model yaklaşımının başarılı sonuç vermediği söylenebilir.

#### 5.4.5. ARARULAT-SKD-1, ARARULAT-DKD-2 ve ARARULAT-İSİ model performanslarının karşılaştırılması

AUAT kapsamında ele alınan şerit ilavesi probleminin çözümü için geliştirilen ve test ağıında uygulamaları gerçekleştirilen ARARULAT-SKD-1, ARARULAT-DKD-2 ve ARARULAT-İSİ modelleri ile hesaplanan ağ toplam seyahat süresi değerleri ve bu değerlerdeki iyileşme oranları Tablo 5.21’de verilmiştir

**Tablo 5.21** ARARULAT-SKD-1, ARARULAT-DKD-2 ve ARARULAT-İSİ modelleri ile elde edilen toplam seyahat süreleri (taşıt-sa) ve iyileşme oranları (%)

Kapasite (taşıt/şerit-sa)	ARARULAT-SKD-1			ARARULAT-DKD-2			ARARULAT-İSİ		
	M	Y	İyileşme (%)	M	Y	İyileşme (%)	M	Y	İyileşme (%)
450	127.80	111.39	12.84	79.56	67.49	15.17	112.89	116.79	-3.46
555	113.99	105.38	7.55	70.89	63.37	10.6	109.35	111.12	-1.62
630	108.96	103.36	5.14	68.22	61.85	9.34	108.45	109.55	-1.01

Tablo 5.21 incelendiğinde, ARARULAT-İSİ modelinden elde edilen toplam seyahat sürelerindeki iyileşme değerlerinin negatif işaretli olduğu görülmektedir. İterasyonlar boyunca iyileşmenin gerçekleşmediği bu modelden elde edilen yeni ağ seyahat süresi değerleri, diğer iki modelden elde edilen değerlerden daha yüksektir. Bu nedenle, ARARULAT-İSİ modelinin AUAT problemlerinin çözümünde etkin bir şekilde uygulanamayacağı sonucuna varılabilir. ARARULAT-SKD-1 ve ARARULAT-DKD-2 modellerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, DKD tabanlı model ile elde edilen toplam ağ seyahat süresi değerlerinin SKD tabanlı modele göre daha düşük mertebede olduğu görülmektedir. Ayrıca, toplam seyahat süresi değerinin mevcut ve yeni durumlar arasındaki iyileşme oranları incelendiğinde, yine DKD tabanlı modelin daha yüksek iyileşme oranları sağladığı görülmektedir. Tablo 5.22’de ARARULAT-SKD-1 ve ARARULAT-DKD-2 model uygulamalarından elde edilen ortalama kapasite kullanım oranları ve bu oranlardaki iyileşmeler verilmiştir. Toplam seyahat süresi değerinde iyileşme sağlayamayan ARARULAT-İSİ modeli bu tabloya dahil edilmemiştir.

**Tablo 5.22** ARARULAT-SKD-1 ve ARARULAT-DKD-2 modelleri ile elde edilen ortalama kapasite kullanım oranları (%) ve iyileşmeler (%)

Kapasite (taşıt/şerit-sa)	ARARULAT-SKD-1			ARARULAT-DKD-2		
	M	Y	İyileşme (%)	M	Y	İyileşme (%)
450	120.34	98.18	18.41	79.47	58.87	25.93
555	100.63	81.13	19.38	64.89	47.79	26.36
630	86.84	69.58	19.88	57.74	42.11	27.07

Tablo 5.22 incelendiğinde, toplam seyahat süresi değerinde olduğu gibi ortalama kapasite kullanım oranı ve bu oranlardaki iyileşme değerlerinde de ARARULAT-DKD-2 yaklaşımının ARARULAT-SKD-1 yaklaşımına göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Örneğin, 450 ve 555 taşıt/şerit-sa’lık kapasite değerleri için SKD tabanlı modelden elde edilen ortalama kapasite kullanım oranları %100’ün üzerindeyken, aynı değerler DKD tabanlı model çözümü sonucunda sırasıyla yaklaşık %65 ve %79

civarındadır. Bunun nedeni, DKD yaklaşımı ile yapılan modellemeler sonucunda ağ genelinde kullanılmayan bazı bağların bulunmasıdır. Trafik hacmi bulunmayan bu bağlarda kapasite kullanım oranları sıfırdır ve bu durum, ağ genelindeki ortalamanın düşmesine neden olmaktadır. Elde edilen iyileşmeler incelendiğinde, her üç kapasite değeri için de %20'nin altında olan ARARULAT-SKD-1 sonuçları, %25'in üzerinde olan ARARULAT-DKD-2 model sonuçlarının altındadır. Yine bu durum, ağdaki yapılandırma sonrasında, mevcut duruma göre çok daha fazla sayıda kullanılmayan bağ olması ile açıklanabilir.

Hem toplam seyahat süresi hem de ortalama kapasite kullanım oranları açısından ARARULAT-DKD-2 modelinin daha iyi sonuçlar verdiği tablolardan görülmektedir. Ancak, daha önceki bölümler de belirtildiği üzere DKD yaklaşımı ile sürücü davranışlarının yeterli düzeyde modellenemediği bilinmektedir. ARARULAT-DKD-2 modellemesi sonucunda elde edilmiş olan bağ trafik hacimleri de bunun bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Belli B-V çiftleri arasındaki seyahat talebinin ağa yüklenmesinden sonra, bazı bağlar hiçbir sürücü tarafından kullanılmazken, bazı bağlarda kapasitenin aşılması ve sıkışıklıkların olduğu görülmektedir. Tasarım aşamasında bu çelişkili durumun göz ardı edilmesi ya da doğru kabul edilmesi, gerçekleştirilecek bir tasarım sonrasında hem yapılan yatırımın boşa gitmesi hem de 2. Bölüm'de açıklanan Braess' paradoksunun ortaya çıkmasına ve trafik sıkışıklıklarının artmasına neden olabilir. Bu nedenle, şerit ilavesi probleminin çözümünden elde edilen sonuçlar doğrultusunda, AUAT kapsamında ele alınan bir diğer problem olan şerit yönlendirme problemi, SKD tabanlı ARARULAT-SKD-2 modeli ile ele alınmıştır. Bu bölümde gerçekleştirilen karşılaştırmaların bir diğer sonucu olarak, düşük şerit kapasitesi değerleri için toplam seyahat süresi değerlerinde daha yüksek iyileşmeler elde edildiği söylenebilir. Bu nedenle, ARARULAT-SKD-2 model çözümleri 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için gerçekleştirilmiştir.

#### **5.4.6. ARARULAT-SKD-2 modeli uygulamaları**

Şerit yönlendirme probleminin çözümünde çalışma ağındaki tüm bağlar yönlendirmeye aday olabileceği gibi bazı özel bağların yönlendirme planı dışında tutulabilir. Ayrıca, karayolu ağında çeşitli nedenlerden dolayı tamamen kapalı olan bağlar nedeniyle yaşanan trafik sıkışıklıklarının önlenmesi de dikkate alınabilir.

Bu bölümde şerit yönlendirme problemi, 3 farklı senaryo altında incelenmiştir. Bu senaryolar:

**Senaryo 1:** Tüm bağların yönlendirme planına dahil edildiği genel yönlendirme planlaması,

**Senaryo 2:** Karayolunu çevreleyen hattın yönlendirme planı dışında bırakıldığı kısmi yönlendirme planlaması,

**Senaryo 3:** Karayolu ağında bulunan kapalı bağlar göz önüne alınarak tüm ağın yönlendirme planına dahil edilmesi şeklindedir.

Şerit yönlendirme problemlerinde, gün içindeki zirve saat trafik hacimlerini ve B-V çiftleri arasındaki seyahat taleplerindeki asimetriyi temsil edebilmek amacıyla 1, 4 ve 12 nolu düğümler ilgili zirve saat için üretim, 2, 3 ve 13 nolu düğümler ise çekim merkezleri olarak kabul edilmiştir. Bu durumda, ağ üzerindeki seyahat talebinin büyük kısmı üretim merkezlerinden çekim merkezlerine olan seyahat talebi ile temsil edilmiştir. Tablo 5.23’de, şerit yönlendirme problemi için kullanılan seyahat talepleri verilmektedir.

**Tablo 5.23** Şerit yönlendirme problemi için kullanılan B-V seyahat talepleri (taşıt/sa)

Başlangıç/Varış	1	2	3	4	12	13	Başlangıç Toplamı
1	---	570	400	0	0	400	1370
2	75	---	---	65	60	---	200
3	50	---	---	70	95	---	215
4	---	450	400	---	---	400	1250
12	---	470	400	---	---	300	1170
13	55	0	0	70	60	---	185
<b>Varış Toplamı</b>	180	1490	1200	205	215	1100	4390

Tablo 5.23 incelendiğinde, zirve saat trafik talebinin yaklaşık % 85’inin 1, 4 ve 12 nolu başlangıçlarda üretildiği görülmektedir.

#### 5.4.6.1. Senaryo 1: Tüm bağlar yönlendirmeye aday

Birinci senaryoda, karayolu ağındaki tüm bağlar Şekil 5.3’de verildiği gibi 2 şeritten oluşmakta ve tüm şeritler yönlendirmeye aday olarak kabul edilmektedir. Çalışma ağındaki bağlardan geçen saatlik trafik hacimleri, ağın mevcut durumu için Tablo 5.24’de verilmiştir.

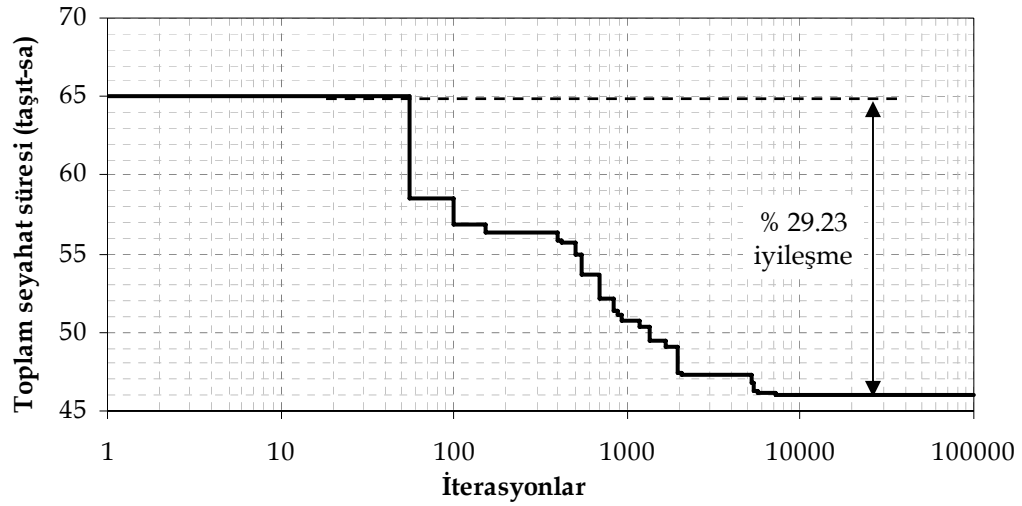
**Tablo 5.24** Senaryo 1 için çalışma ağındaki mevcut saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları

Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)	Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)
1	790	900	88	20	389	900	43
2	433	900	48	21	744	900	83
3	817	900	91	22	276	900	31
4	129	900	14	23	1073	900	119
5	860	900	96	24	378	900	42
6	419	900	47	25	579	900	64
7	1101	900	122	26	494	900	55
8	353	900	39	27	855	900	95
9	1162	900	129	28	127	900	14
10	621	900	69	29	708	900	79
11	882	900	98	30	581	900	65
12	318	900	35	31	941	900	105
13	750	900	83	32	325	900	36
14	522	900	58	33	861	900	96
15	1216	900	135	34	426	900	47
16	156	900	17	35	1238	900	138
17	1047	900	116	36	362	900	40
18	379	900	42	37	1003	900	111
19	1132	900	126	38	149	900	17
<b>Ortalama kapasite kullanım oranı (%)</b>							71.92
<b>Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)</b>							65.05

Tablo 5.24 incelendiğinde, ortalama kapasite kullanım oranının yaklaşık % 72 ve toplam seyahat süresinin 65 taşıt-saat mertebesinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, 7, 9, 15, 17, 19, 23, 31, 35 ve 37 nolu bağlardaki trafik hacimleri, bağ kapasitelerinin üzerindedir.

