

**GPS AĞLARININ ÜLKE NİRENGİ AĞLARINA
ENTEGRASYONU**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMAN TASTON MERKEZİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Şenol Hakan KUTOĞLU
(501972601)**

104276

104276

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Nisan 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 5 Haziran 2001**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Tevfik AYAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Hüseyin DEMİREL (Y.T.Ü.)
Prof.Dr. Şenol Kuşçu (Z.K.Ü.)
Prof.Dr. Rasim DENİZ (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Rahmi N. ÇELİK (İ.T.Ü.)

[Handwritten signatures of Prof. Dr. T. Ayhan, Prof. Dr. H. Demirel, Prof. Dr. S. Kuşçu, Prof. Dr. R. Deniz, and Doç. Dr. R. N. Çelik]

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Son on yılda, GPS uygulamaları mesleğimizin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Teknolojik bakımdan uzun sayılabilecek bu süreye rağmen, konuya ilişkin herhangi bir teknik standarda henüz resmiyet kazandırılmamış ve GPS uygulamaları uygulamacının keyfiyetine bırakılmıştır. Bu nedenle benzer amaçlar için, çok farklı uygulamalar gündeme gelebilmektedir. Bu durum üretilen verilerin güvenilirliğini şüpheli hale getirmektedir. Oysa mühendislik verileri güvenilir ve tekrar kullanılabilir olmalıdır. Burada gerçekleştirilen çalışmanın en azından “GPS ağlarının ülke nirengi ağına entegrasyonu” problemine ışık tutacağı inancını taşımaktayım.

Çalışmalarım sırasında bana büyük kaynak desteği sağlayan Yrd. Doç. Dr. Hakan Akçın’a, akademik hayatım boyunca rahat bir çalışma ortamı sağlayan Prof. Dr. Erdal KOÇAK ve Prof. Dr. Şenol KUŞÇU’ya, desteğini ve sabrını hiçbir zaman esirgemeyen eşim İlkey’a teşekkürü bir borç biliyorum. Son olarak, çalışma boyunca bilgi ve deneyimiyle bana yön veren, bu eserin en az benim kadar sahibi olduğunu düşündüğüm, gönül gönüle çalıştığımız sevgili hocam, danışmanım Prof. Dr. Tevfik AYAN’a sonsuz teşekkür ederken, bu çalışmamızın son değil bir başlangıç olmasını ümit ediyorum.

Ş. Hakan KUTOĞLU

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	V
TABLO LİSTESİ	VI
ŞEKİL LİSTESİ	VIII
SEMBOL LİSTESİ	IX
ÖZET	X
SUMMARY	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Tanımlar	1
1.2. Jeodezide Uygulamalar ve Sorunlar	2
1.3 Çalışmanın Amacı	5
2. KOORDİNAT SİSTEMLERİ VE DÖNÜŞÜM	6
2.1. Dönüşümün Matematik Temelleri	6
2.2. Koordinat Sistemleri	9
2.2.1. Göksel koordinat sistemleri	9
2.2.2. Yersel koordinat sistemleri	14
2.2.2.1. Jeosentrik sistemler	14
2.2.2.2. Toposentrik sistemler	20
2.3. ED50 ve WGS84 Koordinat Sistemlerinin Tanımı	23
3. ED50 VE WGS84 SİSTEMLERİ ARASINDA KOORDİNAT DÖNÜŞÜMÜ	26
3.1. Neden Koordinat Dönüşümü	26
3.2. ED50 ve WGS84 Koordinat Sistemleri Arasındaki Dönüşümün Matematik Modeli	27
3.2.1 Üç boyutlu benzerlik dönüşümü	27
3.2.1.1. Bursa-Wolf modeli	27
3.2.1.2. Molodensky-Badekas modeli	30
3.2.1.3. Üç boyutlu dönüşümde diferansiyel ilişkiler	32
3.2.1.4. Üç boyutlu dönüşümde hata yayılması	36
3.2.1.5. Bursa-Wolf ve Molodensky-Badekas modellerinin karşılaştırılması	41
3.2.2. İki boyutlu benzerlik dönüşümü	43
3.2.2.1. Elipsoidal coğrafi ve projeksiyon koordinatları arasındaki geçiş ilkeleri	44
3.2.2.2. İki boyutlu benzerlik dönüşümünün matematik modeli	46
3.3. Koordinat Dönüşümünde Güvenirlilik	47
3.3.1. Ölçülerin serbestlik derecesine katkısı	48

3.3.2. İki boyutlu benzerlik dönüşümünde güvenilirlik	49
3.3.3. Üç boyutlu benzerlik dönüşümünde güvenilirlik	51
4. DÖNÜŞÜMÜ İYİLEŞTİRİCİ YÖNTEMLER	53
4.1. Genel	53
4.2. Çok Parametrelili Regresyon Yöntemi	54
4.3. Kollokasyon Yöntemi	55
4.4. Filtreleme Yöntemi	60
5. UYGULAMALAR	62
5.1 Uygulama Verileri ve Stratejileri	62
5.2 Koordinat Değişimleri Karşısında Dönüşüm Parametrelerinin Davranışı	64
5.2.1. Parametre-enlem değişimi	65
5.2.2. Parametre-boylam değişimi	66
5.2.3. Parametre-yükseklik değişimi	68
5.2.4. Değerlendirmeler	69
5.3. Üç Boyutlu Dönüşümde Hata Yayılması	72
5.4. Bursa-Wolf Ve Molodensky-Badekas Modellerinin Karşılaştırılması	74
5.5. İki Boyutlu Benzerlik Dönüşümü Uygulaması	77
5.6. Dönüşüm Hesabında Güvenirlik Araştırması	78
5.6.1. Dönüşüm hesabında ölçüler için güvenilirlik sınırı	78
5.6.2. Özdeş noktaların dağılımı	81
5.7. Dönüşüm Sonuçlarının İyileştirilmesi Üzerine Araştırmalar	84
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	93
EKLER	96
ÖZGEÇMİŞ	124

KISALTMALAR

AGTA	: Ankara GPS Test Ağı
AUSLIG	: Australian Surveying and Land Information Group
BIH	: Bureau International de l'Heure
CCRS	: Conventional Celestial Reference System
CEP	: Celestial Ephemeris Pole
CIO	: Conventional International Origin
CTP	: Conventional Terrestrial Pole
CTRS	: Conventional Terrestrial Reference System
DEHA	: Department Of The Environment, Heritage and Aboriginal Affairs
DMA	: Defence Mapping Agency
ED50	: European Datum 1950
EOP	: Earth Orientation Parameters
ERP	: Earth Rotation Parameters
ESA	: European Space Agency
ETRF	: European Terrestrial Reference Frame
EUREF	: European Reference Frame
GAST	: Greenwich Apparent Sidereal Time
GPS	: Global Positioning System
GRS80	: Geodetic Reference System 1980
HGK	: Harita Genel Komutanlığı
IERS	: International Earth Rotation Service
IGS	: International GPS Service
ITRF	: International Terrestrial Reference Frame
ITRS	: International Terrestrial Reference System
İGA-96	: İzmir GPS Ağı-96
İGNA	: İstanbul GPS Ağı-2000
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
POSCE	: POSC Energy Standards
SLR	: Satellite Laser Ranging
TUTGA	: Türkiye Ulusal temel GPS Ağı
UT	: Universal Time
VLBI	: Very Long Baseline Interferometry
WGS84	: World Geodetic System 1984
ZGA-96	: Zonguldak GPS Ağı-96

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. WGS84 ve Hayford elipsoit parametreleri	24
Tablo 5.1. $\varphi=40^0$ ve $\lambda=32^0$ için koordinat değişimleri ve dönüşüm parametreleri arasındaki ilişkiler	70
Tablo 5.2. Parametre-koordinat etkileşim sırası.....	71
Tablo 5.3. Sanal ağıın projeksiyon koordinatları	81
Tablo 5.4. 2 boyutlu dönüşümde değişik dokta kombinasyonları için ölçülerin güven ölçütleri	82
Tablo 5.5. 3 boyutlu dönüşümde değişik nokta kombinasyonları için ölçülerin güven ölçütleri	83
Tablo 5.6. İGNA-2000 için regresyon yöntemiyle belirlenen parametreler.....	85
Tablo 5.7. İGNA-2000 için 3B dönüşüm ile hesaplanan q değerleri.....	86
Tablo 5.8. İGNA-2000 için 2B dönüşüm ile hesaplanan q değerleri.....	86
Tablo 5.9. Kollokasyon ve yalın 3B benzerlik dönüşümü sonuçları.....	87
Tablo 5.10. Kollokasyon ve yalın 2B benzerlik dönüşümü sonuçları.....	87
Tablo 5.11. İGNA-2000’de farklı yöntemlerle elde edilen k.o.h’lar.....	88
Tablo A.1. İGA-96 Elipsoidal Coğrafi Koordinatları.....	96
Tablo A.2. ZGA-96 Elipsoidal Coğrafi Koordinatları.....	96
Tablo A.3. AGTA Elipsoidal Coğrafi Koordinatları.....	96
Tablo A.4. İGNA-2000 Elipsoidal Coğrafi Koordinatları.....	97
Tablo C.1. $H=h_{ED}$ varsayımıyla Molodensky-Badekas modeli’nden hesaplanan parametreler.....	102
Tablo C.2. $h=0$ varsayımıyla Molodensky-Badekas modeli’nden hesaplanan parametreler.....	102
Tablo C.3. $H=h_{ED}$ varsayımıyla Bursa-Wolf modeli’nden hesaplanan parametreler.....	102
Tablo C.4. $h=0$ varsayımıyla Bursa-Wolf modeli’nden hesaplanan parametreler.....	103
Tablo C.5. İki boyutlu benzerlik dönüşümünden hesaplanan parametreler.....	103
Tablo D.1. Ankara GPS Test Ağı.....	104
Tablo D.2. Zonguldak GPS Ağı-96.....	104
Tablo D.3. İzmir GPS Ağı-96.....	104
Tablo D.4. İGNA-2000.....	105
Tablo D.5. Ankara GPS Test Ağı.....	106
Tablo D.6. Zonguldak GPS Ağı-96.....	106
Tablo D.7. İzmir GPS Ağı-96.....	106
Tablo D.8. İGNA-2000.....	107
Tablo F.1. Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_x ötelemesine katkısı.....	110
Tablo F.2. Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_y ötelemesine katkısı.....	110

Tablo F.3.	Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_z ötelemesine katkısı.....	110
Tablo F.4.	Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_x ötelemesine katkısı.....	111
Tablo F.5.	Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_y ötelemesine katkısı.....	111
Tablo F.6.	Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_z ötelemesine katkısı.....	111
Tablo F.7.	Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_x ötelemesine katkısı.....	111
Tablo F.8.	Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_y ötelemesine katkısı.....	112
Tablo F.9.	Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_z ötelemesine katkısı.....	113
Tablo H.1.	$H=h_{ED}$ varsayımıyla Molodensky-Badekas modelinden hesaplanan parametreler.....	123
Tablo H.2.	$h=0$ varsayımıyla Molodensky-Badekas modelinden hesaplanan parametreler.....	123
Tablo H.3.	İki boyutlu benzerlik dönüşümünden hesaplanan parametreler.....	123



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Sağ-el ve sol-el koordinat sistemleri.....	6
Şekil 2.2 : Presesyon	11
Şekil 2.3 : Nutasyon	12
Şekil 2.4 : Anlık Göksel Koordinat Sistemi: α ve δ S cisminin koordinatları, NEP kuzey ekliptik kutbu	13
Şekil 2.5 : CEP'in yolu	13
Şekil 2.6 : Kutup hareketi parametreleri	14
Şekil 2.7 : CTRS ve Anlık CRS ile ilişkisi	15
Şekil 2.8 : Jeosentrik elipsoidal koordinat sistemi	18
Şekil 2.9 : Yerel astronomik sistemle CTRS ilişkisi	22
Şekil 2.10 : Yerel ve jeosentrik elipsoidal sistem ilişkisi	23
Şekil 3.1 : Bursa-Wolf modelinin geometrik gösterimi.....	30
Şekil 3.2 : Molodensky-Badekas modelinin geometrik gösterimi.....	32
Şekil 5.1 : Enlem-öteleme değişimi	65
Şekil 5.2 : Enlem-dönüklük değişimi	66
Şekil 5.3 : Enlem-ölçek değişimi	66
Şekil 5.4 : Boylam-öteleme değişimi	67
Şekil 5.5 : Boylam-öteleme ilişkisi	67
Şekil 5.6 : Boylam-dönüklük değişimi	67
Şekil 5.7 : Yükseklik-öteleme değişimi	68
Şekil 5.8 : Yükseklik-dönüklük değişimi	69
Şekil 5.9 : Yükseklik-ölçek değişimi	69
Şekil 5.10 : AGTA2daki alternatif çözümlerin k.o.h'ları	79
Şekil 5.11 : ZGA-96'daki alternatif çözümlerin k.o.h'ları	79
Şekil 5.12 : İGA-96'daki alternatif çözümlerin k.o.h'ları.....	80
Şekil 5.13 : Sanal ağ	81
Şekil B.1 : İzmir GPS Ağı-96 Ana Ağı.....	98
Şekil B.2 : Zonguldak GPS Ağı-96 Ana Ağı.....	99
Şekil B.3 : Ankara GPS Test Ağı.....	100
Şekil B.4 : İGNA-200 Ana Ağı.....	101
Şekil G.1 : $h=0$ yaklaşımıyla 3 boyutlu benzerlik dönüşümü.....	113
Şekil G.2 : $H=h_{ED}$ yaklaşımıyla 3 boyutlu benzerlik dönüşümü.....	114
Şekil G.3 : 2 boyutlu benzerlik dönüşümü.....	115
Şekil G.4 : $h=0$ yaklaşımıyla 3 boyutlu filtreleme.....	116
Şekil G.5 : $H=h_{ED}$ yaklaşımıyla 3 boyutlu filtreleme.....	117
Şekil G.6 : 2 boyutlu filtreleme.....	118
Şekil G.7 : $h=0$ yaklaşımıyla 3 boyutlu kollokasyon.....	119
Şekil G.8 : $H=h_{ED}$ yaklaşımıyla 3 boyutlu kollokasyon.....	120
Şekil G.9 : 2 boyutlu kollokasyon.....	121
Şekil G.10 : Regresyon.....	122

SEMBOL LİSTESİ

$a, b, f,$	: Elipsoidin büyük yarı eksen, küçük yarı eksen ve basıklığı
e	: Elipsoidin birinci dış merkezlik parametresi
M, N	: Meridyen ve meridyene dik doğrultudaki eğrilik yarıçapları
GM	: Gravitasyonel sabit
U_0	: Normal potansiyel
γ_e	: Ekvatordaki normal gravite
R	: Dönme matrisi
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	: İki koordinat sistemi arasındaki dönüklük parametreleri
t_x, t_y, t_z	: İki koordinat sistemi arasındaki dönüklük parametreleri
k	: İki koordinat sistemi arasındaki ölçek parametresi
A	: Koşul denklemleri katsayılar matrisi
B	: Düzeltme denklemleri katsayılar matrisi
K	: Varyans-kovaryans matrisi
Q	: Bilinmeyenlerin kofaktörler matrisi
l	: Küçültülmüş ölçüler vektörü
v	: Düzeltmeler vektörü
x	: Bilinmeyenler vektörü
P	: Presesyon
z, ζ, θ	: Presesyon parametreleri
N	: Nutasyon
$\varepsilon, \Delta\varepsilon, \Delta\psi$	: Nutasyon parametreleri
x_p, y_p	: Kutup hareketi parametreleri
ϕ, Λ	: Astronomik enlem ve boylam
H	: Ortometrik yükseklik veya nivelman yüksekliği
φ, λ, h	: Elipsoidal enlem, boylam ve yükseklik
ξ, η	: Çekül sapması bileşenleri
r	: Ölçülerin dengelemenin serbestlik derecesine katkısı
s, s_p	: Kollokasyonda iç ve dış sinyal
n	: Kollokasyonda noise
C_0, q, q_0	: Hirvonen fonksiyonu parametreleri

GPS AĞLARININ ÜLKE NİRENGİ AĞLARINA ENTEGRASYONU

ÖZET

Yeryüzünün veya bir parçasının şeklinin belirlenebilmesi için koordinatı bilinen noktalara ihtiyaç duyulur. Bu noktaların koordinat birliği oluşturabilmesi, ortak bir koordinat sisteminde tanımlanmaları ile mümkün olur.

Yer bilimlerinde, farklı amaçlarla çok sayıda koordinat sistemi tanımlanabilir. Ancak başlangıçta, diğer koordinat sistemlerine de referans olacak, iki temel sisteme gereksinim vardır:

- Uydu ve gök cisimlerinin hareketlerini tanımlayabilmek için uzay-sabit (göksel) bir Konvansiyonel İnersiyal Referans Sistemi (CCRS)
- Yeryüvarı üzerindeki noktaların konumlarının belirlenmesi için yer-sabit (yersel) bir Konvansiyonel Referans Sistemi (CTRS)

Bu koordinat sistemlerinin gerçekleştirilmesi, *reference frame* adı verilen noktalar ağıyla sağlanır. Reference frame Konvansiyonel Göksel Referans Sistemi için gök cisimleri, Konvansiyonel Yersel Referans Sistemi için yeryüzü noktalarından oluşur.

Yersel sistemlerin referans yüzeyi jeoitir ve jeoidi kapalı formüllerle tanımlayabilmek mümkün değildir. Jeodezik hesaplamalar için, üzerinde hesap yapmaya uygun, basit matematik temellere dayanan bir referans yüzeyine ihtiyaç duyulur ki, böyle bir geometrik şekil elipsoittir. Referans yüzeyi elipsoit olan koordinat sistemleri *Jeodezik Koordinat Sistemleri* olarak adlandırılır. Prensip olarak, elipsoidin boyutlarının ve yerleştirmesinin yeryüvarına, dolayısıyla CTRS'ye en uygun şekilde olması istenir. Bunun sağlanabilmesi için de CTRS'yi belirleyen reference framelerden yararlanılır.

Geçmişte reference frameler, çeşitli nedenlerle sınırlı sayıda noktadan oluşuyordu ve bunların belirlenmesi klasik ölçme aletleri ile yapılıyordu. Türkiye Ülke Nirengi Ağı'nın dayalı olduğu koordinat sistemi, bu şekilde gerçekleştirilmiş olan ED50 koordinat sistemidir. Son 20-30 yılda gelişen modern teknolojinin ihtiyaçlarını karşılayacak koordinat sistemlerine gereksinim duyuldu ve bu amaçla daha çok sayıda noktadan oluşturulan reference frameler, uydu teknolojileriyle belirlendi. Jeodezik uygulamalarda yaygın bir kullanım alanı bulan GPS ölçme tekniğinin koordinat sistemi, Doppler yöntemiyle ölçülen reference frameden yararlanarak belirlenen WGS84 jeodezik koordinat sistemidir. Teknolojinin son yıllarda geline noktasında, daha gerçekçi fiziksel modellere dayanan bir CTRS tanımı yapıldı ve bu konvansiyonel sistemin gerçekleşmesi IERS tarafından, yeni dünya düzeninin de sayesinde, dünyanın dört bir tarafına dağılmış noktalardan oluşan ITRF ile sağlandı. Günümüzde IGS, GPS uydularının precise ephemeris koordinatlarını ITRF'e dayalı olarak belirlemektedir.

GPS uygulamalarının yaygınlaşması, buna karşın haritacılık hizmetlerinin ülke nirengi ağlarına dayalı olarak yürütülmesi, bunların ait oldukları koordinat sistemleri arasında dönüşümü zorunlu kılmaktadır. GPS koordinatlarının dayalı olduğu WGS84 veya ITRF sistemleri jeosentrik ve ED50 relatif jeosentrik koordinat sistemi olduğundan, bu iki sistem arasındaki koordinat dönüşümü temel olarak üç boyutlu benzerlik dönüşümüyle gerçekleştirilir. Ancak sözkonusu dönüşümün gerçekleştirilmesi aşamasında pek çok problemle karşılaşılır. Bunlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Ülke ağındaki distorsiyonlar
- Geçmiş yıllarda kurulan ağların, jeodinamik hareketler nedeniyle yerdeğiştirmesi
- Ülke ağlarındaki yükseklik problemi
- Dönüşüm parametrelerinin özdeş nokta seçimine bağlı değişimler göstermesi
- Uygun dönüşüm modelinin seçimi
- Parametre hesabında kullanılacak ortak nokta sayısı
- Arazide yeterince ortak nokta bulunamaması
- Farklı dereceden ağların doğruluklarının da farklı olması

Çalışmada, bu problemlerin nedenlerine yönelik incelemeler gerçekleştirilmiş, bunların ışığında uygulamada standarda yönelik çözüm önerileri sunulmuş ve daha doğruluklu bir dönüşüm gerçekleştirmenin yolları araştırılmıştır. Bu bağlamda, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Nokta yüksekliklerinin dönüşüm parametrelerinin değişiminde önemli bir rolü olduğu, buna karşın dönüklüklerin iki koordinat sistemi için beklentilerin ötesine geçmemesi durumunda, yüksekliklerdeki hataların yatay konum koordinatlarına yansımalarının ihmal edilebilecek düzeyde kaldığı tesbit edilmiştir.
- Üç boyutlu benzerlik dönüşümü için kullanılan iki modelden, daha gerçekçi ötelemeler vermesi nedeniyle Bursa-Wolf'ün yerine Molodensky-Badekas'ın kullanılması önerilir.
- Sadece yatay konum koordinatlarının dönüşümüyle ilgilenildiğinde, alan ne kadar büyük olursa olsun iki boyutlu benzerlik dönüşümünün en az üç boyutlu kadar başarılı olduğu gözlenmiştir.
- Yerel ağlarda, dönüşüm hesabı için gerçekleştirilen güvenilirlik analizleri sonrasında, güvenilirlik kriteri olarak 0.70 değeri belirlenmiştir. Bunun sağlanabilmesi için, çalışma alanını çevreleyen en az dört noktanın gerekli olduğu tespit edilmiştir.
- Büyük boyutlu ağlarda dönüşüm doğruluğunu iyileştirebilmek için gerçekleştirilen analizler, en küçük kareler yöntemine göre filtreleme ve kollokasyonun tatminkar sonuçlar sağladığını göstermiştir.

INTEGRATION OF GPS NETWORKS TO NATIONAL HORIZONTAL CONTROL NETWORKS

SUMMARY

The points, which their coordinates are available, are needed to be determined a part or whole of earth surface. The coordinate integrity of these points is possible with referencing to a common coordinate system.

In the earth sciences, the many coordinate systems could be defined for different purposes. However, there are basically two types of coordinate systems that other coordinate systems are referenced to them:

- A space-fixed, Conventional Inertial (Celestial) Reference System for the description of satellite motion.
- An earth-fixed, terrestrial reference system (CTRS) for the positions on the earth surfaces.

These coordinate systems are realized by the points of network is called *reference frame*. The reference frames are consisted of extra-galactic objects for CCRF, and earth surface points for CTRS.

The reference surface of these systems is geoid, and geoid could not be determined by analytical formulas. For the computing of geodetic, a reference surface is requested which has basic mathematical principal. The best suitable geometrical shape to this description is ellipsoid. The coordinate systems which reference surfaces are ellipsoid are called Geodetic Coordinate Systems. In principal, the size and positioning of the ellipsoid should be fit earth as closely as possible, therefore to CTRS. For this purpose, the reference frames determining CTRS are utilized.

Formerly, reference frames consisted of the limited number of points by several causes, and they were measured via classical surveying techniques. The coordinate system that National Horizontal Control Network of Turkey is referenced to is ED50 determined from the same way. In the last two or three decades, the coordinate systems which would meet to need of the developing technology were requested. For this purpose, the reference frames consisting of the large numbers of points were established and determined via satellite surveying techniques. The coordinate system of GPS, which are used commonly in geodetic applications, is WGS84 defined from the reference frame realized by Doppler technique. On the last point of the developed technology, a CTRS, which are referenced to more realistic physical models, was described, and the realization of this conventional system by IERS was proved from ITRF consisted of the scattered points on whole earth. Today, IGS determines the coordinates of GPS satellites with respect to ITRF.

In spite of increasing of the GPS applications, because mapping services are maintained in relation to national horizontal networks, the transformation is an obligation between the coordinate systems that they are belonging to. As WGS84 is a system of geocentric coordinates, and ED50 is a relative geocentric, the transformation between both coordinate systems is basically fulfilled by Three Dimensional Similarity Transformations. However, while the transformation is fulfilled, the many problems emerge. These are classified as follows:

- The distortions of national networks
- Because of geodynamic movements, the displacement of the networks established in the past
- The height problem of national horizontal control networks
- The local variations of transformation parameters
- The selection of suitable transformation model
- The number of common points which would be used for estimation of transformation parameters
- Common points could not be found enough in land
- The accuracies of different degree networks are not identity.

