

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TRAFİK SAYIMLARINDAN O-D MATRİSİ
ELDE ETME YÖNTEMLERİ**

İnşaat Mühendisi Taylan ENGİN

**FBE İnşaat Anabilim Dalı Ulaştırma Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aydın EREL (YTÜ)

İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ.....	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tez Amaçları ve İçeriği	4
1.2 Tez Organizasyonu	5
1.3 Ulaşım Planlamasında Talep Analizi.....	6
1.3.1 Talep Analizi Aşamaları	8
1.3.1.1 Yolculuk Üretim ve Çekimi	8
1.3.1.2 Yolculuk Dağılımı (Distribution)	9
1.3.1.3 Yolculukların Ulaştırma Türlerine Ayrımı (Modal Split)	12
1.3.1.4 Yolculukların Yola Atanması (Assignment)	14
2. TRAFİK SAYIMLARINDAN O-D MATRİSİ TAHMİN EDİLMESİ.....	15
2.1 O-D Matrisinin Önemi.....	15
2.2 Kullanılan Modeller.....	16
2.2.1 Gravity (Çekim Modeli)	17
2.2.2 Entropi Modelleri.....	20
2.2.3 Denge Modelleri	23
2.2.4 İstatistiksel Modeller	25
2.2.5 Sinir Ağı Modelleri.....	25
2.2.6 Bulanık Mantık	26
2.2.7 Değerlendirme	26
2.3 O-D Matrisi Tahminine Ait Problem Detayları.....	27
2.4 Yolculuk Dağılımı ve Yapay O-D Yaratımı.....	29
2.5 Çeşitli Çözümler	33
2.6 Yolculuk Sayıları Tabanlı O-D Matrisleri İçin Maksimum Olabilirlik.....	34
2.7 Trafik Hacim Değerleri Tabanlı Maksimum Olasılık	38
2.8 Akım Sürekliliğinin Varlığı	39
2.9 Diğer Yaklaşımlar.....	42
2.10 Özet.....	43
3. O-D MATRİSİ ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI.....	44
3.1 Giriş	44
3.2 Yolculuk Modeli ve Yaklaşımlar	44

3.3	Hacim Modeli ve Yaklaşımlar	50
3.4	Özet.....	52
4.	SAYISAL ÇÖZÜMLEME TEKNİKLERİ	53
4.1	Giriş	53
4.2	Çift Adımlı Yaklaşım	53
4.3	Tek Basamak Yaklaşımı	56
4.4	Çözüm Yazılımları ve Özellikleri.....	58
4.4.1	Bilgisayar Etmenleri	58
4.4.2	Matematiksel Etmenler	59
4.5	Alternatif Çözümler ve Paket Programlar.....	59
4.5.1	Microsoft Excel Çözümleri	59
4.5.2	Matlab	60
4.5.3	Queens-OD	60
4.6	Özet.....	61
5.	YAPAY O-D MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMASI	62
5.1	Giriş	62
5.2	Test Edilecek Yol Ağlarının Tanımı	62
5.3	Test edilecek Eşitlikler	67
5.4	Başlangıç Matrisi Dengelemesinin Etkisi.....	68
5.5	Üniform Başlangıç Matrisinin Etkisi.....	79
5.6	Uygun Başlangıç Matrisi Etkileri	94
5.7	Uygun Olmayan Başlangıç Matrisi Etkileri	94
5.8	Akım Süreliliğinin Etkisi.....	95
5.9	Özet.....	96
6.	Sonuçlar ve Öneriler	97
	KAYNAKLAR.....	100
	EKLER	101
	ÖZGEÇMİŞ.....	115

SİMGE LİSTESİ

$O-D$	Başlangıç – bitiş noktaları
T_{ij}	$i - j$ noktaları arasında hesaplanan yolculuk sayısı
t_{ij}	$i - j$ noktaları arasındaki mevcut yolculuk sayısı
V_a	“a” kesitinden geçen trafik hacim değeri
P_{ij}^a	$i - j$ bölgeleri arasındaki yolculuğun “a” kesitinden geçme olasılığı
C_{ij}	$i - j$ bölgeleri arasındaki yolculuğun genel maliyeti

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Planlama şeması.....	2
Şekil 1.2	Tez organizasyonu şeması.	6
Şekil 2.1	16 Bağlı yol ağı.....	29
Şekil 2.2	Beş bağlı yol ağı.....	34
Şekil 2.3	İki bağlı yol ağı.....	43
Şekil 5.1	Beş bağlı yol ağı.....	63
Şekil 5.2	İki bağlı yol ağı.....	66
Şekil 5.3	Eşitlik 5.3'ü kullanarak 5 bağlı yol ağı için farklı katsayılar da optimum çözüm.	71
Şekil 5.4	Eşitlik 5.3'ü kullanarak 2 bağlı yol ağı için farklı katsayılar da optimum çözüm.	72
Şekil 5.5	Eşitlik 5.4'ü kullanarak 5 bağlı yol ağı için farklı katsayılar da optimum çözüm.	73
Şekil 5.6	Eşitlik 5.4'ü kullanarak 2 bağlı yol ağı için farklı katsayılar da optimum çözüm.	74
Şekil 5.7	Eşitlik 5.5'i kullanarak 5 bağlı yol ağı için farklı katsayılar da optimum çözüm..	75
Şekil 5.8	Eşitlik 5.5'i kullanarak 2 bağlı yol ağı için farklı katsayılar da optimum çözüm..	76
Şekil 5.9	Eşitlik 5.6'yı kullanarak 5 bağlı yol ağı için farklı katsayılar da optimum çözüm.....	77
Şekil 5.10	Eşitlik 5.6'yı kullanarak 2 bağlı yol ağı için farklı katsayılar da optimum çözüm.....	78
Şekil 5.11	Eşitlik 5.1'i kullanarak 5 bağlı yol ağı için optimum çözüm.....	81
Şekil 5.12	Eşitlik 5.2'yi kullanarak 5 bağlı yol ağı için optimum çözüm.....	82
Şekil 5.13	Eşitlik 5.3'ü kullanarak 5 bağlı yol ağı için optimum çözüm.....	83
Şekil 5.14	Eşitlik 5.4'ü kullanarak 5 bağlı yol ağı için optimum çözüm.....	84
Şekil 5.16	Eşitlik 5.6'yı kullanarak 5 bağlı yol ağı için optimum çözüm.....	86
Şekil 5.17	Eşitlik 5.7'yi kullanarak 5 bağlı yol ağı için optimum çözüm.....	87
Şekil 5.18	Eşitlik 5.8'i kullanarak 5 bağlı yol ağı için optimum çözüm.....	88
Şekil 5.20	Eşitlik 5.2'yi kullanarak 2 bağlı yol ağı için optimum çözüm.....	90
Şekil 5.21	Eşitlik 5.3'ü kullanarak 2 bağlı yol ağı için optimum çözüm.....	91
Şekil 5.22	Eşitlik 5.7'yi kullanarak 2 bağlı yol ağı için optimum çözüm.....	92
Şekil 5.23	Eşitlik 5.8'i kullanarak 2 bağlı yol ağı için optimum çözüm.....	93

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	Talep analizi akış çizelgesi	7
Çizelge 1.2	Örnek ulaşım etüdü matrisi.....	11
Çizelge 1.3	Trafik atama modelleri.....	14
Çizelge 2.1	Yapay O-D sürecinin ve yolculuk dağılımının tamamlayıcı özellikleri.....	31
Çizelge 2.2	Yolculuk dağılımı ve yapay O-D yaratımı karşılaştırması.....	32
Çizelge 2.3	Gözlemlenmiş bağ akım değerleri.....	35
Çizelge 2.4	Genel matris	35
Çizelge 2.5	Potansiyel matris.....	35
Çizelge 2.6	Beş bağlı yol ağı için olası çözümler.....	36
Çizelge 2.7	Önceki anketlerden tahmin edilen trafik fraksiyon matrisi.....	38
Çizelge 2.8	Çizelge 2.7' deki trafik değerlerine göre kaynak matris.....	38
Çizelge 2.9	İki bağlı yol ağında bağ hacimleri.....	43
Çizelge 5.1	Beş bağlı yol ağında bağ trafik hacim değerleri.....	63
Çizelge 5.2	Beş bağlı yol ağı için uygun O-D yolculuk matrisi.....	63
Çizelge 5.3	Beş bağlı yol ağı için çözüm alternatifleri.....	64
Çizelge 5.4	İki bağlı yol ağında bağ trafik hacim değerleri.....	66
Çizelge 5.5	İki bağlı yol ağında matris denklemleri.....	66
Çizelge 5.6	İki bağlı yol ağı için çözüm alternatifleri.....	66
Çizelge 5.7	Üniform başlangıç matrisi için optimum sonuç karşılaştırması.....	80

ÖNSÖZ

Ulaşım planlaması, ulaştırma mühendisliği alanında en çok ilgi toplayan konu olarak dikkati çekmektedir. Ulaşım planlamasında yolculuk taleplerinin belirlenmesi ve bu taleplerin yol ağı içerisindeki dağılımı, araştırmaların en çok yoğunlaştığı kısımdır. Söz konusu talebin belirlenmesinde esas veriyi yolculuk sayıları ve bunların dağılımı oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında da başlangıç-bitiş matrisi (O-D matrisi) olarak tanımlanan, talep analizinin yolculuk dağılımı aşaması üzerinde durulmuştur. O-D matrisinin elde edilmesinde kullanılan yeni teknikler incelenerek bunların kullanılabilirliği test edilmiştir. Bu çalışmanın hızlı ve düşük maliyetli O-D matrisi elde edilmesi konusunda gelecekte yapılacak çalışmalara fikir vereceğini umut ediyorum.

Yüksek lisans tezi çalışmam süresince bana sürekli destek olan, bilgi ve tecrübesi ile beni yönlendiren tez danışmanım Prof. Dr. Aydın EREL' e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca destekleri ile yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Ulaştırma Teknikeri Samet Can BATI, İnş. Müh Cengiz UNCU' ya ve yayınlarından yararlanmam konusunda göstermiş olduğu yardımlardan dolayı Prof. Dr. Jaime BARCELO ve Prof. Dr. Hesham RAKHA' ya teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2005

Taylan ENGİN

ÖZET

Kent içi ulaştırma planlamasında yolculukların başlangıç ve bitiş noktalarına ait matris (O-D matrisi), planlama aşamasının temel verilerinden biridir. Bugüne kadar O-D matrisini elde etmek için değişik yöntemler kullanılmıştır. Araştırmacılar, bu yöntemlerin yüksek maliyetli olması, çalışma hassasiyeti gerektirmesi sebebi ile yeni yöntemler bulmaya yönelmişlerdir. Bu nedenle, düşük maliyetli yapay O-D tahmin teknikleri arayışı başlamıştır. Yeni tekniklerin temelinde yatan düşünceye göre, bir yol ağı üzerinde belli kesitlerde yapılan trafik sayımlarından elde edilen yolculuk sayıları ile geçmiş çalışmalardan elde edilen yolculuk sayıları arasındaki fark, bazı parametrelerin kalibrasyonunda kullanılır. Bu yaklaşım esas alınarak trafik sayımlarından O-D matrisi elde etme fikri oluşmuş ve bunu elde etmek için değişik yöntemler önerilmiştir. Bu tekniklerde mevcut trafik hacim değerleri, en olası O-D yolculuk matrislerini oluşturmak için kullanılır.

Bu tez çalışmasında da O-D matrislerinin elde edilmesine yönelik farklı yaklaşımlar ve teknikler incelenmiş, bunlara ait model ve eşitliklerin örnek bir yol ağı üzerinde sayısal olarak test edilip tanıtılması amaçlanmıştır. Bu konuda bugüne kadar bir çok yöntem önerilmiş, bu yöntemler arasında, maksimum entropi tekniklerine dayanan statik O-D problemlerinin çözümü için önerilen modeller ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Trafik Mühendisliği, O-D Matrisi, Trafik Sayımları, Entropi, Ulaştırma Planlaması, Talep Analizi

ABSTRACT

Origin – Destination (O-D) matrix is the basic data planning process in the urban transportation planning. Up to today various methods have been used to obtain O-D trip tables. Because the known methods are very costly and labor intensive, the researchers tried to find new methods. Consequently, more cost effective indirect or synthetic O-D estimation techniques have been developed. In these new methods, differences between traffic volume counts of some links and priori traffic counts of the same links are used for calibration of some parameters. Using this approach as a basis the idea to obtain O-D trip tables from traffic counts is formed and for obtaining O-D trip tables, various methods are suggested. Existing traffic volumes are used to estimate most likely O-D matrices in these methods.

In this thesis the basic formulations that have been proposed to formulate and solve the static O-D problem are analysed, the models and formulations belonging to these approaches are tested and aimed to introduce as a sample on a sample network numerically. Up to today many methods have been suggested on this topic. Among these methods, the method synthetically using link flow observations based on Maximum Entropy techniques is analysed in detail.

Keywords: Traffic Engineering, O-D Matrix, Traffic Counts, Entropy, Transportation Planning, Demand Analysis.

1. GİRİŞ

Kişilerin ve yüklerin yer ve zaman yararı sağlamak üzere bir yerden başka bir yere taşınması hizmetine “Ulaştırma” denilmektedir. Ulaştırma toplumun gelişmesi üzerinde sosyal, ekonomik, kültürel ve siyasal etkilere sahiptir. Ulaştırma sistemi ise, insan ve yüklerin bir yerden başka bir yere iletimlerinin, istenilen koşullara uygun, iyi tanımlanmış bir şekilde sağlanması amacıyla bir araya getirilmiş, işlevleri ve karşılıklı etkileşimleri organize edilmiş, ilgili tüm fiziksel, sosyal, ekonomik ve kurumsal bileşenlerin kümesi şeklinde tanımlanmaktadır (Erel, 2001). Ulaştırma sisteminin oluşturulması ve işletilmesi amacıyla yapılacak yatırımların belirlenmesi, kararların alınması ise ulaştırma sisteminin planlama aşamasını oluşturmaktadır. Planlama “belirli bir amaca yönelik problemi, belirli kısıtlar altında, optimum düzeyde çözüme” olarak tanımlanmaktadır (Erel,1987). Bu tanıma bağlı olarak ulaştırma planlaması; farklı düzeylerdeki kararların alınmasını gerektiren, çok sayıda olası karar seçenekleri olan karmaşık bir çevre içinde başarılması gereken bir karar verme süreci olarak tanımlanabilir. Ulaştırma planları; kapsamlarına, ayrıntı düzeylerine, sabit ve değişken faktörlerine, zaman boyutlarına, finansal maliyetlerine ve karar verme düzeylerine göre genel olarak aşağıda yer alan 3 düzeyde sınıflandırılabilir.

1) Stratejik Planlama : Uzun süreli, altyapıya yönelik, on yıllar, yirmi yıllar düzeyinde yapılan maliyeti yüksek planlama çalışmalarıdır. Stratejik planlamada amaç, göz önüne alınan şehrin arazi kullanımına etki edip şehrin gelişmesini planlamak, mevcut yol ağlarını 10-20 senelik geleceğe uygun olarak projelendirmektir. Kentin temelden değişimini öngörür. Örneğin; kent içi yol ağı daha fazla gelişmeyecek kentleri toplu taşıma sistemlerine ve dış bölgelerde planlanan yeni kentlere yöneltir. Burada ulaşım sistemlerinin arazi kullanımı ile etkileşimi en önemli husustur.

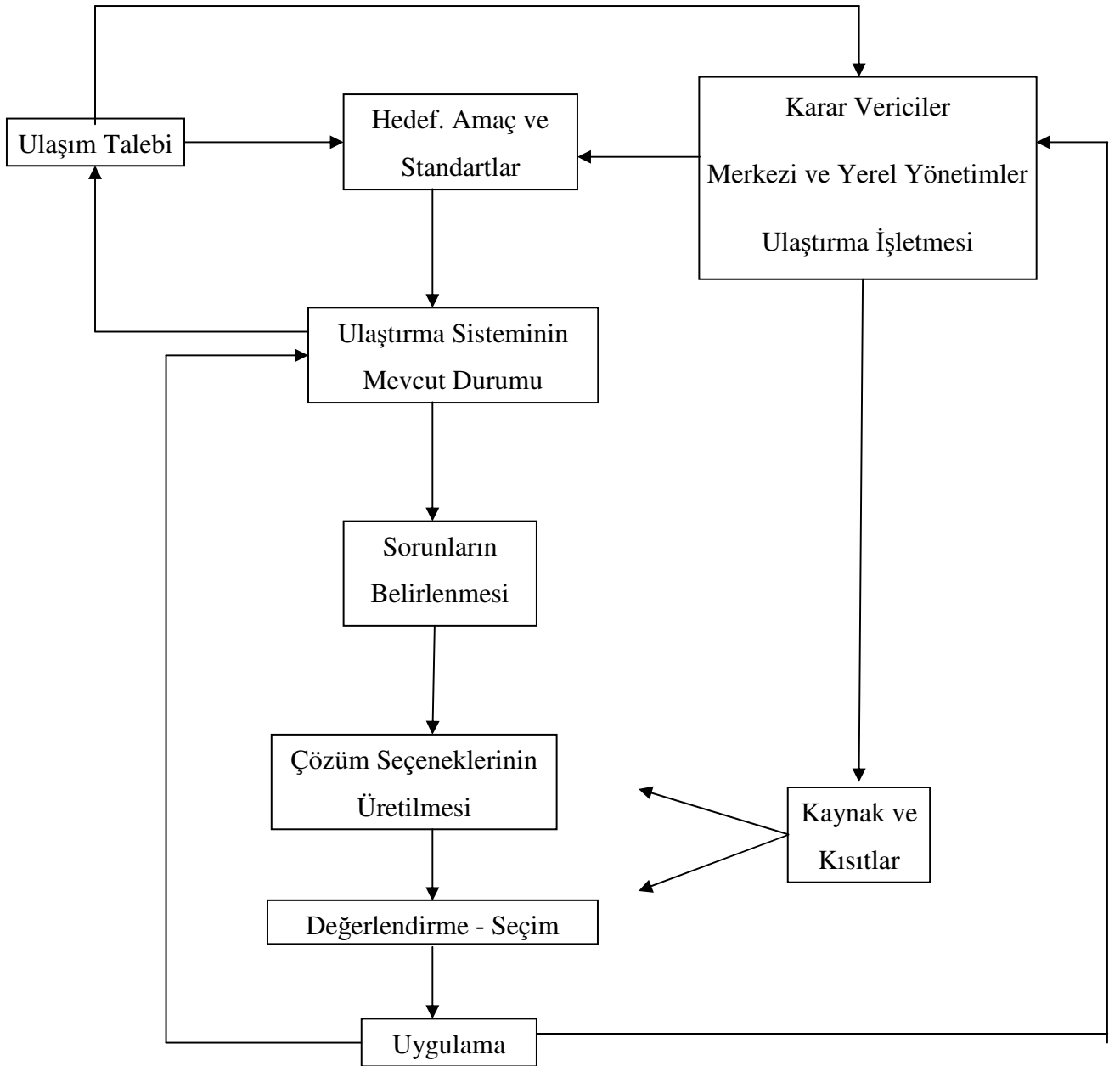
2) Taktik Planlama : Daha kısa süreli, yıl veya birkaç yıl düzeyinde yapılan mevcut sistemi daha verimli kullanmaya yönelik planlama çalışmalarıdır. Taktik planlama, orta vadeli bir süreci kapsar ve bu düzey, kaynak temininden çok organizasyonun verimliliğini ve rekabet gücünü arttırmak için var olan sabit tesisler, taşıtlar ve personel gibi kaynakların optimum kullanımı ile ilgilidir.

3) İşletimsel Planlama : Günlük, haftalık, aylık düzeyde hazırlanan, kısa süreli sorun ve gereksinimlere yönelik planlama çalışmalarıdır. Bu tip planlama kısa sürede sonuçlarını verir. Yalnız, kısa dönemli planlamanın büyük kısmının, özellikle alt yapı ve uzun dönemli planlamanın bir parçası olması gerektiğine ve de stratejik planlamanın adım adım

gerçekleştirilmesine dikkat edilmelidir. Bu planlama, bugünkü alt yapının daha düşük maliyet ile daha iyi çalıştırılması ile ilgilidir. Bu tip planlamada tek yönlü yollar, kavşak düzenlemeleri, sinyalizasyon, işaretleme ve idari önlemler gibi uygulamalar vardır.

1.1 Ulaştırma Planlaması Esasları

Kent içi ulaştırma planlamasında kullanılan temel veri, ulaşım talebidir. Planlama süreci içinde ulaşım talebi ve politikalar, hedefler doğrultusunda mevcut sorunların belirlenip çözülmesinde etkin olan en önemli faktörlerdir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Planlama şeması.

Ulaşım talebi belirlenirken, belirli bir zaman aralığında kentin önceden belirlenmiş her bölgesinden diğer bölgelerine yapılan yolculuk sayılarının dağılımı O-D matrisi ile gösterilmektedir. Bir O-D matrisi, belirlenmiş olan her bir başlangıç ve bitiş bölgesi arasındaki yolculuk taleplerini gösteren hücre değerlerinin oluşturduğu elemanların “n x n” boyutlu bir matrisidir. O-D matrisi değerleri ulaşım planlaması dışında trafik, altyapı ve nazım plan çalışmaları için de önemli bir girdidir. O-D matrisi oluşturmak için sık kullanılan veri toplama yöntemleri genel olarak dört başlıkta sıralanabilir. Bunlar:

1- Anket Yöntemi (Doğrudan sorarak ya da posta yolu ile)

a) Yol Anketleri

b) İşyeri Anketleri

c) Ev Anketleri

2- Trafik Sayımları

3- Plaka Okuma Yöntemi

4- Etiket Yapıştırma Yöntemi

Kentin farklı yerlerinde özellikle otobüs ve minibüs durakları, vapur iskeleleri, tren veya metro istasyonlarında kent içi yolculuklarını başlatan ya da bitiren kişilerle yapılacak yol anketleri, uygulama açısından kolay olmakla birlikte, anket yapılacak örnek büyüklüğünün tespiti, bunların bölgeler arasındaki dağılımının saptanması ve anketlerin değerlendirilmesindeki zorluk bu yöntemin sakıncaları arasındadır. İşyeri anketleri için, kentin farklı yerlerindeki işyerleri ziyaret edilerek buralarda çalışan kişilerden işe geliş – gidişleri konusunda bilgi alınır. Bu yöntemde sadece sabit bir yerde çalışanların dikkate alınması, sürekli hareket halinde çalışanlar ile çalışmayanların hesaba katılmaması önemli bir eksiklik olarak dikkati çekmektedir. Ev anketlerinde, kentin farklı bölgelerindeki haneler ziyaret edilerek ev sakinlerinden günlük yolculuklarının nereden nereye olduğu, gelir düzeyleri, araç sahiplilikleri gibi veriler toplanır. Ev anketlerinin uygulanması, diğer anketlere göre daha güç olmakla birlikte, değerlendirme ve planlama açısından daha sağlıklı veriler sunmaktadır. Ev anketleri ile O-D matrisine ulaşmak mümkün olsa da, bu genel anlamda pahalı ve uygulama güçlüğü olan bir yöntemdir. Örnekleme yoluyla yapılan anket yöntemleri oldukça maliyetlidir. Anketörlerin seçimi, eğitimi, anketlerin kodlanması, değerlendirilmesi yoğun ve yüksek maliyetli bir çalışmayı gerektirir.

Yol kesitlerinde trafik sayımı yöntemi ise, kentin ana arterleri üzerinde bazı noktaları belirleyerek zirve saatlerde bu noktalardan geçen araç sayılarının, tiplerinin ve yolcu sayılarının kaydedilmesini içermektedir. Yol üzerindeki mevcut trafik akımının, mevcut ulaşım talebinin bir sonucu olduğu dikkate alındığında, güvenilir bir model kullanılarak bu yolculukların başlangıç-bitiş noktalarının belirlenmesi, yani O-D matrisinin oluşturulması sağlanabilir.

Bir O-D matrisi plaka okuma, etiket yapıştırma, ev anketleri, yol üzeri anketleri gibi bilinen incelemeler ile elde edilmiş olabilir. Bu tür incelemeler zaman kaybına neden olmakta, pahalıya çıkmakta ve çalışma hassasiyeti gerektirmektedir. Buna ek olarak bu yaklaşımların çoğu örnekleme hataları içermektedir. Bu klasik yaklaşımlar, kent gelişimine ait etkin faktörlerde oluşacak değişimlerin etkisini yansıtmada yetersiz kalmaları gibi dezavantajlarından dolayı da pek rağbet görmemektedirler. Örneğin; eğer arazi kullanım karakteristikleri değişir ise yolculuk talepleri de değişecektir. Bundan dolayı önceden hesaplanmış yolculuk matrisi çok kısa zamanda güncelliğini dolayısıyla geçerliliğini yitirebilir ve elde etme maliyeti yüksek olan yolculuk matrisi için tekrar bir inceleme-araştırma yapılması ihtiyacı doğar.

Çoğu ulaştırma düzenlemelerinde, planlama hedefleri açısından yolculuk matrisine ihtiyaç duyulur. Bütçe, zaman ve çalışma ortamı kısıtlarından dolayı konuyla ilgili araştırmacılar yolculuk matrisinin kısa sürede ve düşük maliyetle oluşturulması için alternatif yöntemler aramışlardır. 1970'lerin başından bu yana, aşağıdaki literatür araştırmasında açıklanacağı gibi, pahalı analizlere ihtiyaç duyulmadan yolculuk dağılım matrislerini elde etmek için çeşitli teknikler bulunmuştur.

1.2 Tez Amaçları ve İçeriği

Doğru ve hızlı O-D matrisi elde edebilmek, ulaşım sistemi planlaması ve yönetimi için önemli bir avantajdır. Bu çalışmada da O-D yolculuk matrisinin daha güvenilir ve daha hızlı bir biçimde elde edilmesi için bu güne kadar ortaya konmuş yaklaşımlar ve bunlara ait sayısal çözüm örnekleri incelenerek bu konuda geliştirilmiş yöntemler araştırılmıştır. Çoğunlukla konu ile ilgili daha önceden yapılmış çalışmalarda geliştirilmiş altı farklı model ve bunların çözümünde kullanılan bazı varsayımlar değerlendirilmiştir.

Çalışmanın sayısal örnek kısmında, maksimum entropi yaklaşımını esas alan farklı modeller kullanılmıştır. Sayısal örneklerde maksimum entropi yaklaşımı ile halihazırda kullanılmakta olan klasik O-D Matrisi elde etme yöntemi karşılaştırılarak, aralarındaki artılar ve eksiler

ortaya konmaya çalışılmıştır.

Bir model oluşturma çalışması, bu amaçla kullanılan özel bir formüle ait güçlü ve zayıf yönleri anlamayı sağlar. Karşılaştırmalı bir yöntem ise hangi modelin daha kolay ve doğru O-D matrisi elde etmeye yaradığına karar verilmesine yardım edecektir. Bu çalışmada öne sürülen varsayımlara dayalı O-D matrisi elde etme teknikleri incelenirken aşağıdaki amaçlar göz önünde tutulmuştur:

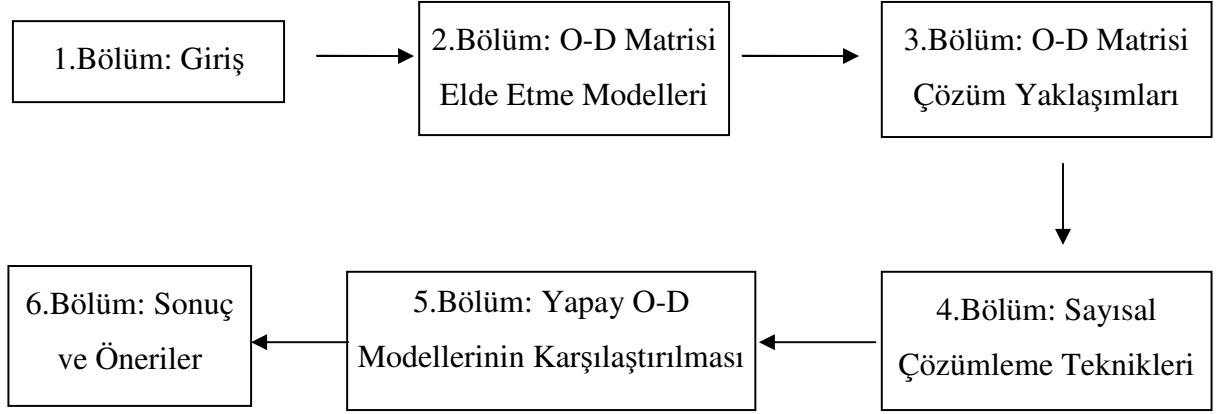
- Yolculuk sayılarına ve trafik hacim değerlerine dayalı yöntemler olarak isimlendirilen 2 tip yapay O-D modelini göstermek ve karşılaştırmak,
- O-D matrisi tahmin sürecinde kullanılan eşitliklerin ilk halinden, sonuçta elde edilen eşitliğe kadar kullanılacak tüm önemli varsayımların ve sonuç çözümünde de bu varsayımların anlamlarını göstermek,
- Bu varsayımlar kullanılmak istendiğinde geçerli olan sonuç O-D çözüm sürecinin nasıl olduğunu göstermek,
- Kullanılan farklı eşitlikler ve bunların çözümünü kolaylaştıran bazı yazılım paketlerinin uygulanabilirliğini test etmek.

1.3 Tez Organizasyonu

Yukarıda bahsedilen çalışmaları doğru bir şekilde incelemek, trafik hacimlerine dayalı O-D yolculuk matrisi elde etmeyi anlamak için önce literatür araştırması yapılmıştır. Bu amaca uygun olarak hazırlanan çalışmanın organizasyon şeması Şekil 1.2' de gösterilmiştir. Maksimum entropi tekniğine dayalı O-D matrisi elde etmeye yarayan farklı modeller, iki farklı yol ağı üzerinde test edilmiş ve çeşitli koşullar altında oluşan etkiler incelenmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde, tez amaçları ve içeriğinden bahsedildikten sonra ulaşım planlamasının ilk adımı olan talep analizi anlatılmış, O-D matrisinin talep analizinin içindeki yeri ve önemi vurgulanmıştır.

İkinci bölümde; bu tez için yapılmış olan literatür araştırması yer almaktadır. Bu araştırma, kullanılan modellerin farklı sınıflandırmalarını içerir. Her bir modelin avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır.



Şekil 1.2 Tez organizasyonu şeması.

Üçüncü bölümde; maksimum entropi ya da minimum bilgi tekniği detayları tartışılmaktadır. Bu tekniğin uygulamasında kullanılan iki temel modelden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, en olası O-D yolculuk matrisinin elde edilmesinde kullanılacak iki farklı çözüm yaklaşımı tanımlanmış, bu iki yöntemin detayları anlatılmıştır. Ayrıca, bu yaklaşımların uygulanmasında kullanılan bazı yazılım paketlerinden de bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde; iki farklı yol ağı üzerinde farklı yöntemler ile elde edilen çözümler karşılaştırılmıştır. Örnek sayısal yaklaşım, diğer alternatif eşitlikler ile karşılaştırılmış, yapılan çalışmalarda yolculuk modeli ve hacim modeli arasında uyumluluğun nasıl sağlandığı konusundaki araştırmalara yer verilmiştir.

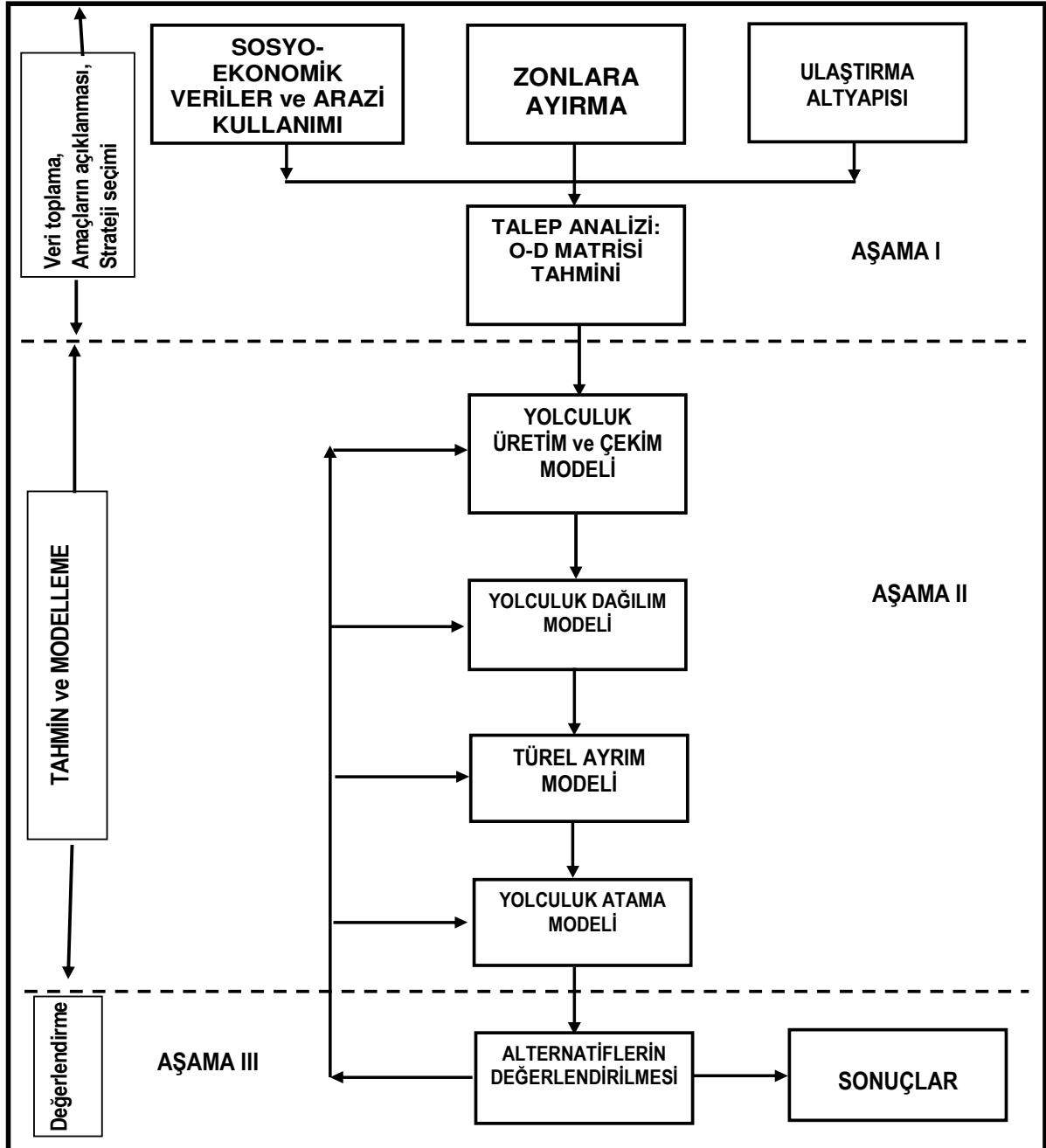
Altıncı bölümde; bugüne kadar yapılmış çalışmaların ışığı altında elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve gelecekte yapılacak araştırmalar için daha önceki araştırmacıların önerileri dikkate alınarak bazı genel tespitlerde bulunulmuştur.

1.4 Ulaşım Planlamasında Talep Analizi

Giriş bölümünde de kısaca değinildiği gibi talep analizi bir ulaşım ağında hareket eden yolcuların nereden nereye, hangi koşullarda ve sayılarda, hangi alt sistemleri kullanarak ve de hangi yollar üzerinden ulaşım faaliyetini gerçekleştirdiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır.

Talep analizi sonucunda elde edilen veriler, analiz yapılan bölgeye ait ulaşım altyapısı ihtiyaçlarını ve bu ihtiyaçlar doğrultusunda gelecek için alınacak plan kararlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Çizelge 1.1' de talep analizi sürecinin akış diyagramı gösterilmektedir.

Çizelge 1.1 Talep analizi akış çizelgesi *



* Prof. Jaume Barcelo' nun "Notes on Optimization Models for Transportation Analysis" başlıklı seminer notlarından, Dept. of Statistics and Operations Research, Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona.

1.4.1 Talep Analizi Aşamaları

Bir planlama çalışmasında yapılacak ilk çalışma etüt çalışmasıdır. Bu aşamada öncelikle etüt yapılacak yerin sınırları ve bu saha içinde eşdeğer özelliklere sahip zonların sınırları belirlenir. Örneğin; konut bölgeleri, idari kademelerin olduğu yerler, endüstri, kültür merkezleri, ticaret alanları gibi.

Bu aşamada aynı zamanda halkın ulaşım olanakları, tercihleri ortaya konarak mevcut ulaşım durumu tahmin edilir. Bu amaçla insanların,

NEREDEN? NEREYE? (Yolculuk Başlangıç – Bitiş noktaları)

NASIL? (Hangi tür araçla)

NİÇİN? (Yolculuk sebebi; iş, okul, eğlence,.. gibi)

NE ZAMAN? (Düzenli yolculuk zamanlarından zirve saati yakalama)

HANGİ GÜZERGAHDAN? (Alternatif yollardan hangisinin kullanıldığı)

gittikleri belirlenir. Bu bölüme yolculuk talep analizi denir. Klasik anlamda talep analizi şu bölümleri içermektedir:

Çalışma bölgesindeki zonlara ait yolculuk üretim ve çekim değerlerinin tahmin edilmesi. (Üretim – Çekim, Generation - Attraction)

Yolculukların zonlara dağılımı, O-D matrislerinin oluşturulması. (Yolculuk Dağılımı – Trip Distribution)

Yolculukların ulaştırma alt sistemlerine dağılımı. (Türel Dağılım - Modal Split veya Tür Seçimi – Mode Choice)

Ulaşım talebinin yol ağına atanması. (Trafik Ataması – Traffic Assignment)

Talep analizinde yapılan çalışmalar statik bir sürece sahip değildir. Talep analizinin dinamik yapısı içinde gelecek için yapılan projeksiyonlar bazı varsayımlarla olur. Oysa kentsel gelişme bu varsayımlara uymayabilir veya bazı gelişmelerin gerçekleşmesi mümkün olmayabilir. Böyle bir durumda, planlamada değişikliklerin yapılması kaçınılmaz olur.

1.4.1.1 Yolculuk Üretim ve Çekimi

Ulaşımda üretim ve çekimi belirlemenin bilinen ve en sık kullanılan yolu, doğrudan bilgi kaynağı durumundaki insanlara, daha önceden belirlenmiş olan ve belirli bir amaç

doğrultusunda oluşturulan soruları yöneltmektir. Bu uygulamaya kısaca anket denilmektedir. Anket, insanların buldukları yerlerde; örneğin evlerinde, yolda, araç içinde ve iş yerlerinde yapılabilir.

Anket uygulamaları, yolculukların niteliklerini belirleyen temel etütlerdir. Çalışma yapılan zonlarda yolculuk üretim ve çekimini belirlemede etkin olan faktörlerin tespiti için anketler en önemli veri kaynaklarıdır. Bu etütler genelde şu yöntemler kullanılarak yapılır:

- Şoförle yol üzerinde doğrudan konuşma.
- Yolcularla duraklarda konuşma.
- Posta kartı metodu.
- Ev ve işyeri anketleri metodu.

Bu anket uygulama yöntemlerinin dışında, istenilen verilere ulaşabilmek amacıyla aşağıdaki farklı veri toplama yöntemleri de uygulanabilmektedir:

- Araç plaka numaralarının kaydedilmesi.
- İşaret yapıştırma yöntemi.
- Trafik sayımları.