Şekil 5.13'de Senaryo 1'in çözümü sonucunda elde edilen yakınsama grafiği logaritmik ölçekte verilmektedir. Yaklaşık 10,000 iterasyon sonunda yakınsama sağlanmış ve ağdaki toplam seyahat süresinde başlangıca göre yaklaşık % 29 mertebesinde iyileşme elde edilmiştir.

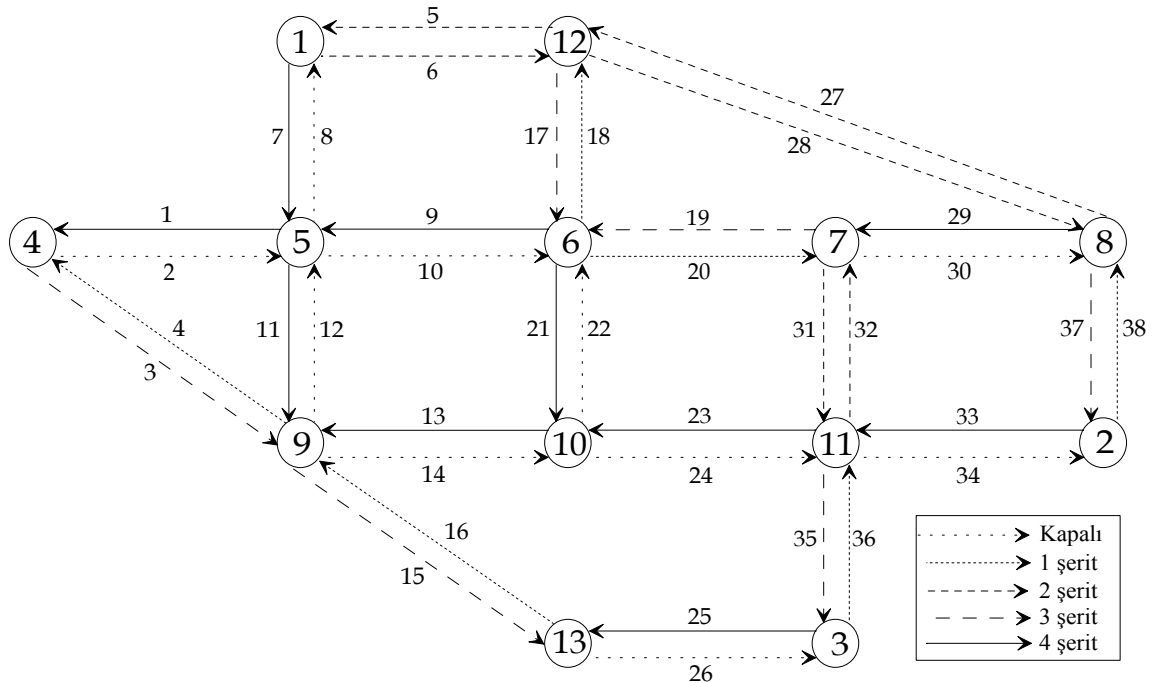
Probleminin çözümü sonucunda elde edilen yeni şerit yönlendirme planı Tablo 5.25'de ve bu yönlendirmeler sonucunda karayolu ağının yeni görünümü Şekil 5.14'de verilmiştir.



**Şekil 5.13** Senaryo 1 için ARARULAT-SKD-2 modeli çözüm sürecinin yakınsama grafiği

**Tablo 5.25** Senaryo 1 için ARARULAT-SKD-2 modeli ile elde edilen bağ yönlendirme planı

<b>Bağ no</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$u_a$	2	-2	1	-1	0	0	2	-2	2	-2	2	-2	2	-2	1	-1	1	-1	1
<b>Bağ no</b>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
$u_a$	-1	2	-2	2	-2	2	-2	0	0	2	-2	0	0	2	-2	1	-1	1	-1



**Şekil 5.14** Senaryo 1 için çalışma ağının yeni görünümü

Şekil 5.14 incelendiğinde, 2, 8, 10, 12, 14, 22, 24, 26, 30 ve 34 nolu bağların tamamen kapatıldığı ve buna karşılık olarak 1, 7, 9, 11, 13, 21, 23, 29 ve 33 nolu

bağların 4 şeride çıkarıldığı yani bu bağlarda tek yön uygulamasının gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca, bazı bağlarda sadece bir şerit değişimi gerekirken, 5, 6, 27, 28, 31 ve 32 nolu bağlarda şerit yönlendirmesine gidilmemiştir. Yeni bağ trafik hacimleri, kapasiteleri ve kapasite kullanım oranları Tablo 5.26’da verilmiştir. Yeni yapılandırma sonrasında ağdaki ortalama kapasite kullanım oranının % 72’den yaklaşık % 55’e, toplam seyahat süresinin ise 65 taşıt-sa değerinden yaklaşık 46 taşıt-sa değerine düştüğü görülmektedir.

**Tablo 5.26** Senaryo 1’in ARARULAT-SKD-2 modeli ile çözümü sonrasında hesaplanan saatlik trafik hacimleri, bağ kapasiteleri ve kapasite kullanım oranları

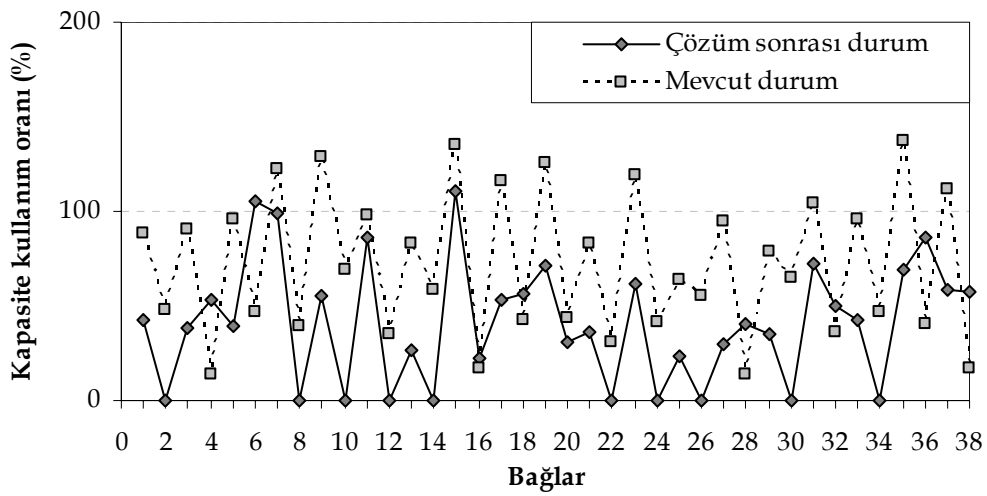
Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)	Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)
1	763	1800	42	20	141	450	31
2	0	Kapalı	---	21	642	1800	36
3	520	1350	39	22	0	Kapalı	---
4	239	450	53	23	1115	1800	62
5	355	900	39	24	0	Kapalı	---
6	950	900	106	25	415	1800	23
7	1785	1800	99	26	0	Kapalı	---
8	0	Kapalı	---	27	266	900	30
9	1001	1800	56	28	368	900	41
10	0	Kapalı	---	29	630	1800	35
11	1547	1800	86	30	0	Kapalı	---
12	0	Kapalı	---	31	647	900	72
13	474	1800	26	32	454	900	50
14	0	Kapalı	---	33	763	1800	42
15	1491	1350	110	34	0	Kapalı	---
16	101	450	22	35	934	1350	69
17	720	1350	53	36	389	450	86
18	256	450	57	37	787	1350	58
19	964	1350	71	38	260	450	58
<b>Ortalama kapasite kullanım oranı (%)</b>							55.43
<b>Ağdaki toplam seyahat süresi (taşıt-sa)</b>							46.03

Tablo 5.27’de çözüm öncesi mevcut durumda ve çözüm sonrasında ağ için elde edilen ortalama kapasite kullanım oranı, toplam seyahat süresi ve bu değerlerdeki iyileşme yüzdeleri verilmiştir. Yeni yapılandırma sonucunda ortalama kapasite kullanım oranında yaklaşık % 23, toplam seyahat süresinde ise yaklaşık % 29 mertebesinde iyileşmeler elde edilmiştir.

**Tablo 5.27** Senaryo 1 için çalışma ağında hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri

	Mevcut durum	Yeni yapılandırma	İyileşme (%)
Ortalama kapasite kullanım oranı (%)	71.92	55.43	22.93
Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)	65.05	46.03	29.23

Şekil 5.15’de çalışma ağını oluşturan bağlardaki mevcut ve yeni yapılandırma sonrasındaki kapasite kullanım oranları görülmektedir. ARARULAT-SKD-2 modelinin Senaryo 1’e uygulanmasından sonra ağ geneline bakıldığında, 6 ve 15 nolu bağlar dışındaki tüm bağlarda trafik hacmi kapasite altında kaldığı görülmektedir.



**Şekil 5.15** Senaryo 1 için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları

#### 5.4.6.2. Senaryo 2: İç bağlar yönlendirmeye aday

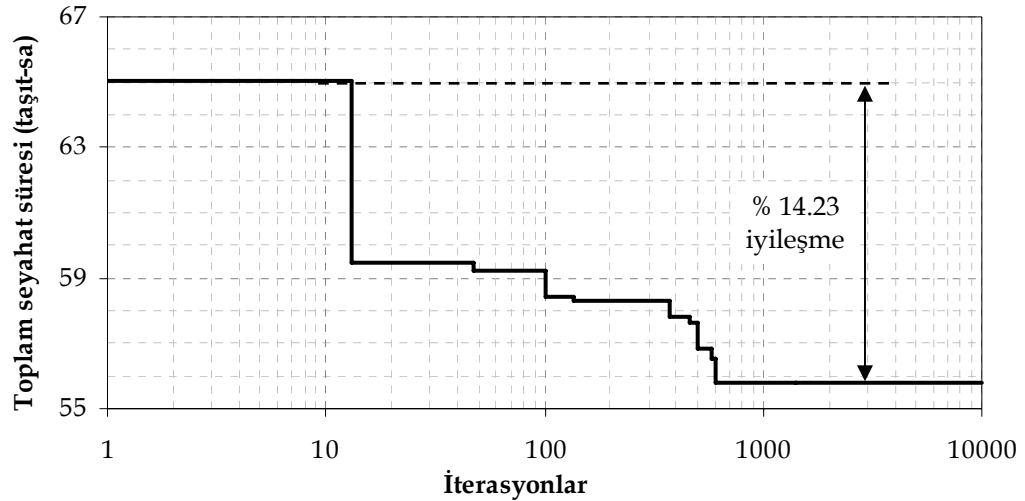
Bu senaryoda, çalışma ağını çevreleyen 20 adet bağın yönlendirme planı dışında tutulması öngörülmüştür. Bunun temel nedenleri:

- Ağı çevreleyen bağların, komşu karayolu ağlarında seyahat eden sürücüler tarafından da kullanılabilir olması ve eğer yönlendirme yapılacaksa, bu etkileşimden kaynaklanacak ek trafiğin de göz önünde bulundurulması gerekliliği,
- Dış bağların çevreyolu olarak hizmet verdiği düşünülürse, çalışma ağını yalnızca transit amaçla kullanan ve ağdaki yönlendirme planlaması ile ilgili bilgi sahibi olmayan sürücülerin olumsuz etkileneceği şeklinde sıralanabilir.



Şekil 5.16'da Senaryo 2'nin çözümü sonucunda elde edilen yakınsama grafiği logaritmik ölçekte verilmektedir. Yaklaşık 600 iterasyon sonunda yakınsama sağlanmış ve ağdaki toplam seyahat süresinde başlangıca göre yaklaşık % 14 mertebesinde iyileşme elde edilmiştir.

Çözüm sonrası elde edilen yeni yapılandırma Tablo 5.28'de, yeni yapılandırma sonucunda ağın görünümü Şekil 5.17'de verilmiştir.