In study, the causes of these problems are investigated, then the solution proposals are given, and the way of performing a more accurate transformation is sought. In this context, the following results are obtained:

- The heights of the points have important role on transformation parameters. On the other hand, if the calculated rotation parameters are different from the expected values so much.
- Because of giving more realistic shift parameters, instead of Bursa-Wolf Molodensky-Badekas is proposed.
- If the horizontal coordinates only interest, it was observed that two dimensional similarity transformation was succeeded at least as well as three dimensional how big the transformation area is.
- After the reliability analysis were performed on the local networks, 0.70 value was proposed as reliability criteria. It was determined that the four common points are required for realizing this criterion.
- The investigations fulfilled for improving the transformation accuracy on the big sized networks showed that the filtering and collocation in according to least squares method gave satisfying results.

1. GİRİŞ

1.1 Genel Tanımlar

Üç boyutlu uzayda gökcisimi, yeryüzü noktaları gibi noktaların yerini belirlemek, bu noktaları birbirleriyle ilişkilendirebilmek için ortak bir koordinat sistemine ihtiyaç duyulur.

Bir koordinat sistemi, eksenlerinin başlangıç noktasının yeri ve yönüyle tanımlanır. Bilimsel ve pratik uygulamalara yönelik olarak, başlangıç noktasının yeri gözlem noktasında, yeryuvarının veya güneşin ağırlık merkezinde, güneş sisteminin kütle merkezinde, samanyolu sisteminin merkezinde olmak üzere çok çeşitli astronomik ve elipsoidal koordinat sistemlerinden faydalanılır (Koçak, 1994). Astronomik sistemler kendi aralarında anlık ve konvansiyonel sistemler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Anlık sistemde yapılan gözlemlerin, değişik zamanlarda gerçekleştirilen ölçülerin aynı bir referansa indirgenmesi, koordinat birliği sağlanması ve elipsoidal sistemlerin oluşturulabilmesi bakımından konvansiyonel sistemlerin belirlenmesi gerekir. Bu nedenlerle, başlangıçta iki tip koordinat sistemine gereksinim duyulur;

- Uydu ve gökcisimlerinin hareketlerini tanımlayabilmek için uzay-sabit (göksel) bir Konvansiyonel İnersiyal Referans Sistemi (CCRS)
- Yeryuvarı üzerindeki noktaların konumlarının belirlenmesi için yer-sabit (yersel) bir Konvansiyonel Referans Sistemi (CTRS)

Sözkonusu Konvansiyonel Referans Sistemler teorik olarak tanımlıdırlar. Teorinin pratik olarak gerçekleşmesi, Referans Frame adı verilen ve ileri ölçme teknikleriyle belirlenen noktalar ağıyla sağlanır. Bu noktalar ağı Konvansiyonel Göksel Referans Sistemi için gökcisimleri, Konvansiyonel Yersel Referans Sistemi için yeryüzü noktalarıdır. Referans Frame'lerin teoriyle çakışması hem mümkün hem de gerekli değildir (Hoffman ve diğ., 1997).

Astronomik sistemler jeodezik hesaplamalar için uygun değildir. Bu nedenle Konvansiyonel Yersel Referans Sistemlerinin gerçekleşmesini sağlayan Referans

Frame'lerden yararlanarak, yeryuvarının şekline uygun bir referans elipsoidi belirlenir ve bu referans elipsoidinin eksenlerinin Konvansiyonel Yersel Referans Sistemi ile çakışması veya paralel kılınması amaçlanır. Geçmişte farklı Referans Frame'lere dayalı olarak belirlenmiş çok sayıda, referans elipsoidi mevcuttur. Bunlara örnek olarak, Hayford, Krasowsky, Clarke, Bessel, GRS80 ve WGS84 elipsoidleri sayılabilir.

1.2 Jeodezide Uygulamalar ve Sorunlar

Yersel ölçme tekniklerinin sınırlamaları nedeniyle, noktaların üç boyutlu koordinatlarını eş zamanlı olarak belirlemek çok problemli olduğundan, yatay ve düşey konum ağıları ayrı ayrı oluşturulmuştur. Yatay konum ağıları için, jeodezik hesaplamalarda sağladığı kolaylık nedeniyle, referans yüzeyi olarak referans elipsoidi, düşey konum ağıları içinse jeoit yüzeyi daha uygun bulunmuştur. 1800'lü yıllardan başlayarak, pek çok bilim adamı, kendi ülkelerinin özelliklerine uygun yerel referans elipsoidleri belirlemiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanları, Avrupa ülkeleri için Bessel ve Hayford, Amerika ve Kanada için Clarke, Doğu Avrupa ülkeleri için Krassowski elipsoididir. Türkiye 1932 yılına kadar Clarke, bu tarihten sonra da Hayford elipsoidini kullanmıştır. Ancak her ülke, seçtiği elipsoidi, kendi topraklarında bir noktaya göre konumlandırıyordu (Şerbetçi, 1979). Türkiye Hayford elipsoidini Meşedağı noktasına referanslamış ve bu şekilde oluşan datuma da Türkiye Ulusal Jeodezik Datumu (TUJD) adını vermiştir. 2. Dünya savaşı'nda sonra ortaya çıkan yeni oluşumlar ülkeleri ortak çalışmalar yapmaya ve ortak koordinat sistemleri kullanmaya itmiştir. Bu yapılanma batı bloğundaki Avrupa ülkeleri için, Hayford elipsoidinin Avrupa'nın geneline uygun bir noktada Postdam'da konumlandırılmasıyla oluşturulan European Datum 1950'yi (ED50) ortaya çıkarmıştır. Türkiye'de 1954'den itibaren bu datumu kullanmaya başlamıştır (HGK, 1988).

1957 yılında Sputnik-12'in fırlatılmasıyla başlayan uydu teknolojisi kullanımı, bugün Global Positioning System (GPS) ile doruk noktasına ulaşmıştır. Son dönemde, Avrupa Uzay Ajansı ESA, GPS'e alternatif bir konumlama sistemi olan Galileo'yu geliştirmektedir (Ashkenazi, 2000). Söz konusu bu uydu teknolojileri, çok daha doğruluklu ve tüm dünya için geçerli olacak koordinat sistemlerine ihtiyaç duymaktaydı. Böylece bölgesel koordinat sistemleri döneminden, global koordinat

sistemleri dönemine girilmiş oldu. İlk zamanlar askeri amaçlarla kullanılan uydu konumlama sistemleri, 1980'lerden sonra oluşmaya başlayan küresel dünya düzeniyle birlikte sivil kullanıma açılmıştır. Bugün hiçbir ülke, uydu teknolojisinin sağladığı olanaklardan mahrum kalmak istememektedir. Üstelik uydu teknolojilerinin kurulması ve sürdürülmesi son derece pahalı olduğundan, uluslararası işbirliğini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenlerle ülkeler arasındaki duvarlar kaldırılmış ve ortak çalışma yapma isteği doruk noktasına ulaşmıştır. Bu sayede eski kuruluşların yerini, çok daha etkin ve uluslararası işbirliğinin üst düzeyde olduğu IERS, IGS, ESA gibi kuruluşlar almıştır. IGS bugün için vazgeçilmez bir uydu konumlama tekniği olan GPS'in sürdürülmesi ve iyileştirilmesine çaba sarfetmektedir. Bunun yanında, GPS'in Glonass ile birlikte verimli bir şekilde kullanılabilmesi için çalışmalar yürütmektedir (IGS, 1998). IERS ise tüm bu sistemlere altlık oluşturan, referans sistemlerin geliştirilmesi ve iyileştirilebilmesi için, kendisine bağlı alt kuruluşlarla birlikte referans framerlerini genişletmekte, onları yeni gözlem teknikleriyle belirlemektedir.

Tüm bu çabalar, yerel ve bölgesel referans koordinat sistemlerinin yerini alacak WGS84, GRS80, ITRF, EUREF gibi referans framerlerinin ve onlara göre belirlenen referans sistemlerinin oluşturulmasını sağlamıştır. Bu sistemlerden WGS84, sivil kullanıcıların en çok faydalandığı GPS'in koordinat sistemi olması nedeniyle sıkça kullanılmaktadır. GPS'in yoğun kullanımına rağmen, ülkeler haritacılık altyapılarını oluşturan yerel ve bölgesel koordinat sistemlerinden tam olarak vazgeçememektedir. Bu nedenle, GPS koordinatları ile Ülke Nirengi Ağı koordinatlarının birlikte kullanılabilmesi için, iki sistem arasında dönüşüm hesabı zorunlu olmaktadır (Aksoy ve diğ., 1999). Ancak, Ülke Nirengi Ağları yersel ölçme teknikleriyle ve oldukça uzun zaman önce belirlendiklerinden, dönüşüm hesabı sırasında çok sayıda problemlerle karşılaşmaktadır.

Uygulamada karşılaşılan en önemli sorun, hesaplanan dönüşüm parametrelerinin yerel değişimler göstermesidir. Bilindiği üzere dönüşüm parametreleri, her iki sistemde koordinatları bilinen, özdeş nokta kümelerinden yararlanılarak elde edilirler. Bu noktaların konum doğrulukları, gözlem tekniklerine, hesaplamalarında kullanılan matematik modellerin fiziksel olgulara uyumuna bağlıdır. GPS ağlarıyla, ülke nirengi ağları arasında yapısal farklılıklar söz konusudur. Ülke nirengi ağları, geçmişte çoğunlukla triangülasyon ağları olarak kurulmuşlardır. Bu tür ağlarda,

ölçüler doğrultulardır. Ağa ölçek verebilmek için, belli aralıklarla kenar ölçmeleri yapılır ve bunlar hatasız kabul edilir. Ayrıca ölçüler projeksiyon düzlemine indirgenir ve bu düzlemde dengelenirler. Düşey konum bilgileri ise, yatay konumdan bağımsız olarak, jeoit referansına göre belirlenir (Aksoy ve diğ., 1989, 1998). Oysa GPS ağlarında ölçüler, faz farkı değerlendirmelerinden türetilmiş üç boyutlu baz vektörleridir. Dengeleme hesabı da WGS84 elipsoidi ile tanımlanan üç boyutlu koordinat sisteminde gerçekleştirilir. Gerek ölçü türleri gerekse koordinat sistemlerinden ileri gelen farklılıklar, dönüşüm hesabında sistematik etkilere neden olabilmektedir. Bu ve buna benzer nedenlerle, farklı bölge, ülke hatta kıtalarda farklı teknolojilere dayalı olarak kurulmuş jeodezik ağlardan yararlanarak hesaplanacak dönüşüm parametreleri birbirinden farklı olacaktır. Parametrelerdeki bu yerel değişimler, her bölgede ayrı dönüşüm parametreleri hesaplamayı zorunlu kılmaktadır.

İkinci bir problem ise, ülkemizde GPS ağlarından, ülke nirengi ağlarına dönüşüm standartlarının belirlenmemiş olmasıdır. Dönüşüm hesabı için, uygulamacıya özel yaklaşımlar söz konusu olabilmektedir. Örneğin, en temel ve doğrudan çözüm üç boyutlu dönüşüm olmasına karşın, matematik modelinin basitliği nedeniyle, çoğu kez noktaların projeksiyon koordinatlarından yararlı iki boyutlu dönüşüm tercih edilmektedir. Üç boyutlu dönüşüm tercih edildiğinde ise, Bursa-Wolf ve Molodensky-Badekas alternatifleri söz konusudur. Bunun yanında, üç boyutlu dönüşüm hesabında teorik olarak, kartezyen koordinatlara geçiş için elipsoidal yüksekliklere ihtiyaç duyulur. Oysa ki, ülke nirengi ağında bazı noktaların hiçbir yükseklik bilgisi bulunmamakta, çok az sayıdaki bazı noktalarda nivelman yükseklikleri bilinmektedir. İfade edilen yüksekliklerin çoğu trigonometrik nivelmanla belirlendiklerinden, düşük doğruluklu olmaktadır. Ayrıca çoğu kez bunlara ait jeoit ondülasyonları da bilinmediğinden, elipsoidal yüksekliklere geçiş mümkün olamamaktadır. Bu durumda üç boyutlu dönüşüm, yüksekliklerin dönüşüm hesabının doğruluğunu olumsuz etkileyeceği varsayımıyla, yükseklik bilgileri kullanılmadan uygulanabilmektedir.

Bir diğer problem ise, dönüşüm hesabında kullanılacak noktaların sayısı ve nitelikleridir. Üç boyutlu dönüşümde 3, iki boyutlu dönüşümde 2 özdeş nokta, hesabı gerçekleştirmek için teorik olarak yeterlidir. Ancak keyfi olarak seçilmiş az sayıdaki

noktalarla hesaplanacak parametrelerin, güvenilirliği kuşkuludur. Buna karşın, arazide yeterince özdeş nokta bulmak da son derece zordur.

Yukarıda değinilen problemler 6nem sırasına g6re ;

- 6lke ağındaki distorsiyonlar
- Ge6miş yıllarda kurulan ağlara ait noktaların jeodinamik hareketler nedeniyle yerdeğiştirmesi
- 6lke nirengi ağlarındaki y6kseklik problemi
- D6n6ř6m parametrelerinin 6zdeş nokta se6imine bağlı değişimler g6stermesi
- Uygun d6n6ř6m modelinin se6imi
- Parametre hesabında kullanılacak 6zdeş nokta sayısı
- Arazide yeterince 6zdeş nokta bulunamaması
- Farklı dereceden ağların doğruluklarının da farklı olması

bi6iminde sıralanabilir.

1.3 6alışmanın Amacı

Kullanımı yukarıda sıralanan sorunları i6eren GPS teknolojisinden optimal yarar sağlamak i6in gerekli koordinat d6n6ř6m6nde, en uygun prosed6r6n ne olacağı konusuna ilişkin herhangi bir fikir birliği de s6z konusu değildir. Bu nedenle d6n6ř6m probleminde, uygulamacıya bağlı 66z6mler 6retilmektedir. Durum b6yle olunca da, belirlenen d6n6ř6m parametrelerinin ve d6n6řt6r6lm6ř koordinatların, herkes tarafından g6venilir bir şekilde kullanılabilmesi m6mk6n olamamaktadır. Diğer taraftan bilinen klasik d6n6ř6m y6ntemleri yerel ağlarda tatmin edici sonu6lar verse de, b6y6k 6l6ekli b6lgesel veya 6lke geneline yayılmış ağlarda, distorsiyonlar vb. nedenlerle yetersiz kalmaktadırlar.

Bu 6alışma i6inde, uygulamada kullanılmakta olan d6n6ř6m yaklaşımları incelenecek, 6lke temel ağlarından beklenen doğruluğu karşılayabilecek d6n6ř6m modelleri araştırılacak, doğruluk arttırıcı ve g6venilir sonu6lar 6reten algoritmalar geliştirilecektir. D6n6ř6m i6in 66ng6r6len matematik model ve geliştirilen algoritmalar, T6rkiye Ulusal Nirengi Ağı'nın İstanbul, Ankara, İzmir ve Zonguldak gibi değişik kesimlerinde ve olduk6a geniş alanlarda ger6ekleştirilmiş d6rt ayrı proje verileriyle test edilecektir.

2. KOORDİNAT SİSTEMLERİ VE DÖNÜŞÜM

2.1 Dönüşümün Matematik Temelleri

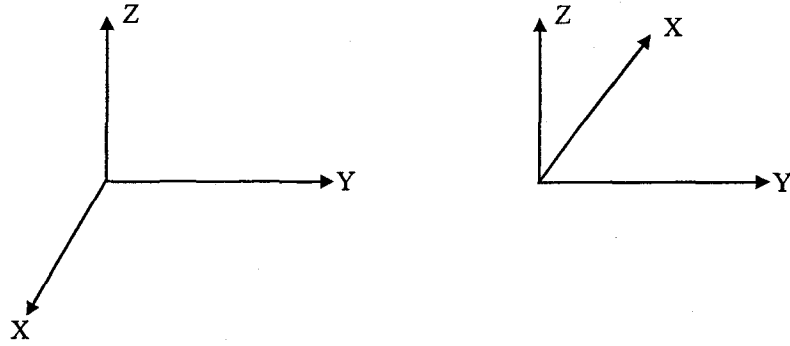
Jeodezide kullanılan koordinat sistemlerini tanımlarken bunlar arasındaki dönüşümler de sözkonusu edileceğinden, öncelikle koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm temellerine değinmek yerinde olacaktır. Bir lineer dönüşüm eşitliği;

$$y = R x \quad (2.1)$$

ile verilir. Burada R matrisi dönüşüm matrisidir. y ilk sistemdeki ve x ikinci sistemdeki sütun vektörlerdir. Eğer x ve y vektörlerinin boyutları aynı ise dönüşüm ortogonaldır. O halde dönüşüm matrisi için;

$$R^T R = R R^T = I \quad (2.2)$$

bağıntısı geçerli olacaktır. Bu eşitlik ile bir ortogonal matrisin determinantının (-1) veya (+1) olduğu söylenebilir.



Şekil 2.1 Sağ-el ve sol-el koordinat sistemleri

Üç boyutlu kartezyen koordinat sisteminde x ve y vektörleri sırasıyla X , Y ve Z eksenlerine sahiptirler. Bu üç eksen bir sağ-el veya sol-el sistemine göre tanımlanmış olabilir (Şekil 2.1). Sağ-el sisteminde, eğer sağ elin parmakları herhangi bir eksenin etrafında başparmak pozitif yönü gösterecek biçimde bükülürse, parmakların bükülme yönü pozitif dönme yönünü gösterecektir. Sol-el sisteminde ise aynı işlem sol-el için yapılır (Deniz, 1993).

Yukarıdaki ifadelerden yola çıkarak bir kartezyen koordinat sisteminde herhangi bir P noktasının x , y , z koordinatları vektörel olarak;

$$\mathbf{x}_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

şeklinde gösterilir.

Başlangıç noktaları özdeş bir sağ-el kartezyen koordinat sisteminden diğerine dönüşümün birinci adımında ilk sistem, z eksenleri arasındaki açı kadar döndürülürse;

$$\mathbf{x}'_p = \mathbf{R}_3(\epsilon_z) \mathbf{x}_p \quad (2.4)$$

elde edilir. Burada;

$$\mathbf{R}_3(\epsilon_z) = \begin{bmatrix} \cos \epsilon_z & \sin \epsilon_z & 0 \\ -\sin \epsilon_z & \cos \epsilon_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ile ifade edilir. İkinci adımda sistem y eksen etrafında ϵ_y açısı, üçüncü adımda ise x eksen etrafında ϵ_x açısı kadar döndürüldüğünde;

$$\mathbf{x}'''_p = \mathbf{R}_1(\epsilon_x) \mathbf{R}_2(\epsilon_y) \mathbf{R}_3(\epsilon_z) \mathbf{x}_p \quad (2.6)$$

bağıntısı elde edilir. Burada;

$$\mathbf{R}_1(\epsilon_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \epsilon_x & \sin \epsilon_x \\ 0 & -\sin \epsilon_x & \cos \epsilon_x \end{bmatrix} \quad (2.7a)$$

$$\mathbf{R}_2(\varepsilon_Y) = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_Y & 0 & -\sin \varepsilon_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon_Y & 0 & \cos \varepsilon_Y \end{bmatrix} \quad (2.7b)$$

ile verilir.

Dönme matrisleri komitatif değildir ($\mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2 \neq \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1$) ve çarpımları sağdan sola yapılır. Eğer dönüştürülecek koordinatların sistemleri farklıysa (Örneğin; biri sağ-el sistemindeyken diğeri sol-el sistemindeyse) koordinat eksenlerini ters yöne çevirmek için refleksiyon matrislerinden faydalanılır. X, Y, Z eksenlerinin yönlerini ters çeviren refleksiyon matrisleri sırasıyla;

$$\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.8a,b,c)$$

şeklinde ifade edilir. Refleksiyon matrisleri komitatiftir (Örneğin; $\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2 = \mathbf{P}_2 \mathbf{P}_1$).

Sonuç olarak ε_X , ε_Y , ε_Z dönüklükleri için genel bir dönme matrisi tanımlamak istenirse;

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z & \cos \varepsilon_Y \sin \varepsilon_Z & -\sin \varepsilon_Y \\ \sin \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z - \cos \varepsilon_X \sin \varepsilon_Z & \sin \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y \sin \varepsilon_Z + \cos \varepsilon_X \cos \varepsilon_Z & \sin \varepsilon_X \cos \varepsilon_Y \\ \cos \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z + \sin \varepsilon_X \sin \varepsilon_Z & \cos \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y \sin \varepsilon_Z - \sin \varepsilon_X \cos \varepsilon_Z & \cos \varepsilon_X \cos \varepsilon_Y \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

olur. Dönüklüklerin çok küçük olduğu durumlarda, sinüslü terimlerin değişkenin kendisine, cosinüslü terimlerin 1'e eşit olduğu varsayımıyla lineer dönme matrisi;

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 1 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

elde edilir (Seeber, 1993).

Eğer koordinat sistemlerinin başlangıç noktaları çakışık değilse, orijinler arasındaki;

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

öteleme vektörü de dönüşüm hesabında işin içine katılır.

2.2 Koordinat Sistemleri

Jeodezide faaliyet alanlarının çeşitliliğine paralel olarak, koordinat sistemlerinin farklı amaçlara hizmet veren sınıflandırmaları yapılabilir (Dana, 1995). Bunlar;

- Koordinat sisteminin şekline göre sınıflandırma
- Koordinat sisteminin orijinine göre sınıflandırma
- Yeryuvarının ve etrafındaki uyduların hareketine göre sınıflandırma

olarak sıralanabilir. Son sınıflandırma jeodezik amaçlara daha uygun düşmektedir.

Buna göre koordinat sistemleri;

- a) Göksel Koordinat sistemleri
- b) Yersel Koordinat Sistemleri

olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Göksel koordinat sistemleri inersiyel sistemlerdir ve gök cisimlerinin koordinatlarını, yörüngesel sistemde dünya etrafında konumlandırılmış uyduların hareketlerini belirlemek için kullanılırlar. Yersel koordinat sistemleri ise dünyaya göre sabittir ve dünya ile birlikte dönerler. Bu sistemler yeryüzündeki noktaların koordinatlarını belirlemek için kullanılırlar.

2.2.1 Göksel koordinat sistemleri

Göksel koordinat sistemi kendi içerisinde;

- Ufuk sistemi
- Saat açısı sistemi
- Ekliptik sistemi
- Rektasansiyon sistemi

olarak sınıflandırılır. Ancak daha çok, gök cisimlerinin konumlarını belirlemek bakımından diğerlerine göre daha uygun olan rektesansiyon koordinat sistemi tercih edilir.

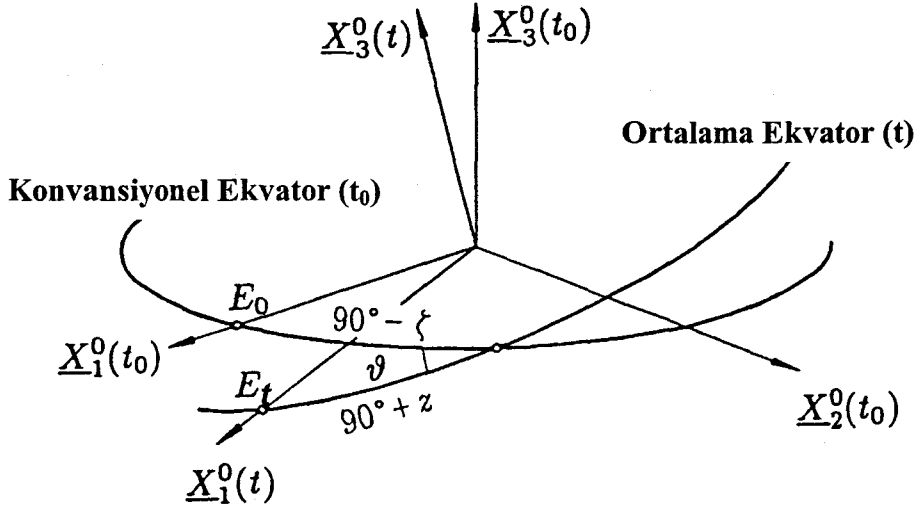
Merkezi, güneş sisteminin kütle merkezi barisentrda olan bir koordinat sistemi, güneş sistemine göre durağan, yani inersiyal bir sistemdir. Fakat yeryuvarının gravite alanının neden olduğu relativistik etkilerin büyüklüğü nedeniyle, yeryuvarına yakın uyduların hareketlerinin tanımı için jeosentrik bir koordinat sistemi daha uygun bulunur. Bu nedenle küresel astronomide de kullanılan, bir t_0 epoğunda verilen ve inersiyal sisteme oldukça iyi yaklaşım sağlayan bir jeosentrik sistem tanımlanır. Yeryuvarının güneş etrafındaki yıllık dolanımı nedeniyle bu sistem tam anlamıyla durağan değildir. Bu nedenle, sözkonusu referans sistemi *quasi-inertial sistem* olarak da adlandırılır. Bu şekilde tanımlanan koordinat sistemine Konvansiyonel Göksel Referans Sistemi (CCRS) adı verilir. 1 Ocak 1988'de kabul edilen referans epoğu 1 Ocak 2000 UT=12^h e göre belirlenen sistemin;

- Orijini yerin ağırlık merkezidir.
- Z eksen, yerin dönme ekseninin gök küreyi deldiği kutba doğru yöneliktir.
- X eksen, ekvator ile ekliptiğin arakesit doğrultusundaki ilkbahar noktasından geçer.
- Y eksen sağ-el sistemini tamamlar.

