

**HAVAYOLLARI ŞEBEKESİ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN TOPLAM
MALİYETİ GÖRECELİ DEĞİŞİM İNDİSLERİ KULLANILARAK
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Peiman ALIPOUR SARVARI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2013

ANKARA

Peiman ALIPOUR SARVARI tarafından hazırlanan “HAVAYOLLARI ŞEBEKESİ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN TOPLAM MALİYETİ GÖRECELİ DEĞİŞİM İNDİSLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Serpil EROL

Tez Danışmanı, Endüstri Müh. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ

Endüstri Müh. A.D, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Serpil EROL

Endüstri Müh. A.D, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan BAL

İstatistik. A.D, Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 08/07/2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Peiman ALIPOUR SARVARI

**HAVAYOLLARI ŞEBEKESİ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN TOPLAM MALİYETİ
GÖRECELİ DEĞİŞİM İNDİSLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Peiman ALIPOUR SARVARI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2013**

ÖZET

Bir ulaşım şebekesinin sürdürülebilirliği önemlidir. Özellikle alternatif olanaklarının bulunduğu havayolu ulaşım şebekelerinde sürdürülebilirliği ölçmek, havayolu şirketlerinin bağlantılı veya direkt uçuşları planlaması açısından gereklidir. Çalışma, bağlantılı ve direkt uçuşları dikkate alarak ulaşım şebekesinin sürdürülebilirliğini ölçme konusuna yönelik yapılan ilk çalışmadır. Bu sırada Kullanıcı Denge (User Optimality) ve Sistem Optimumu (System Optimum) sağlayan koşullar belirlenerek göreceli toplam maliyet indisleri hesaplanmış, kritik bağlantılar belirlenmiş, şebekenin sürdürülebilirliği değerlendirilmiştir. Türkiye’de faaliyet gösteren bir havayolu şirketine ait kısmi bir şebeke üzerinde uygulama yapılmış, sürdürülebilir bir şebeke için uçuş planı belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 906.1.056

Anahtar Kelimeler : Şebeke sürdürülebilirliği, Göreceli Toplam maliyet

Sayfa Adedi : 104

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Serpil EROL

**EVALUATING AIRLINE NETWORK SUSTAINABILITY USING RELATIVE
TOTAL COST INDICES
(M.Sc. Thesis)**

Peiman ALIPOUR SARVARI

**GAZI UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
July 2013**

ABSTRACT

The sustainability of a transport network is important. Especially in the presence of alternative transportation facilities in airlines networks, evaluating of airline network sustainability in terms of direct or transshipment flight planning is necessary. This research, to best of our knowledge, is the first to quantify airline network sustainability in the presence changeable capacity of legs and alternative flights. We used Relative Total Cost Indices to assess airline network sustainability in the case of behavior associated with both User and System–Optimization. In this study, passenger’s rout preference behaviors are the main subject. A numerical case study with real data from a Turkish Airline was given for illustration purposes.

Science Code : 906.1.056

Key Words : Network Robustness, Relative Total Cost indices

Page Number : 104

Adviser : Prof. Dr. Serpil EROL

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın oluőmasında çok değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof. Dr. Serpil EROL'a ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli aileme teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|--------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | v |
| TEŞEKKÜR..... | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ..... | xii |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ..... | xiv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | xv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. ULAŞIM PLANLAMASI SİSTEMİ..... | 5 |
| 2.1. Seyahat Üretimi | 6 |
| 2.1.1. Seyahat üretiminin belirlenmesi..... | 8 |
| 2.2. Seyahat Dağılımı | 9 |
| 2.2.1. Çekim modeli | 11 |
| 2.3. Trafik Atama..... | 12 |
| 2.3.1. Rota seçimi kriterleri | 14 |
| 3. TRAFİK ATAMA MODELLERİNDE DENGE VE TRAFİK ATAMA PROBLEMİ İÇİN ÇÖZÜM ALGORİTMALARI..... | 16 |
| 3.1. Ulaşım Şebekelerinde Denge Ve Trafik Atama Modelleri | 17 |
| 3.1.1. Kullanıcı denge atama modeli..... | 19 |
| 3.1.2. Sistem optimum atama modeli..... | 22 |

| | Sayfa |
|--|--------------|
| 3.1.3. Sabit talepli şebeke dengeli (KD) model | 24 |
| 3.2. Trafik Atama Problemleri İçin Çözüm Algoritmaları | 28 |
| 4. VARYASYONLU EŞİTSİZLİK PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜM ALGORİTMALARI | 30 |
| 4.1. Varyasyonlu Eşitsizlik Teorisi..... | 30 |
| 4.2. Varyasyonlu Eşitsizlik Problemleri İçin Çözüm Algoritmaları | 31 |
| 4.2.1. Projeksiyon algoritması..... | 31 |
| 4.2.2. Modifiyeli projeksiyon algoritması | 33 |
| 4.2.3. Denge algoritması..... | 34 |
| 5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI..... | 39 |
| 6. HAVAYOLU ŞEBEKESİ VE BİLEŞENLERİ..... | 44 |
| 6.1. Şebekeler ve Şebeke Terminolojisi..... | 44 |
| 6.1.1. Düğümler ve bağlantılar..... | 46 |
| 6.1.2. Akış | 46 |
| 6.1.3. Yönlü bağlantı | 46 |
| 6.1.4. Yönsüz bağlantı | 46 |
| 6.1.5. Bağlantı kapasitesi..... | 46 |
| 6.1.6. Arz düğümü..... | 46 |
| 6.1.7. Talep düğümü..... | 47 |
| 6.1.8. Aktarma (Transshipment) düğümü | 47 |
| 6.1.9. Yol (Path)..... | 47 |

| | Sayfa |
|--|--------------|
| 6.1.10. Başlangıç (Orijin) | 47 |
| 6.1.11. Destinasyon | 47 |
| 6.1.12. Bağlantılı şebeke | 48 |
| 6.1.13. Uçuş mesafesi | 48 |
| 6.1.14. Doluluk Oranı | 50 |
| 6.2. Minimum Maliyetli Akış Problemi | 50 |
| 6.3. Maksimum Akış Problemi | 51 |
| 6.4. HAVAYOLLARI BAĞLANTI MALİYET FONKSİYONU | 53 |
| 7. ETKİNLİK ÖLÇÜTLERİ VE HAVA YOLU ŞEBEKESİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ | 53 |
| 7.1. Etkinlik Ölçütleri | 53 |
| 7.1.1. Latora ve marchiori ölçütü..... | 54 |
| 7.1.2. Qlang ve nagurney (QN) ölçütü | 55 |
| 7.1.3. Toplam maliyetin göreceli değişim indisi..... | 56 |
| 7.2. Havayolu Şebekesinin Bağlantılarının İncelenmesi..... | 57 |
| 7.3. Hava Yolu Şebekesinin Sürdürülebilirliğinin İncelenmesi..... | 59 |
| 7.3.1. Uçuş (Bağlantı) kapasitesini azaltarak şebeke sürdürülebilirliğinin etkinlik ölçütüyle incelenmesi..... | 59 |
| 7.3.2. Uçuş (Bağlantı) kapasitesini artırarak, şebeke sürdürülebilirliğinin, etkinlik ölçütüyle incelenmesi | 60 |

| | Sayfa |
|---|--------------|
| 7.3.3. Toplam maliyetin göreceli değişim indisini kullanarak Şebeke sürdürülebilirliğinin incelenmesi | 62 |
| 8. BİR HAVAYOLU ŞİRKETİ İÇİN ŞEBEKE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİğİ UYGULAMASI | 71 |
| 8.1. Problemin Tanımı..... | 71 |
| 8.2. Problemin Çözümü | 71 |
| 8.2.1. Şebekenin kritik bağlantılarının belirlenmesi..... | 72 |
| 8.2.2. KD, SO modelleri ve toplam maliyetin göreceli değişim indisleriyle, Şebekenin sürdürülebilirliğinin incelenmesi..... | 76 |
| 8.2.3. Şebeke sürdürülebilirliği etkinlik ölçütü yardımıyla incelenmesi.. | 79 |
| 8.2.4. Uygulama sonucu | 81 |
| 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 84 |
| KAYNAKLAR | 86 |
| EKLER | 91 |
| EK-1 Alt sınır belirlenmesi..... | 92 |
| EK-2 Üst sınır belirlenmesi | 94 |
| EK-3 Filo verileri..... | 95 |
| EK-4 Kullanıcı Dnge..... | 96 |
| EK-5 Dnge Algoritması | 102 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 104 |

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge | Sayfa |
|---|--------------|
| Çizelge 2.1. Örnek seyahat tablosu..... | 8 |
| Çizelge 6.1. Shuttle Hopper Havayolları için şehirler arası maksimum uçuş sayısı..... | 49 |
| Çizelge 6.2. Yük Faktoru ve Beklenen Kazanç..... | 50 |
| Çizelge 8.1. Şehirler arası uçuş sayısı, uçak tipi ve talep miktarları | 73 |
| Çizelge 8.2. KD'den elde edilen f_1 Direkt ve f_2 Aktarmalı yolcu akışları..... | 74 |
| Çizelge 8.3. γ azalan kapasite oranları ve KD modelinden elde edilen Toplam Maliyet matrisi | 74 |
| Çizelge 8.4. Azalan kapasite oranları için KD ile elde edilen Göreceli Toplam Maliyeti..... | 75 |
| Çizelge 8.5. Artan kapasite oranları için KD ile elde edilen Toplam Maliyetteki Göreceli Değişim..... | 75 |
| Çizelge 8.6. Yükselen kapasite oranları için kullanıcıoptimumla elde edilen Toplam maliyetin Göreceli Değişimi..... | 76 |
| Çizelge 8.7. SO'dan elde edilen f_1 direkt ve f_2 aktarmalı yolcu akışları | 77 |
| Çizelge 8.8. SO modeliyle elde edilen Toplam maliyet matrisi ve γ azalan kapasite oranı | 77 |
| Çizelge 8.9. SO modeliyle elde edilen Toplam maliyet matrisi | 78 |
| Çizelge 8.10. Azalan kapasite oranları için SO ile elde edilen Toplam Maliyetin Göreceli Değişimi..... | 78 |
| Çizelge 8.11. Yükselen kapasite oranları için SO ile elde edilen Toplam Maliyetin Göreceli Değişimi..... | 79 |

| Çizelge | Sayfa |
|--|--------------|
| Çizelge 8.12. KD ve SO ile elde edilen Toplam Maliyetin Göreceli Değişimini kullanarak tüm şebekenin sürdürülebilirliği..... | 79 |
| Çizelge 8.13. Talebin γ azalma kapasite oranları için en ucuz yola göre W başlangıç-varişları arasındaki oranı..... | 80 |
| Çizelge 8.14. γ Oranına göre Şebeke Etkinlik Ölçümü..... | 80 |
| Çizelge 8.15. Talebin α artma kapasite oranları için en ucuz yola göre W başlangıç-varişları arasındaki oranı..... | 80 |
| Çizelge 8.16. α Oranına göre Şebeke Etkinlik Ölçümü | 81 |
| Çizelge 8.17. α ve γ 'e karşı şebekenin sürdürülebilirlik oranları..... | 81 |

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 2.1. Ardışık seyahat öngörü prosedürü | 7 |
| Şekil 2.2. Seyahat dağılımı modelleri..... | 11 |
| Şekil 3.1. Denge trafik atama modellerinin sınıflandırılması | 18 |
| Şekil 3.2. KD'ye göre rota maliyetleri | 20 |
| Şekil 3.3. Örnek ağ | 21 |
| Şekil 3.4. Tıkanıklığa göre bir bağlantının seyahat maliyeti..... | 23 |
| Şekil 6.1. Bir şebekenin temel bileşenleri | 44 |
| Şekil 6.2. Şebeke bileşenleri..... | 45 |
| Şekil 6.3. Uçuş şebekesi ve şehirler arası zaman bakımından mesafeler | 48 |
| Şekil 6.4. Başlangıçtan varışa kadar şebeke gösterimi | 49 |
| Şekil 7.1. Tek yönlü bir O-D | 61 |
| Şekil 8.1. Uçuş şebekesi ve uçuş rotası | 73 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler | Açıklamalar |
|------------------------|-------------------------------------|
| O-D | Başlangıç-Variş |
| VE | Varyasyonel Eşitsizlik |
| KD | Kullanıcı Denge, (User Optimum) |
| SO | Sistem Optimum, (System Optimum) |
| BPR | Bureau of Public Roads |
| G | Şebeke |
| N | Düğüm kümesi |
| L | Bağlantılar veya uçuşlar kümesi |
| f_a | a bağlantısındaki akış |
| W | (O-D) kümesi |
| r | Kullanılmış en yüksek maliyetli yol |
| q | Kullanılmış en düşük maliyetli yol |
| NRI | Şebeke Sürdürülebilirlik İndeksi |
| GTMİ | Göreceli Toplam Maliyet İndeksi |
| lf | Doluluk oranı |
| α, β ve k | Bölgeler arası doluluk çarpımları |
| LM | Latora ve Marchiori |

| Simgeler | Açıklamalar |
|---------------------|--|
| $E(G)$ | LM etkinlik ölçütü |
| d_{ij} | i ve j düğümleri arasındaki en kısa yol |
| t | Maliyet fonksiyonu vektörü |
| c | Bağlantıkapasite vektörü |
| QN | Qiang ve Nagurney |
| $\varepsilon(G)$ | G şebekesinin QN etkinlik ölçüsü |
| \bar{I} | LM etkinlik ölçümünün göreceli düşüşü |
| I | QN etkinlik ölçümünün göreceli düşüşü |
| TC | Şebekenin toplam maliyeti |
| ψ | Göreceli Toplam Maliyet İndeksi |
| γ | Azaltma oranı |
| α | Yükseltme oranı |
| ψ_{U-0} | KD Göreceli Toplam Maliyet İndeksi |
| ψ_{S-0} | SO Göreceli Toplam Maliyet İndeksi |
| ψ_{U-0}^γ | γ azaltma oranıyla KD'li şebekenin sürdürülebilirliği |
| ψ_{S-0}^γ | γ azaltma oranıyla SO'li şebekenin sürdürülebilirliği |
| ψ_{U-0}^α | α oranıyla KD'li şebekenin sürdürülebilirliği |
| ψ_{S-0}^α | α yükseltme oranıyla SO'li şebeke sürdürülebilirliği |
| TC^α | α kapasite vektörlü şebekenin toplam maliyeti |

1. GİRİŞ

Bir kuruluşun en önemli bireyi kimdir? Hangi üretim tesisi bir tedarik zinciri için en önemli rolü üstlenmektedir? Hangi bankanın başarısızlığı büyük ekonomik krizlere neden olabilir? Hangi köprü yıkılırsa veya yol bozulursa, bölge araç akışı etkilenir? Hangi internet bağlantısının kesilmesi, iletişimi büyük ölçüde olumsuz etkileyecektir? Görünüşte farklı sistemlerde uygun şebeke performansını ölçmek, bu tür soruları beraberinde getirebilir. Gerçekten de, bir şebekenin performansını incelerken bazı düğümlerin ve bağlantıların bozulması, tamamen kaldırılması veya kapasitelerinin değişmesi durumunda nasıl bir etki yaratacağını tespit etmek, değerli bir veri haline getirmek önemlidir [1].

Şebeke-Çökme analizi; 2001'deki Dünya Ticaret Merkezi saldırısı veya Japonya'nın Kobe depremi ve hatta 2007 deki Minneapolis I-35 Köprüsü'nün çöküşü gibi olaylardan sonra, yollarda ve taşıma şebekelerinde yaşanan problemlerden dolayı daha fazla önemsenmiştir. Gerçekten de bugün, şebekelerin resmi bir çalışma disiplini olarak kurulduğu günden bu yana yöneylem araştırması, birçok disiplin arasında yayılmakta ve tartışmasız şekilde son 70 yıl içinde şebeke bilimi için önemli bir etken oluşturmaktadır [2].

Şebekeler karmaşık bir yapıya sahiptir, buna bağlı olarak, büyük-ölçekli sistemler daha da karmaşık yapılardır ve bu sistemlerle çalışmak farklı bilim dallarına cazip ve ilgi çekici gelmektedir [3]. Bir ulaştırma sistemine, arz ve talep alt sistemlerinden oluşan bir iktisadi sistem olarak bakılabilir. Bu ulaştırma sisteminin talep tarafı (O-D), Başlangıç-Variş (Orijin-Destination) matrislerinden, arz tarafı ise; bağlantılar (arc), düğümler (node) ve bunlara bağlı olarak maliyetlerden oluşan bir şebekeolarak ifade edilmektedir. Bir trafik atama probleminde, O-D seyahat (trip) matrisi, şebekedeki bir dizi bağlantı akışlarının

yüklenmesi ile ortaya çıkmaktadır [4]. Bir şebekede bağlantı ve düğümlerin sıralanması; yöneticiler, planlamacılar, hükümet yetkilileri, şebeke tasarımcıları, mühendisler ve politikacılar da dâhil olmak üzere, her kademedeki karar vericileri ilgilendirir. Böylece, teorik ağırlıklı ve sayısal olarak elde edilen bu tür önemli bilgiler, karar vericilerin ve şebeke tasarımcılarının güvenli ve daha iyi korunan şebeke tasarımı yapmalarına imkân sağlar. Çünkü hizmet seviyesindeki azalma, şebeke performansını diğer bileşenlerden daha büyük ölçüde etkileyecektir [5].

Arz ve talep kavramıyla çalışan tüm kuruluşların, kullandığı bir şebeke mevcuttur. Bu şebekeler zamanı ve maliyeti optimum bir şekilde kullanabilmeleri için global çevrede birbirleri ile yarışmaktadır. Sürdürülebilir bir koruma kavramı şebekeler için, rekabet ortamında kuruluşu ayakta tutmak adına büyük önem taşımaktadır [5].

Bir taşıma şebekesinde, bakım onarım çalışmaları, zamanlama veya rotalama, fiziki aksaklıklar (taşıyıcı, yol veya terminal) veya politik kararlardan dolayı, taşıyıcıların sayısının azaltılması ya da yükseltilmesi, yolcuların rota seçme kararlarını, dolayısıyla taşıma şebekesinin bağlantılarının hassasiyet seviyesini ve aynı zamanda sürdürülebilirliğini doğrudan etkileyen en önemli etkidir. Yolculuk kalitesi, yolculuk saatinin uygunluğu, rahatlık ve maliyet yolcuların göz önünde bulundurduğu diğer önemli faktörlerdir [6]. Ayrıca, şirketler tarafından istikrarlı bir şekilde gelecekle ilgili büyüme stratejileri geliştirmek, bağlantılardan oluşan ulaştırma şebekesinin sürdürülebilirliğini koruyarak sağlanabilir. Tabii ki böyle kararları sadece istatistik öngörülere veya stokastik kavramlara dayanarak vermemek gerekir [3].

Şebeke sürdürülebilirliği, elektronik şebekeleri veya karayolları; taşımacılık şebekelerinde incelenmiştir ancak şimdiye kadar hava yolları şebekesinin,

değişebilen bileşenler etkisinde sürdürülebilirlik açısından nasıl davrandığı incelenmemiştir. Yapılan bu çalışma, bu anlamda ilk sayılmaktadır. Bu araştırma böyle bir problemi çözmek için atılan ilk adım niteliği taşımaktadır. Parçalanabilir bağlantılar ve alternatif seyahat davranışlarının varlığında ulaşım şebekesinin sürdürülebilirliğini ölçmeye yönelik yapılan ilk çalışmadır.

Yapılan bu çalışmada, bir ulaşım şebekesinin sürdürülebilirliğinin, azalan veya yükselen bağlantı kapasitesi eşliğinde nasıl elde edilebileceği gösterilecektir. Özellikle, Göreceli Toplam Maliyet İndeksleri (Relative Total Cost Indices) yardımıyla, şebeke sürdürülebilirliği Kullanıcı Dengesi (KD) seviyesine ulaştığında ve Sistem Optimumu (SO) koşulları sağlandığında şebekenin alt ve üst sınırları incelenecektir. KD seviyesine ulaşıldığında ve SO koşullar altında, özel yapılı ve sıkışıklık parametreleri ile ulaşım şebekeleri için Göreceli Toplam Maliyet indisi alt ve üst sınırları türetilenecektir. Varyasyonel Eşitsizlik (VE) (Variational Inequality) problemi şeklinde oluşturulan kısıtlı ve kısıtsız optimizasyon problemlerini çözmek için algoritmalarından yararlanılacaktır. Trafik atama problemlerinde kullanılan Etkinlik Ölçümleri de bu çalışmada kullanılacaktır.

Bu tez, dokuz bölümden ve ek olarak beş bölümden oluşmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, Ulaşım Planlama Sistemi'nin ne olduğu, seyahat üretiminin niceliği, seyahat dağılımı ve seyahati öngörmek için kullanılan Çekim Modeli kısaca anlatılacaktır. Ayrıca Trafik Atama problemi de tanıtılacaktır.

Üçüncü bölümde, ulaşım dağılımında dengenin ne anlama geldiğini, Kullanıcı Dengesi (KD) ve Sistem Optimum (SO) atama modelleri tanıtılıp, bağlantı seyahat maliyetinin nasıl hesaplanacağı gösterilecektir. Ayrıca bu bölümde trafik atama problemi modelleri için çözüm algoritmaları kısaca anlatılacaktır.

Dördüncü bölümde, VE problemi ve bu problemi çözmek için kullanılan üç farklı algoritma tanımlanacaktır ve beşinci bölümde, konuyla ilgili kapsamlı bir literatür araştırması yer almaktadır.

Altıncı bölümde, havayolu şebekesinin ne olduğu ve bu şebekenin hangi bileşenlerden oluştuğu yer almaktadır, havayolları bileşenlerinin önemi ve önerilen havayolu maliyet fonksiyonu gösterilecektir.

Yedinci bölümde, LM ve QN Etkinlik Ölçümleri ve Göreceli Toplam Maliyet İndisi tanımlanıp gereken matematiksel ispatlar ve teoremler verilecektir. Bu bölümde, hava yolu şebekesinin bağlantıları kritiklik bazında incelenecektir ve şebeke sürdürülebilirliği ele alınıp, Göreceli Toplam Maliyet İndisi kavramıyla tüm boyutları incelenecektir.

Sekizinci bölümde, Türkiye’de faaliyet gösteren bir havayolu şirketine ait olan kısmi bir şebeke sürdürülebilirlik bakımından incelenmektedir ve son olarak dokuzuncu bölümde çalışmamızın sonuçları ve geleceğe yönelik yapılabilecek çalışma konuları yer almaktadır

2. ULAŞIM PLANLAMASI SİSTEMİ

Ulaşım, çeşitli başlangıçlar (Origin), (O) ve varışlar (Destination), (D) arasında insanların veya eşyaların minimum maliyetle, en kısa sürede güvenli bir şekilde hedeflerine ulaşımının sağlanmasıdır. Ulaşım planlamasının amacı, seyahat talebi ile ulaşım imkanları arasındaki uyumu sağlamak, ulaşım sistemini kullanacak talep öngörüsü ile rotalara akan talep ve buna bağlı olarak bağlantılarda meydana gelen trafik hacmini belirlemektir. Hızlı ve verimli bir ulaşım şebekesini oluşturacak sistemin planlanması için, planlamacılar aşağıda belirtilen soruların cevaplarına ihtiyaç duymaktadırlar.

- a) Nüfusun yüzde kaçı ya da ne kadar insan seyahat etmektedir?
- b) Gelecekte nüfusu etkileyen faktörler neler olabilir?
- c) Sosyo ekonomik ve demografik profil nedir?
- d) Her bölge tarafından üretilen ve çekilen seyahat (yolculuk) talebi nedir?
- e) Her bölgeden ayrılan seyahatler nereye, hangi bölgeye gitmektedir?
- f) Seyahat hangi seyahat tarzı ile yapılacaktır?
- g) Seyahat etmek için kişilerin kararını etkileyen faktörler nelerdir?
- h) Bu seyahatler esnasında hangi rotalar kullanılır?

Ulaşım planlaması sistemi, dört adımda, bu soruları cevaplamak için geliştirilmiştir:

- 1) Seyahat Üretimi (Trip Generation)
- 2) Seyahat Dağılımı (Trip Distribution)
- 3) Türel Dağılım (Modal Split)
- 4) Trafik Atama (Traffic Assignment)

Modelleme çalışmaları için veri toplanmadan önce, çalışma ağı belirlenir ve daha sonra ulaşım ağı üzerindeki trafik hacimlerinin tahmini için yaygın olarak kullanılan ardışık seyahat öngörü prosedürü adımları uygulanır (Şekil 2.1). Ulaşım ağı, trafik analiz bölgelerine ayrılır ve çalışma alanı için tasarım yapılır. Yapılan çalışmaların sonucu, bağlantı, düğüm ve O-D merkezlerinden meydana gelen ağ tasarlanır. Bağlantılar, tek yol veya yol grupları ile gösterilebilir. Düğüm, yol çekiciliğinin değiştiği noktalarda, bağlantıların son noktalarını gösterir. Merkez, seyahat üretiminin merkezinde bütün seyahatlerin başladığı ve bittiği noktaları gösterir. Planlama için bu veriler elde edilerek gelecek tahminler yapılır [7].