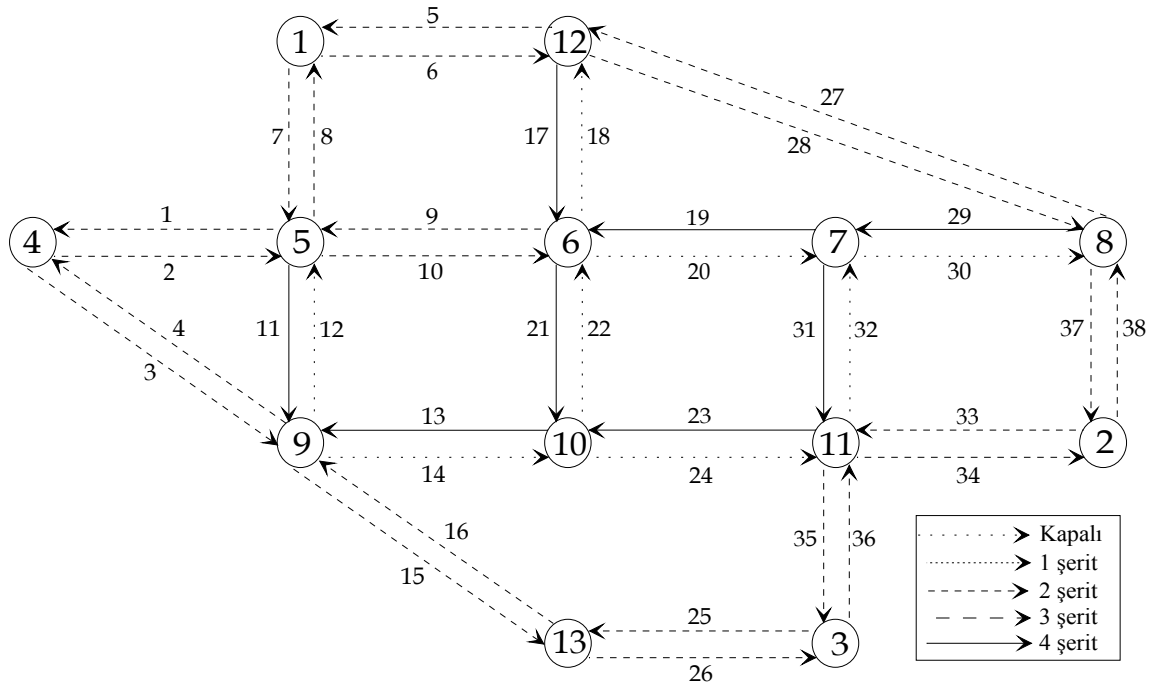


**Şekil 5.16** Senaryo 2 için ARARULAT-SKD-2 modeli çözüm sürecinin yakınsama grafiği

**Tablo 5.28** Senaryo 2 için ARARULAT-SKD-2 modeli ile elde edilen bağ yönlendirme planı

<b>Bağ no</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$u_a$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	-2	2	-2	0	0	2	-2	2
<b>Bağ no</b>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
$u_a$	-2	2	-2	2	-2	0	0	0	0	2	-2	2	-2	0	0	0	0	0	0

Tablo 5.28 incelendiğinde, ilgili zirve saat için yönlendirmeye aday bağlardan 9 ve 10 dışındaki tüm bağlarda tekyön uygulaması gerçekleştiği görülmektedir. Tablo 5.29'da ağ üzerindeki trafik talebi ile kapasite kullanım oranına ilişkin mevcut ve yeni değerler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.17 Senaryo 2 için çalışma ağının yeni görünümü

Tablo 5.29 Senaryo 2'nin ARARULAT-SKD-2 modeli ile çözümü sonrasında hesaplanan saatlik trafik hacimleri, bağ kapasiteleri ve kapasite kullanım oranları (M: Mevcut durum, Y: Yeni durum)

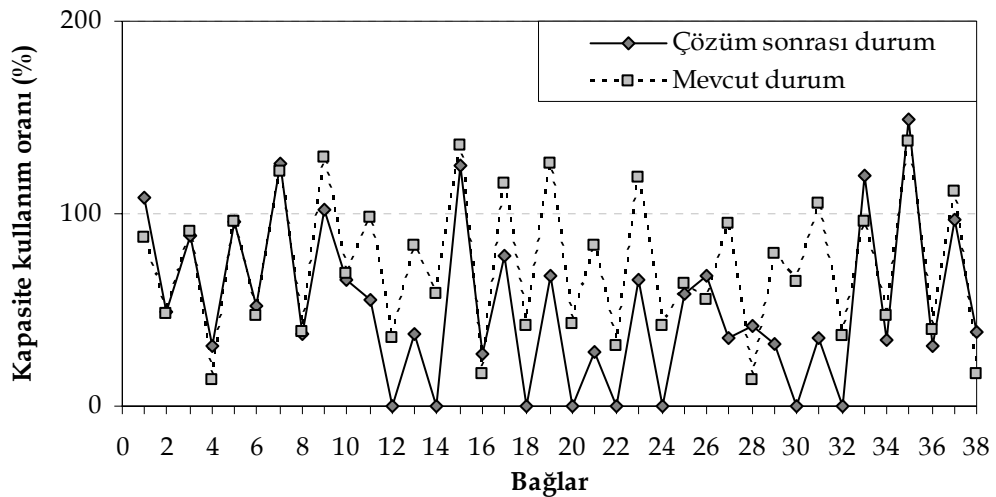
Bağ no	Kapasite (taşıt/sa)		Trafik hacmi (taşıt/sa)		Kapasite kullanım oranı (%)		Bağ No	Kapasite (taşıt/sa)		Trafik hacmi (taşıt/sa)		Kapasite kullanım oranı (%)	
	M	Y	M	Y	M	Y		M	Y	M	Y	M	Y
1	900	900	790	971	88	108	20	900	Kapalı	389	0	43	---
2	900	900	433	443	48	49	21	900	1800	744	513	83	29
3	900	900	817	795	91	88	22	900	Kapalı	276	0	31	---
4	900	900	129	277	14	31	23	900	1800	1073	1190	119	66
5	900	900	860	859	96	95	24	900	Kapalı	378	0	42	---
6	900	900	419	471	47	52	25	900	900	579	525	64	58
7	900	900	1101	1138	122	126	26	900	900	494	614	55	68
8	900	900	353	337	39	37	27	900	900	855	322	95	36
9	900	900	1162	918	129	102	28	900	900	127	377	14	42
10	900	900	621	591	69	66	29	900	1800	708	578	79	32
11	900	1800	882	1001	98	56	30	900	Kapalı	581	0	65	---
12	900	Kapalı	318	0	35	---	31	900	1800	941	634	105	35
13	900	1800	750	677	83	38	32	900	Kapalı	325	0	36	---
14	900	Kapalı	522	0	58	---	33	900	900	861	1078	96	120
15	900	900	1216	1128	135	125	34	900	900	426	312	47	35
16	900	900	156	241	17	27	35	900	900	1238	1341	138	149
17	900	1800	1047	1398	116	78	36	900	900	362	283	40	31
18	900	Kapalı	379	0	42	---	37	900	900	1003	870	111	97
19	900	1800	1132	1213	126	67	38	900	900	149	346	17	38

Tablo 5.30’da çözüm öncesi ve sonrasında ağ için elde edilen ortalama kapasite kullanım oranı, toplam seyahat süresi ve bu değerlerdeki iyileşme yüzdeleri verilmiştir. Yeni yapılandırma sonucunda ortalama kapasite kullanım oranında yaklaşık % 8, toplam seyahat süresinde ise yaklaşık % 14 mertebesinde iyileşmeler elde edilmiştir.

**Tablo 5.30** Senaryo 2 için çalışma ağına hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri

	Mevcut durum	Yeni yapılandırma	İyileşme
Ortalama kapasite kullanım oranı (%)	71.92	66.03	% 8.19
Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)	65.05	55.79	% 14.23

Şekil 5.18’de çalışma ağını oluşturan bağlardaki mevcut ve yeni yapılandırma sonrasındaki kapasite kullanım oranları görülmektedir.



**Şekil 5.18** Senaryo 2 için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları

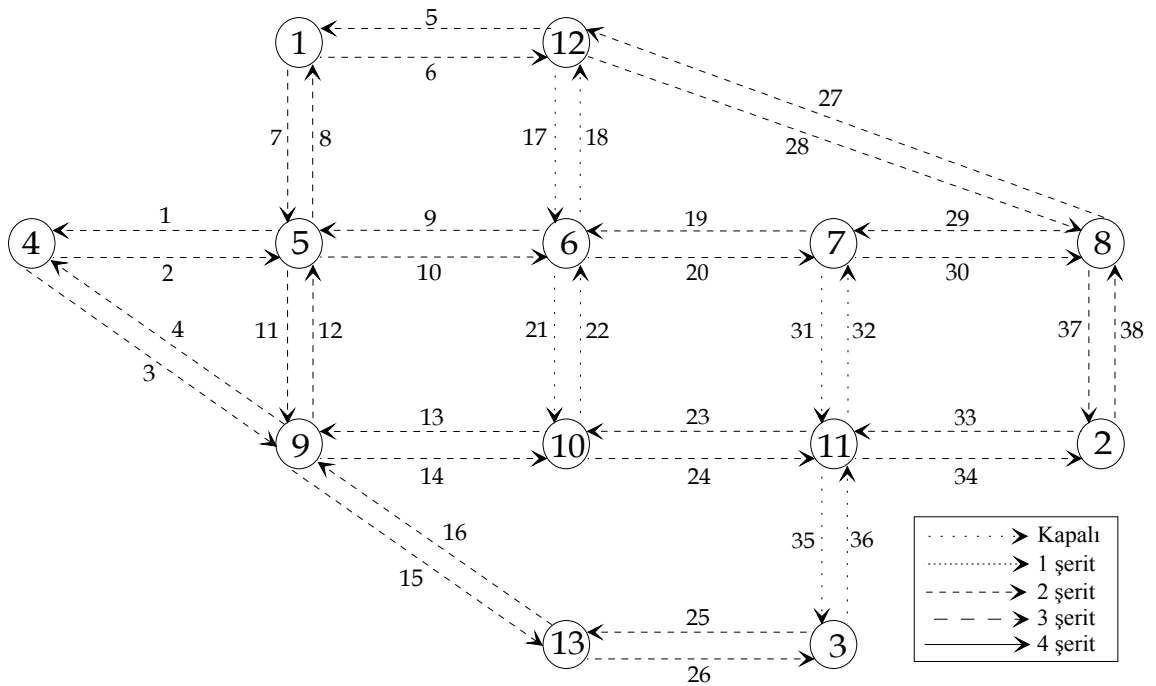
Şekil 5.18 incelendiğinde, çalışma ağının mevcut durumu için ağ genelindeki birçok bağda kapasite kullanım oranının % 100’ün üzerinde olduğu görülmektedir. Çözüm sonrası durumda ise 1, 7, 15, 33 ve 35 nolu bağlar dışındaki tüm bağlarda bu oran % 100’ün altına inmiştir.

#### 5.4.6.3. Senaryo 3: Kapalı bağlar dışındaki tüm bağlar yönlendirmeye aday

Karayolu ağlarında çeşitli bağların zaman zaman kapalı olması söz konusu olabilmektedir. Doğal afetler, altyapı arızaları veya kazalardan dolayı acil kapanmalar

olabileceği gibi, yolun yaya trafiğine ayrılması, ayrıcalıklı otobüs şeritlerinin inşası ya da önceden planlanan bakım/onarım çalışmaları nedeniyle de belli bir takvime uygun olarak bağ kapamaları da yapılabilmektedir. Böyle durumlarda, özellikle zirve saatlerde kapalı bağlardan kaynaklanan sıkışıklığın giderilebilmesi için şerit yönlendirme çalışmaları gerçekleştirilebilir.

Bu senaryo kapsamında, çalışma ağındaki 17, 18, 21, 22, 31, 32, 35 ve 36 nolu bağların kapalı olduğu ve diğer tüm bağların yönlendirme planına dahil olduğu varsayılmıştır. Kapalı bağlar gözönüne alındığında çalışma ağının görünümü Şekil 5.19'da verilmiştir.