Ancak güneş ve ayın kitleleri ve değişen konumlarının sebep olduğu yeryuvarı gravite alanındaki değişimlerin sonucu olarak, yerin ekvator düzleminde burulmalar meydana gelir. Bu burulmalar nedeniyle yerin dönme ekseninin gök küreyi deldiği kutup sabit değildir ve prensip olarak presesyon ve nutasyon adı verilen birbiri üzerine bindirilmiş iki hareket yapar. Presesyon, periyodu yaklaşık 26000 yıl olan, inersiyal uzaya göre dairesel kutup hareketidir (Şekil 2.2). Nutasyon ise 18.6 yıldan 14 güne kadar değişen peryotlarda sapmaların ortaya çıkardığı daha hızlı bir harekettir (Şekil 2.3).

Bir yıldızın sadece presesyon hesaba katılarak hesaplanan koordinatları onun *ortalama konumunu* olarak ifade edilir. Nutasyon da hesaba katılarak elde edilen koordinatlar ise onun gerçek konumunu verir. Buna göre t_0 referans epoğundaki

Konvansiyonel kordinatlardan t epogundaki ortalama koordinatlara geçiş presesasyon matrisiyle sağlanır:



Şekil 2.2 Presesyon

$$P = R_3(-z)R_2(\theta)R_1(-\zeta) \quad (2.12)$$

Burada yer alan üç eksen etrafındaki dönüklükler;

$$\zeta = 0^\circ.6406161T + 0^\circ.0000839T^2 + 0^\circ.0000050T^3 \quad (2.13a)$$

$$z = 0^\circ.6406161T + 0^\circ.0003041T^2 + 0^\circ.0000051T^3 \quad (2.13b)$$

$$\theta = 0^\circ.5567530T + 0^\circ.0001185T^2 + 0^\circ.0000116T^3 \quad (2.13c)$$

ile verilir. Eşitliklerde yer alan T ise $T=(t-t_0)$ ile tanımlanan epoklar arası farktır. T 36525 ile ifade edilen Jülyen asrı biriminde hesaplanır.

Ortama koordinatlardan, gözlem epogundaki anlık gerçek koordinatlara geçiş ise;

$$N = R_1(-\epsilon - \Delta\epsilon)R_3(-\Delta\psi)R_1(\epsilon) \quad (2.14)$$

ile sağlanır. Burada geçen

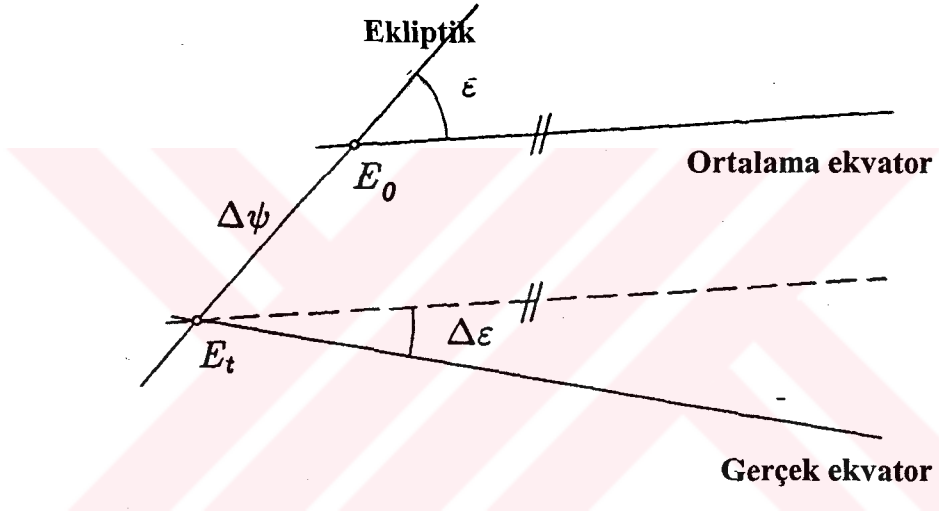
$$\epsilon = 23^\circ 26' 21''.448 - 46''.815T - 0''.00059T^2 + 0''.00183T^3 \quad (2.15)$$

ile verilir. $\Delta\psi$ ve $\Delta\epsilon$ ise Uluslararası Astronomi Birliği'nin 1980'de benimsediği elastik yer modeline dayanan nutasyon teorisine göre sırasıyla 106 ve 64 katsayılı serilerden hesaplanılır (Wahr, 1981). Serinin ana terimleri aşağıdaki gibidir.

$$\Delta\psi = -17''.1996 \sin \Omega - 1''.3187 \sin(2F - 2D + 2\Omega) - 0''.2274 \sin(2F - 2\Omega) \quad (2.16)$$

$$\Delta\epsilon = 9''.2025 \cos \Omega - 0''.5736 \cos(2F - 2D + 2\Omega) - 0''.0927 \cos(2F - 2\Omega) \quad (2.17)$$

Burada geçen Ω ayın yükselme noktasının ortalama boylamı, D ayın güneşten olan ortalama elongasyonu, $F = \lambda_M - \Omega$ olarak tanımlanır (Leick, 1995, Seeber, 1993).

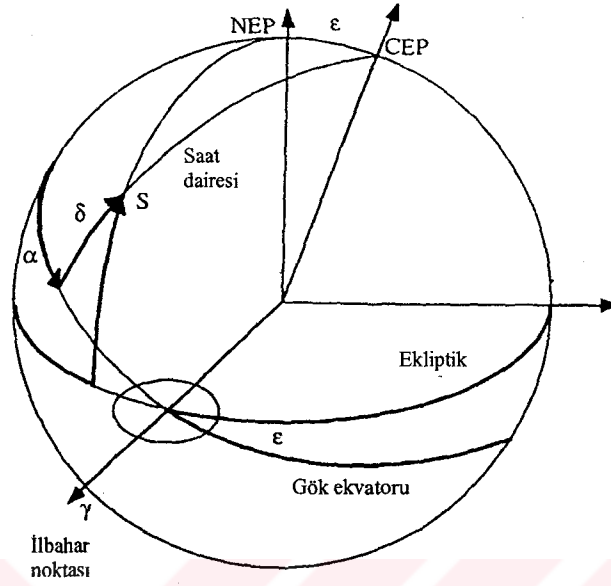


Şekil 2.3 Nutasyon

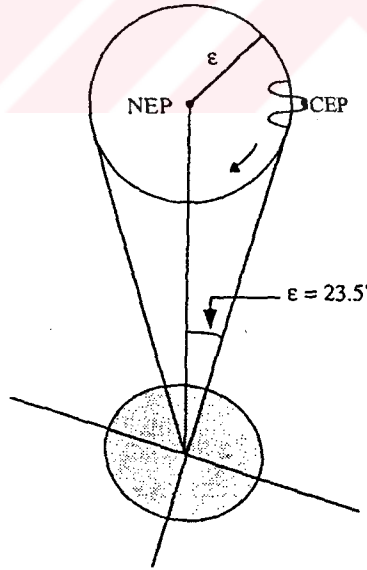
Pratik amaçlar için, anlık gerçek göksel koordinat sisteminin kutbu, Göksel Yörünge Kutbu'na (CEP) özdeş olarak düşünülür (Şekil 2.4). Şekil 2.5 ile gösterilen CEP, nutasyonun ve CTRS'ye geçişte kullanılan kutup hareketi parametrelerinin hesabı için referans kutbu olarak belirlenilir (USNO, 1983).

CCRS önceleri FK5 kataloğundaki yıldız konumlarına göre gerçekleştiriliyordu (Fricke, 1985). Bu şekilde belirlenen CCRS'nin doğruluğu yaklaşık $\pm 0.1''$ civarındaydı. Bu doğruluk modern ihtiyaçlar için yetersizdir. Modern ihtiyaçları karşılayacak bir referans frame IERS tarafından oluşturuldu ve bu frame ilk harfi IERS'i niteleyen ICRF olarak adlandırıldı. ICRF çoğunluğu quasar ve galaktik çekirdeklerden oluşan 500'ün üzerinde extragalaktik cisimden kinematik olarak

belirlendi (Hoffman ve diğ, 1997). ICRF ile belirlenen ICRS, 1998’de CCRS olarak benimsendi (IERS, 2000).



Şekil 2.4 Anlık Göksel Koordinat Sistemi: α ve δ S cisminin koordinatları, NEP kuzey ekliptik kutbu



Şekil 2.5 CEP’in yolu

IERS, kendisi tarafından belirlenen CCRS’nin orijinin güneş sisteminin barisentr’ında olduğunu ve quasarlara göre yapılan eksenlerinin yönlendirmesinin

doğruluğunun ± 20 microarcsecond mertebesinde olduğunu ifade etmektedir (IERS, 2000).

2.2.2 Yersel koordinat sistemleri

Yersel koordinat sistemleri, yeryuvarı üzerindeki noktaların konumlarının belirlenmesi için kullanılır. Bu bağlamda, farklı amaçlarla çok sayıda yersel koordinat sistemi kullanılmaktadır. Yersel koordinat sistemleri genel olarak jeosentrik sistemler ve toposentrik sistemler olarak iki ana grupta incelenebilir (Krakiwsky ve Wells, 1971).

2.2.2.1 Jeosentrik sistemler

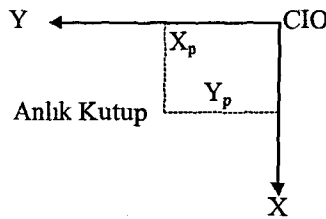
Jeosentrik sistemler merkezi yerin ağırlık merkezi olarak seçilen global sistemlerdir. Bu sistemleri de sırasıyla astronomik gözlemlere ve jeodezik hesaplara dayalı olan;

- Anlık ve Konvansiyonel yersel sistemler
- Jeodezik (elipsoidal) sistemler

olarak iki alt gruba ayırabiliriz.

Anlık ve Konvansiyonel Yersel Sistemler:

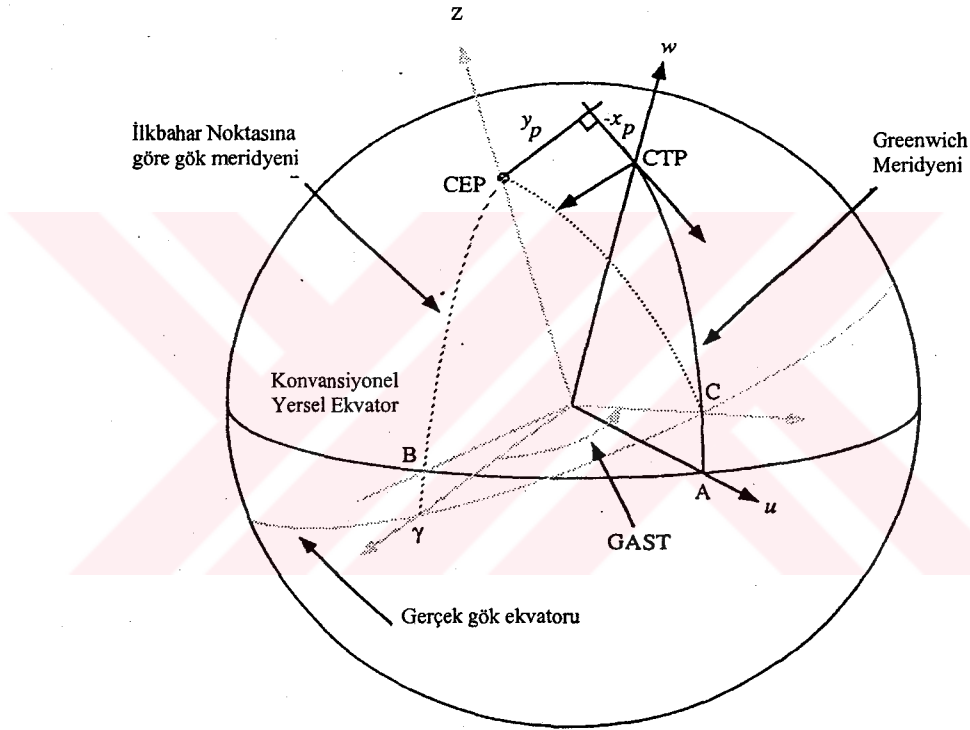
Yer sabit bir referans sistemini tanımlamak oldukça güçtür. Bunun nedeni litosfer tabakasının (yeryuvarının 100km'lik dış tabakası) bağımsız olarak hareket eden yaklaşık 20 rijit tabakadan oluşmasıdır. Bu plakalar yer içindeki hareketleri nedeniyle yılda 1-10 cm yerdeğiştirirler. Bunun sonucu, yer kabuğuna göre yerin dönme ekseninin konumu değişir. Bu hareket "kutup hareketi" olarak adlandırılır (Şekil 2.6). Kutup hareketi bir dereceye kadar periyodiktir ve tam devri yaklaşık 434 gündür. Genliği 10 m'yi geçmeyecek biçimde değişir.



Şekil 2.6 Kutup hareketi parametreleri

Hareketli olan gök kutbunu Z eksenini olarak alacak bir koordinat sistemi “anlık koordinat sistemi” olacaktır. Bu anlık yersel sistemin;

- Başlangıcı dünyanın ağırlık merkezindedir.
- Z eksenini dünyanın gerçek dönme eksenini ile çakışktır.
- X eksenini gerçek ekvator düzlemi ile gerçek dönme eksenini ve Greenwich gözlemevi astronomi noktasını içine alan düzlemin arakesitidir.
- Y eksenini sağ-el sistemini tamamlar.



Şekil 2.7 CTRS ve Anlık CRS ile ilişkisi

Yersabit bir koordinat sisteminin tanımı, Uluslararası Saat Bürosu (BIH) tarafından, yerin dönme ekseninin 1900-1905 yılları arasındaki ortalama konumu Konvansiyonel Uluslararası Orijin'in (CIO), Konvansiyonel Yersel Kutup (CTP) olarak benimsenmesiyle gerçekleştirilmiş ve bu sisteme Konvansiyonel Yersel Referans Sistemi (CTRS) adı verilmiştir (Şekil 2.7). Bu ortalama kutup noktası (CIO) ve Greenwich ortalama astronomik meridyen doğrultusu, *Konvansiyonel Yersel Koordinat Sistemi* CTRS'yi tanımlar. Konvansiyonel yersel sistem, ideal dünya jeodezik sistemidir ve;

- Başlangıcı dünyanın ağırlık merkezindedir.
- Z eksen, yeryuvarının ortalama dönme eksen, ile çakışık ve CIO'ya doğru yönelmiştir.
- X eksen Greenwich ortalama astronomik meridyen düzlemi ile ortalama ekvator düzleminin arakesitinde uzanır.
- Y eksen sağ-el sistemini tamamlar.

Konvansiyonel yersel sistem noktaların uzaydaki konumlarının belirlenmesini sağlar. Bu sistemde bir yer noktasının konumu X, Y, Z dik koordinatları, ϕ , Λ , W veya H eğri koordinatları ile tanımlanabilir. Burada W jeopotansiyel anlamındadır.

Herhangi bir noktanın anlık yersel sistemdeki koordinatlarını, konvansiyonel sisteme dönüştürmek için iki sistem arasında;

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CTRS} = \mathbf{R}_2(-X_P)\mathbf{R}_1(-Y_P) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Anl. TRS} \quad (2.18)$$

ilişkisi kurulabilir. Eşitlikteki X_P , Y_P yay saniyesi biriminde ifade edilen ve CIO'ya göre gerçek kutbun yerini veren koordinatlardır.

CCRS'den CTRS'ye geçiş ise;

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CTRS} = \mathbf{R}_2(-X_P)\mathbf{R}_1(-Y_P)\mathbf{R}_3(GAST)\mathbf{N}\mathbf{P} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CCRS} \quad (2.19)$$

ile sağlanır. Burada CCRS, önce presesyon ve nutasyon dönme matrisleri $\mathbf{P}$ ve $\mathbf{N}$ 'nin uygulanmasıyla Anlık Göksel Referans Sistemine, Anlık Göksel Referans Sistemi Greenwich görünen yıldız zamanı (GAST) ile Anlık Yersel Referans Sistemine, son olarak da Anlık yersel koordinatlar (2.19)'daki gibi kutup hareketi parametrelerinden yararlanarak CTRS'ye dönüştürülmektedir. Kutup hareketi parametreleri ve GAST Yer Dönme Parametreleri (ERP) veya Yer Yönlendirme Parametreleri (EOP) olarak adlandırılırlar.

CTRS'nin gerçekleştirilmesi de Yersel Referans Frame'ler yardımıyla olur. Böyle bir Referans Frame'e örnek olarak World Geodetic System 1984 (WGS84) verilebilir.

Bu jeosentrik sistem 1500'den fazla yersel noktayla TRANSIT Satellite Sistemi'nden Doppler Yöntemiyle belirlenmiştir ve 1987'den itibaren GPS'in referans sistemi olarak alınmıştır (Hoffmann ve diğ, 1997). Referans istasyonlarının doğruluğu 1-2 metre mertebesindedir. Yine GRS80 ve EUREF Referans Frame'leride CTRS gerçekleştirmek amacıyla oluşturulmuş ağlara örnek oluşturur.

Bugüne kadar CIO kutbu CTP olarak seçildi. Fakat son on yılda modern gözlem tekniklerinin yoğun bir şekilde kullanılmasıyla bu tanım yetersiz görüldü (Seeber, 1993). BIH bunun yerine 1984'de, yerkağı hareketinin neden olduğı koordinat değışimlerinin de hesaba katıldığı, GPS, SLR ve VLBI gibi en presizyonlu gözlem teknikleriyle belirlenen bir global referans ağıyla CTRS oluşturma yoluna gitti (Leick, 1995). Daha sonra BIH'ın yerini alan IERS bu çalışmaları sürdürdü. Sonuç olarak olarak 180'den fazla yer noktasından belirlenen ITRF oluşturuldu. IERS, ITRF'nin genişletilmesi ve iyileştirilmesi için belli aralıklarla gözlemlerini yinelemektedir. Bu yinelemeler, ITRF gösteriminin sonuna gözlem yılı iki hane olarak eklenerek ifade edilmekte olup, 1996'dan beri ITRF94 kullanımdadır. ITRF referans istasyonlarının doğruluğı santimetre mertebesindedir.

ITRF ile belirlenen CTRS, ITRS ile sembolize edilmektedir. IERS, bu yolla belirlediğı ITRS'yi, orijini okyanusları ve atmosferi de içeren tüm yeryuvarının ağırlık merkezinde olan, Eksenlerinin yönlendirmesi 1984'deki BIH sistemiyle ± 3 miliarcsecond mertebesinde tutarlı bir sistem olarak tanımlamaktadır (IERS, 2000).

Jeodezik (Elipsoidal) Sistemler:

Koordinat sistemi olarak CTRS'nin belirlenmesi yeterli değildir. Jeodezik hesaplamalar için, yeryuvarının gerçek şekline uygun ve matematik modeli basit bir referans yüzeyine ihtiyaç duyulur ki, buna en uygun geometrik şekil dönel elipsoittir. Bir dönel elipsoit ile tanımlanan jeosentrik bir koordinat sisteminin, modern teknolojinin gereksinimlerini sağlayabilmesi için CTRS'ye olabildiğince uygun olması gerekir.

Bu beklentileri karşılayan bir Jeosentrik Elipsoidal Sistemin;

- Başlangıcının referans elipsoidinin merkezinde
- Z ekseninin elipsoidinin küçük ekseni ile çakışık

- X ekseninin Greenwich jeodezik meridyen düzlemi ile ekvator düzleminin arakesitinde ve artı yönü 0° jeodezik boylama doğru
- Y ekseninin ise sağ-el sistemini tamamlamış

olması istenir (Şekil 2.8). Böyle bir sistemde, bir P noktasının konumu X, Y, Z dik koordinatları veya λ , ϕ h elipsoidal eğri koordinatları ile verilir. ϕ elipsoidal enlem, λ elipsoidal boylam, h elipsoidal yükseklik anlamındadır.

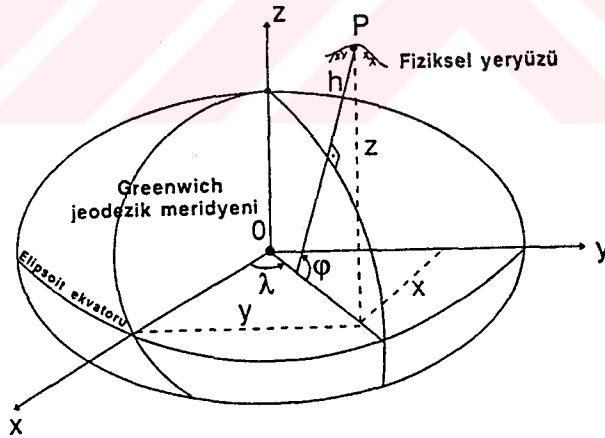
Elipsoidal eğri koordinatlardan elipsoidal dik koordinatlara geçiş;

$$X = (N+h)\cos\phi\cos\lambda$$

$$Y = (N+h)\cos\phi\sin\lambda \quad (2.20a,b,c)$$

$$Z = ((1-e^2)N+h)\cos\phi$$

eşitlikleriyle gerçekleştirilir. Burada N meridyene dik doğrultudaki normal kesit eğrilik yarıçapıdır.



Şekil 2.8 Jeosentrik elipsoidal koordinat sistemi

Elipsoidal dik koordinatlardan eğri koordinatlara geçiş, iteratif veya kapalı formüllerle gerçekleştirilir.

Elipsoidal boylam, (2.20) eşitliklerindeki Y'nin X'e bölünmesiyle doğrudan elde edilir;

$$\lambda = \arctan(Y/X) \quad (2.21)$$

Elipsoidal enlem ve elipsoit yüksekliği için iterasyona dayanan yöntemde;

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos\varphi} - N \quad (2.22)$$

ile ifade edilirken, (2.20) eşitliğinde $Z = ((1-e^2)N+h)\sin\varphi = (N-e^2N+h)\sin\varphi$ şeklinde yeniden düzenlenip $\sqrt{X^2 + Y^2}$ ile bölündüğünde elipsoidal enlem için;

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Z(N+h)}{\sqrt{X^2 + Y^2}(N+h-e^2N)}\right) \quad (2.23)$$

bağıntısı elde edilir. Görüldüğü üzere, (2.22)'de φ , (2.23)'de h yer almaktadır ve ikisinde aranan parametreler olduğundan çözüm iteratif olarak gerçekleştirilebilir.

İterasyonun ilk adımında $h=0$ için (2.23) eşitliğinden φ için yaklaşık değer bulunur. Bulunan değerle (2.22) eşitliğinden h_1 hesaplanır. İkinci adımda $h=h_1$ için φ_2 bulunur. İterasyon, N ve h için kabul edilebilir değişimler elde edilinceye kadar sürdürülür. Bu değişimler için $(h_i-h_{i-1}) < a\varepsilon$ ve $(\varphi_i-\varphi_{i-1}) < \varepsilon$ ($\varepsilon=10^{-10}$) hata sınırları tavsiye edilmektedir (Vanicek ve Krakiwsky, 1982).

Dik koordinatlardan eğri koordinatlara geçiş için kapalı formüller;

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Z(1-f)+e^2a\sin^3\mu}{(1-f)(\sqrt{X^2 + Y^2}a\cos^3\mu)}\right) \quad (2.24)$$

$$h = (X^2+Y^2)^{1/2} \cos\varphi + Z\sin\varphi - a(1-e^2\sin^2\varphi)^{1/2} \quad (2.25)$$

ile verilirler. Burada;

$$\mu = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left[(1-f) + \frac{e^2a}{r} \right] \quad (2.26)$$

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (2.27)$$

olur.