Her adım, prosedürün belirli bir türünü gerektirir ve her adımda farklı model seçimleri yapılır. Bu prosedürün önemli avantajlarından biri, gelecekte ortaya çıkabilecek çeşitli değişiklikleri yansıtabilmesidir. Bu değişiklikler;

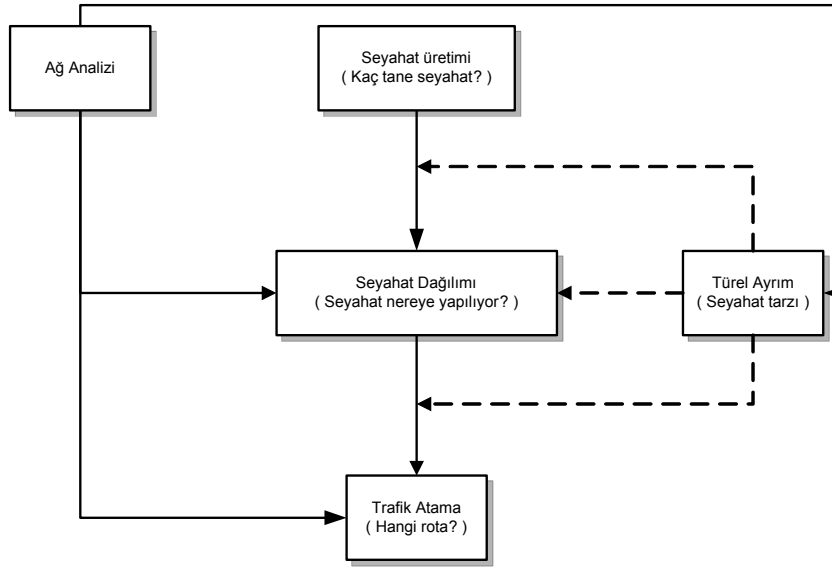
- a) Seyahat yapma oranlarındaki değişiklikler,
- b) Alternatif seyahat modellerinde meydana gelen gelişmelerdeki değişiklikler,
- c) Ulaşım ağındaki değişiklikler şeklinde belirtilebilir.

Ardışık seyahat prosedürünün diğer bir avantajı da, her adımın sonunda yararlı bilgiler oluşturmasıdır. Dezavantajı ise, modelin gelişimi için geniş miktarda veriye ihtiyaç duymasıdır. Araştırmacıların büyük bir bölümü bu modeli uygulamışlardır ve hala bu model geliştirilmeye devam edilmektedir.

2.1. Seyahat Üretimi

Seyahat üretimi, ulaşım planlamasının ilk adımıdır. Çünkü, hem bir sonraki

adımların gerçeğe en uygun değerlere yakın olması, hem de çalışma alanında üretilen toplam seyahat sayısı gibi değerlerin kontrolünü sağlamaktadır. Seyahat



Şekil 2.1. Ardışık seyahat öngörü prosedürü [8]

üretimi, belirli bir bölge tarafından üretilen ve çekilen seyahatin toplam miktarını öngörmeye yardımcı olur. Seyahat üretimi modelinde, bölgenin sosyo ekonomik yapısı ve arazi kullanımı ile bölgede üretilen seyahat sayısı arasındaki ilişkiyi yararlanılır. Yani seyahatin üretilmesinde bugünkü çekim veya sosyo ekonomik yapı, araç sahipliği, gayrisafi milli hasıla vb. diğer etkenler bulunur. Seyahat üretimi, her bölgenin ürettiği veya çektiği seyahati belirtir. Seyahat üretiminin bugünkü değerleri, Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi O-D matrisinde gösterilir. Ulaşım planlamasının seyahat dağılımı adımında bu matrisler kullanılarak modelleme yapılır [8].

Çizelge 2.1. Örnek seyahat tablosu

| B-V | 1 | 2 | 3 | . | . | . | j |
|-----|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| 1 | q_{11} | q_{12} | q_{13} | | | | q_{1j} |
| 2 | q_{21} | | | | | | |
| 3 | q_{31} | | | | | | |
| . | | | | | | | |
| . | | | | | | | |
| . | | | | | | | |
| i | q_{i1} | | | | | | q_{ij} |

Burada, q_{ij} = Başlangıç i den varış j ye olan seyahatler

2.1.1. Seyahat üretiminin belirlenmesi

Ulaşım ağlarının planlanabilmesi için gerekli olan O-D matrislerini öngörmek için çeşitli modellerden yararlanılabilir. Seyahat üretimi modellerinin gelişiminde, modelin bağımsız değişkenlerini oluşturan seyahat üretimini etkileyen verilerden her biri için, verinin elde edilebilmesi değişkenin seçimini etkileyen önemli bir faktördür. Genellikle başlangıç yılları için verinin elde edilmesi gelecek yıllara göre daha kolaydır. Eğer başlangıç yılları için bağımsız değişken verisi elde edilemezse, modelin gelişiminde bağımsız değişken kullanılamaz. Halbuki, modelin gelişimi için, modelin uygulanmasından önce modelde kullanılan bağımsız değişkenlerin öngörülüp öngörülemezliği düşünülmelidir. Eğer böyle öngörüler çok zor olacaksa o halde modelde bu değişkenleri kullanmaktan kaçınılabilir. Bazen ulaşım plancıları böyle öngörüler için kullanılması gereken bir yöntem geliştirmek zorundadırlar. Genellikle, seyahat üretiminde kullanılan sosyo-ekonomik parametrelerin bütün değerlerini öngörmek zordur [9].

Bir dizi bağlantı yolu ve düğüm noktasından oluşan bir karayolu ağıyla n adet bölgenin birbirine bağlandığı varsayılırsa, bir adet O noktası n adet D noktasına

seyahat üretecektir, ya da başka bir ifadeyle bir adet D noktası n adet O noktasından seyahat çekecektir. Bu durumda n adet bölgenin oluşturacağı yolculuk matrisinin n^2 hücreden oluşacağı açıktır. Eğer bölge içi yolculuklar göz önüne alınmazsa O-D matrisindeki hücre sayısı $n^2 - n$ olacaktır. Trafik sayımlarından O-D matrisini oluşturan bu n^2 tane hücrenin bulunması için öncelikle her bir son noktasına yapılan yolculukların izledikleri rotaların belirlenmesi gerekmektedir [9].

Çekim modeli ile seyahat üretiminin belirlenmesinde trafik sayımlarının, seyahat maliyetlerinin ya da mesafe gibi parametrelerin lineer ve lineer olmayan regresyon modelleri ile çözüm yapılmıştır. Trafik hacmi, ulaşım ağına yüklendiği zaman gözlenen trafik sayımlarıyla uyumlu sonuçlar verecek birden daha fazla sayıda yolculuk matrisi bulunacaktır [7].

2.2. Seyahat Dağılımı

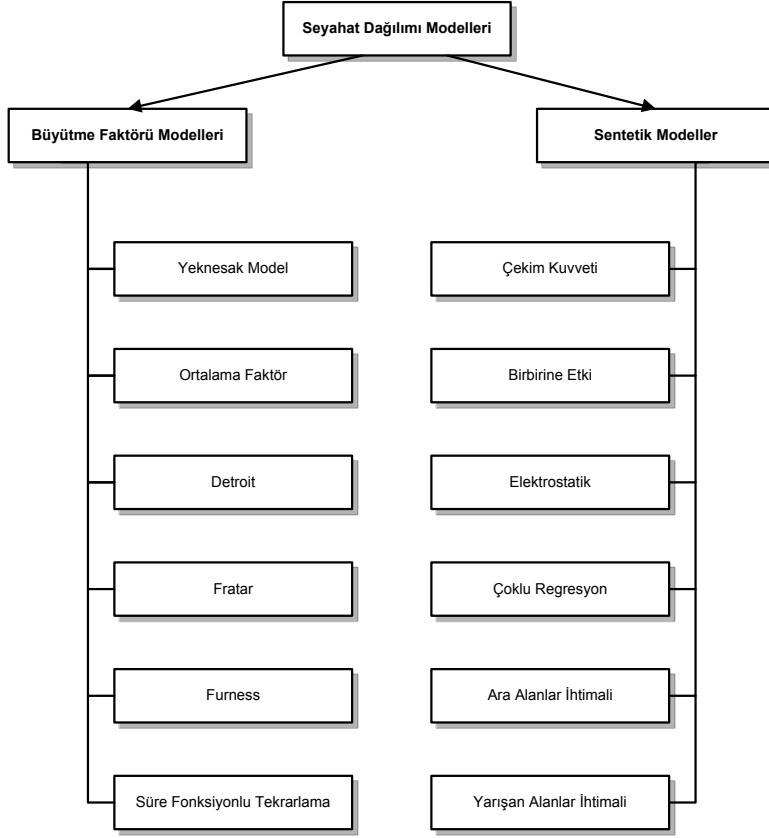
Seyahat dağılımı, trafik çalışmalarının en önemli öğelerinden biridir. Her bölgenin ürettiği ve gelecekte üreteceği veya çekeceği seyahatler ve dolayısıyla, çalışma alanındaki toplam seyahatlerin, planlama yılında bölgelere göre nasıl dağılacığı “Seyahat Dağılımı” modellerine göre yapılır. Öngörülen seyahat üretimi için, seyahat amaçlarının her biri için farklı seyahat dağılımı modelleri geliştirilmiştir. Seyahat dağılımı modelleri, öngörülen seyahatleri üretmek için seyahat üretimi ile öngörülen seyahat başlangıçları ve varışları ile bağlantılıdır [10].

Seyahat dağılımında, başlangıç ve sonu belli olan seyahatler birleştirilir; bilinen başlangıç ve son noktaları için bir seyahat matrisi oluşturulur. Gelecekteki seyahatlerin, bölgelere dengeli biçimde dağılımını sağlayan ‘Seyahat Dağılımı

Yöntemleri', "*Büyütme Faktörü Modelleri*" ve "*Sentetik Modeller*" olarak iki grupta incelenir (Şekil 2.2). Büyütme Faktörü Modellerinde, çalışma alanı içindeki bölgeler arasında bugünkü mevcut yolculuklara büyütme faktörü uygulanır. Bu modellerde bölge içi hareketleri ve bölgeler arasındaki mesafe faktörü, seyahat çiftleri arasındaki değişiklikler ve izdiham dikkate alınmaz. Küçük yerleşim alanları için uzun dönemde arazi kullanımında ve dış faktörlerde fazla değişme olmayacağı için, bu model genel olarak kabul edilir. Sentetik Modellerde, bugünkü seyahatlere etki eden faktörler ve nedenleri açıklanıp, buna uyan model kurulur. Modeldeki girdi değerleri, gelecek için değiştirilerek bölgeler arasındaki gelecekteki seyahat dağılımı hesaplanır [11].

Pratikte, günümüzde çok sık kullanılan ve en popüler olan seyahat dağılımı modelleri, Newton'un çekim kanununu esas almasına dayanılarak isimlendirilen çekim modelidir. 1960'larda çeşitli model türlerinin değerlendirilmesi ile çekim modeli ve ara alanlar ihtimali modelinin güvenilirliği ve işe yararlılığının ispatlandığı sonucuna varılmıştır.

Fratat modelinin arazi kullanımı değişikliklerinde yetersizliklere sahip olduğu görülmüştür. Modeller arasında karşılaştırmalar yapıldığında, hesaplamaların kolay olması ve diğer modellerin bazı teorik problemlere sahip olması sebebiyle çekim modeli daha yaygın hale gelmiştir. Bu hususlar göz önüne alındığında tezde, gelişen sosyo ekonomik faktörlere göre güncelleme kolaylığı olması ve büyük ölçekli ulaşım planlamalarında tercih edilmesi, uzun dönemli kullanımlar için uygun olması sebebiyle Sentetik Modellerden "*Çekim Modeli*" ile çalışılarak seyahat dağılımı elde edilmiştir. Seyahat dağılımı için çekim modelleri, bir bölgede başlayan ve sona eren toplam seyahat sayısı ile uyum gösterir. Böyle bir model üretim-çekim kısıtlı çekim modeli ya da çift kısıtlı çekim modeli olarak adlandırılmaktadır [13].



Şekil 2.2. Seyahat dağılımı modelleri [11]

2.2.1. Çekim modeli

Çekim modelleri geçmişteki O-D bilgisine güvenirlir [14]. Çekim modelleri çok sayıda teorik avantajlara sahiptirler [15]. Örneğin, seyahat çekim değerinin etkisi gibi nedensel bir mantığa dayalıdır, arazi kullanımındaki değişikliklerden dolayı çekim değeri kolayca değiştirilebilir, ulaşım faaliyetlerindeki gelişmeler dahil edilebilir, çözümü kolaydır. Bununla birlikte dezavantajları da vardır. Örneğin, çekim modelinde uzaklığın karesinin ters orantı olarak kullanılması her zaman uygun olmayabilir, çok uzun veya çok kısa seyahatlerde uygun sonuçlar vermeyebilir. G çekim katsayısının belirlenmesi zordur, tamamen deneme

yanılma ile elde edilir. G çekim katsayısı sabit olduğu için gelecek talep öngörülerinde bu sabitler öngörünün güvenilirliğini azaltan en önemli faktörlerden biridir. Çekim Modeli, büyük kentlerin ulaşım planlamasında, diğer matematiksel modellere göre en çok kullanılan bir modeldir. Bu modelde, fizik kanunlarından yararlanılmıştır. İki yerleşim yeri arasındaki çekim, aralarındaki mesafe, süre ve maliyet gibi etkenlerin artmasıyla azalır; fakat, her yerleşim yerindeki hareketlilik miktarı ile doğru orantılıdır. Çekim modeli, iki bölge arasındaki çekimi bölgelerin nüfuslarının birbirleriyle çarpılması ve bölgeler arasındaki mesafenin bazı fonksiyonlarına bölünmesi ile öngörür [16]. Kısaca, Newton kanunundaki; iki kütle birbirini, kütlelerinin çarpımı ve uzaklıklarının karesi ile ters orantılı olarak çekerler esasına dayanan bu modeldeki genel eşitlik fiziksel olarak şöyledir;

$$q_{ij} = \frac{GM_i M_j}{D_{ij}^2} \quad (2.1)$$

Burada; q_{ij} = i ve j arasındaki çekim kuvveti

G = Çekim kuvvet katsayısı

M = Kütle veya büyüklük

D_{ij} = i ve j kütlelerinin birbirine mesafesi

Mühendisler ve sosyal bilimciler şehirler arası yük ve insan hareketliliğini öngörmede Newton'un çekim modelinin değiştirilmiş versiyonlarını son yıllarda kullanmaktadırlar. Seyahat talebi öngörüsündede çekim modeli de Newton'un çekim modelinin benzeridir [17].

2.3. Trafik Atama

Trafik atama, karayolu üzerindeki beklenebilecek araç sayısı ve karayolu rotalarını belirlemek için, ulaşım planlaması sisteminin model analizi sürecindeki

son adımdır. Trafik atama adımının temel görevi; seyahat dağılımı ile belirlenen O-D seyahat talebini ulaşım ağına yükleyerek, ulaşım ağının her bölümünde yüklemeleri ya da kullanıcı hacimlerini ortaya çıkarmaktır. Kullanıcı hacimleri araç sayıları, toplam kişi sayısı, transit yolcuların sayısı ya da başlangıç varış ile tanımlanabilen seyahat talebinin bir başka birimi olabilir [18]. Özetle, trafik ataması, ulaşım sistemi ağına, seyahat eden yolcuların oluşturduğu trafiğin yüklenmesidir. Bu yüklemenin yapılabilmesi için, mevcut ya da önerilecek yol ağı, ulaşım sistemi ve O-D çiftleri arasındaki trafik hacimlerini belirleyen akım matrisinin (seyahat dağılım matrisinin) bilinmesi gerekmektedir [7].

Trafik atamasının amaçları

- Ulaşım ağına ait toplam trafik akımları, toplam seyahat süreleri gibi değerleri belirlemek,
- Seyahat talebini esas alarak O-D arasındaki seyahat maliyetini öngörmek,
- Makul bağlantı akımlarını ve ağır trafik hacmine sahip bağlantıları belirlemek,
- Her O-D çifti arasındaki kullanılan rotaları öngörmek,
- Belirli bağlantı ya da rotayı kullanan O-D çiftlerini analiz etmek.

Trafik atama (ağın yüklenmesi) için gerekli temel veriler

- Bölgeler arası seyahat sayısını belirten seyahat matrisi (seyahat dağılımı adımıyla belirlenmiştir)
- Ağ bileşenleri,
- Bağlantılar,
- Başlangıç veya varış düğüm noktalarına bağlantılar (centroid connectors),
- Başlangıç veya varış düğüm noktaları (nodes),

- Bağlantı seyahat maliyetleri,
 - Düğüm noktaları arasındaki uygun rotalar,
 - Yol seçim kriterleri ve olasılıkları,
 - Maliyet fonksiyonu
- Minimum maliyet şeklinde açıklanabilir.

Bir bölgeden diğerine seyahat eden araçlar, bölgeler arasındaki belirli seyahat rotalarını bilgi düzeyleri doğrultusunda seçerler. Trafik atama, yolcuların yol ağını algılama düzeylerine göre, bölgelerin her O-D çifti arasındaki seyahatin minimum genel maliyetine dayalı olarak yapılır. Bu genel maliyet, bağlantı seyahat süresinin ve bağlantı mesafesine bağlı uygun maliyetin lineer kombinasyonudur [7].

2.3.1. Rota seçimi kriterleri

Trafik atamasının temel dayanak noktası, algılanan en az maliyetli rotayı seçen yol kullanıcılarının orantılı olarak rotalara yükledikleri varsayımdır. Uygulamada, yolcular herhangi bir başlangıç ve varış çifti arasında ulaşımı sağlamak için, O-D çiftlerini bağlayan rotalardan seçim yaparlar. İki nokta arasındaki rota seçimini etkileyen çok sayıda faktör söz konusudur. İngiliz Ulaşım Departmanının (Department of Transportation, 1981) 7000'nin üzerinde yolcu ile görüştükleri çalışmalarında rota seçimini etkileyen faktörler:

- seyahat süresi,
- mesafe,
- parasal maliyet,
- tıkanıklılık,
- kuyruklanmalar,

- yol tipi,
- manzara,
- trafik işaretleri,
- yol çalışmaları,
- kolay ve düzgün bir rota,
- yatay ve düşey kurların azlığı,
- bağlantı güvenilirliği,
- seyahat süresi güvenilirliği ve
- alışkanlıklar şeklinde sayılabilir.

Bu seçimi etkileyen faktörler ve yolcuların her rotaya paylaştırılması trafik atama problemi olarak bilinir. Çalışmalar belirli bir rotanın seçilmesinin en önemli sebebinin seyahat süresi ve düşük maliyet avantajı olduğunu, fakat farklı seyahat amacına sahip gruplar arasında değişik seçimler meydana geldiğini ortaya koymuştur. Yolcuların büyük bir bölümü iş seyahati amacıyla en kısa rotayı (ya da en az maliyetli yolu) seçerlerken, vakit problemi olmayan yolcular manzara ya da diğer sebeplerle farklı rotaları seçebilirler. Ancak, yapılan araştırmalar yolcunun rota seçiminde zaman ve mesafe kombinasyonunun etkili olduğunu göstermektedir [7].

3. TRAFİK ATAMA MODELLERİNDE DENGE VE TRAFİK ATAMA PROBLEMİ İÇİN ÇÖZÜM ALGORİTMALARI

Trafik atama, seyahat talebi ve fiziksel kolaylıklar bakımından ulaşımın sağlanması arasındaki denge olarak değerlendirilebilir. Ulaşım ağlarında oluşan denge; arz ve talep arasındadır. Seyahat edenler talebi temsil ederler, arz ise seyahat maliyetleri ile değerleri belirlenen ağ ile ifade edilir. Trafik akımlarının dengede olması yaklaşımına dayalı bir sistemi gerektiren ağ bileşenleri ve seyahat süresi arasındaki bağımlılık ağ boyunca eş zamanlı olarak belirlenmelidir.

Bağlantı akımları üzerinde bağlantı seyahat sürelerinin trafik hacmine bağımlı olarak belirlenmesi denge özelliğinden gelir. Verilen bir O-D çiftinin pek çok rota ile bağlandığını ve bu iki nokta arasındaki seyahat sayısının bilindiğini varsayalım. Yol kullanıcıları öncelikle seyahat süresi ve maliyet bakımından en kısa ve en uygun maliyetli yolu kullanmaya yönelirler. Bütün yolcuların en kısa rotaya yönelmesinden dolayı trafik hacminin artması ile en kısa rota tıkanık hale gelebilir. Sonuç olarak, bu rota üzerindeki seyahat süresi artabilir ve bu noktada artık minimum süreli rota olmayacaktır. O halde, yol kullanıcılarının bazıları, daha hızlı seyahat etmeyi umduklarında, daha uzun olduğunu düşündükleri alternatif başka bir rota kullanabilirler. Bu rotaların her biri üzerindeki trafik hacimlerinin belirlenmesi, arz / talep denge probleminin çözümünü içerir. Her bağlantı üzerindeki akım, O-D çifti arasındaki rotalar üzerindeki akımların toplamıdır. Her bağlantı için, bağlantının akımı ve seyahat süresi ile ilişkili yol karakteristikleri ve hacime bağlı bir maliyet fonksiyonu belirlenmektedir [19].

Tıkanıklığa konu olan ulaşım ağlarında, rotalardaki trafik akımının tahmini için, ağ denge modelleri kullanılır. Ağı oluşturan herhangi bir bağlantı üzerine gelen

toplam talep, belirli bir zaman dilimi içerisinde bağlantının kapasitesini aşarsa, bu durum tıkanıklılık olarak değerlendirilir. Tıkanık ağlarda denge koşulları altında trafik, O-D çiftleri arasında kullanılmayan rotaların hepsi daha büyük veya eşit maliyetlere sahip iken, O-D çiftleri arasında kullanılan bütün rotalar eşit ve minimum maliyete sahip olacak şekilde düzenlenir [7].

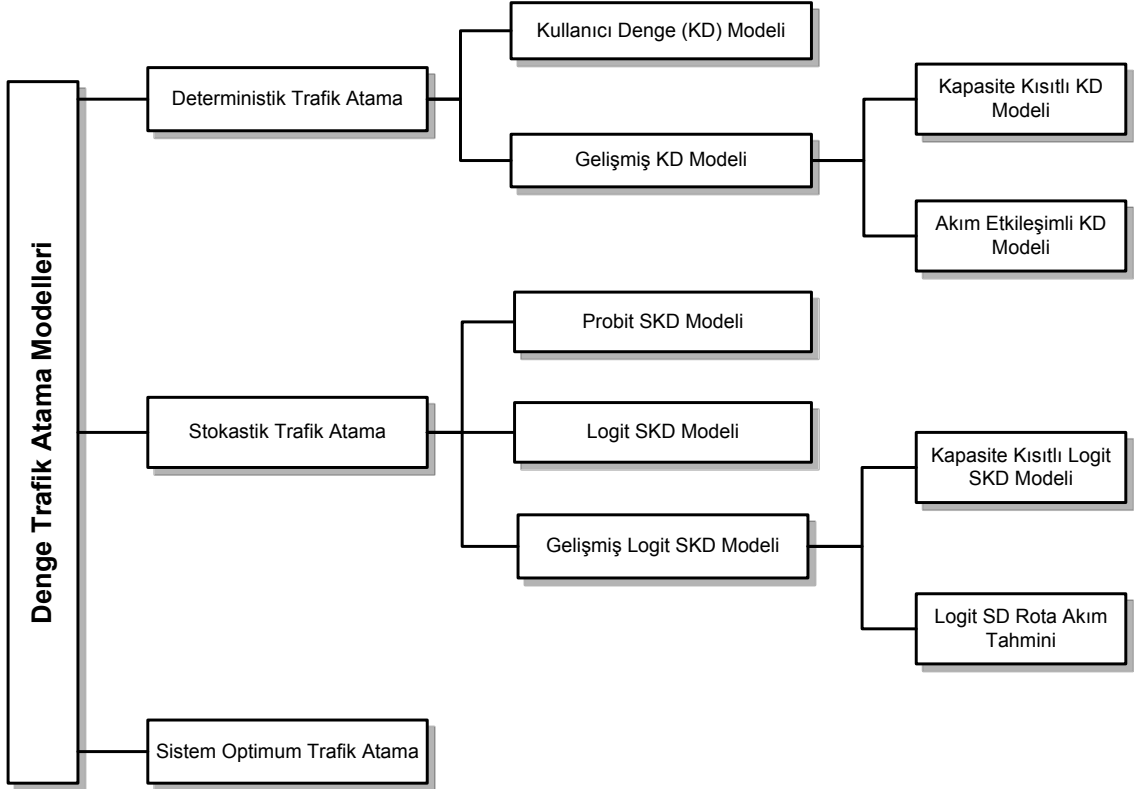
3.1. Ulaşım Şebekelerinde Denge Ve Trafik Atama Modelleri

Denge modeli kavramı Wardrop (1952) tarafından ve trafik atama matematiksel planlama modeli Beckmann (1956) tarafından tanımlanmıştır [20,21]. Bugüne kadar deterministik, stokastik ve SO trafik atama modellerini içeren çok sayıda model araştırması yapılmıştır. Denge trafik atama modelleri (Sheffi, 1985) üç tipte sınıflandırılabilir [22]: Kullanıcı dengesi (KD) ya da deterministik kullanıcı dengesi (DKD), Stokastik kullanıcı dengesi (SKD) ve Sistem optimum (SO)'dur. Trafik atama modellerinin sınıflandırılması Şekil 3.1 de görülmektedir. Bunlar kısaca aşağıda özetlenmiştir.