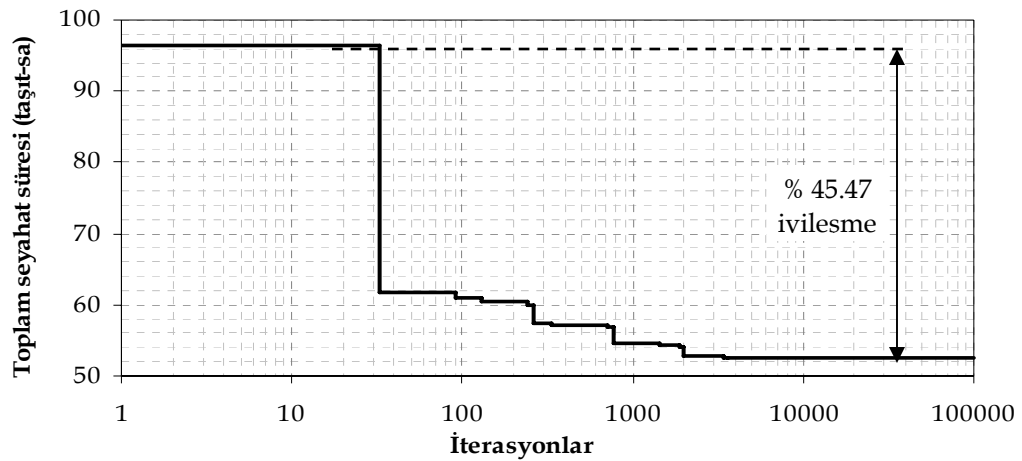
**Şekil 5.19** Senaryo 3 için çalışma ağının mevcut görünümü

Yukarıda bahsedilen 8 adet bağın kapalı olması durumunda yönlendirme öncesi bağ kapasiteleri, bağ trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları hesaplanmış ve Tablo 5.31'de verilmiştir.

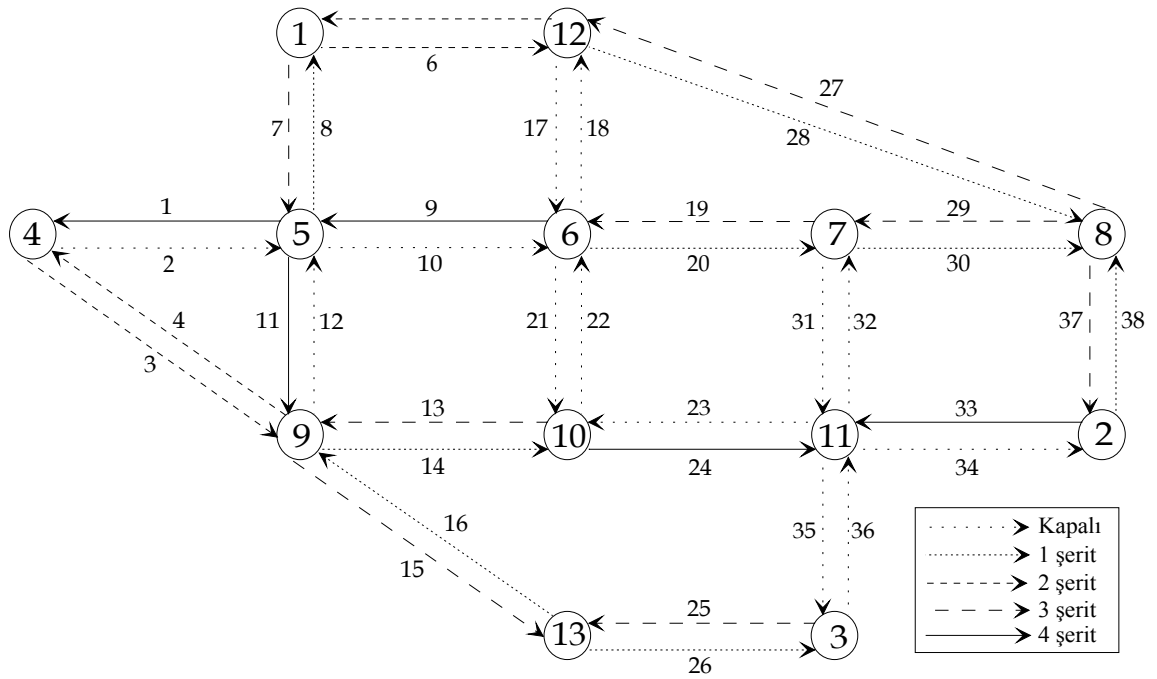
Tablo 5.31 incelendiğinde, yönlendirme öncesi ortalama kapasite kullanım oranının % 75, toplam seyahat süresinin ise yaklaşık 96 taşıt-sa mertebesinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, 7 adet bağda kapasite kullanım oranı % 100'ün üzerindedir. Şekil 5.20'de, Senaryo 3'ün çözümüne ilişkin yakınsama grafiği logaritmik ölçekte verilmiştir.

**Tablo 5.31** Senaryo 3 için çalışma ağındaki mevcut saatlik trafik hacimleri ve kapasite kullanım oranları

Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)	Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)
1	719	900	80	20	531	900	59
2	693	900	77	21	0	Kapalı	---
3	1219	900	135	22	0	Kapalı	---
4	201	900	22	23	509	900	57
5	582	900	65	24	310	900	34
6	570	900	63	25	1200	900	133
7	1498	900	166	26	215	900	24
8	319	900	35	27	1128	900	125
9	656	900	73	28	162	900	18
10	531	900	59	29	656	900	73
11	1405	900	156	30	531	900	59
12	324	900	36	31	0	Kapalı	---
13	509	900	57	32	0	Kapalı	---
14	310	900	34	33	509	900	57
15	2300	900	256	34	310	900	34
16	340	900	38	35	0	Kapalı	---
17	0	Kapalı	---	36	0	Kapalı	---
18	0	Kapalı	---	37	1260	900	140
19	656	900	73	38	169	900	19
<b>Ortalama kapasite kullanım oranı (%)</b>							75.23
<b>Ağdaki toplam seyahat süresi (taşıt-sa)</b>							96.36

**Şekil 5.20** Senaryo 3 için ARARULAT-SKD-2 modeli çözüm sürecinin yakınsama grafiği

Şekil 5.20 incelendiğinde, yakınsamanın yaklaşık 3500 iterasyon sonunda sağlandığı ve yeni bağ yönlendirme planının elde edildiği görülmektedir. Senaryo 3 için çalışma ağının yeni görünümü Şekil 5.21'de, yönlendirme planı Tablo 5.32'de verilmiştir.



Şekil 5.21 Senaryo 3 için çalışma ağının yeni görünümü

Tablo 5.32 Senaryo 3 için ARARULAT-SKD-2 modeli ile elde edilen bağ yönlendirme planı

<b>Bağ no</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$u_a$	2	-2	0	0	0	0	1	-1	2	-2	2	-2	1	-1	1	-1	-2	-2	1
<b>Bağ no</b>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
$u_a$	-1	-2	-2	-2	2	1	-1	1	-1	1	-1	-2	-2	2	-2	-2	-2	1	-1

Senaryo 3 için yeni bağ trafik hacimleri, kapasiteleri ve kapasite kullanım oranları Tablo 5.33’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde, yeni yapılandırma sonrasında ağdaki ortalama kapasite kullanım oranının % 75’den yaklaşık % 59’a, toplam seyahat süresinin ise 96 taşıt-sa değerinden yaklaşık 53 taşıt-sa değerine düştüğü görülmektedir.

Tablo 5.34’de çözüm öncesi mevcut durumda ve çözüm sonrası da ağ için elde edilen ortalama kapasite kullanım oranı, toplam seyahat süresi ve bu değerlerdeki iyileşme yüzdeleri verilmiştir. Yeni yapılandırma sonucunda ortalama kapasite kullanım oranında yaklaşık % 22, toplam seyahat süresinde ise yaklaşık % 45 mertebesinde iyileşmeler elde edilmiştir.

**Tablo 5.33** Senaryo 3'ün ARARULAT-SKD-2 modeli ile çözümü sonrasında hesaplanan saatlik trafik hacimleri, bağ kapasiteleri ve kapasite kullanım oranları

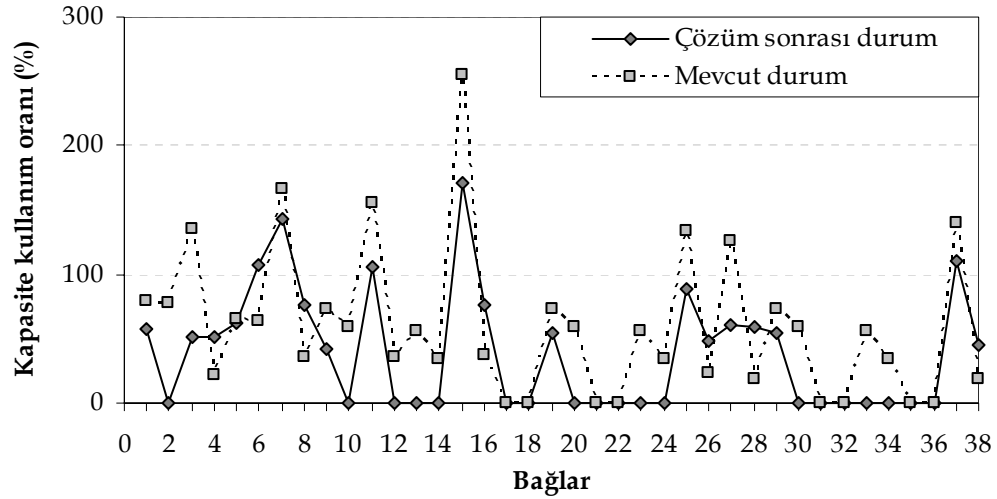
Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)	Bağ no	Trafik hacmi (taşıt/sa)	Bağ kapasitesi (taşıt/sa)	Kapasite kul. oranı (%)
1	1045	1800	58	20	0	450	0
2	0	Kapalı	---	21	0	Kapalı	---
3	465	900	52	22	0	Kapalı	---
4	465	900	52	23	0	Kapalı	---
5	553	900	61	24	0	1800	0
6	961	900	107	25	1200	1350	89
7	1940	1350	144	26	215	450	48
8	343	450	76	27	814	1350	60
9	743	1800	41	28	266	450	59
10	0	Kapalı	---	29	743	1350	55
11	1900	1800	106	30	0	450	0
12	0	Kapalı	---	31	0	Kapalı	---
13	0	1350	0	32	0	Kapalı	---
14	0	450	0	33	0	1800	0
15	2300	1350	170	34	0	Kapalı	---
16	340	450	76	35	0	Kapalı	---
17	0	Kapalı	---	36	0	Kapalı	---
18	0	Kapalı	---	37	1490	1350	110
19	743	1350	55	38	200	450	44
<b>Ortalama kapasite kullanım oranı (%)</b>							58.52
<b>Ağdaki toplam seyahat süresi (taşıt-sa)</b>							52.54

**Tablo 5.34** Senaryo 3 için çalışma ağında hesaplanan ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerleri

	Mevcut durum	Yeni yapılandırma	İyileşme
<b>Ortalama kapasite kullanım oranı (%)</b>	75.23	58.52	% 22.21
<b>Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)</b>	96.36	52.54	% 45.47

Şekil 5.22'de çalışma ağını oluşturan bağlardaki mevcut ve yeni yapılandırma sonrasındaki kapasite kullanım oranları görülmektedir.