Elipsoidal dik koordinat sisteminin üç eksenini, konvansiyonel yersel koordinat sisteminin üç eksenini ile çakışacak veya paralel olacak şekilde tasarlanır. Eksenlerin çakışık olması halinde bir mutlak jeosentrik elipsoidal sistem, paralel olması halinde bir relatif elipsoidal sistem söz konusudur. Relatif jeosentrik sistemler genellikle ulusal ve bölgesel datumlar için geçerlidir ve bunlar astrojeodezik yöntemle belirlenirler. Bu yöntemde elipsoit parametrelerini belirlemek ve elipsoidi konumlandırmak için, referans ağına ait çekül sapması bileşenleri Vening-Meinesz eşitliklerinde yerine koyulur ve çekül sapmalarını minimum yapan en küçük kareler çözümü gerçekleştirilir (Heiskanen ve Moritz, 1967). Dengeleme modeline Laplace eşitlikleri de eklenerek elipsoidal sistemin CTRS'ye paralel olması sağlanır (Cross, 1989). Mutlak jeosentrik sistemlerde ise, elipsoidi belirleyen parametreler CTRS'yi gerçekleştiren Referans Frame'lerden yararlanarak hesaplanır. Mutlak jeosentrik elipsoidal sistemler yerin gravite alanına ve uydu teknolojilerine yönelik çalışmaların giderek artması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu iki tip elipsoidal koordinat sisteminden, relatif olana ED50, mutlak olana WGS84 ve GRS80 koordinat sistemleri örnek olarak gösterilebilir.

Jeosentrik sistemler gerçekleştirilirken, her ne kadar CTRS ile çakışmaları veya paralel olmaları amaçlansa da, bunun sağlanması mümkün değildir. Bu nedenle, jeosentrik koordinat sistemleri arasında dönüşüm gerçekleştirilirken, Bölüm (2.1)'de verilen ve öteleme, ölçek ve dönüklükleri de içeren en genel durum ele alınır. Buna göre gerek elipsoidal olsun gerekse CTRS olsun, iki jeosentrik sistem arasında dönüşüm;

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \mathbf{R}(1+k) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_1 \quad (2.28)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Jeosentrik sistemler CTRS'ye referanslandıklarından, aralarındaki dönüklüklerin oldukça küçük olması gerekir. Dolayısıyla dönüşüm hesabında genellikle lineer dönme matrisi $\mathbf{R}$ kullanılır.

2.2.2.2 Toposentrik sistemler

Yeryüzü üzerindeki her nokta için ayrı bir koordinat sistemi tanımlanabilir. Bu sistemlerin en önemli özelliği başlangıç noktasının durulan noktada olmasıdır.

Jeosentrik sistemlerde olduğu gibi iki ayrı yerel toposentrik koordinat sistemi tanımlanabilir;

- Yerel astronomik sistem
- Yerel jeodezik sistem

Yerel Astronomik Sistem:

Herhangi bir yerel astronomik sistemin;

- Başlangıç noktası yeryüzünde durulan noktadır.
- Z eksenini, durulan noktadan (istasyon noktası) geçen eşpotansiyel yüzey normali ile çakışık ve pozitif yönü astronomik başucuna yöneliktir.
- X eksenini durulan noktadaki eşpotansiyel yüzeye teğet düzlem içindedir. Ortalama kutup noktası CIO'ya yöneliktir ve astronomik kuzey olarak adlandırılır.
- Y eksenini teğet düzlem içerisinde kalacak şekilde sol-el sistemini tamamlar. Pozitif yönü doğuya yönelmiştir.

Klasik yerel ölçmelerin tamamı yerel astronomik sistemde yapılır. Herhangi bir K noktasının yerel astronomik sistemdeki konumu bir İstasyon noktasından (P noktası), K noktasına yapılan astronomik azimut (α), başucu açısı (z), eğik uzaklık (S) ölçmeleriyle belirlenebilir. Bunlar noktanın kutupsal koordinatlarıdır. Kutupsal koordinatlarla yerel astronomik dik koordinatlar arasında;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \sin z \cos \alpha \\ \sin z \sin \alpha \\ \cos z \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

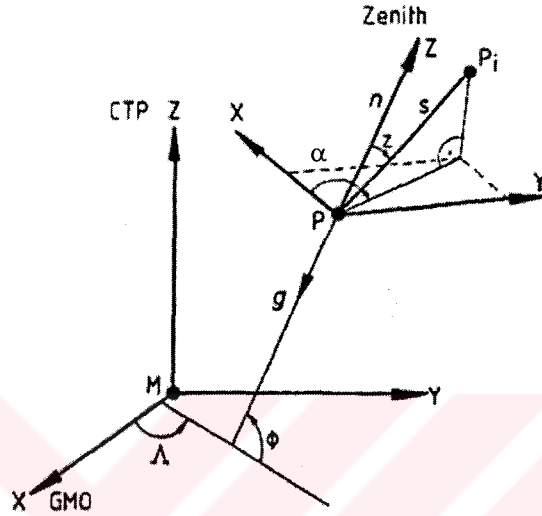
ilişkisi vardır.

Yerel astronomik sistemin başlangıcı olan istasyon noktasında ölçülen astronomik enlem (ϕ_0) ve boylam (Λ_0), kutup hareketine göre düzeltilir ve ortalama kutup CIO'ya indirgenirler.

Şekil 2.9 ile tanımlanan yerel astronomik sistemle konvansiyonel yerel sistem arasındaki ilişki CIO'ya göre indirgenmiş astronomik enlem (ϕ_0) ve boylam (λ_0) yardımıyla;

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CTRS} = t + R_3(180 - \phi_0) R_2(90 - \Lambda_0) P_2 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{Yerel Ast.} \quad (2.30)$$

ile verilir (Krakiwsky ve Wells, 1971, Arslan, 1989).



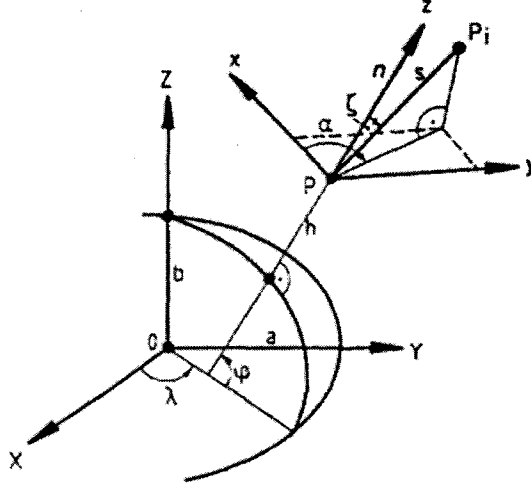
Şekil2.9 Yerel astronomik sistemle CTRS ilişkisi

Yerel astronomik sistemle konvansiyonel yersel sistem arasındaki ilişki üç boyutlu jeodezinin temelini oluşturması bakımından önemlidir.

Yerel Jeodezik (Elipsoidal) Sistem:

Yerel bir jeodezik sistemin;

- Başlangıç noktası, gözlem istasyonundan geçen elipsoit normalinde herhangi bir yerdedir. Uygulamada ise başlangıç noktası, gözlem istasyonunda, elipsoit yüzünde veya elipsoit normalinde jeoitin kesiştiği yerde seçilir.
- z ekseni elipsoit normaline çakışır ve pozitif doğrultusu jeodezik başucuna yöneliktir.
- x ekseni başlangıç noktasında elipsoit normaline dik olan düzlem içinde kalır ve pozitif yönü jeodezik kuzeye yöneliktir.
- y ekseni sol-el sistemini tamamlar ve doğuya yöneliktir.



Şekil 2.10 Yerel ve jeosentrik elipsoidal sistem ilişkisi

Şekil 2.10 ile ifade edilen yerel ve jeosentrik jeodezik sistemler arasındaki dönüşüm (2.30) bağıntısındaki gibi gerçekleştirilir. Ancak eşitlikte geçen astronomik enlem ve boylam yerine, jeodezik enlem ve boylam kullanılır. Yerel jeodezik sistemle yerel astronomik sistem arasındaki ilişki çekül sapması bileşenleri yardımıyla kurulur. Böylece yerel astronomik sistemden yerel jeodezik sisteme dönüşüm;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{elip.}} = R_1(-\eta)R_2(-\xi) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{ast.}} \quad (2.31)$$

ile gerçekleştirilir. Burada ξ ve η çekül sapması bileşenleridir (Krakiwsky ve Wells, 1971, Arslan, 1989).

Yerel jeodezik sistem çoğu kez, referans elipsoidinin herhangi bir noktadaki çekül sapması bileşenleri sıfır alınarak konumlandırılmasıyla gerçekleştirilir. Geçmiş yıllarda ulusal datumları belirlerken, bu uygulama için ülkelerin yaklaşık ortasında bir nokta seçiliyordu.

2.3 ED50 ve WGS84 Koordinat Sistemlerinin Tanımı

Çalışmanın kapsamını GPS ağlarının ülke nirengi ağlarıyla birlikte kullanılması oluşturmaktadır. Böyle bir entegrasyonun hangi temel yaklaşımlar çerçevesinde gerçekleştirileceğini belirleyebilmek için, her iki ağın referanslandıkları koordinat

sisteminin, yukarıda genel tanımları yapılan koordinat sistemlerinden hangilerinin kapsamında olduğunu saptamak yerinde olacaktır.

Öncelikle, her iki ağ koordinatları, jeodezik uygulamalarda kullanıldıklarından jeodezik, yani elipsoidal koordinat sisteminden kaynaklanmaktadır. Türkiye Ülke Nirengi Ağı'nda ED50 koordinat sistemi kullanılmaktadır. ED50 koordinat sisteminin referans elipsoidi 1924 Uluslararası Elipsoidi'dir. Bu elipsoit, Orta Avrupa Referans Ağı'nda çekül sapmalarının kareleri toplamı minimum olacak şekilde konumlandırılmıştır (Aksoy, 1985). Konumlandırma sırasında, laplace koşuluyla koordinat sisteminin CTRS'ye göre paralelliği sağlanmış, buna karşın jeoit ondülasyonu N_0 , Almanya'nın Postdam kentinde bir noktada sıfır alınmıştır (Harsson, B.G., 1994). Böylece sistem CTRS'ye göre ötelenmiştir. Dolayısıyla ED50 bir "Relatif Jeosentrik Elipsoidal Koordinat Sistemi"dir. Relatif sistemleri "Bölgesel Koordinat Sistemleri" olarak da tanımlamak mümkündür.

Tablo 2.1 WGS84 ve Uluslararası Hayford elipsoidi parametreleri

Parametre	WGS84 Elipsoidi	Hayford Elipsoidi
Büyük yarıksen (a)	6378137.000m	6378388.000m
Basıklık (f)	1/298.257223563	1/297
Açısal hız (ω)	$7292115.1 \cdot 10^{-11}$ rad/sn	$7292115.1 \cdot 10^{-11}$ rad/sn
Gravitasyonel sabit (GM)	$3986005 \cdot 10^8$ m ³ /sn ²	$3986329 \cdot 10^8$ m ³ /sn ²
2. der. zonal katsayı ($\bar{C}_{2,0}$)	$-484.16685 \cdot 10^{-6}$	$1092630 \cdot 10^{-9}$
Normal Potansiyel (U_0)	$6.2636861 \cdot 10^7$ m ² /sn ²	$6.2636970 \cdot 10^7$ m ² /sn ²
Ekvatordaki norm. grav. (γ_e)	9.780327 m/sn ²	9.78049 m/sn ²

GPS sistemin kurucusu olan Defence Mapping Agency (DMA), uydu yörüngelerinin belirlenmesi ve izlenmesi için konvansiyonel yersel sistemler başlığı altında sözü edilen WGS84 Referans Frame'ini oluşturmuştur. Jeodezik hesaplamalar için de, parametreleri GRS80 elipsoidinden benimsenen, WGS84 Referans Frame'den yararlanarak konumlandırılan WGS84 elipsoidini belirlemiştir (Tablo 2.1). GRS80 elipsoidinin zonal katsayısı daha sonra altı basamaktan sekiz basamağa çıkarıldığından, iki elipsoit arasında basıklıkta $16 \cdot 10^{-12}$ 'lik bir farka oluşmuştur. WGS84'ü belirleyen parametreler, IERS tarafından belirlenen ITRF parametrelerinden ise tamamen farklıdır. Ancak uydu yörüngelerinde ölçülebilir

farklara neden olan anlamlı farklılık sadece $d\mu=0.582*10^8$ ile verilen yer gravitasyonel sabitinden kaynaklanmaktaydı. ITRF daha duyarlı belirlendiğinden DMA 730. GPS haftasında ITRF'nin gravitasyonel sabitini benimseme kararı aldı ve uydu izleme istasyonlarının koordinatlarını buna göre yeniledi (**Bock, 1996**). Bu yolla belirlenen elipsoidal WGS84 Koordinat Sistemi, bir Mutlak Jeosentrik Elipsoidal Koordinat Sistemidir. Dolayısıyla, GPS sinyalleriyle yayınlanan ve broadcast ephemeris adı verilen uydu yörünge koordinatlarına göre belirlenecek jeodezik ağ koordinatları da WGS84 Elipsoidal Koordinat Sisteminde olacaktır. Bunun yanında, 1992 yılından beri faaliyette olan IGS, GPS uyduları için precise ephemeris adı altında duyarlı yörünge bilgileri üretmekte ve bunları internet üzerinden herkesin kullanımına sunmaktadır. IGS'in bu yörünge bilgileri ITRF koordinatlarıyla tutarlıdır ve bu iş için 1996 yılından itibaren ITRF94 kullanılmaktadır.



3. ED50 VE WGS84 SİSTEMLERİ ARASINDA DATUM DÖNÜŞÜMÜ

3.1 Neden Koordinat Dönüşümü

Haritacılık faaliyetleri bakımından son yüzyıl, yoğun altyapı çalışmalarına sahne olmuştur. Ülkelerin büyük çoğunluğu, kadastro, mühendislik ve belediyeçilik hizmetlerine dayanak oluşturacak, kendilerine uygun özellikler taşıyan ülke nirengi ağlarını planlamış, onların gerçekleşmesini sağlamış ve pek çok ülkede bunların defalarca iyileştirmeleri yapılmıştır. Bugün konumlamada yeni bir dönem açan ve tüm dünya üzerinde vazgeçilmez bir ölçme yöntemi haline gelen uydu gözlem teknikleri devrededir. Bu modern gözlem teknikleri, kendileri gibi modern koordinat sistemlerine dayandırılırlar. Ancak ülkelerin, istisnalar dışında, bütün konumsal kadastro ve belediye hizmetleri, ülke nirengi ağlarının belirlediği datumdadır. Dolayısıyla, sözkonusu hizmetlerin sürdürülebilmesi için, uydu teknikleriyle belirlenecek koordinatların uygun bir yöntemle ülke nirengi ağlarına bağlanması, bugünün şartlarında bir zorunluluk olur. Bunun için, iki alternatiften söz edilebilir: Birincisi, uydu gözlem tekniklerinin ürünlerinden olan uzay kenarların, ülke sistemine göre projeksiyon düzlemine indirgenmesi ve burada bir ağ dengelemesinin gerçekleştirilmesi veya dengeleme hesabının ülke ağı datumunda, baz bileşenleri ölçü alınıp aralarındaki korelasyonlar da göz önünde bulundurularak yapılmasıdır. İkincisi ise bilinen dönüşüm yöntemlerinden faydalanmaktır.

GPS ölçülerinin ağ dengelemesi yoluyla, ülke ağıyla birleştirilmesi, doğruluğu daha yüksek olan GPS ağlarının distorsiyonlara zorlanması anlamına gelmektedir. Oysa söz konusu birleştirmenin dönüşümle gerçekleştirilmesi, hesap kolaylığı ve veri organizasyonu elverişliliği yanında, ülke nirengi ağlarının yargılanmasına imkan tanınması ve gelecekteki olası bağlantıları mümkün kılması açısından tercih edilmektedir.

3.2 ED50 Ve WGS84 Koordinat Sistemleri Arasındaki Dönüşümün Matematik Modeli

Çalışmanın konusunu oluşturan GPS ve ülke nirengi ağlarının dayandıkları koordinat sistemlerinin tanımları, Bölüm 2.3’de verilmektedir. Buna göre, GPS ağları için iki durum ortaya çıkmaktadır: Ağ koordinatları WGS84 sistemindeki broadcast ephemeris veya ITRF sistemindeki precise ephemeris bilgilerinden hesaplanmaktadır. Ancak uydu yörüngelerinin hesabı için WGS84 ve ITRF arasındaki tek anlamlı fark Bölüm 2.3’de ifade edildiği biçimde ortadan kaldırıldığından, precise ephemeris bilgileri ile hesap yapılırsa da, elde edilen jeodezik ağ koordinatları için hesap yüzeyi olarak yine WGS84 elipsoidi seçilmektedir. Bu bağlamda, GPS ağlarının nokta koordinatlarının ülke nirengi ağı referans sistemine dönüştürülmesinde, WGS84 ve ED50 sistemleri arasındaki ilişkiler gözönüne alınır. WGS84 Mutlak, ED50 Relatif Jeosentrik Koordinat Sistemi olarak belirlendiklerine göre, bu iki sistem arasında temel olarak Bölüm 2.1’deki ilkeleri gözetten (2.28) dönüşüm bağıntısı geçerli olacaktır. Bu bağıntı jeodezide genel olarak *Üç Boyutlu Benzerlik Dönüşümü* olarak adlandırılır.

3.2.1 Üç boyutlu benzerlik dönüşümü

Üç boyutlu benzerlik dönüşümü eşitliğinde t_x , t_y , t_z eksenler boyunca ötelemeler, ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z eksenler etrafındaki dönüklükler ve k ölçek faktörü olmak üzere yedi adet parametre bulunur. Bu parametreler her iki koordinat sistemindeki özdeş noktalardan yararlanarak en küçük kareler yöntemiyle hesaplanırlar. Problemin çözümü için çok sayıda yaklaşım vardır. Bursa-Wolf, Molodensky-Badekas, Veis, Krakiwsky-Thompson modelleri bunlardan bazılarıdır. Bu modellerden en yaygın olarak kullanılanlar, çözüm doğrulukları ve diğerlerine göre daha basit matematik yapıları nedeniyle, Bursa-Wolf ve Molodensky-Badekas modelleridir (Harvey, 1986).

3.2.1.1 Bursa-Wolf modeli

Bursa-Wolf modelinin genel eşitliği, (2.28)’deki gibidir (Bursa 1966, Wolf 1963, DEHA, 1998, AUSLIG, 2000, POSCE, 2000). Burada küçük dönüklükler için (2.10) bağıntısıyla verilen R dönme matrisi iki kısma ayrılarak;

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + \mathbf{U} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 0 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

şeklinde yazılır. Her iki sistemdeki koordinat değerleri x_1 ve x_2 ve bunların düzeltmeleri olarak düşünülecek inkonsistent parametreleri v_1 ve v_2 ile;

$$x_2 + v_2 = t + (1+k) (\mathbf{I} + \mathbf{U}) (x_1 + v_1) \quad (3.2)$$

yazılır. Burada bilinmeyen parametrelerin hesabında uygulanacak en küçük kareler yönteminde, özdeş noktaların iki sistemde de verilen koordinatları, Gauss-Markof modelinin ölçülerinin yerini tutmaktadır. (3.2) eşitliğinin sağ tarafındaki çarpımın gerçekleştirilmesiyle ortaya çıkacak olan $k\mathbf{U}x_1$, $k\mathbf{I}v_1$, $k\mathbf{U}v_1$ ve $\mathbf{U}v_1$ çok küçük terimler içerdiklerinden ihmal edilirler. Böylece (3.2) ifadesi;

$$x_2 + v_2 = t + x_1 + v_1 + (\mathbf{U} + k\mathbf{I}) x_1 \quad (3.3)$$

olur.

$$x_2 + v_2 = t + x_1 + v_1 + \begin{bmatrix} k & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & k & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

yazılarak, bir özdeş nokta için

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{x2} \\ v_{y2} \\ v_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 k + Y_1 \varepsilon_Z - Z_1 \varepsilon_Y \\ -X_1 \varepsilon_Z + Y_1 k + Z_1 \varepsilon_X \\ X_1 \varepsilon_Y - Y_1 \varepsilon_X + Z_1 k \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

elde edilir. Bu matris gösterimi tek bir nokta için denklem sistemi şeklinde ifade edilir ve uygun biçimde düzenlenirse;

$$\begin{aligned} v_{x_1} + 0 + 0 - v_{x_2} + 0 + 0 + t_x + 0 + 0 + 0 - Z_1 \varepsilon_Y + Y_1 \varepsilon_Z + X_1 k + X_1 - X_2 &= 0 \\ 0 + v_{y_1} + 0 + 0 - v_{y_2} + 0 + 0 + t_y + 0 + Z_1 \varepsilon_X + 0 - X_1 \varepsilon_Z + Y_1 k + Y_1 - Y_2 &= 0 \\ 0 + 0 + v_{z_1} + 0 + 0 - v_{z_2} + 0 + 0 + t_z - Y_1 \varepsilon_X + X_1 \varepsilon_Y + 0 + Z_1 k + Z_1 - Z_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

doğrusal denklemleri ortaya çıkar. Bu ifade bir özdeş nokta için v düzeltmeleri ve dönüşüm parametreleri bilinmeyenleri ve bilinmeyenleri içeren üç koşul denklemini

göstermektedir. Özdeş noktaların koordinat farkları ise bu denklemlerin mutlak terimleridir. Tüm özdeş noktalar için bu şekilde oluşturulacak denklemlerin genel gösterimi

$$\mathbf{A} \mathbf{v} + \mathbf{B} \mathbf{x} - \mathbf{l} = 0 \quad (3.7)$$

şeklindedir. $\mathbf{x}$ dönüşümün bilinmeyen parametreleri olmak üzere, buradaki kısa gösterimlerin açık ifadesi aşağıdaki gibidir (Şimşek, 1995).

$$\mathbf{v}^T = [v_{x_1} \ v_{y_1} \ v_{z_1} \ v_{x_2} \ v_{y_2} \ v_{z_2}] \quad (3.8)$$

$$\mathbf{x}^T = [t_x \ t_y \ t_z \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ k] \quad (3.9)$$

$$-\mathbf{l}^T = [(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)(Z_1 - Z_2)] \quad (3.10)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_1 & Y_1 & X_1 \\ 0 & 1 & 0 & Z_1 & 0 & -X_1 & Y_1 \\ 0 & 0 & 1 & -Y_1 & X_1 & 0 & Z_1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Ayrıca bu matris ve vektörlerin satır sayısı, her yeni bir özdeş nokta için katlanacaktır. Eğer sistemlerden birinin hatasız olduğu varsayılırsa (Örneğin ikinci sistem koordinatları) $v_{x_2} = v_{y_2} = v_{z_2} = 0$ ile;

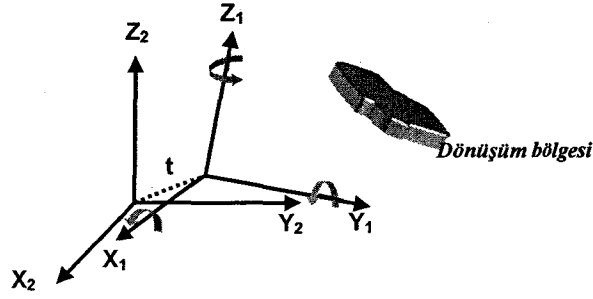
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

olur ve model;

$$\mathbf{v} = \mathbf{B} \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (3.14)$$

dolaylı ölçüler dengelemesinin fonksiyonel modeli haline gelir.

Bursa-Wolf modelinin geometrik gösterimi Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1 Bursa-Wolf modelinin geometrik gösterimi

3.2.1.2 Molodensky-Badekas modeli

Bu modelde, Bursa-Wolf Modelinden farklı olarak, dönüşüm parametrelerinin hesabında kullanılacak özdeş noktaların, dönüştürülecek sistemdeki koordinatlarının ağırlık merkezinde olan, bir P_0 noktası alınır ve tüm noktaların konum vektörleri P_0 noktasına göre yeniden belirlenir ($x_1 - x_0$). Bu yeni konum vektörü bir (U, V, W) koordinat sisteminde tanımlanır. Bu sistem P_0 noktasında döndürüldükten sonra, önce x_0 konum vektörü kadar, sonra da dönüşüme konu, iki koordinat sistemi arasındaki t öteleme vektörü kadar ötelenir. Model genel olarak ;

$$x_2 = t + x_0 + (1+k) (R) (x_1 - x_0) \quad (3.15)$$

bağıntısıyla ifade edilir (Kutoğlu, 1997). Burada, x_0 bir P_0 noktasının (Çoğunlukla özdeş noktaların koordinatlarının ağırlık merkezi) birinci sistemdeki koordinatlarıdır.