Yukarıda belirtilen yöntemler kullanılarak farklı zonlar arasında ortaya çıkan yolculuk üretim ve çekim değerleri tespit edilir, bu veriler kullanılarak yolculuk üretim ve çekim matrisleri oluşturulur. Bu matris bize önceden belirlemiş olduğumuz zonların mevcut yolculuk üretim ve çekim değerlerini verirken söz konusu zonların sosyo-ekonomik verilerinin de elde edilmesini sağlayacaktır. Bu yolculuk değerlerinin, oluşturulan model yardımı ile geleceğe projeksiyonlarının yapılması sonucunda gelecekteki yolculuk üretim ve çekim değerleri tahmin edilir. Geleceğe ait yolculuk değerleri belirlenirken kente ait gelişme eğilimleri ve nazım plan kararları da dikkate alınmalıdır.

1.4.1.2 Yolculuk Dağılımı (Distribution)

Bir önceki adımda, farklı zonlardan ortaya çıkan yolculuk üretiminin nasıl elde edileceğinden bahsedilmiştir. Çalışma alanının büyüklüğüne göre değişen bir zaman biriminde tüm yolculuk üretiminin, yine bölgelerde mevcut tüm yolculuk çekimine eşit olduğu aşağıda yer alan Çizelge 1.2' de açıkça görülmektedir.

Yolculuk dağılımının modellenmesinde, zonların ekonomik gücü ve arazi kullanımı ile olan ilişkileri önemli rol oynar. Bu faktörlerin dışında çalışma alanına ait nüfus, araç sahipliği, çalışan sayısı, cinsiyet, vb. gibi sosyo-ekonomik faktörlerin de etkisi modelin içinde yer almalıdır. Zonlara ait yolculuk talebinin diğer zonlardaki çekim noktalarına hangi kriterlere göre nasıl dağıldığı, hangi genel etkenin bunda rol oynadığı bilinmelidir ki, ileride ortaya çıkacak yolculuk talebinin bu etken altında dağılımı yapılabilir. Bu aşamaya “Yolculuk Dağılımının Belirlenmesi” (Trip Distribution) denir. O-D matrisi oluşturma çalışması bu aşamada devreye girecektir. Farklı yöntemlerle belirlenen yolculuk dağılımlarının bir matris yapısıyla ifade edilmesi sonucunda O-D Matrisi elde edilmektedir. Bu adımda yapılacak iş, birinci adımda belirlenmiş yolculuk üretim - çekim değerlerinin, zonlar arasındaki dağılımını bulmaktır. Daha kısa açıklamak gerekirse, son satır ve son sütun değerleri bulunmuş olan O-D matrisinin, diğer hücrelerine ait değerlerin bulunmasıyla yolculuk dağılımı elde edilecektir.

Farklı zonlar arasındaki yolculuk talebi, birinci aşamada yapılmış çalışmaların değerlendirilip modelin uygulanması sonucu elde edilen değerler, matrislerin kolon ve satırlarında belirtilir. Çizelge 1.2’ de verilmiş olan örnek matriste dikkat edilecek nokta, satırlardaki sayıların genel toplamalarının kolonlardaki sayıların genel toplamalarına eşit olmasıdır. Çizelgede yer alan örnek matriste zonların kendi içinde oluşan yolculuklar dikkate alınmamıştır..

Çizelge 1.2 Örnek ulaşım etüdü matrisi.

		ZONLAR - ÇEKİM									Toplam Üretim
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ZONLAR - ÜRETİM	1	-	50	30	40	20	60	80	100	30	410
	2	10	-	20	35	40	50	70	33	42	300
	3	51	22	-	30	41	12	70	93	20	339
	4	76	70	79	-	80	31	25	97	46	504
	5	90	80	80	60	-	40	27	18	73	468
	6	80	95	90	75	37	-	31	36	70	514
	7	73	100	107	150	80	107	-	81	79	777
	8	33	37	70	105	110	93	85	-	65	598
	9	65	45	30	50	71	60	110	170	-	601
Toplam Çekim		478	499	506	545	479	453	498	628	425	4511
											4511

Yolculuk dağılımını belirlerken dikkat edilecek bazı noktalar vardır. Örneğin; bir zondaki çekim kapasitesi her zaman karşılanamayabilir. Farklı nedenlerden dolayı trafik bu zon yerine başka yere gidebilir. İşte bu tür faktörlerin bilinmesi ve formüle katılması gerekecektir. Bunun da anahtarı, bugünkü yolculuk talebinin zonlara dağılımının formüle edilmesinden geçer.

Bugünkü dağılım modeli bir kere bulunduktan sonra gelecekteki dağılım, aynı formül içine gelecekteki yolculuk üretimi, çekimi, zonlar arası yeni mesafeler, kent gelişimi ve sosyo-ekonomik faktörlerdeki değişim konarak elde edilir. Gelecekteki ulaşımın dağılımı için yaygın olarak iki yöntem kullanılmaktadır:

1. Analog veya “Büyüme Faktörü” (Growth Factor) metodu. Bunda bölgeler arası bugünkü ulaşım, muhtelif şekillerde belirlenen bir “Büyüme Faktörü” ile çarpılarak gelecekteki bölgeler arası ulaşım ortaya çıkar (Fratar yöntemi).
2. Sentetik veya “Zonlar Arası Ulaşım Formülü” metodunda, zonlar arası üretim ve çekim değerleri kullanılarak ulaşım dağılımının nasıl ortaya çıktığı, hangi faktörlerin etkisi altında olduğu araştırılır ve bu formüle edilir. Bu çalışmada belirli bazı fiziksel formüllerden yararlanır. Bugünkü yolculuk dağılımının modellenmesinden sonra aynı modelde gelecek için tahmin edilen yolculuk talebi kullanılır ve gelecekteki yolculuk dağılımı bulunur. (Gravity yöntemi)

1.4.1.3 Yolculukların Ulaştırma Türlerine Ayrımı (Modal Split)

Talep analizinin birinci ve ikinci adımında, zonların her birine ait toplam yolculuk yaratımlarının gelecekte ne olacağı ve bunun bölgeler arasında nasıl dağıtılacağı incelenmiştir ki bunlardan birincisi “Yolculuk Üretim ve Çekimi” (Production - Attraction), ikincisi ise Ulaşım Talebinin Dağılımı (Distribution) idi. Bu aşamalardan sonra, otomobil, toplu taşıma, yaya vs. gibi hangi türler ile ve ne miktarda yolculuk yapılacağına bakılmalıdır. Bu aşamaya: “Türel Ayrım” (Modal Split) denir.

Türel ayrım esas olarak iki bölümde incelenir.

Birincisi, ilk adımda elde edilmiş olan üretim ve çekim değerlerinin farklı türlere dağıtılmasıdır. Başka bir deyişle; yolculuk dağılımını belirlemeden önce yolculuk üretim ve çekim değerlerinin ne kadarının hangi ulaşım türünü kullanacağını tahmin edilmesidir. Örneğin: 1 nolu zonda üretilen yolculuğun özel araç ve toplu taşıma araçlarına dağılımının belirlenmesi gibi.

İkincisi ise, ulaşım formüllerinin türel seçimlerine bakılmadan, sadece zonlar arası yolculuk olarak formüle edilip, bunun zonlara dağılımı da elde edildikten sonra bunun ne kadarının özel otomobil, ne kadarının taksi, ne kadarının toplu ulaşım ile taşınacağı, ne kadarının yaya veya bisikletli olacağını belirlenmesidir.

Bunlardan başka, özellikle geleceğe dönük ulaşım politikası hedeflerinde, kentlerin yapabilecekleri yatırımların büyüklüğüne göre önceden bazı kabuller yapılır. Örneğin; “(A) kentinde kentiçi ulaşım, gelecek 20 yıl içinde, %60 toplu taşıma ile %40 ise özel araçlarla olacaktır” denilerek yatırım ve yasal düzenlemeler buna göre yapılmaya başlanır.

İnsanların ulaşım araçları seçimlerinde genel olarak aşağıdaki faktörler etkilidir:

1.Yapılan yolculuğun karakteristikleri:

a. Yolculuk uzunluğu.

Yolculuk uzunluğu, bölge merkezleri arasındaki kuş uçuşu yol olarak ölçülür. Bu toplu taşımacılık ve özel araçlar için ölçülür. Bazen bunun yerine kapıdan kapıya olan mesafe veya yolculuk süresi alınır. Toplu taşımada bu süre, duraklara kadar gidişi, bekleme sürelerini de kapsar. Genelde görülen, ev - iş yeri ve ev - okul yolculuklarında daha çok toplu taşımanın kullanıldığıdır.

b. Yolculuk amacı.

Evden başlayan yolculuklarda (okul, işyeri gidişi) daha çok toplu ulaşım araçları kullanılır. Buna karşın alışveriş veya eğlence trafiğinde ise daha çok özel araç kullanılır.

2. Yolcu Karakteristiği:

Yolcuların gelir durumu, eğitim seviyesi, yaş grubu, yolculuk amacı ve özel araç sahipliliği araç türü seçiminde önemli rol oynar. Özel araç sahipleri çoğunlukla toplu taşıma sistemini tercih etmez. Yolculuk süresi uzadıkça toplu taşıma sisteminin seçilme şansı artar. Ayrıca seçimde, özellikle alt ve orta gelirli sınıflarda, yolculuk masrafları da önemli rol oynar.

3. Sosyal ve Ekonomik Faktörler

Ulaşım türünün seçiminde, yolculuğun başlangıç ve son noktalarının sosyo-ekonomik durumu da etkili bir diğer faktördür. Söz konusu yolculuğun yapıldığı bölgelerin ekonomik yapısı sahip olduğu ulaşım türü seçeneklerini de etkilemektedir. Bunun yanı sıra bölgenin sahip olduğu sosyal ve kültürel fonksiyonlar kişilerin türel seçimini etkileyeceği gibi, o bölgeye sunulan ulaşım hizmetlerinin alternatiflerini ve kalitesini de etkileyecektir. Tüm bu faktörler yolcuların türel tercihlerinde etkili olmaktadır.

1.4.1.4 Yolculukların Yola Atanması (Trip Assignment)

Talep analizinin son aşaması “Atama” bölümüdür. Bu bölümde, kendi içinde homojen özellikler taşıyan farklı zonlardan oluşup yine bu zonlar arasına dağılan farklı türden yolculuklarla aynı noktaya giden alternatif güzergahlardan hangisini seçileceği ile ilgilenilecektir. Bu iki nokta arasında birkaç alternatif güzergah varsa bu yolların yolculuk süresi bakımından en kısa süreli olanı (diğer bir deyimle en az dirençlisi) ya da en kısa mesafeye sahip olanının seçilmesi sık kullanılan yöntemlerdendir. Böyle bir tercih yapılacağı varsayıldığında trafik yükünün tümü bu yol üzerine yüklenir. Bunu haricinde uzunluk, maliyet, zaman gibi kriterlerin dikkate alındığı denge atamaları da sık kullanılan atama yöntemlerindedir. Sıkça kullanılan trafik atama modelleri çizelge 1.3’te gösterilmiştir. Talep analizinde kullanılacak atama modeline karar verildikten sonra, talep analizinin ilk üç aşamasından elde edilen veriler mevcut yol ağına atanır.

Yol seçiminde modeller aşağıda gösterildiği gibi dört grupta incelenir:

Çizelge 1.3 Trafik atama modelleri.*

	KAPASİTE KISITLI	KAPASİTE KISITSIZ
DETERMİNİSTİK HEPSİ YA DA HİÇBİRİ	Hacim-Süre Modeli, En kısa yol**	En Kısa Yol Modeli
PAYLAŞIMLI	Denge Modeli	Tercih Modeli

* Erel A., (2001), Ulaşım Planlaması I ders notlarından alınmıştır.

** Hacim-Süre modeli Ekler bölümünde anlatılmıştır.

2. TRAFİK SAYIMLARINDAN O-D MATRİSİ TAHMİN EDİLMESİ

2.1 O-D Matrisinin Önemi

Bütün gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin yaşadığı büyük sorunlardan birisi trafik problemidir. Bu problemi hafifletmeye yönelik olarak karar vericiler (merkezi ve yerel otoriteler), işletme ve planlama konusunda çeşitli potansiyel çözümler uygulamışlardır. Bu çözümlerden bazıları;

- Talep sınırlama politikaları (vergilerin arttırılması, diğer ulaşım masraflarının arttırılması, otopark, benzin,..).
- Toplu ulaşımı destekleme.
- Ulaşım yönetim stratejileri geliştirme (sinyal koordinasyonu, eş zamanlı trafik yönlendirme gibi).

Ulaşım planlamasında yolculukların sayısal dağılımı O-D yolculuk matrisiyle açıklanır. O-D matrisleri yolculuk dağılımını belirlemek için kullanılır ve talep analizi içinde çok önemli bir yere sahiptir. Bu matris, çalışılan bölgenin farklı zonları arasındaki yolcu sayısının ya da yük miktarlarının dağılımını göstermektedir. Yolculuk dağılımının bilinmesi yapılacak planlama çalışmalarının esasını oluşturmaktadır. Bu şekilde elde edilecek olan yolculuk talebi dağılımı bilgisi, ulaşım sistemindeki eksikleri ve yetersizlikleri belirlemeye yardımcı olmakla birlikte, gelecek için yapılacak yatırımlar konusunda da karar vermeye katkıda bulunacaktır. Günümüzde nüfus değerleri ve arazi kullanımında yaşanan hızlı değişimler O-D matrislerinin geçerliliğini kısa sürede yitirmesine neden olmaktadır. Mevcut yöntemlerle O-D matrisi tahmin edilmesi işi, çalışmayı yapanlar için yüksek maliyetli olmakla birlikte, yolcular için de zaman kaybına neden olması ve de anketlerle elde edilen verilerin doğruluğundan emin olunamaması, O-D matrisini daha güvenilir verilere dayanan, daha düşük maliyetli, daha hızlı tahmin etmeyi sağlayacak yeni yöntemlerin geliştirilmesinin gerekli olduğunu ortaya koymaktadır. Tüm bu gerekçeler dikkate alındığında, trafik sayım değerleri ve araziden elde edilecek diğer bilgiler kullanılarak O-D matrisinin elde edilebilmesi çok önemli bir avantaj olacaktır. Trafik sayımları ve araziden alınan verilerin gerçekte yolculuk dağılımı ve trafik atamasının bir sonucu olduğu düşünülürse, sayım yapılan yol bağlarındaki her bir başlangıç bitiş çiftinin toplamı hakkında doğrudan bilgi edinilmiş olunacaktır. Trafik sayımlarının veri kaynağı olarak kullanılması, diğer veri toplama yöntemlerine göre hem daha düşük maliyetli hem de her zaman uygulanabilir olması sebebiyle, oldukça avantajlı görülmektedir. Trafik

sayımlarının gelişmiş otomatik sistemlerle yapılması, tahmin edilecek O-D matrisinin güvenilirliğini daha fazla arttıracaktır. Geçen birkaç yıl süresince trafik mühendisleri, “Gelişmiş Trafik Yönetim Sistemlerini” (ATIS) de içeren “Akıllı Ulaşım Sistemleri” (ITS) üzerine odaklanmıştır. Planlamada, işletmede ve Akıllı Ulaşım Sistemlerinin çalıştırılmasında doğru ve hızlı O-D yolculuk matrisi üretim tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2 Kullanılan Modeller

Trafik sayımlarına dayalı O-D yolculuk matrisleri elde etmek için pek çok yöntem vardır. Bu tekniklerden en çok kullanılanı, bu bölümde bahsedilecek olan Maksimum Entropi yaklaşımıdır. Trafik sayımlarına dayalı O-D matrisi tahmin edilmesi alanında kullanılan çoğu model, basitleştirmek amacıyla çeşitli varsayımlar ve eklemeler yapılmış olan Maksimum Entropi yaklaşımına dayanır. Bu basitleştirmeler aslında çözüme daha çabuk ulaşmak için yapılmıştır. Farklı koşullar altında doğruluğu ve uygulanabilirliği test etmek için entropi temelli çeşitli modeller denenmiştir. Entropi yaklaşımı ve model ayrıntıları aşağıda anlatılmıştır.

Trafik sayımlarını veri olarak kullanan bir talep modeli elde etmek için her bir başlangıç noktasından her bir bitiş noktasına olan yolculukların takip ettikleri rotaların belirlenmesi çok önemlidir. N adet zona sahip bir yol ağı içerisinde yer alan düğüm noktaları ve bağlar üzerinde elde edilecek O-D matrisi “ N^2 ” hücreden, zonların kendi içindeki yolculuklar dikkate alınmadığında ise “ $N^2 - N$ ” hücreden oluşacaktır. Bu ağ üzerinde i zonundan j zonuna yapılan yolculukların “a” bağıncı tercih etme olasılığı “ P_{ij}^a ” ile gösterildiğinde, bu a bağıncıdan geçecek akım değeri “ V_a ” şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_a = \sum P_{ij}^a x T_{ij}$$

Bu eşitlikte yer alan “ P_{ij}^a ” olasılık değeri kullanılan trafik atama modelinden elde edilmektedir. “ T_{ij} ” değerleri ise tahmin edilmeye çalışılan O-D matrisi hücrelerinin bilinmeyen değerleridir. Gözlemlerle elde edilen “ V_a ” değerlerinin sayısı bilinmeyen “ T_{ij} ” değerlerinin sayısından çok azdır. Bu nedenle, bu eşitlikten tek bir çözüm bulunması imkansızdır. Bu sorunun çözümü için iki farklı yaklaşım önerilmektedir. Bunlar:

1- Çekim modeli gibi önceden yapılmış çalışmalardan elde edilmiş bir modelin yapısına bağlı kalınarak O-D matrisini tahmin etmek.

2- Matrisin tahmini için gerekli olan ilave bilgileri en az seviyede tutmak için maksimum olasılık ya da maksimum entropi gibi tekniklerin kullanılması. (Burada bahsedilen ilave bilgilerin en önemlisi bir başlangıç matrisinin elde edilmesidir.)

Trafik sayımlarını kullanarak O-D matrisi tahmin etme çalışmalarında en önemli nokta 1.2.1.4 nolu paragrafta anlatılacak olan “Yolculukların Yola Ataması” başlığı altında anlatılmış olan “Trafik Atama Tekniği”dir. Atama modelinde trafik sıkışma etkisinin dikkate alınıp alınmamasına bağlı olarak Atama Matrisi elde edilir. Genelde kullanılan atama yöntemleri iki grupta sınıflandırılmıştır. Bu atama modelleri:

a) Orantılı Atama:

“ P_{ij}^a ” trafik olasılık değeri ve V_a trafik hacim değerinin birbirinden etkilenmediği varsayılır. Bu tip atama yöntemlerinde V_a değeri, yolculuk başlangıç ve son noktalarındaki trafik akımları ile orantılıdır. Yolcuların trafikte oluşacak sıkışma etkisini dikkate almadan yol seçecekleri kabul edilmekle birlikte, maliyetin minimum olduğu yollar tercih edilecektir.”All or Nothing” atamaları buna örnek gösterilebilir.

b) Denge Ataması

Bu atama yönteminde yoldaki sıkışma etkisi dikkate alınmaktadır ve daha gerçekçi bir yaklaşım olduğu kabul edilmektedir. Denge ataması Wardrop'un denge prensipleri ile ifade edilmektedir. Wardrop'un birinci prensibine göre, tıkalı ulaşım ağlarında oluşan trafik dağılımı içinde kullanılmakta olan herhangi bir yolun maliyeti alternatifleri arasında minimum maliyetli ya da diğerleri ile eşit maliyetli bir yoldur. Kullanılmayan yollardaki maliyetler ise kullanılan yolların maliyetinden ya daha fazladır ya da eşittir.

Trafik sayım değerlerinden yararlanarak O-D matrisi elde etmek için kullanılan yöntemlerin en çok bilinenleri aşağıda altı başlık altında toplanmıştır. Özellikle, ilk üç grupta yer alan modeller en sık kullanılan modellerdir.

2.2.1 Gravity (Çekim Modeli)

Bu modelde ana prensip, yolculukların Newton'a ait çekim kuralına göre oluştuğu varsayımına dayanmaktadır. Bu yaklaşımı esas alan ilk model D. Low tarafından önerilmiştir. Çekim modelleri “Parametre Kalibrasyon Modelleri” olarak da adlandırılırlar. Bu modellerde, O-D matrisleri, trafik sayımının ve diğer parametrelerin (yolculuk maliyeti, yolculuk mesafesi, yolculuk süresi gibi) bir fonksiyonu olarak kabul edilirler. Çeşitli regresyon

teknikleri ve akım sürekliliği kuralı, parametrelerin kalibrasyonunda kullanılır. Bu modelde sayımlardan elde edilen hacimler ve tahmin edilen hacimler arasındaki farklar ise en küçüklüklenerek sonuç çözümü elde edilir.

Çekim modeline göre i ve j başlangıç – bitiş noktaları arasındaki yolculukların,

$$t_{ij} = \alpha(O_i D_j d_{ij}^{-n}) \quad (2.1)$$

eşitliğine göre oluşturduğu kabul edilir.

T : Toplam yolculuk sayısı

T_{ij} : $i - j$ başlangıç – bitiş noktaları arasındaki yolculuk matrisi

t_{ij} : $i - j$ başlangıç – bitiş noktaları arasındaki yolculuk sayısı

$O_i D_j$: $i - j$ başlangıç – bitiş noktalarına ait nüfus, istihdam, vb. sosyoekonomik veriler.

d_{ij} : direnim katsayısı

n : regresyon katsayısı.

P_{ij}^1 : $i - j$ başlangıç – bitiş noktaları arasında “1” kesitini kullanan yolculuk oranı

V_l : “1” kesitindeki trafik akımı

X_{ij}^n : $i - j$ noktaları arasında n yolculuk veya yolcu türüne göre yolculuk doğurganlık (genişleme) faktörü

C_{ij} : $i - j$ başlangıç – bitiş noktaları arasındaki yolculuğunun genel maliyeti

$C_l(V_l)$: l kesiti üzerindeki maliyet – akım fonksiyonu

Yolculukların en ucuz yolu kullanacak şekilde gerçekleştiği kabul edilirse;

$$P_{ij}^1 = \begin{cases} 1, & l \text{ kesiti } i-j \text{ rotası üzerinde ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

l kesitindeki trafik akımı:

$$V_l = \sum t_{ij} P_{ij}^1 = \alpha \sum (O_i D_j d_{ij}^{-2}) P_{ij}^1 \quad (2.2)$$

olacaktır.

Bu formülde “ α ” dışındaki tüm parametreler ve değişkenler bilinmektedir. “ α ” parametresinin değerini bulmak için, standart regresyon teknikleri yardımıyla, hesaplanmış değerler ile trafik sayımlarından elde edilen gerçek değerler arasındaki farkların karesi alınarak, bu farkların en azlanması yöntemi kullanılır. “ α ” uyarlama parametresinin bulunabilmesi için şu regresyon modeli önerilmiştir.

Yapılan yolculuklar iş ve iş dışı yolculuklar olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Her bir bölgeden diğer bölgelere yapılan iş yolculuklarını belirleyen unsurlar her bölgedeki iş gücü (F_i) ile diğer bölgelerdeki istihdam (E_j) olacaktır. İş dışı yolculukları belirleyen unsurlar ise her bölgeye ait nüfus (P_j) ile diğer bölgelerin çekiciliği (A_j) olacaktır. Herhangi bir bölgenin çekiciliği, nüfus, gelir ve harcama durumu gibi ölçütler ile belirlenebilir. İş ve iş dışı yolculuklar için X_{1ij} , X_{2ij} doğurganlık faktörleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$X_{1ij} = F_i E_j C_{ij}^{-m} \quad (2.3)$$

$$X_{2ij} = P_i A_j C_{ij}^{-m} \quad (2.4)$$

Yapılan yolculukların $i - j$ arasındaki en kısa yolu kullanacağı kabul edilirse bu yol üzerindeki herhangi bir l kesitinde:

$$X_{2l} = \sum P_{ij}^1 X_{2ij} \quad (2.5)$$

olacaktır.

X_{1l} ve X_{2l} değişkenleri ile kesit bilgileri arasında anlamlı bir ilişki ortaya konarak yolculukların oluşumu açıklanabilir. Bunun için V_1 (l kesitindeki trafik değerleri) bağımlı değişken, X_{1l} ve X_{2l} ise bağımsız değişkenler olarak alınıp ;

$$V_1 = \alpha_0 + \alpha_1 X_{1l} + \alpha_2 X_{2l} \quad (2.6)$$

Eşitliği elde edilir. X_{1l} ve X_{2l} için çeşitli m değerleri kullanılarak en yüksek uyum sağlayan çoklu regresyon çözümünden “ α_i ” parametreleri bulunur.

Yolculuk yaratım faktörleri için sosyo-ekonomik değişkenler ve değişik matematiksel modeller kullanılarak modeli geliştirmek mümkündür. Ayrıca i ve j bölgeleri arasındaki bağlantılar için, en ucuz yol seçimi yerine çoklu seçim durumu modele katılabilir.

Çekim modeli yaklaşımı ile O-D matrisine ulaşmak için çeşitli modeller geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bütün bu modellerin ortak amacı sosyo-ekonomik verilere ve arazi kullanım verilerine dayanarak bölgeler arası çekim modeli kurmaktır.

Çekim modelleri, doğrusal (Low 1972, Holm ve arkadaşları.1976, Gaudry and Lamarre 1978, Smith and McFarlane 1978) ve doğrusal olmayan (Rolillhard 1975, Hogbag 1976) çekim modelleri olarak ikiye ayrılır.

2.2.2 Entropi Modelleri

Entropi, en genel tanımıyla bir sisteme ait düzensizliğin ölçüsüdür. Günümüzde pek çok disiplinde entropi fonksiyonları kullanılmaktadır. Sistemlerde; ister en küçük, isterse en büyük sistem olsun bir bozulma, bir çöküş her zaman mevcuttur. İşte bu bozulma haline veya bozulmaya eğilim haline entropi denmektedir. Sistemin düzensizliği arttıkça artış gösteren bir fonksiyon rahatlıkla bir entropi fonksiyonu olabilir. Ölçülebilir bir sistem özelliği olan entropi kavramı, kullanım alanına göre farklı tanımlara sahiptir. Yakın zamanlarda, ulaştırma mühendisliği içinde kullanılan modellerde O-D yolculuk matrislerini elde edebilmek için trafik akımı sayım değerleri kullanılmaya başlanmıştır. O-D matrisi tahmin etmede, sayım değerlerini temel veri kabul eden yeni çözüm yöntemlerinden birisi olan Entropi yöntemi, kesin doğru olmayan ve yolculuk üretim yöntemini kullanan Gravity modellerine göre, daha az hatayla ve daha kolay bir şekilde O-D matrislerinin elde edilebilmesi açısından bir avantajdır. Bundan dolayı modelin gerçeğe yakınlığı, O-D matrisindeki toplam yolculuk sayısının büyüklüğü ile mutlaka ilişkili değildir. Aslında trafik sayımlarından bir yolculuk matrisi tahmin etmek için yukarıda bahsedilen yaklaşım, yolculuk matrisini bir çekim modeline ya da önceden bilinen bir yolculuk matrisine mümkün olduğunca yakın hale getirmeye zorlamaktır. Entropi, ulaşım sistemi modellemesinde olasılık açısından ele alındığında yolculukların (t_{ij}) en olası dağılımı;

$$W(t_{ij}) = \frac{\sum_{ij} t_{ij}}{\prod_{ij} (t_{ij})!} = \frac{T_{ij}}{\prod_{ij} (t_{ij})!} \quad (2.7)$$

İfadesinin en yüksek değeri alması ile sağlanacaktır. $W(t_{ij})$ ifadesi toplam T sayıda yolculuktan oluşan matrisin kaç değişik şekilde oluşturulabileceğini vermektedir. Bu sayıyı en yüksek yapan t_{ij} değerleri en olası O-D matrisini oluşturacaklardır. Entropi yaklaşımının modellemede en bilinen uygulaması, yolculuk dağılımı için kullanılan tam kısıtlı çekim modelidir. L.G. Willumsen tarafından önerilen modelde ise, $W(t_{ij})$ ifadesinin yol kesit

bilgilerinden gelen kısıtları sağlayacak şekilde en büyüklenmesi yöntemi ile O-D matrisine ulaşılmalarını öngörülmektedir. Model için;

$$V_1 = \sum_{ij} P_{ij}^1 t_{ij} \quad (2.8)$$

Bütün l'ler için kısıtları sağlanarak, amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$Z = \ln W(t_{ij}) \quad (2.9)$$

Burada $W(t_{ij})$ ifadesinin doğal logaritması alınmıştır. Bu işlemin sebebi daha ayrıntılı olarak 4.2. bölümde, "Çift Adımlı Yaklaşım" başlığı altında açıklanacaktır. Bu işlem, 2.9 eşitliğindeki amaç fonksiyonunun en büyüklenmesi olarak tanımlanır. $W(t_{ij})$ ifadesinin açılımı yerine yazılırsa:

$$\ln W(t_{ij}) = \left(\ln \sum_{ij} t_{ij} \right)! - \sum_{ij} \ln(t_{ij}!) \quad (2.10)$$

fonksiyonu elde edilir. Burada Stirling* yaklaşımı uygulanırsa:

$$\ln W(t_{ij}) = \left(\ln \sum_{ij} t_{ij} \right)! - \sum_{ij} (t_{ij} \ln t_{ij} - t_{ij}) \quad (2.11)$$

yazılır.

$\sum t_{ij}$ ifadesi toplam yolculuk sayısını veren bir sabit olduğundan ihmal edilerek yukarıdaki model şu şekilde yazılabilir:

$$V_1 = \sum_{ij} P_{ij}^1 t_{ij} \quad (2.12)$$

Bütün l'ler için kısıtları sağlanarak,

$$\ln W(t_{ij}) = - \sum_{ij} (t_{ij} \ln t_{ij} - t_{ij}) \quad (2.13)$$

amaç fonksiyonunun en büyüklenmesidir.

Kısıtlar Lagrange çarpanları ile çarpılarak amaç fonksiyonuna dahil edilir ve böylece kısıtsız bir en büyükleme problemi elde edilir.

* Stirling yaklaşımı Ek 1'de detaylı olarak anlatılmıştır.

$$L = \sum_{ij} (t_{ij} \ln t_{ij} - t_{ij}) + \sum_1 \lambda_1 \left(V_1 - \sum_{ij} P_{ij}^1 t_{ij} \right) \quad (2.14)$$

Bu ifadenin en büyüklenmesi gerekecektir. En büyükleme için L fonksiyonunun karar değişkenlerine göre kısmi türevi alınarak sifıra eşitlenip karar değişkenleri çözülür. Bu işlemler sonucunda elde edilen değerler L ifadesini en büyükleyen değerlerdir.

$$\frac{\partial L}{\partial t_{ij}} = -\ln t_{ij} - \sum_1 \lambda_1 x P_{ij}^1 = 0 \quad (2.15)$$

Bu eşitlikten elde edilen,

$$t_{ij} = e^{-\sum_1 \lambda_1 P_{ij}^1} \quad (2.16)$$

ifadesinde $e_l^{-\lambda}$ yerine x_1 konulursa model,

$$t_{ij} = \pi_1 x_1 P_{ij}^1 \quad (2.17)$$

şekline dönüşecektir. buradaki ifade 12 kısıtında yerine konulduğunda

$$V_1 = \left(\sum_{ij} \pi_1 x_1 P_{ij}^1 \right) P_{ij}^1 \quad (2.18)$$

eşitliği elde edilir.

Entropi yaklaşımını baz alan benzer bir model de H.J. Van Zuylen (1980) tarafından önerilmiştir. Önerilen modelde ilk O-D matrisinin güncelleştirilmesi amaçlanmıştır.

Hazırlanan modellerin çözümü için J.D. Murchland*, “tekrarlı dengeleme algoritması” adını verdiği bir çözüm tekniği kullanmıştır. Bu teknik, yolculuk ataması içinde yer alan denge modellerinin çözümünde kullanılan tekniğe benzemektedir.

Van Zuylen ve Willumsen (1980) bu yaklaşımı trafik sayımlarındaki bilginin tam anlamıyla kullanılmadığını söyleyerek eleştirmişlerdir. V. Zuylen ve Willumsen ilk yolculuk matrisinden itibaren ele aldıkları özel bir problem altında diğer yaklaşımlar ile birlikte minimum bilgi kullanarak problemin çözülebildiğini öne sürmüşlerdir. Bu öneriyi takip eden diğer otoriteler “minimum bilgi” ve “maksimum entropi” kavramlarına dayanan iki yaklaşım

* Harinarayan, P., (1999) “Fundamental Properties of Synthetic O-D Generation Formulations and Solutions”, Master of Science Thesis in Civil and Environmental Engineering,

ileri sürmüşlerdir. Entropi maksimizasyonu ile bilgi minimizasyonu birbirine eşdeğer anlamdadır. Entropi maksimizasyonu; entropi olasılığının en büyüklenmesidir. Buna karşın bilgi minimizasyonunda olasılığın negatif doğal logaritmasının en küçüklenmesi gerekmektedir.

Yol sayımlarından yolculuk matrisi tahmini için genel eşitlikte mümkün olduğunca az bilgi kullanılması, bilgi minimizasyonu anlamına gelir. V. Zuylen ve Willumsen problemi çözmek için maksimum entropi yaklaşımını önermişlerdir.

Bu yaklaşımların ortak özelliği; problemin çözümünde $i - j$ bölgeleri arasındaki yolculukların toplam sayısını bir sabit olarak kabul etmeleridir. Ancak bu varsayım, bütün çalışmalar için her zaman geçerli değildir.

2.2.3 Denge Modelleri

Bu modeller, “Denge Prensibi Kuralı” veya “Wardrop İlkeleri” diye isimlendirilen, trafik akımı içinde kullanıcı tercihlerinin belirlediği prensipleri esas alan modellerdir. Bu tip modeller kalabalık-yoğun alan analizi için daha kullanışlıdır. Genellikle mevcut bir O-D çifti arasındaki rota seçimi, bilinen bir O-D matrisinden alınmıştır. Bu modellerde çözüme, bilinen eski bir O-D bilgisini hedef alarak ulaşılmaktadır. Modeldeki düzenlemeler, gözlemlerle elde edilen trafik hacim değerleri kullanılarak yapılır.

Trafik hacim bilgilerinden O-D matrisine ulaşmak için yukarıdaki yöntemler, yolculukların başlangıç – bitiş noktaları arasında en ucuz ya da k -ucuz ($k > 1$) yolu izleyecekleri varsayımını içermektedirler. Başka bir ifade ile “ P_{ij}^1 ” değerleri ($i - j$ arasındaki yolculukların l kesitinden geçme olasılığı), “ t_{ij} ” den ($i-j$ arasındaki toplam yolculuk sayısı) bağımsız olarak ele alınmaktadır. Sang Nyugen ise, yollardaki trafik yoğunluğunun yüksek olması durumunda yolculukların Wardrop’ un birinci ilkesine göre atanarak denge durumuna ulaşılacağını belirtmiştir. Bu ilkeye göre herhangi bir başlangıç – bitiş ikilisi arasında kullanılan her bir bağın maliyeti, kullanılabilir diğer tüm alternatif bağların maliyetine eşit ya da daha düşük olacaktır. Bu yaklaşımı esas alan modelin tanımlaması şu şekildedir:

“ V_l ”, $i-j$ arasındaki bağlantılardan herhangi bir “ l ” kesitindeki trafik hacim değerini ve “ C_{ij}^l ” de $i-j$ noktaları arasında kullanılan bağların toplam maliyetini vermektedir. Wardrop’ un birinci ilkesi gereği kullanılan bütün bağların maliyeti C_{ij}^l dir. Herhangi bir kesitteki maliyet – akım ilişkisi ise $C_l(V_l)$ ile ifade edilmektedir. Buna göre denge durumu;

$$\sum_{ij} C'_{ij} t'_{ij} = \sum_l C_l(V'_l) V'_l \quad \text{ile sağlanacaktır.} \quad (2.19)$$

Buradan hesaplanan $[t_{ij}]$ yolculuk matrisinin, gerçek yolculuk matrisi $[t'_{ij}]$ 'ye eşdeğer olması için, aşağıdaki koşullar tüm i-j çiftleri için sağlanmalıdır.

$$\sum_{ij} C'_{ij} t'_{ij} = \sum_{ij} C_l(V'_l) V'_l \quad (2.20)$$

ve

$$C'_{ij} = C_{ij}$$

Buradaki C_{ij} değeri, $[t_{ij}]$ 'nin yola atanması sonucunda i-j başlangıç ve bitiş noktaları arasında kullanılan yollarda oluşacak maliyetleri vermektedir. Bu koşulları sağlayan yolculuk matrisini elde etmek için öngörülen modelde,

$$\sum_l P_{ij}^l = 1 \quad \text{bütün (i,j)'ler için} \quad (2.21)$$

$$P_{ij}^l \geq 0 \quad \text{bütün l,i,j'ler için}$$

$$t_{ij} > 0 \quad \text{bütün (i,j)'ler için}$$

$$V_l = \sum_{ij} P_{ij}^l t_{ij} \quad \text{bütün l'ler için}$$

$$\sum_l C_l(V'_l) V'_l = \sum_j C'_{ij} t'_{ij}$$

Kısıtları sağlanarak,

$$Z_{\min} = \int_0^v Cl(x) dx \quad (2.22)$$

Amaç fonksiyonunun en küçüklenmesi gerekmektedir.

Burada esas hedef, uyulması istenilen ilk matris ile mümkün olduğu kadar örtüşecek bir yolculuk denge matrisi tahmin etmektir. Bundan sonra bu modeller O-D çiftleri arasında hacim değerlerini ve rotaları belirlemede kullanılır. Modeller çözüme ulaşıncaya kadar O-D üretimi ve trafik ataması arasında iterasyon yapılır.

Küçük bir ulaşım ağında yapılan testleri esas alan Nguyen, kullanıcı denge prensiplerini kullanarak yol ağına trafik ataması yapıldığında, kendi modeli ile ürettiği yolculuk matrisinin, gözlemlerle elde edilmiş yolculuk matrisi ile hemen hemen aynı olduğunu iddia etmektedir. Bu yaklaşımın en önemli dezavantajı çoklu O-D çözümlerinin olabildiği yerlerde benzer trafik eşleşmelerini tekrar üretebilmesidir. Bu yüzden, bir dağıtım tahmini için alternatif çözümlerden en olası yolculuk matrisi elde edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Doğrusal Programlama Modeli, yol ağı üzerindeki tüm bağlar için özel bir hacim bilgisine ihtiyaç duyan kısıta sahiptir. Ancak eksiksiz veri her zaman elde edilemeyebilir. Sonuç olarak, Narayanan (1995) tarafından ortaya konulan “mevcut yol hacim bilgilerinin bir kısmını kullanarak yolculuk matrisi üretme” konusunda daha ileri çalışmalar yapılmıştır.

2.2.4 İstatistiksel Modeller

Bu modellerde, yolculuk matrisi istatistiksel teknikler ve geçmişe ait bilgiler kullanılarak tahmin edilmeye çalışılır ve Bayes tahmin yöntemleri ya da en küçük kareler gibi farklı teknikler kullanılarak sonuca ulaşılır.

Maksimum entropi ya da minimum bilgi teknikleri, geçmiş çalışmalardan elde edilmiş bilgilerden belirli bir güven derecesinde sonuç vermektedir.

Genel anlamda trafik sayımlarını esas alan tüm modeller, bağ akımlarına en uygun O-D matrisini bulur. Burada yakalanacak mükemmel uygunluk, sayımlarla bulunan trafik akımı hacim değerlerindeki hataların dağıtılması ile ilgili tahminlere bağlıdır. İstatistiksel modeller, bu dezavantajı yok etmeye çalışırlar. En küçük kareler yaklaşımı kategorisi içinde Mc Neill, Hendrickson (1985) ve Cascetta (1984) tarafından alternatif modeller ortaya konmuştur. Bu modellerin esas avantajı verilerin stokastik doğal yapısını dikkate almasıdır, ama buna karşın en olası yolculuk üretimi gerçeğini de yok saymaktadır.