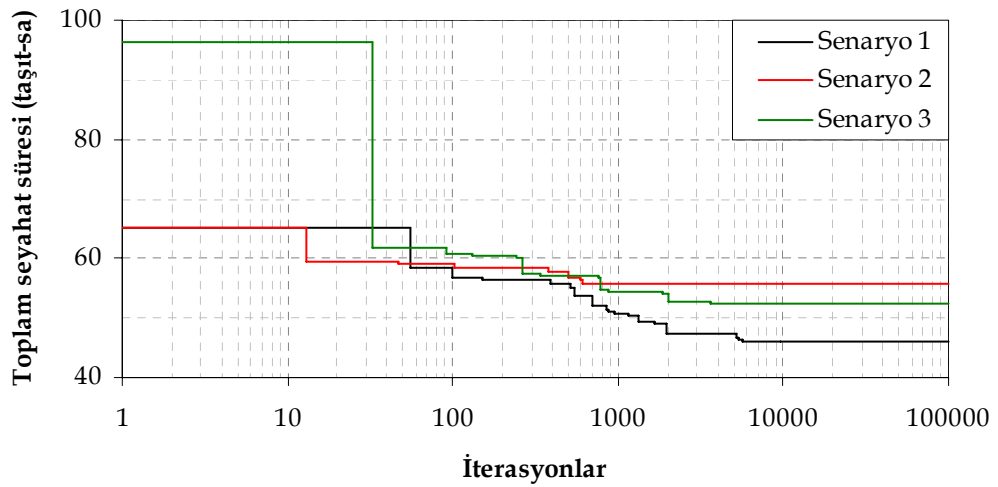
Şekil 5.22 incelendiğinde, çalışma ağının mevcut durumu için ağ genelindeki birçok bağda kapasite kullanım oranının % 100'ün üzerinde olduğu görülmektedir. Özellikle çözüm öncesi kapasite kullanım oranı % 250 mertebesinde olan 15 nolu kritik bağ için bu değer çözüm sonrasında % 170 mertebesine düşürülmüştür.



Şekil 5.22 Senaryo 3 için çözüm öncesi ve sonrası kapasite kullanım oranları

#### 5.4.6.4. Senaryoların karşılaştırılması

Şerit yönlendirme problemi için oluşturulan senaryoların çözüm sürecinde çalışma aşındaki toplam seyahat süresinin değişimi Şekil 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5.23 ARARULAT-SKD-2 modeli ile senaryoların çözümü sonucunda elde edilen toplam seyahat süresi yakınsama grafiği

Şekil 5.23 incelendiğinde, 1 ve 2 nolu senaryoların aynı başlangıç çözümüne sahip oldukları görülmektedir. Ancak, çözüm sonunda elde edilen toplam seyahat süreleri incelendiğinde Senaryo 1’de, Senaryo 2’ye göre daha düşük toplam seyahat süresi değerine ulaşıldığı görülmektedir. Bunun nedeni, karayolundaki tüm bağların yönlendirme planına dahil edilmiş olmasıdır. Senaryo 3’e ait yakınsama süreci incelendiğinde, 1 ve 2 nolu senaryolardan daha yüksek bir başlangıç çözümüne sahip



olduğu görülmektedir. 3. senaryoya göre ağda 8 adet kapalı bağ bulunması, ağdaki trafik sıklığının artması ve dolayısıyla toplam seyahat süresinin de artmasına neden olmuştur. Ancak çözüm sonrasında, Senaryo 3 kapsamında elde edilen toplam seyahat süresi değeri Senaryo 2'nin sonucundan daha düşüktür.

Tüm senaryolar için hesaplanan başlangıç ve bitiş ağ seyahat süresi değerleri ile ortalama kapasite kullanım oranları ve bu değerlere ait iyileşme yüzdeleri Tablo 5.35'de verilmiştir.

**Tablo 5.35** Senaryoların çözümü sonucunda elde edilen toplam seyahat süresi, ortalama kapasite kullanım oranları ve bu değerlere ait iyileşme yüzdeleri.

		Mevcut durum	Yeni yapılandırma	İyileşme (%)
<b>Senaryo 1</b>	Ortalama kapasite kullanım oranı (%)	71.92	55.43	22.93
	Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)	65.05	46.03	29.23
<b>Senaryo 2</b>	Ortalama kapasite kullanım oranı (%)	71.92	66.03	8.19
	Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)	65.05	55.79	14.23
<b>Senaryo 3</b>	Ortalama kapasite kullanım oranı (%)	75.23	58.52	22.21
	Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)	96.36	52.54	45.47

Tablo 5.35 incelendiğinde, genel yönlendirme planını temsil eden Senaryo 1'de, kısmi yönlendirmeyi temsil eden Senaryo 2'ye göre ortalama kapasite kullanım oranı ve toplam seyahat süresi değerlerinde daha yüksek iyileşme yüzdeleri elde edildiği görülmektedir. Senaryo 3'ün sonuçları incelendiğinde, ortalama kapasite kullanım oranındaki iyileşmenin % 22 mertebesinde olduğu ve bu değer Senaryo 1'de elde edilen % 23'lük değere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ancak, kapalı bağlardan dolayı oluşan trafik sıklığından dolayı Senaryo 3'e göre başlangıç durumunda ağdaki toplam seyahat süresi 96 taşıt-sa mertebesindeydi. Optimum yönlendirme planının bulunmasından sonra bu değer 53 taşıt-sa mertebesine gerilemiş ve yaklaşık % 45'lik değerle en yüksek iyileşme oranı Senaryo 3'de gerçekleşmiştir.

### 5.5. Duyarlılık Analizleri

Bu çalışma kapsamında geliştirilen ve detayları 4. Bölümde verilen ARARULAT-SKD modellerinin AUAT kapsamında, ağdaki toplam seyahat süresinin minimizasyonu için optimum ilave ve yönlendirme planlamasında kullanılabileceği bu bölümde ele

alınan sayısal uygulamalar sonucunda görülmüştür. Ancak, bir karayolu ulaşım ağındaki toplam seyahat süresinin değişimi sadece bağ ve şeritlere ilişkin yapılandırma ya da ilavelere bağlı değildir. Problem çıktıları üzerinde etkili olabilecek temel unsurlar arasında, bağ seyahat süresi fonksiyonu, rota seçim modeli, şerit genişlikleri/kapasiteleri ve çözüm yöntemine ilişkin çeşitli parametreler sayılabilir. Bu çalışmada kullanılan BPR bağ seyahat süresi fonksiyonu ve C-Logit rota seçim modeli, UAT problemlerinin çözümünde literatürde sıkça kullanılan ve günümüzde geçerliliğini koruyan modellerdir. Buna karşın, ele alınan probleme ilişkin detaylı analiz gerektiren bazı hususlar bulunmaktadır. Bunlar:

- Şerit genişlik/kapasitelerinin toplam seyahat süresi ve çözüm sonucunda elde edilen iyileşmeye etkisi,
- ARAR optimizasyon parametrelerinin çözüm süreci ve sonuca olan etkisidir.

Ayrıca, ARARULAT modellerinin çözüm performanslarının farklı şerit kapasiteleri ve ARAR parametrelerine olan duyarlılığının araştırılması, model güvenilirliğinin belirlenmesi açısından da önem taşımaktadır. Bu kapsamda, ARARULAT-SKD-1 modeli için duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

#### **5.5.1. ARARULAT-SKD-1 modelinin şerit kapasitelerine duyarlılığı**

Bu bölüme kadar yapılan analizlerde kullanılan 450, 555 ve 630 taşıt/şerit-sa'lik kapasite değerlerine ek olarak, 700, 800, 900, 1000, 1100 ve 1200 taşıt/şerit-sa'lik şerit kapasiteleri için ARARULAT-SKD-1 modeli Nguyen-Dupuis test ağına uygulanmıştır. Sonuçları bilinen 3 farklı şerit genişliğine ek olarak analizlere ilave edilen 6 yeni şerit genişliği için yapılan analizler sonucunda elde edilen toplam seyahat süreleri ve bu sürelerdeki iyileşme oranları Tablo 5.36'da verilmiştir.

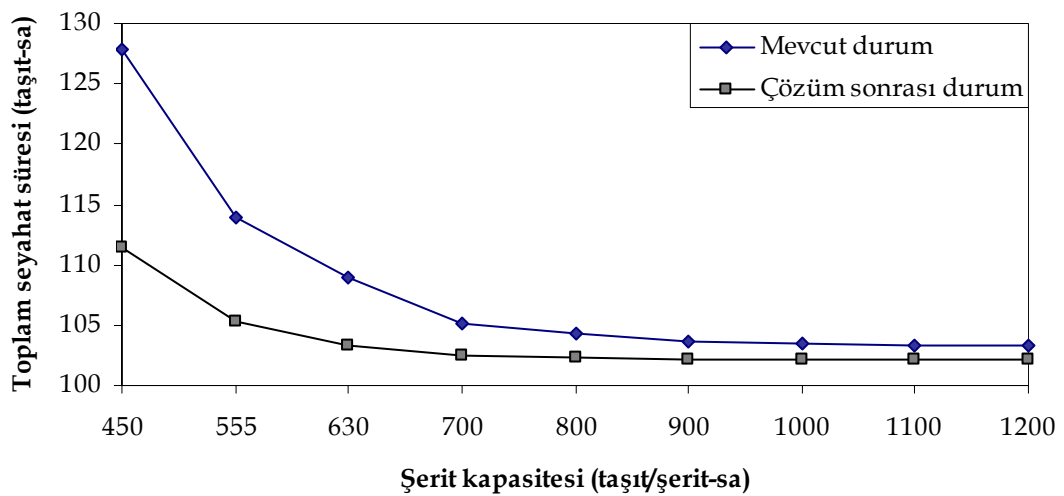
Tablo 5.36 incelendiğinde, ağın çözüm öncesi ve sonrasındaki durumları için en yüksek toplam seyahat süresi değerlerinin 450 taşıt/şerit-sa'lik kapasite değerleri için elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, toplam seyahat süresindeki en yüksek iyileşme oranı da yaklaşık %13 olarak 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için hesaplanmıştır. Toplam seyahat süresi değerleri ve bu değerlerdeki en düşük iyileşmeler ise analizlerde göz önüne alınan en yüksek bağ kapasite değeri olan 1200 taşıt/şerit-sa için elde

edilmiştir. Bu da, trafik sıkışıklıklarının yüksek olduğu karayolu ağlarında gerçekleştirilecek uygun tasarımlarla, bu sıkışıklıkların çok daha yüksek oranda giderilebileceğini göstermektedir. Farklı seyahat süreleri için gerçekleştirilen ARARULAT-SKD-1 model çözümleri sonucunda elde edilen toplam seyahat süresi değerleri ve iyileşme oranları Şekil 5.24 ve Şekil 5.25’de grafiksel olarak verilmiştir.

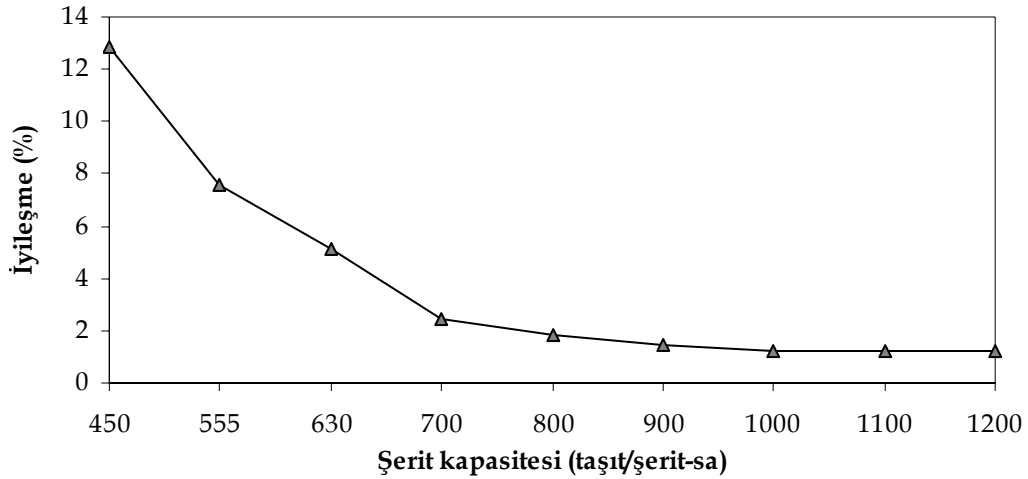
**Tablo 5.36** ARARULAT-SKD-1 modelinin şerit kapasitelerine bağlı duyarlılık analiz sonuçları (M: Mevcut durum, Y: Yeni durum)

Kapasite (taşıt/şerit-sa)	Toplam seyahat süresi (M) (taşıt-sa)	Toplam seyahat süresi (Y) (taşıt-sa)	İyileşme (%)
450	127.80	111.39	12.84
555	113.99	105.38	7.55
630	108.96	103.36	5.14
700	105.12	102.56	2.44
800	104.23	102.28	1.87
900	103.69	102.19	1.45
1000	103.41	102.14	1.23
1100	103.38	102.13	1.21
1200	103.37	102.13	1.20

Şekil 5.24 ve Şekil 5.25 incelendiğinde, şerit genişliklerindeki artış karşısında, karayolu ağındaki toplam seyahat süreleri ve bu sürelerdeki iyileşme oranlarının azaldığı görülmektedir. Bundan dolayı, ARARULAT-SKD-1 modelleri ile düşük şerit kapasitelerinden kaynaklanan trafik sıkışıklıklarının daha yüksek oranda giderilebildiği söylenebilir.