Burada da çözüme Bursa-Wolf modelinde olduğu gibi gidilir. R dönme matrisi, $I+U$ bileşenlerine ayrılır. Her iki sistemdeki koordinatların ve x_0 vektörünün hatalı olduğu düşünülür ve $(1+k)(I + U)$ çarpımı yapılır. Bu durumda genel bağıntı;

$$x_2 + v_2 = t + x_0 + v_0 + (I + U + kI + kU)((x_1 - x_0) + (v_1 - v_0)) \quad (3.16)$$

haline gelir. Burada oluşacak kU , $kI(v_1 - v_0)$ ve $U(v_1 - v_0)$ matris çarpımları çok küçük terimler içermeleri nedeniyle gözardı edilirler. Böylece;

$$x_2 + v_2 = t + x_0 + v_0 + I(x_1 - x_0) + U(x_1 - x_0) + kI(x_1 - x_0) + I(v_1 - v_0) \quad (3.17)$$

olur. Burada;

$$\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0 = \mathbf{s} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

değişimiyle;

$$\mathbf{x}_2 + \mathbf{v}_2 = \mathbf{t} + \mathbf{x}_0 + \mathbf{v}_0 + (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) + \mathbf{U} \mathbf{s} + \mathbf{k} \mathbf{I} \mathbf{s} + \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_0 \quad (3.19)$$

ve;

$$\mathbf{x}_2 + \mathbf{v}_2 = \mathbf{t} + \mathbf{x}_1 + \mathbf{v}_1 + (\mathbf{U} + \mathbf{k} \mathbf{I}) \mathbf{s} \quad (3.20)$$

elde edilir. Bu eşitlik görüldüğü üzere Bursa-Wolf modelindeki (3.3) eşitliğine özdeştir. Oradaki yol izlenerek;

$$\mathbf{x}_2 + \mathbf{v}_2 = \mathbf{t} + \mathbf{x}_1 + \mathbf{v}_1 + \begin{bmatrix} Uk + V\epsilon_z - W\epsilon_y \\ -U\epsilon_z + Vk + W\epsilon_x \\ U\epsilon_y - V\epsilon_x + Wk \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

elde edilir. Bu matris gösterimini bir nokta için açıp, denklem sistemi halinde düzenleyecek olursak;

$$\begin{aligned} v_{x_1} + 0 + 0 - v_{x_2} + 0 + 0 + t_x + 0 + 0 + 0 - W\epsilon_y + V\epsilon_z + Uk + X_1 - X_2 &= 0 \\ 0 + v_{y_1} + 0 + 0 - v_{y_2} + 0 + 0 + t_y + 0 + W\epsilon_x + 0 - U\epsilon_z + Vk + Y_1 - Y_2 &= 0 \\ 0 + 0 + v_{z_1} + 0 + 0 - v_{z_2} + 0 + 0 + t_z - V\epsilon_x + U\epsilon_y + 0 + Wk + Z_1 - Z_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.22)$$

doğrusal denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminin genel gösterimi;

$$\mathbf{A} \mathbf{v} + \mathbf{B} \mathbf{x} - \mathbf{I} = 0 \quad (3.23)$$

bilinmeyenli koşullu ölçüler dengelemesinin fonksiyonel modelidir. Burada (3.12)'den farklı olarak;

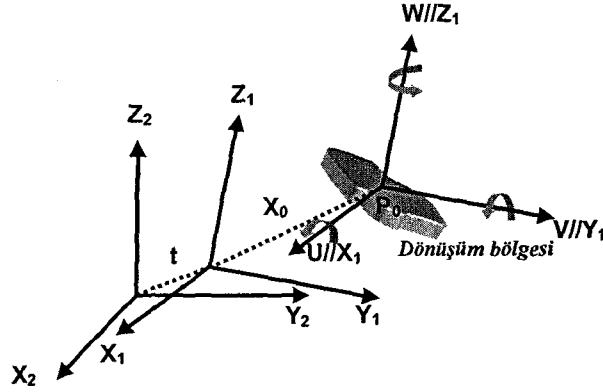
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -W & V & U \\ 0 & 1 & 0 & W & 0 & -U & V \\ 0 & 0 & 1 & -V & U & 0 & W \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

şeklindedir.

Bu modelde sistemlerden birinin hatasız varsayılması durumunda, yine;

$$\mathbf{v} = \mathbf{B} \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (3.25)$$

şeklinde dolaylı ölçüler dengelemesinin fonksiyonel modeli ile karşılaştırılır (Şimşek, 1995). Modelin geometrik ifadesi Şekil 3.2'deki gibidir.



Şekil 3.2 Molodensky-Badekas modelinin geometrik gösterimi

3.2.1.3 Üç boyutlu dönüşümde diferansiyel ilişkiler

Daha önce vurgulandığı gibi, dönüşüm hesabında en önemli problem, özdeş nokta koordinatlarından yararlanarak hesaplanan dönüşüm parametrelerin yerel değişimler göstermesi, diğer bir deyişle nokta seçimine bağlı çözümler elde edilmesidir. Başka bir anlatımla, dönüşüm probleminin verileri arasında yer alan her bir sistemdeki özdeş nokta koordinatları, rastlantısal karakterli (stokastik) jeodezik ölçülerden elde edilmiş, yani onların fonksiyonu olan stokastik parametrelerdir. Bu koordinatlardan hesaplanacak dönüşüm parametreleri de stokastik özellikte olacaktır. Ancak dönüşüme konu olan koordinatların gerçek değerlerinin bilinmesi durumunda, ağ noktalarından hangi özdeş nokta alınırsa alınsın daima aynı dönüşüm parametreleri elde edilirdi. Diğer yünden, dönüşüme konu olan nokta koordinatlarının yalnızca rastlantısal hatalardan etkileniyor olması halinde, jeodezi ile uğraşanların işi yine de kolay olurdu. Çünkü ağ noktalarının bazı sistematik hataları da içerdiği bilinmektedir. Ağların distorsiyonu sonucunu çıkaran bu sistematik etkiler, (ölçme aletlerinin kalibrasyonu, yatay refraksiyon vb.) ölçme tekniklerinden ileri gelebildiği gibi, teoriyi tam karşılamayan değerlendirme modellerinden de (çekül sapmalarının gözardı edilmesi referans yüzeyinin yetersizliği vd.) kaynaklanabilmektedir.

Koordinat dönüşümünü incelemeye değer kılan bir başka bakış açısı da, güncel problem olan üç boyutlu dönüşüm verileri olan X, Y, Z koordinatlarının geçmişte, parçalı bir yaklaşımla, konum koordinatlarının ve yüksekliklerin ayrı ölçme ve değerlendirme modellerinden elde edilmiş olması ve bugün GPS ölçüleriyle elde edilen X, Y, Z değerlerinin farklı doğruluklarda elde ediliyor olmasıdır. Bu nedenle de hangi koordinat bileşenin hangi parametre üzerinde daha etkin olduğunun belirlenmesi, dönüşüm hesabı için yapılacak tesbitlerde yol gösterici olacaktır. Bu amaçla koordinat bileşenleri ve parametreler arasındaki diferansiyel ilişkilerin ortaya çıkarılması yerinde olacaktır.

Bilindiği üzere üç boyutlu koordinatlar jeodezik olarak, ya X, Y, Z kartezyen dik koordinatlarla veya φ , λ , h elipsoidal coğrafi koordinatlarla belirlenebilir. Bu iki koordinat türü arasındaki ilişki ise;

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ [N(1 - e^2) + h] \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

eşitlikleriyle sağlanır. Burada N birinci düşey düzlemdeki elipsoidal eğrilik yarıçapı;

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad (3.27)$$

ve

$$e^2 = 2f - f^2 \quad (3.28)$$

ile ifade edilirler. a elipsoidin büyük yarı eksen ve f basıklığıdır.

Bir noktanın elipsoidal sistemdeki koordinatları $\delta\varphi$, $\delta\lambda$, δh değişimi ile δa , δf elipsoidal parametrelerdeki değişime karşılık kartezyen koordinatlarındaki değişim, (3.26)'nın toplam diferansiyeli;

$$\begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \delta\varphi \\ \delta\lambda \\ \delta h \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} \delta a \\ \delta f \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

ile ifade edilir. Burada;

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -(M+h) \sin \varphi \cos \lambda & -(N+h) \cos \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \cos \lambda \\ -(M+h) \sin \varphi \sin \lambda & (N+h) \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda \\ (M+h) \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} N \cos \varphi \cos \lambda / a & M \cos \varphi \cos \lambda \sin^2 \varphi / (1-f) \\ N \cos \varphi \sin \lambda / a & M \cos \varphi \sin \lambda \sin^2 \varphi / (1-f) \\ N(1-f)^2 \sin \varphi / a & (M \sin^2 \varphi - 2N) \sin \varphi (1-f) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

matrislerde yer alan meridyen düzlemindeki elipsoidal eğrilik yarıçapı M ;

$$M = \frac{a(1-e^2)}{\sqrt[3]{1-e^2 \sin^2 \varphi}} \quad (3.32)$$

ile tanımlanır (Gürkan, 1983). Eğer eşitlikler, kartezyen koordinatlardaki değişime karşılık gelen eğri koordinatlardaki değişim için düzenlenirse;

$$\begin{bmatrix} \delta \varphi \\ \delta \lambda \\ \delta h \end{bmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} + \mathbf{E} \begin{bmatrix} \delta a \\ \delta f \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

elde edilir. Burada $\mathbf{C}^{-1}$;

$$\mathbf{C}^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{\sin \varphi \cos \lambda}{M+h} & -\frac{\sin \varphi \sin \lambda}{M+h} & \frac{\cos \varphi}{M+h} \\ -\frac{\sin \lambda}{(N+h) \cos \varphi} & \frac{\cos \lambda}{(N+h) \cos \varphi} & 0 \\ \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

ile tanımlıdır (Vanicek ve Krakiwsky, 1982, Seeber, 1993). $\mathbf{E}$ matrisi ise $\mathbf{E} = -\mathbf{C}^{-1} \mathbf{D}$ eşitliğiyle;

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \frac{e^2 \cos \varphi \sin \varphi (N/a)}{M+h} & \frac{(W^2 + 1) \cos \varphi (M \sin \varphi / (1-f))}{M+h} \\ 0 & 0 \\ -W^2 (N/a) & W^2 M \sin^2 \varphi / (1-f) \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

şeklinde tanımlanır.

Bu aşamada iki jeosentrik koordinat sistemi arasında;

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + (1+k) \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_z & -\epsilon_y \\ -\epsilon_z & 1 & \epsilon_x \\ \epsilon_y & -\epsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

ile ifade edilen üç boyutlu dönüşümün temel bağıntısını ele alalım. Bu bağıntının toplam diferansiyeli alındığında;

$$\begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \mathbf{F} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \delta k \quad (3.37)$$

elde edilir (Elmotaal ve Tokhey,1997, Dinter ve diğ, 1997). Burada;

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & -Z & Y \\ Z & 0 & -X \\ -Y & X & 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

şeklindedir. $\mathbf{F}$ matrisinde kartezyen koordinatlar yerine (3.26)'daki eşitini yazar ve (3.37) eşitliğini (3.33)'de yerine koyarsak;

$$\begin{bmatrix} \delta\phi \\ \delta\lambda \\ \delta h \end{bmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \mathbf{G} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} + \mathbf{h} \delta k + \mathbf{E} \begin{bmatrix} \delta a \\ \delta f \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

elde edilir (Groten, 1979). Burada $\mathbf{G}=\mathbf{C}^{-1}\mathbf{F}$ ve $\mathbf{H}=\mathbf{C}^{-1}[\ X \ Y \ Z]^T$ olmakla birlikte;

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{-(h + NW^2) \sin \lambda}{M + h} & \frac{(h + NW^2) \cos \lambda}{M + h} & 0 \\ \frac{(h + N(1 - e^2) \sin \phi \cos \lambda}{(N + h) \cos \phi} & \frac{(h + N(1 - e^2)) \sin \phi \sin \lambda}{(N + h) \cos \phi} & -1 \\ -e^2 N \cos \phi \sin \phi \sin \lambda & e^2 N \cos \phi \sin \phi \cos \lambda & 0 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} \frac{-e^2 N \cos \varphi \sin \varphi}{M + h} \\ 0 \\ h + NW^2 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

ile ifade edilirler.

Bu yolla elde edilen yeni (3.39) eşitliğiyle, farklı referans elipsoidine sahip koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametrelerinin değişimine karşılık, noktaların yatay ve düşey konum koordinatlarının değişimini incelemek, böylece hangi koordinat bileşenin hangi dönüşüm parametresiyle daha çok etkileşimli olduğunu ortaya koymak mümkündür.

3.2.1.4 Üç boyutlu dönüşümde hata yayılması

Bilindiği üzere, üç boyutlu dönüşüm kartezyen koordinatlar üzerinden gerçekleştirilir. Bu nedenle kartezyen koordinatlar ya başlangıçta verilmeli veya elipsoidal coğrafi koordinatlardan hesaplanmalıdır. Bunun için elipsoidal enlem ve boylamın yanında, noktalara ait elipsoidal yüksekliklerin de bilinmesi gerekir. Ne var ki, ülke nirengi ağlarına ait yükseklik bilgilerinin jeoide referanslı olduğuna ve bunlara ait jeoit ondülasyonlarının da belirlenmediğine daha önce değinilmişti. Bu durumda sözkonusu problemin aşılması için, ülke nirengi ağına ait elipsoidal yüksekliklerin nivelman yüksekliklerine eşit olduğu varsayımı yapılabilir. Ancak bu varsayımın, yükseklik bilgilerinin yatay konum koordinatlarına göre düşük doğruluklu olmaları nedeniyle, üç boyutlu dönüşümden elde edilecek parametreleri olumsuz etkileyeceği, bunun da dönüştürülmüş yatay konum koordinatlarına yansıyabileceği düşüncesi yaygındır. Dolayısıyla uygulamada, nivelman yüksekliklerinin ülke ağının elipsoidal yüksekliklerine eşit varsayıldığı yaklaşımdan başka, çoğu kez yükseklik bilgileri kullanılmadan dönüşüm gerçekleştirilir.

Uygulamada bu iki yaklaşımla, dönüştürülmüş yatay konum koordinatları bakımından, benzer sonuçlar kadar farklı sonuçlarda elde edilebilmektedir (Ek D).

Dönüşüm hesabında çoğu kez bir sistemde bilinen koordinatların, diğer bir sistemdeki karşılıklarının elde edilmesi amaçlanır. Dolayısıyla, dönüşüm sağlayacak parametrelerin gerçek geometriye uygun olması önemli değildir. Ancak,

bazı durumlarda gerçeğe uygun parametrelerle çalışmak zorunlu olabilir. Bu durumda, olabildiğince gerçeğe yakın geometriyi gözetmek gerekir. Bu bağlamda, yükseklikli bir dönüşüm düşünülemez. Dönüşüm modelinde olması gereken bir bilginin en baştan yok sayılması, başka birtakım mühendislik hizmetleri ve hesaplamalar için altlık oluşturacak sağlıklı dönüşüm parametrelerinin üretilmesine imkan tanımaz.

Yükseklik bilgisinin, dönüştürülmüş yatay konum bilgileri üzerindeki etkinin belirlenebilmesi için, Bursa-Wolf ve Molodensky-Badekas modellerinin, tabir yerindeyse, işleyiş mekanizmalarının ortaya konması, buradan hareketle de yatay ve düşey konum koordinatlarındaki olası hataların birbirlerine ne derece bulaşabileceğinin tesbit edilmesi zorunludur. Bunun sağlanabilmesi için de üç boyutlu dönüşümde hata yayılması bağıntılarının çıkarılması gereklidir.

Yükseklik bilgisinin dönüştürülmüş koordinatlara etkisi incelendiğinden, başlangıçta noktalara ait elipsoidal coğrafi koordinatların verildiği düşünülün. Bu durumda kartezyen koordinatlara geçiş (3.26) eşitlikleriyle sağlanır. Eğer coğrafi koordinatlar hatalıysa, bu hataların kartezyen koordinatlara yansımaları, (3.26)'ya uygulanacak hata yayılma yasasıyla hesaplanabilir. Buna göre (3.26)'ın önce diferansiyeli alınır;

$$\begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} d\phi \\ d\lambda \\ dh \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

sonra da elde edilen lineer (3.42) eşitliğine hata yayılma yasası uygulanırsa;

$$K_{II} = C K_{EE} C^T \quad (3.43)$$

elde edilir. Eşitlikte geçen K_{EE} coğrafi koordinatların varyans-kovaryans matrisi olup, coğrafi koordinatların birbirinden bağımsız oldukları düşünülürse;

$$K_{EE} = \begin{bmatrix} m_{\phi\phi} & & \\ & m_{\lambda\lambda} & \\ & & m_{hh} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

biçiminde olacaktır. C katsayılar matrisi ise (3.30)'da olduğu gibidir.

Elipsoidal coğrafi koordinatlardan hesaplanan kartezyen koordinatlar, $I_1^T = [X_1 \ Y_1 \ Z_1]$ şeklinde bir vektörle tanımlanır ve bu koordinat vektörü Bursa-Wolf veya Molodensky-Badekas modellerinden herhangi biriyle ikinci bir koordinat sistemine dönüştürülürse fonksiyonel model;

$$I_2 = t + \bar{R} I_1 \quad (3.45)$$

olacaktır. Burada $\bar{R} = (1+k)R$ ile tanımlıdır. Eğer dönüşüm parametrelerinin doğruluğu hakkında herhangi bir bilgi yoksa, sadece koordinat bilinmeyenleri değişken olarak alınır, dönüşüm parametreleri sabit kabul edilir. Buna göre (3.45) eşitliğine hata yayılma yasası uygulanırsa;

$$dI_2 = R dI_1 \quad (3.46)$$

ve;

$$K_{I_2 I_2} = \bar{R} K_{I_1 I_1} \bar{R}^T \quad (3.47)$$

elde edilir. $K_{I_1 I_1}$ 'in (3.43)'e göre oluşturulacak eşiti yerine yazılırsa;

$$K_{I_2 I_2} = \bar{R} C_1 K_{E_1 E_1} C_1^T \bar{R}^T \quad (3.48)$$

bulunur.

Eğer dönüşüm parametreleri özdeş noktalardan yararlanılarak dengeleme hesabıyla bulunuyorsa, $x^T = [t_X \ t_Y \ t_Z \ \varepsilon_X \ \varepsilon_Y \ \varepsilon_Z \ k]$ dönüşüm parametreleri;

$$x = (B_{01}^T B_{01})^{-1} B_{01}^T I' \quad (3.49)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Eşitlikte geçen B_{01} , kullanılan dönüşüm modeline bağlı olarak özdeş noktalarla (3.12) veya (3.24)'e göre oluşturulan dönüşümün katsayılar matrisidir. I' ise parametre hesabında kullanılan özdeş noktaların kartezyen koordinatlarından $(I_{01} - I_{02})$ ile hesaplanan küçültülmüş ölçüler vektörüdür. (3.49) eşitliğiyle belirlenen dönüşüm parametrelerinin, varyans- kovaryans matrisi;

$$dx = (B_{01}^T B_{01})^{-1} B_{01}^T dI_{01} \quad (3.50)$$

$$\mathbf{K}_{xx} = \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{B}_{01}^T \mathbf{K}_{l_0 l_0} \mathbf{B}_{01} \mathbf{Q}_{xx} \quad (3.51)$$

olarak bulunur. Dönüştürülmüş kartezyen koordinatların varyans-kovaryans matrisi ise, (3.45) eşitliğinde hem koordinatlar hem de dönüşüm parametreleri değişken kabul edilip hata yayılma yasası uygulanarak;

$$d\mathbf{l}_2 = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{R}} & \mathbf{B}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{l}_1 \\ d\mathbf{x} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$\mathbf{K}_{l_2 l_2} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{R}} & \mathbf{B}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{l_1 l_1} & \\ & \mathbf{K}_{xx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{R}}^T \\ \mathbf{B}_1^T \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

$$\mathbf{K}_{l_2 l_2} = \bar{\mathbf{R}} \mathbf{K}_{l_1 l_1} \bar{\mathbf{R}}^T + \mathbf{B}_1 \mathbf{K}_{xx} \mathbf{B}_1^T \quad (3.54)$$

şeklinde bulunur. $\mathbf{K}_{l_1 l_1}$ 'in (3.43)'den elde edilecek eşiti yerine yazılırsa;

$$\mathbf{K}_{l_2 l_2} = \bar{\mathbf{R}} \mathbf{C}_1 \mathbf{K}_{E_1 E_1} \mathbf{C}_1^T \bar{\mathbf{R}}^T + \mathbf{B}_1 \mathbf{K}_{xx} \mathbf{B}_1^T \quad (3.55)$$

olur. Dönüştürülen koordinatlar parametre hesabında kullanılan özdeş noktalara ait ise, (3.52)'de geçen $d\mathbf{l}_2 = d\mathbf{l}_{02}$, $d\mathbf{l}_1 = d\mathbf{l}_{01}$ ve $\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_{01}$ olacaktır. Yine bu bağıntıda geçen $d\mathbf{x}$ yerine (3.50)'deki karşılığı yazılır ve buna göre eşitlik yeniden düzenlenecek olursa;

$$d\mathbf{l}_{02} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{R}} & \mathbf{B}_{01} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{l}_{01} \\ (\mathbf{B}_{01}^T \mathbf{B}_{01})^{-1} \mathbf{B}_{01}^T d\mathbf{l}_{01} \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

bulunur. Elde edilen yeni diferansiyel eşitlikte gerekli çarpım ve düzenlemelerin yapılmasıyla;

$$d\mathbf{l}_{02} = \left[\bar{\mathbf{R}} d\mathbf{l}_{01} + \mathbf{B}_{01} (\mathbf{B}_{01}^T \mathbf{B}_{01})^{-1} \mathbf{B}_{01}^T d\mathbf{l}_{01} \right] \quad (3.57)$$

$$d\mathbf{l}_{02} = \left[\bar{\mathbf{R}} + \mathbf{B}_{01} (\mathbf{B}_{01}^T \mathbf{B}_{01})^{-1} \mathbf{B}_{01}^T \right] d\mathbf{l}_{01} \quad (3.58)$$

$$d\mathbf{l}_{02} = \left[\bar{\mathbf{R}} + \mathbf{B}_{01} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{B}_{01}^T \right] d\mathbf{l}_{01} \quad (3.59)$$

ve buradan da özdeş noktalar için;

$$\mathbf{K}_{l_{o2}l_{o2}} = \left[\bar{\mathbf{R}} + \mathbf{B}_{o1} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{B}_{o1}^T \right] \mathbf{K}_{l_{o1}l_{o1}} \left[\bar{\mathbf{R}} + \mathbf{B}_{o1} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{B}_{o1}^T \right]^T \quad (3.60)$$

varyans-kovaryans matrisi bulunur. Eğer $\mathbf{K}_{l_{o1}l_{o1}}$ 'in yerine (3.43)'deki eşiti yerine yazılırsa;

$$\mathbf{K}_{l_{o2}l_{o2}} = \left[\bar{\mathbf{R}} + \mathbf{B}_{o1} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{B}_{o1}^T \right] \mathbf{C}_{o1} \mathbf{K}_{E_{o1}E_{o1}} \mathbf{C}_{o1}^T \left[\bar{\mathbf{R}} + \mathbf{B}_{o1} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{B}_{o1}^T \right]^T \quad (3.61)$$

varyans-kovaryans matrisi elde edilir.