Akımların ağa atanması için kullanılan yaklaşımlar kapasite kısıtı var ya da yok ve stokastik etkiler var ya da yok varsayımlarını esas alırlar. *Kapasite kısıtı kavramı*; yolculuk seçimlerinin O-D noktalarını bağlayan mümkün rotaların izdiham seviyesi ile etkilendiğini kabul eder. Bu yüzden kapasite kısıtını uygulayan her model, bağlantı performans fonksiyonu olarak da bilinen bağlantı seyahat maliyeti ile ilişkili fonksiyonları gerektirir. Trafik iterasyonlar halinde ağa yüklenir. Her iterasyondan sonra, bağlantı seyahat süreleri bağlantı performans fonksiyonları kullanılarak ayarlanır [9]. Yüklemede pratik kapasite geçilemez.

Tekrar eden hesaplamalarla bir bağlantı, kapasite üstü yüklendiğinde, o bağlantıdaki ortalama trafik hızını azaltıp seyahat süresinin artırılması ile

bağlantının trafik çekiciliği azaltılır. Eğer bağlantı kapasitesi göz önüne alınmazsa, trafiğin tıkanıklığının önemsenmediği sabit bir maliyetin kabul edildiği



Şekil 3.1. Denge trafik atama modellerinin sınıflandırılması [9]

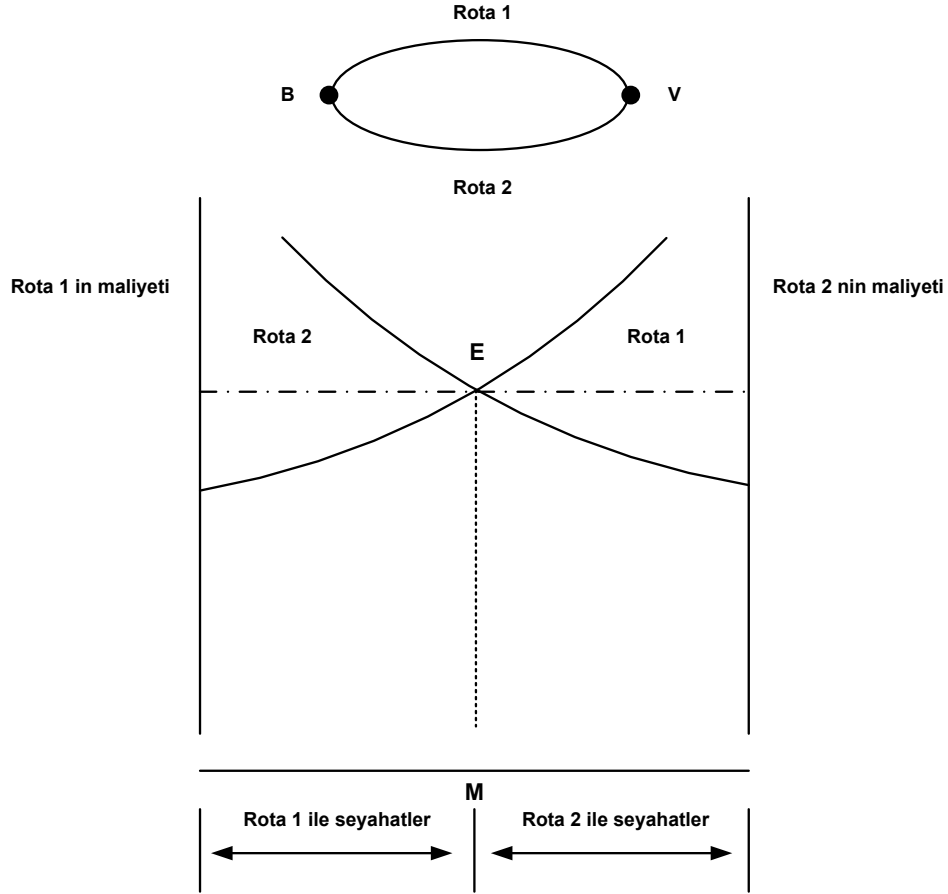
bir rota dikkate alınır; bu koşul altında bir tek rota O-D çiftinin bütün akımını toplar (örneğin hep ya da hiç algoritması). *Stokastik etki kavramı*, yolcuların ulaşım sistemi hakkında mükemmel bir bilgiye sahip olmadıklarını kabul eder, böylece ulaşım ağının farklı algılanmaları sonucu her O-D için rotaların seçiminde değişik tercihler ortaya çıkar. Daha gerçekçi bir yaklaşım olmasına rağmen, bu yaklaşımın kullanılması çalışma bölgesinde yolcular tarafından seçilen rotaların tercih edilmesi hakkında gerçeğe uygun veriler gerektirir [7].

3.1.1. Kullanıcı denge atama modeli

Kullanıcı Dengesi (KD) modelleri deterministiktir. KD ilkesi Wardrop (1952) tarafından ileri sürülmüştür [20]. Wardrop, denge kavramını formüle eden ve toplam seyahat maliyetini minimize eden alternatif davranış esasını tanıtan iki ilke belirtmiştir ve ağ performansı esasını şekillendiren rota seçim davranışını modellemeyi amaçlamıştır. Onun birinci ilkesine göre, kullanıcılar kendi seyahat sürelerini minimize edecek şekilde kullanacakları rotayı seçerler. Her O-D çifti için tüm kullanılan rotalar üzerindeki seyahat süresi eşittir ve hiç kullanılmayan rota üzerindeki maliyet veya seyahat süreleri diğer kullanılan rotalara göre daha fazladır. Bu, kullanıcı dengesi (KD) olarak tanımlanır. KD tanımı, yol kullanıcılarının seyahat maliyetleri hakkında tam bilgiye sahip olduklarını ve rota seçimi hakkında doğru karar verdiklerini ifade eder. Şekil 3.2 de iki rotalı bir O-D için KD ifadesi açıklanmıştır. O-D çiftlerini bağlayan 1 ve 2 bağlantıları varsayıldığında, KD'ye göre rota seçimi optimize edildiğinde ortalama maliyet fonksiyonları, iki maliyetin kesiştiği E noktasında elde edilir. Bu yüzden 1 ve 2 bağlantıları için KD optimizasyon çözümü M noktasında sağlanır. Her bağlantı üzerinde ortalama seyahat maliyeti EM dir [23].

KD ataması, seyahat edenlerin rotalarını kendi ilgi alanlarına göre farklı bir şekilde seçtiklerini varsayar. Bu durumda, her seyahat eden, O-D düğüm noktalarını bağlayan mümkün olabilen bütün yolları kıyaslarlar ve minimum maliyetli yolu seçer.

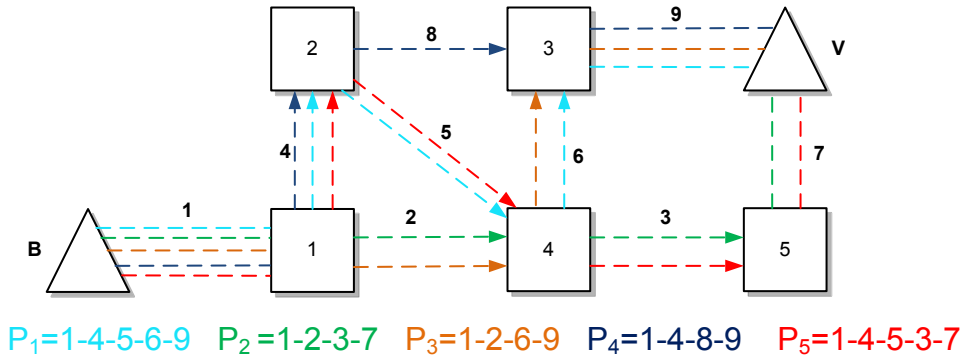
KD durumunda, O-D çiftleri arasında seyahat edenler tarafından seçilen bütün rotalar, aynı ya da seçilmeyenden daha az maliyetlidir. Örneğin Şekil 3.3 de görülen P1, P2, P3, P4, P5 şeklinde beş rotalı bir ağ varsayıldığında, O-D



Şekil 3.2. KD'ye göre rota maliyetleri [23]

arasındaki talebi karşılamak için sadece P1, P2 ve P3 kullanılıyorsa, o halde denge durumunda, P1, P2 ve P3 rotalarının seyahat maliyeti P4 ve P5 rotalarının seyahat maliyetinden daha azdır ya da eşittir. P1, P2 ve P3 rotalarının seyahat maliyeti aynıdır.

KD modelleri pratik olarak atamada en yaygın olarak kullanılan modeller olmasına rağmen, sınırlamalar ile nitelendirildikleri şeklinde bilinirler. KD ataması, seyahat edenlerin davranışını gerçeğe uygun şekilde tam olarak



Şekil 3.3. Örnek şebeke

yansıtmaz. Çünkü rota seçim kararları, çeşitli kişisel farklılıkların söz konusu olduğu algılanan seyahat süreleri ya da seyahat maliyetlerine bağlıdır [23]. Ayrıca, KD ataması için bağlantı maliyet fonksiyonlarının önemi oldukça büyüktür. Genellikle KD atamasında iki tür bağlantı maliyet fonksiyonu kabul edilir. Birincisi, bağlantı trafik hacminin bir fonksiyonu olarak bağlantı maliyet artışına sahiptir (örneğin BPR fonksiyonu). Bu durum artan maliyet fonksiyonu olarak ifade edilir. Diğeri, sabit bir maliyet ve belirlenmiş bir kapasiteye sahiptir. Hidrodinamik teorisini kullanan kuyruklanan trafik maliyet fonksiyonudur, şehir içi ulaşım modellemesinde kullanılır. Belirlenmiş kapasitede, bağlantı üzerinde kuyruklanma meydana gelir ve kapasiteyi aşmayacak şekilde talebi karşılayacak maliyet belirlenir. Atama modelinde, bağlantıların seyahat maliyeti, izdiham etkisi nedeniyle sabit değildir. Bir bağlantı seyahat maliyeti, bağlantı üzerindeki trafik akımı belirli izdiham noktasına ulaşıncaya kadar sabit kalır ve daha sonra trafik akım artışlarına göre artar. Şekil 3.4 bağlantının trafik hacmi ve maliyet fonksiyonu arasındaki ilişkiyi gösterir [24].

KD ataması varsayımları aşağıda bahsedildiği şekilde özetlenebilir;

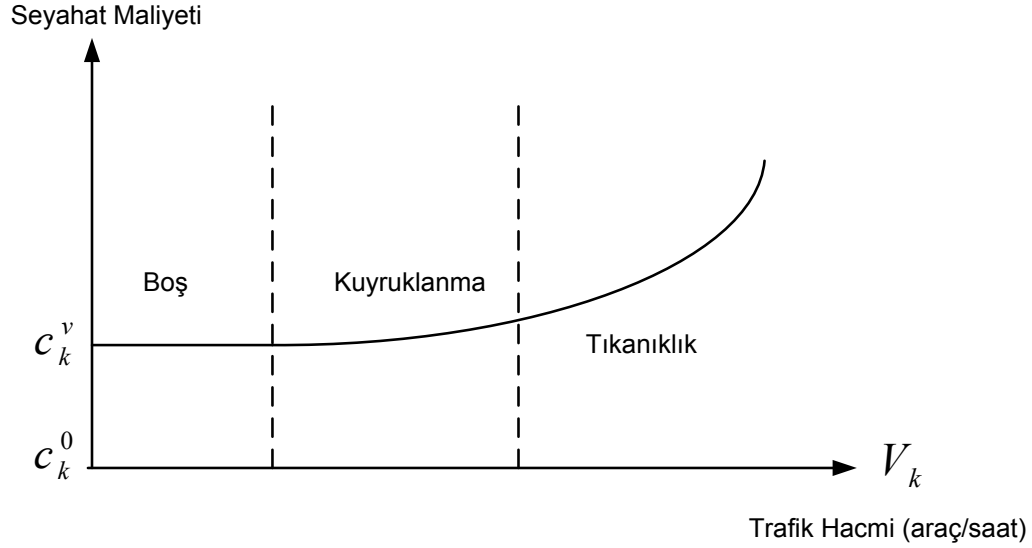
- Yol kullanıcıları yolun seyahat maliyetini bilmek isterler,
- Verilen bir bağlantı üzerindeki seyahat süresi,

- Bağlantı üzerindeki akımın, şerit genişliği ve kapasite gibi parametrelerin bir fonksiyonudur.
- Seyahat süresi fonksiyonları pozitifdir ve artış gösterirler [22].

3.1.2. Sistem optimum atama modeli

Wardrop'un *ikinci ilkesine* göre, sistemin yöneticileri rota maliyetlerini minimum yapmaya çalışırlar. Bu durum, tüm sistemin en etkili kullanımını sağlamak için ve tüm sistemin yararına olacak şekilde, her kullanıcının kendi rotasını seçmede mantıklı davrandığı anlamına gelir; bu da sistem optimum (SO) olarak tanımlanır. SO atama modelinde, rota seçiminde tüm yolcuların ulaşılan alternatiflerden en kolayını izleyebileceği varsayılır. Tarif edilen rota, tüm yolcuların toplam seyahat sürelerini minimize edecek şekilde sistemci tarafından belirlenir. SO, tıkanıklığın minimize edildiği bir model olarak düşünülebilir. SO atama, seyahat edenlerin tercihlerini dikkate almadan tüm seyahatlerin mutlaka bir danışman tarafından yönetilebildiği durumlarda uygundur. SO atamaya ulaşmak için seyahat edenler, bağlantı maliyet fonksiyonlarının izdiham süresi ile tanımlanan ortalama maliyete nazaran, ekstra ortaya çıkabilecek seyahatlerin bağlantı seyahat sürelerini etkilediği marjinal maliyete göre bağlantılara atanmalıdırlar.

Açıkçası, bu gerçeğe uygun davranış gösteren bir model değildir. Fakat ulaşım planlamacıları ve mühendisleri için minimum seyahat maliyetlerine ulaşım, ulaşım şebekesini sürdürmek gerekir. Böylece en iyi sosyal dengeye ulaşmak amacıyla kullanılabilir [7].



Şekil 3.4. Tıkanıklığa göre bir bağlantının seyahat maliyeti

Beckmann, Mc Guire, ve Winsten (1956), bu koşulları güçlü olarak matematiksel bir biçimde formüle eden ilk araştırmacılarıdır. Beckmann, Mc Guire, ve Winsten(1956), trafik, şebeke ve denge koşulları arasında eşitliği sağlamışlar ve bunu böyle vurgulamışlar; her O-D arasındaki kullanılan yolların maliyetleri eşit veya minimal bir biçimde olabilir. Wardrop'un birinci prensibine ve Kuhn-Tucker koşullarına dayanarak, bir simetri varsayımı altında, belli başlı fonksiyonlarla, uygun inşa edilmiş optimizasyon problemleri elde edebilir. Buna göre dengeli bağları ve rota akışları, bir matematiksel programlama probleminin sonucu olarak elde edilebilir.

Defarinos ve Sparrow (1969) taşıma şebekeleri için Kullanıcı Denge (KD) veya KD (UO) ve Sistem Optimum (SO) isimlerini, iki farklı durumu ayırt etmek için kullanmışlardır. İki farklı durumun birincisi; kullanıcılar tek taraflı ve kendi çıkarları doğrultusunda kendilerine bir yol seçmektedirler, ikincisinde ise kullanıcılar yollarını merkezi bir sistem içinden optimal olan yolların arasından

seçmek zorundadırlar. Bu durumda sistemin toplam maliyeti minimize edilmiş olacaktır. Birinci problem Wardrop'un birinci prensibine denk gelmekte ve ikinci problem, Wardrop'un ikinci prensibiyle örtüşmektedir. Yazarlar ayrıca direnişçi kurumsal oyun tabiatı olan, denge problemlerini fark ettiler. Nitekim Nash (1950,1951) denge problemleri, böyle problemlerden sayılmaktadır. Bu çalışmada KD ve şebeke dengesi teorileri birbiriyle aynı anlamda oldukları için, birbirlerinin yerine de kullanılabilirler ve şebeke dengesi, KD ile aynı anlamı taşımaktadır.

SO kavramı diğer rotalama modelleriyle alakalıdır. Öyleki taşıma problemlerindeki yük taşımacılığı rotalama modellerinde ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde tedarik zinciri; lojistik şebekelerinde, şebeke sistemlerinde ve merkezi bir denetici kontrolü altında akışların rotalarının nasıl biçimlendiğini göstermekte ve bu sistemlerde büyük rol oynamaktadır [1].

3.1.3. Sabit talepli şebeke dengeli (KD) Model

Haberleşmede, bağlantı kuranlar düğümlerle temsil edilmektedirler. Lojistik ve tedarik zincirinde, düğümler üreticileri, distribütörleri ve talep pazarlarını temsil eder. Finansal ve ekonomi şebekelerinde, düğümler, karar vericileri temsil eder [25]. Şebeke modellerinde, bağlantılar, fiziksel bağlantıyı (kablolar, aktarma hatları, üretim hatları gibi) temsil eder. Elbette bizim çalışmamızda da, düğümler; havaalanlarını, bağlantılar ise uçuşları temsil edeceklerdir.

Sıradan bir $G = (N, L)$ şebekesi düşünölsün, N ; düğümler kümesini, L ise bağlantılar veya uçuşlar kümesini temsil etmektedir. Varsayalım a ; şebekenin iki düğümünü birbirine bağlayan bir uçuş olsun. p ; Başlangıç noktasından Varış

noktasına (O-D) giden, bir dizi uçuşun, yörüngesi olsun. Her (O-D)'yi, (x,y) ile gösterilebilir. x başlangıç noktasını, y hedef veya bitiş noktasını simgeler.

(O-D) kümesini W ; ($W \subset N \times N$), ile gösterebiliriz ve bu kümenin $|W|^*$ sayısında üyesi vardır. $w(w := (x,y))$, (O-D)'yi birbirine bağlayan tüm yolları P_w ve şebekede bulunan tüm yollar P ile gösterilir.

f_a , a bağlantısındaki akışı ve f vektörünün her bir üyesi şebekenin bağlantılarındaki akışı göstermektedir. Böylece $f \in R_+^{|A|}$ olması gerekmektedir.

p yolundaki akışı göstermek için x_p kullanılmakta. X vektörünün her bir üyesi, şebekenin her bir yolunda akışı gösterir, böylece $X \in R_+^{|P|}$ olması gerekmektedir. d_w , w inci (O-D)'nin talebini gösterir.

Eğer talep her (O-D) için biliniyor ve sabit ise;

$$\sum_{p \in P_w} x_p = d_w, \quad \forall w \in W \quad (3.1)$$

(3.1) denklemi; bir (O-D) ye ait olan akışların toplamı, o (O-D)'ye karşılık gelen talebe eşit olması gerektiğini göstermektedir.

$d \in R_+^{|W|}$ vektörünün her üyesi o şebekedeki (O-D)'nin talebini gösterir, ayrıca;

$$f_a = \sum_{p \in P} x_p \delta_{ap}, \quad \forall a \in A \quad (3.2)$$

Eğer p yolu, a bağlantısını kapsıyorsa, $\delta_{ap} = 1$, aksi takdirde $\delta_{ap} = 0$ olur.

* O-D lerin toplam sayısı

(3.2) denkleminde; a bağlantısındaki akış, 'ait olduğu yolun toplam akışlarına eşittir' anlamını taşımaktadır.

(3.1) ve (3.2) denklemleri şebekedeki akışın sürdürülebilirliğini garanti etmektedirler; Başlangıç noktasında üretilen ve çıkan akış miktarı ile bitiş noktasına giden akış miktarı eşit olmalıdır [1].

Kullanıcı denge problemi

Kullanıcı denge; daha önce açıklandığı gibi, Wardrop'un birinci prensibi sayılır ve maliyeti düşürme amacıyla her $(O \setminus D)$ 'yi birbirine bağlayan bileşenler arasından kişisel seçim kararlarına dayanmaktadır.

$X^* \in \mathbf{R}_+^{|P|}$, sabit talepli kullanıcı dengedir, eğer;

- X^* , (3.1) ve (3.2) denklemlerinde sağlanıyorsa,
- her bir $(O \setminus D)$, ve bu $(O \setminus D)$ den geçen her bir rotada aşağıdaki optimal durum sağlanıyorsa,

$$C_p^{(X^*)} - \lambda_w^* \begin{cases} = 0 & \text{eğer} & X_p^* > 0 \\ \geq 0 & \text{eğer} & X_p^* = 0 \end{cases}, \quad (3.4)$$

burada λ_w , balansdan sonraki $(O \setminus D)$ ye ait olan, w inci yolun minimum maliyetidir. Kullanıcı Denge probleminin çözümü aşağıdaki optimizasyon probleminden elde edilebilir.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} t_a(y) dy. \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{p \in P_w} x_p = d_w, \quad \forall w \in W \\ & f_a = \sum_{p \in P} x_p \delta_{ap}, \quad \forall a \in A, \\ & x_p \geq 0, \quad \forall p \in P \end{aligned} \quad (3.5)$$

Sistem optimum problemi

Sistem optimum, Wardrop'un ikinci prensipine dayanmakta ve bireysel kararlara değil belki makroskopik kararlara bağlıdır.

$X^* \in \mathbf{R}_+^{|P|}$, sabit talepli Sistem optimumdur, eğer;

- X^* , (3.1) ve (3.2) denklemlerinde sağlanıyorsa,
- her bir (O\D), ve bu (O\D) den geçen her bir rotada aşağıdaki optimal durum sağlanıyorsa,

$$\hat{c}_p^{(X^*)} \begin{cases} = \mu_w & , & X_p^* > 0 \\ \geq \mu_w & , & X_p^* = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

$\hat{c}_p^{(X^*)}$, p rotası için marjinal toplam maliyet ve aşağıdaki formasyondan elde edilir.

$$\hat{c}_p^{(X^*)} = \sum_{a \in A} \frac{\partial \hat{t}_a(f_a)}{\partial f_a} \times \delta_{ap} \quad ,$$

Sistem Optimum probleminin çözümü aşağıdaki optimizasyon probleminden elde edilebilir.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{a \in A} \hat{t}_a(f_a) \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{p \in P_w} x_p = d_w \quad , \quad \forall w \in W \\ & f_a = \sum_{p \in P} x_p \delta_{ap} \quad , \quad \forall a \in A, \\ & x_p \geq 0 \quad , \quad \forall p \in P \end{aligned} \quad (3.7)$$

3.2. Trafik Atama Problemleri İçin Çözüm Algoritmaları

Trafik atama probleminde, seyahat dağılımı modelleri ile geliştirilen O-D seyahat matrisleri ağa yüklenirler. Bu yükleme, O-D akımlarını bağlayan ağın belirli rotalarını en az seyahat maliyeti kriteri altında seçen algoritmalar yardımıyla çözülür. Ulaşım ağlarına akımların atanması için çeşitli yaklaşımlar vardır. Trafik atama yöntemlerindeki gelişme iteratif yöntemlerin ortaya çıkması ile daha da artmıştır. Trafik atama problemi için çözüm algoritmaları aşağıda belirtilmiştir.

- Arttırarak yükleme algoritması
- Frank-Wolfe algoritması
- Ardışık ortalamalar yöntemi (AOY) algoritması

Arttırarak yükleme algoritması, her seyahat eden seyahat süresini minimum edecek şekilde bir rota seçer kabulüne ilave olarak seyahat sürelerinin bağlantı üzerindeki akımlara bağlı olarak değişiklik gösterdiğini varsayar. Atama esnasında bağlantılar üzerindeki seyahat süresi kararlıdır varsayımı ile trafik hacmi atanır. Toplam seyahat matrisi çok sayıda küçük matrislere bölünür ve artan bir şekilde adım adım yüklenir. Her adımda en son yüklenen trafik hacmine göre bağlantı maliyetleri hesaplanır. Bu süreç bütün seyahatler yüklenene kadar devam eder. Bu yöntem, çok büyük sayıda seyahat hacmine sahip ağlar için kullanışlı değildir. Yerel ulaşım sistemlerinde otomobil akımlarını simule etmek için önerilir. Bu algoritma Wardrop'un denge koşulu ile uyuzmaz [28].

Bağlantı seyahat sürelerindeki varsayımlar ve bağlantı seyahat sürelerinde yolcuların algılama hataları esas alınarak, trafik atama modelleri deterministik ağ-deterministik kullanıcı dengesi (DA-DKD), deterministik şebeke-stokastik kullanıcı dengesi (DA- SKD), stokastik ağ-deterministik kullanıcı dengesi (SA-

DKD), stokastik ağ-stokastik kullanıcı dengesi (SA-SKD) şeklinde sınıflandırıldığında Frank-Wolfe algoritması ve AOY algoritmaları ile çözümler önerilmiştir. DA'da rotanın tek bir seyahat süresi vardır; yolcu O-D arasındaki en kısa süreli rotayı seçer. Gerçekte SA'da rotanın seyahat süresi tek değildir, trafik hacimleri ile değişir; her yolcu dezavantajın en az olduğu rotayı seçer [29].