**Şekil 5.24** Farklı şerit genişlikleri için ARARULAT-SKD-1 çözümü ile elde edilen toplam seyahat süresi değerleri



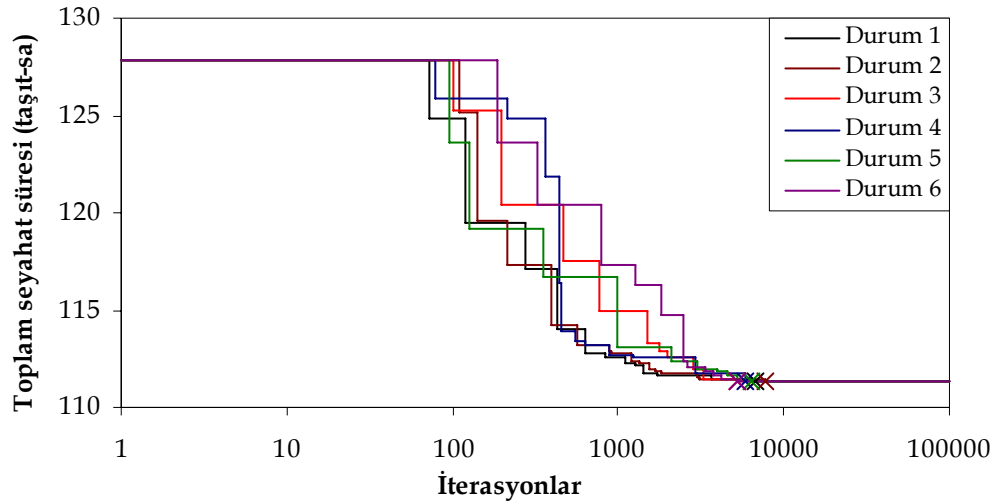
**Şekil 5.25** Farklı şerit genişlikleri için Nguyen-Dupuis test ağındaki toplam seyahat süresi değerinde hesaplanan iyileşme oranları

### 5.5.2. ARARULAT-SKD-1 modelinin ARAR parametrelerine duyarlılığı

ARAR parametrelerinin çözüm üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla 450 taşıt/şerit-sa'lık şerit kapasitesi ve 6 farklı parametre seti içeren durumlar için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu durumlar için kullanılan parametre değerleri, analiz sonuçları ve çözüm için gerekli iterasyon sayıları Tablo 5.37'de, çözüm süreçleri boyunca ağdaki toplam seyahat süresinin değişimi ve saniye cinsinden CPU süreleri Şekil 5.26'da verilmiştir.

**Tablo 5.37** Armoni araştırması parametrelerine bağlı duyarlılık analizinde dikkate alınan durumlar ve çözüm sonuçları

	HMS	HMCR	PAR	İterasyonlar	Toplam seyahat süresi (taşıt-sa)	CPU süresi (s)
Durum 1	100	0.95	0.45	6750	111.39	469
Durum 2	100	0.90	0.40	7823	111.39	459
Durum 3	100	0.85	0.35	5319	111.39	348
Durum 4	50	0.95	0.45	5784	111.39	388
Durum 5	50	0.90	0.40	6424	111.39	440
Durum 6	50	0.85	0.35	5175	111.39	371



**Şekil 5.26** Duyarlılık analizine ilişkin yakınsama grafiği

Tablo 5.37 ve Şekil 5.26 incelendiğinde, farklı parametre setlerinden oluşan durumlar için yakınsamanın farklı iterasyon sayıları ve çözüm sürelerinde elde edildiği ancak tüm durumlar için aynı toplam seyahat süresi değerinin yani aynı şerit ilave yapılandırmasının elde edildiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, armoni araştırması optimizasyon tekniğinin AUAT probleminin çözümüne uygulanabilirliğini göstermiştir.

## 5.6. Sonuçlar

Bu bölümde, şerit ilavesi ve şerit yönlendirmelerini ele alan AUAT problemlerinin çözümü için geliştirilen ARARULAT model performanslarının test edilmesi amacıyla bir dizi sayısal uygulama gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, şerit genişliklerinin ağdaki toplam seyahat süresine olan etkisi incelenmiş ve problemin armoni araştırması optimizasyon tekniği parametrelerine olan duyarlılığının belirlenmesi amacıyla 6 farklı parametre seti içeren bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerden aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

AUAT probleminin çözümü için geliştirilen ARARULAT-SKD modelleri, karayolu ulaşım ağlarındaki optimum şerit ilave ve yönlendirme planlarının elde edilmesinde kullanılabilir.

Şerit ilavesi problemi için farklı şerit genişliklerinin toplam seyahat süresi üzerindeki etkileri incelendiğinde, düşük şerit genişlikleri için yüksek şerit genişliği

değerlerine göre toplam seyahat süresinde daha yüksek iyileşme oranları elde edildiği görülmüştür.

ARARULAT-SKD-1 modelinin performansını test etmek amacıyla şerit ilavesi problemi, ARARULAT-DKD-2 ve ARARULAT-İSİ modelleri ile çözülmüştür. Sonuçlar, ARARULAT-İSİ modelinin AUAT problemlerinin çözümünde başarılı sonuçlar vermediğini göstermiştir. ARARULAT-DKD-2 modeli ile elde edilen iyileşme oranları, ARARULAT-SKD-1 modelinden elde edilen oranlardan daha yüksek olmasına karşın, deterministik yaklaşımda TA çıktılarının sürücü davranışlarının iyi düzeyde temsil edilmediği görülmüştür.

Armoni araştırması parametrelerinin çözüm performansı üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla 6 farklı parametre seti içeren bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, farklı parametre setleri için optimum ağ yapılandırma planının elde edilebildiğini göstermiştir. Ayrıca, farklı parametre setlerinin yakınsama için gerekli iterasyon sayısını ve çözüm süresini etkilediğini ortaya koymuştur.

Şerit yönlendirme probleminin çözümü için geliştirilen ARARULAT-SKD-2 modeli, 3 farklı senaryo için test ağına uygulanmıştır. Analizler, şerit ilavesi probleminin çözümünden elde edilen sonuca dayanarak en yüksek iyileşme oranının elde edildiği 3.05 m'lik şerit genişliği için gerçekleştirilmiştir. Özellikle ağ üzerindeki belli yol kesimlerinin kapalı olması durumunda ortaya çıkacak trafik sıkışıklıklarının şerit yönlendirme çalışmaları ile çözülebileceği, toplam seyahat süresinde elde edilen yaklaşık % 45'lik iyileşme oranı ile ortaya koyulmuştur.

Şerit yönlendirmesine ilişkin senaryolar doğrultusunda iki önemli sonuca ulaşmak mümkündür. Bunlardan birincisi, ağ genelinde yapılacak yönlendirme ile kısmi yönlendirmeye göre toplam seyahat süresinde daha yüksek iyileşme elde etmek mümkündür. İkinci olarak, ağı oluşturan bağlardan bir veya birkaçının kapalı olması durumunda toplam seyahat süresindeki artış, uygun bir yönlendirme planı sayesinde sonucunda etkili şekilde azaltılabilmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında öncelikle, AUAT probleminin çözümü için literatürde geliştirilen çözüm yaklaşımları detaylı olarak incelenmiştir. DOKTP problemi olarak ele alınan AUAT probleminin çözümünde, dal-sınır yaklaşımı tabanlı yöntemlerin yoğun olarak kullanıldığı görülmüştür. Ancak, büyük ölçekli karayolu ağları için ele alınan problemlerin çok sayıda ayrık ve tamsayı karar değişkeni içermesinden dolayı, dal-sınır yaklaşımının yüksek çözüm süresi ve çözüm kapasitesi gerektirdiği belirtilmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, tasarım probleminin çözümü için sezgisel optimizasyon algoritmaların kullanımı önerilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen ARARULAT modelleri, ARAR optimizasyon tekniği ile ayrık tasarım probleminin çözümünü ele almaktadır.

Geliştirilen ARARULAT modelleme yaklaşımının doğrulanması amacıyla ARARULAT-DKD-1 modeli, Sioux-Falls test ağındaki şerit iyileştirme probleminin çözümüne uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, aynı problemin literatürde dal-sınır ve destek fonksiyonu yaklaşımları çözümünden elde edilen sonuçlarla aynıdır. Optimum çözümü bilinen bu problemin çözümüyle, ARARULAT modellerinin AUAT problemlerinin çözümünde kullanılabileceği görülmüştür.

AUAT kapsamında ele alınan ilk problem şerit ilavesi problemidir. Şerit ilavesi problemi öncelikle sırasıyla 450, 555 ve 630 taşıt/şerit-sa'lik kapasite değerleri için ARARULAT-SKD-1 modeli ile çözülmüştür. Öngörülen yatırım bütçesi için başlangıç durumuna göre toplam seyahat süresi değerindeki en yüksek iyileşme, yaklaşık %13 olarak 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için elde edilmiştir. Ayrıca, ağın mevcut durumu için yaklaşık %120 seviyesinde olan ortalama kapasite kullanım oranı, iyileştirme sonrasında yaklaşık %98 mertebesine düşmüştür. Bu da, elde edilen şerit ilave

yapılandırması sonucunda ağ kapasitesinin daha etkin kullanıldığını ve bağ trafik hacimlerinin bağ kapasitelerini aşmasından kaynaklanan sıkışıklıkların azaltıldığını göstermiştir.

AUAT problemlerinin çözümünde DKD ve SKD kabullerinin sonuca olan etkisini araştırmak amacıyla, şerit ilavesi problemi ARARULAT-DKD-2 modeli ile çözülmüştür. Bu modelle elde edilen toplam seyahat süresi değerinin hem başlangıç hem de çözüm sonrası durumda ARARULAT-SKD-1 modelinin sonuçlarından daha düşük olduğu bulunmuştur. Ancak, ağ toplam seyahat süresinin hesaplanmasında kullanılan DKD ataması probleminin çözümüyle elde edilen bağ trafik hacimleri incelendiğinde test ağındaki birçok bağın hiç trafik talebi görmezken, bazı bağlarda kapasitenin oldukça aşıldığı görülmüştür. Tasarım aşamasında bu çelişkili durumun göz ardı edilmesi ya da doğru kabul edilmesi, gerçekleştirilecek bir tasarım sonrasında hem yapılan yatırımdan beklenen faydanın sağlanamaması ya da Braess' paradoksunun ortaya çıkmasına ve trafik sıkışıklıklarının artmasına neden olabilir.

ARARULAT-SKD-1 modelinin etkin test etmek amacıyla şerit ilavesi problemi, ARARULAT-İSİ modeli ile çözülmüştür. ARARULAT-İSİ modeli ile AUAT probleminin çözümünde yakınsama sağlanamamış ve çözüm sonrasında, başlangıca göre daha yüksek bir ağ toplam seyahat süresi değeri bulunmuştur. Şerit ilavesi probleminin 3 farklı modelle çözümünden elde edilen sonuçlar, DKD kabulünün AUAT problemlerinde sürücü davranışlarını doğru temsil edemediğini, Cournot-Nash oyunu olarak da bilinen iki-seviyeli iteratif çözüm yaklaşımının ise ağ seyahat süresi ve bağ trafik hacimleri arasındaki ilişkiyi doğru şekilde modelleyemediği için yakınsama sağlayamadığını göstermiştir.

Şerit ilavesi problemi için gerçekleştirilen model testleri, ARARULAT-SKD-1 modelinin etkinliğini ortaya koymuştur. Bundan dolayı, AUAT kapsamında ele alınan diğer problem olan şerit yönlendirme problemi, benzer yaklaşım olan ARARULAT-SKD-2 yaklaşımı ile 3 farklı senaryo altında çözülmüştür. Bu senaryolar sırasıyla, genel yönlendirme, kısmi yönlendirme ve belli güzergahların trafiğe kapalı olması durumunda yapılacak AUAT tasarımlarını içermektedir. Yapılan analizler sonucunda, genel yönlendirme planı için toplam seyahat süresindeki iyileşme oranı %29 mertebesindeyken, bu değer kısmi iyileştirme planı için %14 olarak hesaplanmıştır.