Dönüştürülen kartezyen koordinatlar, elipsoida coğrafi koordinatlara çevrilecek olursa, (3.26)'dan yararlanılarak bulunan (3.42) diferansiyel eşitliğinin tersi alınarak;

$$\begin{bmatrix} d\phi \\ d\lambda \\ dh \end{bmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

elde edilir. Bu yeni diferansiyel eşitliğe, ikinci sisteme dönüştürülmüş koordinatlar için hata yayılması uygulanırsa;

$$\mathbf{K}_{E_2E_2} = \mathbf{C}_2^{-1} \mathbf{K}_{l_2l_2} (\mathbf{C}_2^{-1})^T \quad (3.63)$$

bulunur. Bağlantıda geçen $\mathbf{K}_{l_2l_2}$ 'in yerine sırasıyla (3.48), (3.55) ve (3.61)'deki karşılıkları yazılırsa, dönüşüm parametrelerinin sabit olduğu durum için varyans-kovaryans matrisi;

$$\mathbf{K}_{E_2E_2} = \mathbf{C}_2^{-1} (\bar{\mathbf{R}} \mathbf{C}_1 \mathbf{K}_{E_1E_1} \mathbf{C}_1^T \bar{\mathbf{R}}^T) (\mathbf{C}_2^{-1})^T \quad (3.64)$$

dönüşüm parametrelerinin değişken olarak alındığı durumda, özdeş olmayan, dönüştürülmüş koordinatlar için;

$$\mathbf{K}_{E_2E_2} = \mathbf{C}_2^{-1} (\bar{\mathbf{R}} \mathbf{C}_1 \mathbf{K}_{E_1E_1} \mathbf{C}_1^T \bar{\mathbf{R}}^T + \mathbf{B}_1 \mathbf{K}_{xx} \mathbf{B}_1^T) (\mathbf{C}_2^{-1})^T \quad (3.65)$$

dönüşüm hesabında kullanılan özdeş noktalar için;

$$\mathbf{K}_{E_{o2}E_{o2}} = \mathbf{C}_{o2}^{-1} \left[\bar{\mathbf{R}} + \mathbf{B}_{o1} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{B}_{o1}^T \right] \mathbf{C}_{o1} \mathbf{K}_{E_{o1}E_{o1}} \mathbf{C}_{o1}^T \left[\bar{\mathbf{R}} + \mathbf{B}_{o1} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{B}_{o1}^T \right]^T (\mathbf{C}_{o2}^{-1})^T \quad (3.66)$$

olarak elde edilir.

Yukarıda çıkarılan (3.64), (3.65) ve (3.66) bağıntıları yardımıyla, olası tüm durumlar için, başlangıçta verilen koordinatlardaki hataların dönüştürülmüş koordinatlara etkisi hesaplanabilir. Böylece yatay ve düşey konum bilgilerinin birbirlerine etkisini, düşey konum bilgisindeki hataların dönüşümü gerçekten olumsuz etkileyip etkilemediğini ortaya koymak mümkün olabilir.

3.2.1.5 Bursa-Wolf ve Molodensky-Badekas modellerinin karşılaştırılması

Her iki modelle, dönüştürülen koordinatlar birbirinin aynı olmasına karşın, hesaplanan ötelemeler ve onların k.o.h.'larının son derece farklı olduğu bilinmektedir (King ve dig., 1987, Leick, 1995). Bu iki modelden ancak birinin ürettiği ötelemeler gerçekçi olabilir. Daha önce de değinildiği üzere amaç; dönüştürülmüş koordinatların doğruluğu yanında, gerçeğe en yakın parametrelerin belirlenmesi ve bunların ilgili tüm meslek disiplinlerinin hizmetine sunulması olmalıdır. O takdirde, her ne kadar bu iki model aynı dönüştürülmüş koordinatları sağlasa da, en doğru öteleme parametrelerinin belirlendiği modelin seçilmesi, uygulamada bir standart oluşturulması bakımından yerinde olacaktır.

Parametrelerin hesabında kullanılan katsayılar matrisi, Bursa-Wolf modelinde (3.12)'de olduğu gibi birinci sistem kartezyen koordinatlarından, Molodensky-Badekas modelinde ise (3.24)'de olduğu gibi ağırlık merkezine dönüştürülmüş birinci sistem kartezyen koordinatlarından oluşmaktadır. Buna göre, $N=B^T B$ ile belirlenen dengelemenin normal denklemler matrisi Bursa-Wolf modeli için (3.67), Molodensky-Badekas için (3.68)'deki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} n & 0 & 0 & 0 & -[Z] & [Y] & [X] \\ 0 & n & 0 & [Z] & 0 & -[X] & [Y] \\ 0 & 0 & n & -[Y] & [X] & 0 & [Z] \\ 0 & [Z] & -[Y] & [Z^2 + Y^2] & -[YX] & -[ZX] & 0 \\ -[Z] & 0 & [X] & -[XY] & [Z^2 + X^2] & -[ZY] & 0 \\ [Y] & -[X] & 0 & -[XZ] & -[YZ] & [Y^2 + X^2] & 0 \\ [X] & [Y] & [Z] & 0 & 0 & 0 & [X^2 + Y^2 + Z^2] \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

$$\begin{bmatrix}
n & 0 & 0 & 0 & -[Z]+nZ_0 & [Y]-nY_0 & [X]-nX_0 \\
0 & n & 0 & [Z]-nZ_0 & 0 & -[X]+nX_0 & [Y]-nY_0 \\
0 & 0 & n & -[Y]+nY_0 & [X]-nX_0 & 0 & [Z]-nZ_0 \\
0 & [Z]-nZ_0 & -[Y]+nY_0 & [(Z-Z_0)^2+(Y-Y_0)^2] & -(Y-Y_0)(X-X_0) & -(Z-Z_0)(X-X_0) & 0 \\
-[Z]+nZ_0 & 0 & [X]-nX_0 & -(X-X_0)(Y-Y_0) & [(Z-Z_0)^2+(X-X_0)^2] & -(Z-Z_0)(Y-Y_0) & 0 \\
[Y]-nY_0 & -[X]+nX_0 & 0 & -(X-X_0)(Z-Z_0) & -(Y-Y_0)(Z-Z_0) & [(Y-Y_0)^2+(X-X_0)^2] & 0 \\
[X]-nX_0 & [Y]-nY_0 & [Z]-nZ_0 & 0 & 0 & 0 & [(X-X_0)^2+(Y-Y_0)^2+(Z-Z_0)^2]
\end{bmatrix}
\quad (3.68)$$

(3.68) matrisinde yer alan $[X]$, $[Y]$, $[Z]$ sırasıyla nX_0 , nY_0 ve nZ_0 'a eşit olacağından, eşitlik yeniden düzenlenerek Molodensky-Badekas için;

$$\begin{bmatrix}
n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & n & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & [(Z-Z_0)^2+(Y-Y_0)^2] & -(Y-Y_0)(X-X_0) & -(Z-Z_0)(X-X_0) & 0 \\
0 & 0 & 0 & -(X-X_0)(Y-Y_0) & [(Z-Z_0)^2+(X-X_0)^2] & -(Z-Z_0)(Y-Y_0) & 0 \\
0 & 0 & 0 & -(X-X_0)(Z-Z_0) & -(Y-Y_0)(Z-Z_0) & [(Y-Y_0)^2+(X-X_0)^2] & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [(X-X_0)^2+(Y-Y_0)^2+(Z-Z_0)^2]
\end{bmatrix}
\quad (3.69)$$

yeni normal denklemler matrisi elde edilir.

Bursa-Wolf modeli için çıkarılan normal denklemler matrisi incelendiğinde, ötelemelere ait ilk üç satırın dönüklük ve ölçeğe karşılık gelen elemanların, özdeş noktaların koordinatlarının $-[Z]$, $[Y]$, $[X]$ gibi toplamlarından oluşan son derece büyük değerler aldığı görülmektedir. Bu elemanlar, normal denklemler matrisinin tersi alınarak Q_{xx} bilinmeyenlerin kofaktörler matrisinin hesaplanması sırasında da oransal olarak büyük kalırlar. Bu durum bilinmeyenler arasında yüksek matematiksel korelasyon olarak ortaya çıkar. Buna karşın, Molodensky-Badekas'da aynı elemanların sıfır olduğu (3.69)'dan görülmektedir. Dolayısıyla Q_{xx} hesabında öteleme bilinmeyenlerinin diğer parametrelerle korelasyonu küçük düzeyde kalmış olur. Söz konusu korelasyonları;

$$r_i = \frac{q_{xiyi}}{\sqrt{q_{xixi} \cdot q_{yiyi}}} \quad (3.70)$$

bağıntısından hesaplamak mümkündür.

Bursa-Wolf ve Molodensky-Badekas ötelemeleri arasındaki büyük farklılıkların nedeni gerçekten de diğer parametrelerle olan korelasyonlar mıdır? Bunu daha somut bir şekilde ortaya koyabilmek için, iki modelin (3.6) ve (3.22) ile verilen eşitlikleri ele alınsın. Bu eşitliklerin sağ tarafında kalan ve dönüklüklerle, ölçeği içinde bulunduran matrisler alınıp, diğer terimler işlem dışı bırakıldığında elde edilecek;

$$\begin{bmatrix} X_1 k + Y_1 \varepsilon_Z - Z_1 \varepsilon_Y \\ -X_1 \varepsilon_Z + Y_1 k + Z_1 \varepsilon_X \\ X_1 \varepsilon_Y - Y_1 \varepsilon_X + Z_1 k \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

$$\begin{bmatrix} Uk + V\varepsilon_Z - W\varepsilon_Y \\ -U\varepsilon_Z + Vk + W\varepsilon_X \\ U\varepsilon_Y - V\varepsilon_X + Wk \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

bağıntılarıyla, dönüklükler ve ölçeğin her iki modele reel katkılarını hesaplamak da mümkündür.

3.2.2 İki boyutlu benzerlik dönüşümü

GPS ağları ile klasik yöntemlerle ölçülmüş mevcut ülke ağlarının entegrasyonunda, Bölüm 3.2.1.3 ve Bölüm 3.2.1.4’de açıklanan sorunların aşılması için uygulama alanı bulan yollardan biri de, yükseklik bileşenleri ayırarak yatay konum koordinatlarının dönüşümünü gerçekleştirmektir. Gerçekten de projeksiyon düzleminde gerçekleştirilecek iki boyutlu benzerlik dönüşümü sağladığı doğruluk ve dönüştürülmüş koordinatların referans koordinatlarına yaklaşımı bakımından, üç boyutlu dönüşümün alternatifi olarak düşünülebilir. Nitekim, uygulamada pek çok yerel ağın dönüşümü bu yolla gerçekleştirilmektedir. Ancak projeksiyon koordinatları dilim orta meridyenine göre tanımlanırlar ve koordinatların bütünlüğü kendi dilimleri içerisinde söz konusudur. Birden fazla dilime yayılmış büyük ağlar için tek bir dönüşümle problemi çözebilmek mümkün olmayabilir. Tek bir dönüşüm için koordinatların tek bir dilim orta meridyenine göre belirlenmesi gerekir. Bu defa da dilim orta meridyeninden uzaklaştıkça projeksiyon koordinatlarındaki deformasyonlar büyüyeceğinden, dönüşümün doğruluğunun olumsuz etkilenmesi söz konusu olabilir.

3.2.2.1 Elipsoidal coğrafi ve projeksiyon koordinatları arasında geçiş ilkeleri

İki boyutlu dönüşüm için, projeksiyon koordinatları kullanılır. Bunun için eldeki kartezyen veya coğrafi koordinatların, ülkemizde kullanılan Gauss-Kruger projeksiyonuna çevrilmeleri gerekir. Kartezyen koordinatlardan, coğrafi koordinatlara geçiş bağıntıları, daha önceki bölümlerde verilmişti. Elipsoidal coğrafi koordinatlar verilmişken, Gauss-Kruger projeksiyon koordinatlarına geçiş;

$$\begin{aligned} y = B(\varphi) + \frac{t}{2} N \cos^2 \varphi \ell^2 + \frac{t}{24} N \cos^4 \varphi (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) \ell^4 \\ + \frac{t}{720} N \cos^6 \varphi (61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330t^2\eta^2) \ell^6 \\ + \frac{t}{40320} N \cos^8 \varphi (1385 - 3111t^2 + 543t^4 - t^6) \ell^8 + \dots \end{aligned} \quad (3.73a)$$

$$\begin{aligned} x = N \cos \varphi \ell + \frac{1}{6} N \cos^3 \varphi (1 - t^2 + \eta^2) \ell^3 \\ + \frac{1}{120} N \cos^5 \varphi (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58t^2\eta^2) \ell^5 \\ + \frac{1}{5040} N \cos^7 \varphi (61 - 479t^2 + 179t^4 - t^6) \ell^7 + \dots \end{aligned} \quad (3.73b)$$

eşitlikleriyle sağlanır. Eşitlikte geçen a referans elipsoidinin büyük yarı eksen, b küçük yarı eksen, $t = \tan \varphi$, $\ell = \lambda - \lambda_0$ ve λ_0 dilim orta meridyeni olarak tanımlıyken;

$$\eta^2 = \frac{(a^2 - b^2) \cos^2 \varphi}{b^2} \quad (3.74)$$

$$B(\varphi) = \alpha(\varphi + \beta \sin 2\varphi + \gamma \sin 4\varphi + \delta \sin 6\varphi + \varepsilon \sin 8\varphi + \dots) \quad (3.75)$$

ile belirlenir. $B(\varphi)$ 'de yer alan yardımcı değişkenler ise;

$$\alpha = \frac{a+b}{2} \left(1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4 + \dots\right) \quad (3.76a)$$

$$\beta = -\frac{3}{2}n + \frac{9}{16}n^3 - \frac{3}{32}n^5 + \dots \quad (3.76b)$$

$$\gamma = \frac{15}{16}n^2 - \frac{15}{32}n^4 + \dots \quad (3.76c)$$

$$\delta = -\frac{35}{48}n^3 + \frac{105}{256}n^5 - \dots \quad (3.76d)$$

$$\varepsilon = \frac{315}{512}n^4 + \dots \quad (3.76e)$$

$$n = \frac{a-b}{a+b} \quad (3.76f)$$

bağıntılarıyla hesaplanırlar. Söz konusu Gauss-Kruger koordinatlarından;

$$\text{Sağa}=500000+m_0y \quad (3.77a)$$

$$\text{Yukarı}=m_0x \quad (3.77b)$$

değerlerine de geçmek mümkündür. Eğer eşitlikte geçen $m_0=0.9996$ olarak seçilirse, bulunacak yeni projeksiyon koordinatlarına 6°'lik UTM koordinatları, $m_0=1$ olarak seçilirse 3°'lik değiştirilmiş UTM koordinatları adı verilir.

Projeksiyon koordinatlarından, elipsoidal coğrafi koordinatlara geçiş ise;

$$\begin{aligned} \varphi = & \varphi_f + \frac{t_f}{2N_f^2}(-1 - \eta_f^2)x^2 \\ & + \frac{t_f}{24N_f^4}(5 + 3t_f^2 + 6\eta_f^2 - 6t_f^2\eta_f^2 - 3\eta_f^4 - 9t_f^2\eta_f^4)x^4 \\ & + \frac{t_f}{720N_f^6}(-61 - 90t_f^2 - 45t_f^4 - 107\eta_f^2 + 162t_f^2\eta_f^2 + 45t_f^4\eta_f^2)x^6 + \dots \end{aligned} \quad (3.78a)$$

$$\begin{aligned} \lambda = & \lambda_0 + \frac{1}{N_f \cos \varphi_f}x + \frac{1}{6N_f^3 \cos \varphi_f}(-1 - 2t_f^2 - \eta_f^2)x^3 \\ & + \frac{1}{120N_f^5 \cos \varphi_f}(5 + 28t_f^2 + 24t_f^4 + 6\eta_f^2 + 8t_f^2\eta_f^2)x^5 \\ & + \frac{1}{5040N_f^7 \cos \varphi_f}(-61 - 662t_f^2 - 1320t_f^4 - 720t_f^6)x^7 + \dots \end{aligned} \quad (3.78b)$$

bağıntılarıyla sağlanır. Eşitlikte yer alan;

$$\varphi_f = \bar{y} + \bar{\beta} \sin 2\bar{y} + \bar{\gamma} \sin 4\bar{y} + \bar{\delta} \sin 6\bar{y} + \bar{\varepsilon} \sin 8\bar{y} + \dots \quad (3.79)$$

yardımcı değişkenler;

$$\bar{\alpha} = \frac{a+b}{2} \left(1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4 + \dots\right) \quad (3.80a)$$

$$\bar{\beta} = \frac{3}{2}n - \frac{27}{32}n^3 + \frac{269}{512}n^5 + \dots \quad (3.80b)$$

$$\bar{\gamma} = \frac{21}{16}n^2 - \frac{55}{32}n^4 + \dots \quad (3.80c)$$

$$\bar{\delta} = \frac{151}{96}n^3 - \frac{417}{128}n^5 + \dots \quad (3.80d)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{1097}{512}n^4 + \dots \quad (3.80e)$$

$$\bar{y} = \frac{y}{\alpha} \quad (3.80f)$$

ile tanımlıdır (Hofmann ve diğ., 1997).

3.2.2.2 İki boyutlu benzerlik dönüşümünün matematik modeli

X, Y ve x,y gibi iki kartezyen sistem arasındaki benzerlik dönüşümünün genel bağıntısı;

$$\begin{aligned} X_i &= t_x - by_i + ax_i \\ Y_i &= t_y + bx_i + ay_i \end{aligned} \quad (3.81)$$

ile verilmektedir (Ghosh, 1979). Burada $a=\lambda \cos \epsilon$, $b=\lambda \sin \epsilon$ ile tanımlıdır. λ iki sistem arasındaki ölçek, ϵ ise dönüklüktür.

Eğer verilen bağıntıda, sadece ikinci sistem X, Y koordinatları hatalı varsayılırsa, dönüşümün fonksiyonel modeli;

$$\mathbf{v} = \mathbf{B} \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (3.82)$$

şeklinde olacaktır. Bağıntıda geçen matrisler;

$$\mathbf{v}^T = \begin{bmatrix} v_{x_1} & v_{y_1} & \dots & v_{x_n} & v_{y_n} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

$$\mathbf{x}^T = [t_x \quad t_y \quad b \quad a] \quad (3.84)$$

$$\mathbf{l}^T = [X_1 \quad Y_1 \quad \dots \quad X_n \quad Y_n] \quad (3.85)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_1 & x_1 \\ 1 & 0 & -y_2 & x_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -y_n & x_n \\ 0 & 1 & x_1 & y_1 \\ 0 & 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & x_n & y_n \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

ile tanımlıdır (Öztürk, 1992).

(3.82) fonksiyonel modelinden yararlanarak, En Küçük Kareler Yöntemi ile dönüşüm parametreleri hesaplanır. Hesaplanan parametreler (3.81) eşitliğinde yerine koyulur ve dönüştürülmüş projeksiyon koordinatları elde edilir.

3.3 Koordinat Dönüşümünde Güvenirlik

Jeodezik ağların doğruluğunu ifade etmek için kullanılan tüm doğruluk ölçütleri, ağın dengeleme sonuçlarından türetilmektedir. Bu sayısal değerlerin geçerliliği, dengeleme için ortaya konan matematiksel modelin geçerli olmasına bağlıdır. Bir jeodezik ağın yeterli doğruluğa sahip olmasının yanında, ölçülerinin model hatası içermemesi de istenir. Jeodezik ağlardaki kaba ölçme hataları gibi model hatalarının ortaya çıkarılabilmesi, ağın geometrik yapısına da bağlıdır. Jeodezik ağlarda güven, ağın geometrik yapısının model hatalarına karşı duyarlılığı olarak tanımlanmakta ve model hatalarını gizlemeyen, onların açığa çıkarılmasına uygun yapıdaki ağlar, güvenilir ağlar olarak adlandırılmaktadır (Ayan, 1997). Aynı kaynak kümeden kaynaklanmayan uyumsuz ölçülerin açığa çıkarılabilmesi, jeodezinin temel ilkelerinden “kontrol” kavramını gerçekleştiren fazla ölçülerle olur. Sözü edilen ağ geometrisi ise yeterinden fazla ölçülerin, başka bir anlatımla kontrolün uygun dağılımı ile gerçekleştirilir.

Dönüşüm hesabı için kullanılan özdeş noktalar da, bir jeodezik ağ tanımlar. Dönüşüm parametreleri bu ağ noktalarından yararlanarak, dengelemeyle belirlenir.

Dengelemenin ölçüleri özdeş nokta koordinatlarıdır. Fazla ölçüleri ise gereğinden fazla olan özdeş nokta koordinatlarıdır. Dolayısıyla, jeodezik ağların güvenilirliği için söylenenler, dönüşüm hesabı için de geçerlidir. Bu nedenle kullanılacak ölçülerin ve bunlardan yararlanarak hesaplanacak parametrelerin güvenilir olması, bunun yanında parametrelerin dönüşüm bölgesinin tamamını temsil edebilir olması gerekir. Bu durum dönüşümüne konu olan özdeş noktaların verilen koordinatlarının, aynı kaynak kümeden kaynaklanması, yani uyumlu olması örneğin kaba hata içermemesi durumunda mümkün olur.

İki boyutlu dönüşüm için, teorik olarak 2, üç boyutlu dönüşüm için de 3 özdeş noktaya ihtiyaç olmasına rağmen, güvenilir bir dönüşüm, parametre hesabının serbestlik derecesine ve özdeş noktaların çalışma alanına dağılımına bağlıdır. Teoride serbestlik derecesinin olabildiğince yüksek olması istenir. Ancak arazi koşullarında istenildiği kadar nokta bulabilmek son derece zordur. Bu nedenle, özellikle küçük yerel ağlarda güvenilir çözümü sağlayacak, uygun dağılımlı noktalar belirlenmeli ve dönüşüm hesabında bu noktalar kullanılmalıdır. Bu amaçla, dönüşüm hesabına katılması düşünülen her noktanın, hatta her noktaya ait koordinat bileşenlerinin çözüme katkısı, diğer bir deyişle serbestlik derecesine katkısı, araziye çıkmadan planlama aşamasında araştırılmalıdır.

3.3.1 Ölçülerin serbestlik derecesine katkısı

Bir jeodezik ağın güven ölçütü, dengeleme hesabına giren ölçülerin serbestlik derecesine katkısını veren;

$$r_i = (Q_{vv} P_{ii})_{ii} \quad i=1 \dots n \quad (3.87)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Burada Q_{vv} düzeltmelerin kofaktörler matrisini, P_{ii} ölçülerin ağırlık matrisini göstermektedir. Q_{vv} dengelemenin fonksiyonel modeli;

$$v = Bx - l \quad (3.88)$$

eşitliğine hata yayılma yasası uygulanarak elde edilir. Buna göre x bilinmeyenler vektörü yerine, onun eşiti;

$$x = Q_{xx} B^T P_{ii} l \quad (3.89)$$

yazılacak olursa;

$$v = BQ_{xx}B^T P_{II} l - l \quad (3.90)$$

ve buradan;

$$v = (BQ_{xx}B^T P_{II} - I)l \quad (3.91)$$

olur. Elde edilen yeni bağıntıya hata yayılma yasası uygulanırsa;

$$Q_{vv} = (BQ_{xx}B^T P_{II} - I)P_{II}^{-1}(BQ_{xx}B^T P_{II} - I)^T \quad (3.92)$$

bulunur. Bu eşitlik açılıp ve gerekli düzenlemeler yapıldığında;

$$Q_{vv} = P_{II}^{-1} - BQ_{xx}B^T \quad (3.93)$$

sonuç bağıntısı elde edilir. Dolayısıyla (3.87) eşitliği;

$$r_i = (I - BQ_{xx}B^T P_{II})_{ii} \quad (3.94)$$

haline gelir.

Dönüşüm hesabı söz konusu olduğunda, özdeş noktaların koordinatlarının doğruluğu hakkında sağlıklı bilgiler elde etmek çoğu kez mümkün olmadığından, koordinatların eşit doğruluklu oldukları varsayılır ve çözüm buna göre gerçekleştirilir. Bu durumda dönüşüm hesabının ölçüleri olan koordinatların ağırlık matrisi $P_{II}=I$, bilinmeyenlerin kofaktörler matrisi $Q_{xx} = (B^T B)^{-1}$ olacaktır. Böylece ölçülerin, dengelemenin serbestlik derecesine katkısı;

$$r_i = (I - BQ_{xx}B^T)_{ii} \quad (3.95)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Bağıntıda yer alan B dengelemenin, diğer deyişle dönüşüm hesabının katsayılar matrisidir.