Beckmann vd. (1956) tarafından formüle edilen DA-DKD modeller ya da SA-DKD modeller Frank-Wolfe algoritması ile çözülebilir. Frank-Wolfe algoritması, ayrıştırma yolu ile, lineer olmayan optimizasyon problemini çözmek için genel prosedür olarak Frank ve Wolfe (1956) tarafından önerilmiştir. Problem, bir lineer program veya rota araştırması şekline dönüştürülür. Lineer program adımı, amaç fonksiyonunun geliştirilmesi ile uygun yeni çözümler için bir araştırma sunduğundan “doğrudan bulma” olarak isimlendirilir. Rota araştırma adımı, yeni minimum amaç fonksiyonunu elde etmek için önceki sonuçlarla, geçerli doğrudan-bulma çözümünün ortalama ağırlıklarını belirler. Doğrudan-bulma adımı, uygun seyahat sürelerini varsayan en kısa yol algoritmaları (örneğin Dijkstra's algorithm) ile çözülür.

DA-SKD modeller ya da SA-SKD modeller için AOY (Sheffi ve Powell, 1982) genel bir çözüm algoritmasıdır. AOY, Frank-Wolfe algoritmasından daha genel bir yaklaşımdır. Doğrudan-bulma adımını içerir, fakat rota araştırmasında ağırlığı hesaplamak yerine, AOY öngörülen uygun ağırlıkları kullanır. Kolay ve güvenilir bir yöntemdir. Bu çalışmada, aşağıda açıklanan ve örneklenen AOY algoritması kullanılarak denge optimizasyonunun amaç fonksiyonu iteratif olarak azaltılmaya çalışılmış ve çalışma ağına ait denge trafik akımları yüklemesi yapılmıştır [7]

4. VARYASYONLU EŞİTSİZLİK PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜM ALGORİTMALARI

4.1. Varyasyonlu Eşitsizlik Teorisi

Sonlu boyutlu varyasyonlu eşitsizlik (Variational Inequality) probleminde amaç $x^* \in K \subseteq \mathbf{R}^n$ elde etmektir, yani;

$$\langle F(x^*)^T, x - x^* \rangle \geq 0, \forall x \in K \quad (4.1)$$

ve $F, K \rightarrow \mathbf{R}^n$ kapalı konveks kümesinin, sürekli fonksiyonudur. $\langle \cdot, \cdot \rangle$ ise, n boyutlu öklid uzayında içsel çarpımı göstermektedir. Sonlu boyutlu eşitsizlik problemini kısaca $VE(F,K)$ ile göstermekteyiz.

Çoğu kısıtlı ve kısıtsız optimizasyon problemini varyasyonlu eşitsizlik şeklinde oluşturabiliriz [30]. Kısıtlı Optimizasyon Problemi aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & f(x), \\ \text{s.t.} & x \in K. \end{array} \quad (4.2)$$

Eğer $K = \mathbf{R}^n$ ise yukardaki optimizasyon problemi, kısıtsız olur.

Teorem 4.1. Varsayalım ki f , kapalı konveks $K \subset \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ kümesinde türetilebilen bir fonksiyon olsun, böylece:

- (a) (4.2) probleminin her çözümü, $VE(\nabla f(x), K)$ problemine bir cevaptır.
- (b) F konveks olursa $VE(\nabla f(x), K)$ probleminin her sonucu (4.2) problemine bir cevap niteliğine sahip olabilir [30].

4.2. Varyasyonlu Eşitsizlik Problemleri İçin Çözüm Algoritmaları

Bu bölümde literatürde bulunan denklem algoritmaları verilmiştir [Dafermos ve Sparrow (1969) ve Nagurney (1999)]. Projeksiyon Metodu, ilk olarak Dafermos (1983) tarafından; Modifiyeli Projeksiyon Algoritması Korpelevich tarafından (1977) ve Dupuis ve Denge Algoritması Nagurney tarafından (1993) uygulanmıştır [1].

4.2.1. Projeksiyon algoritması

Projeksiyon Algoritması, Varyasyonlu eşitsizlik (VE (F,K)) probleminin çözümü için kullanılır. $F, K \subset \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ konveks kümesinin sürekli ve türetilbilir bir fonksiyonudur [1].

$g(x,y)$ fonksiyonu, $K \times K \rightarrow \mathbf{R}^n$ kümesine ait olan ve aşağıdaki özellikleri taşıyan bir fonksiyon olduğunu kabul edelim;

- $\forall x \in K, g(x,x)=F(x)$
- $\forall x, y \in K, \nabla_x g(x, y)$ simetrik ve kesin pozitif olsun.

Amaç: Aşağıdaki Varyasyonlu Eşitsizliğin çözümü;

$$\langle g(x, y)^T, Z - Y \rangle \geq 0, \forall z \in K \quad (4.1)$$

Her zaman,

$$g(x, y) = F(y) + \frac{1}{\rho} G(x - y) \quad (4.2)$$

olarak açıklanıyorsa, $\rho > 0$ ve G simetrik ve kesin pozitif bir matris ise, (4.1). varyasyonlu eşitsizlik probleminin çözümü, y sabit miktarı için, aşağıdaki optimizasyon probleminin çözümüne eşdeğer denir.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \frac{1}{2} \langle x^T, Gx \rangle + \langle \rho F(y) - G_{y,x} \rangle \\ \text{s. t.} \quad & x \in K \end{aligned} \quad (4.3)$$

(4.1) varyasyonlu eşitsizliğin çözümüne yaklaşan sonuçlar aşağıda tekrarlanan adımlar sonucunda elde edilecektir. Bu algoritmaya Projeksiyon Algoritması adı verilmiş olup aşağıda adımlar halinde verilmektedir.

Algoritma Adımları;

Adım 1: $x^{(0)} \in K$ birinci olabilirlik diye öngörülür, ve $k = 1$ yazılır.

Adım 2: Aşağıdaki VE'nin çözümünden $x^{(k)}$ elde edilir.

$$\langle g(x^k, x^{(k-1)}), x - x^{(k)} \rangle \geq 0, \quad \forall x \in K \quad (4.4)$$

(4.4), VE ve (4.5) optimizasyon problemine eşdeğerdirler. Eğer G diyagonal bir matris ise o zaman (4.5), ikinci dereceden bir optimizasyon problemidir.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \frac{1}{2} \langle (x^{(k)})^T, G_x^{(k)} \rangle + \langle \rho F(x^{(k-1)}) - Gx^{(k-1)}, x^{(k)} \rangle \\ \text{s. t.} \quad & x \in K \end{aligned} \quad (4.5)$$

Adım 3: Eğer $\text{Max} |x_l^{(k)} - x_l^{(k-1)}| \leq \varepsilon^*, \forall l = 1; n$ olur ise, algoritma tamamlanmış demektir, yoksa, $k=k+1$ olarak ikinci adımdan algoritma tekrarlanır.

4.2.2. Modifiyeli projeksiyon algoritması

Modifiyeli Projeksiyon algoritması, $VE(F,K)$ Varyasyonlu Eşitsizlik probleminin çözümü için kullanılır. Kullanılan F , Lipschitz Sürekliliği ve tekdüzelik şartlarına uymaktadır. Projeksiyon algoritmasında kullanılan kesin pozitif matrisi ve simetrik matris, bu algorithmada kimlik matrisidir. Algoritmanın adımları aşağıda verilmektedir [1].

Adım 1: Birinci olabilirliği $x^{(0)} \in K$, olarak tahmin edip, $k=1$ alınır sonra ρ ,

$0 < \rho < \frac{1}{L}$ (L, F fonksiyonu için Lipschitz sabitidir) olarak seçilir.

Adım 2: $\langle (\bar{x}^{(k-1)} + (\rho F(x^{(k-1)}) - x^{(k-1)}))^T, x - \bar{x}^{(k-1)} \rangle \geq 0, \forall x \in K$

Varyasyonlu eşitsizliğin çözümünden, $\bar{x}^{(k-1)}$ elde edilir ve bu sonuç aşağıdaki optimizasyon probleminin çözümüne eşdeğerdir.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \frac{1}{2} \langle (\bar{x}^{(k-1)})^T, \bar{x}^{(k-1)} \rangle + \langle (\rho F(x^{(k-1)}) - x^{(k-1)})^T, \bar{x}^{(k-1)} \rangle \\ \text{s.t. } & x \in K, \end{aligned} \quad (4.6)$$

Adım 3: Aşağıdaki varyasyonlu eşitsizlik probleminin çözümünden $x^{(k)}$ elde edilir.

$$\langle x^{(k)} + \rho F(\bar{x}^{(k-1)}) - x^{(k-1)} \rangle^T, x - x^{(k)} \geq 0, \forall x \in K \quad (4.7)$$

* ε daha önceden belirlenen pozitif miktar ve x_l, x vektörüne ait olan bir ünedir.

yukarda elde edilen sonuç, aşağıdaki optimizasyon probleminin çözümüne eşdeğerdir.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \frac{1}{2} \langle \mathbf{x}^{(k)} \rangle^T, \mathbf{x}^{(k)} \rangle + \langle \rho \mathbf{F}(\bar{\mathbf{x}}^{(k-1)}) - \mathbf{x}^{(k-1)} \rangle^T, \mathbf{x}^{(k)} \rangle \\ \text{s. t. } & \mathbf{x} \in \mathbf{K}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

Adım 4: Eğer; $\max |x_l^{(k)} - x_l^{(k-1)}| \leq \varepsilon, \forall l = 1:n$, olursa, algoritma tamamlanmıştır, yoksa, $k = k + 1$ ve ikinci adıma geri donup algoritma tekrarlanır [1].

4.2.3. Denge (Equilibration) algoritması

Denge algoritması, ulaşım şebekesinde, akış atama problemlerinin çözümünde kullanılır. Bu bölümde, önce Denge algoritması, sabit talep ve tek O-D'den oluşan bir şebeke için sunularak, algoritma, $|W|$, O-D'den oluşan bir şebeke için genelleştirilecektir.

Denge algoritması, her adımda, en yüksek, en düşük maliyetli yolu bir O-D için tanımlar ve akışı her iki tanımlanmış yollarda; aşağıda tanıtılan teknik doğrultusunda dengeler. Bilindiği gibi, maliyet fonksiyonu her bir bağlantı için doğrusal ve ayrılabilir, yani;

$$t_a(f_a) = g_a f_a + h_a, \quad g_a, h_a > 0, \quad \forall a \in A. \quad (4.9)$$

Tek O-D'li Kullanıcı denge problemi için Denge algoritması ve adımları;

Adım 1: Tek olan O-D, için mümkün yol akışını seçip $(x^{(0)} \in \mathbf{R}_+^{|P|})$, $k = 1$ olarak alınır.

Adım 2: r aşağıdaki gibi bulunur.

$$r = \{p \mid \max_p T_p, x_p^{(k-1)} > 0\}, \quad (4.10)$$

r , en yüksek maliyetli yolu temsil eder; q , en düşük maliyetli yolu temsil eder ve aşağıda belirtildiği gibi bulunur. Eğer $|T_r - T_q| \leq \varepsilon$ ise algoritma tamamlanmıştır, yoksa üçüncü adıma gidilir ve algoritma tekrarlanır.

Adım 3: Δ' ve Δ aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\Delta' = \frac{|T_r - T_q|}{\sum_{a \in A} g_a (\delta_{aq} - \delta_{ar})^2}, \quad \Delta = \min\{\Delta', x_r^{(k-1)}\}. \quad (4.11)$$

Eğer $\Delta = 0$ ise, algoritma tamamlanmıştır, yoksa, yeni mümkün akış aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{cases} x_r^{(k)} = x_r^{(k-1)} - \Delta \\ x_q^{(k)} = x_q^{(k-1)} + \Delta \end{cases} \quad (4.12)$$

ve geri kalan yollar için, yol akışı değişmez.

Yani,

$$x_p^{(k)} = x_p^{(k-1)}, \quad \forall p \in P \quad (p \neq q, p \neq r). \quad (4.13)$$

Adım 4: $k = k + 1$ alınır ve adım ikiye gidilir.

Yukarıdaki algoritmanın üçüncü adımı, E_w^{UO} ile gösterilir. w , şebekenin tek O-D olsun. E^{UO} , algoritmanın üçüncü adımının tekrarlanması sonucu olup aşağıdaki eşitlikle açıklanır [1].

$$E^{UO} = E_w^{UO} \circ \left(E_w^{UO} \circ \left(\dots \circ (E_w^{UO}) \right) \right). \quad (4.14)$$

Tek O-D'li Sistem Optimum problemi için Denge algoritması ve adımları;

Adım 1: Tek olan O-D için mümkün yol akışını seçip ve $(x^{(0)} \in R_+^{|P|})$ ve $k := 1$ olarak alınır.

Adım 2: r miktarı aşağıdaki eşitlikle bulunur.

$$r = \{p \mid \max_p \hat{T}'_p, x_p^{(k-1)} > 0\}, \quad (4.15)$$

r, kullanılmış en yüksek maliyetli yolu göstermektedir. q kullanılmış en düşük maliyetli yolu göstermekte olup aşağıdaki gibi bulunur.

$$q = \{p \mid \min_p \hat{T}'_p\}, \quad (4.16)$$

Eğer $|\hat{T}'_r - \hat{T}'_q| \leq \varepsilon$ olursa, algoritma tamamlanmıştır, yoksa üçüncü adıma gidilir.

$$\Delta' = \frac{|\hat{T}'_r - \hat{T}'_q|}{\sum_{a \in A} 2g_a (\delta_{aq} - \delta_{ar})^2}, \quad \Delta = \min\{\Delta', x_r^{(k-1)}\}. \quad (4.17)$$

Eğer $\Delta = 0$ ise algoritma tamamlanmıştır, yoksa yeni mümkün akış aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\begin{cases} x_r^{(k)} = x_r^{(k-1)} - \Delta \\ x_q^{(k)} = x_q^{(k-1)} + \Delta \end{cases} \quad (4.18)$$

ve diğer yollar için, akış aynı kalır, yani;

$$x_p^{(k)} = x_p^{(k-1)}, \quad \forall p \in P \quad (p \neq q, p \neq r). \quad (4.19)$$

Adım 4: $k = k + 1$ alınır ve adım ikiye gidilir.

Yukardaki algoritmanın üçüncü adımı E_w^{SO} ile gösterilir. w , şebekenin tek O-D olsun. E^{SO} , algoritmanın üçüncü adımının tekrarlanması bir sonucu olup, aşağıdaki eşitlikle açıklanır.

$$E^{SO} = E_w^{SO} \circ \left(E_w^{SO} \circ \left(\dots \circ (E_w^{SO}) \right) \right). \quad (4.20)$$

Sunulan algoritmaları $|w|$, O-D için genelleştirmek için, E^{UO} ve E^{SO} fonksiyonlarını aşağıdaki şekilde yazılır.

$$E^{UO} \equiv \left(E_{w|w|}^{UO} \circ \left(\dots \circ (E_w^{UO}) \right) \right) \circ \dots \circ \left(E_{w1}^{UO} \circ \left(\dots \circ (E_{w1}^{UO}) \right) \right) \quad (4.21)$$

$$E^{SO} \equiv \left(E_{w|w|}^{SO} \circ \left(\dots \circ (E_w^{SO}) \right) \right) \circ \dots \circ \left(E_{w1}^{SO} \circ \left(\dots \circ (E_{w1}^{SO}) \right) \right) \quad (4.22)$$

$|w|$, sayıda O-D'ye sahip olan Kullanıcı Optimum problemleri için Denge algoritması ve adımları;

Adım 1: Mümkün yol akışını seçiniz. Mümkün bağlantının akışını hesaplayınız ve $k = 1$ alınız.

Adım 2: E^{UO} hesaplayınız.

Adım 3: her bir $|w|$: $i=1$ için $|T_{rwi} - T_{qwi}| < \varepsilon$ ise, algoritma tamamlanmıştır ve;

$$r_{wi} := \left\{ p \mid \max_{p \in P_{wi}} T_p, x_p^{(k)} > 0 \right\}, \quad i = 1: |W|, \quad (4.23)$$

$$q_{wi} := \left\{ p \mid \min_{p \in P_{wi}} T_p, x_p^{(k)} > 0 \right\}, \quad i = 1: |W|, \quad (4.24)$$

aksi taktirde; $k = k + 1$ alıp, ikinci adıma geri dönünüz.

$|w|$, sayıda O-D ye sahip olan Sistem Optimum problemleri için Denge algoritması ve adımları:

Adım 1: Mümkün yol akışını seçiniz. Mümkün bağlantının akışını hesaplayınız ve $k = 1$ alınız.

Adım 2: E^{SO} hesaplayınız.

Adım 3: her bir $|w|$: $i=1$ için $|\hat{T}_{rwi} - \hat{T}_{qwi}| < \varepsilon$ ise, algoritma tamamlanmıştır ve;

$$r_{wi} = \{p \mid \max_{p \in P_{wi}} \hat{T}'_{p, x_p^{(k)}} > 0\}, \quad i = 1: |W|, \quad (4.25)$$

$$q_{wi} = \{p \mid \min_{p \in P_{wi}} \hat{T}'_{p, x_p^{(k)}} > 0\}, \quad i = 1: |W|, \quad (4.26)$$

aksi taktirde; $k = k + 1$ alıp, ikinci adıma geri dönünüz [31].

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Taşıma konusu ilk olarak 1950'lerde Hitchcock [49] ve daha sonra Nobel Ödülü'nü paylaşan Kantorovich (1954) tarafından, doğrusal programlama ile kaynakların optimum tahsisi açısından incelenmiştir. Ancak, bu klasik ulaşım tipi doğrusal programlama modellerinde hiçbir izdiham yoktur. Sıkışık taşıma şebekesinin kullanıcı problemi, başlangıçtan varış noktalarına kadar seyahat rotalarını bulmak için Kohl ve Pigou tarafından, iki düğümlü, iki bağlantılı bir şebeke için incelenmiş ve daha sonra Knight tarafından daha da geliştirilmiştir [12].

Wardrop (1952, s. 345), (Dafermos ve Sparrow 1969) kullanıcı optimizasyonu ve sistem optimizasyonunda trafik şebeke kullanımı için, iki yaygın alıntı kriterleri belirlemiştir. Wardrop'un ilk kriterine göre; eğer yolcuların başlangıç noktasından varış noktasına kadar seçtikleri bir rota varsa, bu rotadaki seyahat maliyeti, zamanı seçilmeyen rotalara göre daha azdır. Sistem optimizasyonu ise; bir kontrol merkezi tarafından seçilen rotalar, şebekenin tüm rotalarındaki toplam seyir maliyetini en aza indirgeyen bir sistemdir [13-33].

Trafik kullanıcı denge problemlerinde, duyarlılık analizi, bu problemlerin formülasyonlarının önerilmesi ile başlatılmıştır. Denklem akış değişimleri niteliksel olarak bilgi değişimlerine yanıt vermektedirler. Bu konu Beckmann ve McGuire ve Winsten (1956) tarafından vurgulanmıştır. Sonra Dafermos [34] ve Nagurney (1984) bir parametrik problemde [1], trafik kalıbının sürdürülebilirlik değişiklikleri ile ilgili kapsamlı iletilerde bulunmuşlardır.

Barabasi (2003)'ye göre; şebekelerin karmaşıklığını anlamak için, şebeke topolojisi ve yapısından öteye gidip, bağlantılar üzerinde yer alan dinamikleri incelemek gerekmektedir [35]. Örneğin; Latora ve Marchiori (2001, 2002, 2004)

birçok mevcut şebeke üzerinde avantaj gösteren şebeke verimliliği ölçütünü önermiş, (MBTA) Boston ilinde metro şebekesi ve internet ile ilgili uygulamalar yapmışlardır. Bununla birlikte; kullandıkları ölçütlerin sadece jeodezik bilgi ve şebeke akışları, maliyetler ve kullanıcıların davranışlarından oluşan bilgileri yakalamakla sınırlı kalmadığını, bu ölçütlerin merkezi veya merkezi olmayan karar verme ilkelerine göre de uyum sağlayabilen ölçütler olduğunu çalışmalarında belirtmektedirler [36].

Ulaşım şebekeleri aksamalarını modelleme girişimi ilk olarak Du ve Nicholson, (1997), Asakura (1996) ve Chen (2000) tarafından kapasiteli bir azalma ile ilişkili olumsuz etkileri ölçmeye yönelik bir çaba olarak başlatılmıştır [37]. Sonraki çalışmalar; şebeke kesintilerinin farklı amaçlar veya sonuçların dikkate alınması ve birçok farklı şekilde gelişmesi üzerine yapılan bir dizi şebeke kesintisi çalışmaları ile ilgilidir.

Robinson [38] bağlantı akış denklemlerinin türevlerini hesaplama yaklaşımını, yolculuk talebi ve bağlantı maliyet fonksiyonu karmaşıklık parametreleri sayesinde geliştirmiştir. Bu makalelerde kullanılan temel kavramlar, tam fonksiyon teoremi (Classical implicit function theorem) olarak tanımlandı. Denklem rota akışı genellikle yegane olmadığı için, mecburen tam fonksiyon teoremini kullanabilmek için kısıtlandırılmış problemler kurdu. Sonra esas problemi kısıtlandırılmış problemlere eşdeğer tutarak duyarlılık analizi yapmaya çalıştı. Bu makalelerde bağlantı akışına uyan, bağlantı maliyet fonksiyonunu güçlü bir monoton olarak varsaydı ve sonra bağlantı akış denklemlerinin sürekliliğini ispat etti. Smith [39] yang ve Bell [40] bir rota akış denkleminde her bir kullanıcı optimal rotasının pozitif akışa sahip olduğunu varsaymışlardır. Bu varsayım onlara denklem koşullarını bir eşitlikler kümesine transfer edebilme imkanı sağlamış böylece tam fonksiyon teoremini uygulayabilmişlerdir.

Qiu ve Magnanti [41] bir VE probleminin çözümünün devamlılığını ve yön farklılığını araştırmışlar, enteresan olan fonksiyonu bu problem karmaşık tanımlar iken, polihedral konveks küme onu sabit tanımlamıştır. Bu sonuçları, trafik kullanıcı denge probleminde sabit ve elastik taleplerle kullanmışlardır. Gerçi onlar Lipschitz sürekliliği terimini makalelerinde kullandılar, ama bu tanım ve özellikler Lipschitz sürekliliğini yansıtmıyordu ve şimdi varyasyonel analizde tamamen anlaşılmıştır ve Rockafellar ve Wets [42] tanımıyla durgunluk kavramına oldukça yakındır. Gerçekte onların tanımının durgunluktan biraz daha fazlasına ihtiyacı var, öyle ki karmaşık olmayan problemlerin yegane olan sonuçlarına ihtiyaç duymakta. Onların anahtar farzları bağlantı maliyet fonksiyonunun affine gövdesini de içermesidir.

Yen [43], bölgesel güçlü monotonluk ve bölgesel lipschitz varsayılan bağlantı akışını, bağlantı maliyet fonksiyonu ve yolculuk talep karmaşıklığı ortamında ele alarak bölgesel varlığı, yeganeliği ve Lipschitz sürekliliğini ispat etmeyi başardı. Bu sonuca varmak için, sağ tarafı P ile göstererek, doğrusal eşitsizliği tanımladı, sonra P kümesinden bir noktayı konveks polyhedral kümesinde belirliyerek bir noktanın metrik projeksiyonunda Lipschitz sürekliliğini gösterdi. Outrata [44], fonksiyonun bir VE'ı sabit polihedral konveks kümesinde sonuçların duyarlılığını baz aldı. Bu sonuçları bir seri matematiksel programların çözümünde, denklem kısıtlarıyla kullandı.

Patriksson ve Rockafellar, elastik-talepli trafik kullanıcı dengesinde, bölgesel yeganeliği, Lipschitz sürekliliğini ve yarı farklılığı araştırdı. O-D maliyetinde tamamen monoton varsaydığı negatif yolculuk talep fonksiyonunu, bir (x,d) uzayında bir VE olarak formülize ettiler. Bu makalede, bağlantı maliyeti fonksiyonu ve ters talep fonksiyonunun negatifini bir kritik koninin bölgesel monoton affine gövdesinde varsayılmıştır. En son Patriksson [44] ayrılabilen

bağlantı maliyeti ve talep fonksiyonunun analizini yapmıştır. Patricsson, sabit talebi bir özel durum olarak içinde barındıran bir trafik kullanıcı dengesinin elastik talep dengesinin elastik talep duyarlılığıyla ilgilenmiştir. Her iki bağlantı maliyet fonksiyonu ve yolcu talep karmaşıklığını içinde bulunduran bu çalışma yanlış olduğu, Robinson [45] tarafından gösterilmiştir.