2.2.5 Sinir Ağı Modelleri

Muller ve Reinhardt (1996) trafik sayımlarından O-D matrisi tahmin etmek için sinir ağı yaklaşımını ileri sürmüşlerdir. Chin ve arkadaşları (1994), trafik hacim değerlerinden O-D bilgisine ulaşmak için kendine has bir sinir ağı modeli açıklamışlardır.

Sinir ağı modelleri, henüz geniş kapsamlı denenmediğinden, trafik akım verilerini kullanarak doğrudan sonuç alabilecek modeller arasında değildir. Bu modellerin daha hassas ve yeni testlerle değerlendirilmesi tavsiye edilmektedir.

2.2.6 Bulanık Mantık

O-D matrisi tahmini için son zamanlarda kullanılan diğer bir yaklaşım da, bulanık mantık modelleridir. Çoğu modelde olduğu gibi hepsi ya da hiçbiri yaklaşımı yerine bulanık mantık yaklaşımında trafik verileri için bazı net olmayan (bulanık) bilgiler uygulanır, öyle ki belirsizlik sistemin içine katılır. Bu modelin Amerika Birleşik Devletleri'nde Doğu Otoyol Koridoru ağında test edildiği ve iyi sonuçlar elde edildiği bilinmektedir. Konu ile ilgili uzmanlar daha fazla test ve kontrollü deney desteği ile değerlendirme yapılmasını tavsiye etmektedir.

2.2.7 Değerlendirme

Yolculuk matrisi elde etmeye yönelik yukarıda bahsedilen altı model için çeşitli çözüm algoritmaları kullanılmıştır. Bu çözüm algoritmaları için genel bir değerlendirme aşağıda yer almaktadır.

O-D Matrisi elde etmek için, doğrusal parametrelili kalibrasyon modelleri, çözümde çoklu doğrusal regresyon yöntemini kullanırken doğrusal olmayan kalibrasyon modelleri ise doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemini kullanırlar. Dengeleme modellerinde hata veren LINK O-D modeli, problemi çözmek için Frank-Wolfe algoritmasını kullanır.

Maksimum entropi modeli ve doğrusal programlama (LP) modelleri, verilmiş olan problemi çözen kendilerine ait özel bilgisayar yazılımlarına sahiptirler.

İstatistiksel modellerde ise O-D tahmin için genellikle “en küçük kareler” yöntemi kullanılmaktadır.

Araştırmaların çoğunda problem yapay O-D modelinin üzerinde odaklanmıştır. Ancak bu araştırmalarda genellikle uygulanan çözüm algoritması gösterilmemiştir.

Trafik sayımlarından O-D matrisi elde etmeye yönelik çeşitli yaklaşımları içeren bu araştırma, problemin ne denli karmaşık olduğunun bir göstergesidir. Her bir yöntem kendi içinde avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bahsedilen model yaklaşımları içinde Gravity (çekim) modelinde O-D matrisine ulaşmak için, trafik sayımları dışında sosyo-ekonomik verilere de ihtiyaç duyulmasından ve çalışma bölgesinin zonlara ayrılmasında güçlüklerle karşılaşılmasından dolayı, klasik anket yöntemlerine göre pek avantajlı olmadığı görülmektedir. Dengeleme modellerinde ise trafik akımı – maliyet ilişkisinin bilinmesine gerek duyulduğundan çok sayıda başlangıç – bitiş noktası olması durumunda etkinliğini yitirmektedir. Entropi

modellerinin veri olarak sadece yol kesitlerine ait trafik bilgilerine ihtiyaç duyması ve çözüm algoritmasının çeşitli büyüklükteki yol ağları üzerinde uygulanabilir olması nedeniyle trafik sayımlarını kullanarak O-D matrisi elde edilmesi konusunda daha avantajlı olduğu görülmektedir. Minimum bilgi veya maksimum entropi teknikleri, trafik sayımlarına dayalı O-D matrisi elde etmek için en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Ayrıca bu tekniklerin içine akım yoğunluğu gibi kısıtların da yüklenebilmesi, hala daha sık ve geniş oranda kullanılmalarında etkilidir.

2.3 O-D Matrisi Tahminine Ait Problem Detayları

Bir trafik probleminin çözümü için kullanılan trafik mühendisliği ve ulaşım planlama kararlarının en önemli ve en hassas noktası, O-D matrisini doğru elde edecek yöntemin tayin edilmesidir. O-D matrisinin elde edilmesine yönelik problemler, hangi faktörün daha önemli olduğunun dikkate alınması ve eksik parametrelerin sonradan elde edilmesi gibi farklı detaylara bağlıdır. “Sayısal Çözümleme Detayları” bölümünde, bu türdeki tüm problemlere ayrıntılı olarak bakılarak, çeşitli problem çözümlerinin belirtilmesi ve sayısal çözüm yöntemlerinin değerlendirilmesi konusuna ağırlık verilmiştir. Burada amaç, genel olarak yapılan yaklaşımları değerlendirirken, izlenen yollarda mantıklı kararlar alınabilmesi için hangi tekniğin kullanılacağı konusunda genel bir yorumda bulunmaktır.

Önerilen hesaplama tekniklerinin birincisi, O-D matrisinin statik olarak hesaplanarak, gözlem yapılan zaman aralığında uygulama yapılması ve dinamik zaman periyotlarında gerekli bağlantı serilerinin hesaplanması şeklindedir. İkinci hesap tekniğinde ise, girdi bilgisi olarak yolculuk son noktalarındaki sayıların büyüklüğünü, hacim bilgisini, esas alan veya kullanılan bağlar üzerindeki her güzergah için düğüm noktalarındaki toplam yolculuk sayısını esas alan bir yaklaşım uygulanmaktadır. Tanımlanan ilk problem genellikle tahminler gerektiren yolculuk dağılımını kapsarken, ikinci problem yapay O-D matrisi üretim problemini kapsamaktadır. Bu iki tip probleme ait uygulamalar arasında her şeyden önce yapay O-D matrisinin üretilmesi problemi ilgi toplamaktadır. Aslında ilk problem, ikinci problemin daha basit bir halidir.

Statik yapay O-D üretimi problemlerinin içinde iki önemli durum tanımlanmıştır. Birincisi, çalışılan bağdan geçen araçların rotalarının bilinmesi ve öncelikli olarak değerlendirilmesidir. İkincisi ise, O-D matrisi hesaplanırken rotaların tesadüfi olarak ortaya çıkmasıdır. Her O-D çifti arasında sadece bir rota olduğunda veya ölçülen trafik değerleri yol ağında başlangıç ve bitişler arasında denklik sağlandığında otomatik ve dolaylı olarak rotalar için yeni bilgiler

ortaya çıkar. O-D matrisinde tek kesişimler, ana merkezler, tek yer değiştirmeler olduğunda veya otoyollar için hesaplamalar yapılmak istenildiğinde birinci durumun söz konusu olacağı açıkça görölmektedir. İkinci durumda ise herhangi bir yolculuk dağılım analizine uyulmamakta, rota bilgisi tamamen elde edilen O-D matrisinden alınmaktadır. Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için, konu ile ilgili araştırma yapan araştırmacılar, rotaların bilindiği durumların dikkate alınmasının daha uygun olacağı ileri sürölmektedirler. Bunun yanı sıra rotalar öncelikli olarak dikkate alındığı zaman iteratif çözüm yöntemlerinin kullanılması gerekecektir.

Statik, yapay O-D yaratım problemlerinin içinde, rotaların bilindiği senaryolarda, iki adet alt problem tanımlanmıştır. Bunların ilki, yol ağındaki her düğümde akım sürekliliğinin olduğu ve çeşitli O-D matrislerinin, yaklaşık olarak trafik sayımı yapılan akımlarla uyumlu olduğu durumlardır. Bu durumda çeşitli O-D matrislerinden en olası matrisin belirlenmesi gerekecektir. İkinci problem ise yol ağında veya düğümlerde akım sürekliliğinin olmadığı durumları içermektedir. Diğer bir deyişle gözlemlerle elde edilen trafik akımı hacim değerlerinin, O-D matrisi sonuçları ile çelişkili olması durumudur. Böyle bir durumda, akım sürekliliğinin elde edilmesini sağlayacak diğer tamamlayıcı bağlara ait trafik akım değerlerine ihtiyaç duyulur. Tamamlayıcı akımlar da dikkate alındığında akım sürekliliği gerektiren teknikler kullanılmadan önce maksimum olasılık problemi çözülebilir.

Senaryoda akım sürekliliğinin olduğu statik yapay O-D problemleri iki farklı yolla formüle edilmektedirler. Bunların birincisi; bireysel yolculuklara ait sayım değerlerinin esas olarak hesaba katılması iken, ikincisinde ise özel bir bağda yalnızca araçlara ait sayım değerlerinin esas olarak değerlendirmeye katılmasıdır. Başlangıç ya da hedef O-D matrisinin kullanılabilirliği ikinci tip modelde kesindir, fakat ilk modelde yetersiz kalabilmektedir. Bununla birlikte sonraki bölümde göröleceği gibi kullanılan başlangıç matrisi tam anlamıyla ilk model ile uyumlu olduğunda, geliştirilmiş sonraki modellerden de tutarlı sonuçlar elde etmek mümkün olacaktır. Başka bir deyişle yolculuk tabanlı modelde, başlangıç matrisinin eksikliği sonuçlarda tutarsızlık olarak görölecek, en azından olası çoklu çözümlere sahip yol ağlarında daha farklı bir yolculuk sayısı gerektirecektir.

Yolculuk ile ilgili maksimum olasılık formölünün içinde yol ağındaki toplam yolculukların amaç fonksiyonunda yeri olacaktır. Bu terim "T" olarak adlandırılır ve bu "T" yolculuk değeri ile ilgili bazı yaklaşımlarda bulunulmuştur. Bununla birlikte doğru sonucu bulma yolunda bu terimin çok küçük katkısının olacağı beşinci bölümde yer alan örnek uygulamada görölecektir. Uygulamada yaşanan zorluk, faktöriyelli terimlerin logaritmasının

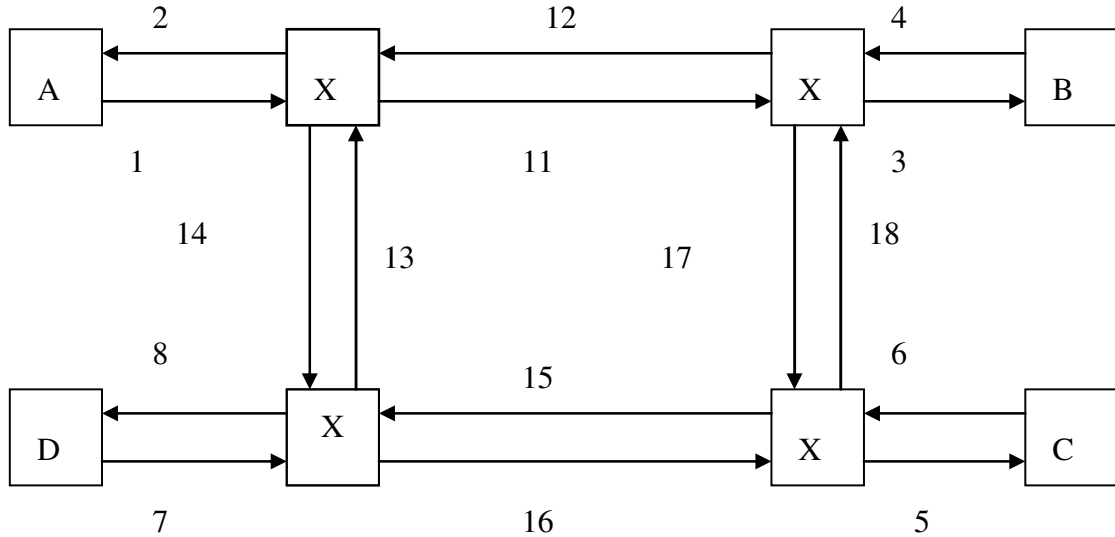
alınmasındadır. Bu değerlerin gösterilmesi için Stirling' in yaklaşımı kullanılmaktadır. Buradaki sonuçlar kritiktir. Çünkü problemi çözmek için alınması gereken türevler Stirling yaklaşımında kritik öneme sahiptir. (Faktöriyelli terimler içeren eşitliklerin türevlerinin alınması zordur.)

Önce Stirling yaklaşımı uygulandıktan sonra, Willumsen tarafından geçmişte yapılmış başka bir yaklaşım kullanılarak bu yapay O-D problemi doğrusal bir regresyon problemine dönüştürülmüştür. Fakat bu yaklaşımlar, sonuç çözümleri daha kolay elde etmeyi sağlarken, doğruluk derecesini de azaltmaktadır.

İleriki bölümlerde O-D matrisi tahmin probleminin çeşitli türleri, özellikleri tartışılacak ve sonuç O-D matrisi tahmini için yaklaşımların doğruluğu incelenecektir.

2.4 Yolculuk Dağılımı ve Yapay O-D Yaratımı

Yapay (sentetik) O-D matrisi üretimini daha iyi anlayabilmek amacıyla şekil 2.1'de görülen yol ağı değerlendirilmiştir. Bu şekil, 4 bölgeden (A,B,C,D) ve 16 bağdan oluşacak şekilde hazırlanmıştır. 1, 3, 5, 7 no' lu bağlar her bölgeden çıkış yapan bağları temsil ederken, 2, 4, 6, 8 no' lu bağlar ise bu bölgelere girenleri temsil eder. Bundan başka 11, 13, 15, 17 no'lu bağlar ağ çevresinde saat yönünde akışı sağlarken 12, 14, 16, 18 no'lu bağlar saat yönüne ters hareketi temsil etmektedir.



Şekil 2.1 16 Bağlı yol ağı. *

* Fundamental Properties of Synthetic O-D Generation Formulations and Solutions, (1999), H. Paramahamsan

Eğer yukarıdaki problem yolculuk dağılım problemi olarak kabul edilirse, sadece 1'den 8' e kadar olan hatlar kullanılabilir olacaktır. Özellikle 1, 3, 5, 7 no'lu bağlar zonlara ait yolculuk üretimini; 2, 4, 6 ve 8 no'lu bağlar ise zonların yolculuk çekimlerini temsil ediyorlar. Diğer bir deyişle, içinde normal yolculuk dağılımı yapılacak ağlarda 11'den 18'e kadar olan bağlar değerlendirilmez. Herhangi bir yöndeki herhangi bir akımın değerlendirilmemesinin eksikliği, A' dan D' ye trafiğin bilinmesini önemsiz hale getirir. Yapay O-D üretim işi ve yolculuk dağılımı işi Çizelge 2.1'de iyi bir şekilde örneklerle açıklanmıştır. Zonlar arası bağlantı yollarının asıl caddelere veya cadde gruplarına göre kukla bağ varsayıldığına dikkat edilmelidir. Bu yüzden, bunlar yapay O-D yaratımı sürecinin girdileri içinde yer alamazlar. Fakat, eğer bu zonlar çok iyi tanımlanmış olarak bölünürlerse (ticari veya endüstriyel parklar, alışveriş merkezleri gibi zonlara ayrılırlarsa) zonlar arasındaki bağlar, gerçek ve fiziksel yolları temsil edebilirler ve yapay O-D yaratım sürecinin içinde yer alırlar.

Çizelge 2.1 Yapay O-D sürecinin ve yolculuk dağılımının tamamlayıcı özellikleri.*

Bağ no	Hat tipi	Bütün Akım Bilgisi	Yolculuk Dağılımında Kullanılan Bilgi	Yapay O-D Üretiminde Kullanılan Bilgi
1	Bölgelerarası Bağlayıcı Yol	100	100	-
2	Bölgelerarası Bağlayıcı Yol	200	200	-
3	Bölgelerarası Bağlayıcı Yol	200	200	-
4	Bölgelerarası Bağlayıcı Yol	200	200	-
5	Bölgelerarası Bağlayıcı Yol	300	300	-
6	Bölgelerarası Bağlayıcı Yol	300	300	-
7	Bölgelerarası Bağlayıcı Yol	400	400	-
8	Bölgelerarası Bağlayıcı Yol	300	300	-
11	O-D Güzergahı Ara Bağı	35	-	35
12	O-D Güzergahı Ara Bağı	61	-	61
13	O-D Güzergahı Ara Bağı	139	-	139
14	O-D Güzergahı Ara Bağı	65	-	65
15	O-D Güzergahı Ara Bağı	269	-	269
16	O-D Güzergahı Ara Bağı	296	-	296
17	O-D Güzergahı Ara Bağı	80	-	80
18	O-D Güzergahı Ara Bağı	165	-	165

* Fundamental Properties of Synthetic O-D Generation Formulations and Solutions, (1999), H. Paramahamsan Yüksek lisans tezinden alınmıştır.

Benzer şekilde, yolculuk dağılımı için yapılacak değerlendirmede, yolculuk üretim ve çekim oranları sayım verileri kullanılarak elde edilemez, ancak yolculuk yaratım eşitliklerine dayanan alan kullanımlarından tahmin edilir. Örnek tahminler çoğunlukla 24 saatlik veya zirve saatler içindedir. Oysa şu anda, yolculuk tahminleri 15 dakikalık periyotlar ile elde edilemez, 15 dk'lık toplamlarla elde edilmiş O-D matrisini kullanarak yolculuk dağılımının da elde edilmesi neredeyse imkansızdır. Tabii ki bazı plancılar, sayımlarından 15 dk'lık matrisler elde etmek için 24 saatlik veya zirve saat periyodu matrisleri üretirler. Bununla birlikte eğer böyle bir geçici çalışma yapılırsa, mevcut yolculuk dağılımı matrisini bir kaynak matris olarak düzenlemek daha iyi bir yaklaşım olabilir ve daha sonra bu veriler yapay O-D yaratım matrisinde sistematik bir şekilde kullanılabilir. 16 bağlı yol ağı için yolculuk dağılımı ve yapay O-D yaratım matrisi arasındaki ilişki çizelge 2.2' de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Yolculuk dağılımı ve yapay O-D yaratımı karşılaştırması.*

Yolculuk Dağılımı

	A	B	C	D
A	0,00	34,95	11,71	53,34
B	60,63	0,00	79,77	59,60
C	22,93	90,04	0,00	187,04
D	116,45	75,00	208,54	0,00

Yapay O-D Üretimi

	A	B	C	D
A	0,00	34,75	13,76	57,15
B	59,78	0,00	82,54	54,89
C	25,17	92,71	0,00	184,89
D	118,74	70,75	207,26	0,00

* Harinarayan, P., (1999) "Fundamental Properties of Synthetic O-D Generation Formulations and Solutions", Master of Science Thesis in Civil and Environmental Engineering, başlıklı tez çalışmasından alınmıştır.

2.5 Çeşitli Çözümler

Yapay O-D matrisi yaratımında yolculuk dağılımı süreci eldeki belirli bilgilere bağlıdır. Örneğin, eğer ölçülmüş değerlerle 100 zon ve zonlar arası 1000 bağlantı olan bir bölge için O-D matrisi hesaplanmak istenirse burada bağlantılardan her birine ait birçok bilinmeyen ve birçok kısıt olacaktır. Bu durumda yolculuk dağılımı işi için 100x100 adet O-D hücresi hesaplanmakta ve bunlardan sadece 2x100 yolculuk kısıtlıdır. Yapay O-D yaratım işinde ise yine 100x100 adet O-D hücresi hesaplanmakta ve sadece 1000 bağlantı kısıtlıdır. Çeşitli çözümlerin olabilirliklerinin bulunması amacıyla yolculuk dağılımı ve yapay O-D yaratımı sürecinde, mevcut çeşitli çözümler içinden en uygun matrisi seçmek için ek değerlendirme yapılması gerekeceği belirtilmektedir.

Yapay O-D yaratımı durumunda amaç, tüm olası çözümler arasında en uygun O-D matrisini seçmektir. Fakat bu amaca ulaşmak için her matrisin olasılığının hesaplanması gerekmektedir.

Genellikle matrisin olasılığını doğrulamak için iki yaklaşım vardır. Bunlardan biri trafik sayım değerlerini incelemenin temeli olarak ele alırken, diğeri yolculuk sayılarını incelemenin temel elemanı olarak kabul etmektedir. Her iki yaklaşımdan da detaylı olarak ileride bahsedilecektir, fakat şimdi her matris hücresi için $L = F(t_{ij}, T_{ij})$, burada “ t_{ij} ” eski yolculuk bilgisini temsil etmektedir, fonksiyonunu kullanarak matrisin olabilirliğinin hesaplanabileceğini belirtmek yeterlidir. Bu eski bilgi, genellikle başlangıç (kaynak) matrisi ile ilgilidir ve her iki yöntemle yapılmış önceki çalışmalardan veya farklı incelemelerden elde edilmektedir. Bu tür önceki bilginin eksikliğinde bunun yerine her hücresi düzenli ve üniform bir şekilde hazırlanan O-D matrisi kullanılmaktadır.

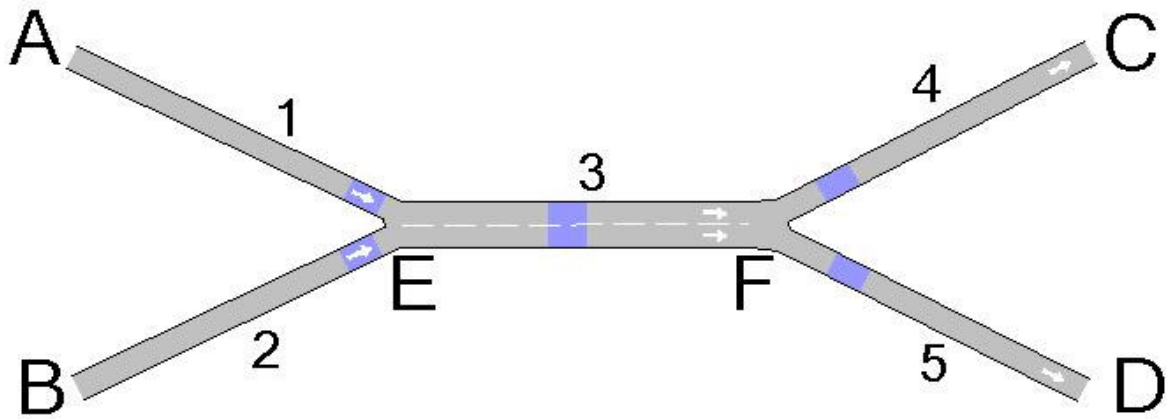
Yolculuk dağılımı sürecinde modele eklenen ek bilgiler bazı kısıt ve engellerin açıklanması amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin orijinal çekim modelinin olasılığı iki zon arasındaki uzaklığın karesi ile ters orantılıdır. Bu zamana kadar uzmanlarca bu konuda bir çok karmaşık yapıda modeller değerlendirilmiştir, fakat burada amaç mevcut tüm değişkenlerin “ f_{ij} ” formunda genelleştirilmek istenmesidir. Burada $f_{ij} = f(c_{ij})$, farklı zonlar arasındaki yolculukların genelleştirilmiş ücret fonksiyonudur. Şu anda açıkça anlaşılmasına karşın bu direnç faktörlerinin (f_{ij}) hazırlanmasının amacı aslında ileride açıklanacağı gibi başlangıç matrisi t_{ij} 'nin kullanılabilirliğini sağlamaya yöneliktir.

Yolculuk dağılımı problemini çözerken, bölgesel yolculuk üretim ve çekim değerleri ile birlikte yolculuk direnç matrisini kısıt olarak kullanmak, yapay O-D üretim matrisini oluştururken bölgelere ait bağlantılardaki giriş çıkış akım değerlerini ve $t_{ij} = T \times f_{ij} / \sum f_{ij}$

başlangıç matrisini kısıt olarak kullanmaya benzerdir. Bu benzerlik bir çok trafik mühendisini ve planlamacıyı cesaretlendirmiştir. Öncelikle pek çok plancı, çok uzun bir geçmişi olan ve zor sorularla kurulabilen O-D tahmin matrisini yolculuk dağılımı sürecinde izlemişlerdir. Burada bilinen en büyük zorluk yapay O-D yaratımının daha az bilinmesi ve kullanılan tekniklere ait detayların anlaşılır olmamasıdır. Yukarıdaki benzerlik görüldükten sonra artık planlılar, yapay olarak elde edilen O-D matrisinin geçerliliğini sorgulamaktan daha çok klasik yolculuk dağılımı sürecinden tahmin edilen O-D matrisinin geçerliliğini sorgulamaktadırlar. İkinci olarak ise artık planlıların, özellikle yolculuk dağılımı uygulamasından türetilen O-D matrisini başlangıç matrisi olarak kullandıklarında, yapay O-D yaratım sürecinde güzergah üzerinde yer alan bağlara ait ek bilgilerin de kullanılmasının sonuç matrisini daha doğru yapacağını kabul ettikleri bilinmektedir.

2.6 Yolculuk Sayıları Tabanlı O-D Matrisleri İçin Maksimum Olasılık

Şekil 2.2, iki başlangıç bölgesinin iki bitiş bölgesine bağlantısını göstermektedir. Bazı bağlar sadece iki O-D çifti için bağlantıyı oluştururken (1,2,4,5 no'lu bağlar), 3 no'lu bağ tüm O-D çiftlerini taşımaktadır. Eğer çizelge 2.3' ten ölçülen bağ akımları değerlendirilirse , şu söylenebilir ki bu yol ağında birbirinden farklı matrisler oluşturulabilir ve ölçülen akımların yerine kullanılabilir. Çizelge 2.4' ten görüleceği gibi, eğer A' dan C' ye yolculuk sayıları x ise diğer yolculuk sayıları bütün O-D çiftleri arasında otomatik olarak bulunabilir.



Şekil 2.2 Beş bağılı yol ağı.*

Maksimum olasılık yaklaşımında, yapay O-D matrisini seçmek için, hangi matrisin en olası olduğu değerlendirilirken bütün mantıklı çözümlerin iyice düşünülmesi gerektiği de

* Şekil Aimsun NG 5.0 mikrosimülasyon programında çizilmiştir.

unutulmamalıdır. Maksimum olasılığı tanımlamak için kullanılan yolculuk tabanlı yaklaşım, sayısı az olan yolculuklar için yapılan tüm matrisleri incelemektedir. Bu durumda şekil 2.2 ve çizelge 2.5 deki matris, burada toplam 100 adet yolculuk olduğunu gösterir.

Çizelge 2.3 Gözlemlenmiş bağ akım değerleri.

Hat No.	Gözlemlenmiş Hacim
1	40
2	60
3	100
4	70
5	30

Çizelge 2.4 Genel matris

	C	D	Sum
A	X	40 - X	40
B	70 - X	X - 10	60
Toplam	70	30	100

Çizelge 2.5 Potansiyel matris

	C	D	Sum
A	20	20	40
B	50	10	60
Toplam	70	30	100

100 kişilik bir toplulukta, A' dan C' ye 20 yolculuk olduğunu düşünülürse burada 20 yolculuk için $(100! / 20! 80!)$ tane çözüm olurken, kalan 80 yolculuğun 20 tanesinin A' dan D' ye olduğunu düşünürsek bu işi yapmak için $80! / (20! 60!)$ adet farklı çözüm olacaktır. Benzer

şekilde B' den C' ye $60! / (10! \times 50!)$ adet farklı yolculuk olacağı gibi B' den D' ye $10! / (10! \times 0!)$ tane seçilebilecek yolculuk olur. Bazı basitleştirmelerden sonra toplamda $100! / (20! \times 20! \times 50! \times 10!)$ tane matris içinden yaratılabilecek 20, 20, 50 ve 10 değerli basit bir yolculuk matrisi olur. Genellikle bu sayı $T! / (\prod T_{ij}!)$ şeklindedir. Şekil 2.2, çizelge 2.4 ' de tanımlanan tüm matrislerin birleştirilmiş olasılığını gösterir

Bu şekilden çok açık görülüyor ki x: 28 en çok olabilirliği olan matristir. Bu ağ için tüm olası çözümlerin olası sonucu çizelge 2.6' da verilmiştir

$$Z(T_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} (T_{ij}!)} \quad (2.23)$$

Üstteki model, geçmişte yapılmış çalışmalardan elde edilen bazı eski bilgileri hesaba katmaz. Eğer geçmişteki çalışmalar trafiğin bir fraksiyonunu gösteriyorsa, çizelge 2.7' deki gibi bir trafik fraksiyon matrisi hazırlanarak, başlangıç matrisi çizelge 2.8 deki gibi kurulur. Eğer bu başlangıç matrisi ölçülen bağ değerlerini açık şekilde göstermiyorsa, bu başlangıç matrisi eşitlik 2.24' de gösterdiği gibi maksimum olasılık fonksiyonuna göre genişletilebilir.

Çizelge 2.6 Beş bağlı yol ağı için olası çözümler.

Talep Senaryosu	T_{AC}	T_{AD}	T_{BC}	T_{BD}
0	10	30	60	0
1	11	29	59	1
2	12	28	58	2
3	13	27	57	3
4	14	26	56	4
5	15	25	55	5
6	16	24	54	6
7	17	23	53	7
8	18	22	52	8

9	19	21	51	9
10	20	20	50	10
11	21	19	49	11
12	22	18	48	12
13	23	17	47	13
14	24	16	46	14
15	25	15	45	15
16	26	14	44	16
17	27	13	43	17
18	28	12	42	18
19	29	11	41	19
20	30	10	40	20
21	31	9	39	21
22	32	8	38	22
23	33	7	37	23
24	34	6	36	24
25	35	5	35	25
26	36	4	34	26
27	37	3	33	27
28	38	2	32	28
29	39	1	31	29
30	40	0	30	30

Çizelge 2.7 Önceki anketlerden tahmin edilen trafik fraksiyon matrisi.

	C	D
A	0.1	0.2
B	0.3	0.4

Çizelge 2.8 Çizelge 2.7’deki trafik değerlerine göre kaynak matrisi.

	C	D
A	10	20
B	30	40

Burada söylenebilir ki i’ den j’ ye bireysel yolculuğun olasılığı; $t_{ij}/(\sum t_{ij})$ üstteki başlangıç matrisine bağlıdır. Bu nedenle “ T_{ij} ” yolculuğunun olasılığı $(t_{ij}/\sum t_{ij})T$ olarak yazılır. Şekil 2.4’ te görüleceği gibi üstteki üniform olmayan başlangıç matrisi sonuçlarının farklı matris olarak kullanımı, en olası O-D matrisini tanımlamakta etkileyici olacaktır. Buna zıt olarak, şekil 2.2’deki ağda düzenli bir başlangıç matrisi kullanıldığında güçlü bir etki görülmez. Bununla birlikte ileride gösterileceği gibi kesin ağ tipleri için bu özellik genelleştirilemez. Bu sebepten dolayı başlangıç matrisi kullanılması doğru kabul edilmiştir.

$$Maksimum : Z(T_{ij}, t_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} (T_{ij})!} \prod_{ij} \left[\frac{t_{ij}}{\sum_{ij} t_{ij}} \right]^{T_{ij}} \quad (2.24)$$

2.7 Trafik Hacim Değerleri Tabanlı Maksimum Olasılık

Alternatif bir maksimum olasılık modeli, ölçülen değerlerin en basit birimi olan trafik hacim değerlerini inceler. Şekil 2.2’deki gibi 5 bağlı yol ağı için örneğin 300 tane gözlenen değer olsun (30+70+100+40+60). Çizelge 2.7’de de görüldüğü gibi potansiyel çözüm matrisi incelenirse eşitlik 2.25’de gösterildiği gibi 300 yolculuk için çözüm sayısı bulunur. Eğer 40 yolculuk bir bağın değeri ise ve T_{AC} ve T_{AD} bağları doğrudan geçen yolculuklar ise bundan sonraki 30 yolculukta T_{AC} ve T_{AD} arasında bölünmüşse bu durum için grup sayısı $40! / (T_{AC}! \times T_{AD}!)$ olarak bulunur. Bu nedenle T_{ij} yolculuklarının olasılığı $(t_{ij} / (\sum t_{ij}))^{T_{ij}}$ olarak yazılır.

Eğer bu olasılık tüm bağlar için hesaplanırsa, bunların sonuçları eşitlik 2.25' deki olasılığı verir. Bu model aynı zamanda bölüm 3' de tartışılacak olan minimum bilgi teorisine dayalı olarak da türetilmektedir.

$$Maksimum : Z(T_{ij}, t_{ij}) = \prod_a \frac{V_a!}{\prod_{ij} (T_{ij} P_{ij}^a)!} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij} P_{ij}^a}{V_a} \right)^{T_{ij} P_{ij}^a} \quad (2.25)$$

Eşitlik 2.25, farklı bir yapıya sahip olmasına rağmen şekil 2.2' deki ağ için örnek gösterilebilir. Bu amaç fonksiyonu da önceki yolculuk tabanlı model (eşitlik 2.23) gibi en olası O-D matrisini tanımlar. Özellikle bazı durumlarda bu genel bir çözüm değildir. Trafik hacim değerleri tabanlı modeller ile belirgin bir farklılık taşımayan yolculuk tabanlı modellerde süreklilik sadece eşitlik 2.24 ile sağlanabilmektedir. Bölüm 3' te farklı modeller üzerinde daha detaylı açıklama yapılacaktır.

2.8 Akım Sürekliliğinin Varlığı

Olasılığı anlatan yukarıdaki modellere ait amaç fonksiyonlarının tamamlanabilmesi için ek kısıtlara ihtiyaç duyulur. Bu kısıtların en basiti, verilen bağdan geçen yolculukların toplamının bu bağdaki akım değerine eşit olacağıdır (eşitlik 2,26). İleride görüleceği gibi, yukarıdaki kısıtlar önceki amaç fonksiyonlarını da içeren ve Lagrange çarpanını kullanmak için en basit sistemdir. Bu çarpanlar eşitlik kısıtları içeren amaç fonksiyonunun, eşdeğer kısıtsız amaç fonksiyonuna dönüşmesini sağlar.

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \quad \forall a \quad (2.26)$$

Modelin tamamlanmasında basit eşitlik kısıtlarının hazırlanması problemi uygunluk sınırlarının dışına taşır. Örneğin şekil 2.2' deki ağı değerlendirirsek buradaki gözlenmiş akımlar 30, 70, 100, 40 ve 60 dır. Eğer düğümlerde akım sürekliliği yoksa, ölçülen bağ akımları ile eşleşebilen hazırlanmış bir O-D matrisi yoktur. Bu yüzden kısıtlı veya eşdeğer kısıtsız optimizasyon durumunda her iki amaç fonksiyonunda uygun çözüm alanı yoktur. Tercihen tamamen yok saymak yerine daha genel bir model, bağ akımlarındaki hataları minimize etmek için kullanılmaktadır. Başka bir deyişle tüm ölçülmüş bağ hacim değerleri için en olası O-D matrisini bulmaktansa bağ akımları ile tam uyuşanlar için en olası O-D matrisi bulunması şeklinde yeniden formüle edilir.

Bir başka anlatım şekli ile, O-D matrisinin elde edilmesi, eşitlik 2.27 'deki hataların minimize edilmesini sağlamak ve eşitlik 2.28'deki akım sürekliliği kısıtını sağlamaktır. Eşitlik 2.28'deki kısıtlar, kısıtlanmamış bir amaç fonksiyonu için hazırlanan tamamlayıcı bağ hacim değerleri (V_a') kullanılarak eşitlik 2.27' ye dahil edilebilir. Bu tamamlayıcı akımlar, kabul edilebilir seviyede akım sürekliliğini sağladıklarında ölçülen bağ akımlarından ayrılırlar. Bu tamamlayıcı bağ hacim değerleri, akım sürekliliği güvenilir düzeye eriştiğinde, amaç fonksiyonuna eşitlik kısıtı olarak eklenerek uygun çözüme ulaşılır

$$\text{Maksimum } Z(T_{ij}) = \sum_a (V_a - V_a')^2 \quad (2.27)$$

Bu amaç fonksiyonunda;

V_a : Gözlem yapılan "n" bağına ait güncel trafik hacim değeri,

V_a' : V_a ile uyumlu ve akım sürekliliğini sağlayan hacim değerleri.

$$V_a' = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \quad \forall a \quad (2.28)$$

Alternatif olarak eşitlik 2.28'den alınan terimler, eşitlik 2.27'de yerine konulabilir. Eşitlik 2.29'da gösterilen bu yeni ifade, eşitlik 2.23 ve 2.24'deki maksimumu aranan amaç fonksiyonunun minimize edilmiş halidir.

Ancak bu ifadeleri birleştirmek kolay değildir, çünkü olasılık ençoklanırken diğer bir yandan bağdaki akım hatasının minimum olması istenir. Langrange ise kısıtlanmış amaç fonksiyonuna sadece eşitlik kısıtı katabilir.

Bu problemin bir çözümü, O-D matrisine ait her bir hücrenin değerine uygun şekilde eşitlik 2.29'un kısmi türevini alınarak yapılır. Eşitlik 2.30'daki sonuçlar bir çok yolculuk hücresinin eşitliğidir. Bunun dışında, bu türevleri sıfıra eşitlemek, eşitlik 2.29 'u minimum yapmak demektir. Fakat eşitlik 2.29 maksimum olasılık fonksiyonuna eklenmezken, eşitlik 2.30 eklenebilir. Bu gösteriyor ki kısıtlanmamış bir amaç fonksiyonu, eşitlik 2.31'deki gibi her zaman uygun bir çözüm sunar.

$$\text{Minimum} : Z(T_{ij}) = \sum_a \left[V_a - \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \right]^2 \quad \forall a \quad (2.29)$$

$$0 = 2 \left[\sum_a (V_a \cdot P_{ij}^a) - \left[\sum_a P_{ij}^a \left[\sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \right] \right] \right] \quad \forall i, j \quad (2.30)$$

$$L \equiv \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}} \prod_{ij} \left[\frac{t_{ij}}{t} \right]^{T_{ij}} - \sum_{ij} \left[\lambda_{ij} \cdot 2 \left[\sum_a (V_a \cdot P_{ij}^a) - \left[P_{ij}^a \sum_a \left[\sum_{ij} T_{ij} \cdot P_{ij}^a \right] \right] \right] \right] \quad \forall i, j \quad (2.31)$$

Yukarıda verilen eşitlikler gösteriyor ki yapay O-D yaratımı problemlerinin içinde iki adet alt problem mevcuttur. Bunlardan biri, maksimum olasılık probleminin daha önce çözüldüğü noktada akım sürekliliğine izin veren yeni tamamlayıcı bağ akımlarının bulunmasını kapsar ve akım sürekliliğini sağlamak için kısmi türevler hesaplanır.

Bu kısmi türevler, Lagrange çarpanları kullanılarak doğrudan maksimum olasılık formülasyonu için kullanılabilir.

Eşitlik 2.31' i maksimum yaparken, en uygun çözümü bulmak için, sonuçlar içinde büyük önem taşıyanları tespit etmek genellikle zordur. Bundan başka, türevini alarak amaç fonksiyonunu maksimum yapmak gibi basit bir yaklaşım yapılırken, sürekliliği olmayan ifadelerin türevini almak oldukça zordur. Bu yaklaşımlar, eşitlik 2.23 ve 2.24'deki iki amaç fonksiyonunun da logaritmasının alınmasını kapsar. Çıktıları kolayca kontrol altına almak için amaç fonksiyonun logaritması alınır ve bu işlem, çözüm için Stirling yaklaşımının *kullanılabilir olmasını sağlayacaktır.