3.3.2 İki boyutlu benzerlik dönüşümünde güvenilirlik

İki boyutlu benzerlik dönüşümünün fonksiyonel modeli (3.81) ve buna göre oluşturulacak dengelemenin katsayılar matrisi (3.86)'da verildiği gibidir. Bilinmeyenlerin kofaktörler matrisi ise;

$$q_{11} = q_{22} = \frac{1}{n} + \frac{[x]^2 + [y]^2}{n^2[x^2 + y^2] - n[x]^2 - n[y]^2} \quad (3.96a)$$

$$q_{33} = q_{44} = \frac{1}{[x^2 + y^2] - \frac{[x]^2 + [y]^2}{n}} \quad (3.96b)$$

$$q_{13} = -q_{24} = \frac{[y]}{n[x^2 + y^2] - [x]^2 - [y]^2} \quad (3.96c)$$

$$q_{14} = q_{23} = \frac{-[x]}{n[x^2 + y^2] - [x]^2 - [y]^2} \quad (3.96d)$$

yardımcı gösterimleriyle;

$$Q_{xx} = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & q_{13} & q_{14} \\ & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ & & q_{33} & 0 \\ & & & q_{44} \end{bmatrix} \quad (3.97)$$

şeklinde tanımlanır. Burada köşegen üzerindeki elemanların altındaki çizgi, matrisin simetrik olduğunu ifade etmektedir. Bu durumda, (3.86) ve (3.97)'nin (3.95) eşitliğinde yerine koyulması, gerekli işlem ve düzenlemelerin yapılmasıyla, verilen her bir özdeş nokta koordinatının, serbestlik derecesine katkısı için;

$$r_{x_i} = r_{y_i} = 1 - \left(\frac{1}{n} + \frac{[x]^2 + [y]^2}{n^2[x^2 + y^2] - n[x]^2 - n[y]^2} + \frac{x_i^2 + y_i^2}{[x^2 + y^2] - \left(\frac{[x]^2 + [y]^2}{n} \right)} - \frac{2([x]x_i + [y]y_i)}{n[x^2 + y^2] - [x]^2 - [y]^2} \right) \quad (3.98)$$

$i=1,2,\dots,n$

kapalı eşitliği elde edilir ki, bu eşitlik yardımıyla matris işlemlerine gerek kalmadan herhangi bir özdeş noktanın dönüşüm hesabına katkısını belirlemek mümkündür. Eşitlikte geçen [] sembolü, toplam işlemini tanımlamaktadır.

Eğer dönüşüm ağırlık merkezine ötelenmiş ölçülerle gerçekleştirilirse, (3.98)'de yer alan $[x]=[\Delta x]=0$ ve $[y]=[\Delta y]=0$ olacağından, bu durum için;

$$r_{x_i} = r_{y_i} = 1 - \left(\frac{1}{n} + \frac{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}{[\Delta x^2 + \Delta y^2]} \right) \quad (3.99)$$

bağıntısı elde edilir.

3.3.3 Üç boyutlu benzerlik dönüşümünde güvenilirlik

Üç boyutlu dönüşüm için, Molodensky-Badekas modeli ele alınırsa, dengelemenin katsayılar matrisi (3.24) eşitliğindeki gibi olacaktır. Bu matris, n sayıda özdeş nokta için yeniden düzenlenirse, dengelemenin katsayılar matrisi;

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -(Z_i - Z_0) & (Y_i - Y_0) & (X_i - X_0) \\ 0 & 1 & 0 & (Z_i - Z_0) & 0 & -(X_i - X_0) & (Y_i - Y_0) \\ 0 & 0 & 1 & -(Y_i - Y_0) & (X_i - X_0) & 0 & (Z_i - Z_0) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -(Z_n - Z_0) & (Y_n - Y_0) & (X_n - X_0) \\ 0 & 1 & 0 & (Z_n - Z_0) & 0 & -(X_n - X_0) & (Y_n - Y_0) \\ 0 & 0 & 1 & -(Y_n - Y_0) & (X_n - X_0) & 0 & (Z_n - Z_0) \end{bmatrix} \quad (3.100)$$

olur. Kofaktörler matrisi;

$$q_{44} = \frac{1}{b_{44}^2} + \frac{N_{45}^2}{N_{44}^2 b_{55}^2} + \frac{\left(\frac{N_{45} b_{56}}{N_{44} b_{55}} - \frac{b_{46}}{b_{44}} \right)^2}{b_{66}^2}, \quad q_{55} = \frac{b_{66}^2 + b_{56}^2}{b_{55}^2 b_{66}^2}, \quad q_{66} = \frac{1}{b_{66}^2} \quad (3.101a,b,c)$$

$$q_{77} = \frac{1}{N_{77}}, \quad q_{45} = -\frac{N_{45}}{N_{55} b_{55}^2} - \left(\frac{b_{56}}{b_{55} b_{66}} \right) \left(\frac{N_{45} b_{56}}{N_{44} b_{55}} - \frac{b_{46}}{b_{44}} \right) \quad (3.101d,e)$$

$$q_{46} = \frac{\left(\frac{N_{45} b_{56}}{N_{44} b_{55}} - \frac{b_{46}}{b_{44}} \right)}{b_{66}^2}, \quad q_{56} = -\frac{b_{56}}{b_{55} b_{66}^2} \quad (3.101f,g)$$

ve

$$b_{44} = \sqrt{N_{44}}, \quad b_{55} = \sqrt{N_{55} - \frac{N_{45}^2}{N_{44}}}, \quad b_{66} = \sqrt{N_{66} - b_{46}^2 - b_{56}^2} \quad (3.102a,b,c)$$

$$b_{46} = N_{46} / \sqrt{N_{44}}, \quad b_{56} = \frac{N_{56}N_{44} - N_{45}N_{46}}{N_{44}b_{55}} \quad (3.102d,e)$$

gösterimleriyle;

$$Q_{xx} = \begin{bmatrix} 1/n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1/n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & q_{44} & q_{45} & q_{46} & 0 \\ & & & & q_{55} & q_{56} & 0 \\ & & & & & q_{66} & 0 \\ & & & & & & q_{77} \end{bmatrix} \quad (3.103)$$

olarak elde edilir. Burada n özdeş nokta sayısı iken, N'li terimler, Molodensky-Badekas modelinin (3.69) ile verilen normal denklemler matrisinin elemanlarıdır.

Söz konusu katsayılar ve kofaktörler matrislerinin (3.95) eşitliğinde yerine koyulmasıyla, ölçüler olarak kabul edilen koordinat bileşenleri için $\Delta X_i = X_i - X_0$, $\Delta Y_i = Y_i - Y_0$, $\Delta Z_i = Z_i - Z_0$ kısa gösterimleriyle;

$$r_{X_i} = 1 - \left(\frac{1}{n} + q_{55}\Delta Z_i^2 + q_{66}\Delta Y_i^2 + q_{77}\Delta X_i^2 - 2q_{56}\Delta Y_i\Delta Z_i \right) \quad (3.104a)$$

$$r_{Y_i} = 1 - \left(\frac{1}{n} + q_{44}\Delta Z_i^2 + q_{66}\Delta X_i^2 + q_{77}\Delta Y_i^2 - 2q_{46}\Delta X_i\Delta Z_i \right) \quad (3.104b)$$

$$r_{Z_i} = 1 - \left(\frac{1}{n} + q_{44}\Delta Y_i^2 + q_{55}\Delta X_i^2 + q_{77}\Delta Z_i^2 - 2q_{45}\Delta X_i\Delta Y_i \right) \quad (3.104c)$$

kapalı formülleri elde edilir.

Üç boyutlu dönüşümün kapalı formülleriyle hesap yapmak, iki boyutlu dönüşümdekine oranla daha zahmetlidir. Bu nedenle, kapalı formüller yerine doğrudan matris çözümüyle sonuca gitmek daha uygun bir tercih olabilir.

İki ve üç boyutlu dönüşüm için verilen katsayılar matrislerinde sadece 1. sistem koordinatları yer aldığından, çıkarılan sonuç eşitliklerinde 2. sistem koordinatları bulunmamaktadır. Dolayısıyla, bu eşitliklerle yapılacak herhangi bir güvenilirlik incelemesinde 1. sistem koordinatlarının bilinmesi yeterli olacaktır.

4. DÖNÜŞÜMÜ İYİLEŞTİRİCİ YÖNTEMLER

4.1 Genel

Küçük yerel ağların dönüştürülmesinde, klasik iki veya üç boyutlu benzerlik dönüşümleri, beklentileri karşılayacak yeterli doğruluğu sağlayabilmektedir. Ancak, dönüşümün gerçekleştirileceği bölgenin sınırları büyüdükçe ve buna bağlı olarak kullanılan nokta sayısı arttıkça, doğruluk derecesi azalmakta ve desimetre mertebelerinden daha iyi bir dönüşüm mümkün olamamaktadır. Bu büyük oranda, Bölüm 1’de anılan ülke ağlarındaki distorsiyonlardan kaynaklanmaktadır.

Böyle bir durumda iyileştirici yöntem olarak akla ilk önce, fotogrametride resim distorsiyonlarını, harita deformasyonlarını ve benzeri hataları gidermek amacıyla sıkça kullanılan afin dönüşümleri gelmektedir. Ancak jeodezik ağlardaki distorsiyonların karakteristikleri söz konusu durumlardan çok farklıdır. Jeodezik ağlardaki distorsiyonlar, farklı teknolojik dönemlerde, farklı gözlemciler tarafından gerçekleştirilen ölçmeler ve farklı hesaplama yöntemleri nedeniyle ortaya çıkan rastlantısal ve sistematik hataların birleşiminden kaynaklanmaktadır. Bunlara bir de, geçen uzun yıllardaki depremler ve jeodinamik hareketler nedeniyle noktaların yer değiştirmesini eklemek gerekir. Birbirinden çok farklı ve karmaşık etkenler nedeniyle, söz konusu distorsiyonlar yerel süreksizlikler gösterecektir.

Bu tip yapısal farklılıklar nedeniyle, afin dönüşümleri yeterli iyileşme sağlayamamaktadır. Daha yüksek doğruluk beklentileri için, ülke ağlarındaki rastlantısal-sistematik karakteristiğe sahip distorsiyonların modellenenebilmesine olanak tanıyacak yöntemlere gereksinim vardır.

Genel olarak enterpolasyon yöntemleri olan bir çok yöntem dönüşüm hesabı için de kullanılabilir. Bu bölümde, daha çok yüksekliklerin modellenmesinde kullanılan kollokasyon, filtreleme ve regresyon yöntemleri ele alınmış ve bunların iki ve üç boyutlu dönüşüme uygulanabilirliği araştırılmıştır.

4.2 Çok Parametrelili Regresyon Yöntemi

Çok parametrelili regresyon yöntemi, gerçekte azalan terimli polinomal fonksiyonlardan oluşur. Polinomal yöntemlerin en önemli özelliği, aranan her büyüklük için farklı bir fonksiyon ve parametre kümesinin tanımlanabilmesidir.

Problem, GPS ağlarının ülke ağlarına bağlanması olduğunda, koordinat bileşenlerinin herbiri için ayrı ayrı fonksiyonlar yazılabilir. Bu sayede, nirengi ağlarına ait yatay konum koordinatları, yükseklik bilgisine gereksinim olmaksızın dönüştürülebilir. Bu bağlamda, i nokta numarası olmak üzere iki koordinat sisteminin yatay konum koordinatları arasında;

$$\Delta\varphi_i = A_0 + A_1 U_i + A_2 V_i + A_3 U_i^2 + A_4 U_i V_i + A_5 V_i^2 + \dots \quad (4.1)$$

$$\Delta\lambda_i = B_0 + B_1 U_i + B_2 V_i + B_3 U_i^2 + B_4 U_i V_i + B_5 V_i^2 + \dots \quad (4.2)$$

bağıntıları yazılabilir (DMA, 1988). Burada, $\Delta\varphi$ ve $\Delta\lambda$ bir noktanın iki sistemdeki koordinatları arasındaki farklar, $A_0, A_1, \dots, B_0, B_1, \dots$, dönüşüm parametreleridir. U ve V ise birinci sistem koordinatlarından;

$$U = k(\varphi - \varphi_0) \quad (4.3)$$

$$V = k(\lambda - \lambda_0) \quad (4.4)$$

ile elde edilirler. Burada yer alan φ_0 ve λ_0 dönüşüm bölgesine en yakın tamsayı koordinatlar veya özdeş noktaların ağırlık merkezi koordinatları olarak alınabilir. k ise derece-radyan dönüşümünü de içeren keyfi bir ölçeklendirme faktörüdür.

Dönüşüm hesabının gerçekleştirilmesinde kullanılacak parametreler, özdeş noktaların koordinatlarıyla (4.1) ve (4.2)'den oluşturulacak gözlem eşitliklerinin dengelenmesiyle belirlenir. Buna göre, n tane özdeş nokta için ikinci derece polinomal eşitliklerden;

$$\mathbf{x}^T = [A_0 \ A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4 \ A_5 \ B_0 \ B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4 \ B_5] \quad (4.5)$$

$$\mathbf{l}^T = [\Delta\varphi_1 \ \Delta\varphi_2 \ \dots \ \Delta\varphi_n \ \Delta\lambda_1 \ \Delta\lambda_2 \ \dots \ \Delta\lambda_n] \quad (4.6)$$

ve

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & U_1 & V_1 & U_1^2 & U_1 V_1 & V_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & U_2 & V_2 & U_2^2 & U_2 V_2 & V_2^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & U_n & V_n & U_n^2 & U_n V_n & V_n^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & U_1 & V_1 & U_1^2 & U_1 V_1 & V_1^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & U_2 & V_2 & U_2^2 & U_2 V_2 & V_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & U_n & V_n & U_n^2 & U_n V_n & V_n^2 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

olmak üzere,

$$\mathbf{v} = \mathbf{B} \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (4.8)$$

fonksiyonel modeli elde edilir ve çözüm Dolaylı Ölçüler Dengelemesi ile gerçekleştirilir. Bulunan parametreler, (4.1) ve (4.2) eşitliklerinde yerine koyulur ve dönüştürülmüş koordinatlar hesaplanır.

4.3 Kollokasyon Yöntemi

Jeodezinin bazı problemlerinde, ölçüleri bir fonksiyonel modelle tam olarak ifade etmek güçtür. Ölçülere iyi uyan bir fonksiyonel modelde de bilinmeyenlerin sayısı çok fazla olabilmektedir. Böyle durumlarda basit bir model fonksiyonu ve ölçülerin ondan olan sapmalarına ilişkin bir stokastik model (kollokasyon yöntemi) ile ölçülerde saklı bilgiler yeterli bir incelikte elde edilebilmektedir (Demirel, 1983).

Kollokasyon, ölçülerde mevcut düzenli ve düzensiz sistematik etkilerin dikkate alındığı bir dengeleme türüdür (Wolf, 1977). Bu dengeleme türünün gözlem eşitliklerinin genel ifadesi;

$$\mathbf{l} + \mathbf{n} = \mathbf{B} \mathbf{x} + \mathbf{s} \quad (4.9)$$

ile verilir (Moritz, 1975, Balmino 1978, Moritz, 1978). Burada $\mathbf{l}$ gözlemler vektörüdür. $\mathbf{B} \mathbf{x}$, dengelemenin parametreler vektörü ve katsayılar matrisinden oluşan deterministik kısım, diğer bir deyişle trend fonksiyonudur. Sinyal adı verilen $\mathbf{s}$ modelden sapmaları, noise adı verilen $\mathbf{n}$ gözlem hatalarını içeren birbirinden bağımsız rastgele kısımlardır (Torge, 1991). Bu rastgele büyüklüklerin her birinin ortalama değerinin sıfır olması umulur ve bunların istatistiksel davranışı kovaryans

matrisleriyle belirlenir. Buna göre noise'ların korelasyonsuz, sinyallerin ise korelasyonlu olduğu düşünülür ve varyans-kovaryans matrisleri;

$$C_{nn} = \begin{bmatrix} c_{n_1 n_1} & & & \\ & c_{n_2 n_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & c_{n_n n_n} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$C_{ss} = \begin{bmatrix} c_{s_1 s_1} & c_{s_1 s_2} & \dots & c_{s_1 s_n} \\ c_{s_2 s_1} & c_{s_2 s_2} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ c_{s_n s_1} & \dots & & c_{s_n s_n} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

ile tanımlanır. Bunlara ait ters ağırlık matrisleri ise;

$$Q_{nn} = P_{nn}^{-1} = \frac{1}{m_0^2} C_{nn} \quad , \quad Q_{ss} = P_{ss}^{-1} = \frac{1}{m_0^2} C_{ss} \quad (4.12a,b)$$

bağıntılarıyla hesaplanır. Burada m_0^2 öncül varyanstır.

(4.9) eşitliğinde, l gözlemler vektörü ve noiseler eşitliğin sağ tarafına alındığında;

$$Bx + s - n - l = 0 \quad (4.13)$$

elde edilir. Bu eşitlikte, sinyaller ve noiseler düzeltmeler vektörü olarak tanımlanabilecek;

$$v = \begin{bmatrix} n \\ s \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

şeklinde bir sütun vektörde toplanırsa;

$$Av + Bx - l = 0 \quad (4.15)$$

haline gelen yeni gözlem eşitliği , Bilinmeyenli Koşullu Ölçüler Dengelemesinin Fonksiyonel Modeli olur. Burada A katsayılar matrisi;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{n \times 2n} \quad (4.16)$$

yapısındadır. (4.15) eşitliğine en küçük kareler yöntemi uygulanarak trend fonksiyonun bilinmeyenleri, noiseler ve sinyaller birarada çözülürler. Buna göre;

$$\Omega = \mathbf{v}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{v} - 2\mathbf{k}^T (\mathbf{A} \mathbf{v} + \mathbf{B} \mathbf{x} - \mathbf{l}) = \min. \quad (4.17)$$

biçimindeki lagrange fonksiyonunun $\mathbf{v}$ ve $\mathbf{x}$ vektörlerine göre kısmi türevi alındığında;

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \mathbf{v}} = 2\mathbf{Q}^{-1} \mathbf{v} - 2\mathbf{A}^T \mathbf{k} = 0 \quad (4.18)$$

ve;

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \mathbf{x}} = -2\mathbf{B}^T \mathbf{k} = \mathbf{B}^T \mathbf{k} = 0 \quad (4.19)$$

elde edilir. (4.18) eşitliğinden düzeltmeler vektörü için;

$$\mathbf{v} = \mathbf{Q} \mathbf{A}^T \mathbf{k} \quad (4.20)$$

bulunur. Burada $\mathbf{Q}$;

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{nn} & \\ & \mathbf{Q}_{ss} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

ile tanımlıdır. (4.20) bağıntısının (4.15)'de yerine yazılması ve $\bar{\mathbf{Q}} = \mathbf{A} \mathbf{Q} \mathbf{A}^T$ gösterimiyle;

$$\bar{\mathbf{Q}} \mathbf{k} + \mathbf{B} \mathbf{x} - \mathbf{l} = 0 \quad (4.22)$$

elde edilir. Bu eşitlik sol taraftan önce $\bar{\mathbf{Q}}^{-1}$ sonra da $\mathbf{B}^T$ ile çarpılırsa;

$$\mathbf{B}^T \mathbf{k} + \mathbf{B}^T \bar{\mathbf{Q}}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{x} - \mathbf{B}^T \bar{\mathbf{Q}}^{-1} \mathbf{l} = 0 \quad (4.23)$$

bulunur ki, buradan da (4.11) eşitliği gözönünde bulundurularak, bilinmeyenler için;

$$\mathbf{x} = (\mathbf{B}^T \bar{\mathbf{Q}}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \bar{\mathbf{Q}}^{-1} \mathbf{l} \quad (4.24)$$

eşitliği çıkarılır. Bilinmeyenler hesaplandıktan sonra korelatlar için (4.22)'den;

$$\mathbf{k} = \bar{\mathbf{Q}}^{-1} (\mathbf{l} - \mathbf{B} \mathbf{x}) \quad (4.25)$$

elde edilir. Bu eşitlik, (4.20) ve (4.21)'ten sinyaller ve noiselar için;

$$\mathbf{s} = \mathbf{Q}_{ss} \mathbf{k} \quad (4.26)$$

$$\mathbf{n} = -\mathbf{Q}_{nn} \mathbf{k} \quad (4.27)$$

bağıntıları elde edilir. Bağıntılarda yer alan $\bar{\mathbf{Q}}$ matrisi, noiselerin ve sinyallerin birbirinden bağımsız olması nedeniyle;

$$\bar{\mathbf{Q}} = \mathbf{Q}_{nn} + \mathbf{Q}_{ss} \quad (4.28)$$

ile ifade edilir.

Dengeleme bilinmeyenlerinin hesabından sonra dengelemenin karesel ortalama hatası, n ölçü sayısı, u bilinmeyen sayısı olmak üzere;

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{\mathbf{n}^T \mathbf{Q}_{nn}^{-1} \mathbf{n} + \mathbf{s}^T \mathbf{Q}_{ss}^{-1} \mathbf{s}}{n - u}} \quad (4.29)$$

ile hesaplanabilir. Bilinmeyenlerin k.o.h'ları;

$$m_x = \pm m_0 \sqrt{q_{xx}} \quad (4.30)$$

ile bulunur. Burada bilinmeyenlerin kofaktörler matrisi;

$$\mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{B}^T \bar{\mathbf{Q}}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \quad (4.31)$$

ile verilir.

Böylece, trend fonksiyonunu tanımlayan parametreler, sinyaller ve noiselar, tek bir modelde, kollokasyon modeliyle belirlenmiş olur. Belirlenen bu büyüklükler

yardımıyla dengeleme hesabına girmeyen dış noktalardaki değerlerin predikasyonu da gerçekleştirilebilir. Genel olarak, dengeleme noktalarına ait sinyaller iç, predikasyon noktalarının ki dış sinyaller olarak tanımlanır (Wolf, 1978). Buna göre, dengeleme hesabında kullanılmayan noktaların, predikasyonu istenen değerleri I^p ve bunlara ait dış sinyaller s_p ile gösterilirse, predikasyon bağıntısı;

$$I^p = B_p x + s_p \quad (4.32)$$

olur. Eşitlikte geçen katsayılar matrisi predikasyon noktalarından oluşturulur. Predikasyonun gerçekleştirilebilmesi için gerekli s_p sinyalleri;

$$s_p = Q_{sps} k \quad (4.33)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Burada Q_{sps} , predikasyon noktalarıyla dengeleme noktaları arasındaki ilişkiyi belirler. Kollokasyonda genellikle öncül varyans $m_0^2 = 1$ olarak seçildiğinden, $Q_{ss} = C_{ss}$, $Q_{nn} = C_{nn}$ ve $Q_{sps} = C_{sps}$ olur.

Kollokasyonun en büyük problemi Q_{ss} ve Q_{sps} matrislerinin elemanlarının belirlenmesidir. Matrislerin elemanlarının belirlenmesi, sinyaller arasındaki ilişkilerin de belirlenmesi anlamına gelir. Bunların dengeleme öncesi belirlenmesi zorunludur. Aksi takdirde kollokasyondan söz edilemez (Demirel, 1983). Sinyaller arasındaki ilişkilerin belirlenmesi için bir kovaryans veya korelasyon fonksiyonundan faydalanılır. Jeodezik uygulamalar için genellikle;

$$C = C_0 / (1 + (q/q_0)^2) \quad (4.34)$$

ile verilen Hirvonen fonksiyonu kullanılır. Burada q probleme göre uzaklığın veya zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenir. C_0 'ın korelasyonların belirlenmesinde önemli bir katkısı bulunmadığından çoğu kez 1 olarak alınır. Buna karşın, q_0 korelasyonları belirleyen en önemli etkidir, bu nedenle uygun bir değer alması gerekir. En uygun değer bulunabilmesi için q_0 'a keyfi değerler verilir ve her defasında bir ölçü çıkarılıp kollokasyon yinelerek, çıkarılan ölçünün predikasyonu yapılır. Predikasyon değerlerinin, ölçülerden farkları alınır ve bu farklardan kestirim gücünü belirleyen bir k.o.h. hesaplanır. En küçük k.o.h.'yı veren q_0 bulununcaya kadar bu işlem sürdürülür. Bu yolla belirlenen q_0 kullanılarak Q_{ss} ve Q_{sps} hesaplanır ve kollokasyon gerçekleştirilir.

Bu çalışmada kollokasyonun dönüşüm hesabına uygulanması sözkonusudur. Bu nedenle, eşitliklerde geçen x bilinmeyenler vektörü dönüşüm parametrelerinden oluşacaktır. Bilinmeyenlere ait katsayılar matrisi B ve gözlemler vektörü l ise, seçilen dönüşüm modeline göre üç boyutlu veya iki boyutlu dönüşüm modellerindekilerin eşitidir. C_{nn} birim matris ve q noktalar arasındaki uzaklık, q_0 'da uzaklığa göre normlandırma faktörüdür.

4.4 Filtreleme Yöntemi

Filtreleme, kollokasyonun sadece sinyal ve noiselerin hesaplandığı halidir. Deterministik kısım, daha önceden başka bir yöntemle ölçmelerden uzaklaştırılır. Geriye içinde sinyal ve noiselerin bulunduğu gözlem eşitliği kalır.

$$l + n = s \quad (4.35)$$

Gözlem eşitliği;

$$s - n - l = 0 \quad (4.36)$$

şeklinde yeniden düzenlenirse, (4.14)'deki gösterimden yararlanarak filtreleme için;

$$A v - l = 0 \quad (4.37)$$

Koşullu Ölçüler Dengelemesinin Fonksiyonel Modeli elde edilir. Bu bağlamda, en küçük kareler yöntemine göre koşullu ölçüler dengelemesinin ilkeleri uygulandığında korelatlar için;

$$k = \bar{Q}^{-1} l \quad (4.38)$$

eşitliği elde edilir. Sinyal ve noiseler için kollokasyon yönteminde çıkarılan eşitlikler geçerli olduğu gibi, (4.38)'den hareketle;

$$s = Q_{ss} \bar{Q}^{-1} l \quad (4.39)$$

$$n = -Q_{nn} \bar{Q}^{-1} l \quad (4.40)$$

eşitlikleri de yazılabilir. Dengelemenin karesel ortalama hatası, yine kollokasyonda olduğu gibi (4.29) bağıntısıyla hesaplanır.