Senaryo 3'ün çözümüyle elde edilen iyileşme değeri yaklaşık %45'dir. Ayrıca, hesaplanan toplam seyahat süresi değerleri incelendiğinde, çözüm öncesi ve sonrasında en yüksek değerlerin yine Senaryo 3'de elde edildiği görülmüştür. Dolayısıyla, şerit yönlendirme problemi için elde edilen en yüksek iyileşme oranı, karayolu ağındaki belli bağların trafiğe kapalı olması durumunda yapılacak yönlendirmeler ile elde edilmiştir.

Çalışmada, duyarlılık analizi ile şerit ilavesi problemi için farklı şerit kapasitesi değerlerinin toplam seyahat süresi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, 450 ile 1200 taşıt/şerit-sa kapasite değerleri arasındaki değerler için ARARULAT-SKD-1 modeli ile analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ağı çözüm öncesi ve sonrasındaki durumları için en yüksek toplam seyahat süresi değerlerinin 450 taşıt/şerit-sa'lik kapasite değeri için elde edildiği göstermiştir. Ayrıca, toplam seyahat süresindeki en yüksek iyileşme oranı da yaklaşık %13 olarak 450 taşıt/şerit-sa kapasite değeri için hesaplanmıştır. Toplam seyahat süresi değerleri ve bu değerlerdeki en düşük iyileşme oranları ise analizlerde göz önüne alınan en yüksek bağ kapasite değeri olan 1200 taşıt/şerit-sa için elde edilmiştir.

Şerit ilavesi probleminin kapasitelere bağlı duyarlılık analizinden ve şerit yönlendirme probleminin senaryolarından aşağıdaki özel sonuçlar çıkarılabilir:

- Bir karayolu ağındaki bağ kapasitelerinin düşük olması, trafik sıkışıklıklarının ve ağdaki toplam seyahat süresi değerinin artmasına neden olmaktadır.
- Trafik sıkışıklıklarının yüksek olduğu karayolu ağlarında gerçekleştirilecek uygun tasarımlarla, bu sıkışıklıklar çok daha yüksek oranda giderilebilir.

ARAR parametrelerinin ARARULAT modellerinin çözüm performansı üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla, 6 farklı ARAR parametre seti için şerit ilavesi problemi ARARULAT-SKD-1 modeli ile çözülmüştür. Sonuçlar, tüm parametre setleri aynı toplam ağ seyahat süresi ve şerit ilave yapılandırmasının elde edildiğini göstermiştir. Ancak, farklı parametre setlerinin yakınsama için gerekli iterasyon sayısını ve çözüm süresini etkilediğini ortaya koymuştur.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen ARARULAT modelleri ile elde edilen sonuçlar, sezgisel ARAR optimizasyon tekniğinin, DOKTP problemi olarak ele alınan AUAT problemlerinin çözümünde kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

## 6.2. Öneriler

Bu çalışma kapsamında geliştirilen ARARULAT modelleri ile bir karayolu ağındaki şerit ilave ve yönlendirme planlarının etkin bir şekilde belirlenebilmesine rağmen, sayısal uygulamalar belli kabuller altında yapılmıştır. Örneğin, gerçekte bir karayolu ağındaki tüm bağların aynı şerit sayılarına ve şerit kapasitelerine sahip olmadığı durumlarla karşılaşılabılır. Bu nedenle gerçek problem uygulamalarında, tasarımı planlanan yol ağı ile ilgili fiziksel verilerin dikkatle derlenerek modelleme çalışmalarında kullanılması gerekmektedir.

Karayolu ağındaki kavşaklardaki kontrol mekanizmalarının ya da akıllı ulaşım sistemlerinin trafik akışı ve kapasite üzerindeki etkileri, ARARULAT modellemelerinin kapsamı dışında bırakılmıştır. Gelecek çalışmalarda, sinyal parametrelerini de ayrık değişkenler olarak modellemeye dahil eden çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesi, mevcut UAT literatürüne katkı sağlayacaktır.

Bağ seyahat süreleri üzerinde büyük etkisi olan yol kenarı parkları, şişe boynu kesimlerinin yerleri ve sıklığı, yaya geçitleri gibi trafik akışının olumsuz etkilendiği durumlar, gerçek uygulamalarda dikkate alınmalıdır. Mümkünse, tasarım çalışmalarında kullanılmak üzere ağa özgü bağ seyahat süresi fonksiyonları, gözlem ve modelleme çalışmaları ile belirlenmelidir. Bu sayede, daha etkili modelleme çalışmaları yapmak mümkün olabilecektir.

Şerit yönlendirme problemlerinin çözümüyle, genel yönlendirme planlarının kısmi yönlendirme planlarına göre daha etkili sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak, genel yönlendirme planları uygulama aşamasında bir takım sıkıntılar yaratabilir. Örneğin, bir yerleşim biriminde sabah ve akşam zirve saatlerinde birçok bağda şerit yönlendirmelerinde değişiklik yapılması, trafiğin düzenlenmesi ve yol kullanıcılarının yönlendirilmesi gibi zorlu çalışmalar gerektirmektedir. Ayrıca, belli güzergahlardaki

şerit yönlendirmelerinin gün içinde birkaç kez değiştirilmesinin sosyal tepkilere neden olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

ARARULAT model çalışmalarında TA simülasyonları, saatlik sabit B-V talepleri için gerçekleştirilmiştir. Dinamik TA yaklaşımının AUAT probleminin çözümünde kullanılması, gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

Geliştirilen ARARULAT modellerinin demiryolu ağlarına uygulanarak verimsiz hatlar ile mevcut kapasitenin yetersiz olduğu hatların belirlenmesi ve kapasite iyileştirme çalışmalarının yapılması tez kapsamı dışında olduğu için gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

## 7. KAYNAKLAR

- Abdulaal, M. and LeBlanc, L. J. (1979) Continuous equilibrium network design models. *Transportation Research Part B*, 13: 19–32.
- Allsop, R. E. (1974) Some possibilities of using traffic control to influence trip distribution and route choice. *Proceedings of the 6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Elsevier, Amsterdam, s. 345–374.
- Arora, J. S. (2004) Introduction to Optimum Design. *Elsevier Academic Press*, California, 728s.
- Ayvaz, M. T., (2007) Simultaneous Determination of Aquifer Parameters and Zone Structures with Fuzzy c-Means Clustering and Meta-Heuristic Harmony Search Algorithm. *Advances in Water Resources*, 30: (11) 2326–2338.
- Ayvaz, T. (2008) Heterojen bir akiferde pompaj kuyu karakteristiklerinin genetik algoritma ile belirlenmesi, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 134s.
- Ayvaz, M. T., Kayhan, A. H., Ceylan, H. and Gurarslan, G., (2009) Hybridizing harmony search algorithm with a spreadsheet solver for solving continuous engineering optimization problems. *Engineering Optimization*, (in press).
- Ban, J. X., Liu, H. X., Ferris, M. C. and Ran, B. (2006) A general MPCC model and its solution algorithm for continuous network design problem. *Mathematical and Computer Modelling*, 43: (5–6) 493–505.
- Beckmann, M. J., McGuire, C. B. and Winsten, C. B. (1956) Studies in Economics of Transportation. *Yale University Press*, New Haven.
- Bell, M. G. H. and Iida, Y. (1997) Transportation Network Analysis. *John Wiley & Son Ltd.*, England, 216s.
- Boyce, D.E., (1984) Urban transportation network equilibrium and design models: recent achievements and future perspectives. *Environment and Planning*, 16A: 1445–1474.
- Braess, D. (1969) Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. *Unternehmensforschung*, 12: 258–268.
- Bureau Of Public Roads (1999) Traffic Assignment Manual, *U.S. Department of Commerce*, Washington.
- Cantarella, G. E. and Sforza, A. (1991) Traffic assignment In: Traffic & Transportation

- Systems, (Papageorgioe Ed.), *Oxford Press*, s513–520.
- Cantarella, G.E., (1997) A general fixed-point approach to multi-mode multi-user equilibrium assignment with elastic demand. *Transportation Science*, 31: 107–128.
- Cascetta, E., Nuzzolo, A., Russo, F. and Vitetta, A. (1996) A Modified Logit Route Choice Model Overcoming Path Overlapping Problems: Specification and Some Calibration Results for Interurban Networks. *Proceedings of 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Lyon, Fransa, s. 697–711.
- Ceylan, H. (2002) A Genetic Algorithm Approach to the Equilibrium Network Design Problem. Doktora Tezi, *University of Newcastle upon Tyne*, England, 173s.
- Ceylan, H. and Bell, M. G. H. (2004a) Traffic signal timing optimisation based on genetic algorithm approach, including drivers' routing. *Transportation Research Part B*, 38: (4) 329–342.
- Ceylan, H. and Bell, M. G. H. (2004b) Reserve capacity for a road network under optimized fixed time traffic signal control. *ITS Journal-Intelligent Transportation Systems Journal*, 8: (2) 87–99.
- Ceylan, H. and Bell, M. G. H. (2004c) Sensitivity analysis of stochastic equilibrium transportation networks. *Journal of Advanced Transportation*, 38: (4) 291–321.
- Ceylan, H. and Bell, M. G. H. (2005) Genetic algorithm solution for the stochastic equilibrium transportation networks under congestion. *Transportation Research Part B*, 39: 169–185.
- Ceylan, H., Ceylan, H., Haldenbilen, S. and Baskan, O. (2008) Transport Energy Modeling with Meta-Heuristic Harmony Search Algorithm, an Application to Turkey. *Energy Policy*, 36: 2527–2535.
- Ceylan H. and Ceylan H. (2009a) Application of Harmony Search Algorithm for the Solution of Transport Energy Demand Modeling Problems, Music-Inspired Harmony Search Algorithm: Theory and Applications, Studies in Computational Intelligence Series, (Geem, Z. W.), *Springer Berlin*, Heidelberg, s163-172.
- Ceylan, H. and Ceylan, H. (2009b) Şehirçi Karayolu Ağlarının Ayrık Tasarımında Sezgisel Armoni Araştırması Yöntemi Uygulaması. **8. Ulaştırma Kongresi**, İstanbul.
- Chen, M. and Alfa, A. S. (1991) A network design algorithm using a stochastic incremental traffic assignment approach. *Transportation Science*, 25: 215–224.
- Chen, A., Subprasom, K., and Ji, Z. W. (2006) A simulation-based multiobjective genetic algorithm (SMOGA) procedure for BOT network design problem. *Optimization and Engineering*, 7(3): 225–247.
- Cheng, Y. M., Li, L., Lansivaara, T., Chi, S. C. And Sun, Y. J. (2008) An improved harmony search minimization algorithm using different slip surface generation methods for slope stability analysis. *Engineering Optimization*, 40: (2) 95-115.