Özetle; elastik talep denklemi sabit talep denklemini bir özel durum olarak kapsamakta; Patriksson ve Rockafellar(2003); Patrisson (2007); ve Qiu ve Magnant (1989) tarafından elastik-talep denklemleri için geliştirilen duyarlılık analizi metotları, sabit talep durumlarında kullanışlı değildir. Çünkü bu yazarların gerek duydukları durum: talep fonksiyonunun negatifi, O-D maliyetine uyarak kuvvetle monoton olmasıdır. O-D maliyetine bağlı olmayan, sabit talep durumlarında doğru bir varsayım değildir. Jenelius (2007) [46], statik trafik kullanıcı dengesi problemlerini ele alarak, yeni bir yaklaşımla çarpma matrisi yardımıyla doğrusal trafik kullanıcı denge problemini ve onun türevlerini çözmeyi başarmıştır.

Bağlantı kapasitesi değişiklikleriyle ulaşım şebekesinin sürdürülebilirliğini incelemek yeni bir kavramdır. Sakakibara ve diğerleri [47], ulaşım şebekesinin sürdürülebilirliğini inceleyen ilk araştırmacılardandır. Topoloji indisini tanımlayarak ve şebekenin yapısını göz önünde bulundurarak, ulaşım şebekesini incelemişlerdir.. Onlara göre; bir ulaşım şebekesi eğer iki bölgeyi birbirine bağlayan yol şebekeden izole edilebilirse, o iki bölgeyi birbirine bağlayacak başka bir yol veya rota bulunabilirse sürdürülebilirdir.

Scott ve diğerleri [48], toplam maliyeti kullanarak ve kullanılan optimal akış, kullanıcı optimumu ile elde edebilirliği göz önünde bulunarak, ulaşım şebekesinin sürdürülebilirliğini incelemişlerdir. Bu bakış açısıyla, bir caddenin elenmesiyle, toplam maliyet çok fazla yükselmiyorsa o sürdürülebilirdir. Ayrıca

toplam maliyeti kullanarak, kritik bağlantıları da tanımlamışlardır. Şebeke Sürdürülebilirlik Indisi (NRI), Scott ve diğerleri tarafından tanıtılarak metodolojisi geliştirilen orijinal formülasyondur. NRI belirli bir bağlantının genel ulaşım şebekesi için ne kadar kritik olduğunu ölçer [48].

Nagurney ve Qiang [6], şebeke etkinlik ölçüsünü tanımlayarak, kullanıcı optimal yardımıyla, kullanılan optimal akışı elde etmiştir ve kapasitenin azaltılmasıyla, etkinlik ölçüsünün azalmasını incelemişlerdir..

Nagurney ve Qiang [25], toplam maliyeti kullanmıştır ve GTMİ (Göreceli Toplam Maliyet İndeksini) tanımlamıştır. Ulaşım şebekesinin sürdürülebilirliği, bağlantı kapasitesinin azaltılmasıyla denenmiştir. Sullivan ve diğerleri [2], toplam maliyeti kullanarak, bağlantıların kapasitesini azaltmakla ulaşım şebekesinin bağlantılarını incelemişlerdir.

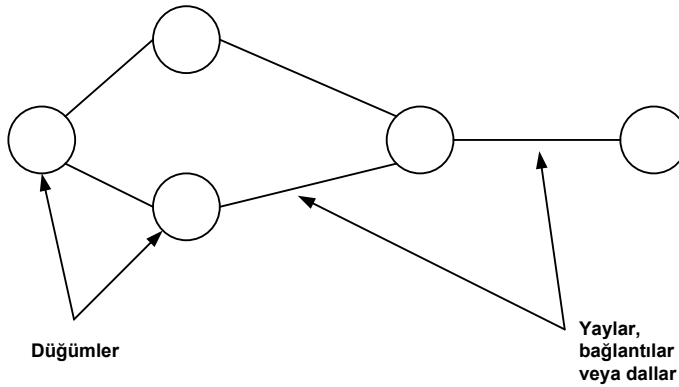
Yukarda belirtilen çalışmalar'da elektrik şebekeleri veya kara yolları ağlarını baz alarak formülasyonlar geliştirilmiştir, ama hayolları şebekeleri ile ilgili böyle bir çalışma mevcut değildir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve formülasyonlar bizim çalışmamızda'da kullanılacaktır.

6. HAVAYOLU ŞEBEKESİ VE BİLEŞENLERİ

Havayollarının şebekesini tasarlarken bir çok etken göz önünde bulunur. Uçulması gereken bağlantıların O-D'lerine bakılarak karar verilmesi, bu düğümlerin veya uçların hangi özellikler taşıdığına büyük ölçüde bağlıdır. Düğümün hab olup olmaması, mürettebat istasyonu olup olmaması, havaalanının kapasitesi ve standartlarının uygun olup olmaması ve bir çok benzer nedenden dolayı bazı O-D'ler arasındaki izdihamın değişmesi farklı şebeke tiplerini ortaya çıkartabilir. Bu nedenden dolayı havayolunun şebeke bileşenlerini incelemek çok yararlı olmaktadır [1].

6.1. Şebekeler ve Şebeke Terminolojisi

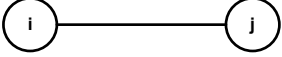
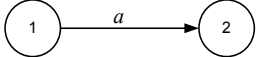
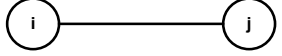
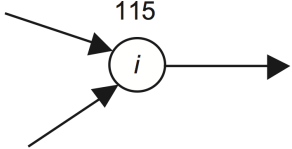
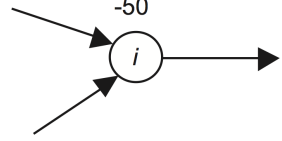
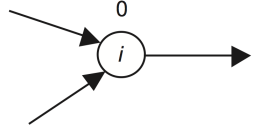
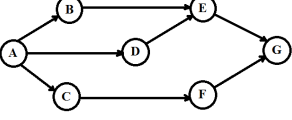
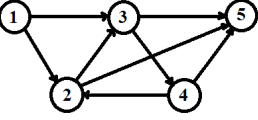
Bir şebeke bir kaç düğümü birbirine bağlayan bir kaç bağlantıdan oluşmaktadır. Genelde bu bağlantılar üzerinde meydana gelen eden ve bir düğümden başka bir düğüme giden akışlar mevcuttur. Şekil 6.1 bir şebekeyi temsil etmektedir [3].



Şekil 6.1. Bir şebekenin temel bileşenleri

Şebekeler veya ağlarda genellikle yaygın olan bazı terimler kullanılmaktadır, bu terimleri aşağıdaki açıklamalarla tanıtacağız.

6.1.1. Döğümler ve bağlantılar

| SIRA | ŞEKİL | TANIM |
|------|--|--|
| 1 | $x_{i,j} = 100 \text{ yolcu}$  | İki döğüm arasındaki akış |
| 2 |  | a yönlü bağlantı yolculuk başlangıç noktasını yolculuk varış noktasına bağlamaktadır |
| 3 |  | Yönsüz akış |
| 4 |  | Arz döğümü |
| 5 |  | Talep döğümü |
| 6 |  | Aktarma döğümü |
| 7 |  | Bir şebeke A dan G ye kadar üç yol sunmaktadır |
| 8 |  | Bağlantılı şebeke |

Şekil 6.2. Şebeke bileşenleri

6.1.2. Akış

İki farklı düğüm tek bir ok ile birbirine bağlandığında; söz konusu iki düğüm arasında bir akış oluşur, ve bu düğümler ve bağlantılar üzerindeki her türlü bilgi, yolcu, veya yük hareketliliğine akış denilir.

6.1.3. Yönlü bağlantı

Eğer bir bağlantı veya bağlantı üzerindeki akış sadece bir yönde oluşabiliyorsa o bağlantı yönlü bağlantı olarak tanımlanır. Yönlü bağlantı şekil olarak, akış yönünde bir ok olarak gösterilir (Şekil 6.2).

6.1.4. Yönsüz bağlantı

Bir bağlantı (iki düğüm arası) üzerindeki akış, her iki yönde de cereyan edebiliyorsa bir yönsüz bağlantıdır. Yönsüz bağlantı şekil olarak sade ve düz bir çizgi olarak iki düğümü birbirine bağlamaktadır (Şekil 6.2).

6.1.5. Bağlantı kapasitesi

Bir bağlantı üzerinde cereyan edebilen maksimum akış miktarına bağlantı veya bağlantı kapasitesi denilir.

6.1.6. Arz düğümü

Bir düğüme gelen akış miktarı o düğümden çıkan akış miktarından daha fazlaysa, yani net akış miktarı pozitif olan düğüm arz düğümüdür (şekil 6.2).

6.1.7. Talep düğümü

Net akış miktarı negatif olan düğüm veya düğümden çıkan akış, düğüme giren akıştan daha fazla olursa o düğüm talep düğümüdür (Şekil 6.2).

6.1.8. Aktarma (Transshipment) düğümü

Bir düğüme giren akış miktarı ile çıkan akış miktarı eşit veya net akış miktarı sıfır ise o düğüm aktarma düğümüdür (Şekil 6.2).

6.1.9. Yol (Path)

Bazen iki düğüm bir tek bağlantıyla birbirine bağlanmazlar, ama bir dizi bağlantılar sayesinde bu iki düğüm birbirine bağlanabilir (Şekil 6.2). Bir yol, bir dizi farklı bağlantıların iki noktayı birbirine bağlamasıyla ortaya çıkmaktadır. Havayolları şirketleri uçuş şebekelerinde, Habları kullanarak şehirleri birbirine bağlarlar.

6.1.10. Başlangıç (Orijin)

Bir akışın, seyahatin veya seferin başlangıç noktası / düğümüdür.

6.1.11. Destinasyon

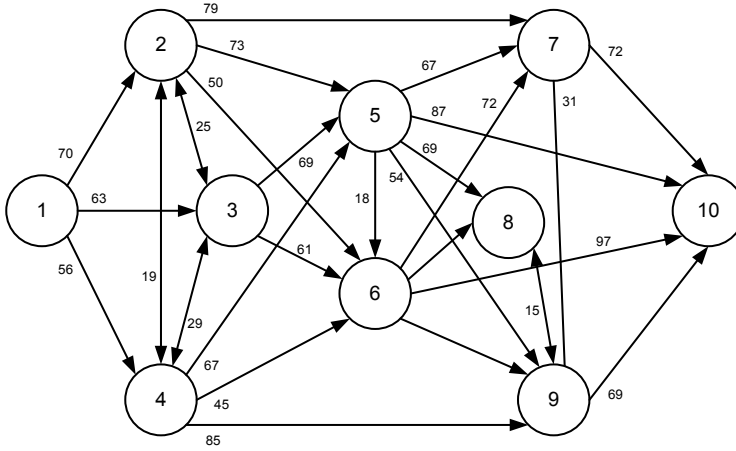
Bir akışın, seyahatin veya seferin sonlandığı noktası / düğümüdür.

6.1.12. Bağlantılı şebeke

Eğer bir şebekede her iki nokta en az bir yolla birbirine bağlanıyorsa o şebeke bağlantılı şebekedir (Şekil 6.2).

6.1.13. Uçuş mesafesi

Havayolları şebekelerinde uçuş mesafesi, uçuş zamanı olarak ölçülür (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Uçuş şebekesi ve şehirler arası zaman bakımından mesafeler

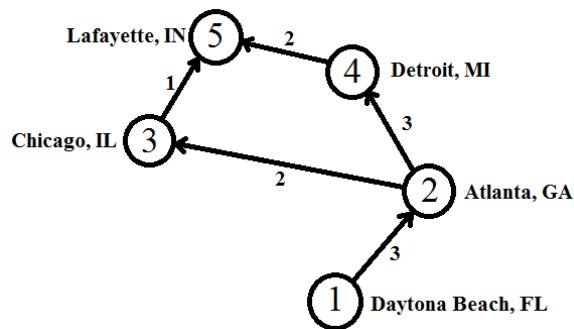
6.1.14. Doluluk oranı

Uçakların doluluk oranı, iki şehir arasındaki uçuş sayısının belirlenmesinde önemli role sahiptir. Doluluk oranı, yolcularla doldurulan uçak sandalyelerinin ortalama yüzdesidir. Uçuş saati, uçuş sayısı, hizmet ve konfor seviyesi doluluk oranını etkileyen en önemli faktörlerdir. Ancak, yüksek doluluk oranına sahip olmak havayolları şirketleri için her zaman yüksek gelir ve yüksek kâr anlamına gelmemektedir.

Çizelge 6.2. beklenen talepler ve doluluk oranlarını 150 koltuklu Airbus A-320 için göstermektedir. Bu tabloya istinaden 65% lik bir doluluk oranı 100% luk bir doluluk oranına göre daha fazla gelir sağlamaktadır [3].

Çizelge 6.1. Shuttle Hopper Havayolları için şehirler arası maksimum uçuş sayısı

| Şehir Çiftleri | Günlük Maksimum Uçuş Sayısı |
|----------------|-----------------------------|
| DAB-ATL | 3 |
| ATL-ORD | 2 |
| ATL-DTW | 3 |
| ORD-LAF | 1 |
| DTW-LAF | 2 |



Şekil 6.4. Başlangıçtan varışa kadar şebeke gösterimi

Çizelge 6.2. Yük faktörü ve beklenen kazanç

| Ortalama Bilet Ücreti | Öngörülen | | Beklenen Kazanç |
|--------------------------|-----------------|-------------|--------------------|
| | Yolcu Sayısı | Yük Faktörü | |
| \$240 | 100 | 0.67 | \$24,000 |
| \$220 | 115 | 0.77 | \$25,300 |
| \$200 | 128 | 0.85 | \$25,600 |
| \$180 | 140 | 0.93 | \$25,200 |
| \$160 | 150 | 1.00 | \$24,000 |

6.2. Minimum Maliyetli Akış Problemi

Minimum maliyetli şebeke akış problemi, düğümlerin ihtiyaçlarını minimum maliyetle karşılamak istemektedir. Bu problem, ulaştırma, aktarma ve en kısa yol problemlerinin genelleştirilmiş şeklidir. Bu problem, akış maliyetini ve her bir bağlantının kapasitesinin bildiğini varsaymaktadır [3].

6.3. Maksimum Akış Problemi

Maksimum akış problemi, minimum maliyet akış probleminin özel bir halidir. Bu problem, belli kapasiteli şebekelerde, bir düğümden başka bir düğüme gönderilmesi mümkün olan maksimum akış miktarını bulma çabasıdır. Bundan dolayı şebekelerdeki bağlantıların kapasite diye bir kısıtı mevcuttur [3]. Örnek: Bir havayolları şirketinin kurumsal politikasına göre, hava alanları arasındaki maksimum uçuş sayısı 6.1. çizelgesine göre düzenlenmiş ve şekil 6.4 de gösterilmiştir.

6.4. Havayollari Bağlantı Maliyet Fonksiyonu

Taşıma yolları doğal ya da suni olarak geliştirilmiş yollar olabilir. Doğal yollar deniz ve hava yolu taşımacılığında kullanılır ve herhangi bir bakım ya da düzenleme gerektirmezler. Ancak her iki taşıma yolu da suni olarak geliştirilebilir. Örneğin; ırmaklar gemi taşımacılığı için elverişli konuma getirilebilir.

Havayolu ise tamamıyla doğal bir yoldur. Bununla beraber taşıma maliyetleri, taşınan mal başına oldukça yüksektir. Kargo şirketleri liman ve rıhtım ücretleri ödemektedirler. Uçakların hava limanlarında sürekli bakım, onarım vb. destek ünitelerine sahip olabilmeleri için ödedikleri ücretler de, taşınan kargonun maliyetinin artmasına yol açmaktadır. Pahalı bir taşıma sistemi olmasına rağmen trafik sıkışıklığı gibi sorunlarla karşılaşmadan zamanında ve kargoya zarar vermeden taşıma sağlandığından dolayı havayolu taşımacılığı, tıpkı deniz yolu taşımacılığı gibi en çok tercih edilen taşıma sistemlerindedir. Elbette her taşıma sisteminde olduğu gibi bu sistemin de taşıdığı bazı riskler söz konusudur.

Havayolu taşımacılığında göze çarpan bir diğer nokta da diğer taşıma sistemlerinde kullanılan araçlar gibi istenildiği zaman kullanılan ulaşım vasıtasının (uçak, helikopter, balon vb.) seyrinin durdurulamamasıdır. Uçuş kollektif bir çalışmayı gerektirir ve daima radarlar vasıtasıyla hava kontrolörleri ile irtibat halinde olmak zorunludur. Dünyadaki en yoğun hava sahalarından biri İngiltere'nin güneybatısında yer alan ve çeşitli büyüklükte limanlara sahip olan Londra havalimanlarıdır. Buradaki hizmetler İngiliz Sivil Havacılık Dairesi (UK's Civil Aviation Authority-CAA) tarafından Savunma Bakanlığı (Ministry of Defence) ile ortak yürütölmektedir. Ulusal Hava Trafik Hizmeti (National Air

Traffic Services-NATS) olarak adlandırılan kuruluşun görevi hava trafiğini kontrol etmek, güvenli ve emniyetli uçuşlar sağlamaktır. Bunun için NATS; hava kontrol odaları, savunma radarları, 100 civarında uçuş işaretleri, limanda hazır ilk yardım, hava-yer ilişkisini sağlayan iletişim cihazları ve yoğun telekomünikasyon şebekesine sahiptir [50].

Bu bölümde yolcu akış fonksiyonu ve bağlantı maliyet fonksiyonundan oluşan bir yolcu akışı a uçağı için f_a ile gösterilsin.

Eğer a uçağının kapasitesi c_a ile gösterilirse, lf doluluk oranı göz önünde bulundurularak, elverişli ve kullanılması mümkün kapasite $lf \times c_a$ ile gösterilir [1].

Böylece a numaralı uçak için akış oranını $\frac{kf_a}{lf \times c_a}$ ile gösterilsin.

Bu çalışmada BPR tarafından sunulan bağlantı maliyet fonksiyonunu kullanılmaktadır [26].

$$t_a = fc_a \left[\alpha \left(\frac{kf_a}{c_a} \right)^\beta \right] \quad (6.1)$$

Doluluk oranı göz önünde bulundurulduğunda ise:

$$t_a = fc_a \left[\alpha \left(\frac{kf_a}{lf \times c_a} \right)^\beta \right] \quad (6.2)$$

a uçağının en düşük uçuş maliyeti veya en ucuz bilet fiyatını fc_a ile gösterilsin.

α , β ve k : Bölgeler ve şirketlere özel olan doluluk (congestion) çarpımları.

7. ETKİNLİK ÖLÇÜTLERİ VE HAVA YOLU ŞEBEKESİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

7.1. Etkinlik Ölçütleri

Bu bölümde kritik bağlantıları belirlemek için LM ve QN olmak üzere iki farklı performans /etkinlik ölçütü tanımlanacaktır.

7.1.1. Latora ve marchiori ölçütü

Latora ve Marchiori (LM) etkinlik ölçütü şebekenin yapısına göre elde edilir, en önemli özelliği talep ve bağlantı maliyetinden bağımsız olmasıdır.

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in N} \frac{1}{d_{ij}} \quad (7.1)$$

G : şebeke

$E(G)$: LM etkinlik ölçütü

$n(n-1)$: O-D'lerin toplam sayısı

d_{ij} : i ve j uçları arasındaki en kısa yol

n : düğüm sayısı

LM etkinlik ölçütüne göre; eğer uçlar arasındaki mesafe en kısa mesafe sayılırsa bir şebeke verimli ve etkindir.

Not: Eğer i, j arasında hiç bir yol olmazsa, o iki uç arasında $d_{ij} = \infty$ olan bir yapay (suni) yol olduğu farz edilir [5,25].

LM Etkinlik Ölçümünün Göreceli Düşüşü

$g \in A$, G şebekesinin bir bağlantıyı ve, $\bar{I}(\{g\})$ G şebekesinin, LM etkinlik ölçümünün göreceli düşüş miktarı olsun. Her ne zaman $\{g\}$ bağlantısını şebekeden çıkartılırsa LM etkinlik ölçümünün düşüş miktarı aşağıdaki denklemden elde edilir [1,25].

$$\Delta E = E(G) - E(G - \{g\}), \quad (7.2)$$

LM etkinlik ölçümünün göreceli düşüş miktarını bulmak için aşağıdaki denklem yazılır.

$$\bar{I}(\{g\}) = \frac{\Delta E}{E(G)} = \frac{E(G) - E(G - \{g\})}{E(G)} \quad (7.3)$$

7.1.2. Qiang ve Nagurney (QN) ölçütü

Qiang ve Nagurney etkinlik ölçütü (QN), talep ve bağlantı maliyetine bağlı olduğundan, ulaşım şebekelerinin sürdürülebilirliğini incelemek için daha uygundur. Buna rağmen QN etkinlik ölçütü sadece optimum akışı, KD'den elde edilen şebekeler için kullanılmaktadır.

$$\varepsilon = \varepsilon(G, D) = \frac{\sum_{w \in W} d_w \lambda_w}{n_w} \quad (7.5)$$

λ_w : Maliyeti en az olan yolun maliyet miktarı/ en kısa yol, o yoldaki pozitif akışla w 'da ki O-D'leri birbirine bağlamakta

n_w : O-D lerin toplam sayısı

$\varepsilon(G, d)$: d talep vektörlü G şebekesinin etkinlik ölçütü

QN, etkinlik ölçümü yüksektir, eğer şebekedeki talep miktarı yüksek ve minimum yol maliyeti düşük olursa ve bazı koşulları göz önünde bulundurursak, LM etkinlik ölçütü ile QN etkinlik ölçütü eşit olurlar.

Teorem: Eğer ulaşım şebekesinin iki farklı düğümü için talep 1'e eşit olursa, ve her $w(i, j)$, O-D için $d_{ij} = \lambda_w$, o zaman QN etkinlik ölçütü, LM etkinlik ölçütü ile eşit olacaktır. Yukardaki teoremi şöyle ispat edebiliriz;

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in N} \frac{1}{d_{ij}} = \frac{\sum_{i \neq j \in N} \frac{1}{d_{ij}}}{|W|} = \frac{\sum_{i \neq j \in N} \frac{d_w}{\lambda_w}}{|W|} = \varepsilon(G) \quad (7.6)$$

böylece $E = \varepsilon$ eşitliği ispatlanmıştır.

i, j düğümleri arasında hiç bir yol veya rota bulunmadığını varsayalım. $w(i, j)$ için sonsuz maliyetli bir yapay (suni) yolun akışı 0 olacaktır ve sonuçta, talep w , O-D için sıfır olur dolayısıyla $d_w / \lambda_w = 0$ 'dır [1,5,25].

QN Etkinlik Ölçümünün Göreceli Düşüşü

$g \in A$, G şebekesinin bir bağlantısı olsun ve $I(\{g\})$, G şebekesinin, LM etkinlik ölçümünün göreceli düşüş miktarı olsun. Her ne zaman $\{g\}$ arkı şebekeden çıkarılırsa QN etkinlik ölçümünün göreceli düşüşü aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I(\{g\}) = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon(G) - \varepsilon(G - \{g\})}{\varepsilon(G)} \quad (7.7)$$

Not: Şebeke etkinliği göreceli düşüş miktarının üst sınırı, 1 dir.

Bir bağlantının şebekeden çıkartılması, etkinlik ölçümü değerini çok düşüyor ise, o bağlantı kritik bağlantıdır. Kritik bağlantıları tanımak için, Göreceli Toplam Maliyet İndeksini (GTMI) kullanmak gerekir ama önce Toplam Maliyet İndeksinin tanımlanması gerekmektedir.

Bu bölümde tanıtılan toplam maliyet indisi, KD ve SO ile kullanılabilirliği açısından çok önemlidir.

Şebekenin toplam maliyetini TC ile gösterelim,

$$TC = \sum_{g \in A} \hat{t}_g = \sum_{g \in A} t_g(f_g) f_g \quad (7.8)$$

arkın akışı f_a , KD veya SO ile elde edilir [1,5,25,44].

7.1.3. Toplam maliyetin göreceli değişim indisi

$g \in A$, şebekenin bir bağlantısı olsun ve $\Psi(\{g\})$, G şebekesinin toplam maliyetinin göreceli yükseliş miktarını göstermekte, eğer $\{g\}$ bağlantısını o şebekeden çıkartırsak, toplam maliyetin göreceli yükseliş miktarı şöyle hesaplanır;

$$\Psi(\{g\}) = \frac{TC(G - \{g\}) - TC(G)}{TC(G)} \quad (7.8)$$

$TC(G)$: G şebekesinin toplam maliyeti

$TC(G - \{g\})$: $G - \{g\}$ şebekesinin toplam maliyeti

Toplam maliyet KD veya SO cinsinden ifade edilecek olursak (7.8) denklemi yerine aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$\Psi_{U-o}(\{g\}) = \frac{TC_{U-o}(G - \{g\}) - TC_{U-o}(G)}{TC(G)} \quad (7.9)$$

$$\Psi_{S-o}(\{g\}) = \frac{TC_{S-o}(G - \{g\}) - TC_{S-o}(G)}{TC(G)} \quad (7.10)$$

(7.9) denklemi, KD ile elde edilen GTMİ, olup $\{g\}$ bağlantısını şebekeden çıkarılırsa kullanılır.