Eşitlik 2.32'de amaç fonksiyonunun (eşitlik 2.24'deki orijinal amaç fonksiyonunu temel almıştır) sadeleştirme sonuçlarını görüyoruz. Eşitlik 2.33, logaritmaya dönüştürülmüş amaç fonksiyonunun türevini göstermektedir. Bu logaritmaya dönüştürülmüş amaç fonksiyonunun türevi, önceden söz edilen kısmi türevler ile çoğaltıldığı zaman tüm matrisler içinde en olası O-D matrisini gösterecektir.

Yukarıda anlatılan doğrusal olmayan eşitlikler çeşitli sayısal analiz yazılım paketleri kullanılarak çözülebilir. Bununla birlikte daha geniş yol ağlarında eşitlikler ve bilinmeyenler bulunamaz hale gelecektir, bunun için özel bir eşitlik geliştirilmiştir ve QUEENS-OD olarak adlandırılmıştır. Bu özel eşitlik 2.24 veya 2.25'deki amaç fonksiyonlarını optimum hale getirir ve akım sürekliliği olmadığı zaman bağ akımlarındaki hatayı minimize etmeyi sağlar.

* Stirling yaklaşımı ek 1'de detaylı olarak anlatılmıştır.

Stirling'e ait olan bu yaklaşım, yapay O-D üretiminde hata oranını %1'den aşağıya indirmek için kullanılmaktadır, eşitlik 2.24 'in detaylı bir türevi 4. Bölümde verilecektir.

$$\maximize : Z(T_{ij}, t_{ij}) = \frac{T! \left(\sum_{ij} t_{ij} \right)^{-\sum T_{ij}}}{\prod_{ij} (T_{ij}!)} \prod_{ij} (t_{ij})^{T_{ij}} \quad (2.32)$$

$$0 = Ln(T) - Ln(t) - Ln(T_{ij}) + Ln(t_{ij}) \quad \forall i, j \quad (2.33)$$

$$0 = Ln(T) - Ln(t) - Ln(T_{ij}) + Ln(t_{ij}) -$$

$$\sum_{ij} \left(\lambda_{ij} \cdot 2 \left(\sum_a (V_a \cdot P_{ij}^a) - \left(\sum_a P_{ij}^a \left(\sum_{ij} T_{ij} \cdot P_{ij}^a \right) \right) \right) \right) \quad (2.34)$$

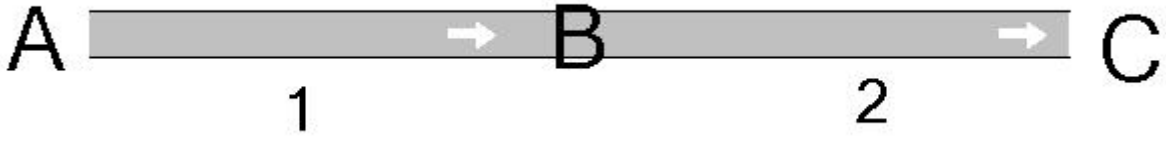
2.9 Diğer Yaklaşımlar

QUEENS-OD yazılımı, sadece Stirling'in yaklaşımını kullanarak amaç fonksiyonunun tamamını çözerken, diğer yazılım paketlerinin çoğunda daha farklı yaklaşımlar kullanılmıştır. Bunlara örnek olarak oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olan Willumsen yaklaşımı verilebilir. Bununla birlikte ileride anlatılacağı gibi farklı yaklaşımların denenmesi, O-D matrisi tahmininde yapılan önemli hataları ortaya çıkarmaya yardımcı olmaktadır.

En sık kullanılan yaklaşım olan Stirling'in yaklaşımı uygulandıktan sonra, ağdaki toplam yolculuk sayıları bir sabit olarak dikkate alınmış ve bu terimler optimizasyon eşitliğinden çıkarılmıştır. Bu yaklaşımın uygulandığı modele ait sonuç, eşitlik 2.35'de gösterilmiştir. Ancak Çizelge 2.9'da verilmiş bağ trafik hacim değerlerine sahip, toplam yolculuk sayısının bir sabit rakam olmadığı, üç düğüm noktası ve iki bağdan oluşan yol ağında (Şekil 2.3), "T" toplam yolculuk sayısı çözüm eşitliğinden çıkarıldığında, çok farklı bir optimum ya da en olası yolculuk matrisi ortaya çıkmaktadır.

$$Maksimum Z(T_{ij}, t_{ij}) = - \sum_{ij} \left(T_{ij} Ln \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right) \quad (2.35)$$

Çeşitli modellere ait detaylı eşitlikler sonraki bölümde verilmiştir.



Şekil 2.3 İki bağılı yol ağı.*

Çizelge 2.9 İki bağılı yol ağında bağ hacimleri.

Bağ No.	Hacim
1	10
2	15

2.10 Özet

Bu bölümde konunun uzmanları tarafından ortaya konmuş, trafik sayımlarına dayalı O-D matrisi tahmininde karşılaşılabilecek alternatif alt problemler için sonuçlar sunulmuştur. Bazı problemlerde akım sürekliliği olmaması durumu ve bu durumlar için çeşitli çözümler verilmiştir. Akım sürekliliği problemi genellikle akım sürekliliğini bozan eşdeğer akım değerini elde etmek için hataların dağıtılması ile çözülür.

Çoklu çözümlere sahip problemler ise, geçmişte yapılmış çalışmalardan alınan bir matris (başlangıç matrisi) kullanılarak çözülmektedir. Bu yöntem, hala çoklu çözüme sahip problemlerin tam karşılığı olamamakla birlikte en azından alternatif çözüm sayısını azaltmıştır.

İkinci bölümün genelinde, yolculuk dağılımı ve yapay O-D matrisi arasındaki benzerlikler sunulurken yolculuk sayılarına ve trafik sayım değerlerine göre ayrı ayrı maksimum olasılık konusu anlatılmıştır. Detaylı tanımlamalar ve bu bölümde bahsedilen çeşitli modellere ait örnek uygulamalar ilerideki bölümlerde sunulmuştur.

* Şekil Aimsun NG5.0 Mikrosimülasyon programında hazırlanmıştır.

3. O-D MATRİSİ ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

3.1 Giriş

Maksimum entropi ve minimum bilgi teknikleri ulaşım problemlerinin sayısal çözümünde kullanılmaya başlanmıştır (Wilson 1970). Statik O-D tahmin problemi için entropi en çoklaması (maksimizasyon) prensipleri uygulanması ilk olarak Willumsen tarafından öne sürülmüştür. Willumsen, entropi maksimizasyonu ile belli bir kısıtlar dizisine bağlı olarak en olası yolculuk matrisi tahmini yapılabileceğini kanıtlamıştır.

Bu bölüm, Van Zuylen ve Willumsen (1980) tarafından statik O-D problemini çözmek için öne sürülmüş iki modeli açıklamaktadır. Buna ek olarak bu bölümde problemin analitik çözümü için sunulan diğer yaklaşımlardan da bahsedilmiştir.

3.2 Yolculuk Modeli ve Yaklaşımlar

Toplam O-D yolculuklarının sayısının “T” ve i başlangıçlı j sonlu yolculukların sayısının “ T_{ij} ” ye eşit olduğu varsayılırsa, yolculuk grupları içine dağılmış olan “T” sayıdaki yolculuğun oluşturduğu, entropi olarak açıklanmış, “ T_{ij} ” değerine ait çözümlerin sayısı 3.1 eşitliğindeki gibi hesaplanabilir.

$$Maksimum : Z(T_{ij}) = \prod_{ij} \left(\frac{T_n}{T_{ij}} \right) = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!}$$

(3.1)

Aşağıdaki kısıtlar altında,

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \quad \forall a \quad (3.2a)$$

$$T_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (3.2b)$$

Burada;

T_k : NxN’lik bir O-D matrisinin “k” nıncı hücresindeki mevcut yolculukların sayısı

$T_n = T - \sum_{k=1}^{k=n-1} T_k$: Seçilen T_{ij} yolculuklarından dikkate alınan mevcut toplam yolculuk sayısı

$T = \sum_{ij} T_{ij}$: T_{ij} 'lerin toplamı

$$k = i + (j-1)N$$

Entropi fonksiyonunu maksimize eden (en büyükleyen) T_{ij} değerleri, en olası çözümü (en yüksek olasılıklı) sunar. Maksimizasyon için “Entropi” fonksiyonunun logaritması alınarak (3.3 eşitliğinde görüldüğü gibi), eşitlik sadeleştirilerek yazılmıştır.

$$\text{Maksimum} : Z(T_{ij}) = \text{Ln} \left(\frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \right) = \text{Ln}(T!) - \sum \text{Ln}(T_{ij}!)$$

(3.3)

Stirling (Donald 1976) “ $\text{Ln}(x!)$ ” ifadesi için (x in sonsuza gitmesi durumunda) bir yaklaşım öne sürmüştür. (3.4 Eşitliği) Stirling yaklaşımının detayları Ek 1’ de anlatılmıştır.

$$\text{Ln}(x!) = x \text{Ln} x - x \tag{3.4}$$

Stirling yaklaşımı 3.3 eşitliğine uygulandığında;

$$\text{Maksimum} Z(T_{ij}) = T \cdot \text{Ln} T - T - \sum (T_{ij} \text{Ln} T_{ij} - T_{ij})$$

(3.5)

Eşitliği elde edilir.

Willumsen (1984), hesap kolaylığı açısından T 'yi sabit alan daha ileri bir yaklaşım sunmuştur. Willumsen, yukarıdaki eşitlikte yer alan “ T ” ifadesinin (toplam yolculukların sayısı) bir sabit değer olduğunu kabul ederek eşitlikte düzenleme yapmıştır. Bu yaklaşımın bütün yol ağları ve trafik karakteristikleri için geçerli olmadığı bilinmektedir. Bu yaklaşıma dayanarak 3.5 eşitliğinde yer alan ilk iki terim atılabilir ve eşitlik 3.6’daki gibi bir amaç fonksiyonu haline gelir.

$$\text{Maksimum} Z(T_{ij}) = - \sum (T_{ij} x \text{Ln} T_{ij} - T_{ij}) \tag{3.6}$$

Aşağıdaki kısıtlar altında;

$$V_a = \sum T_{ij} P_{ij}^a \quad \forall a \text{ için} \quad (3.7a)$$

$$T_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \text{ için} \quad (3.7b)$$

Daha önceki çalışmalardan bilinen eski bir matrisin olması durumunda (başlangıç matrisi), bu entropi fonksiyonu 3.8 eşitliği kullanılarak açıklanmıştır. 3.8 eşitliği, T_{ij} yolculuklarının her biri için başlangıç matrisi verisini içeren ek terim dışında, 3.1 eşitliği ile benzer bir eşitliktir. 3.9a ve 3.9b'de açıklanan kısıtlar 3.1a ve 3.1b'dekilerle aynıdır.

$$\text{Maksimum : } Z(T_{ij}, t_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} (T_{ij}!)} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij}}{\sum_{ij} t_{ij}} \right)^{T_{ij}} \quad (3.8)$$

Aşağıdaki Kısıtlar Altında;

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \quad \forall a \text{ için} \quad (3.9a)$$

$$T_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \text{ için} \quad (3.9b)$$

Burada,

$$T = \sum_{ij} T_{ij} \text{ dir.}$$

Yukarıda yazılan fonksiyon 3.10 eşitliğinde basitleştirilerek yazılmıştır;

$$\text{Maksimum : } Z(T_{ij}, t_{ij}) = T! \frac{\left(\sum_{ij} t_{ij} \right)^{-\sum T_{ij}}}{\prod_{ij} (T_{ij}!)} \prod_{ij} (t_{ij})^{T_{ij}} \quad (3.10)$$

Verilmiş olan T , T_{ij} 'lerin toplamı , t ise t_{ij} 'lerin toplamıdır. Amaç fonksiyonu şu şekilde sadeleştirilebilir.

$$\text{Maksimum : } Z(T_{ij}, t_{ij}) = \frac{T!(t)^{-r}}{\prod_{ij} (T_{ij}!)} \prod_{ij} (t_{ij})^{T_{ij}} \quad (3.11)$$

Willumsen'e ait olan “Yolculukların toplam sayısının bir sabit sayı olması” yaklaşımına dayanarak 3.11 eşitliği şu şekilde sadeleştirilir.

$$Maksimum : Z(T_{ij}, t_{ij}) = \frac{\prod_{ij} (t_{ij})^{T_{ij}}}{\prod_{ij} (T_{ij}!)} \quad (3.12)$$

eşitliğin logaritması alındığında ve 3.12 eşitliğine Stirling yaklaşımı uygulandığında amaç fonksiyonu 3.13'teki gibi olur.

$$Maksimum Z(T_{ij}) = - \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right) \quad (3.13)$$

Aşağıdaki kısıtlar altında

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \quad \forall a \text{ için} \quad (3.14b)$$

$$T_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \text{ için} \quad (3.14b)$$

Burada

$$T = \sum_{ij} T_{ij}$$

$$t = \sum_{ij} t_{ij} \quad \text{dir.}$$

Willumsen (1981,1984) 3.15 eşitliğinde görüldüğü gibi amaç fonksiyonundan sabit bir terim çıkartmıştır. Bu sabit terim çözümü değiştirmez. Amaç fonksiyonunun sadeleştirilmesi daha sonra açıklanacaktır.

$$Maksimum Z(T_{ij}) = - \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} + t_{ij} \right) \quad (3.15)$$

$X \geq 0.5$ olduğunda $\ln(x)$ için Taylor serisi 3.15 eşitliğinde yerine yazılır ve sadece $T_{ij} / t_{ij} \cong 1$ yapan ilk iki terim alındığında oluşan sonuçlar 3.17 eşitliğinde görülmektedir. 3.17 eşitliği sadeleştirildikten sonra problem 3.20'de görüldüğü gibi bir minimizasyon problemi haline gelir.

$$\ln(x) = \left(\frac{x-1}{x}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{x-1}{x}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{x-1}{x}\right)^3 + \dots \quad (3.16)$$

$$\text{Maksimum} Z(T_{ij}, t_{ij}) = -\sum \left(T_{ij} \left(\frac{\frac{T_{ij}-1}{t_{ij}}}{\frac{T_{ij}}{t_{ij}}} \right) + \frac{T_{ij}}{2} \left(\frac{\frac{T_{ij}-1}{t_{ij}}}{\frac{T_{ij}}{t_{ij}}} \right) - T_{ij} + t_{ij} \right) \quad (3.17)$$

$$\text{Maksimum} : Z(T_{ij}, t_{ij}) = -\sum \left(T_{ij} - t_{ij} + \frac{T_{ij}}{2} \left(\frac{\frac{T_{ij}-1}{t_{ij}}}{\frac{T_{ij}}{t_{ij}}} \right)^2 - T_{ij} + t_{ij} \right) \quad (3.18)$$

$$\text{Maksimum} : Z(T_{ij}, t_{ij}) = -\sum_{ij} \left(T_{ij} - t_{ij} + \frac{1}{2T_{ij}} (T_{ij} - t_{ij})^2 - T_{ij} + t_{ij} \right) \quad (3.19)$$

$$\text{Maksimum} Z(T_{ij}, t_{ij}) = \sum_{ij} \left(\frac{1}{2T_{ij}} (T_{ij} - t_{ij})^2 \right) \quad (3.20)$$

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \quad \forall a \text{ için} \quad (3.21a)$$

$$T_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \text{ için} \quad (3.21b)$$

Burada;

$$\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \approx 1 \quad \text{dir.}$$

3.20 eşitliği, $T_{ij} \cong t_{ij}$ varsayımına dayanmaktadır. Problem, paydada T_{ij} yerine t_{ij} terimi yazılarak 3.22 eşitliğinde görüldüğü gibi basit bir ikinci derece en küçükleme (minimizasyon) problemi haline getirilmiştir. 3.22 eşitliğinde görülen sonuç formülü literatürde desteklenmemektedir. Bu eşitlikteki en büyük avantaj, paydada yer alan t_{ij} teriminin başlangıç matrisinden gelmesi nedeniyle bilinen bir değer olmasıdır. Bu sayede çözüm için, farklı değerler içeren paydanın (T_{ij}) bulunduğu 3.20 eşitliğine nazaran hesap kolaylığı elde

edilmektedir. Sonuç olarak 3.20 eşitliği, 3.22 eşitliğinden farklıdır. 3.22 eşitliğinde optimum sonucu bulmak için iteratif bir algoritma tipi kullanmaya gerek yoktur.

3.22 eşitliğinde verilen amaç fonksiyonu, başlangıç matrisine ait hataların karesi alınarak hataların minimize edildiği (en küçüklendiği) avantajlı bir regresyon ortaya koyar. Homojen bir başlangıç matrisi kullanıldığında ise terimlerinin hepsi eşdeğer hale gelir ve amaç fonksiyonu standart bir regresyon problemine dönmüş olur.

$$\text{Maksimum} : Z(T_{ij}, t_{ij}) = \sum_{ij} \left(\frac{1}{2t_{ij}} (T_{ij} - t_{ij})^2 \right) \quad (3.22)$$

Aşağıdaki kısıtlar altında

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \quad \forall a \text{ için} \quad (3.23a)$$

$$T_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \text{ için} \quad (3.23b)$$

$$\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \approx 1$$

Lagrange çarpanları kullanılarak problem, 3.24 eşitliğinde görüldüğü gibi kısıtlı bir optimizasyondan kısıtsız bir optimizasyona dönüştürülebilir. Amaç fonksiyonu gözlem yapılan bağların sayısına eşit sayıda ek terimler içerir. Bu terimler, çözüm için λ_a değişkenleri ile çarpılır. Sonuç olarak 3.25 eşitliği elde edilmiştir. Burada amaç fonksiyonu, bağlardaki trafik akım değerlerinde ve yolculuk sayılarında oluşan hataların karesinin alınarak bunların aynı eşitlik içinde birleştirilmiş halinin minimize edilmesidir (en küçülenmesidir).

$$\text{Maksimum} Z'(T_{ij}, t_{ij}) = \sum_{ij} \left(\frac{1}{2t_{ij}} (T_{ij} - t_{ij})^2 \right) + \sum_a \lambda_a \left(V_a - \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \right) \quad (3.24)$$

$$\text{Maksimum} Z''(T_{ij}, t_{ij}) = \sum_{ij} \left(\frac{1}{2t_{ij}} (T_{ij} - t_{ij})^2 \right) + \lambda \sum_a \left(V_a - \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \right)^2 \quad (3.25)$$

Özet olarak, başlangıçta yola çıkılan eşitlik (3.9a ve 3.9b kısıtları altındaki 3.8 eşitliği), akım sürekliliği ve negatif olmama kısıtları altında en olası O-D matrisini desteklemektedir. Amaç fonksiyonuna Stirling yaklaşımı uygulanıp logaritması alınarak fonksiyon basitleştirilir (3.15 eşitliğindeki gibi). 3.15 eşitliğindeki terimler Taylor serisi ve başlangıç matrisi ile uyumlu olacak O-D matrisine dayalı yaklaşım ($T_{ij} \approx t_{ij}$) kullanılarak genişletildiğinde eşitlik daha da basitleştirilebilmektedir. Daha sonra, bu çalışmada iddia edildiği gibi “ T_{ij} ” terimi yerine paydada “ t_{ij} ” terimi yazıldığında basit bir regresyon kullanılarak problemin çözümüne ulaşılır. (3.23a ve 3.23b kısıtları altında 3.22 eşitliği)

3.3 Hacim Modeli ve Yaklaşımlar

O-D problemini çözmek için bir alternatif yaklaşım da problemin O-D yolculuk sayıları yerine yol bağlarında gözlemlenen trafik hacim değerlerine ait eşitliklerin kullanılmasıdır. Trafik hacim değerlerini kullanarak OD matrisi tahmin etme eşitliği, 3.30, 3.31a, 3.31b ve 3.31c’de gösterildiği gibi Willumsen ve Van Zuylen tarafından 1980’ de ortaya konmuştur. Ancak bu iki yaklaşım arasında sistematik bir karşılaştırma yapmanın bir geçerliliği yoktur. Van Zuylen tarafından izlenen bu yöntem, Brillouin’in bilgi ölçümü yöntemine dayanmaktadır. Burada sunulan eşitlik ikinci bölümde verilmiş olan 2.3 eşitliğindeki hacim eşitliğine benzemektedir. İkisi arasındaki fark ise modelin yorumlanmasından ileri gelmektedir.

Veri olarak kullanılan bilgi, bir N gözleminde k kesitinde yapılmış n_k süreli bir trafik sayımını içermektedir. (Brillouin – 1956)

$$I = -Ln \left(N! \prod_k \left(\frac{q_k^{n_k}}{n_k!} \right) \right) \quad (3.26)$$

q_k bir k gözlem kesitinin başlangıç olasılığıdır. Eğer gözlemler, i-j arasındaki yolculuk sayılarının olduğu özel bir bağa ait sayımlar olarak açıklanmış ise ;

$$n_{ij}^a = T_{ij} P_{ij}^a \quad (3.27)$$

“İ-J” noktaları arasında yer alan “a” bağı üzerinde yapılan trafik gözleminin olasılığını (q_{ij}^a), başlangıç O-D matrisinden elde edilen bir bilginin fonksiyonu olarak açıklayabiliriz.

$$q_{ij}^a = \frac{t_{ij} P_{ij}^a}{\sum_{ij} t_{ij} P_{ij}^a} \quad (3.28)$$

Burada t_{ij} , daha önceden bilinen i - j arasındaki yolculuklara ait bir sayıdır (Kullanılan başlangıç matrisinden alınan değerlerdir). Bu bilgi gözlem yapılan bağdaki “ V_a ” sayım değerlerini de içerdiğinden şu şekilde ifade edilecektir;

$$I_a = -Ln \left(\frac{V_a! \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij} P_{ij}^a}{V_a} \right)^{T_{ij} P_{ij}^a}}{\prod_{ij} (t_{ij} P_{ij}^a)!} \right) \quad (3.29)$$

Buna göre amaç fonksiyonu şu hale gelir:

$$Min.: Z(T_{ij}, t_{ij}) = - \sum_a Ln \left(\frac{V_a! \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij} P_{ij}^a}{V_a} \right)^{T_{ij} P_{ij}^a}}{\prod_{ij} (t_{ij} P_{ij}^a)!} \right) \quad (3.30)$$

Aşağıdaki kısıtlar altında;

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij}, P_{ij}^a \quad \forall a \quad (3.31a)$$

$$v_a = \sum_{ij} T_{ij}, P_{ij}^a \quad \forall a \quad (3.31c)$$

$$T_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (3.31c)$$

Yolculuk formülasyonu için Stirling yaklaşımı kullanılarak amaç fonksiyonu 3.36’da ki gibi sadeleştirilmiştir.

$$\text{Maksimum. : } Z(T_{ij}, t_{ij}) = -\sum_a \text{Ln} \left(\frac{V_a! \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij} P_{ij}^a}{V_a} \right)^{T_{ij} P_{ij}^a}}{\prod_{ij} (t_{ij} P_{ij}^a)!} \right) \quad (3.32)$$

$$\text{Maksimum: } Z(T_{ij}, t_{ij}) = -\sum_a \left(V_a \text{Ln}(V_a) - V_a + \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \text{Ln} \left(\frac{t_{ij} P_{ij}^a}{V_a T_{ij} P_{ij}^a} \right) + \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \right) \quad (3.33)$$

$$\text{Maksimum } Z(T_{ij}, t_{ij}) = -\sum_a \left(\sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \text{Ln}(V_a) - V_a + \sum_a \left(\sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \text{Ln} \left(\frac{t_{ij} P_{ij}^a}{V_a T_{ij} P_{ij}^a} \right) + V_a \right) \right) \quad (3.34)$$

$$\text{Maksimum. : } Z(T_{ij}, t_{ij}) = -\sum_a \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \text{Ln} \left(\frac{V_a t_{ij}}{T_{ij} V_a} \right) \quad (3.35)$$

$$\text{Maksimum. : } Z(T_{ij}, t_{ij}) = \sum_a \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \text{Ln} \left(\frac{T_{ij} V_a}{V_a t_{ij}} \right) \quad (3.36)$$

3.4 Özet

Bu bölümde çeşitli yolculuk ve hacim formülleri ile bunlara ait farklı yaklaşım türleri incelenmiştir. Sonraki bölümde ise en olası O-D yolculuk matrisi tahmini için iki farklı yaklaşım sunulmuştur. Bu yaklaşımlarda kavşaklardaki veri uyuşmazlıkları akım sürekliliği prensibi içinde dağıtılmıştır. Bu yaklaşımlardan birincisi problemi iki alt probleme ayırarak çözmeye çalışır ve birinci problemin çözümünden elde edilen çıktılar ile ikinci probleme ait bazı girdi bilgileri birleştirilerek ikinci kısımda problemin çözümüne ulaşılır. Diğer yaklaşımda ise problem tek bir parça olarak ele alınıp tek adımlık bir süreçte çözüme gidilir.

4. SAYISAL ÇÖZÜMLEME TEKNİKLERİ

4.1 Giriş

O-D yolculuk matrisi elde etmek için gerekli olan en önemli teknik verilerden birincisi söz konusu başlangıç – son noktaları arasında yer alan bağlara ait trafik sayımlarıdır. Trafik sayımları çoğunlukla (loop) dedektörler kullanılarak otomatik elde edilirler. Bu sayım aletleri tamamen güvenilir değildir. Bu aletlerin, bağlara ait trafik akımı hacim değerlerinde tutarsızlıklar gösteren hataları görülmektedir. Bu durum aynı zamanda, bağlardaki trafik sayımları farklı koşullarda elde edildiklerinde de ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple bundan sonra yapılması gereken ilk işlemlerden biri, olası yolculuk matrisinin elde edilmesi için trafik hacimlerinin kullanılmasından önce, bağlarda yapılan sayımların, “bağ akım sürekliliği” ilkesini karşılayıp karşılamadığının kontrol edilmesi işlemidir.

Mümkün olabildiğince gözlemlenen bağ trafik sayımıyla örtüşen ve eşzamanlı olarak bağ akım sürekliliğini sağlayacak dengelenmiş bir trafik sayımı elde etmek için, tahmin edilen bağ hacim değerleri arasındaki hata payı asgari düzeye çekilmelidir. Ancak bu ön hazırlık işlemi tamamlandıktan sonra maksimum olasılık tekniği kullanılarak en olası O-D matrisi elde edilebilir. Bağlardaki trafik sayımları tutarsızlığı dikkate alınarak en olası yolculuk matrisini elde etme konusunda iki yaklaşım mevcuttur. Bu iki yaklaşım aşağıda incelenmektedir. Bu yaklaşımların uygulamasında kullanılabilen bazı yazılım paketleri de aşağıda ayrıca incelenmektedir.

4.2 Çift Adımlı Yaklaşım

Bu yaklaşımda, problem iki aşamaya ayrılmaktadır. İlk aşamada, bir yandan gözlemler sonucunda elde edilen bağ trafik sayımlarından sapmayı en aza indirmeye çalışırken diğer bir yandan da bağdaki trafik akım sürekliliğini sağlayan bağ hacim değerleri elde edilmeye çalışılmaktadır. İkinci aşamada ise dengelenmiş bağ hacimleri en olası O-D yolculuk matrisinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. İlk aşamada, öncelikle sayımlardaki hata, aşağıda eşitlik 4.1’de gösterildiği gibi, en aza indirgenmeye çalışılır.

$$\text{Minimum} Z(T_{ij}) = \sum (V_a - V'_a)^2 W_a \quad \forall a \text{ için} \quad (4.1)$$

V_a Fiilen gözlenen trafik hacim değeri

V_a' V_a ya en yakın olan ve akım sürekliliğini sağlayan hacim değerleri

W_a Ağırlık faktörü, [1.0 veya $(1/\sqrt{V_a})$ ya da $(1/V_a)$ olabilir.]

Bunun gibi,

$$V_a' = \sum T_{ij} \cdot P_{ij}^a \quad \forall a \text{ için} \quad (4.1a)$$

Burada V_a' için çözüm yapılmaktadır. V_a' nü çözmek için (4.1a) eşitliğindeki kısıtlar dikkate alınarak, 4.1a eşitliğindeki kısıtlar, “Lagrangian Çarpanları” tarafından çarpılmalıdırlar. Böylece bu kısıtlar amaç fonksiyonuna dahil edilebilirler ve türevleri de sıfıra eşitlenir. Bu eşitlik gurubunu çözmek bize V_a' nü verir. Bir kez eşit yol hacimleri elde edildiğinde, Eşitlik 4.2’de görüldüğü gibi, maksimum entropi tekniğine dayanan, en olası yolculuk matrisini elde etme yolunda ilerlenmiş olunur.

$$\text{Maxksimum: } Z(T_{ij}, t_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} (T_{ij})} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij}}{\sum_{ij} t_{ij}} \right)^{T_{ij}} \quad (4.2)$$

$$V_a' = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \quad \forall a \text{ için} \quad (4.2a)$$

4.2a ‘da yer alan kısıtlar altında, 4.2 eşitliğindeki amaç fonksiyonu sürekli pozitif oldukça, bu eşitlikteki doğal logaritma da, 4.3 eşitliğinde görüldüğü üzere alternatifli olarak en büyük değere çıkarılabilmektedir. Böyle yapmanın pek çok avantajı vardır. Öncelikle, olasılık genelde yol ağının büyüklüğüne ve onun üzerindeki trafik akımına bağlı olarak oldukça düşük seviyede olur. Yol ağı ve bağ akımı büyüdükçe olasılık küçülür. İkinci olarak da faktöriyel içeren terimlerin türevlerini elde etmek zordur. Çünkü tüm işlem sürecinin otomasyonu gerekli olduğundan, değerlerin dağılımı (oranı) muhtemelen bir bilgisayarın bulundurabileceği en küçük gerçek sayının altında kalacağından, bu da zorluk yaratacaktır. Bu durumdan kurtulabilmek için 4.2 eşitliğinin doğal logaritması alınarak maksimize edilmektedir. Bu durum çıkacak sonucu değiştirmemektedir, çünkü kendisi maksimum olan bir ifadenin logaritması da maksimum olacaktır.

$$\text{Maksimum. } Z(T_{ij}, t_{ij}) = \text{Ln} \left[\frac{T!}{\prod_{ij} (T_{ij}!)} \prod_{ij} \left[\frac{t_{ij}}{\sum_{ij} t_{ij}} \right]^{T_{ij}} \right] \quad (4.3)$$

4.2a eşitliğindeki kısıtlar altında, Stirling yaklaşımını da kullanarak 4.3 eşitliğini genişletip 4.4. eşitliğini elde etmekteyiz.

$$\text{Maksimum : } T \text{Ln} \left(\frac{T}{t} \right) - T - \sum_{ij} \left(T_{ij} \text{Ln} \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right) \quad (4.4)$$

Bunun gibi:

$$V'_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \quad \forall a \text{ için} \quad (4.4a)$$

Burada;

$$T = \sum_{ij} T_{ij} \quad (4.4b)$$

$$t = \sum_{ij} t_{ij} \quad (4.4c)$$

4.5 eşitliğinde görüldüğü gibi Lagrangian çarpanlarını kullanarak aşağıdaki problemi çözmek için, amaç fonksiyonu 4.4 olmak üzere eşitlik 4.2a'yı eşitliğe katıyoruz.

$$T \text{Ln} \left(\frac{T}{t} \right) - T - \sum_{ij} \left(T_{ij} \text{Ln} \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right) + \sum_a \lambda_a \left(V'_a - \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \right) \quad (4.5)$$

En olası yolculuk matrisini elde etmek için yukarıdaki eşitlikte T_{ij} 'ye ve λ_a 'ya göre diferansiyel alınarak sonuç değişkenlerinin sıfırlanması ve T_{ij} ve λ_a için çözümlenmesi gerekmektedir. Eğer bir yol ağı "m" adet O-D ikilisine sahipse ve yol ağına "n" adet bağ varsa biz toplam olarak "m+n" adet eşitliğe sahibiz demektir. λ_a 'ya göre diferansiyel alınarak elde edilen "n" adet eşitlik doğrusaldır, halbuki T_{ij} 'ye göre diferansiyel alınarak elde edilen "m" adet eşitlik doğal olarak doğrusal değildir.

4.3 Tek Basamak Yaklaşımı

Bu yaklaşımda, bağlarda trafik akımı sürekliliğini sağlayan bağ hacim değerleri elde etmeye çalışılmaktadır. Burada ilk adım, gözlenen bağ akımlarına en yakın olan ve düğüm noktalarında akım sürekliliğini sağlayacak bağ trafik akım değerlerini elde etmektir. Eşitlik 4.6'da ve 4.6a'da verilmiş olan kısıtlar altında, gözlemler sonucu elde edilen bağ hacim değerleri ile akım sürekliliğini sağlayan bağ hacim değerleri arasındaki hata asgari düzeye indirgenmektedir.

$$\text{Maksimum } Z(T_{ij}) = \sum_a (V_a - V'_a)^2 \quad \forall a \quad (4.6)$$

Bu eşitlikte veriler aşağıdaki anlamları ile kullanılmaktadır:

V_a : Güncel gözlenen yol hacmi

V'_a : “ V_a “ ya en yakın olan ve akım sürekliliğini sağlayan hacimler

Bu halde;

$$V'_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \quad \forall a \quad (4.6a)$$

5.6a eşitliğindeki kısıtları kullanarak 4.6 eşitliğinde yerine yazarsak; eşitlik 4.7'yi elde ederiz.

$$\text{Maksimum } : Z(T_{ij}) = \sum_a \left(V_a - \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \right)^2 \quad \forall a \quad (4.7)$$

Yukarıdaki kısıtsız problemi çözmek için, eşitliğin T_{ij} ye göre türevi alınır ve sıfıra eşitleyerek 4.8 eşitliği elde edilir. Burada görülen doğrusal eşitlikler kümesinin çözümü, dengelenmiş bağ akımını verir.

$$0 = 2 \left[\sum_a (V_a P_{ij}^a) - \left[\sum_a P_{ij}^a \left[\sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \right] \right] \right] \quad (4.8)$$

En olası yolculuk matrisini elde etmek için, 4.8 eşitliğindeki şartların sağlanarak, Eşitlik 4.9'un maksimize edilmesi gerekmektedir. Böylece gözlenen bağlardan bulduğumuz trafik akım değerlerinin, akım sürekliliği koşulunu sağlayıp sağlamadığının etkisini hesaba katmadan akım sürekliliği koşulunun sağlanıldığından emin olunmakta veya değerler bunu

sağlamaya zorlanmaktadır. Eğer yapılan gözlemlerde akım sürekliliği sağlanamazsa, 4.8 eşitliği, bağ akım sürekliliğini sağlayan eşit bir bağ akımının (V_a') elde edilebilir olduğunu gösterecektir.

$$\text{Maksimum.: } Z(T_{ij}, t_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} (T_{ij}!)} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij}}{\sum_{ij} t_{ij}} \right)^{T_{ij}} \quad (4.9)$$

4.9 eşitliği bu olasılığın çoğunlukla çok düşük değerde olduğunu gösterir. 4.10 eşitliğinde görüldüğü üzere, 4.10'daki eşitlik, 4.9'daki amaç fonksiyonunun doğal logaritması alınmış halidir. Bunun yapılmasındaki nedenler daha önce "Çift Adımlı Yaklaşım" da açıklanmış bulunmaktadır.

$$\text{Maksimum.: } Z(T_{ij}, t_{ij}) = \text{Ln} \left(\frac{T!}{\prod_{ij} (T_{ij}!)} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij}}{\sum_{ij} t_{ij}} \right)^{T_{ij}} \right) \quad (4.10)$$

$\text{Ln}(x!)$ ifadesi için Stirling yaklaşımı kullanılarak amaç fonksiyonu 4.11 eşitliğine dönüştürülmektedir.

$$\text{Maksimum.: } T \text{Ln} \left(\frac{T}{t} \right) - T - \sum_{ij} \left(T_{ij} \text{Ln} \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right) \quad \forall i, j \quad (4.11)$$

$$T = \sum_{ij} T_{ij} \quad (4.11a)$$

$$t = \sum_{ij} t_{ij} \quad (4.11b)$$

Şimdi, eşitlik 4.8'de verilmiş olan dengelenmiş akım koşulu altında eşitlik 4.11'in maksimize edilmesi gerekmektedir. 4.8 eşitliğindeki ifade, eşitlik 4.11'deki kısıtlar dengelenmiş olduğundan Eşitlik 4.12'de gösterildiği üzere, doğrudan Lagrangian çarpanları kullanılarak amaç fonksiyonuna taşınabilir.

$$L \equiv T \text{Ln} \left(\frac{T}{t} \right) - T - \sum_{ij} \left(T_{ij} \text{Ln} \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right) + \sum_{ij} \left(\lambda_{2j} \left(\sum_a (V_a p_{ij}^a) - \left(\sum_a p_{ij}^a \left(\sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^a \right) \right) \right) \right) \quad \forall i, j \quad (4.12)$$

Şimdi problemi çözmek için, T_{ij} ve λ_{ij} 'yi probleme dahil ederek yukarıdaki eşitliğin kısmi türevinin alınması ve doğrusal olmayan sonuç eşitliklerinin çözülmesi gerekmektedir. λ_{ij} 'nin türevinin alınması doğrusal eşitlikleri verirken, T_{ij} 'yi hesaba katarak türevinin alınması da bizi doğrusal olmayan eşitliklere götürecektir. Eğer “n” adet O-D çifti varsa, o zaman çözülecek eşitliklerin sayısı, “n” adedi doğrusal, diğer “n” adedi doğrusal olmayan “2n” adet eşitlik olacaktır. Gözlenen bağ sayımlarının daima akım sürekliliğini sağlayıp sağlayamayacağı gerçeğini de dikkate alarak bu eşitlikleri çözmek bize en olası O-D matrisini verecektir.

4.4 Çözüm Yazılımları ve Özellikleri

Doğrusal olmayan eşitliklerin çözümünde olduğu gibi doğrusal eşitliklerin çözümünde de kullanılan pek çok yazılım paketi mevcuttur. Bu paketler, eşitlik 4.5 ve eşitlik 4.12'nin türevinin alınması ile elde edilen yeni eşitliklerin çözümünde kullanılabilir. Bu paketlerden yararlandığımızda veya gerçek yol ağlarını çözmeye kalktığımızda bazı sınırlamalarla karşılaşılacaktır. Bilgisayar donanımının özelliklerine dayanan bilgisayar etmenlerinin bu durumda dikkate alınması gerekir. Bir çözümün elde edilmesinde bilgisayar etmenlerinin dışında dikkate alınması gereken bazı matematiksel etmenler de vardı ki bunların bir kısmı aşağıda tartışılmaktadır.

4.4.1 Bilgisayar Etmenleri

I. Hesaplama Zamanı

Hesaplama zamanı doğrudan değişkenlerin sayısına bağlıdır. Örneğin, 2000 bağ ve 200 O-D çiftinden oluşan bir yol ağında eğer “Çift Adımlı Yaklaşımı” kullanarak çözümlene yapmaya kalkışırsak, bize 2200 eşitlik ve 2200 değişken veya “Tek Adımlı Yaklaşımı” kullandığımızda da 400 eşitlik ve 400 değişken verir. Yol ağı genişledikçe değişkenler ve eşitlikler ve buna bağlı olarak da hesaplama zamanı da genişleyecektir. Hesaplama zamanı ayrıca çözümü elde etmek için kullanılan algoritma tarafından da etkilenmektedir. Performansı yüksek olan bir bilgisayar, performansı yüksek olmayandan (etkili olmayan) daha hızlı olarak çözümü elde edecektir. Ayrıca bazı paketler sonuç değişkenleri sayısında tavan limitine sahiptirler ki bu da geniş yol ağlarıyla uğraşılırken paket yazılımların kullanılabilirliğini son derece sınırlandırmaktadır.