- Chiou, S. W. (2005) Bilevel programming for the continuous transport network design problem. *Transportation Research Part B*, 39: (4) 361–383.
- Chriqui, C. (1974) *Reseaux de Transport en Commun: les Problemes de Cheminement et d'Acces*. *Centre de recherche sur les transports*, Publication no. 11, Universite de Montreal.
- Chriqui, C. and Robillard, P. (1975) Common Bus Lines. *Transportation Science*, 9: 115–121.
- Coelho, L. D. and Bernert, D. L. D., (2009) An improved harmony search algorithm for synchronization of discrete-time chaotic systems. *Chaos Solitons & Fractals*, 41: (5) 2526–2532.
- Cominetti, R. and Correa, J. (2001) Common-Lines and Passenger Assignment in Congested Transit Networks. *Transportation Science*, 35: (3) 250–267.
- Cree, N. D., Maher, M. J. and Paechter, B. (1999) The continuous equilibrium optimal network design problem: a genetic approach. *Proceedings of the 4th Euro Transportation Meeting*, s163-174.
- Daganzo, C. F. and Sheffi, Y. (1977) On stochastic models of traffic assignment. *Transportation Science*, 11: 253–274.
- Daganzo, C.F., (1983) Stochastic network equilibrium with multiple vehicle types and asymmetric, indefinite link cost Jacobians. *Transportation Science*, 17: 282–300.
- Davis, G. A. (1994) Exact local solution of the continuous network design problem via stochastic user equilibrium assignment. *Transportation Research*, 28: (1) 61–75.
- De Cea, J., Bunster, J. P., Zubieta, L. and Florain, M. (1988) Optimal Strategies and Optimal Routes in Public Transit Assignment Models: An Empirical Comparison. *Traffic Engineering and Control*, 520–526.
- De Cea, J. and Fernandez, E. (1993) Transit Assignment for Congested Public Transport Systems: An Equilibrium Model. *Transportation Science*, 27: (2) 133–147.
- De Jong, K. D. (1975) *An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*, Doktora Tezi, *Department of Computer and Communication Sciences, University of Michigan*, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Degertekin, S. O., (2008) Optimum design of steel frames using harmony search algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 36: (4) 393–401.
- Dial, R. B. (1971) A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration. *Transportation Research*, 5: (2) 83–111.
- Drezner, Z. and Wesolowsky, G. O. (1997) Selecting an optimum configuration of one-way and two-way routes. *Transportation Science*, 31: (4) 386–394.

- Duthie, J. and Waller, S. T. (2008) Incorporating Environmental Justice Measures into Equilibrium-Based Network Design. *Transportation Research Board 87th Annual Meeting*, Washington.
- Fan, W. and Machemehl, R. B. (2006). Optimal transit route network design problem with variable transit demand: Genetic algorithm approach. *Journal of Transportation Engineering-ASCE*, 132: (1) 40–51.
- Fesanghary, M., Mahdavi, M., Minary-Jolandan, M. And Alizadeh, Y., (2008) Hybridizing harmony search algorithm with sequential quadratic programming for engineering optimization problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197: (33) 3080-3091.
- Fisk, C. (1986) A conceptual framework for optimal transportations system planning with integrated supply and demand models. *Transportation Science*, 20: 37–47.
- Friesz T. L., Tobin, R. L., Cho, H. J. And Metha, N. J. (1990) Sensitivity analysis based heuristic algorithms for mathematical programs with variational inequality constraints. *Math Program*, 48: 265–284.
- Friesz, T. L., Cho, H. J., Mehta, N. J., Tobin, R. L. and Anandalingam, G. (1992) A Simulated annealing approach to the network design problem with variational inequality constraints. *Transportation Science*, 18–26.
- Friesz, T. L., Anandalingam, G., Mehta, N. J., Nam, K., Shah, S. J. and Tobin, R. L. (1993) The multiobjective equilibrium network design problem revisited – A simulated annealing approach. *European Journal of Operational Research*, 65: (1) 44–57.
- Gao, Z. Y., Wu, J. J. and Sun, H. J. (2005) Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem. *Transport Research Part B*, 39: 479–495.
- Gartner, N. H. (1976) Area traffic control and network equilibrium. Traffic Equilibrium Methods, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, (Florian, M.), 118, *Springer-Verlag*, Berlin, s274–297.
- Geem, Z. W., Kim, J-H. and Loganathan, G. V. (2001) A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *Simulation*, 76: (2) 60–68.
- Geem, Z. W. (2006) Improved harmony search from ensemble of music players, 10th *International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*, Bournemouth, s86–93.
- Geem, Z. W., (2008) Novel derivative of harmony search algorithm for discrete design variables. *Applied Mathematics and Computation*, 199: (1) 223–230.
- Geem, Z. W., (2009) Particle-swarm harmony search for water network design. *Engineering Optimization*, 41: (4) 297–311.

- Gershwin, S. B. and Tan, H. N. (1979) Hybrid optimisation: optimal static traffic control constrained by drivers' route choice behaviour. *Laboratory for Information and Decision System Report*, Massachusetts Institute of Technology, 870s.
- Goldstein, A. A. and Price, I. F. (1971) On Descent from Local Minima. *Math. Comput.*, 25: (115).
- Heragu, S. S. (1997) Facilities Design, *PWS Publishing Company*, Boston, 647s.
- Hillier, F. S. and Lieberman, G. J. (1986) Introduction to Operations Research. *Holden-Day*, 888s.
- Jang, W. S., Kang, H. I. and Lee, B. H. (2008) Hybrid Simplex-Harmony Search Method for Optimization Problems, *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Hong Kong, s4157–4164.
- Karoonsoontawong, A. and Waller, S. T. (2006) Dynamic continuous network design problem - Linear bilevel programming and metaheuristic approaches. *85th Annual Meeting of the Transportation-Research-Board*, Washington, s104–117.
- Kaveh, A. and Talatahari, S. (2009) Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures. *Computers & Structures*, 87: (5-6) 67–283.
- Kim, B. J. and Kim, W. (2006) An equilibrium network design model with a social cost function for multi-modal networks. *Ann Reg Sci.*, 40: 473–491.
- Knodel, W. (1969) Graphentheoretische Methoden und ihre Anwendungen. *Springer-Verlag*, 57s.
- Kolata, G. (1990, Dec. 25) What if they closed 42nd street and nobody noticed?, *New York Times*, 1: (38).
- Lam, W. H. K., Gao, Z. Y., Chana, K. S., and Yang, H. (1999) A Stochastic User Equilibrium Assignment Model for Congested Transit Networks. *Transportation Research Part B*, 33: 351–368.
- Land, A. M. and Doig, A. G. (1960) An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica*, 28: 497–520.
- Lasdon, L. S., Waren, A. D., Jain, A. and Ratner, M. (1978) Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. *ACM Trans. on Math. Software*, 4: (1) 34–49.
- LeBlanc, L. J. (1973) Mathematical Programming Algorithms for Large Scale Network Equilibrium and Network Design Problems, Doktor Tezi, *Department of Industrial Engineering and Management Sciences, Northwestern University*, Chicago.
- LeBlanc, L. J. (1975) An Algorithm for the Discrete Network Design Problem.



*Transportation Science*, 9: (3) 183–199.

- Lee, C. and Machemehl, R. B. (1998) Genetic algorithm, local and iterative searches for combining traffic assignment and signal control. *Proceedings of ICTTS 98*, s489–497.
- Lee, K. S. and Geem, Z. W., (2004) A new structural optimization method based on the harmony search algorithm. *Comp. and Struct*, 82: 781–798.
- Lee, K. S. and Geem, Z. W., (2005) A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice. *Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg*, 194: 3902–3933.
- Lee, K. S., Geem, Z. W., Lee, S. H. and Bae, K. W., (2005) The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization. *Engineering Optimization*, 37: (7) 663–684.
- Lee, J. H. and Yoon, Y. S. (2009) Modified Harmony Search Algorithm and Neural Networks for Concrete Mix Proportion Design, *Journal Of Computing In Civil Engineering*, 23: (1) 57–61.
- Magnanti, T. L. and Wong, R. T. (1984) Network design and transportation planning: models and algorithms. *Transportation Science*, 18: 1–55.
- Mahdavi, M., Fesanghary, M. and Damangir, E., (2007) An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 188: (2) 1567–1579.
- Marcotte, P. (1983) Network optimization with continuous control parameters. *Transportation Science*, 17: 181–197.
- Marcotte, P. and Marquis, G. (1992) Efficient implementation of heuristics for the continuous network design problem. *Annals of Operations Research*, 34: 163–176.
- Meng, Q., Yang, H., and Bell, M. G. H. (2001) An equivalent continuously differentiable model and a locally convergent algorithm for the continuous network design problem. *Transportation Research Part B*, 35: 83–105.
- Michalewicz, Z. (1992) Genetic Algorithm + Data Structure = Evolution Programs, *Springer-Verlag*, New York.
- Nguyen, S. and Dupuis, C. (1984) An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs. *Transportation Science*, 18: 185–202.
- Nguyen, S., Pallottino, S. and Malucelli, F. (2001) A Modeling Framework for Passenger Assignment on a Transit Network with Timetables. *Transportation Science*, 35: (3) 238–249.

- Nielsen, O. A. (2000) A Stochastic Transit Assignment Model Considering Differences in Passengers Utility Functions. *Transportation Research Part B*, 34: 377–402.
- Omran, M. G. H. and Mahdavi, M., (2008) Global-best harmony search. *Applied Mathematics and Computation*, 198: (2) 643–656.
- Oppenheim, N. (1995) Urban Travel Demand Modeling, *Wiley-Interscience*, New York, 480s.
- Ortuzar, J. D. and Willumsen, L. G. (1994) Modelling Transport (2nd Edition), *John Wiley and Sons*, Chichester, 433s.
- Pinedo, M. L. (2008) Scheduling Theory, Algorithms and Systems (third edition), *Springer Science+Business Media, LLC*, 647s.
- Poorzahedy, H. and Turnquist, M. A. (1982) Approximate algorithm for the discrete network design problem. *Transportation Research Part B*, 16: (1) 45–55.
- Rastrigin, L. A. (1974) Extremal Control Systems, *Theoretical Foundations of Engineering Cybernetics Series*, Moscow, Russia.
- Schwefel, H-P. (1981) Numerical Optimization of Computer Models, *Wiley & Sons*, Chichester.
- Sheffi, Y. (1985) Urban Transportation networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. *MIT. Prentice-Hall, Inc*, New Jersey.
- Spiess, H. (1983) On Optimal Route Choice Strategies in Transit Networks. *Centre de recherche sur les transports*, Publication no. 286, Universite de Montreal.
- Spiess, H. and Florian, M. (1989) Optimal strategies. A New Assignment Model for Transit Networks. *Transportation Research Part B*, 23: (2) 83–102.
- Steenbrink, A. (1974) Transport network optimization in the dutch integral transportation study. *Transportation Research Part B*, 8: 11–27.
- Stokes, L. and Plummer, J. (2004) Using spreadsheet solvers in sample design. *Computational Statistics & Data Analysis*, 44: (3) 527–546.
- Suh, S. and Kim, T. J. (1992) Solving nonlinear bilevel programming models of the equilibrium network design problem: a comparative review. *Annals of Operations Research*, 34: 203–218.
- Suwansirikul, C., Friesz, T. L., and Tobin, R. L. (1987) Equilibrium decomposed optimization: a heuristic for the continuous equilibrium network design problem. *Transportation Science*, 21: 254–263.
- The Highways Agency (1999) Design Manual for Roads and Bridges, *Part 3 – Traffic Capacity of Urban Roads*, 5: (1), 14s.

- Tobin, R. L. and Friesz, T. L. (1988) Sensitivity analysis for equilibrium network flow. *Transportation Science*, 22: 242–250.
- Xu, T., Wei, H. and Hu, G. (2009) Study on continuous network design problem using simulated annealing and genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 36: 1322–1328.
- Wardrop, J. G. (1952) Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proc. Inst. Civ. Eng. Part II*, 325–378.
- Wu, J. H., Florian, M. and Marcotte, P. (1994) Transit Equilibrium Assignment: A Model and Solution Algorithms. *Transportation Science*, 28: (3) 193–203.
- Yang, H. and Yagar, S. (1994) Traffic assignment and traffic control in general freeway-arterial corridor systems. *Transportation Research Part B*, 28: (6) 463–486.
- Yang, H. and Bell, M. G. H. (1998) Models and algorithms for road network design: a review and some developments. *Trans Rev.*, 18: 257–278.
- Yin, Y. (2000) Genetic-algorithm-based approach for bilevel programming models. *Journal of Transportation Engineering*, 126: 115–120.
- Yin, Y. and Madanat, S. (2005) Developing Optimal Planning and Management Strategies for a Robust Highway System. *California PATH Research Report*, 51s.
- Youn, H., Gastner, M. T. and Jeong, H. (2008) Price of anarchy in transportation networks: efficiency and optimality control. *Phys. Rev. Lett.*, 101: (12).
- Zhang, H. and Gao, Z. (2007) Two-Way Road Network Design Problem With Variable Lanes. *J Syst Sci Syst Eng.*, 16: (1) 50–61.

## ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin Ceylan, 5 Mayıs 1981 tarihinde Denizli’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Denizli’de tamamladı. 2002 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2005 yılında Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Ulaştırma alanında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Aralık 2005’ten bu yana Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde görev yapmaktadır.