(7.10) denklemi, SO elde edilen GTMİ, olup $\{g\}$ bağlantısı şebekeden çıkarılırsa kullanılır.

Yukarıda elde edilen sonuçları, şebekede kritik düğümleri bulmak için de kullanabiliriz. Çünkü bir düğüm şebekeden çıkartılırsa, ona gelen ve ondan çıkan bağlantılar da şebekeden çıkartılmış olur [1,5,25].

7.2. Havayolu Şebekesinin Bağlantılarının İncelenmesi

Bu bölümde, bağlantıların kullanılan kapasitesini değiştirmekle, ulaşım şebekesinin bağlantılarını inceleyeceğiz.

Maliyet fonksiyonunun, bağlantının kullanılan kapasitesine bağlı olduğunu varsayalım. Bağlantının kullanılan kapasitesini azaltmak için, $\gamma \in (0,1]$, a bağlantısında, kapasiteyi azaltma uygulanırsa, γc_g , g bağlantısının kullanılan

kapasitesi olarak adlandırılır ve $cg - \gamma cg$, g bağlantısının kapasitesinin azalma miktarıdır.

Kullanılan kapasiteyi azaltmak, uçak sayısını azaltmak veya uçağın tipini değiştirmek ve uçuşlarda farklı filolardan daha küçük ve daha az kapasiteli uçakları tercih etmek gibi kararlar ortaya çıkabilir.

Bu çalışmada, bağlantıların kullanılan kapasitesini yükseltmek kavramını tanıtacağız. Kullanılan bağlantının kapasitesini yükseltmek için α işaretini kullanacağız, α ; kullanılan kapasitenin yükseltme oranıdır, ve $\alpha \geq 1$. g bağlantısında kapasiteyi yükseltirsek, αcg , g bağlantısının kullanılan kapasitesi olarak adlandırılır, ve $\alpha cg - cg$, g kapasitesinin yükselme miktarıdır.

Not: eğer $\gamma = 0$ ise, o bağlantı tamamen şebekeden çıkartılmıştır. Eğer, $\alpha = \gamma = 1$ ise, kullanılan kapasiteye dokunulmamıştır.

Kapasite değişikliğine maruz kalan g bağlantısı için, GTMİ ;

$$\Psi_{(g)}^{\gamma} = \frac{TC_{(g)}^{\gamma} - TC}{TC} \quad (7.11)$$

$$\Psi_{(g)}^{\alpha} = \frac{TC_{(g)}^{\alpha} - TC}{TC} \quad (7.12)$$

TC : Şebeke toplam maliyeti. Eğer kullanılan kapasite değişime uğramışsa.

$TC_{(g)}^{\gamma}$: Şebeke toplam maliyeti. Eğer g bağlantısının kapasitesi, γ kapasite azaltma oranıyla azalmışsa.

$TC_{(g)}^{\alpha}$: Şebeke toplam maliyeti. Eğer g bağlantısının kapasitesi, α kapasite yükselme oranıyla yükseliyorsa.

(7.11): γ azalma oranıyla GTMİ

(7.12): α yükselme oranıyla GTMİ

(7.11) ve (7.12) denkleminde, toplam maliyet, KD ve SO ile elde edilebilir.

7.3. Hava Yolu Şebekesinin Sürdürülebilirliğinin İncelenmesi

Bağlantı kapasite değişikliğini uygulamakla, uçaklardaki yıpranmaları, boş beklemeleri hatta bu değişikliklerin başka uçuşları nasıl etkileyeceğini inceleyebiliriz. Hava yolları çizelgeleme, rotalama ve filolama kurallarına uymak zorundadırlar. Mesela her bir uçak maksimum 60 saat uçuş sonrasında veya 4 günde bir bakım onarım işlemlerine tabi tutulmalıdır veya her bir uçağın uçabilme mesafe kısıtı vardır ve en önemlisi hava alanlarında kapı tahsisi kısıtlıdır ve aylar öncesinden bu kapılar ve uçuş saatleri hava alanlarından kiralanır. Burada iki farklı bakış ortaya çıkmaktadır, KD zamanını ve maliyetini aramaktadır. Organizasyon kullanıcı memnuniyetini sağlarken kendi karını ve hassasiyetlerini sistem optimum açısından da göz önünde bulundurmalıdır. Bu sebeplerden dolayı, uçuş şebekesinin sürdürülebilirliği araştırılırken, hassas stratejik ve önemli olduğu düşünülen O-D'lerin birbirine bağlayan yolları incelemeye başlanır [5].

Bağlantı kapasite değişikliği iki şekilde uygulanır; 1. Uçuş (ark) kapasitesini azaltmakla, şebekenin sürdürülebilirliğini etkinlik ölçütüyle incelemek ve 2. Uçuş (ark) kapasitesini yükseltmekle, şebekenin sürdürülebilirliğini, etkinlik ölçütüyle incelemek.

7.3.1. Uçuş (Bağlantı) kapasitesini azaltarak şebeke sürdürülebilirliğinin etkinlik ölçütüyle incelenmesi

Şebekenin sürdürülebilirliğini incelemek için, bağlantıların kapasitesi sabit bir oranla azaltılır. Şebeke etkinlik ölçümündeki değişim bu azaltmanın etkisinde incelenir. Eğer bir bağlantının asıl kapasitesi, c_g olursa, $\gamma(\gamma \in (0,1])$ kapasitenin azalma oranıdır. γc_g bağlantının azaltılmış kapasitesidir ve $c_g - \gamma c_g$ bağlantı kapasitesinin azaltılmış miktarıdır. G şebekesinin sürdürülebilirlik ölçüsü R^γ ile gösterilir.

$$R^\gamma = R^\gamma(G, d, t, c, \gamma) = \frac{\varepsilon^\gamma}{\varepsilon} \times 100\% \quad (7.13)$$

d : G şebekesinin talep vektörü

t : Bağlantı maliyet fonksiyonu

c : Bağlantı kapasite vektörü

γ : Bağlantı kapasite azaltma oranı

ε : kapasite c iken, şebekenin etkinlik ölçütü

ε^γ : kapasite γc 'ye düşürüldüğü zaman şebekenin etkinlik ölçütü

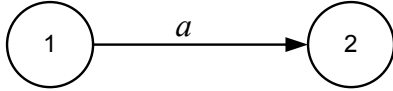
Eğer γc kapasiteli şebekenin etkinlik ölçütü, c kapasiteli şebekenin etkinlik ölçütüne yakın ise, o şebeke sürdürülebilirdir.

Bir O-D arasında sadece bir uçuş yapıyorsa:

Teorem 7.1.

Şekil 7.1 de gösterilen şebeke, iki düğüm ve bir bağlantıdan oluşmuştur (g bağlantısı, 1 ve 2 düğümlerini birbirine bağlamaktadır). Bu şebekenin sürdürülebilirliği (7.13). formülasyonundan elde edilebilir. Bu şebekenin

sürdürülebilirliğinin alt sınırı $\gamma^{\beta} \times 100\%$ dır. Teorem 7.1 ve ispatı Ek-1 de verilmektedir.



Şekil 7.1. İki düğüm arasındaki bağlantı

7.3.2. Uçuş (Bağlantı) kapasitesini arttırarak şebeke sürdürülebilirliğinin etkinlik ölçütüyle incelenmesi

Şebekenin sürdürülebilirliğini incelemek için, bağlantıların kapasitesi sabit bir oranla yükseltilir. Şebeke etkinlik ölçümündeki değişim bu artmanın etkisinde incelenir. Eğer bir bağlantının asıl kapasitesi, c_g olursa, α ; ($\alpha \geq 1$) kapasitenin yükseltme oranıdır. αc_g , bağlantının yülsetilmiş kapasitesidir ve $\alpha c_g - c_g$ bağlantı kapasitesinin artmış miktarıdır. G şebekesinin sürdürülebilirlik ölçütü R^α ile gösterilir [5].

$$R^\alpha = R^\alpha(G, d, t, c, \alpha) = \frac{\varepsilon^\alpha}{\varepsilon} \times 100\% \quad (7.14)$$

d : G şebekesinin talep vektörü

t : Bağlantı maliyet fonksiyonu

c : Bağlantı kapasite vektörü

α : Bağlantı kapasite azaltma oranı

ε : kapasite c iken şebekenin etkinlik ölçütü

ε^α : kapasite αc 'ye yükseltildiği zaman şebekenin etkinlik ölçütü

Teorem 7.2.

Şekil 7.1 de, 1 ve 2 düğümleri bir tek bağlantıyla birbirine bağlamaktadır. Bağlantı maliyet fonksiyonu bu bağlantı için BPR'dır. 7.13. şeklinin

sürdürülebilirlik denklemini elde edebiliriz ve bahsi geçen şebekenin üst sınırı $\alpha^\beta \times 100\%$ ve $\alpha \geq 1$, Teorem ve ispatı Ek-2'de verilmiştir.

Tanıtilan etkinlik ölçütü sadece KD'ye dayanan şebekelerde kullanılabilir. Tezin devamında tanıtilan Göreceli (Nispi) Toplam Maliyet İndeksi, kullanıcı optimum veya sosyal (sistem) optimumla kullanılabilir.

7.3.3. Toplam maliyetin göreceli değişim indisini kullanarak şebeke sürdürülebilirliğinin incelenmesi

Bağlantı kapasitesini azaltarak şebekenin incelenmesi

G şebekesi için göreceli toplam maliyet indisi;

$$\psi^\gamma = \psi(G, d, t, c, \gamma) = \frac{TC^\gamma - TC}{TC} \times 100\% \quad (7.15)$$

d : toplam vektörü

t : maliyet fonksiyonu vektörü

c : bağlantı kapasite vektörü

γ : kapasite azaltma oranı

TC : c kapasite vektörlü şebekenin toplam maliyeti

TC^γ : γc kapasite vektörlü şebekenin toplam maliyeti

Not: TC ve TC^γ yi KD ve SO kullanılarak elde edilebilir.

Yukardaki formülasyondan KD veya SO böyle yazabiliriz.

$$\psi_{U-0}^\gamma = \psi_{U-0}^\gamma(G, d, t, c, \gamma) = \frac{TC_{U-0}^\gamma - TC_{U-0}}{TC_{U-0}} \times 100\% \quad (7.16)$$

$$\psi_{s-o}^{\gamma} = \psi_{s-o}^{\gamma}(G, d, t, c, \gamma) = \frac{TC_{s-o}^{\gamma} - TC_{s-o}}{TC_{s-o}} \times 100\% \quad (7.17)$$

Eğer ψ^{γ} miktarı küçük olursa γ kapasite azaltma oranıyla bir şebeke sürdürülebilir. Bunun anlamı kapasite γc iken göreceli toplam maliyet miktarı c kapasiteli göreceli toplam maliyet miktarıyla eşittir.

Teorem 7.3.

Eğer bir şebekede, n paralel bağlantı iki ucu birbirine bağlamakta ise ve eğer her bağlantı için serbest akış maliyeti (t_g^0) eşit ve bağlantı maliyet fonksiyonu BPR şeklinde ise, KD'den elde edilen akış paylaşımı, SO'dan elde edilen akış paylaşımı ile eşittir $\psi_{U-o} = \psi_{S-o}$.

İspat.

Önce, elde edilen akış olgusunu, KD ve SO'lerin her ikisiyle de örtüştüğünü göstereceğiz, bu durumun tersi benzer şekilde elde edilebilir. İspat için iki durum ele alınacaktır.

Durum 1: şebekenin tüm bağlantıları kullanılmayacaktır.

Durum 2: şebekenin tüm bağlantıları kullanılacaktır.

Birinci durumun incelenmesi

En azından sıfır akışlı bir bağlantı mevcuttur, rastgele seçilen iki bağlantıdan KD durumunda, bir bağlantıda akış pozitif iken diğerinde akış sıfır olmalıdır.

$a, b \in A$ iki bağlantımız olsun ve $f_a^* > 0$, $f_b^* = 0$.

Böylece;

$$t_b(f_b^*) = t_a(f_a^*) = \lambda_w \quad (7.18)$$

$$\text{ve; } t_a(f_a^*) = t_a^0 \left[1 + \left(\frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right)^\beta \right] \leq t_a^0 \left[1 + \left(\frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right)^\beta \right] \quad (7.19)$$

varsayımımıza göre, serbest akış maliyeti tüm bağlantılar için eşit ve t^0 ile gösterilir ve (7.19) fonksiyonu yeniden yazılır;

$$t^0 \left[1 + \left(\frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right)^\beta \right] \leq t^0 \left[1 + \left(\frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right)^\beta \right] \Leftrightarrow \left(\frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right)^\beta \leq \left(\frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right)^\beta \Leftrightarrow$$

$$t^0 + t^0(\beta+1) \left(\frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right)^\beta \leq t^0 + t^0(\beta+1) \left(\frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right)^\beta \quad (7.20)$$

(7.20) denklemi, SO koşullarını açıklıyor ve f_a^* ve f_b^* sırasıyla a ve b için SO ile elde edilen akışlardır. a ve b rastgele şebekeden seçtiklerinden, şebekenin her bağlantısı için yukarıdaki sonuca ulaşabiliriz.

İkinci durumun incelenmesi

Eğer tüm yollar ve rotalar kullanılırsa, KD koşullarını göz önünde bulundurarak,

$$\lambda_w = t_a^0 \left[1 + \left(\frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right)^\beta \right] = t_b^0 \left[1 + \left(\frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right)^\beta \right] = \dots = t_n^0 \left[1 + \left(\frac{f_n^*}{lf \times c_n} \right)^\beta \right] \Leftrightarrow$$

$$\lambda_w = t^0 \left[1 + \left(\frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right)^\beta \right] = t^0 \left[1 + \left(\frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right)^\beta \right] \Leftrightarrow \left(\frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right)^\beta = \left(\frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right)^\beta = \dots = \left(\frac{f_n^*}{lf \times c_n} \right)^\beta \Leftrightarrow$$

$$t^0 + t^0(\beta+1) \left(\frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right)^\beta = t^0 + t^0(\beta+1) \left(\frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right)^\beta = \dots = t^0 + t^0(\beta+1) \left(\frac{f_n^*}{lf \times c_n} \right)^\beta \Leftrightarrow$$

$$t_a^0 + t_a^0(\beta+1) \left(\frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right)^\beta = t_b^0 + t_b^0(\beta+1) \left(\frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right)^\beta = \dots = t_n^0 + t_n^0(\beta+1) \left(\frac{f_n^*}{lf \times c_n} \right)^\beta \quad (7.21)$$

(7.21) SO koşullarını göstermektedir. Elde edilen sonuçların birleşimi ile; $TC_{U-O} = TC_{S-O}$, $TC_{U-O}^\gamma = TC_{S-O}^\gamma$ şeklinde yazabiliriz, $\psi_{U-O}^\gamma = \psi_{S-O}^\gamma$ durumu bu şekilde ispatlanmıştır.

Teorem 7.4.

Maliyet fonksiyonunun BPR şeklinde ve $\beta=1$ ve her iki c ve γc kapasite vektörleri ve KD yardımıyla elde edilen akışın tüm bağlantılar üzerinde pozitif olduğu varsayılın, bu durumda, KD akış olgulu GTMİ, aşağıdaki formülden elde edilebilir.

$$\psi_{U-O}^\gamma = \left(\frac{\gamma(lf \times c) + kd_w}{\gamma(lf \times c) + k\gamma d_w} - 1 \right) \times 100\% \quad (7.22)$$

Bu durumda, $c \equiv c_a + c_b + \dots + c_n$ ve ψ_{U-O}^γ yukarıdan $\frac{1-\gamma}{\gamma} \times 100\%$ ile kısıtlanır.

İspat.

Şebeke tek O-D' ye sahip olduğuna göre;

$$TC_{U-O} = \sum_{g \in A} \hat{t}_g(f_g) = \sum_{g \in A} t_g(f_g) f_g = \sum_{g \in A} t_g^0 \left(1 + k \frac{f_g}{lf \times c_g} \right) f_g = \sum_{g \in A} \lambda_w f_g = \lambda_w d_w, \quad (7.23)$$

ve benzer bir şekilde;

$$TC_{U-O}^\gamma = \lambda_w^\gamma d_w, \quad (7.24)$$

Sonuçta;

$$\frac{TC_{U-O}^\gamma}{TC_{U-O}} = \frac{\lambda_w^\gamma d_w}{\lambda_w d_w} = \frac{\lambda_w^\gamma}{\lambda_w} \quad (7.25)$$

elde edilir.

Her iki c ve γc kapasiteleriyle tüm bağlantılar üzerinde pozitif akışın olduğunu varsayarak;

$$\lambda_w = t_a^0 \left[1 + \left(\frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right)^\beta \right] = t_b^0 \left[1 + \left(\frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right)^\beta \right] = \dots = t_n^0 \left[1 + \left(\frac{f_n^*}{lf \times c_n} \right)^\beta \right], \quad (7.26)$$

ve $f_a^*, f_b^*, \dots, f_n^*$; c kapasiteli KD ile, bağlantı akışlardır, diğer taraftan;

$$\lambda_w^\gamma = t_a^0 \left[1 + \left(\frac{f_a^{**}}{\gamma(lf \times c_a)} \right)^\beta \right] = t_b^0 \left[1 + \left(\frac{f_b^{**}}{\gamma(lf \times c_b)} \right)^\beta \right] = \dots = t_n^0 \left[1 + \left(\frac{f_n^{**}}{\gamma(lf \times c_n)} \right)^\beta \right], \quad (7.27)$$

ve $f_a^{**}, f_b^{**}, \dots, f_n^{**}$; γc kapasiteli, KD ile, bağlantı akışlardır ve böylece;

$$\frac{TC_{U-0}^\gamma}{TC_{U-0}} = \frac{\lambda_w^\gamma}{\lambda_w} = \frac{t_a^0 \left(1 + k \frac{f_a^{**}}{\gamma(lf \times c_a)} \right)}{t_a^0 \left(1 + k \frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right)} = \frac{t_b^0 \left(1 + k \frac{f_b^{**}}{\gamma(lf \times c_b)} \right)}{t_b^0 \left(1 + k \frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right)} = \dots = \frac{t_n^0 \left(1 + k \frac{f_n^{**}}{\gamma(lf \times c_n)} \right)}{t_n^0 \left(1 + k \frac{f_n^*}{lf \times c_n} \right)} \quad (7.28)$$

Sonuçta;

$$\begin{aligned} \frac{TC_{U-0}^\gamma}{TC_{U-0}} &= \frac{\left(1 + k \frac{f_a^{**}}{\gamma(lf \times c_a)} \right) + \left(1 + k \frac{f_b^{**}}{\gamma(lf \times c_b)} \right) + \dots + \left(1 + k \frac{f_n^{**}}{\gamma(lf \times c_n)} \right)}{\left(1 + k \frac{f_a^*}{lf \times c_a} \right) + \left(1 + k \frac{f_b^*}{lf \times c_b} \right) + \dots + \left(1 + k \frac{f_n^*}{lf \times c_n} \right)} = \\ &= \frac{\gamma(lf \times c_a) + kf_a^{**} + \gamma(lf \times c_b) + kf_b^{**} + \dots + \gamma(lf \times c_n) + kf_n^{**}}{\gamma(lf \times c_a) + k\gamma f_a^* + \gamma(lf \times c_b) + \gamma kf_b^* + \dots + \gamma(lf \times c_n) + \gamma kf_n^*} = \\ &= \frac{\gamma \times lf (c_a + c_b + \dots + c_n) + k(f_a^{**}, f_b^{**}, \dots, f_n^{**})}{\gamma \times lf (c_a + c_b + \dots + c_n) + \gamma k(f_a^*, f_b^*, \dots, f_n^*)} = \\ &= \frac{\gamma(lf \times c) + kd_w}{\gamma(lf \times c)c + \gamma kd_w}. \end{aligned} \quad (7.29)$$

ψ_{U-0}^γ ele alarak yazabiliriz;

$$\begin{aligned}\psi_{U-0}^{\gamma} &= \frac{TC_{U-0}^{\gamma} - TC_{U-0}}{TC_{U-0}} \times 100\% = \left(\frac{TC_{U-0}^{\gamma}}{TC_{U-0}} - 1 \right) \times 100\% = \\ & \left(\frac{\gamma(lf \times c) + kd_w}{\gamma(lf \times c) + \gamma kd_w} - 1 \right) \times 100\%\end{aligned}\quad (7.30)$$

Amaçladığımız formülü elde ettik. Şimdi ψ_{U-0}^{γ} için üst sınır şöyle bulunur;

$$\begin{aligned}\psi_{U-0}^{\gamma} &= \left(\frac{\gamma(lf \times c) + kd_w}{\gamma(lf \times c) + k\gamma d_w} - 1 \right) \times 100\% = \left(\frac{(lf \times c)(\gamma + k \frac{d_w}{lf \times c})}{(lf \times c)(\gamma + k\gamma \frac{d_w}{lf \times c})} - 1 \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{\gamma + k \frac{d_w}{lf \times c}}{\gamma + k\gamma \frac{d_w}{lf \times c}} - 1 \right) \times 100\% \leq \left(\frac{1 + k \frac{d_w}{lf \times c}}{\gamma(1 + k \frac{d_w}{lf \times c})} - 1 \right) \times 100\%\end{aligned}\quad (7.31)$$

$$= \frac{1 - \gamma}{\gamma} \times 100\% , \quad (7.32)$$

Böylece ispat tamamlanır.

Teorem (7.4)'ten bir kaç varsayımı çıkartırsak, SO'lu GTMİ üst sınırı elde edilir. Çıkartılan sonuçlar şöyledir [1]:

1. Hem c kapasitesi hem γc kapasiteyle, pozitif akış tüm rotalarda mevcuttur.
2. $\beta = 1$ 'dir.
3. Şebekenin önceden belirlenmiş bir yapısı vardır.

Teorem 7.5.

Ulaşım şebekesinde, BPR bağlantı maliyet fonksiyonu, ψ_{S-0}^{γ} için üst sınır,

$$\frac{1 - \gamma^{\beta}}{\gamma^{\beta}} \times 100\% \text{ 'dır } \gamma \in (0,1] .$$

İspat.

$$TC_{S-O} \text{ Biliyoruz ki, } TC_{S-O} = \sum_{g \in A} t_g^0 [1 + k (\frac{f_g^*}{lf \times c_g})^\beta] \times f_g^* ,$$

f_g^* , g bağlantılarındaki akıştır ve SO elde edilir. $\gamma \in (0,1]$ ve her $g \in A$ için $t_g^0 > 0$;

$$TC_{S-O} = \sum_{g \in A} t_g^0 [1 + k (\frac{f_g^*}{\gamma(lf \times c_g)})^\beta] \times f_g^* \frac{1}{\gamma^\beta} TC_{S-O} , \quad (7.33)$$

Var sayalım, SO'lu bağlantı akış olgusu ve γ kapasite azalış oranıyla, her $g \in A$ için, \hat{f}_g ile eşit olsun, TC_{S-O}^γ aşağıdaki gibi elde edilir.

$$TC_{S-O}^\gamma = \sum_{g \in A} t_g^0 [1 + k (\frac{\hat{f}_g}{\gamma(lf \times c_g)})^\beta] \times \hat{f}_g \leq \sum_{g \in A} t_g^0 [1 + k (\frac{f_g^*}{\gamma(lf \times c_g)})^\beta] \times f_g^* , \quad (7.34)$$

(7.33) ve (7.34) birleştirerek;

$$TC_{S-O}^\gamma \leq \frac{1}{\gamma^\beta} TC_{S-O} \Leftrightarrow \frac{TC_{S-O}^\gamma}{TC_{S-O}} \leq \frac{1}{\gamma^\beta} \quad (7.35)$$

ve sonuçta;

$$\psi_{S-O}^\gamma = (\frac{TC_{S-O}^\gamma}{TC_{S-O}} - 1) \times 100\% \leq (\frac{1}{\gamma^\beta} - 1) \times 100\% = \frac{1 - \gamma^\beta}{\gamma^\beta} \times 100\% , \quad (7.36)$$

ve ispat tamamlanır.

Bağlantı kapasitesini artırarak şebekenin incelemesi

Bu bölümde, bağlantı kapasitesini yükselterek ulaşım şebekesinin sürdürülebilirliğini inceleyeceğiz. Bunun için, bağlantı kapasitesini sabit bir oranla yükseltip bu değişime göre şebekenin toplam maliyetinin değişimleri incelenecektir. Bağlantı kapasitesi c_g olursa ve α ($\alpha \geq 1$) kapasitenin,

yükseltme oranı ve αc_g yükseltilmiş bağlantı ve $\alpha c_g - c_g$,- bağlantının yükselmiş kapasite miktarıdır. G şebekesi için, GTMİ aşağıdaki gibidir;

$$\psi_{U-O}^{\alpha} = \psi_{U-O}^{\alpha}(G, d, t, c, \alpha) = \frac{TC^{\alpha} - TC}{TC} \times 100\% , \quad (7.37)$$

$$\psi_{S-O}^{\alpha} = \psi_{S-O}^{\alpha}(G, d, t, c, \alpha) = \frac{TC^{\alpha} - TC}{TC} \times 100\% \quad (7.38)$$

d : toplam vektörü

t : maliyet fonksiyonu vektörü

c : bağlantı kapasite vektörü

α : kapasite yükseltme oranı

TC : c kapasite vektörlü şebekenin toplam maliyeti

TC^{α} : αc kapasite vektörlü şebekenin toplam maliyeti

Teorem 7.6.