II. Hafıza

Hafıza kapasitesi bir çözücünün en önemli niteliklerinden birisidir. Burada, metodu uygulamak için çözücünün (bilgisayarın) sahip olduğu, sistemin, RAM' inden bahsetmekteyiz. Esasen, hesaplama zamanı RAM ile ters orantılıdır. Yüksek bir RAM' imiz varsa sistem hesaplamayı kısa zamanda yapabilmektedir, ancak hesaplama süreci uzadıkça RAM' in hızı düşmektedir. Bunun sebebi hafıza limiti nedeni ile yığınlar halinde yapılan hesaplamaların bilgisayarın hızını düşürmesidir. Bu sebeplerden ötürü problemi çözmek için ihtiyaç duyulan hafızaya sahip doğru bilgisayarı seçmek ve uygun paketi kullanmak zorunludur. Aksi halde ise daha hızlı ve daha kısa zamanda hesaplama yapabilmek için çoğunlukla değişkenlerin sayısının azaltılması veya yol ağının büyüklüğünün kısıtlanması gerçeği ile karşı karşıya kalınmaktadır.

4.4.2 Matematiksel Etmenler

Doğrusal olmayan eşitliklerin çözümünde kullanılan algoritmalar sonuç çözümüne ulaşmada yinelemeli (iteratif) yöntemler kullanırlar.

Burada, uygun başlangıç çözümünün kullanılması büyük bir öneme sahiptir. Kullanılan algoritmaya bağlı olarak kişi sonuca yaklaşabilir veya yaklaşamayabilir. Eğer birinci başlangıç çözümü vasat ise problem, gerçek dünyada fiziksel anlam taşımayan, karmaşık ve çok sayıda çözümlerle sonuçlanabilir. Başlangıç çözümleri, özellikle çoklu çözümler içeren bir problem ile uğraşırken, büyük önem taşımaktadırlar.

4.5 Alternatif Çözücüler ve Paket Programlar

Bu çalışmada yer alan doğrusal ve doğrusal olmayan eşitlikleri çözmek için en sık kullanılan üç yazılıma ait bazı sınırlamalar ve avantajlar aşağıda sunulmaktadır.

4.5.1 Microsoft Excel Çözücü

Microsoft Excel Çözücü, sonradan eklenebilen bir yama olarak, Microsoft Excel standart paketi ile birlikte piyasada kullanılmaktadır. Bu program yardımı ile hem maksimizasyon (en büyükleme) hem de minimizasyon (en küçükleme) eşitlikleri çözülebilir. Doğrusal ve doğrusal olmayan eşitliklerin çözümü için kurulum ayarlarının değiştirilmesi gerekir. Excel Çözücü 8.0, doğrusal olmayan eşitliklerin çözümünü yapmasa da takip eden versiyonlarının doğrusal olmayan eşitlikleri çözeceği umulmaktadır. Microsoft Excel Çözücü, Austin'deki Teksas Üniversitesi'nden Leon Lasdon ve Cleveland Eyalet Üniversitesi'nden Allen Waren tarafından geliştirilen doğrusal olmayan optimizasyon kodu "Genelleştirilmiş Küçülen Eğitim" (GRG2)'yi kullanmaktadır (Microsoft 1997). Başlangıç çözümü doğrusal olmayan

eşitliklerin çözümünde önemli rol oynamaktadır. Eğer başlangıç çözümü vasat ise çözücü yarı yolda kalır. Ayrıca, GRG2 sadece 200 değişken kullanabilmekte ve bundan dolayı da uygulama yapılacak büyük yol ağlarını çözümlenmede kullanılamamaktadır. Değişkenler, yayıldıkları alanda değerleri değişen ve kısıtların da aynı tarzı sergilediği hücreler olarak kodlanmaktadır. Kişi, tekrarların (iterasyonların) sayısını ve kısıtlamaların uygunluğunu sağlayacak doğruluğu kontrol edebilmektedir. Problem küçük yol ağları için de uyarlanabilir olduğundan, öğrenciler tarafından da bir araç olarak kullanılabilir potansiyeline sahiptir. Microsoft Excel 8.0 versiyonu, Çözücü versiyonu ile birlikte bu tezde tartışılan pek çok formülasyonun çözümünde de kullanılmıştır.

4.5.2 Matlab

MATLAB ismi Matris Laboratuvarı için kullanılmaktadır. MATLAB yüksek performans gerektiren sayısal hesaplamalar ve canlandırmalar için Math Works Şirketi (MATLAB 1998) tarafından oluşturulan bir teknik hesaplama ortamıdır. Özel konularda araştırmalar için gerekli çok sayıda alet ve aracın yanında dinamik sistem simülasyon paketi SIMULINK de bünyesinde mevcuttur. Problemler genellikle M dosyaları adı altında bir çalışma alanı içerisinde kodlanmaktadır. Bu programda optimizasyon yapabilmek için, doğrusal olmayan eşitlikleri çözen hazır alt hesaplama yöntemlerini içeren ayrı bir araç kutusu bulunmaktadır. MATLAB eşzamanlı ve çok karmaşık doğrusal olmayan eşitlikleri çözebilen güçlü bir araçtır. Fazla sayıda sonuç değişkenini alabilir ve çok hızlıdır.

MATLAB, doğrusal olmayan eşitliklerin çözümünde, Gauss-Newton algoritmasını bir standart olarak kullanmaktadır. Eğer Gauss-Newton algoritması vasat bir sonuç verirse MATLAB otomatik olarak Levenberg-Marquardt (LM) algoritmasına geçer. Daha sağlam olan ve daha az hesaplama zamanı tutan LM algoritması Gauss-Newton algoritmasının bir modifikasyonudur. MATLAB 5.2 versiyonu çeşitli pek çok formülasyonun çözümünde kullanıldı. Geniş yol ağları MATLAB kullanılarak çözümlenebilirler, ancak bunu yapmadan önce problem bir M-dosyası olarak kodlanmalıdır. Geniş yol ağları için bu süreci otomatikleştirmek yararlı olacaktır.

4.5.3 Queens-OD

Queens-OD, gözlenen yol akımlarından kaynaklanan başlangıç-son trafik taleplerinin tahmin edilmesinde kullanılan, esas olarak Kanada'da Queen's Üniversitesi'nde Dr. Van Aerde (QUEENS-OD 1998) tarafından geliştirilmiş bir modeldir. Model, sadece gözlenen trafik akımlarını değil ayrıca gözlenen dönüş hareketi sayımlarını, yolculuk zamanlarını ve

potansiyel olarak O-D yolculuk matrisinin tahmini için sürücülerin yol tercihlerini de hesaba katar. Model, statik ve dinamik başlangıç -son (O-D) trafik taleplerinin tahmini ve hesaplaması için de uygundur. Queen's O-D, yine Dr. Van Arde tarafından geliştirilen, ENTEGRASYON trafik yol ağı simülasyonu modelini tamamlamak için oluşturulmuş bir destek modelidir. Bu sebeple her iki model de aynı veri dosyası yapısını ve dosya formatını paylaşmaktadırlar. Bununla birlikte başlangıç-son trafik taleplerinin tahmininde QUEENS-OD modelini kullanmak için ENTEGRASYON modelinin olması veya bunun kullanılması gerekli değildir.

Model, tek aşamalı (basamaklı) modeli çözmek için özelleştirilmiş bir kodlama sistemine sahiptir. Trafik sayımlarından O-D matrisi elde edilmesi konusunda çalışma yapan uzmanlar, QUEENS-OD kullanılarak elde edilen çözümlerin MATLAB' dan ve MS-EXCEL Çözücü' den elde edilen tüm sonuçlar ile eşleştiğini söylemektedirler. Bu model son derece çok yönlüdür, geniş yol ağları üzerinde çalışılabilir ve model ölçüsüne bağlı olarak O-D yolculuk matrisi elde edilebilir. QUEENS-OD 2.0 (QUEENS-OD 1998), yol sayımlarına dayanan O-D matrislerinin elde edilmesi amacı ile kullanılmıştır.

4.6 Özet

Bu bölümde ilk olarak en olası O-D yolculuk matrisinin elde edilmesinde kullanılacak iki yaklaşım tanımlandı. Trafik sayım değerlerindeki tutarsızlıklar ile ayrı ayrı uğraşmaya gerek bırakmadığı için “Tek Adımlı Yaklaşımın” (veya Tek Aşamalı Yaklaşım), daha üstün olduğu görülmektedir. Bu yaklaşım sonuç eşitliklerinin üzerine kurulmuşken, “Çift Adımlı Yaklaşımında”, akımdaki tutarsızlıklar öncelikle çözümlenmekte ve ancak o zaman buna dayanan en olası O-D matrisi elde edilmektedir. Tek adımlı yaklaşımın bir diğer avantajı da çift adımlı yaklaşıma göre nispeten daha az sayıda eşitliğe gerek duymasıdır. Hesaplama açısından bakıldığında bu büyük bir avantajdır.

Ayrıca, bu yaklaşımları uygulamak için kullanılmak üzere bazı yazılım paketlerinden de bahsedilmiştir. Bundan sonraki bölümlerde, iki farklı yol ağında, O-D yolculuk matrisinin elde edilmesinde yararlanılan pek çok eşitlik kıyaslanmaktadır. Bu eşitlikler QUEENS O-D tarafından kullanılan tek basamak yaklaşımını içermektedirler.

5. YAPAY O-D MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMASI

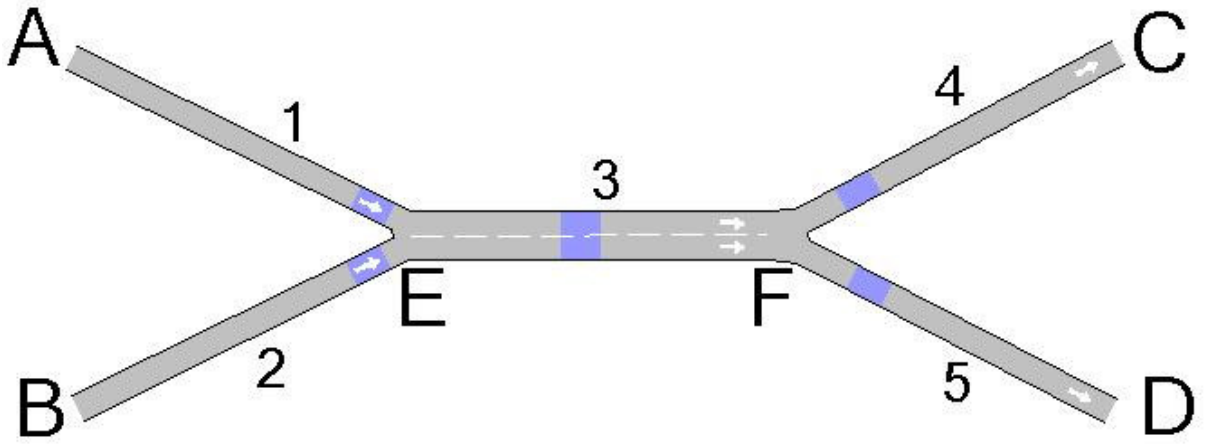
5.1 Giriş

Bu bölümde, H. Paramahamsan'ın uygulamasını yapmış olduğu yapay O-D problemine yönelik farklı modeller karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Sunulan modeller arasındaki farklılıkları belirlemek amacı ile iki ayrı yol ağı kullanılmakta ve tüm modeller bu yol ağlarına uygulanmaktadır. Bunlara ek olarak üniform başlangıç matrisinin, uygun ve uygun olmayan başlangıç matrisinin, optimum çözümler üzerindeki etkileri de incelenmektedir. Bu bölümde yer alan örnek uygulamaların çözümü için MS Excel ve Lingo programları kullanılmıştır.

5.2 Test Edilecek Yol Ağlarının Tanımı

Çeşitli modellerin ve bu modellere ait farklı eşitliklerin test edilmesinde iki farklı yol ağı kullanılmaktadır. Birinci yol ağı şekil 5.1'de görüldüğü üzere 5 bağdan oluşmaktadır. A ve B olmak üzere iki başlangıç noktası ve C ve D olmak üzere iki bitiş noktası bulunmaktadır. Aynı yol ağında ayrıca E ve F olmak üzere iki ara nokta vardır. Bu yol ağı dört O-D çiftine sahiptir. Ağ üzerindeki beş bağ, 1'den 5'e kadar numaralandırılmış olup Şekil 5.1'de görüldüğü üzere bunlar tek yönlü bağlardır. T_{AC} , T_{AD} , T_{BC} ve T_{BD} tek yönlü bağlara ait trafik hacim değerleridir.(Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.)

Çizelge 5.1'den de anlaşılacağı gibi bu yol ağında akım sürekliliği olduğu açıktır. Bundan başka, her dört O-D yolculuğu için sadece bir güzergah bulunmakta ve her güzergah tam olarak üç ayrı bağdan oluşmaktadır. Eğer yolculuk oranlarından bir tanesi verilmiş ise mevcut trafik hacmi için otomatik olarak diğer yolculuk oranları da bulunmaktadır. Çizelge 5.2' de açıkça görülmektedir ki 'x', 10'dan 40'a kadar herhangi bir değeri alabilir. Bu sebeple, kuramsal olarak, bu problem için sonsuz sayıda gerçek değerli çözümler söz konusudur. Burada yolculuk değerleri ile çalıştığımız için tam sayıların dışındaki rakamların geçerliliği olmamaktadır. Ayrıca maksimum olasılık teknikleri uygulanırken yolculuklara ait ondalıklı sayıların faktöriyel değerleri bulunamayacağından, çözüm sadece tamsayı değerli çözümlerle sınırlandırılmıştır. Çizelge 5.3, bu yol ağında oluşabilecek olası tamsayı değerli çözümleri göstermektedir. Ayrıca, bu yol ağında yolculukların toplam değerinin (T) sabit bir sayı olduğu da açıktır. (Bu kabul, O-D tahmin modelleri için yapılan en önemli kabullerden biridir.)



Şekil 5.1 Beş bağılı yol ağı.

Çizelge 5.1 Beş bağılı yol ağında bağı trafik hacim değerleri.

Bağlantı No	Gözlemlenmiş Hacim
1	40
2	60
3	100
4	70
5	30

Çizelge 5.2 Beş bağılı yol ağı için uygun O-D yolculuk matrisi.

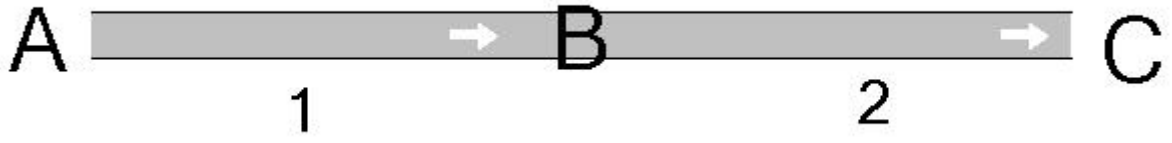
	C	D	Toplam
A	X	40 - X	40
B	70 - X	X - 10	60
Toplam	70	30	100

Çizelge 5.3 Beş bağılı yol ağı için çözüm alternatifleri.

Talep Senaryosu	T_{ac}	T_{ad}	T_{bc}	T_{bd}	<u>Toplam Yolculuklar (T)</u>
0	10	30	60	0	100
1	11	29	59	1	100
2	12	28	58	2	100
3	13	27	57	3	100
4	14	26	56	4	100
5	15	25	55	5	100
6	16	24	54	6	100
7	17	23	53	7	100
8	18	22	52	8	100
9	19	21	51	9	100
10	20	20	50	10	100
11	21	19	49	11	100
12	22	18	48	12	100
13	23	17	47	13	100
14	24	16	46	14	100
15	25	15	45	15	100
16	26	14	44	16	100
17	27	13	43	17	100
18	28	12	42	18	100
19	29	11	41	19	100
20	30	10	40	20	100

21	31	9	39	21	100
22	32	8	38	22	100
23	33	7	37	23	100
24	34	6	36	24	100
25	35	5	35	25	100
26	36	4	34	26	100
27	37	3	33	27	100
28	38	2	32	28	100
29	39	1	31	29	100
30	40	0	30	30	100

İkinci yol ağı, Şekil 5.22'de gösterildiği gibi, iki bağdan oluşan bir yol ağıdır. A, B ve C olmak üzere 3 merkez noktası (düğüm noktası) vardır. A'nın sadece başlangıç, C'nin ise sadece bitiş noktası olduğu bu yol ağında, B hem başlangıç hem de bitiş noktasıdır. Mevcut ağ yapısı üç O-D çiftine izin vermektedir, bunlar; T_{AB} , T_{AC} , ve T_{BC} 'dir ve her bir O-D çifti sadece bir rota kullanımına imkan sağlamaktadır. Çizelge 5.4, bağlara ait trafik akımlarını göstermektedir. Eğer yolculuk oranlarından biri bilirse, Çizelge 5.5'te görüldüğü gibi otomatik olarak diğer iki yolculuk oranı da bulunabilmektedir. Çizelge 5.5 açıkça göstermektedir ki 'x', 0'dan 10'a kadar herhangi bir değeri alabilir. Çizelge 5.6 da ise iki bağdan oluşan bu yol ağında olası gerçek tam sayı değerli çözümlerin bir listesi görülmektedir. Ayrıca bu ağ yapısı için toplam yolculukların değeri, beş bağlı yol ağından farklı olarak değişkendir. Bundan dolayı bu yol ağı toplam yolculuk değerinin sabit olduğu yaklaşımlara ait eşitliklerin test edilmesinde kullanılamamaktadır.



Şekil 5.2 İki bağılı yol ağı.

Çizelge 5.4 İki bağılı yol ağında bağı trafik hacim değerleri.

Bağlantı No	Hacim
1	10
2	15

Çizelge 5.5 İki bağılı yol ağında matris denklemleri.

	B	C	Sum
A	X	10 - X	10
B	-	5 + X	5 + X
Sum	70	15	15 + X

Çizelge 5.6 İki bağılı yol ağı için çözüm alternatifleri

Talep Senaryosu	T_{ab}	T_{ac}	T_{bc}	Toplam Yolculuk (T)
0	0	10	5	15
1	1	9	6	16
2	2	8	7	17
3	3	7	8	18
4	4	6	9	19
5	5	5	10	20

6	6	4	11	21
7	7	3	12	22
8	8	2	13	23
9	9	1	14	24
10	10	0	15	25

5.3 Test Edilecek Eşitlikler

Aşağıdakiler birbirleri ile karşılaştırılmış dokuz farklı eşitliktir. Logaritması alınarak ve Stirling yaklaşımından yararlanılarak elde edilen Eşitlik 5.2'nin yanında Eşitlik 5.1 maksimum olasılık tekniğine dayanan orijinal amaç fonksiyonudur. Eşitlik 5.3, Willumsen'e ait olup eşitlik 5.4, eşitlik 5.5'i veren ara bir eşitliktir. Ağırlık faktörleri ile doğrusal regresyon probleminin ilişkilendirildiği eşitlik 5.5'in tekrar düzenlenmiş bir versiyonu olarak eşitlik 5.6; hacim modeli olarak da eşitlik 5.7 kullanılmıştır. Eşitlik 5.8 hacim modelinin logaritmik tahmini olurken eşitlik 5.9 QUEENS-OD tarafından da uygulanan tek basamak yaklaşımıdır.

Aşağıda her iki yol ağı üzerinde test edilecek olan dokuz eşitlik için amaç fonksiyonları Ek 2'de verilmektedir. Dokuz eşitliğin tamamı beş bağlı yol ağında test edilmektedir. İki bağlı yol ağının çözümü için, 5.4, 5.5 ve 5.6'daki eşitlikler kullanılamamaktadır. Bunun sebebi bu üç eşitliğin toplam yolculuk sayısının sabit olduğu varsayımına dayanmasıdır. Oysa iki bağdan oluşan yol ağında toplam yolculuk sayısı sabit değildir. Toplam yolculuk sayısının sabit olduğu varsayımına dayanan 5.3 numaralı eşitlik, bu varsayımın geçerli olmadığı durumda da kullanılarak eşitliğin etkinliği test edilmiştir. İki bağdan oluşan yol ağında test etmek üzere eşitlik 5.3'ün seçilmesinin ardında yatan bir diğer neden, eşitlik 5.4, 5.5 ve 5.6'nın eşitlik 5.3'ün türevleri olmasıdır. Bundan dolayı tümü üzerinde çalışmaktansa esas eşitlik üzerinde çalışmak daha verimli olacaktır. Her iki yol ağında da kullanılacak eşitlikler en geniş şekilde Ek 2'de verilmiştir.

$$\text{Maksimum: } Z(T_{ij}, t_{ij}) = \ln \left(\frac{T!}{\prod_{ij} (T_{ij}!)} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij}}{\sum_{ij} t_{ij}} \right)^{T_{ij}} \right) \quad (5.1)$$

$$\text{Maksimum} : Z(T_{ij}, t_{ij}) = T \ln\left(\frac{T}{t}\right) - T - \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln\left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}}\right) - T_{ij} \right) \quad (5.2)$$

$$\text{Maksimum} : Z(T_{ij}, t_{ij}) = - \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln\left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}}\right) - T_{ij} \right) \quad (5.3)$$

$$\text{Maksimum} : Z(T_{ij}, t_{ij}) = - \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln\left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}}\right) - T_{ij} + t_{ij} \right) \quad (5.4)$$

$$\text{Maksimum} : Z(T_{ij}, t_{ij}) = \sum_{ij} \left(\frac{1}{2T_{ij}} (T_{ij} - t_{ij})^2 \right) \quad (5.5)$$

$$\text{Maksimum} : Z(T_{ij}, t_{ij}) = \sum_{ij} \left(\frac{1}{2t_{ij}} (T_{ij} - t_{ij})^2 \right) \quad (5.6)$$

$$\text{Maksimum} : Z(T_{ij}, t_{ij}) = \prod_a \frac{V_a!}{\prod_{ij} (T_{ij} P_{ij}^a)!} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij} P_{ij}^a}{v_a} \right)^{T_{ij} P_{ij}^a} \quad (5.7)$$

$$\text{Maksimum} : Z(T_{ij}, t_{ij}) = \sum_a \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \ln\left(\frac{T_{ij} v_a}{V_a t_{ij}}\right) \quad (5.8)$$

$$L = T \ln\left[\frac{T}{t}\right] - T - \sum_{ij} \left[T_{ij} \ln\left[\frac{T_{ij}}{t_{ij}}\right] - T_{ij} \right] +$$

$$\sum_{ij} \left[\lambda_{ij} 2 \left[\sum_{ij} (V_a P_{ij}^a) - \left[\sum_{ij} P_{ij}^a \left[\sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \right] \right] \right] \right] \quad \forall i, j \quad (5.9)$$

5.4 Başlangıç Matrisi Dengelemesinin Etkisi

Başlangıç matrisinin dengelenmesi işi, problemin çözümünde başlangıç verisi olarak kullanılan kaynak matrise ait her yolculuk değerinin belli bir katsayı ile çarpılarak genişletilmesi ya da daraltılması işlemidir. Eşitlik 5.1' deki amaç fonksiyonu üzerinde düşünüldüğünde, başlangıç matrisi, fonksiyonda belirli bir başlangıç bitiş ikilisi için tüm başlangıç değerlerinin toplamına uygulanan bir oran olarak görünen bir olasılık değeridir. Bundan dolayı, başlangıç matrisi için yapılacak bir dengeleme bu olasılık değerini

etkilemeyecektir. Bu durumda fonksiyonun en optimum çözümü, başlangıç matrisinin dengelenmesinden bağımsız olacaktır.

Eşitlik 5.2 deki amaç fonksiyonuna yönelik olarak, eğer eşitlik 5.2’de tüm t_{ij} ’lerin yerine “ k ” kez t_{ij} ’ler yazılırsa, burada k sıfırdan farklı pozitif dengeleme faktörüdür, ve genişletilirse eşitlik 5.10 elde edilecektir. Eşitlik 5.10’un üçüncü ve altıncı terimleri, 5.12 nolu eşitliği elde etmek için genişletilmiş ve tekrar gruplanmış eşitlik 5.11’e ulaşmayı engellerler. Son iki terim aynıdır, çünkü $\ln(k)$ sabittir ve toplam işaretinden çekip çıkarılabilir, ayrıca toplam T_{ij} ’nin değeri T ’dir, bu sebeplerden ötürü bunlar eşitlik 5.13’e götüren dengelemeyi geçersiz hale getirirler. Eşitlik 5.13, k ’dan bağımsızdır, 5.2 nolu eşitlikte amaç fonksiyonu, k ölçüm faktörlerinden bağımsızdır.

$$Z(T_{ij}, t_{ij}) = T \ln(T) - T \ln(kt) - T - \sum_{ij} T_{ij} \ln(T_{ij}) + \sum_{ij} T_{ij} \ln(kt_{ij}) + \sum_{ij} T_{ij} \quad (5.10)$$

$$Z(T_{ij}, t_{ij}) = T \ln(T) - T \ln(kt) - T - \sum_{ij} T_{ij} \ln(T_{ij}) + \sum_{ij} T_{ij} \ln(kt_{ij}) \quad (5.11)$$

$$Z(T_{ij}, t_{ij}) = T \ln(T) - T \ln(t) - \sum_{ij} T_{ij} \ln(T_{ij}) + \sum_{ij} T_{ij} \ln(t_{ij}) - T \ln(k) + \sum_{ij} T_{ij} \ln(k) \quad (5.12)$$

$$Z(T_{ij}, t_{ij}) = T \ln(T) - T \ln(t) - \sum_{ij} T_{ij} \ln(T_{ij}) + \sum_{ij} T_{ij} \ln(t_{ij}) \quad (5.13)$$

Eşitlik 5.3 ve eşitlik 5.2 için açıklanan yöntem takip edilerek (dengeleme ve genişletmeden sonra) eşitlik 5.14’ü elde ederiz. Beş bağlı yol ağında olduğu gibi yolculuk sayısının toplamı sabit olduğunda son terimin de sabit olacağı açıktır. Böyle bir durumda amaç fonksiyonunun değeri değişse bile optimum çözüm değişmeyecektir. Bu durum, şekil 5.3’te görülebilmektedir.

Toplam yolculuklar, iki bağlı yol ağında olduğu gibi sabit olmadığında, şekil 5.4’de görüleceği üzere, dengeleme faktörü optimum çözümü etkileyecektir. Eşitlik 5.4, dengeleme faktörüne dayalı olarak amaç fonksiyonunun değerini aşağı ve yukarı itecek olan eşitlik 5.3’te var olanların dışında, ek olarak bir başlangıç ifadesine sahiptir. İçinde eşitlik 5.3’ü barındırdığından bu eşitliktekinе benzer bir duruma eşitlik 5.4’te de rastlanmaktadır. Bu durumun, beş bağlı yol ağı için, optimum çözümü değiştirmede Şekil 5.5’te açıkça anlatılmaktadır. Şekil 5.6’da, başlangıç matrisi dengelemesi, toplam yolculuk sayısının (T) sabit olmadığı iki bağlı yol ağı için uygulandığında optimum çözüm değişmektedir.

$$Z(T_{ij}, t_{ij}) = -\sum_{ij} T_{ij} \ln(T_{ij}) + \sum_{ij} T_{ij} \ln(t_{ij}) + \sum_{ij} T_{ij} \ln(k) \quad (5.14)$$

Tüm t_{ij} ' leri ' k ' kez t_{ij} ' ler ile değiştirdiğimiz ve genişleterek eşitlik 5.15'i elde etmekte kullandığımız eşitlik 5.5'i incelemek gerekmektedir. 5.15 numaralı eşitlik yeniden düzenlendiğinde eşitlik 5.16'yı vermektedir.

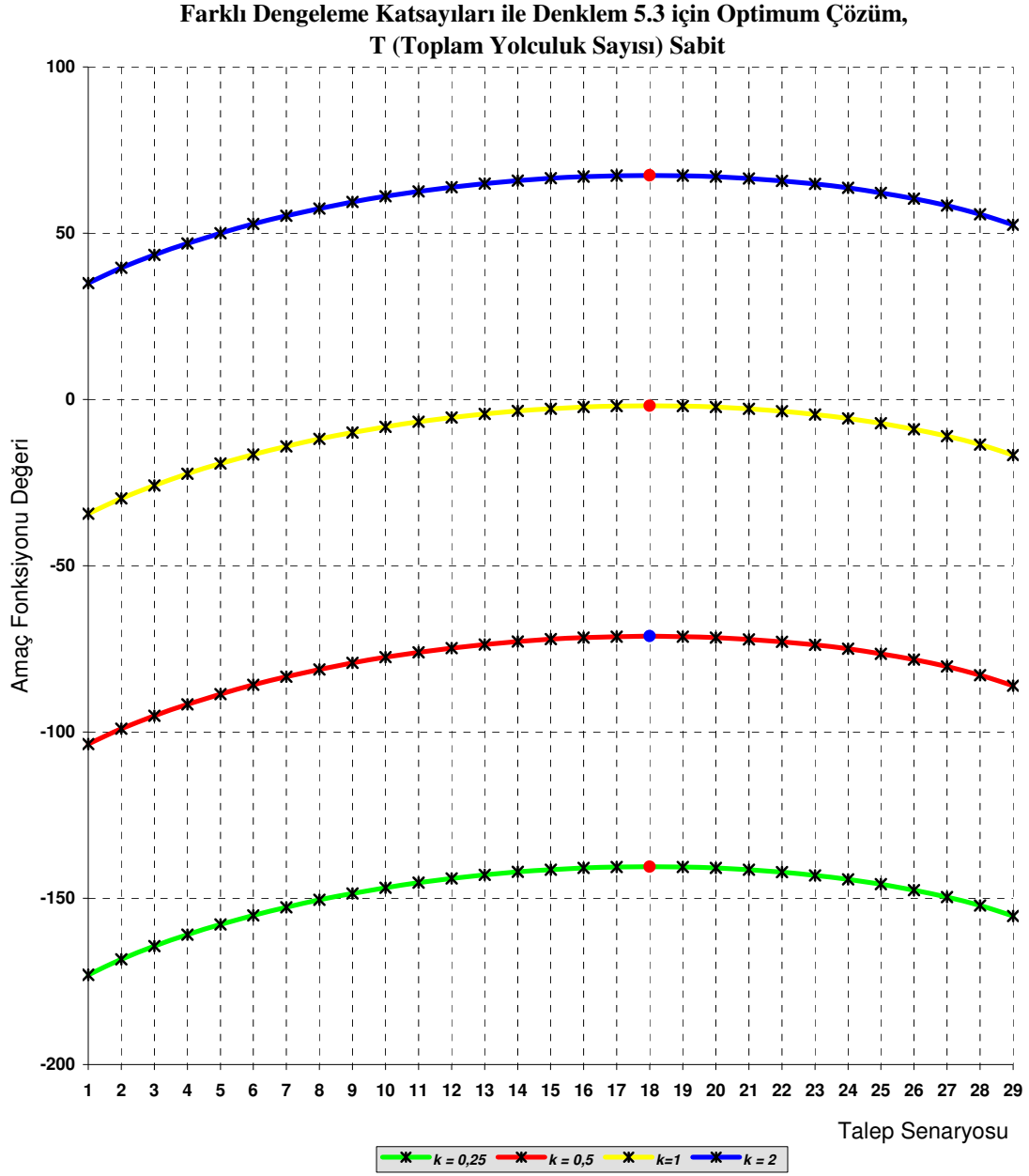
$$Z(T_{ij}, t_{ij}) = \sum_{ij} \frac{k^2 t_{ij}^2}{2T_{ij}} + \sum_{ij} \frac{T_{ij}}{2} - \sum_{ij} k t_{ij} \quad (5.15)$$

$$Z(T_{ij}, t_{ij}) = k^2 \sum_{ij} \frac{t_{ij}^2}{2T_{ij}} + \sum_{ij} \frac{T_{ij}}{2} - k \sum_{ij} t_{ij} \quad (5.16)$$

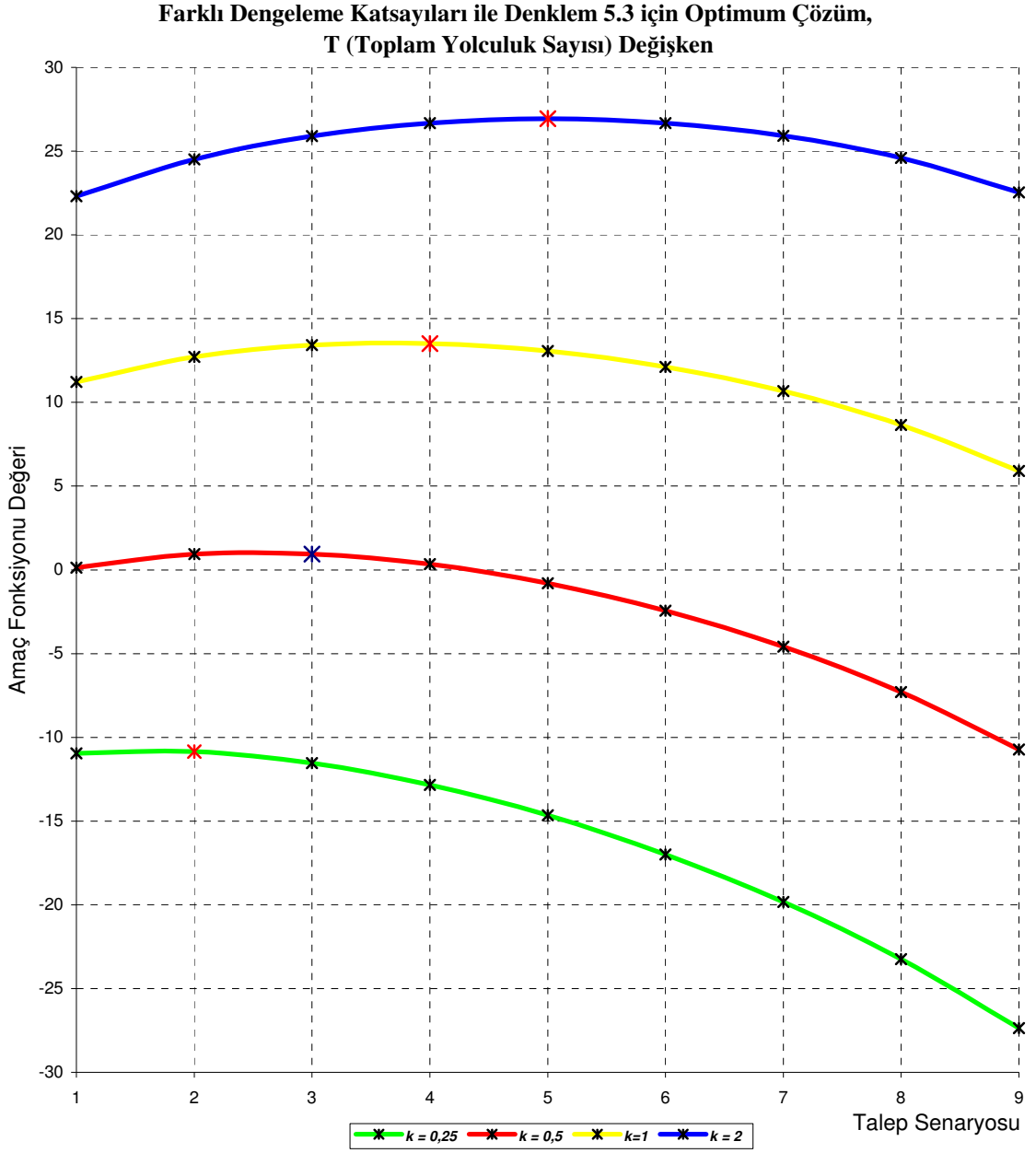
Görüldüğü üzere, eğer yolculuk sayılarının toplamı sabitse yukarıdaki ifadede yer alan son iki terim de sabittir ve bu, optimum çözümü tanımlayan ilk terimdir. Bundan dolayı, beş bağlı yol ağında olduğu gibi, eğer toplam yolculuklar sabitse, başlangıç matrisinin dengelenmesi optimum çözümü etkilemeyecektir. Fakat, iki bağlı yol ağında olduğu gibi toplam yolculukların sayısı değişken ise, dengeleme işlemi optimum çözümü etkileyecektir. Bu durum şekil 5.7 ve 5.8'de açıkça anlatılmaktadır. 5.5 eşitliğinde yapılan işlemler ile aynı işlemler eşitlik 5.6 için de uygulandığında sonuç olarak eşitlik 5.17' ye ulaşılmaktadır.

$$Z(T_{ij}, t_{ij}) = \frac{1}{k} \sum_{ij} \frac{T_{ij}}{2t_{ij}} + k \sum_{ij} \frac{t_{ij}}{2} - \sum_{ij} T_{ij} \quad (5.17)$$

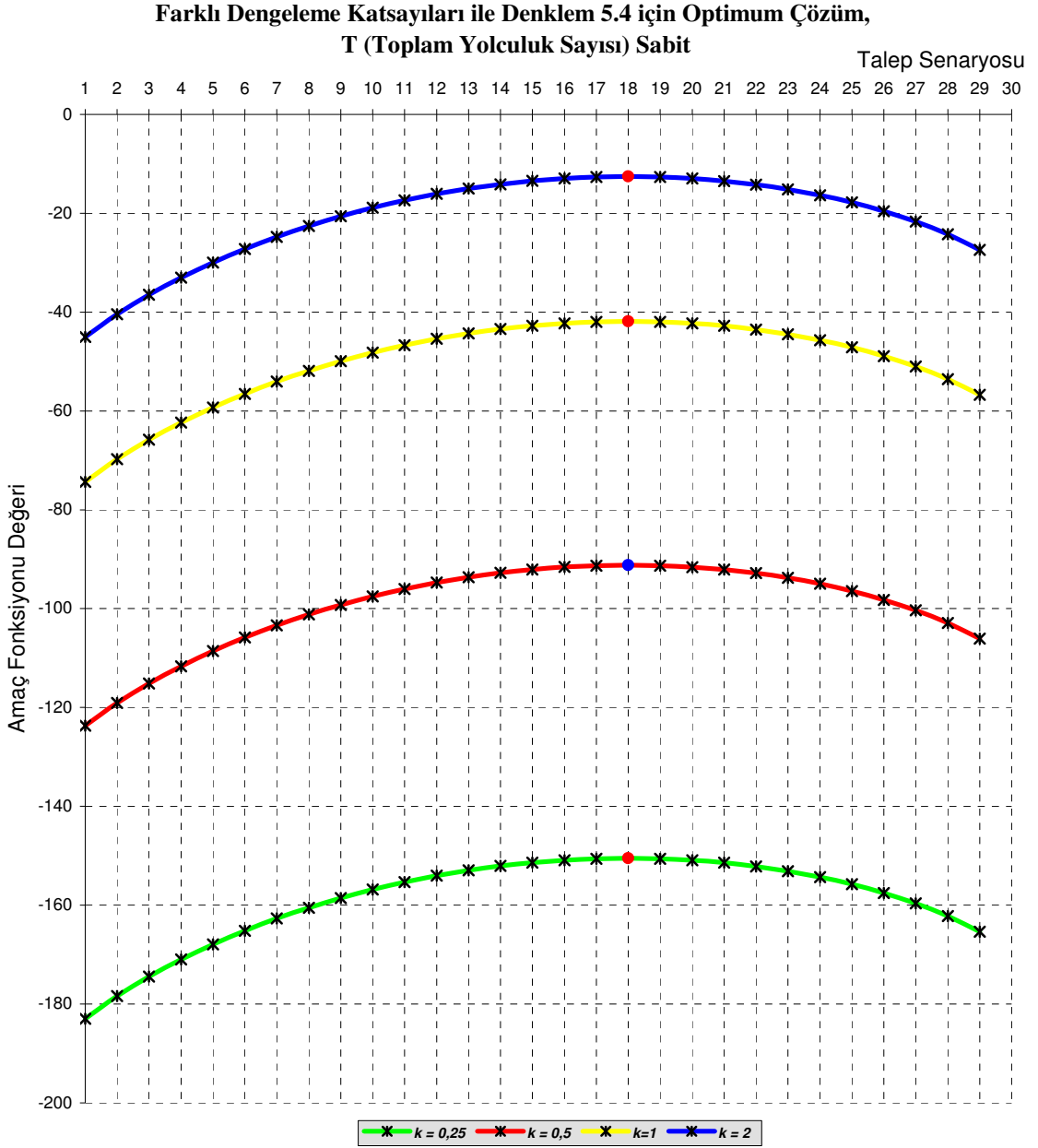
Eşitlik 5.17'ye dikkatlice bakılırsa; yolculuk değerleri toplamı sabit olduğunda optimum çözüm, başlangıç matrisinin dengelenmesinden bağımsızdır. Bununla birlikte toplam yolculuklar sabit değilse, başlangıç matrisinin dengelenmesi optimum çözümü etkiler. Bu durum şekil 5.9 ve 5.10'da gösterilmektedir. Eşitlik 5.7 ve 5.8 için başlangıç matrisi bir oran olarak eşitliklerde yer alır ve bu sebepten dolayı başlangıç matrisinin dengelenmesi en son elde edilecek optimum çözüm üzerinde herhangi bir etkiye sahip değildir. Eşitlik 5.9 veya tek basamak yaklaşımı ile ilgili olarak; herhangi bir dengeleme faktörü, başlangıç matris değerleri logaritmalarının farklılığı sebebi ile kullanılmamaktadır. Bu durumda başlangıç matrisinin dengelenmesi için kullanılacak katsayılar sonuç çözümü üzerinde hiçbir etkiye sahip olmayacaktır.