Eğer $\beta=1$ ve var sayalım her iki c kapasiteli vektörü ve αc kapasiteli vektörün akışı, KD ile elde ediliyor ve tüm bağlantılarda pozitifdir; ve böylece KD olgusuyla göreceli toplam maliyet indisi aşağıdaki formülden elde ediliyor.

$$\psi_{U-O}^{\alpha} = \left(\frac{\alpha(lf \times c) + kd_{\omega}}{\alpha(lf \times c) + k\alpha d_{\omega}} - 1 \right) \times 100\% , \quad (7.39)$$

ki $\alpha \geq 1$ ve $c \equiv c_a + c_b + \dots + c_n$ ve ψ_{U-O}^{α} dengesinin alt sınırı $\frac{1-\alpha}{\alpha} \times 100\%$ dır.

İspat.

Birinci bölümün ispatı 7.5. teoremde ki gibi yapılır ve ikinci bölümün ispatı ψ_{U-O}^{α} denklemini yeniden yazarak aşağıdaki gibi yapılır;

$$\psi_{U-o}^{\alpha} = \left(\frac{(lf \times c) \left(\alpha + k \frac{d_w}{lf \times c} \right)}{\alpha \left(\alpha + k \frac{d_w}{lf \times c} \right)} - 1 \right) \times 100\% = \left(\frac{\alpha + k \frac{d_w}{lf \times c}}{\alpha \left(\alpha + k \frac{d_w}{lf \times c} \right)} - 1 \right) \times 100\% \xrightarrow{\alpha \geq 1} \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \times 100\% \leq \psi_{U-o}^{\alpha} \quad (7.40)$$

ve benzer bir şekilde SO için ispatlanır;

$$\psi_{S-o}^{\alpha} = \left(\frac{(lf \times c) \left(\alpha + k \frac{d_w}{lf \times c} \right)}{\alpha \left(\alpha + k \frac{d_w}{lf \times c} \right)} - 1 \right) \times 100\% \xrightarrow{\alpha \geq 1} \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \times 100\% \leq \psi_{S-o}^{\alpha} \quad (7.41)$$

8. BİR HAVAYOLU ŞİRKETİ İÇİN ŞEBEKE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ UYGULAMASI

8.1. Problemin Tanımı

Beş düğüm (şehir) ve sekiz bağlantıdan oluşan bir kısmi şebeke ve bağlantıları, bağlantı kapasite değişiklikleri dikkate alınarak incelenecektir. Tüm şehirlerdeki yolculuk talep miktarları bellidir, ayrıca şirketin bünyesinde bulunan ve tahsis ettiği uçaklar, uçuş sayısı ve kapasiteleri Ek 3'te belirtilmiştir. Şirket yönetimi yolcuların alternatif rota tercihlerini incelemek istemektedir. Bu şebekede aralarında alternatif uçuş imkanı olan iki farklı İstanbul-Trabzon ve İstanbul-Antalya Başlangıç varışları incelenecektir. Ayrıca şirket şebeke bağlantılarının (uçuşların) zorlayabileceği alt ve üst sınırların bilrlenmesini istemektedir.

Şekil 8.1'de şebekedeki uçakların takip ettiği rotalar gösterilmekte ve çizelge 8.1'de şehirler arası uçuş sayısı ve talep miktarları verilmektedir. Şirketin kurumsal politikasına göre ortalama doluluk oranı %90 olarak alınmıştır, ayrıca tüm biletlerin ortalama fiyatı, yolcu başına 15\$ ve yolcu başı aktarma maliyeti 7\$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan bağlantı maliyet fonksiyonu bir havayolu şirketinin, yolcu tercihlerini 400 farklı rotada inceledikten sonra kalibre edilmiş halidir.

8.2. Problemin Çözümü

Türkiye'deki tanınmış bir havayolları şirketinin şebekesini incelemek için farklı rotalara sahip olan başlangıç varışları baz alınmıştır. Bu amaca ulaşmak için üç ana hedefi takip edilmiştir.

- Şebekenin sürdürülebilirliğinin etkinlik ölçütü yardımıyla incelenmesi.
- KD ve SO modelleri yardımıyla elde edilen Göreceli Toplam Maliyet bakımından şebekenin sürdürülebilirliğini incelenmesi.
- Şebekenin kritik bağlantılarının belirlenmesi.

8.2.1. Şebekenin kritik bağlantılarının belirlenmesi

Şebekede bulunan bazı bağlantıların kapasite değişikliği o bağlantının toplam maliyetini çok fazla etkilemez, ama bazı bağlantıların kapasite değişikliği; bu değişiklik çok küçük olsa bile, yolculuk toplam maliyetinde büyük yükselmelere neden olmakla beraber o şebekenin sürdürülebilirliğini bile kötü yönde etkileyebilir. Böyle hassas bağlantılara kritik bağlantı (Critical Arc) denir.

Önce KD modelini projeksiyon algoritması yardımıyla çözerek bağlantılar arası akış dağılımı elde edilmiştir. Bunun için algoritma C++ programlama dili ile kodlanmış olup Ek 4'de verilmiştir. Bu örnekte akış miktarların havayolu şirketinin bilet satış istatistikleri bağlantı akış tahsisi olarak kullanılmıştır. Veriler çizelge 8.2 te verilmiştir. Akış miktarları kullanılarak her bir bağlantıya ait toplam maliyet 5 değişik kapasite azaltma ($\gamma=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) ve kapasite artırma ($\alpha=1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8$) oranlarıyla hesaplanmış olup sırasıyla Çizelge 8.3 ve 8.5 ile verilmiştir.



Şekil 8.1. Uçuş şebekesi ve uçuş rotası

Çizelge 8.1. Şehirler arası uçuş sayısı, uçak tipi ve talep miktarları

| O-D | Uçak sayısı | Uçak tipi | Talep |
|---------|-------------|-------------|-------|
| IST-TRZ | 5 | 1,3,5 | 1700 |
| IST-ANK | 38 | 1,2,3,4,8,9 | 12000 |
| IST-KNY | 3 | 2,3 | 1400 |
| IST-ANT | 10 | 1,2,5,4 | 4200 |
| ANK-ANT | 4 | 8 | 1150 |
| ANK-TRZ | 4 | 4 | 780 |
| TRZ-ANT | 2 | 6 | 750 |
| KNY-ANT | 1 | 5 | 330 |

Çizelge 8.2. KD den elde edilen f_1 Direkt ve f_2 Aktarmalı yolcu akışları

| O-D | f_1 | f_2 | Talep |
|---------|-------|-------|-------|
| IST-TRZ | 1423 | 160 | 1700 |
| IST-ANK | 11200 | 0 | 12000 |
| IST-KNY | 1310 | 0 | 1400 |
| IST-ANT | 3560 | 640 | 4200 |
| ANK-ANT | 1020 | 250 | 1150 |
| ANK-TRZ | 705 | 90 | 780 |
| TRZ-ANT | 610 | 143 | 750 |
| KNY-ANT | 295 | 0 | 330 |

Çizelge 8.3. γ azalan kapasite oranları ve KD modelinden elde edilen Toplam maliyet matrisi

| TC^γ | $\gamma = 0$ | $\gamma = 0.2$ | $\gamma = 0.4$ | $\gamma = 0.6$ | $\gamma = 0.8$ |
|-------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IST-TRZ | 356700 | 359000 | 360500 | 370000 | 394500 |
| IST-ANK | 404400 | 403000 | 406000 | 384000 | 376500 |
| IST-KNY | 490000 | 490000 | 490000 | 490000 | 490000 |
| IST-ANT | 544200 | 554500 | 562500 | 566400 | 561900 |
| ANK-ANT | 520900 | 520900 | 519900 | 519900 | 509100 |
| ANK-TRZ | 341600 | 341600 | 341600 | 341600 | 341600 |
| TRZ-ANT | 630900 | 630900 | 630900 | 630900 | 630900 |
| KNY-ANT | 267000 | 267000 | 267000 | 267000 | 267000 |

Çizelge 8.4. Azalan kapasite oranları için KD ile elde edilen
Toplam Maliyetteki Göreceli Değişim

| ψ^{γ} | $\gamma = 0$ | $\gamma = 0.2$ | $\gamma = 0.4$ | $\gamma = 0.6$ | $\gamma = 0.8$ |
|-----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IST-TRZ | 0 | 0.0065 | 0.011 | 0.037 | 0.1 |
| IST-ANK | 0 | -0.004 | 0.0039 | -0.05 | -0.069 |
| IST-KNY | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| IST-ANT | 0 | 0.0005 | 0.033 | 0.04 | 0.032 |
| ANK-ANT | 0 | 0 | -0.002 | -.002 | -.02 |
| ANK-TRZ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TRZ-ANT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| KNY-ANT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Çizelge 8.5. Artan kapasite oranları için KD ile elde edilen Toplam Maliyet
matrisi

| TC^{α} | $\alpha = 1$ | $\alpha = 1.2$ | $\alpha = 1.4$ | $\alpha = 1.6$ | $\alpha = 1.8$ |
|---------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IST-TRZ | 356700 | 347200 | 335700 | 315800 | 315800 |
| IST-ANK | 404400 | 419000 | 423000 | 430400 | 437000 |
| IST-KNY | 490000 | 490000 | 490000 | 490000 | 490000 |
| IST-ANT | 544200 | 501200 | 523000 | 530700 | 541100 |
| ANK-ANT | 520900 | 540000 | 546900 | 549800 | 550200 |
| ANK-TRZ | 341600 | 312800 | 313900 | 314100 | 326000 |
| TRZ-ANT | 630900 | 630900 | 630200 | 630900 | 630900 |
| KNY-ANT | 267000 | 267000 | 267000 | 267000 | 267000 |

Çizelge 8.6. Yükselen kapasite oranları için kullanıcıoptimumla elde edilen
Toplam maliyetin Göreceli Değişimi

| ψ^α | $\alpha = 1$ | $\alpha = 1.2$ | $\alpha = 1.4$ | $\alpha = 1.6$ | $\alpha = 1.8$ |
|---------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IST-TRZ | 0 | -0.026 | -0.058 | -0.11 | -0.11 |
| IST-ANK | 0 | 0.036 | 0.046 | 0.064 | 0.08 |
| IST-KNY | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| IST-ANT | 0 | -0.08 | -0.039 | -0.024 | -0.005 |
| ANK-ANT | 0 | 0.036 | 0.05 | 0.055 | 0.056 |
| ANK-TRZ | 0 | -0.08 | -0.081 | -0.08 | -0.045 |
| TRZ-ANT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| KNY-ANT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

8.2.2. KD , SO modelleri ve toplam maliyetin göreceli değişim indislerle, şebeke sürdürülebilirliğinin incelenmesi

Çizelge 8.3 ve Çizelge 8.5 'te KD modeli kullanılarak bağlantılara ait toplam maliyet azalan ve yükselen kapasite oranları için hesaplanmıştır, ayrıca bu sonuçlar kullanılarak azalan ve yükselen farklı bağlantı kapasite oranları için Toplam maliyetin Göreceli Değişimi çizelge 8.4 ve çizelge 8.6 da hesaplanmıştır.

Ek 5 'te gösterildiği gibi, SO modelini Equilibrium algoritması yardımıyla çözerek bağlantılar arası akış dağılımı elde edilecektir. Sonuçlar çizelge 8.7 de gösterilmiştir. Akış miktarlarını kullanarak her bir bağlantıya ait toplam maliyeti azalan ve yükselen kapasite oranlarında hesaplanmıştır, sonuçlar çizelge 8.8 ve 8.9'de gösterilmiştir. Çizelge 8.8 ve 8.9'de SO modelini kullanarak bağlantılara ait toplam maliyet azaltan ve yükselten kapasite oranları için hesaplanmıştır, şimdi bu sonuçları kullanarak; çizelge 8.10 ve 8.11'da

gösterildiği gibi, azalan ve yükselen farklı bağlantı kapasite oranları için Toplam Maliyetin Göreceli Değişimi hesaplanmıştır.

Çizelge 8.7. SO'dan elde edilen f_1 direkt ve f_2 aktarmalı yolcu akışları

| O-D | f_1 | f_2 | Demand |
|---------|-------|-------|--------|
| IST-TRZ | 1523 | 160 | 1700 |
| IST-ANK | 10200 | 0 | 12000 |
| IST-KNY | 1210 | 180 | 1400 |
| IST-ANT | 3430 | 428 | 4200 |
| ANK-ANT | 1150 | 0 | 1150 |
| ANK-TRZ | 780 | 0 | 780 |
| TRZ-ANT | 730 | 0 | 750 |
| KNY-ANT | 295 | 0 | 330 |

Çizelge 8.8. SO modeliyle elde edilen Toplam maliyet matrisi ve γ azalan kapasite oranı

| TC^γ | $\gamma = 0$ | $\gamma = 0.2$ | $\gamma = 0.4$ | $\gamma = 0.6$ | $\gamma = 0.8$ |
|-------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IST-TRZ | 384700 | 387000 | 388500 | 398000 | 422500 |
| IST-ANK | 432400 | 431000 | 434000 | 412000 | 404500 |
| IST-KNY | 518000 | 518000 | 518000 | 518000 | 518000 |
| IST-ANT | 572200 | 582500 | 590500 | 594400 | 589900 |
| ANK-ANT | 548900 | 548900 | 547900 | 547900 | 537100 |
| ANK-TRZ | 369600 | 369600 | 369600 | 369600 | 369600 |
| TRZ-ANT | 658900 | 658900 | 658900 | 658900 | 658900 |
| KNY-ANT | 295000 | 295000 | 295000 | 295000 | 295000 |

Çizelge 8.9. SO modeliyle elde edilen Toplam maliyet matrisi

| TC^{α} | $\alpha = 1$ | $\alpha = 1.2$ | $\alpha = 1.4$ | $\alpha = 1.6$ | $\alpha = 1.8$ |
|---------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IST-TRZ | 335200 | 329800 | 307900 | 293600 | 287300 |
| IST-ANK | 380100 | 398000 | 389400 | 400200 | 397600 |
| IST-KNY | 460600 | 465500 | 450800 | 455700 | 445900 |
| IST-ANT | 511500 | 476100 | 482900 | 493500 | 492400 |
| ANK-ANT | 489600 | 513000 | 503700 | 511300 | 500600 |
| ANK-TRZ | 321100 | 297100 | 288800 | 292100 | 296600 |
| TRZ-ANT | 593000 | 599300 | 579700 | 586700 | 574100 |
| KNY-ANT | 250900 | 253600 | 245600 | 248300 | 242900 |

Çizelge 8.10. Azalan kapasite oranları için SO ile elde edilen Toplam Maliyetin Göreceli Değişimi

| ψ^{γ} | $\gamma = 0$ | $\gamma = 0.2$ | $\gamma = 0.4$ | $\gamma = 0.6$ | $\gamma = 0.8$ |
|-----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IST-TRZ | 0 | 0,00597 | 0,009877 | 0,034572 | 0,098258 |
| IST-ANK | 0 | -0,003237 | 0,003700 | -0,047178 | -0,064523 |
| IST-KNY | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| IST-ANT | 0 | 0,0180 | 0,031981 | 0,038797 | 0,030933 |
| ANK-ANT | 0 | 0 | -0,001821 | -0,001821 | -0,021497 |
| ANK-TRZ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TRZ-ANT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| KNY-ANT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Çizelge 8.11. Yükselen kapasite oranları için SO ile elde edilen Toplam Maliyetin Göreceli Değişimi

| ψ^α | $\alpha = 1$ | $\alpha = 1.2$ | $\alpha = 1.4$ | $\alpha = 1.6$ | $\alpha = 1.8$ |
|---------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IST-TRZ | 0 | -0,01627 | -0,0816 | -0,1240 | -0,1429 |
| IST-ANK | 0 | 0,04712 | 0,0245 | 0,0529 | 0,0461 |
| IST-KNY | 0 | 0,01063 | -0,0212 | 0,0106 | -0,0319 |
| IST-ANT | 0 | -0,06921 | -0,0559 | -0,0351 | 0,0374 |
| ANK-ANT | 0 | 0,04769 | 0,0287 | 0,0442 | 0,0225 |
| ANK-TRZ | 0 | -0,07456 | -0,1003 | -0,0902 | -0,07612 |
| TRZ-ANT | 0 | 0,01063 | -0,0224 | -0,0829 | -0,03191 |
| KNY-ANT | 0 | 0,01063 | -0,0212 | -0,0106 | -0,0319 |

Çizelge 8.12. KD ve SO ile elde edilen Toplam Maliyetin Göreceli Değişimini kullanarak tüm şebekenin sürdürülebilirliği

| $\beta = 4, \alpha = 1$, $k = 0.15$ | ψ_{U-O}^γ | ψ_{S-O}^γ | $\beta = 4, \alpha = 1$, $k = 0.15$ | ψ_{U-O}^α | ψ_{S-O}^α |
|---|---------------------|---------------------|---|---------------------|---------------------|
| $\gamma = 0$ | 0 | 0 | $\alpha = 0$ | 0 | 0 |
| $\gamma = 0.2$ | 0,003149872 | 0,00296321 | $\alpha = 1.2$ | -0,013386956 | -0,0028911 |
| $\gamma = 0.4$ | 0,006384126 | 0,00600577 | $\alpha = 1.4$ | -0,007312203 | -0,0379162 |
| $\gamma = 0.6$ | 0,003965464 | 0,00373045 | $\alpha = 1.6$ | -0,007593442 | -0,0181512 |
| $\gamma = 0.8$ | 0,004443573 | 0,00418023 | $\alpha = 1.8$ | 0,000646849 | -0,0312887 |

8.2.3. Şebeke sürdürülebilirliği etkinlik ölçütü yardımıyla incelenmesi

Etkinlik ölçütü şebekenin sürdürülebilirliğini incelenmek için çok önemli bir faktör olabilir. Bu amaca ulaşmak için bağlantıların kapasitelerini varyasyonlara tabi tutulmalıdır, bunun için sabit oranlarla bağlantıların kapasitelerini yükseltilmesi veya azaltılması gerekmektedir. Çizelge 8.13, 8.14, 8.15, 8.16 ve 8.17 bu hesaplamaları adım adım göstermektedir, hesaplamalarda Excel programı kullanılmıştır.

Çizelge 8.13. Talebin γ azalma kapasite oranları için en ucuz yola göre W başlangıç- varışları arasındaki oranı

| d_w/λ_w | $\gamma = 0$ | $\gamma = 0.2$ | $\gamma = 0.4$ | $\gamma = 0.6$ | $\gamma = 0.8$ |
|-----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IST-TRZ | 0,476590973 | 0,473537604 | 0,471567268 | 0,459459459 | 0,430925222 |
| IST-ANK | 2,96735905 | 2,977667494 | 2,955665025 | 3,125 | 3,187250996 |
| IST-KNY | 0,285714286 | 0,285714286 | 0,285714286 | 0,285714286 | 0,285714286 |
| IST-ANT | 0,771775083 | 0,757439134 | 0,746666667 | 0,741525424 | 0,747463962 |
| ANK-ANT | 0,220771741 | 0,220771741 | 0,221196384 | 0,221196384 | 0,225888823 |
| ANK-TRZ | 0,228337237 | 0,228337237 | 0,228337237 | 0,228337237 | 0,228337237 |
| TRZ-ANT | 0,118877794 | 0,118877794 | 0,118877794 | 0,118877794 | 0,118877794 |
| KNY-ANT | 0,123595506 | 0,123595506 | 0,123595506 | 0,123595506 | 0,123595506 |

Çizelge 8.14. γ Oranına göre Şebeke Etkinlik Ölçümü

| | $\gamma = 0$ | $\gamma = 0.2$ | $\gamma = 0.4$ | $\gamma = 0.6$ | $\gamma = 0.8$ |
|--------------------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $\sum_{w \in W} d_w/\lambda_w$ | 5,193021669 | 5,185940795 | 5,151620164 | 5,303706089 | 5,348053824 |
| ε^γ | 0,649127709 | 0,648242599 | 0,643952521 | 0,662963261 | 0,668506728 |

Çizelge 8.15. Talebin α artma kapasite oranları için en ucuz yola göre W başlangıç- varışları arasındaki oranı

| d_w/λ_w | $\alpha = 1$ | $\alpha = 1.2$ | $\alpha = 1.4$ | $\alpha = 1.6$ | $\alpha = 1.8$ |
|-----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IST-TRZ | 0,489631336 | 0,476590973 | 0,506404528 | 0,538315389 | 0,538315389 |
| IST-ANK | 2,863961814 | 2,96735905 | 2,836879433 | 2,788104089 | 2,745995423 |
| IST-KNY | 0,285714286 | 0,285714286 | 0,285714286 | 0,285714286 | 0,285714286 |
| IST-ANT | 0,837988827 | 0,771775083 | 0,803059273 | 0,791407575 | 0,776196636 |
| ANK-ANT | 0,212962963 | 0,220771741 | 0,210276102 | 0,20916697 | 0,209014904 |
| ANK-TRZ | 0,249360614 | 0,228337237 | 0,248486779 | 0,248328558 | 0,239263804 |
| TRZ-ANT | 0,118877794 | 0,118877794 | 0,119009838 | 0,118877794 | 0,118877794 |
| KNY-ANT | 0,123595506 | 0,123595506 | 0,123595506 | 0,123595506 | 0,123595506 |

Çizelge 8.16. α Oranına göre Şebeke Etkinlik Ölçümü

| | $\alpha = 1$ | $\alpha = 1.2$ | $\alpha = 1.4$ | $\alpha = 1.6$ | $\alpha = 1.8$ |
|----------------------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $\sum_{w \in W} d_w / \lambda_w$ | 5,18209313 | 5,19302166 | 5,13342574 | 5,10351016 | 5,03697374 |
| ε^α | 0,64776164 | 0,64912770 | 0,64167821 | 0,63793877 | 0,62962171 |

Çizelge 8.17. α ve γ' 'e karşı şebekenin sürdürülebilirlik oranları

| | | | | | |
|------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| R^γ | 1 | 0,998636464 | 0,992027473 | 1,021314069 | 1,02985394 |
| R^α | 1 | 0,988523844 | 0,997895535 | 0,982763118 | 0,969950457 |

8.2.4. Uygulama sonucu

Bölim (8.2.1)'de şebekenin kritik bağlantıları belirlenmiştir. Kullanılan bağlantının kapasitesini değiştirip, göreceli toplam maliyet indisi yardımıyla havayolu şebekesinin bağlantıları incelenmiştir. Kullanılan yöntemde seçilen bir bağlantı hariç, tüm bağlantıların kapasitesi sabit tutulmuştur. Seçilen bağlantının kapasitesi, sabit bir oranla artırılıp veya azaltılmıştır. Her aşamada sonuçlar incelenip, toplam maliyet ve göreceli toplam maliyet indisi analiz edilmiştir. KD yaklaşımıyla elde edilen, çizelge (8.2), (8.3), (8.4), (8.5) ve (8.6)'ya bakıldığında, (IST-TRZ) kritik bağlantıdır ve kapasitesi en az 1.6 oranında artırılması gerekiyor. (IST-ANK) bağlantısı bir kritik bağlantıdır, ama hab ve istasyon olduğu gerekçesile kapasitesinin azatılmaması gerekiyor. (IST- ANT) bağlantısı bir kritik bağlantıdır ve 1.2 oranında kapasitesi artırılabilir. (ANK-ANT) kritik bağlantıdır ama istasyon ve hab olma gerekçesile kapasitesi azaltılamaz. (ANK-TRZ) diğer kritik olan bağlantıdır ve kapasitesi 1.2 oranında artırılabilir.

Bölüm (8.2.3)'te KD, SO modelleri ve toplam maliyetin göreceli değişim indisleriyle, şebekenin sürdürülebilirliği incelenmiştir. KD yaklaşımıyla elde edilen, çizelge (8.2), (8.3), (8.4), (8.5) ve (8.6)'ya bakıldığında, (IST-TRZ) kritik bağlantıdır ve kapasitesi en az 1.6 oranında yüksetilmesi gerekiyor. (IST-ANK) bağlantısı bir kritik bağlantıdır, ama hab ve istasyon olduğu gerekçesile kapasitesinin azatılmaması gerekiyor. (IST- ANT) bağlantısı bir kritik bağlantıdır ve 1.2 oranında kapasitesi artırılabilir. (ANK-ANT) kritik bağlantıdır ama istasyon ve hab olma gerekçesile kapasitesi azaltılamaz. (ANK-TRZ) digger kritik olan bağlantıdır ve kapasitesi 1.2 oranında yüksetilebilir.