Şekil 5.3 Eşitlik 5.3'ü kullanarak 5 bağlı yol ağı için farklı katsayılarda optimum çözüm.

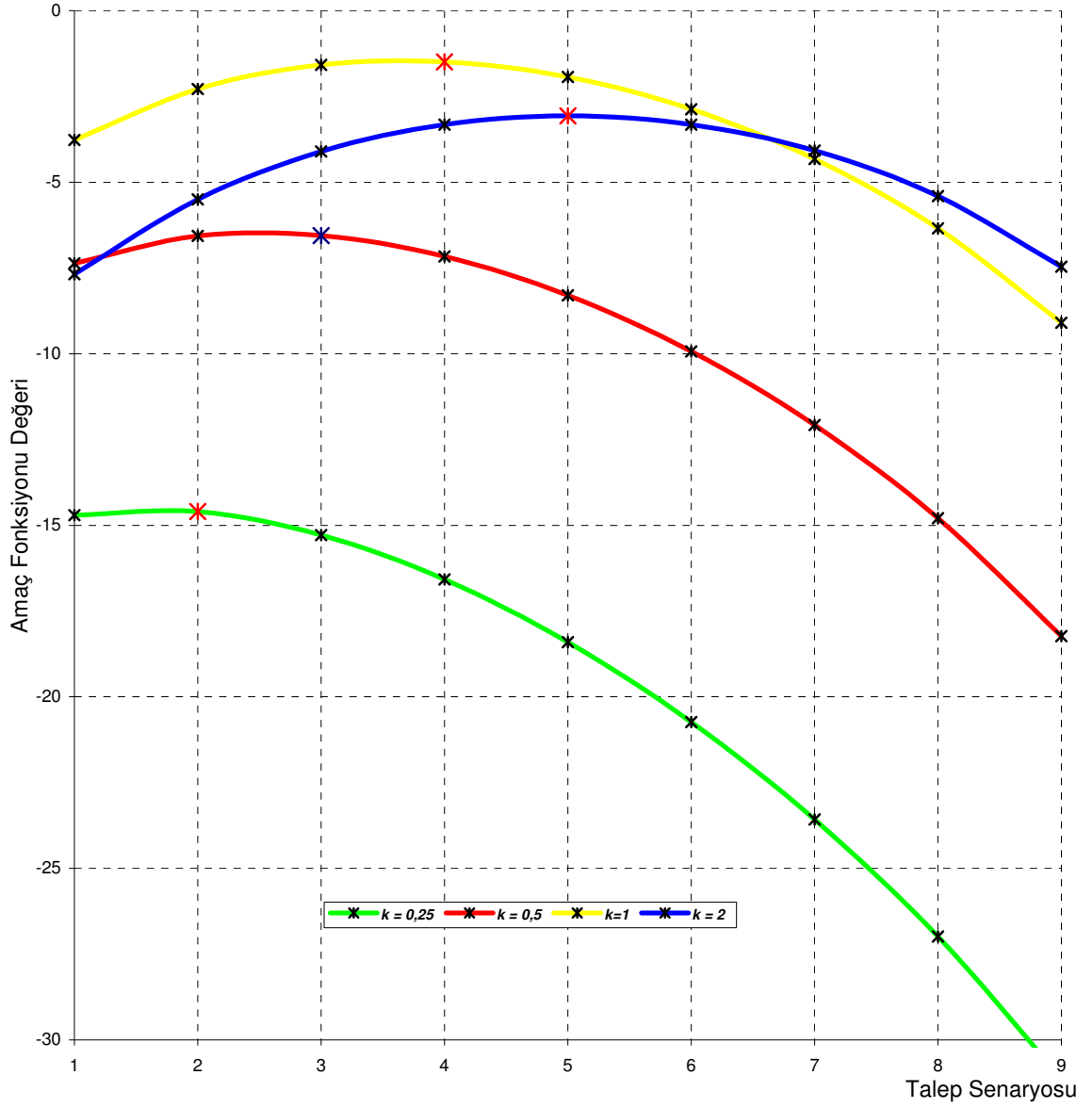


Şekil 5.4 Eşitlik 5.3'ü kullanarak 2 bağlı yol ağı için farklı katsayılarda optimum çözüm.

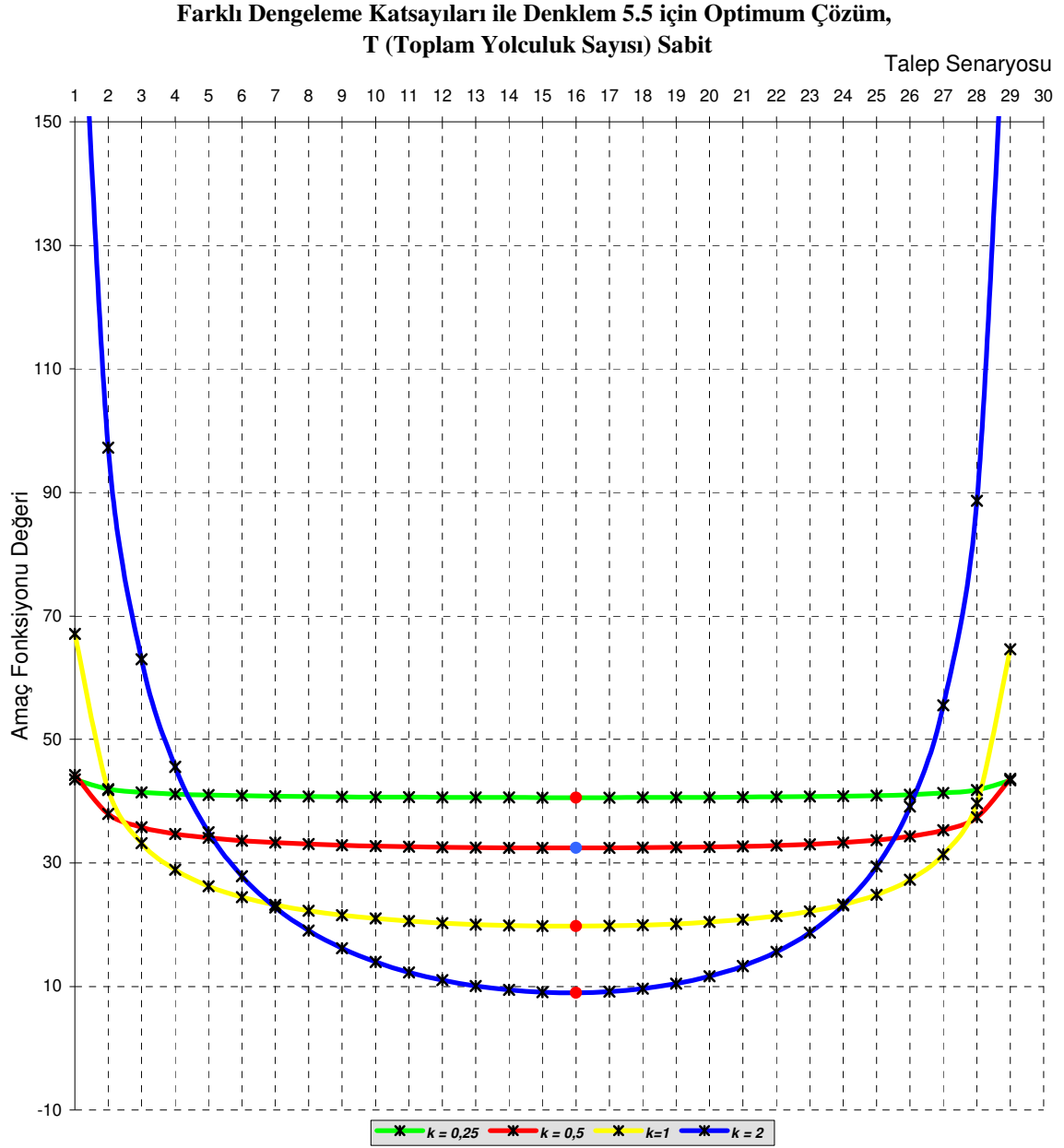


Şekil 5.5 Eşitlik 5.4'ü kullanarak 5 bağlı yol ağı için farklı katsayılarda optimum çözüm.

Farklı Dengeleme Katsayıları ile Denklem 5.4 için Optimum Çözüm,
T (Toplam Yolculuk Sayısı) Değişken

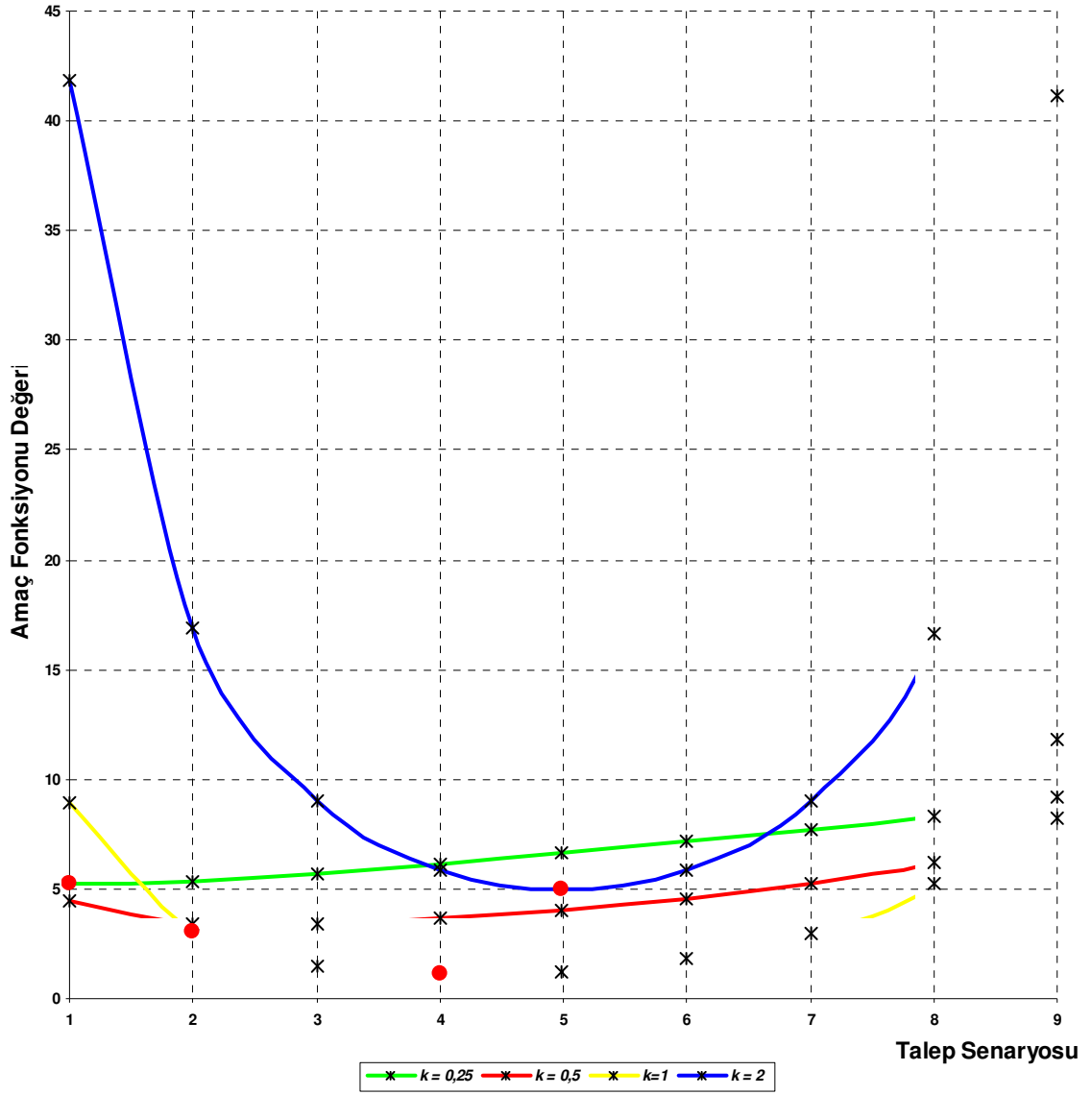


Şekil 5.6 Eşitlik 5.4'ü kullanarak 2 bağlı yol ağı için farklı katsayılarda optimum çözüm.

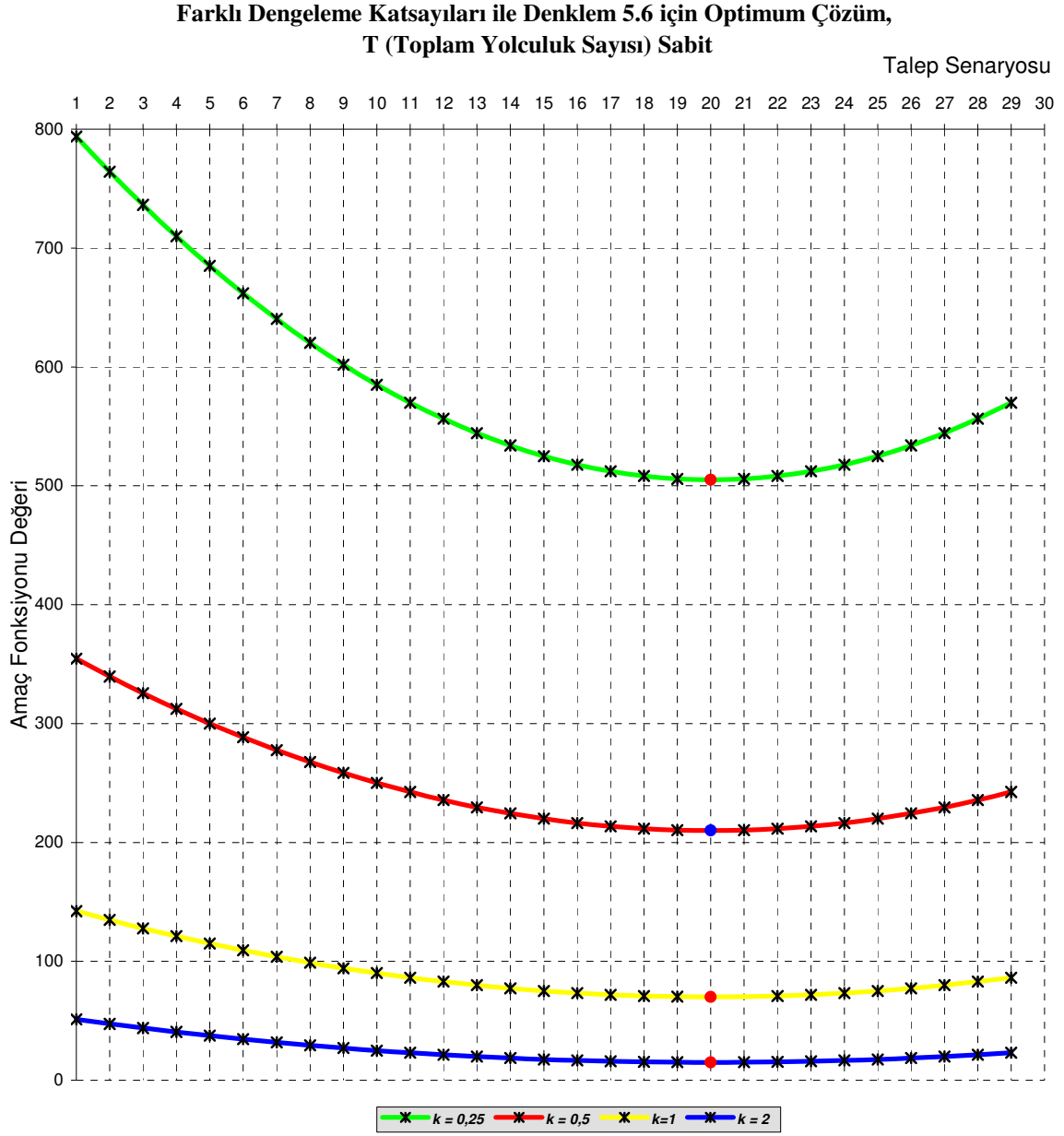


Şekil 5.7 Eşitlik 5.5'i kullanarak 5 bağlı yol ağı için farklı katsayılarda optimum çözüm.

Farklı Dengeleme Katsayıları ile Denklem 5.5 için Optimum Çözüm,
T (Toplam Yolculuk Sayısı) Değişken

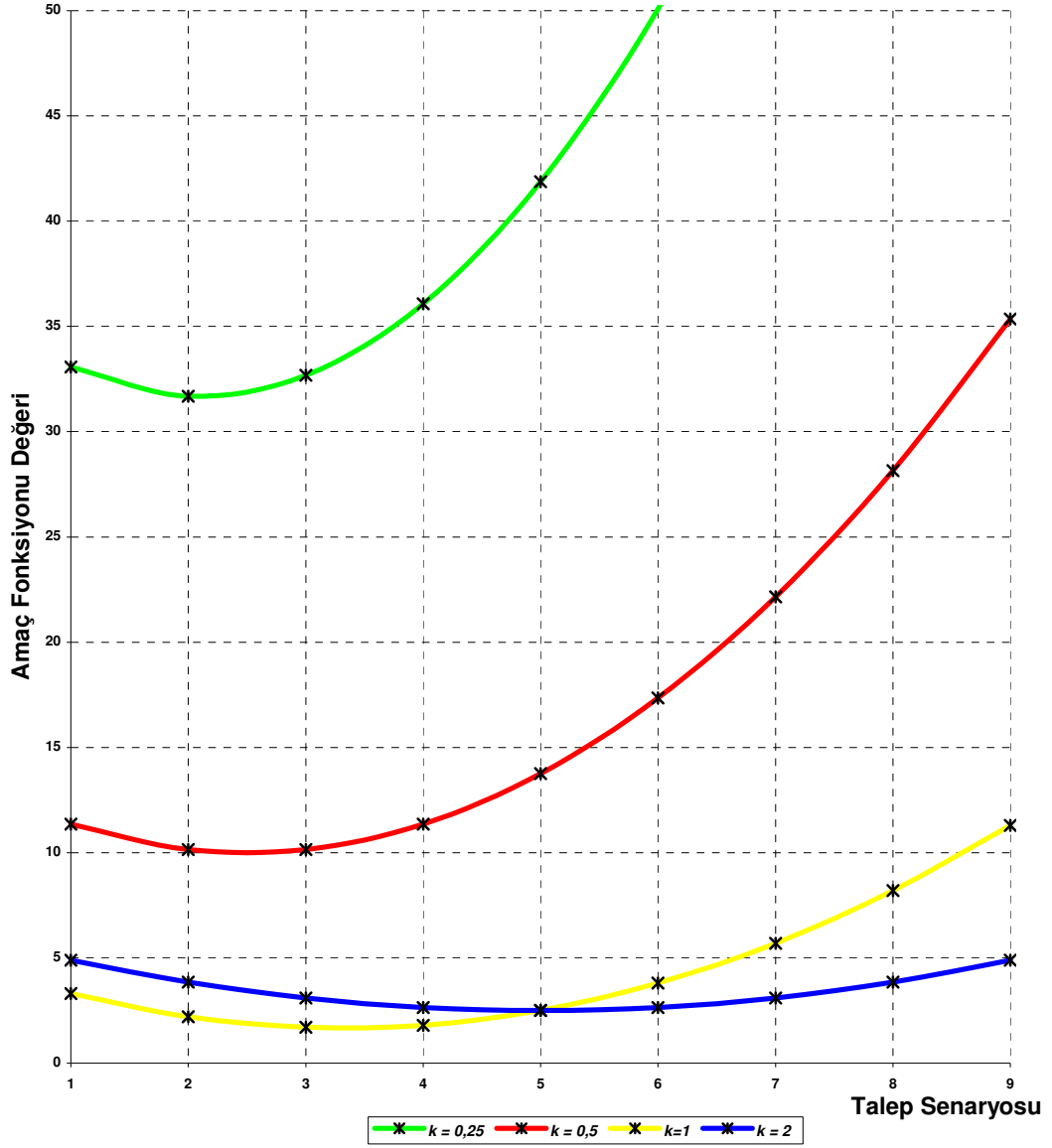


Şekil 5.8 Eşitlik 5.5'i kullanarak 2 bağlı yol ağı için farklı katsayılarda optimum çözüm.



Şekil 5.9 Eşitlik 5.6'yı kullanarak 5 bağlı yol ağı için farklı katsayılarda optimum çözüm.

Farklı Dengeleme Katsayıları ile Denklem 5.6 için Optimum Çözüm,
T (Toplam Yolculuk Sayısı) Değişken



Şekil 5.10 Eşitlik 5.6'yı kullanarak 2 bağlı yol ağı için farklı katsayılarda optimum çözüm.

5.5 Ünitorm Başlangıç Matrisinin Etkisi

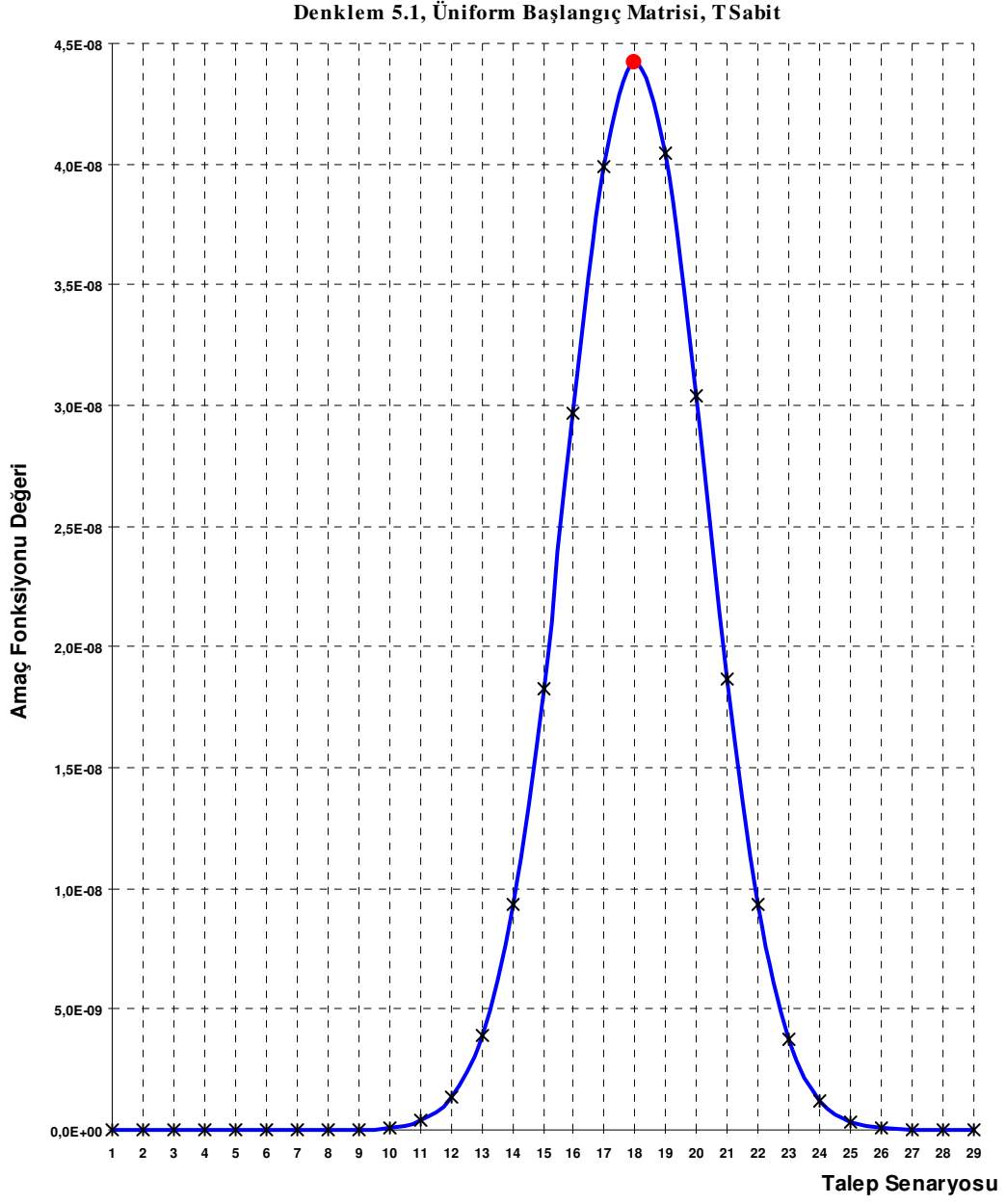
Çeşitli amaç fonksiyonları üzerinde, farklı bir üniform başlangıç matrisi kullanmanın yaratacağı etkileri görmek önemlidir. Bunun sebebi, geçmiş çalışmalardan elde edilmiş bir matrisin mevcut olmaması durumunda nasıl bir başlangıç matrisinin kullanılabilceğı sorusudur. Bu gibi durumlarda üniform bir başlangıç matrisi oluşturmak için daha farklı bir çalışma yapılmaktadır. Başlangıç matrisinin dengelenmesi konusunda belirtildiğı gibi dengeleme için kullanılacak katsayıların, bazı amaç fonksiyonları için optimum çözümlü değıştirecek etkiye sahip olduğı anlaşılmaktadır. Eşit bir karşılaştırma için, örnek olarak seçilmiş her iki yol ağında geçerli olmak üzere başlangıç matrisi değeri tüm hücrelerde 10 olarak alınmıştır.

Çizelge 5.7' de üniform başlangıç matrisi kullanılarak elde edilen sonuçlar özetlemektedir. Optimum çözümlü, 5-bağlı yol ağı için, çizelge 5.3'te ve 2-bağlı örnek için çizelge 5.6'da verilen senaryo numarası ile gösterilmektedir. Çözümlü yapılrken, örnek yol ağlarına ait senaryolar için de geçerli olmak üzere ilk ve son talep senaryoları dikkate alınmaz, ilk ve son senaryolardaki yolculukların bir tanesinin "0" değeri alması, logaritması alındığında sonucu negatif sonsuz değere götürmektedir. Eşitlik 5.9 ve tek basamak yaklaşımının çözümlü için özel bir algoritmaya sahip olan QUEENS-OD programının kullanılması gerekmekte ve bu çalışmada diğer sonuçlarla karşılaştırma yapabilmek amacıyla sadece QUEENS-OD'den elde edilen sonuçlar alınmıştır.

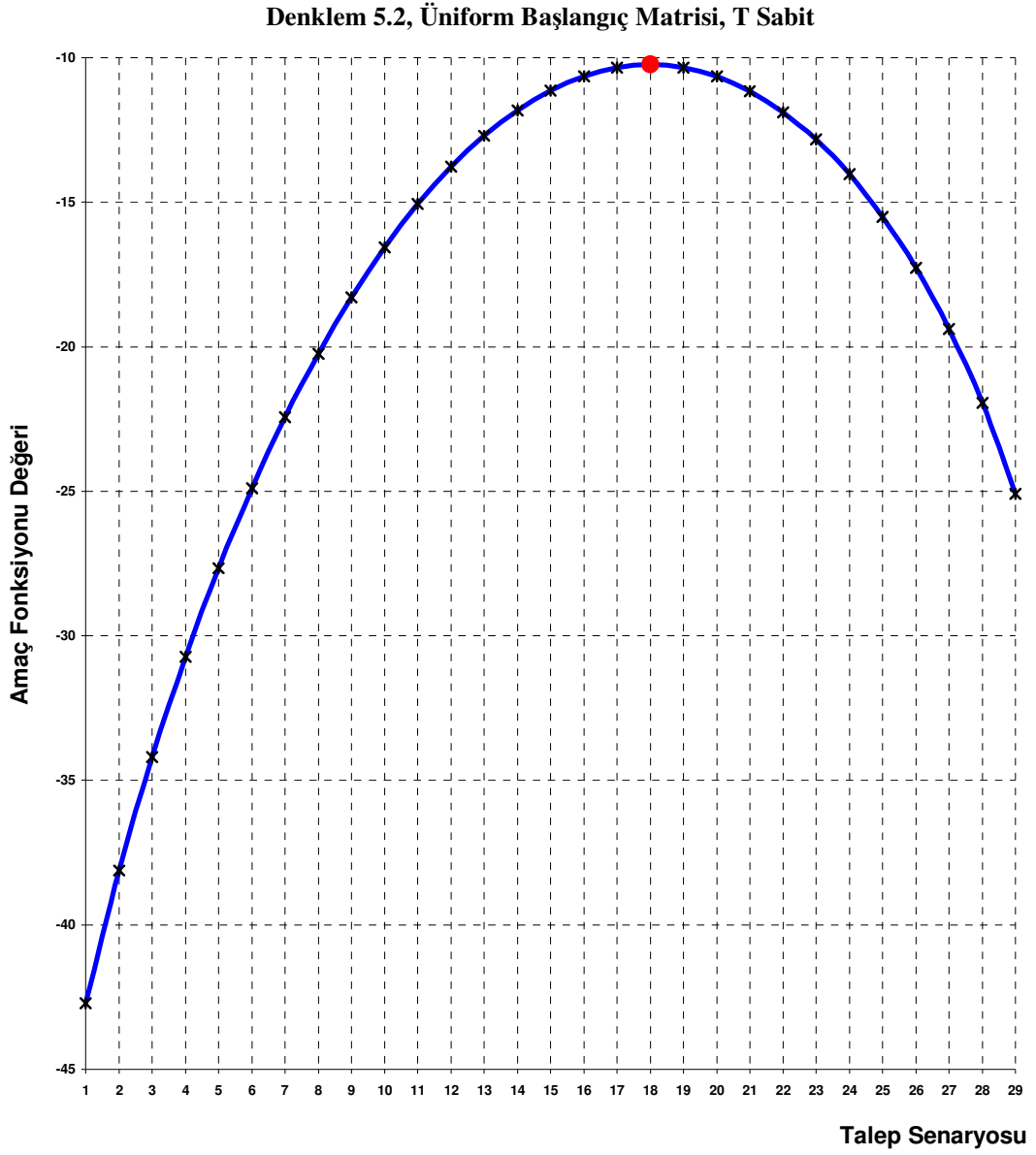
Şekil 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17. ve 5.18 de verilen grafikler, 5-bağlı yol ağı ile ilgili tüm eşitliklerden elde edilen optimum çözümlü gösterirken, Şekil 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 ve 5.23 ile verilen grafikler ise 2-bağlı yol ağı ile ilgili tüm eşitlikler için optimum çözümlü göstermektedirler. Çizelgeden açıkça görüldüğü üzere, 5-bağlı yol ağında olduğı gibi, eşitlik 5.5 ve 5.6 hariç olmak üzere toplam yolculuk sayısı sabit olduğı zaman tüm eşitlikler aynı optimum çözümlü vermektedirler. 2-bağlı yol ağında ki gibi toplam yolculuk sayısı değişken olduğunda, eşitlik 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6 optimum çözümlüden sapmaktadır. Bunlara ek olarak, üniform başlangıç matrisine bağımlı olan optimum çözümlüdeki değişim aralığı, bu 4 eşitlik için, başlangıç matrisi dengelemesinin hassasiyeti ile aynı derecededir.

Çizelge 5.7 Üniform başlangıç matrisi için optimum sonuç karşılaştırması.

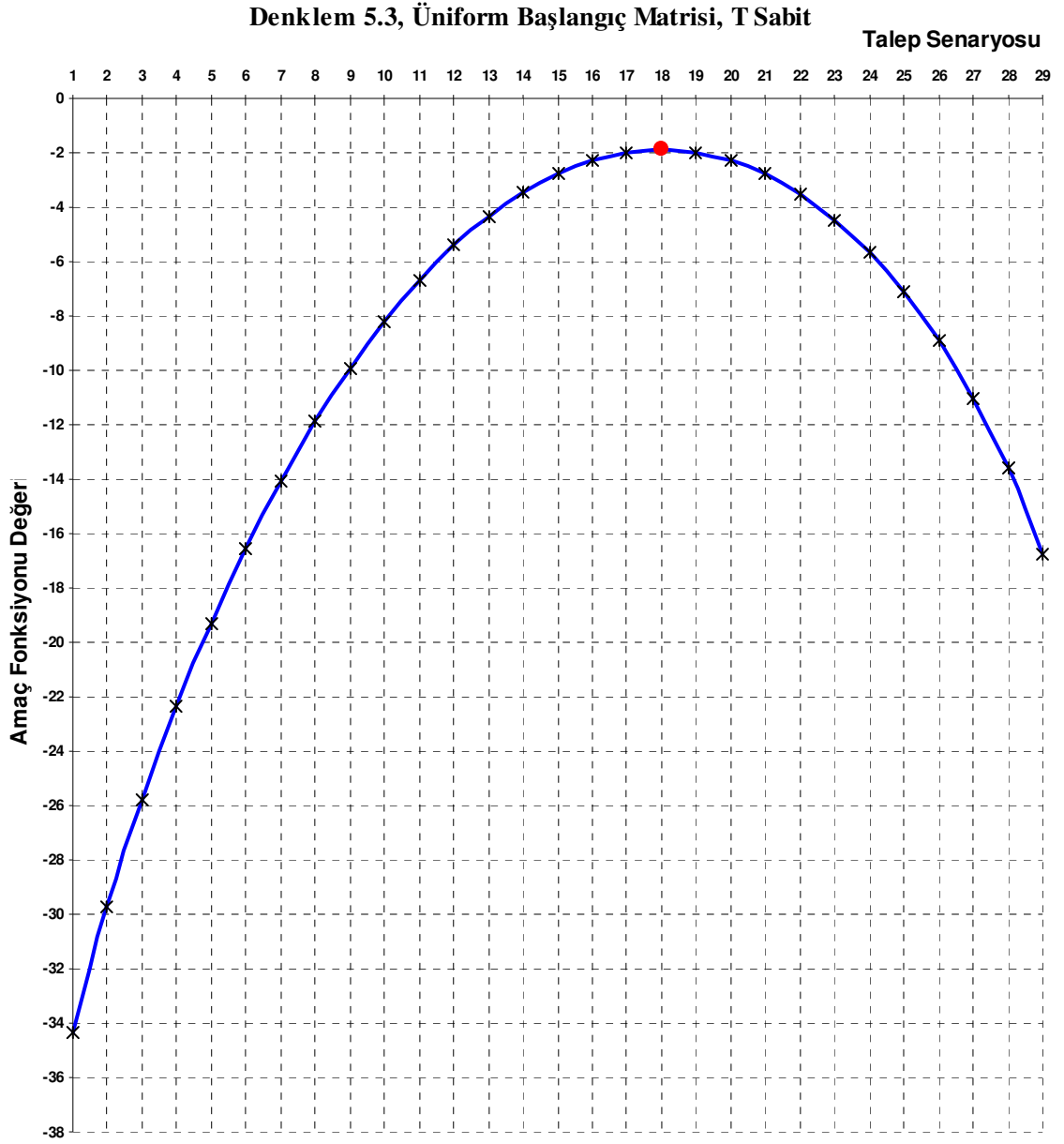
EŞİTLİK NO	5 BAĞLI YOL AĞI	2 BAĞLI YOL AĞI
Eşitlik 5.1	18	4
Eşitlik 5.2	18	4
Eşitlik 5.3	18	5
Eşitlik 5.4	18	-
Eşitlik 5.5	16	-
Eşitlik 5.6	20	-
Eşitlik 5.7	18	4
Eşitlik 5.8	18	4
Eşitlik 5.9	18	4



Şekil 5.11 Eşitlik 5.1'i kullanarak 5 bağlı yol ağı için optimum çözüm.



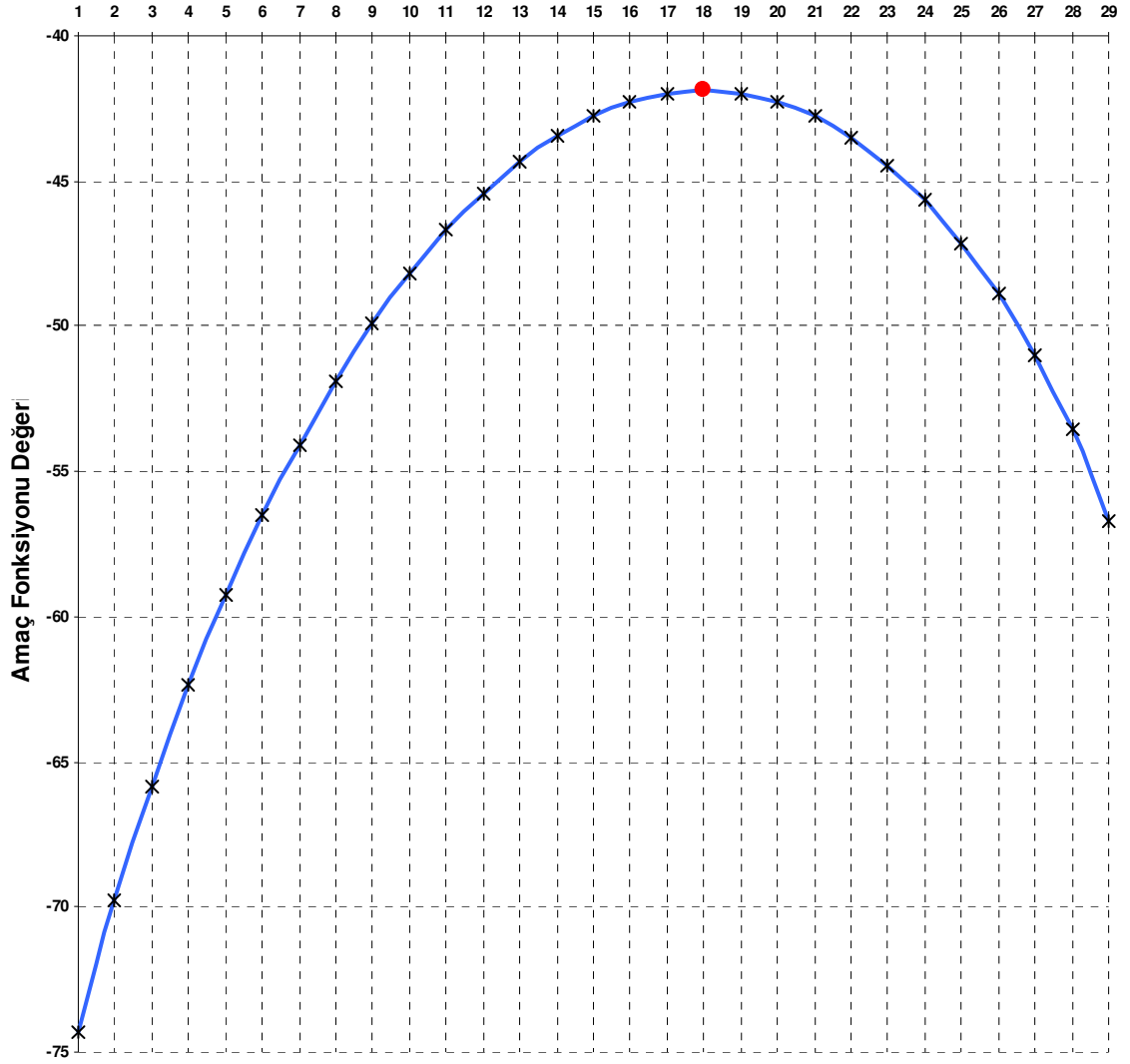
Şekil 5.12 Eşitlik 5.2'yi kullanarak 5 bağlı yol ağı için optimum çözüm.



Şekil 5.13 Eşitlik 5.3'ü kullanarak 5 bağılı yol ağı için optimum çözüm.

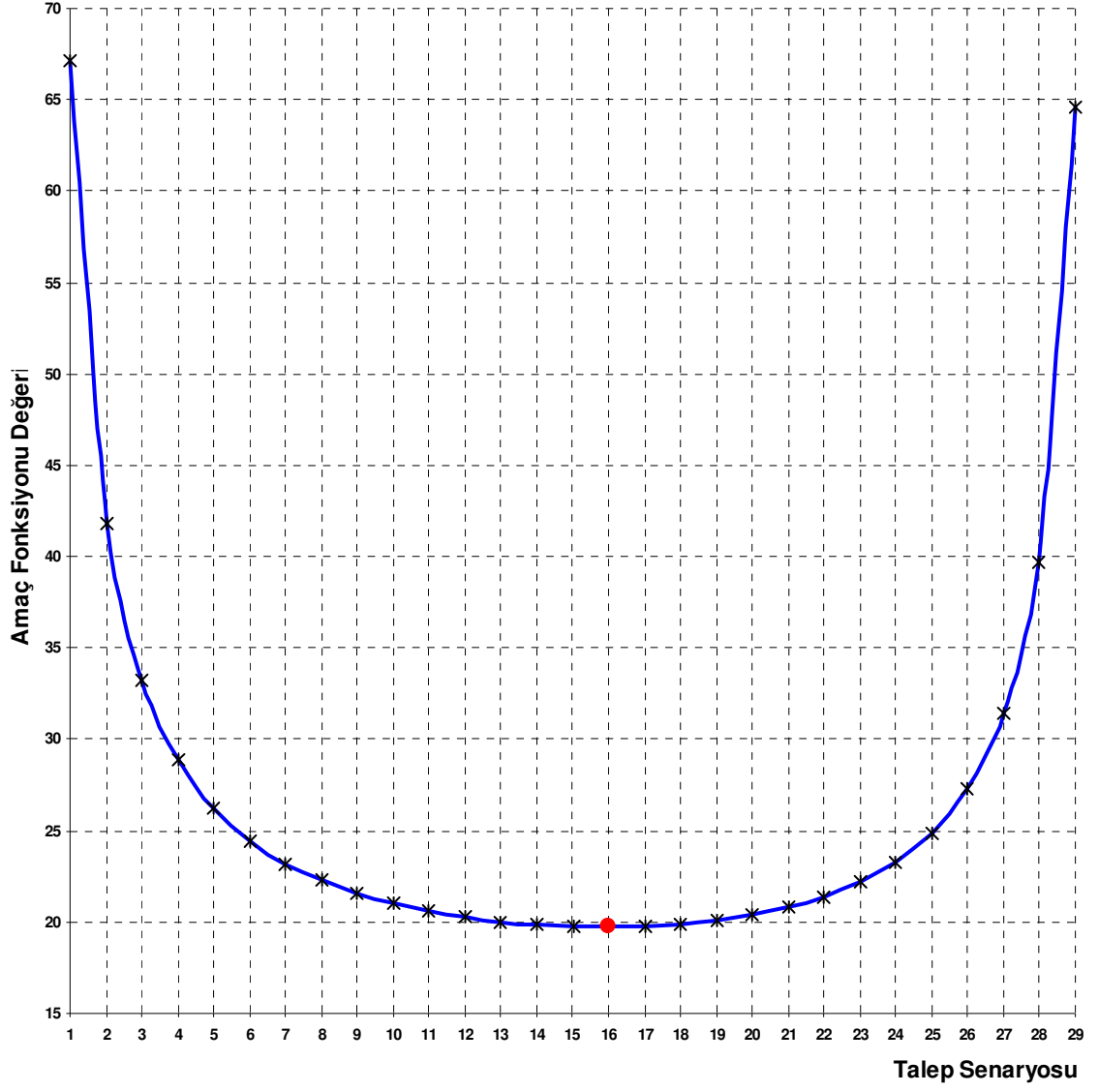
Denklemler 5.4, Ünlorm Başlangıç Matrisi, T Sabit

Talep Senaryosu



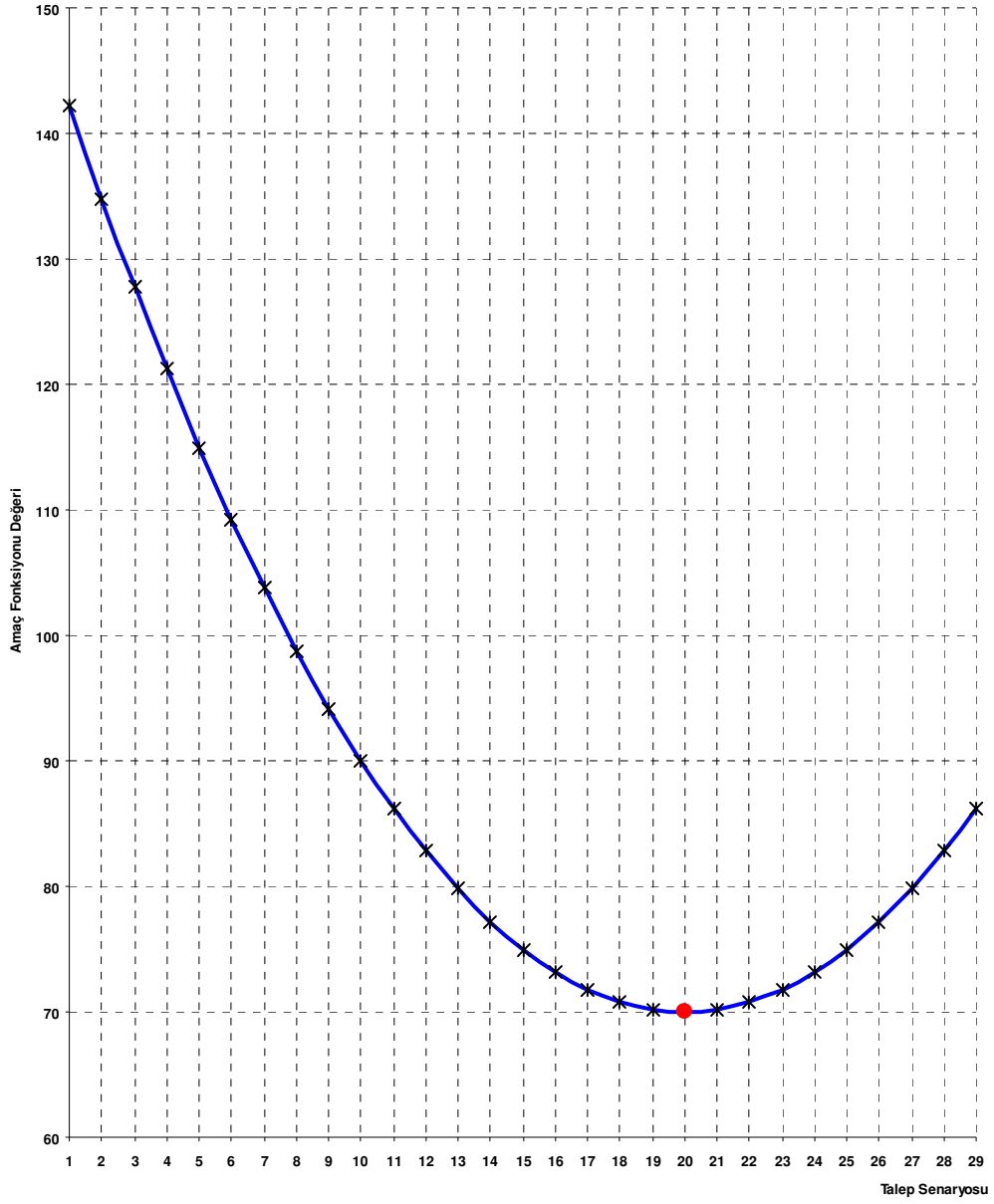
Şekil 5.14 Eşitlik 5.4'ü kullanarak 5 bağılı yol ağı için optimum çözüm.

Denklemler 5.5, Üniform Başlangıç Matrisi, T Sabit



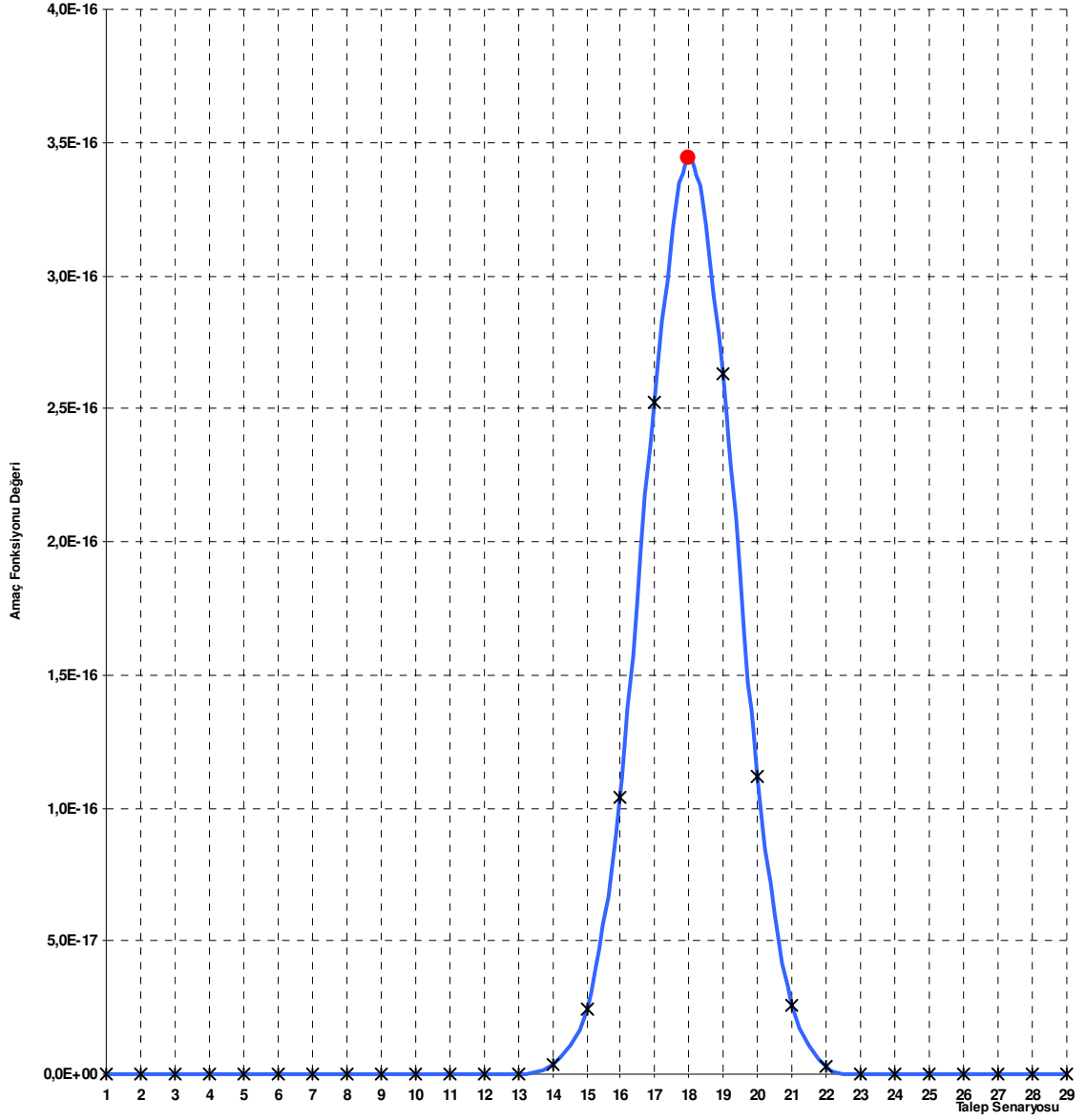
Şekil 5.15 Eşitlik 5.5'i kullanarak 5 bağılı yol ağı için optimum çözüm.

Denklemler 5.6, Üniform Başlangıç Matrisi, T Sabit



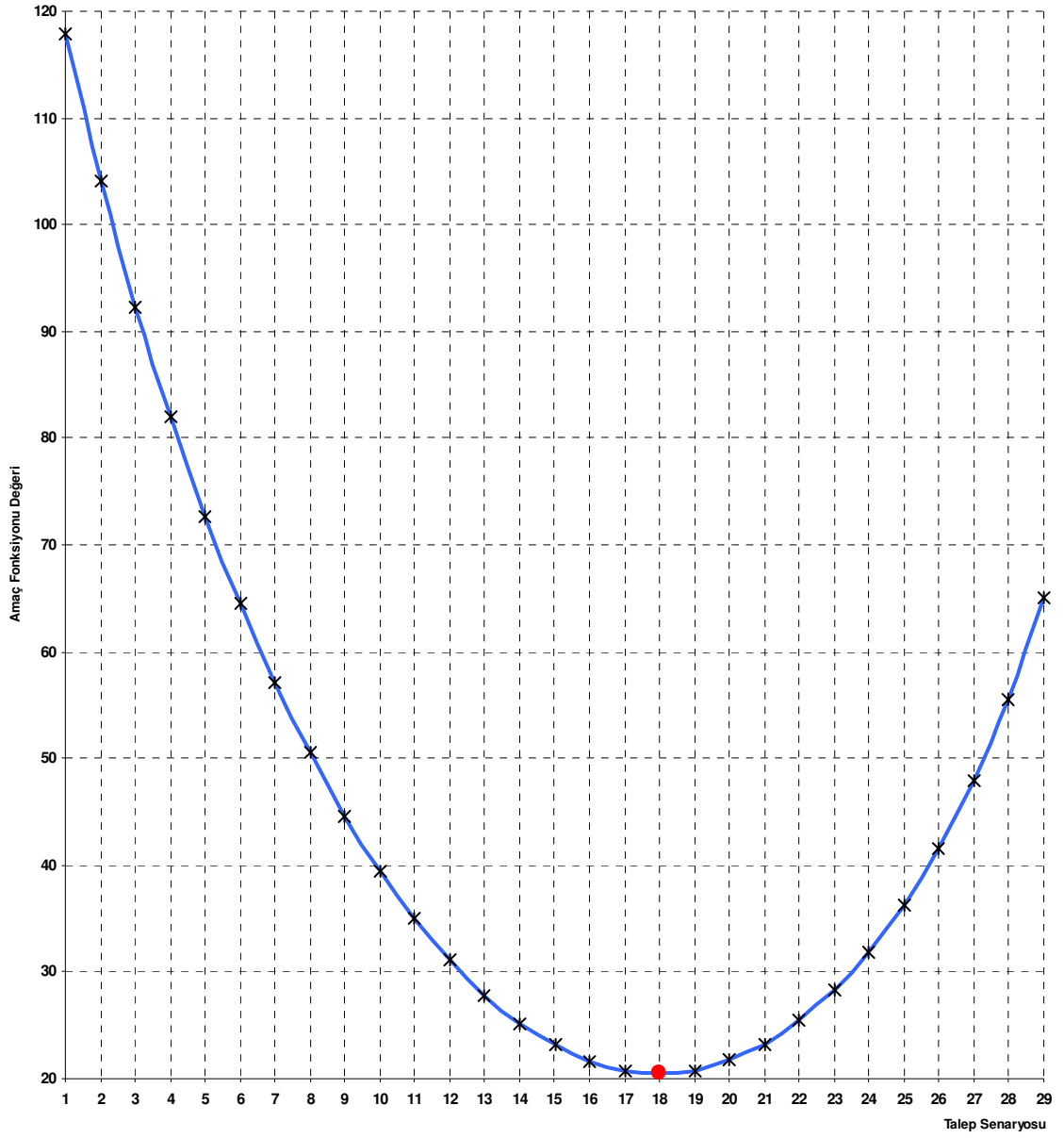
Şekil 5.16 Eşitlik 5.6'yı kullanarak 5 bağılı yol ağı için optimum çözüm.

Denklem 5.7, Üniform Başlangıç Matrisi, T Sabit

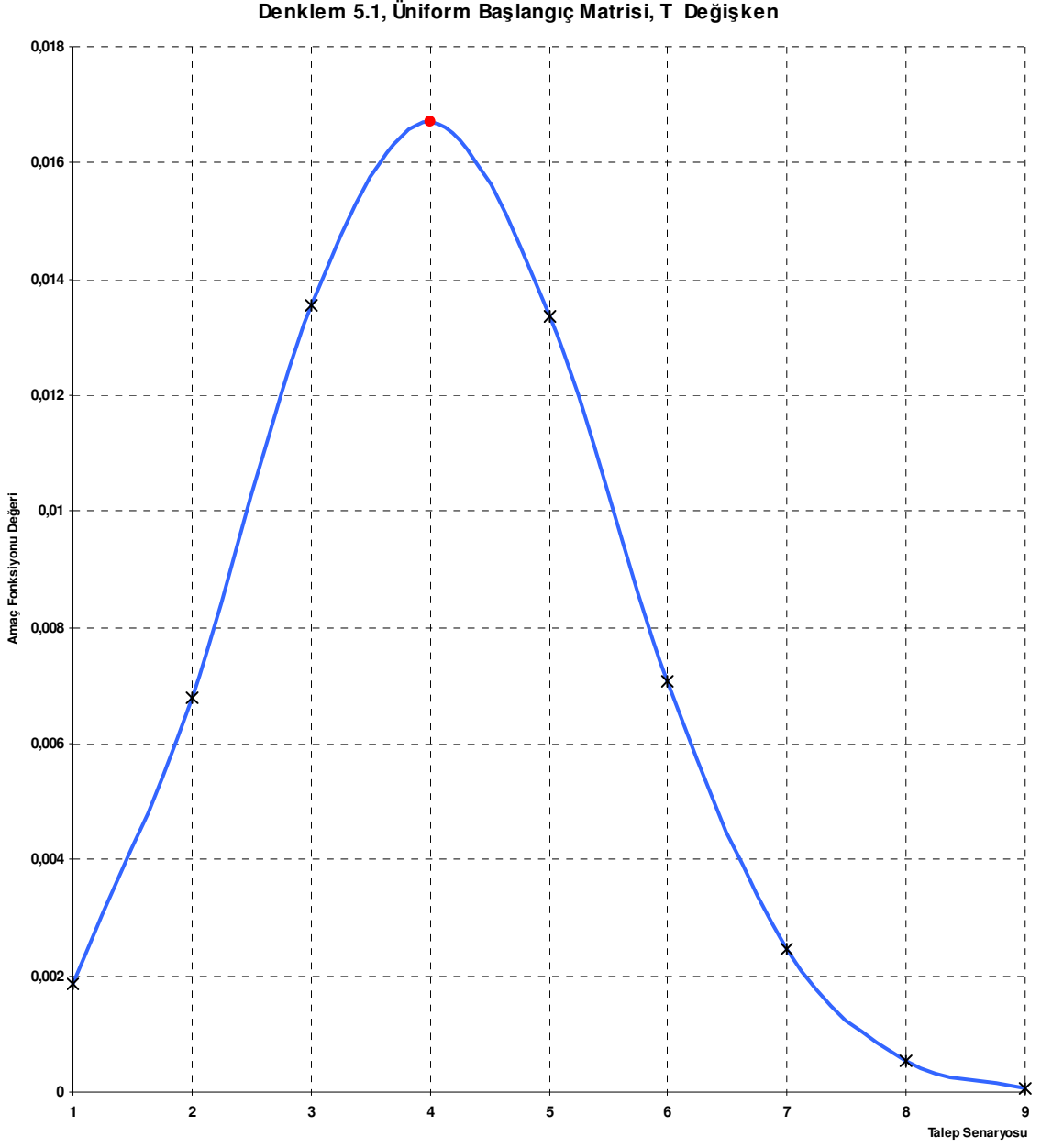


Şekil 5.17 Eşitlik 5.7'yi kullanarak 5 bağlı yol ağı için optimum çözüm.

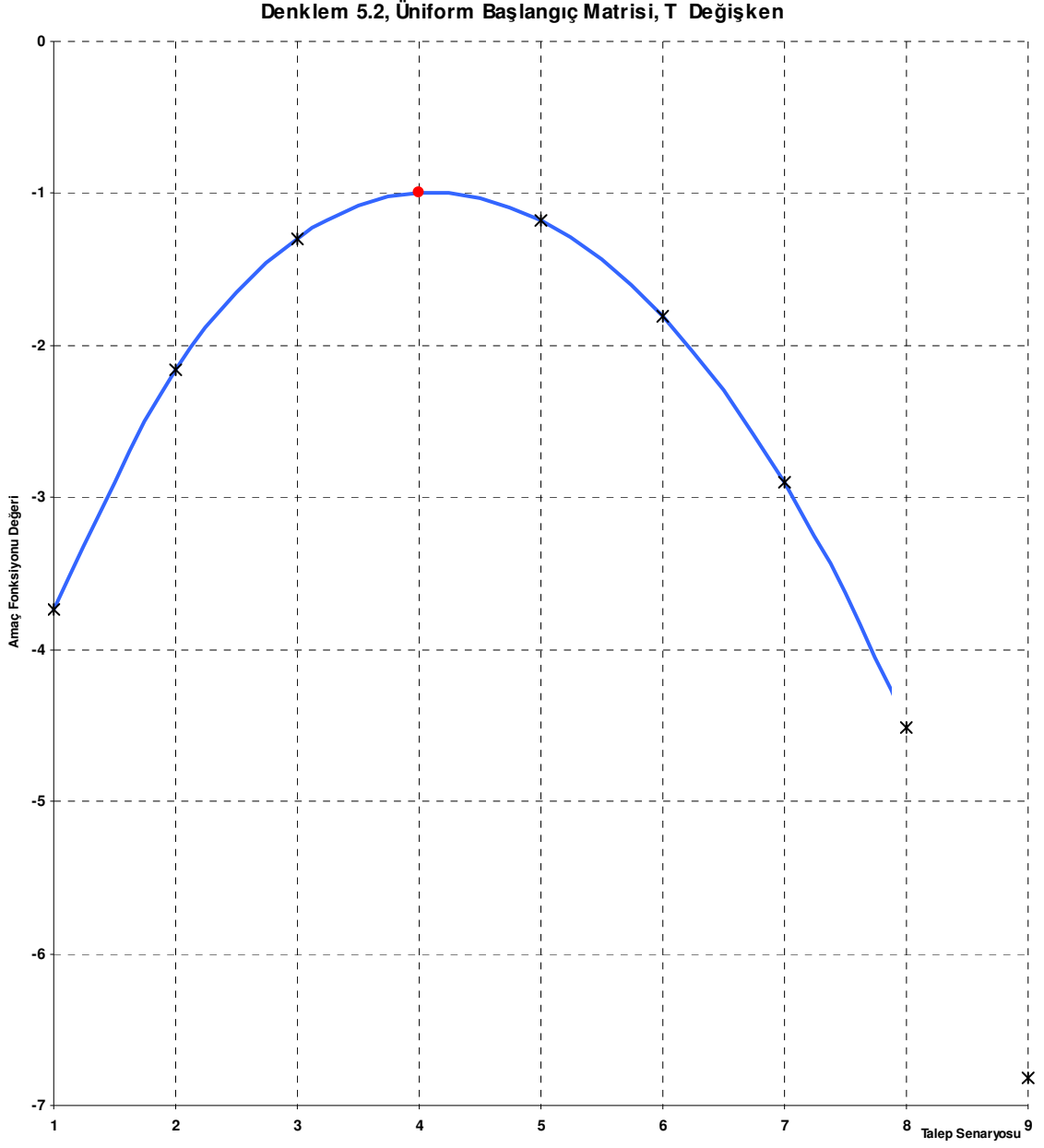
Denklemler 5.8, Ünlümler Başlangıç Matrisi, T Sabit



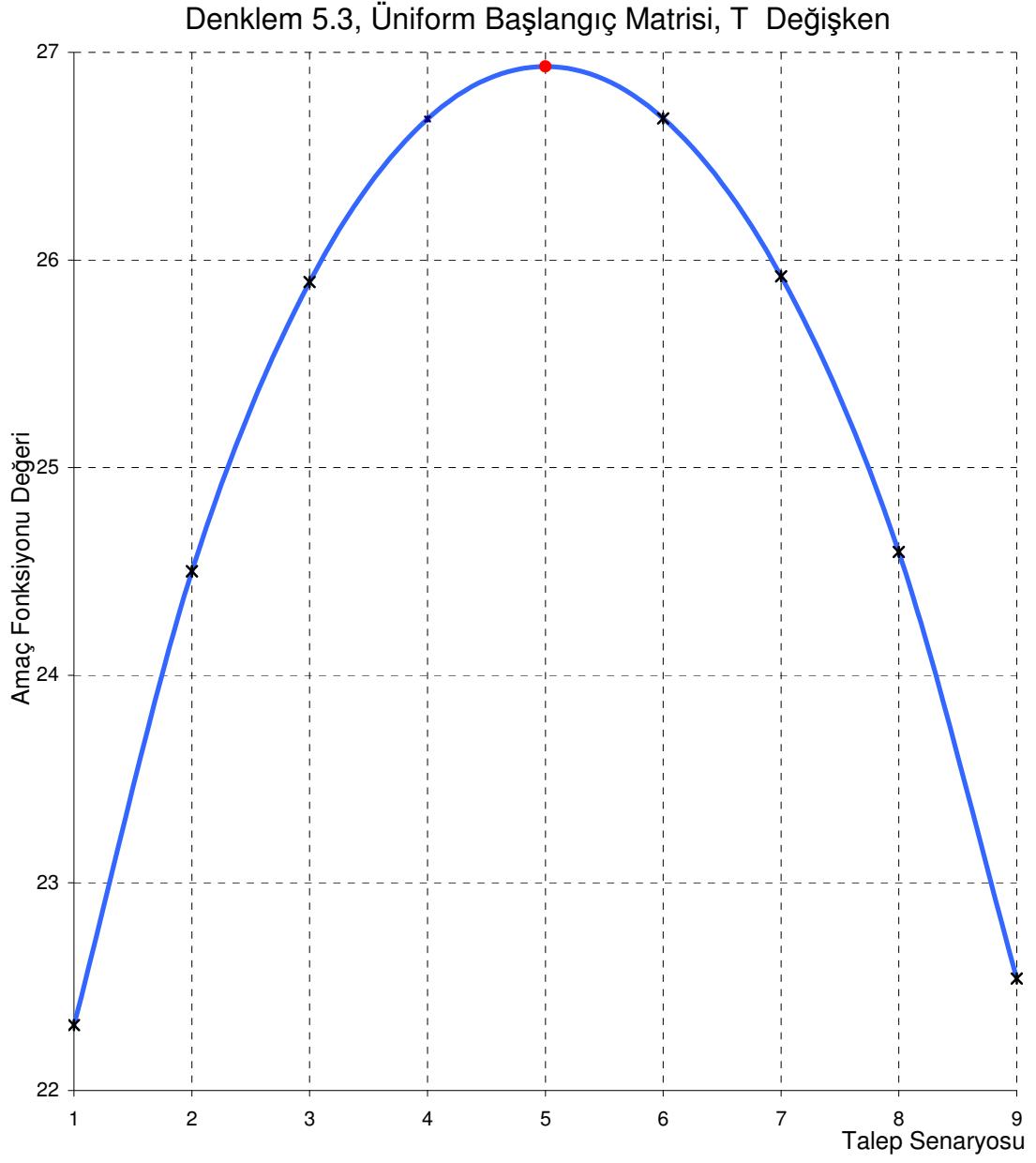
Şekil 5.18 Eşitlik 5.8'i kullanarak 5 bağılı yol ağı için optimum çözüm.



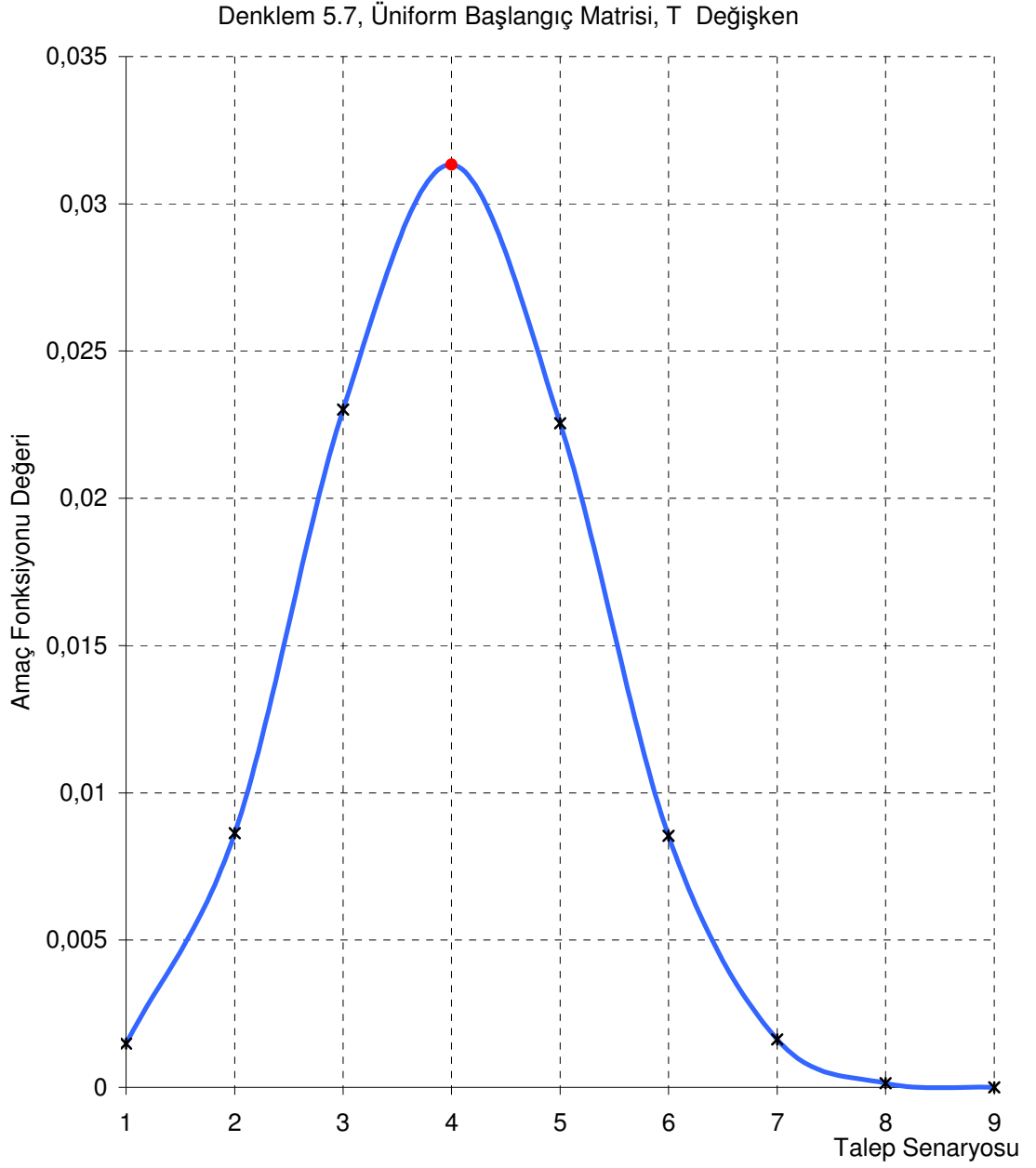
Şekil 5.19 Eşitlik 5.1'i kullanarak 2 bağlı yol ağı için optimum çözüm.



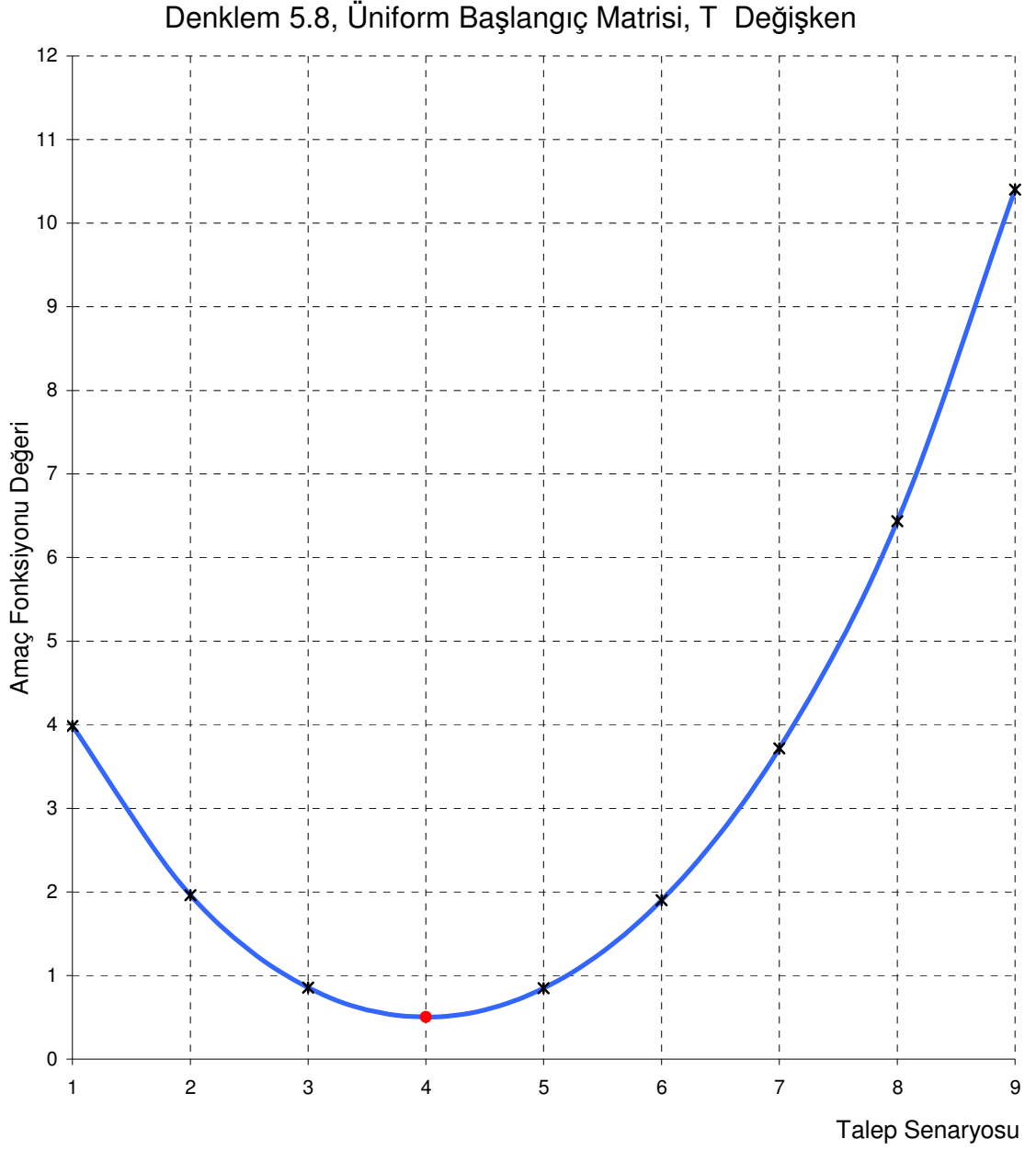
Şekil 5.20 Eşitlik 5.2'yi kullanarak 2 bağlı yol ağı için optimum çözüm.



Şekil 5.21 Eşitlik 5.3'ü kullanarak 2 bağlı yol ağı için optimum çözüm.



şekil 5.22 Eşitlik 5.7'yi kullanarak 2 bağlı yol ağı için optimum özüm.



Şekil 5.23 Eşitlik 5.8'i kullanarak 2 bağlı yol ağı için optimum çözüm

5.6 Uygun Başlangıç Matrisi Etkileri

Uygun bir başlangıç matrisinin, örnek olarak alınan yol ağlarındaki etkilerini anlamak için, çeşitli alternatif çözümler birer başlangıç matrisi olarak kullanılmış ve en uygun çözüm test edilmiştir. Tüm amaç fonksiyonları, olası çözümler grubunun birer üyesi olan başlangıç matrislerine sahiptirler. Bu araştırmanın yapılması için iki neden öne sürülmüştür; birincisi üniformluğu sağlamak, ikincisi de başlangıç matrisinin dengelenmesinden etkilenen eşitliklerde oluşacak sonuç farklılığından emin olmaktır. Bu amaçla, başlangıç matrisi, elde edilmiş çözümlerden birine sabitlenerek bulunmuştur. Bu yöntem, elde edilmiş tüm çözümleri kapsayacak şekilde uygulanarak başlangıç matrisleri elde edilmiş ve her iki örnek yol ağı için bütün eşitliklerde tekrar edilmiştir. Bir yol ağında toplam yolculuklar değişken olduğunda, Willumsen eşitliğinin ve sonuç olarak onu izleyen eşitliklerin uygulanmasının sakıncalarını göstermektedir. QUEENS-OD tarafından çözümlenen Eşitlik 5.9, beklendiği gibi tüm test ağları için geçerli olmak üzere başlangıç matrisi ile uyumlu sonuç vermiştir.

5.7 Uygun Olmayan Başlangıç Matrisi Etkileri

Büyük ve karmaşık yol ağlarında, eski çalışmalardan elde edilmiş bir başlangıç matrisi, O-D yolculuk matrisini elde etmek için kullanılan geçerli senaryoya uygun bir çözüm sağlamayabilir. Pek çok durumda başlangıç matrisleri uygun (kullanılabilir) bir çözüm oluşturamazlar, bu yüzden başlangıç matrisinin, senaryolar ile uyumlu olduğu durumlardaki eşitliklerin özellikleri üzerinde çalışmakta yarar vardır. Bu sayede sadece uyumsuz başlangıç matrisi etkilerinin görülmesi değil, ayrıca mevcut senaryolarla uyumlu olanlar içinde en iyi eşitliğin çıkarılması da sağlanacaktır. Bu konuda yapılmış çalışmalarda, senaryolar ile uyumsuz başlangıç matrisinin elde edilmesi için oldukça dikkat gerektiren bir yaklaşım izlenmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bunun için benzer bir örnek üzerinde, Profesör Dr. Hesham Rakha' nın yönetiminde Harinarayan Paramahamsan' ın 1999 yılında yapmış olduğu "Fundamental Properties of Synthetic O-D Generation Formulations and Solutions" başlıklı tez çalışmasında, başlangıç matrisi daima aynı tarzda düzenlenmiş rastgele numaralar ile doldurularak 10.000 civarı başlangıç matrisi elde edilmiş ve bu işlem her iki örnek yol ağı için tekrarlanmıştır. Başlangıç matrisi dengelemesinden etkilenmiş olan eşitlikler için başlangıç matrisi, toplam yolculuk sayısının sabit olduğu durumlara uygun bir şekilde ayarlanmıştır. Böylece çözümler, tüm eşitlikler, tüm başlangıç matrisleri ve her iki örnek yol ağı için elde edilmiştir. Eşitlik 5.1 ile gösterilmiş olan orijinal eşitlikten elde edilen çözüm referans alınarak diğer eşitliklerden bulunan çözümler ile arasında oluşan sapmalar tespit edilmiştir.