SO yaklaşımıyla elde edilen, çizelge (8.7), (8.8), (8.9), (8.10) ve (8.11)'e bakıldığında, tüm bağlantılar kritiktir ve en ufak kapasite değişikliği şebeke toplam maliyetini farklı yönlerde etkileyebilir (Çizelge (8.10) ve Çizelge (8.11), (7.15) denklemi ile elde edilmiştir). Böylece (IST-TRZ) bağlantısının kapasitesini 1.8 oranında, (IST-KNY) bağlantısını 1.8, (IST-ANT)'yı 1.2, (ANK-TRZ) 1.4, (TRZ-ANT), 1.8 ve (KNY-ANT), 1.8 oranlarında kapasite artışına gidilmesi gerekiyor. (IST-ANK) ve (ANK-TRZ) kritik bağlantı olduklarına karşın hab ve mürettebat istasyonu sayılmaktalar ve onların yüksek görünen bağlantı maliyetleri bağlantı kapasitelerinden kaynaklanmamakta bunun için onların kapasitelerinin azaltılmaması gerekiyor.

Böylece çizelge (8.12) de KD ve SO ile elde edilen toplam maliyetin göreceli değişimini kullanarak tüm şebekenin sürdürülebilirliğini inceledik. KD yaklaşımında şebekenin tüm bağlantılarının kapasiteleri 1.2 oranında yükseltirirse şebekenin toplam maliyeti daha fazla düşer ve dolayısıyla şebeke daha sürdürülebilirdir. SO yaklaşımında şebekenin tüm bağlantılarının kapasiteleri 1.4 oranında yükseltirirse şebekenin toplam maliyeti daha fazla düşer ve dolayısıyla şebeke daha sürdürülebilirdir.

Bölüm (8.2.5)'te şebeke sürdürülebilirliği etkinlik ölçütü yardımıyla incelenmiştir., çizelge 8.17'da denklem (7.14) ve (7.16) kullanılmıştır. NQ etkinlik ölçümünün verilerine göre şebekenin sürdürülebilirliğini yükseltmek için ya tüm şebekenin kapasitesini 0.8 oranında azaltmak ya da 1.2 oranında yükseltmek gereklidir.

Özetle, KD , SO modelleri ve toplam maliyetin göreceli değişim indisleriyle, şebekenin sürdürülebilirliği incelenmiştir, ayrıca elde edilen sonuçlar, etkinlik ölçütü yardımıyla elde edilmiş olan şebeke sürdürülebilirlik miktarlarıyla karşılaştırıldığında, sonuçların hemen hemen aynı olduklarını görebiliriz.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çoğu sistemde var olan şebeke yapıları, bu sistemlerin başarısında çok büyük rollere sahiptirler. Bu şebekelerin farklı durumlardaki davranış biçimleri, sistemler ve sistem yöneticileri tarafından izlenmektedir. Bu çalışmada trafik atamalı bir taşıma sistemi olan havayolu ulaştırma sisteminin şebekesi incelenmiştir. Bu tezdeki yaklaşım, bir şebekenin bağlantılarını esas alarak, mikro ve makro davranışları gözetleyen KD ve SO modelleri ile sistemin şebekesini incelemektir. Bu tarz bir inceleme, şebeke sürdürülebilirlik kavramı adına çok değerli bilgiler elde etmemize olanak tanımaktadır.

Her bir şebekenin sürdürülebilirliğini korumak için maksimum ve minimum kapasite tanımlanır. Şebeke bağlantılarının alt ve üst sınır miktarları, KD ve SO kavramlarıyla tanımlanabilir. Bu çalışmada KD ve SO için kapasite alt ve üst sınırları bulunmuştur. Bağlantı kapasitelerininin azaltılıp artırılmasıyla KD, SO ve şebeke sürdürülebilirliği tüm boyutlarıyla gösterilmiştir.

Bir havayolu ulaştırma şebekesinin bağlantı kapasiteleri değişebilir. Bu değişim, tüm şebekenin sürdürülebilirliğini yakından ilgilendirir. Ayrıca bazı bağlantılar, konumları ve kapasiteleri gereği çok hassas dengeler üzerine kurulu olabilir, bu nedenle, kritik bağlantı diye nitelendirilen bazı O-D bağlantıları belirlemek gerekmektedir. Bu çalışmamızda, NQ Etkinlik Ölçütü sayesinde ilk kez bir havayolu ulaşım şebekesi için kritik bağlantılar tanımlanmıştır.

Son yıllarda ulaştırma şebekelerini incelemek için kullanılan GTMI kavramı yardımıyla, tüm şebekenin sürdürülebilirliği incelenmiş ve GTMI için gereken bağlantı maliyet fonksiyonu tanımlanmıştır.

Çalışmamızın uygulama bölümünde, Türkiye’de faaliyet gösteren özel bir havayolu şirketinin bilgileri kullanılarak bu şirketin taşıma şebekesi kısmi olarak gözlemlenmiştir, Bu çalışma; elde edilen bilgiler ile şebekenin sürdürülebilirliği veya kritik bağlantıların da incelenmesine olanak tanınmasının yanında, geleceğe yönelik yeni bir şebeke tasarlamak ve oluşturmak adına uçak sayısı belirlemek gibi stratejik kararların daha kolay verilmesi için atılmış bir adım sayılmaktadır.

Bu çalışmada deterministik verilerle çalışan çözüm yöntemleri üzerinde araştırma yapılmıştır, gelecek çalışmalarda stokastik öngörü teknikleri ile bağlantıların ve şebekelerin incelenmesi üzerine çalışılabilir. Böyle bir çalışma, Stratejik Havayolları İttifacı (Strategic Airlines Alliance) gibi problemlerde, şirketlerin filolarını ve uçuş şebekelerinin kombinasyonlarını inceleyebilir.

KAYNAKLAR

1. Nagurney, A., Qiang Q., “Fragile networks: identifying vulnerabilities and synergies in an uncertain world”, **John Wiley & Sons**, New York, 2009.
2. Sullivan, J. L., Novak, D. C., Aultman-Hall L., Scott D. M.,. “Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: A link-based capacity-reduction approach”. **Transportation Research Part A 44**, 323-336 (2010).
3. Bazargan, M., “Airline Operation and Scheduling”, Second edition., **Ashgate**, Great Britain, 2010.
4. Feng Xie, David Levinson, “The weakest link: The decline of the surface transportation network”, **Transportation Research part E 44**, p.103 (2008)
5. Nagurney, A., Qiang, Q., “A network efficiency measure with application to critical infrastructure networks”, **J. Glob. Optim.**, 261-275 (2007).
6. Nagurney, A., Qiang. Q., “A transportation network efficiency measure that captures flows, behavior and costs with applications to network component importance identification and vulnerability”, **In Proceedings of the 18th Annual POMS Conference**, Dallas, Texas, (2007).
7. Üçer, F., “the research with network reliability approach for highway siystem”, Ph.D Thesis., **Balikesir University**, Turkey, (2009).
8. Paramahamsan, H., “Fundamental properties of synthetic o-d generation formulations and solutions”, **Blacksburg, Polytecnic Institute and State University, Virginia**, (1999).
9. Ortuzar, J., Willumsen, L.G., “Modelling transport”, **John Willey ve Sons, London, England**, (1990).
10. “Travel demand forecasting”, **Transportation Planning Handbook, The Institute of Transportation Engineers**, 112-114, (1992).
11. Gülgeç, İ., “Sefer dağılımı”, **Ulaşım Planlaması**, 83-163, (1998).
12. Knight, F.H., “Some fallacies in the interpretation of social costs”, **Quarterly Journal of Economics** 38: 582–606, (1924).

13. Haynes, Kingsley, E., Fotheringham, A. Steward, "Gravity and spatial interaction models" **Bevellery Hills, CA:Sage Publications**, (1984).
14. Modali, N. K., "Modelling destination of civil and environmental engineering", **Louisiana State University**, May, (2005).
15. Zhao, F., Chow, L. F., Li, M.T., Gan, A., "Refinement of fsutms trip distribution methodology", **Final Report for BB942**, September, (2004).
16. Harris, D. M., "A GIS aproach to linking spatial patterns and trip generation/ trip distribution modelling", **Florida Atlantic University**, 20-26, (1995).
17. Papacostas, C. S ve Prevedouros, P. D., **Transportation Engineering and Plannig**, (1993)
18. Chatterjee, A., Venigalla, M. M., "Travel demand forecasting for Urban transportation planning", *Chapter 7 of Handbook of Transportation Engineering*, Myer Kutz (Editor), **McGraw-Hill**, (2004).
19. Robles, J., "Evaluating traveler costs of alternative traffic management plans at highway work zones using a dynamic traffic assignment model", *Dissertation MSc.*, **University of Colorado at Denver**, (1997).
20. Wardrop, J. G., "Some theoretical aspects of road traffic research, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II 1, 325-378, (1952).
21. Beckmann, M.J., McGuire, C.B. ve Winsten, C.B., "Studies in the economics of transportation ", **Yale University Pres**, *Nnew Haven, Connecticut*, (1956).
22. Sheffi, Y., "Urban transport networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods", **Prentice –Hall inc.**, *Englewood Cliffs, New Jersey, USA*, (1985).
23. Bell M.G.H., Ilda Y., "Transportation Network Analysis". **John Willey and Sons Chiechester**, First edition, (1997).
24. Kang, D.H., "Multi-commodity flow estimation with partial counts on selected links", *Dissertation, Doctor of Phikosophy*, **Texas A and M University**, (2005).
25. Nagurney, A., Qiang Q., "A network efficiency measure for congested networks", **Europhysics Letters 79**, 38005, 1-5, (2007).

26. Bureau of Public Roads, "Traffic assignment manuel", **US Department of Commerce, Washington, DC**, (1964).
27. Seyed Hosseini, S.M., "Planning of Transportation Engineering and Material movement Analysis". **Publishing of University of Science and Technology**, Tehran, (2010).
28. Internet, "Advanced Transportation Engineering", node16.html, Son erişim: 09.02.2013.
29. Cheu, R.L. ve Kreinovich V., "Use of deterministik traffic assignment algorithms in stochastic networks: Analysis of equivalent link disutility functions", **Submitted to Transportmetrica for Review and Publication**, February, (2007).
30. Robinson, S. M. "Solution continuity in monotone polyhedral variational inequalities". **SIAM J. Optim.** 18 1046–1060, (2007).
31. Patriksson, M., R. T. Rockafellar, "Sensitivity analysis of aggregated variational inequality problems, with application to traffic equilibrium". **Transportation Sci.** 37 56–68, (2003).
33. Dafermos SC, Sparrow FT, "The traffic assignment problem for a general network". **Journal of Research of the National Bureau of Standards** 73B: 91– 118, (1969).
34. Dafermos S., "Traffic equilibrium and variational inequalities", **Transportation Science.** 14, 42-54, (1980).
35. Barabasi, A. L., "Linked: how everything is connected to everything else and what it means". **Plume**, New York, (2003).
36. Latora, V., Marchiori, M., "How the science of complex networks can help developing strategies against terrorism". **Chaos, Solitons and Fractals**, 20, 69-75, (2004).
37. Du, Z.P., Nicholson, A., "Degradable transportation systems: sensitivity and reliability analysis". **Transportation Research Part B: Methodological** 31 (3), 225–237, (1997).
38. Robinson, S. M.. "Normal maps induced by linear transformations", **Math. Oper. Res.** 17 691–714, (1992).

39. Smith, M. J., “The existence, uniqueness and stability of traffic equilibria”. *Transportation Res.* Part B 13 295–304, (1979).
40. Yang, H., M. G. H. Bell., “Sensitivity analysis of network traffic equilibria revisited: **The corrected approach**”. <http://ihome.ust.hk/cehyang/paper/Yang-Bell-2005-04-30.pdf>, (2005).
41. Qiu, Y., T. L. Magnanti.. “Sensitivity analysis for variational inequalities defined on polyhedral sets”. *Math. Oper. Res.* 14 410–432, (1989).
42. Rockafellar, R. T., R. J-B. Wets., “Variational Analysis. Grundlehren der mathematischen Wissenschaften“, **Springer-Verlag**, Berlin, (1998).
43. Yen, N. D., “Lipschitz continuity of solutions of variational inequalities with a parametric polyhedral constraint”. *Math. Oper. Res.* 20 695–708, (1995).
44. Outrata, J. V., “On a special class of mathematical programs with equilibrium constraints”., **Springer-Verlag**, Berlin, 246–260, (1997).
44. Patriksson, M., “Sensitivity analysis of traffic equilibria”. *Transportation Sci.* 38 258–281, (2004).
45. Robinson, S. M., “Strong regularity and the sensitivity analysis of traffic equilibria: A comment”. *Transportation Sci.* 40 540–542, (2006).
46. Jenelius E., “Approaches to road network vulnerability analysis. Division of Transport and Location Analysis”, **The Royal Institute of Technology (KTH)**, Stockholm, (2007).
47. Sakakibara, H., Kajitani, Y., Okada, N., Road network robustness for avoiding functional isolation in disasters. *Journal of Transportation Engineering* 130, 560-567, (2004).
48. Scott, D. M., Novak, D., Aultman-Hall, L., Guo, F., Network robustness index: a new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks”, *Journal of Transport Geography* 14, 215-227, (2006).
49. Hitchcock, F.L., “The distribution of a product from several sources to numerous facilities”. *Journal of Mathematical Physics* 20: 224 –230

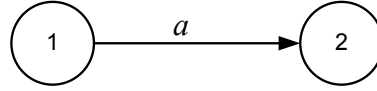
50. Mercier, A, Soumis, F., "An integrated aircraft routing and crew scheduling model with time windows", *Computers and Operations Research*, (2007)

EKLER

Ek-1. Alt sınır belirlenmesi

Teorem

Aşağıdaki şekil de gösterilen şebeke, iki düğüm ve bir bağlantıdan oluşmuştur (g bağlantısı, 1 ve 2 düğümlerini birbirine bağlamaktadır). Bu şebekenin sürdürülebilirliği (7.13) denklemi ile elde edilebilir. Bu şebekenin sürdürülebilirliğinin alt sınırı $\gamma^\beta \times 100\%$ dır.

*İspat*

Şekil de gösterilen şebeke bir O-D'den oluşmuştur, bu O-D w olarak gösterilecektir.

$$R^\gamma = \frac{\varepsilon^\gamma}{\varepsilon} \times 100\% = \frac{\lambda_w}{\lambda_w^\gamma} \times 100\% \quad (1)$$

λ_w ve λ_w^γ sırasıyla, c_g ve γc_g kapasiteli tek yolun maliyetleridir.

$$R^\gamma = \frac{t_g^0 [1 + k (\frac{d_w}{lf \times c_g})^\beta]}{t_g^0 [1 + k (\frac{d_w}{\gamma(lf \times c_g)})^\beta]} \times 100\% \Rightarrow$$

$$R^\gamma = \frac{\gamma^\beta [(lf \times c_g)^\beta + kd_w^\beta]}{\gamma^\beta (lf \times c_g)^\beta + kd_g^\beta} \times 100\% \quad (2)$$

R^γ nın, alt sınırını bulmak için, (7.13) denklemi yeniden yazılır.

$$R^\gamma = \frac{t_g^0 [1 + k (\frac{d_w}{lf \times c_g})^\beta]}{t_g^0 [1 + k (\frac{d_w}{\gamma(lf \times c_g)})^\beta]} \times 100\% , \quad (3)$$

Ek-1. (Devam) Alt sınır belirlenmesi

Biliyoruz ki $\gamma \in (0,1]$, böylece her $\beta > 0$ ve $\gamma^\beta \in (0,1]$ için;

$$R^\gamma \geq \frac{\gamma^\beta [1 + k(\frac{d_w}{lf \times c_g})^\beta]}{1 + k(\frac{d_w}{lf \times c_g})^\beta} \times 100\% = \gamma^\beta \times 100\% \quad (4)$$

ve böylece alt sınır belirlenmiş olur.

Ek-2. Üst sınır belirlenmesi

Teorem

Şekil 7.1 de, 1 ve 2 düğümleri bir tek bağlantıyla birbirine bağlamaktadır. Bağlantı maliyet fonksiyonu bu bağlantı için BPR'dir. Şekil 7.1.'in sürdürülebilirlik denklemini Ek 1'de ki (4). denklemeden elde edilebilir ve bahsi geçen şebekenin üst sınırı $\alpha^\beta \times 100\%$ ve $\alpha \geq 1$.

İspat

Teoremin birinci bölümünün ispatı, 7.1. teoremin birinci bölüm ispatıyla aynıdır.

R^α nın üst sınırını bulmak için Ek 1 deki (4). denklem şöyle yazılabilir.

$$R^\alpha = \frac{\alpha^\beta [1 + k(\frac{d_w}{lf \times c_g})^\beta]}{\alpha^\beta + k(\frac{d_w}{lf \times c_g})^\beta} \times 100\% \xrightarrow{\alpha \geq 1}$$

$$R^\alpha = \frac{\alpha^\beta [1 + k(\frac{d_w}{lf \times c_g})^\beta]}{\alpha^\beta + k(\frac{d_w}{lf \times c_g})^\beta} \times 100\% \leq \frac{\alpha^\beta [1 + k(\frac{d_w}{lf \times c_g})^\beta]}{1 + k(\frac{d_w}{lf \times c_g})^\beta} \times 100\% = \alpha^\beta \times 100\% \quad (1)$$

Ek-3. Filo verileri

| No. | Uçak tipi | Uçak sayısı |
|-----|----------------|-------------|
| 1 | A340-300 | 8 |
| 2/3 | A330-200/300 | 6/4 |
| 4 | A321- 200 | 8 |
| 5 | A320-200 | 3 |
| 6 | A319 - 132/100 | 5 |
| 7 | B777-300 ER | 3 |
| 8 | B737 - 800 | 4 |
| 9 | B737 - 700 | 3 |
| 10 | B737 - 400 | 3 |
| 11 | B737-900 ER | 2 |

Şekil 1. Uçuş filosu

| | |
|--|-------|
| <i>Günlük</i> (26.12.2012) | 838 |
| <i>Haftalık</i> (20.12.2012- 26.12.2012) | 5758 |
| <i>Aylık</i> (27.11.2012- 26.12.2012) | 22356 |

Şekil 2. Türkiyede toplam uçuş sayısı

Ek-4. Kullanıcı Denge

/ Kullanıcı Denge*/*

#include "my_types.h"

#include "md_alloc.h"

#include "my_util.h"

/Varyasyonlu Eşitsizlik/

#include "variational inequality by User Optimality.h"

include <stdio.h>

include <string.h>

include <time.h>

include <math.h>

include <stdlib.h>

include <malloc.h>

include <errno.h>

include <ctype.h>

#include "os.h"

#include "my_types.h"

#include "md_alloc.h"

#include "my_util.h"

#include "message.h"

#include "tui.h"

Ek-4. (Devam) Kullanıcı Denge

```

/* Function declarations. */
int Find_OD_dist ( int ** OD_dist, int no_zones, char* NodesFileName);
void Read_Nodes (my_float *Xnode, my_float *Ynode, int no_nodes, char*
NodesFileName) ;

my_float ft2mile(int x);
/* Main functions of this module. */

int Find_OD_dist ( int ** OD_dist, int no_zones, char* NodesFileName){
    int Orig, Dest, dist, max_orig, max_dest, max_dist=0;
    my_float *Xnode, *Ynode;
    my_float dx,dy;

    Xnode = (my_float *) Alloc_1D(no_zones, sizeof(my_float));
    Ynode = (my_float *) Alloc_1D(no_zones, sizeof(my_float));

    Read_Nodes (Xnode, Ynode, no_zones, NodesFileName);

    for(Orig=1;Orig<=no_zones;Orig++){
        for(Dest=1;Dest<=no_zones;Dest++){
            dx = Xnode[Orig]-Xnode[Dest];
            dy = Ynode[Orig]-Ynode[Dest];
            dist = (int) ceil(sqrt((double) dx*dx+dy*dy));
            OD_dist[Orig][Dest] = dist;
            if(dist>max_dist) {
                max_dist=dist;
            }
        }
    }
}

```

Ek-4. (Devam) Kullanıcı Denge

```

        max_orig=Orig;
        max_dest=Dest;
    }
}
}

    printf("Maximum OD distance %d from origin %d to destination %d .\n",
max_dist, max_orig, max_dest);
    free(Xnode);
    free(Ynode);

    return(max_dist);
}

void Read_Nodes (my_float *Xnode, my_float *Ynode, int no_nodes, char*
NodesFileName) {
    FILE *NodesFile;

    char ch;
    int Node=0, NewNode, X, Y;

    if(NodesFileName==NULL || NodesFileName[0]!='-') {
        for(Node=1;Node<=no_nodes;Node++){
            Xnode[Node]=Ynode[Node]=0.0;
        }
    }
}

```

Ek-4. (Devam) Kullanıcı Denge

```

return;
    }

    NodesFile = FileOpen ( NodesFileName , "r" );
    SkipComments(NodesFile);

    fscanf(NodesFile, " node X Y ; ");

    while ( Node<no_nodes && !feof ( NodesFile ) ) {

    SkipComments(NodesFile);
    if( fscanf(NodesFile, " %d %d %d %c ", &NewNode, &X, &Y, &ch) == 4 ) {
        if(NewNode==Node+1){
            Node++;
        }
        else {
            printf("Error in node file %s: Last node %d New node %d
\n",
                NodesFileName, Node, NewNode);
            exit(EXIT_FAILURE);
        }
        if(ch!=';'){
            printf("Error in node file %s: Expected semicolon for node
%d, found %c \n",
                NodesFileName, Node, ch);
            exit(EXIT_FAILURE);

```

Ek-4. (Devam) Kullanıcı Denge

```
}

    }
    else {
        printf("Error in node file %s: Wrong number of arguments after
node %d \n",
                NodesFileName, Node);
        exit(EXIT_FAILURE);
    }

    Xnode[Node] = ft2mile(X);
    Ynode[Node] = ft2mile(Y);
}

if(Node!=no_nodes){
    printf("Error in node file %s: last node is %d, number of nodes is %d \n",
            NodesFileName, Node, no_nodes);
    exit(EXIT_FAILURE);
}

if( fscanf(NodesFile, " %c", &ch ) != EOF )
    InputWarning("Expected EOF in file '%s' after node %d, and not %c ",
NodesFileName, Node, ch );

}
```

Ek-4. (Devam) Kullanıcı Denge

```
my_float ft2mile(int x){  
    return((my_float)x/5280);  
}
```

Ek-5. Denge Algoritması

```
/* Sistem Optimum */
```

```
void ClearVolume ( my_flow *VolumeArray );
```

```
void VolumeDifference( my_flow *Volume1, my_float *Volume2, my_flow
*Difference);
```

```
void UpdateVolume ( my_float *MainVolume, my_float *SubVolume, my_flow
Lambda );
```

```
/* FLIGHT COST FUNCTIONS BY SYSTEM OPTIMALITY */
```

```
void UpdateLinkAdditionalCost(void);
```

```
void UpdateLinkCost ( my_float *Volume);
```

```
void UpdateLinkCostDer (my_float *Volume);
```

```
void GetLinkTravelTimes(my_float *Volume, my_float *TravelTime);
```

```
my_float TotalLinkCost(my_float *Volume);
```

```
/* FLIGHT OBJECTIVE FUNCTION */
```

```
my_float OF_Links(my_float *MainVolume);
```

```
my_float OF_LinksDirectionalDerivative(my_float *MainVolume, my_float
```

```
Ek-5- (Devam)- Denge Elgoritması
```

```
*SDVolume, my_float Lambda );
```

```
void GetLinkParameters(my_float*Ticketprice /LoadFactor*my_float *Capacity,
my_float *Power, my_float *B_factor);
```

```
void SetLinkParameters(my_float*Ticketprice/LoadFactor* my_float *Capacity,
my_float Power, my_float B_factor);
```

```
/* PRINT FUNCTIONS */
```

```
/*
```

Ek-5. (Devam) Denge Algoritması

```
void PrintVolumeInColumns(my_float* Volume, FILE* fp);
void PrintTailsInRow(FILE *fp);
void PrintHeadsInRow(FILE *fp);
void PrintVolumeInRow(my_float *Volume, FILE *fp);
*/
int CongestedLinks(my_float* Volume);
void ReportInterLinkFlows(my_float *Volume, int Iteration);
void ReportFinalLinkFlows(my_float *Volume);
void LoadFactor(char *LoadFactor, my_float *Volume, int SetCosts);
/* If Volume!=NULL, get link flows. If SetCosts is TRUE, set costs. */

void InitLinks(void);
void CloseLinks(void);

#endif
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ALIPOUR SARVARI, Peiman
 Uyuşu : IRI
 Doğum tarihi ve yeri : 11.02.1984 Tabriz
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 05354569774
 e-mail : peyman.alipour@gmail.com

Eğitim Derece

| Eğitim Derece | Eğitim Birimi | Mezuniyet tarihi |
|---------------|--------------------------------------|------------------|
| Yüksek Lisans | Gazi Üniversitesi /Endüstrü Müh A.D | 2013 |
| Lisans | Bonab Üniversitesi/ Endüstrü Müh A.D | 2009 |
| Lise | Ferdosi | 2003 |

Yabancı Dil

İngilizce, Fransızca, Türkçe

Yayınlar 1. Alipour Sarvari, P. and Erol, S. Airline network: Critical leg Assessment via Variation in Practical Capacity. Journal of Traffic and Logistics Engineering (JTLE. 2013), (ISSN: 2301-3680), (Vol 2, p 228- 233).

Hobiler

Tenis, Futbol