Burada sapma, eşitlik 5.1 için bulunan optimum talep senaryosu ile diğerleri arasındaki farklılık olarak tanımlanmıştır. Sapmanın genişliği ile ilgili olarak bilgi sahibi olabilmek için sapmanın kritik noktaları elde edilmiştir.

Harinarayan Paramahamsan' ın (1999) yapmış olduğu bu karşılaştırma sonucunda; yolculukların toplam sayısının sabit olduğu 5-bağlı ağ için, 5.1, 5.2 ve 5.7 ile gösterilmiş olan eşitliklerin her zaman benzer çözüm verdikleri dikkat çekmektedir. Eşitlik 5.3, 5.4, 5.8 ve 5.9'u kullanarak bulunan sonuçlar, eşitlik 5.1'in kullanılması ile elde edilen sonuçlara gerçekten çok yakın çıkmıştır. Eşitlik 5.5 ve 5.6' nın kullanıldığı çözümlerde geniş bir sapma olduğu ve bundan dolayı da uygulamada zayıf kaldığı görülmektedir. Buradan eşitlik 5.5 ve 5.6' nın her iki yol ağı yapısında da önemli hatalar verdiği göz önünde bulundurulmadan kullanılamayacağı açıkça anlaşılmaktadır.

Eşitlik 5.1 ve 5.2' yi kullanan 2-bağlı ağda da çözümlerin benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, 5.3, 5.7, 5.8 ve 5.9 ile verilen eşitlikler kullanıldığında sapmanın nispeten daha küçük olduğunu göstermektedirler.

5.8 Akım Süreliliğinin Etkisi

Bir önceki bölümde açıklandığı üzere gerek tek adımlı gerekse de iki adımlı yaklaşımda akım sürekliliğinin sağlanamadığı durumlarda dahil olmak üzere trafik sayım değerlerinden faydalanarak O-D matrisleri elde edilebilmektedir. Bunun sebebi, bağlarda yapılan trafik sayımlarından bulunan trafik hacim değerlerinin, sayımlarda yapılan hataların en etkin yöntemlerle dağıtılması sonucu akım sürekliliğini sağlayan eşdeğer trafik hacim değerlerine dönüştürülmüş olmasıdır. İki adımlı yaklaşımda akım sürekliliği problemi ilk adımda çözülmüş ve sonra maksimum entropi teknikleri kullanılarak sonuç O-D matrisi elde edilmiştir. Tek adımlı yaklaşımda ise akım sürekliliği problemi ve maksimum entropi tekniği birleştirilmiş ve tek adımda çözülmüştür. Trafik sayımlarından O-D matrisini elde etmeye yönelik ortaya konmuş olan yaklaşımları karşılaştırmak için örnek olarak seçilmiş yol ağları şekil 5.1 ve 5.2 de gösterilmiştir. Yol ağı içindeki bağlardan herhangi birinin hacim değeri sonradan arttırıldığında akım sürekliliği muhafaza edilemeyecektir. Matlab, MS Excell Solver ve Queen's OD gibi yazılımlar kullanılarak tek adımlı yaklaşım problemleri rahatça çözülebilmektedir. Farklı çalışmalarda bu üç paket yazılım ile yapılmış testlerden elde edilen sonuçlar birbirine benzer çıkmıştır. İki adımlı yaklaşımda da benzer durum söz konusudur, ancak tek adımlı yaklaşımda daha hızlı sonuca ulaşıldığı görülmüştür.

5.9 Özet

Bu bölümde iki farklı yol ağı üzerinde farklı O-D matrisi çözüm eşitlikleri karşılaştırılmıştır. Daha sonra eşitlikler, bir üniform, ve bir de dengelenmiş başlangıç matrisi koşulları altında test edilmiş, toplam yolculuk sayısının sabit olması ve değişken olması durumunda ayrı ayrı çözümler bulunarak karşılaştırma yapılmıştır. Bu inceleme, tamamen çeşitli eşitliklerin üzerinde oluşan etkilerin karşılaştırmalı olarak gösterilmesi amacı ile yapılmıştır. Bunların haricinde konu ile ilgili yapılmış çalışmalardan, benzer ağ yapılarına uygulanmış farklı testlerin sonuçlarından da bahsedilmiştir. Bu bölümde ayrıca yolculuk sayıları tabanlı eşitlikler ile trafik hacim değerleri tabanlı eşitliklerin benzerlikleri ortaya konmuş ve tek adımlı çözüm yaklaşımına ait eşitliklerin sonuca daha hızlı ulaştığı görülmüştür.

6. Sonuçlar ve neriler

Bu çalışmada, yapay O-D probleminin çözümü için bugüne kadar ortaya konulan çeşitli formüller ve çözüm algoritmaları arasında yapılan karşılaştırmalar sunulmuştur. Bu karşılaştırmalar en iyi çözümü bulmak amacıyla üniform başlangıç matrisi, uygun ve uygun olmayan başlangıç matrisi kullanılarak toplam yolculukların sabit olduğu ve değişken olduğu iki farklı durum altında yapılmıştır. Uygulanan modeller; yolculuk sayısı tabanlı ve trafik hacim değerleri tabanlı olmak üzere iki ana başlık altında toplanmıştır. Çalışmada esas alınan model entropi modeli olmuştur. Entropi modeli içinde bugüne kadar farklı çalışmalarda kullanılmış dokuz ayrı eşitlik test edilmiştir. Testlerde uygulanan amaç fonksiyonlarında, en küçük hatayı verecek en yakın sonucu elde etmek için maksimizasyon (enoklama) tekniği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde;

- Toplam yolculuk sayısının sabit olduğu durumlarda yolculuk sayısı tabanlı yöntem ve trafik hacim değerleri tabanlı yöntem ile elde edilen en iyi çözüm arasında bir farklılık yoktur. Toplam yolculuk sayısı, değişken olduğunda ise bulunan en iyi çözümde farklılıklar görölmüştür.
- Uzmanlarca önerilen tek adımlı yaklaşım, yolculuk sayıları tabanlı modelden elde edilen sonuçlar ile uyumlu sonuçlar vermektedir.
- Willumsen tarafından önerilen ilk model (Eşitlik 6.3), toplam yolculuk sayısının değişken olduğu durumlarda optimum çözümde sapmaktadır.
- Willumsen' in formülünden türetilmiş olan eşitlik 6.5 ve bu eşitliğin düzenlenmiş hali olan eşitlik 6.6, sadece toplam yolculuk sayısı sabit ve $T_{ij} / t_{ij} \approx 1$ ise uygulanabilir olmaktadır.
- Yolculuk modelinden, hacim modelinden ve tek adımlı yaklaşımdan elde edilen çözümlerin, başlangıç matrisinin katsayılarla çarpılarak dengelenmesinden bağımsız olduğu ortaya çıkmaktadır. Buna karşın, Willumsen' in ortaya koyduğu modelde ve onun türevlerinde başlangıç matrisinin katsayılarla çarpılması sonucu değiştirmekte ve optimum çözümde sapmaktadır.
- Toplam yolculukların sayısı bir değişken olduğunda, Willumsen' in ana formülünden türetilen eşitlikten (Eşitlik 6.5) elde edilen sonucun, uygun bir başlangıç matrisi kullanıldığı durumda bile gerçek yolculuk değerleri kullanılarak bulunan sonuçtan uzaklaştığı görölmektedir.

- Toplam yolculukların sayısı sabit bir sayı olduğu zaman çözüm araştırmasının uygun olmayan bir başlangıç matrisi ile başladığı yerde Willumsen' in esas modeli (Eşitlik 6.5) ya da onun düzenlenmiş hali (Eşitlik 6.6), yaklaşık %20' ye kadar ulaşan hatalar vermektedir.
- Toplam yolculuk sayısının değişken olması ve uygun olmayan başlangıç matrisi kullanılması durumunda, tek adımlı yaklaşımda %5'ten az hata görülmüştür. Tek adımlı yaklaşımda, tüm olası çözümlerin kendi içinde doğrulanabilir olduğu küçük yol ağları için, birbirine çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Küçük yol ağları için, tek adımlı yaklaşım eşitliklerinin Matlab, Excel gibi standart eşitlik çözüm programları kullanılarak çözümlenebilmektedir. Ancak geniş yol ağlarında, kullanılacak denklemlerin ve değişkenlerin sayısı, standart eşitlik çözücülerin bu konuda kullanılabilirliğini yani başka bir deyişle çözüm yapılabilmesini engellemektedir. Standart eşitlik çözücü programların kullanabileceği eşitlik ve değişken sayısı oldukça kısıtlıdır.

Profesör Dr. Hesham Rakha' nın yönetiminde Harinarayan Paramahamsan' ın 1999 yılında yapmış olduğu “Fundamental Properties of Synthetic O-D Generation Formulations and Solutions” başlıklı tez çalışmasında, Queens OD programının son versiyonu ile her üç yöntemin de (yolculuk modeli, hacim modeli ve tek basamaklı yaklaşım) uygulanabilir olduğu küçük yol ağlarında standart eşitlik çözücülerden elde edilen sonuçlar ile uyumlu sonuçlar ortaya koyduğu belirtilmiştir. Queens OD yazılımı 1000'den fazla zonu olan ve 5000'in üzerinde bağa sahip yol ağlarına uygulanabilmektedir. Uzmanlarca Queens-OD yazılımı için, bu büyüklükteki bir yol ağına ait problemin çözümünde yaklaşık bir saat kadar zaman harcandığı iddia edilmektedir.

Gelecekteki Çalışmalar İçin Tavsiyeler;

Bu tez çalışmasında incelenen trafik sayımlarını kullanarak OD matrisi elde etmeye yönelik denemeler 1980'li yılların başından bugüne kadar konuyla ilgilenen araştırmacıların elde etmiş oldukları sonuçları özetlemektedir. Elde edilen sonuçlar gerçek hayatta yeteri kadar test edilme imkanı bulamadığından, konu ile ilgili olarak kesin bir karara varmak için erken olduğu görülmektedir. Bugüne kadar yapılmış olan çalışmalar esas alınarak gelecekte yapılacak araştırma ve testler trafik sayımlarını kullanarak daha kolay ve daha düşük maliyetli OD matrisi elde etme imkanı yaratacaktır. Kaynaklarda da belirtilen bugüne kadar yapılan

araştırmalar da dikkate alındığında gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilebilecek bazı tavsiyeler şu şekilde özetlenebilir:

Test edilecek yol ağları bu çalışmada da olduğu gibi özel bir O-D çiftleri için çoklu güzergahlar içermemelidir. 5 bağdan oluşan yol ağında ve 2 bağdan oluşan yol ağında bütün O-D çiftleri için sadece bir güzergah seçeneği mevcuttur. Yapılan deneme çalışmaları geliştikçe, daha ileriki çalışmalarda verilmiş bir O-D ifti için çoklu güzergaha sahip yol ağları kullanılmalıdır. Bu çeşitli model ve denklemlerin duyarlılıklarına daha geniş bir erevde bakılması için gerekli olacaktır.

Bu tezde seçilen örnek yol ağları oldukça basit seçilmiştir. Daha büyük yol ağları için yapılacak denemeler, bu tür çalışmalarda bulunan sonuçlarla karşılaştırma yapılıp doğrulanmasına olanak sağlayacaktır. Doğruluğun test edilebilmesi için çeşitli model sonuçları gerçek bir yol ağı için kesin olarak bilinen O-D yolculuk matrisleri ile karşılaştırılmış olmalıdır.

Gelecekte yapılacak karşılaştırmaların entropi yaklaşımı ve sinir ağları teknikleri gibi diğer yaklaşımlar arasında sürdürülmesinin daha doğru olacağı grlmektedir. Bu karşılaştırmalar sonuç çözümlerine dayanan farklı yöntemler üzerindeki avantaj ve dezavantajlar ilişkisinin de bulunmasına yardımcı olacaktır.

Maksimum entropi teknikleri, dinamik O-D matrisi elde etmeye yönelik yaygın olarak kullanılan diğer teknikler ile karşılaştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Barcelo, J., (2004), "Notes on Optimization Models for Transportation Analysis", Seminar notes, Dept. of Statistics and Operations Research, Universitat Politècnica de Catalunya.

Erel, A., (2001), Ulaşım Planlaması I ve II Basılmamış Ders Notları, İstanbul.

Harinarayan, P., (1999) "Fundamental Properties of Synthetic O-D Generation Formulations and Solutions", Master of Science Thesis in Civil and Environmental Engineering, Blacksburg, VIRGINIA.

Hazelton, M. L., (2001), "Inference For O-D Matrices: Estimation, Prediction and Reconstruction", Transportation Research B, Vol:35, pp:667-676.

Lo, H. P., Zhang, N., Lam, W.H.K., (1999), "Decomposition Algorithm For Statistical Estimation of O-D Matrix with Random Link Choice Proportions From Traffic Counts", Transportation Research B, Vol:33, pp:369-385

Tunç, A., (2003) "Trafik Mühendisliği ve Uygulamaları", Asil Yayın Dağıtım.

Yang, H., Zhou, J. , (1998), "Optimal Traffic Counting Locations For Origin-Destination Matrix Estimation.", Transportation Research B, Vol:32 No:2, pp. 109-126.

Yüksel, H., (1998) "Kentiçi Ulaşımında Talep Yönetimi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi F.B.E İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programı.

Zuylen, H. J. V., Willumsen, L.G., (1980), "The Most Likely Trip Matrix Estimation from Traffic Counts", Transportation Research B, Vol:14B, pp. 281-293.

INTERNET KAYNAKLARI

[1]www.vt.edu

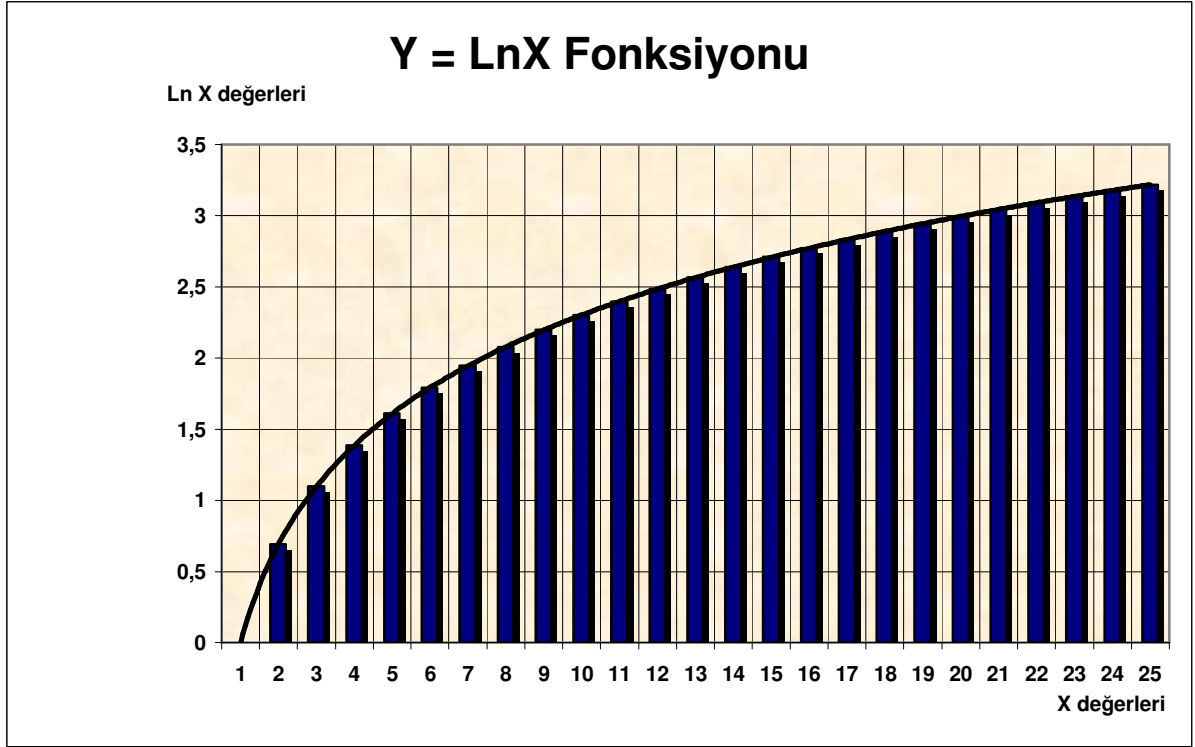
[2]www.sciencedirect.com

[3]www.aimsun.com

[4] www.lindo.com

EKLER

Ek 1: Stirling Yaklaşımı

 $y = \ln X$ fonksiyonunun grafiğine bakılacak olursa,

Eğri altında kalan alana bakıldığında dikdörtgen metodu kullanılarak:

Yöntem 1

 $X=1$ ve $X=N$ noktaları arasında eğrinin altında kalan alan şu şekilde hesaplanabilir:

$$\approx (1)\ln(1) + (1)\ln(2) + (1)\ln(3) + (1)\ln(4) + \dots + (1)\ln(N) = \ln(N!) \quad (\text{E.1})$$

Eğer $X=1$ ve $X=N$ noktaları arasında eğrinin altında kalan mevcut alan hesaplanırsa, bir integral yapısının hesaplanmış olduğu görülecektir.

Yöntem 2

 $X=1$ ve $X=N$ noktaları arasında eğrinin altında kalan alan ;

$$\int_1^N \ln(X) dx \quad (\text{E.2})$$

olarak tanımlanır. E.2 de verilen eşitlik için;

$$\int \text{Ln}(X)dx = x\text{Ln}(X) - X \quad (\text{E.3})$$

olduğunu biliyoruz. Bu durumda,

$$\int_1^N \text{Ln}(X)dx = N\text{Ln}(N) - N - 0 + 1 \quad (\text{E.4})$$

yazılabilir. Eğer “N” çok büyükse, bu fonksiyon içerisinde “1” değerinin etkisi yok sayılacak kadar küçük olacaktır. Yöntem 1 ve 2 de yer alan E.1 ve E.2 eşitlikleri kullanılarak:

$$N\text{Ln}(N!) = N\text{Ln}(N) - N \quad (\text{E.5})$$

elde edilecektir. Burada Euler-Maclaurin serilerinden elde edilen asimptotik seriler kullanılarak bir kısaltma yapıldığında,

$$X! = \sqrt{2\pi X} X^x e^{-x} \left(1 + \frac{1}{12X} + \frac{1}{288X^2} - \frac{1}{51840X^3} - \dots \right) \quad (\text{E.6})$$

asimptotik seriden gelen X içeren terimler yok sayıldığında,

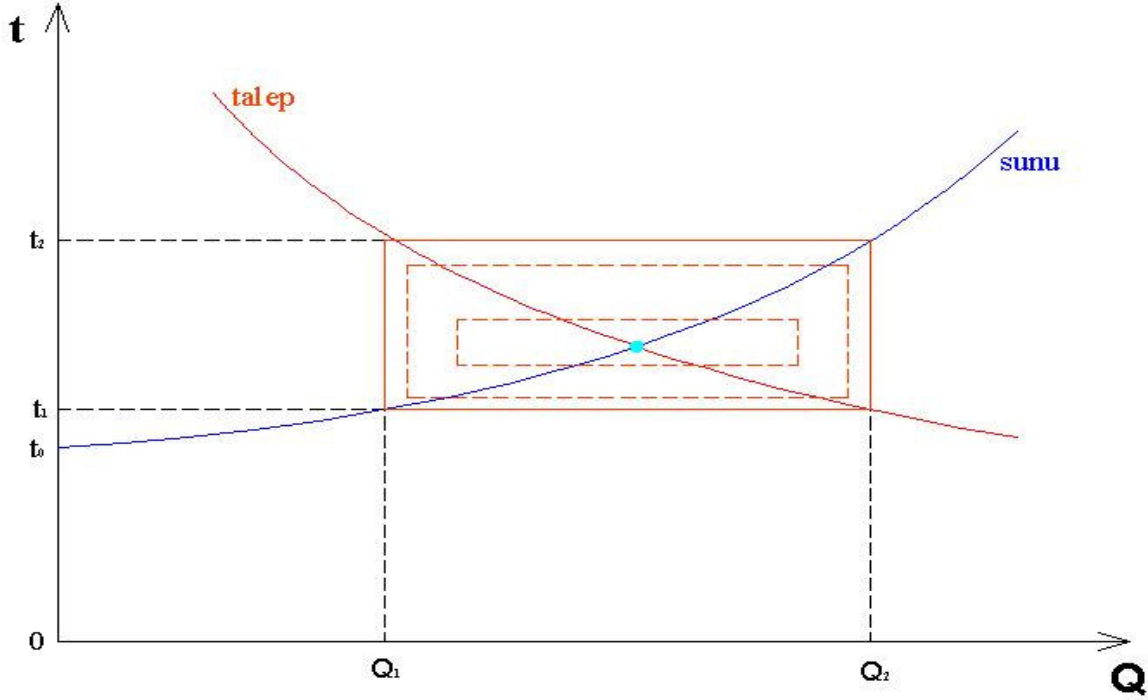
$$X! = \sqrt{2\pi X} X^x e^{-x} \quad (\text{E.7})$$

elde edilecektir. E.7 eşitliğinde, eşitliğin her iki tarafının da logaritması alınır;

$$\text{Ln}(X!) = \left(x + \frac{1}{2} \right) \text{Ln}(x) - X + \frac{1}{2} \text{Ln}(2\pi) \quad (\text{E.8})$$

elde edilir. Bu ifade E.5 eşitliğinden daha hassas bir ifadedir. Ancak büyük değerlerde E.5 eşitliği ile E.8 eşitliği arasındaki fark 0' a yaklaşmaktadır. Pratik çözüm açısından hata payı çok küçük olan E.5 eşitliği kullanılmaktadır.

Ek 2 Hacim-Süre Modeli.



Hacim - Süre modeli, kapasite kısıtı (ulaşım koşullarının trafik miktarından etkilenmesi) altında hepsi ya da hiçbiri seçiminin yapılacağı düşünülmüş bir tercih modelidir. Trafik hacmi ve zaman grafiği üstünde talep eğrisi ile sunu eğrisinin kesiştiği nokta bu modeldeki merkez nokta yani denge noktası olacaktır. Hacim – Süre modelinde ise talep ve sunu eğrilerinin kesiştiği nokta değil, sunu eğrisi modeli tanımlamaktadır.

Olasılığa dayalı davranışsal tercih durumunda Logit model yapısı da şu şekilde ifade edilmektedir:

$$Q_1 = P_1 T_{AB}$$

$$P_i = \frac{e^{V_{i1}}}{\sum_x e^{V_x}}$$

$$V_1 = \beta_{o1} + \beta_1 t_1$$

$$V_2 = \beta_{o2} + \beta_2 t_2$$

$$t_1 = t_{o1} \left[1 + \alpha \left(\frac{Q_1}{Q_{1\max}} \right)^p \right] \alpha$$

$$t_2 = t_{o2} \left[1 + \alpha \left(\frac{Q_2}{Q_{2\max}} \right)^n \right] \alpha$$

$$Q_1 = P_1 T_{AB} = T_{AB} \left[\frac{e^{\beta_{a1} + \beta_1 t_1}}{e + e^{\beta_{o2} + \beta_2 t_2}} \right]$$

Burada,

- P_i : i seçeneğinin tercih edilme yüzdesi
 V_i : i seçeneğinin yararlılık fonksiyonu
 V_x : Tercih konusu olan seçenekler.

Ek 3 5. Bölümde beş bağdan ve iki bağdan oluşan yol ağlarının test edilmesinde kullanılan eşitliklerin çözümde kullanılan genişletilmiş açılımları.

5Bağlı Yol Ağı

Eşitlik 5.1

$$Max.: Z \left(T_{ij}, t_{ij} \right) = \frac{T!}{\prod_{ij} (T_{ij}!)} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij}}{\sum_{ij} t_{ij}} \right)^{T_{ij}}$$

$$Max.: Z = \frac{T!}{T_{ac}! T_{ad}! T_{bc}! T_{bd}!} \left(\frac{t_{ac}}{t} \right)^{T_{ac}} \left(\frac{t_{ad}}{t} \right)^{T_{ad}} \left(\frac{t_{bc}}{t} \right)^{T_{bc}} \left(\frac{t_{bd}}{t} \right)^{T_{bd}}$$

Eşitlik 5.2

$$Max.: Z \left(T_{ij}, t_{ij} \right) = T \ln \left(\frac{T}{t} \right) - T - \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right)$$

$$Z = T \ln \left(\frac{T}{t} \right) - T - \left(T_{ac} \ln \left(\frac{T_{ac}}{t_{ac}} \right) - T_{ac} \right) - \left(T_{ad} \ln \left(\frac{T_{ad}}{t_{ad}} \right) - T_{ad} \right)$$

Max.:

$$- \left(T_{bc} \ln \left(\frac{T_{bc}}{t_{bc}} \right) - T_{bc} \right) - \left(T_{bd} \ln \left(\frac{T_{bd}}{t_{bd}} \right) - T_{bd} \right)$$

Eşitlik 5.3

$$\text{Max. : } Z\left(T_{ij}, t_{ij}\right) = -\sum_{ij} \left(T_{ij} \text{Ln} \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right)$$

$$Z = -\left(T_{ac} \text{Ln} \left(\frac{T_{ac}}{t_{ac}} \right) - T_{ac} \right) - \left(T_{ad} \text{Ln} \left(\frac{T_{ad}}{t_{ad}} \right) - T_{ad} \right)$$

Max. :

$$- \left(T_{bc} \text{Ln} \left(\frac{T_{bc}}{t_{bc}} \right) - T_{bc} \right) - \left(T_{bd} \text{Ln} \left(\frac{T_{bd}}{t_{bd}} \right) - T_{bd} \right)$$

Eşitlik 5.4

$$\text{Max. : } Z\left(T_{ij}, t_{ij}\right) = -\sum_{ij} \left(T_{ij} \text{Ln} \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} + t_{ij} \right)$$

$$Z = -\left(T_{ac} \text{Ln} \left(\frac{T_{ac}}{t_{ac}} \right) - T_{ac} + t_{ac} \right) - \left(T_{ad} \text{Ln} \left(\frac{T_{ad}}{t_{ad}} \right) - T_{ad} + t_{ad} \right)$$

Max. :

$$- \left(T_{bc} \text{Ln} \left(\frac{T_{bc}}{t_{bc}} \right) - T_{bc} + t_{bc} \right) - \left(T_{bc} + t_{bc} \right) - \left(T_{bd} \text{Ln} \left(\frac{T_{bd}}{t_{bd}} \right) - T_{bd} + t_{bd} \right)$$

Eşitlik 5.5

$$Min.: Z \left(T_{ij}, t_{ij} \right) = \sum_{ij} \left(\frac{1}{2T_{ij}} \left(T_{ij} - t_{ij} \right)^2 \right)$$

$$Max.: Z = \frac{1}{2T_{ac}} \left(T_{ac} - t_{ac} \right)^2 + \frac{1}{2T_{ad}} \left(T_{ad} - t_{ad} \right)^2 + \frac{1}{2T_{bc}} \left(T_{bc} - t_{bc} \right)^2$$

$$+ \frac{1}{2T_{bd}} \left(T_{bd} - t_{bd} \right)^2$$

Eşitlik 5.6

$$Min.: Z \left(T_{ij}, t_{ij} \right) = \sum_{ij} \left(\frac{1}{2t_{ij}} \left(T_{ij} - t_{ij} \right)^2 \right)$$

$$Min.: Z = \frac{1}{2t_{ac}} \left(T_{ac} - t_{ac} \right)^2 + \frac{1}{2t_{ad}} \left(T_{ad} - t_{ad} \right)^2 + \frac{1}{2t_{bc}} \left(T_{bc} - t_{bc} \right)^2$$

$$+ \frac{1}{2t_{bd}} \left(T_{bd} - t_{bd} \right)^2$$

Eşitlik 5.7

$$\text{Max.} : Z \left(T_{ij}, t_{ij} \right) = \prod_a \frac{V_a!}{\prod_{ij} \left(T_{ij}^{p_{ij}^a} \right)} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij}^{p_{ij}^a}}{v_a} \right)^{T_{ij}^{p_{ij}^a}}$$

$$Z_1 = \frac{V_1!}{T_{ac}! T_{ad}!} x \left(\frac{t_{ac}}{t_{ac} + t_{ad}} \right)^{T_{ac}} x \left(\frac{t_{ad}}{t_{ac} + t_{ad}} \right)^{T_{ad}}$$

$$Z_2 = \frac{V_2!}{T_{bc}! T_{bd}!} x \left(\frac{t_{bc}}{t_{bc} + t_{bd}} \right)^{T_{bc}} x \left(\frac{t_{bd}}{t_{bc} + t_{bd}} \right)^{T_{bd}}$$

$$Z_3 = \frac{V_3!}{T_{ac}! T_{ad}! T_{bc}! T_{bd}!} x \left(\frac{t_{ac}}{t_{ac} + t_{ad} + t_{ac} + t_{ad}} \right)^{T_{ac}} x \left(\frac{t_{ad}}{t_{ac} + t_{ad} + t_{ac} + t_{ad}} \right)^{T_{ad}} x$$

$$\left(\frac{t_{bc}}{t_{ac} + t_{ad} + t_{ac} + t_{ad}} \right)^{T_{bc}} x \left(\frac{t_{bd}}{t_{ac} + t_{ad} + t_{ac} + t_{ad}} \right)^{T_{bd}}$$

$$Z_4 = \frac{V_4!}{T_{ac}! T_{bc}!} x \left(\frac{t_{ac}}{t_{ac} + t_{bc}} \right)^{T_{ac}} x \left(\frac{t_{bc}}{t_{ac} + t_{bc}} \right)^{T_{bc}}$$

$$Z_5 = \frac{V_5!}{T_{ad}! T_{bd}!} x \left(\frac{t_{ad}}{t_{ad} + t_{bd}} \right)^{T_{ad}} x \left(\frac{t_{bd}}{t_{ad} + t_{bd}} \right)^{T_{bd}}$$

$$\text{Max.} : Z = Z_1 x Z_2 x Z_3 x Z_4 x Z_5$$

Eşitlik 5.8

$$\text{Min.} : Z \left(T_{ij}^t, t_{ij} \right) = \sum_a \sum_{ij} T_{ij}^a p_{ij}^a \text{Ln} \left(\frac{T_{ij}^a V_a}{V_a^t t_{ij}} \right)$$

$$Z_1 = T_{ac} \text{Ln} \left(\frac{T_{ac}^{xv} 1}{V_1^{xt} ac} \right) + T_{ad} \text{Ln} \left(\frac{T_{ad}^{xv} 1}{V_1^{xt} ad} \right)$$

$$Z_2 = T_{bc} \text{Ln} \left(\frac{T_{bc}^{xv} 2}{V_2^{xt} bc} \right) + T_{bd} \text{Ln} \left(\frac{T_{bd}^{xv} 2}{V_2^{xt} bd} \right)$$

$$Z_3 = T_{ac} \text{Ln} \left(\frac{T_{ac}^{xv} 3}{V_3^{xt} ac} \right) + T_{ad} \text{Ln} \left(\frac{T_{ad}^{xv} 3}{V_3^{xt} ad} \right) + T_{bc} \text{Ln} \left(\frac{T_{bc}^{xv} 3}{V_3^{xt} bc} \right) + T_{bd} \text{Ln} \left(\frac{T_{bd}^{xv} 3}{V_3^{xt} bd} \right)$$

$$Z_4 = T_{ac} \text{Ln} \left(\frac{T_{ac}^{xv} 4}{V_4^{xt} ac} \right) + T_{bc} \text{Ln} \left(\frac{T_{bc}^{xv} 4}{V_4^{xt} bc} \right)$$

$$Z_5 = T_{ad} \text{Ln} \left(\frac{T_{ad}^{xv} 5}{V_5^{xt} ad} \right) + T_{bd} \text{Ln} \left(\frac{T_{bd}^{xv} 5}{V_5^{xt} bd} \right)$$

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5$$

$$\text{Min.} : Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5$$

Eşitlik 5.9

$$L \equiv T \operatorname{Ln} \left(\frac{T}{t} \right) - T - \sum_{ij} \left(T_{ij} \operatorname{Ln} \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right) +$$

$$\sum_{ij} \left(\lambda_{ij}^2 \left(\sum_a \left(V_a P_{ij}^a \right) - \left(P_{ij}^a \sum_a \left(\sum_{xy} T_{xy} P_{xy}^a \right) \right) \right) \right) \quad \forall i, j$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Ln}(T) - \operatorname{Ln}(t) - \operatorname{Ln} \left(T_{ac} \right) + \operatorname{Ln} \left(t_{ac} \right) - 3\lambda_1 - 2\lambda_2 - 2\lambda_3 - 1\lambda_4 &= 0 \\ \operatorname{Ln}(T) - \operatorname{Ln}(t) - \operatorname{Ln} \left(T_{ad} \right) + \operatorname{Ln} \left(t_{ad} \right) - 2\lambda_1 - 3\lambda_2 - 1\lambda_3 - 2\lambda_4 &= 0 \\ \operatorname{Ln}(T) - \operatorname{Ln}(t) - \operatorname{Ln} \left(T_{bc} \right) + \operatorname{Ln} \left(t_{bc} \right) - 2\lambda_1 - 1\lambda_2 - 3\lambda_3 - 2\lambda_4 &= 0 \\ \left(V_1 + V_3 + V_4 \right) - 3T_{ac} - 2T_{ad} - 2T_{bc} - 1T_{bd} &= 0 \\ \left(V_1 + V_3 + V_5 \right) - 2T_{ac} - 3T_{ad} - 1T_{bc} + 2T_{bd} &= 0 \\ \left(V_2 + V_3 + V_4 \right) - 2T_{ac} - 1T_{ad} + 3T_{bc} - 2T_{bd} &= 0 \\ \left(V_2 + V_3 + V_5 \right) - 1T_{ac} - 2T_{ad} + 2T_{bc} + 3T_{bd} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

2 Bağlı Yol Ağı

Eşitlik 5.1

$$Max.: Z \left(T_{ij}, t_{ij} \right) = \frac{T!}{\prod_{ij} \left(T_{ij}! \right)} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij}}{\sum_{ij} t_{ij}} \right)^{T_{ij}}$$

$$Max.: Z = \frac{T!}{T_{ab}! T_{ac}! T_{bc}!} \left(\frac{t_{ab}}{t} \right)^{T_{ab}} \left(\frac{t_{ac}}{t} \right)^{T_{ac}} \left(\frac{t_{bc}}{t} \right)^{T_{bc}}$$

Eşitlik 5.2

$$Max.: Z \left(T_{ij}, t_{ij} \right) = T \ln \left(\frac{T}{t} \right) - T - \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right)$$

$$Z = T \ln \left(\frac{T}{t} \right) - T - \left(T_{ab} \ln \left(\frac{T_{ab}}{t_{ab}} \right) - T_{ab} \right) -$$

Max.:

$$\left(T_{ac} \ln \left(\frac{T_{ac}}{t_{ac}} \right) - T_{ac} \right) - \left(T_{bc} \ln \left(\frac{T_{bc}}{t_{bc}} \right) - T_{bc} \right)$$

Eşitlik 5.3

$$Max.: Z \left(T_{ij}, t_{ij} \right) = - \sum_{ij} \left(T_{ij} \operatorname{Ln} \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right)$$

$$Max.: Z = - \left(T_{ab} \operatorname{Ln} \left(\frac{T_{ab}}{t_{ab}} \right) - T_{ab} \right) - \left(T_{ac} \operatorname{Ln} \left(\frac{T_{ac}}{t_{ac}} \right) - T_{ac} \right) - \left(T_{bc} \operatorname{Ln} \left(\frac{T_{bc}}{t_{bc}} \right) - T_{bc} \right)$$

Eşitlik 5.7

$$Max.: Z \left(T_{ij}, t_{ij} \right) = \prod_a \frac{V_a!}{\prod_{ij} \left(T_{ij}^{p_{ij}^a} \right)} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij}^{p_{ij}^a}}{v_a} \right)^{T_{ij}^{p_{ij}^a}}$$

$$Z_1 = \frac{V_1!}{T_{ab}! T_{ac}!} x \left(\frac{t_{ab}}{t_{ab} + t_{ac}} \right)^{T_{ab}} x \left(\frac{t_{ac}}{t_{ab} + t_{ac}} \right)^{T_{ac}}$$

$$Z_2 = \frac{V_1!}{T_{ac}! T_{bc}!} x \left(\frac{t_{ac}}{t_{ac} + t_{bc}} \right)^{T_{ac}} x \left(\frac{t_{bc}}{t_{ac} + t_{bc}} \right)^{T_{bc}}$$

$$Max.: Z = Z_1 x Z_2$$

Eşitlik 5.8

$$\text{Min.} : Z \left(T_{ij}, t_{ij} \right) = \sum_a \sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^a \text{Ln} \left(\frac{T_{ij}^v a}{V_a t_{ij}} \right)$$

$$Z_1 = T_{ab} \text{Ln} \left(\frac{T_{ab}^{xv} 1}{V_1^{xt} ab} \right) + T_{ac} \text{Ln} \left(\frac{T_{ac}^{xv} 1}{V_1^{xt} ac} \right)$$

$$Z_2 = T_{ac} \text{Ln} \left(\frac{T_{ac}^{xv} 2}{V_2^{xt} ac} \right) + T_{bd} \text{Ln} \left(\frac{T_{bd}^{xv} 2}{V_2^{xt} bd} \right)$$

$$Z = Z_1 + Z_2$$

$$\text{Min.} : Z = Z_1 + Z_2 \quad (6.8)$$

Eşitlik 5.9

$$L \equiv T \ln\left(\frac{T}{t}\right) - T - \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln\left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}}\right) - T_{ij} \right) +$$

$$\sum_{ij} \left(\lambda_{ij}^2 \left(\sum_a \left(V_a p_{ij}^a \right) - \left(p_{ij}^a \sum_a \left(\sum_{xy} T_{xy} p_{xy}^a \right) \right) \right) \right) \quad \forall i, j$$

$$\ln(T) - \ln(t) - \ln\left(\frac{T}{ab}\right) + \ln\left(\frac{t}{ab}\right) - 1\lambda_1 - 1\lambda_2 - 0\lambda_3 = 0$$

$$\ln(T) - \ln(t) - \ln\left(\frac{T}{ac}\right) + \ln\left(\frac{t}{ac}\right) - 1\lambda_1 - 2\lambda_2 - 1\lambda_3 = 0$$

$$\ln(T) - \ln(t) - \ln\left(\frac{T}{bc}\right) + \ln\left(\frac{t}{bc}\right) - 0\lambda_1 - 1\lambda_2 - 1\lambda_3 = 0$$

$$\left(V_1 \right) - 1T_{ab} - 1T_{ac} - 0T_{bc} = 0$$

$$\left(V_1 + V_2 \right) - 1T_{ab} - 2T_{ac} - 1T_{bc} = 0$$

$$\left(V_2 \right) - 0T_{ab} - 1T_{ac} - 1T_{bc} = 0$$

(6.9)

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 23.09.1977

Doğum yeri Balıkesir

Lise 1991-1994 Balıkesir Lisesi

Lisans 1995-1999 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak.
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2001-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı

Çalıştığı kurum(lar)

1997 - (üç ay) BAYTUR İnş.Taah. AŞ
1999 - 2000 İstanbul Büyükşehir Belediyesi BİMTAŞ
2000 - 2001 YAPITEK Mimarlık ve Planlama Ltd. Şti
2001 - 2002 İstanbul Büyükşehir Belediyesi İSBAK
2002 – YTÜ Meslek Yük.Okulu Öğretim Görevlisi