Dengelemeye girmeyen noktalardaki prediksyon hesabı için gerekli s_p dış sinyalleri ise (4.33)'den veya;

$$s_p = Q_{sps} \bar{Q}^{-1} l \quad (4.41)$$

bağıntısından bulunur. Buradan elde edilecek dış sinyaller yardımıyla dengeleme dış noktaların prediksyon değerleri;

$$l^p = s_p \quad (6.42)$$

olacaktır.

Filtrelemenin, iki koordinat sistemi arasındaki dönüşümde doğrudan kullanılması düşünülemez. Öncelikle, kollokasyonda trend fonksiyonu olarak adlandırılan iki koordinat sistemi arasındaki deterministik kısmın, ölçülerden uzaklaştırılması gerekir. Bunun için, filtrelemede kullanılacak koordinat türüne göre, iki veya üç boyutlu dönüşüm modellerinden yararlanılabilir. Filtreleme hesabından önce, bu iki modelden biriyle iki koordinat sistemi arasındaki dönüşüm parametreleri hesaplanır ve bu parametreler yardımıyla deterministik kısım ölçü olarak kabul edilen koordinatlardan uzaklaştırılır. Geriye kalan ve sinyal olarak adlandırılan model sapmaları, noktalar arasındaki komşuluk ilişkilerini belirleyen korelasyon fonksiyonu vasıtasıyla filtreleme yönteminden hesaplanır.

5. UYGULAMALAR

5.1 Uygulama Verileri ve Stratejileri

Ülkemizde gerçekleştirilen GPS uygulamalarının büyük çoğunluğu arazi toplulaştırması, kadastro ve belediye hizmetleri gibi yerel kapsamlı çalışmalardır. Bu tip çalışmalarda, küçük bir alana yayılmış sınırlı sayıda kontrol noktasının koordinatları GPS yöntemiyle belirlenmekte ve bunların ülke nirengi ağına entegrasyonu yine az sayıdaki ülke sisteminde de koordinatı bulunan özdeş noktalarla sağlanmaktadır. Diğer bir deyişle, dönüşüm hesabı için de yerel çözümler söz konusu olmaktadır. Bu tarz çalışmalarda karşılaşılan problemlerin araştırılmasına yönelik olarak gerçekleştirilen uygulamalarda, Harita Genel Komutanlığı tarafından tesis edilen Ankara GPS Test Ağı (AGTA), İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından tesis edilen Zonguldak GPS Ağı-96 (ZGA-96), İzmir GPS Ağı-96 (İGA-96) yerel nitelikli ağlarının özdeş noktalarından yararlanılmıştır (Ek B, Şekil B.1, 2 ve 3). Daha geniş alanlara yayılmış ağlardaki distorsiyonların modellenebilmesine olanak tanıyacak ve daha üst düzey doğruluk beklentilerine yanıt verebilecek yöntemlerin denenebilmesi için en azından bölgesel nitelikli bir projeye ihtiyaç duyulmuştur. Uzun bir süre hissedilen bu verilerin eksikliği, yine İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından oluşturulan İstanbul GPS Nirengi Ağı-2000 (İGNA-2000)'in özdeş noktaları ile giderilmiştir (Ek B, Şekil B.4). Burada uygulamalarda kullanılan bu ağların özelliklerine ve dönüşüm hesabının stratejilerine kısaca değinilecektir.

AGTA, 1991 yılında 11 adet Trimble 4000 SST çift frekanslı alıcısıyla ölçülen 15 noktadan oluşmaktadır. Dört gün süren gözlemler, günde altı saat 30 saniye aralıklı taşıyıcı faz ölçüleri ve 15 derece yükseklik açısı esasına göre gerçekleştirilmiş, her saat başı atmosferik ölçmeler yapılmıştır. Nokta koordinatları, Bernese V3.2 yazılımıyla hassas efemeris kullanılarak ETRF89 referans sisteminde hesaplanmıştır. Bu ağın 30x60 km'lik bir alana yayılmış yedi noktasının ülke sistemi ED50'de de koordinatları mevcuttur. Bunlardan 3, 4, 5, ve 6 nolu noktalar 1. derece, diğerleri ikinci derece nirengi noktalarıdır ve tamamına geometrik nivelman ölçüsü yapılmıştır. Noktalara ait tesislerin tamamı pilyedir (HGK, 1997).

ZGA-96 GPS ile belirlenen 160 nirengi noktasından oluşmaktadır. Ancak bu noktalardan 14 tanesi, diğer noktaların belirlenmesinde referans olacak ana ağ noktaları olarak tasarlanmıştır. Ana ağdaki GPS gözlemleri, 4-5 ocak 1996 tarihinde dört adet GPS alıcısıyla en az 30 dakika süresince 10 derece yükseklik açısı ve 10 saniye gözlem aralıklarıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ana ağın Yığılca'daki SLR noktasıyla bağlantısı da yapılarak, noktaların ITRF96 referans sisteminde konumlandırılması sağlanmıştır. Ana ağın dengelenmesi Bernesse yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Ana ağın 20x15 km'lik bir alan dağılmış altı noktası aynı zamanda ülke nirengi ağı noktalarıdır. Bunlar arasında 4 nolu nokta dizi nirengi noktasıyken, diğerleri HGK tarafından üretilen ülke nirengi ağı sıklaştırma noktalarıdır. Söz konusu ağın kotları trigonometrik ve geometrik nivelman ölçülerinin birlikte dengelenmesiyle belirlenmiştir. Bu sırada 5 noktanın ülke sistemindeki kotları değişmez olarak alınmıştır. Dengeleme sonrası birim ölçünün karesel ortalama hatası $m_0 = \pm 22.8$ mm olarak elde edilmiştir (İTÜ, 1996a).

İGA-96 342 noktalı ağının, 23 tanesi ana ağ noktası olarak belirlenmiştir. Gözlemler 10-12 ağustos 1996 tarihleri arasında 7 alıcı ve 15 derece yükseklik açısıyla en az bir saat süreyle statik modda gerçekleştirilmiştir. Ağ İzmir Çeşme ve Foça'daki SLR noktalarına bağlanarak ITRF referans sistemiyle irtibatlandırılmıştır. Bu çalışmada, ana ağda 15x12 km'lik alana yayılmış ve ülke sisteminde koordinatları ve kotları bulunan 6 noktadan yararlanılmıştır (İTÜ, 1996b, Ayan ve diğ., 1997a, 1997b, 1997c).

İGNA-2000 650 noktalı bir GPS nirengi ağı olarak planlanmıştır. Bunların içinde İstanbul il sınırlarını pratik olarak kaplayan 58 nokta Ana Ağ olarak tasarlanmıştır. Ana ağ noktaları yarım pilye olarak tesis edilmiş, ölçmeleri 5 adet Zeiss GPS alıcısı ile statik ölçme yönteminde, minimum 60 dakika gözlem süresi, 15 saniye kayıt aralığı ve 15° minimum yükseklik açısıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçüler SKI 2-3 yazılımı ile değerlendirilmiştir. Ana ağın 34303 nolu noktasının ITRF94 koordinatları sabit tutularak, 139 bağımsız bazdan elde edilen 417 baz vektörü bileşeni dengelenmiş ve 171 koordinat bileşeni hesaplanmıştır. İGNA'nın ülke sistemine dönüştürülebilmesi için ED50'de koordinatı bulunan 160x65 km'lik bir alana yayılmış 31 nokta da bu ağ içine dahil edilmiştir. Bunlardan 4020, 4295, 4301, 4308, 4337 ve 4339 1. derece, 4296 ve 4304 2.derece ülke nirengi ağı, diğerleri İstanbul metropoliten nirengi ağı noktalarıdır (İTÜ, 2000).

Teorik uygulamalarda, gerçek verilerin yanı sıra sanal verilerden de yararlanılmıştır. Bu verilerin belirlenmesine ilişkin ayrıntılı bilgiler, ilgili uygulamalarda yer almaktadır.

Söz konusu verilerle iki ve üç boyutlu olmak üzere, 6 değişik dönüşüm yöntemi gerçekleştirilmiştir. Ülke nirengi ağı noktalarına ait elipsoidal yükseklikler bilinmediğinden, üç boyutlu dönüşümlerde iki ayrı yaklaşım uygulandığına daha önce değinilmişti. Nivelman yüksekliklerinin, ülke nirengi ağının elipsoidal yüksekliklerine eşit varsayıldığı yaklaşım burada $H=h_{ED}$ yaklaşımı olarak adlandırılacaktır. Her iki koordinat sistemindeki yüksekliklerin sıfıra eşit varsayıldığı yaklaşım ise $h=0$ yaklaşımı olarak deyimlendirilecektir. İki boyutlu dönüşümler ise, regresyon yöntemi dışında projeksiyon düzlemindeki koordinatlarla gerçekleştirilmiştir. Regresyon yönteminde ise, noktaların elipsoidal coğrafi koordinatlarından faydalanılmıştır.

5.2 Koordinat Değişimleri Karşısında Dönüşüm Parametrelerinin Davranışı

Özdeş noktaların değişik kombinasyonlarından yararlanarak hesaplanan dönüşüm parametrelerinde meydana gelen değişimlerin, koordinat bileşenlerindeki olası hatalara mal edilip edilemeyeceğini, hangi bileşenin hangi dönüşüm parametresi üzerinde daha etkili olduğunu,

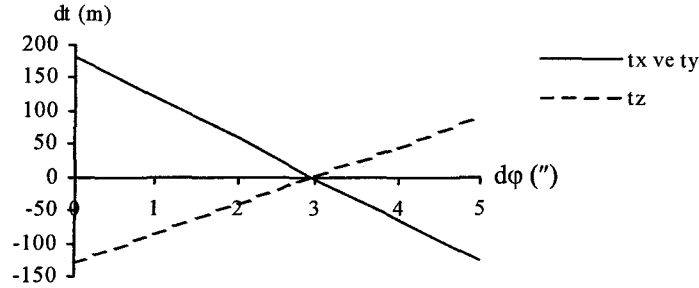
$$\begin{bmatrix} \delta\varphi \\ \delta\lambda \\ \delta h \end{bmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \mathbf{G} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} + \mathbf{h}\delta k + \mathbf{E} \begin{bmatrix} \delta a \\ \delta f \end{bmatrix}$$

bağıntısıyla incelemek mümkündür. Bu amaçla koordinat bileşenleri ve parametreler arasındaki ilişkiler tek tek ele alınmış ve bunlar grafiklerle ortaya konulmaya çalışılmıştır. Her bir parametre incelenirken diğer parametreler sabit tutulmuştur. Değişik enlem ve boylamlarda grafiklerin yönü aynı kalmakla birlikte, eğimlerinde küçük değişiklikler söz konusu olmaktadır, ancak karakteristik özellikler değişmemektedir. Karakteristikleri aynı olduğundan ve basitliği korumak amacıyla grafiklerde sadece 45° enlem ve 45° boylamdaki ilişkilere yer verilmiş ve nokta birinci sistemin referans elipsoidi üzerinde seçilmiştir.

5.2.1 Parametre-enlem değışimi

Ötelemeler:

Enlemdeki değişime karşılık ötelemelerdeki değişim Şekil 5.1’de verilmektedir.



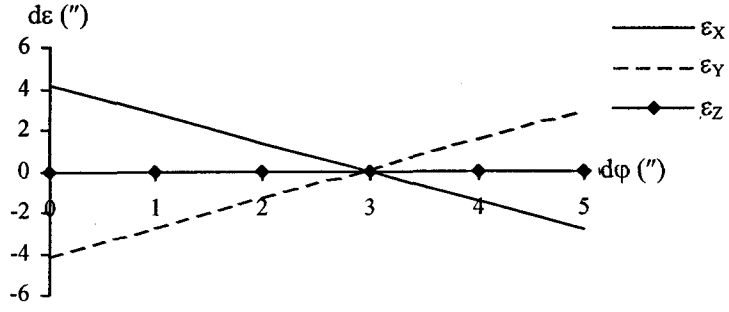
Şekil 5.1 Enlem-öteleme değişimi

Görüldüğü üzere, t_z enlem değişimiyle doğru orantılıyken, t_x ve t_y ters orantı sergilemektedir. Buna karşın her üç parametre de $2''.9595$ enlem farkı değerinde sifira ulaşmaktadır. Bu durum iki sistemin (WGS84 ile Uluslararası Hayford elipsoidi) orijinleri çakıştırıldığında, bir noktanın iki sistemdeki enlemleri arasında yaklaşık $3''$ lik bir fark oluşacağını göstermektedir. Diğer yünden, bir noktanın iki sistemdeki enlem değerlerinde hiç fark olmaması için iki sistemin başlangıç noktaları X ve Y eksenleri yönünde yaklaşık 180m, Z yönünde 135m kaydırılmalıdır. Bu sonuçlar, dönüşüm parametrelerinin hesabına kaynaklık eden özdeş nokta koordinatlarının olası hataları bir koordinat değişimi gibi düşünülerek yorumlanırsa, noktanın enlemindeki $0''.01$ lik değişim (yaklaşık 30cm), 60 cm'lik t_x ve t_y , 45 cm'lik t_z değişimine neden olacağını göstermektedir. Bu arada t_x ve t_y ötelemelerinin çakışması sadece 45° enlem ve boylamına özgüdür. Diğer enlem ve boylam değerlerinde farklı yönlere ötelenmektedirler.

Dönüklükler:

Şekil 5.2’de enlem değişimi ve dönüklükler arasındaki ilişki görülmektedir. X eksenindeki dönüklük ε_X , enlem değişimi arttıkça azalmakta, Y eksenindeki dönüklük ε_Y ise artmaktadır.

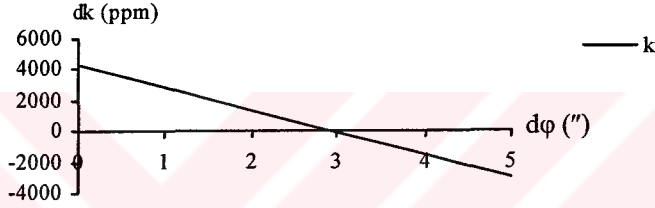
Dikkat edilmesi gereken bir husus; her iki dönüklük yine $2^{\circ},9595$ enlem farkı değerinde sifıra ulaşmaktadır. Z eksenini etrafındaki dönüklük ε_Z ise enlem değişiminden etkilenmemektedir.



Şekil 5.2 Enlem-dönüklük değişimi

Ölçek:

Ölçek ve enlem farkı arasındaki ilişki t_z ve ε_y parametreleri gibi ters orantılıdır.



Şekil 5.3 Enlem-ölçek değişimi

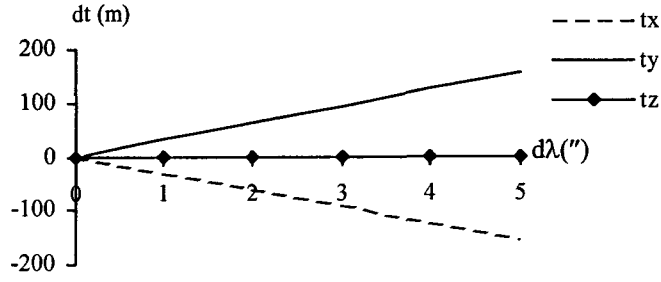
Yine, diğer tüm parametrelerde olduğu gibi ölçek faktörü de $2''/9595$ değerinde sıfıra ulaşmaktadır (Şekil 5.3).

5.2.2 Parametre-boylam değişimi

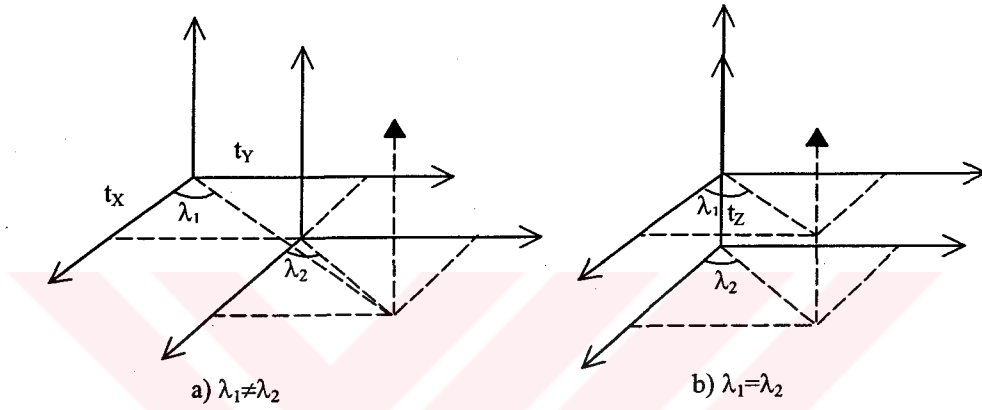
Ötelemeler:

Şekil 5.4 incelendiğinde, iki sistem arasında boylam farkı olmadığında, t_x ve t_y ötelemelerinin de sıfır olduğu gözlenmektedir. t_z ötelemesi ise, boylam değişiminden bağımsızdır.

İki sistem arasında boylam farkı olmadığında, sistemlerden birinin orijin noktasının, diğerinin Z eksenı üzerinde bir yerde bulunabileceği göz önünde bulundurulduğunda, bu doğal bir sonuçtur (Şekil 5.5).

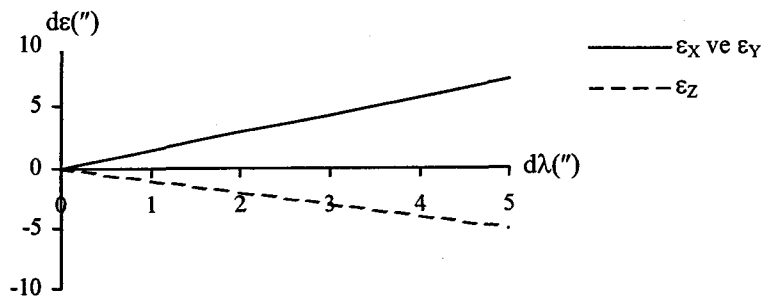


Şekil 5.4 Boylam-öteleleme değişimi



Şekil 5.5 Boylam-öteleleme ilişkisi

Dönüklükler:



Şekil 5.6 Boylam-dönüklük değişimi

Burada ε_z ters orantı, ε_x ve ε_y doğru orantı göstermektedir. ε_x ve ε_y , 45° enlem ve boylam değerine özgü olarak çakışmaktadır. Diğer enlem ve boylamlarda farklı eğim değerlerine sahip olurlar (Şekil 5.6).

Dönüklükler, ötelemelerde olduğu gibi grafiğin orijin noktasından itibaren değerler almaya başlamaktadır.

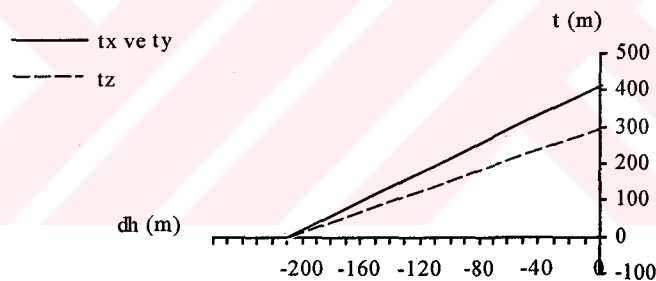
Ölçek:

Eşitlik (3.40)'a göre ölçek faktörü boylam değişiminden diferansiyel anlamda bağımsızdır.

5.2.3 Parametre-yükseklik değişimi

Ötelemeler:

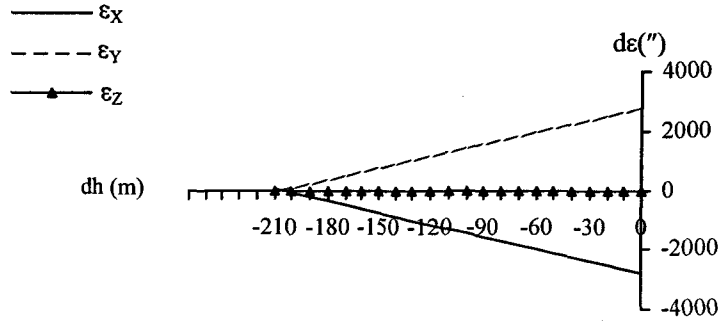
Şekil 5.7’de t_x , t_y ve t_z ötelemelerinin yükseklik değişimiyle doğru orantılı olduğu gözlenmektedir. Ayrıca her üç parametrenin de -205,3964m değerinde sıfıra ulaştığı görülmektedir. Bu değer 45° enleminde iki elipsoit yüzeyi arasında elipsoit normali boyunca olan uzaklıktır. Ancak yükseklikler arasındaki fark sıfıra ulaştığında elipsoit merkezleri arasındaki ötelemeler t_z de 300 m, t_x ve t_y de 410 m’ye kadar ulaşmaktadır.



Şekil 5.7 Yükseklik-öteleme değişimi

Dönüklükler:

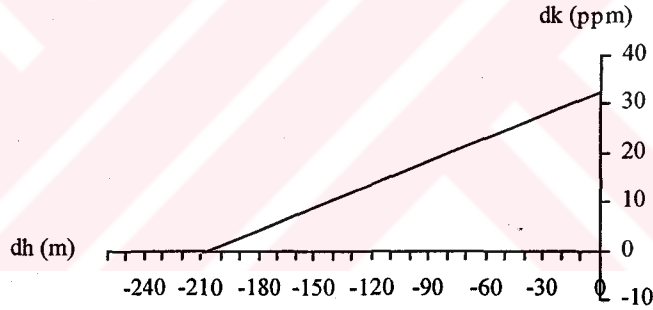
ε_z dönüklüğü, yükseklik değişiminden diferansiyel anlamda etkilenmemektedir. ε_x ve ε_y dönüklüklerinin yükseklik değişimiyle ilişkisi ise Şekil 5.8'deki gibidir. Her iki dönüklükte, Şekil 5.7'de olduğu gibi -205,3964m değerinde sıfır olmaktadır.



Şekil 5.8 Yükseklik-dönüklük değişimi

Ölçek:

Ölçeğin de ötelemelerdeki gibi, yükseklikle ters orantılı olduğu, şekilde görülmektedir. İki elipsoit yüzeyi arasındaki fark yaklaşık -205 m iken iki sistem arasındaki ölçek farkı sıfır olmaktadır. Ayrıca 5 m'lik yükseklik değişimi yaklaşık 1 ppm'lik ölçek değişimine neden olmaktadır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 Yükseklik-ölçek değişimi

5.2.4 Değerlendirmeler

Yukarıda verilen grafikler 45° enlem ve 45° boylamına özgüdür. Diğer enlem ve boylamlarda sayısal değerler farklı olacaktır, ancak koordinat-parametre değişim ilişkisi benzer karakteristikleri sergilemektedir. Buna göre, her iki koordinat sisteminde birbirine eş kabul edilen noktaların kordinatları, üç boyutlu uzayda tek bir nokta belirlediğinde, parametrelerin yerel değişimler sergilemeyeceği, diğer bir deyişle iki sistem arasında tek anlamlı parametre kümesi elde edilebileceği söylenebilir.

Rastlantısal bir olay olan jeodezik ölçme ve bunun rastlantısal sonucu ölçülerden hesaplanan nokta konumu da rastlantısaldir, yani rastlantısal hatalar içerir. Ölçmelerdeki rastlantısal hatalar ile ölçmenin türünden ve hesap yöntemlerinden kaynaklanabilen sistematik hatalar nokta konumlarında sistematik hatalar ortaya çıkarabilir. Bunun sonucunda, her iki sistemdeki eşlenik noktaların iki ayrı sistemdeki koordinatlarının karşılaştırılması teorik olarak zorunlu değildir. Ancak her iki sistemdeki koordinatların gerçek değerleri karşılaştırılabilir. Uygulamada, nokta koordinatlarının ümit değere sadık olduğu düşünülen kestirim değerleriyle yetinilmek zorunluluğu vardır. Dolayısıyla bu tür nokta kümelerinden yararlanarak hesaplanacak datum parametreleri, kısmen sistematik değişimler gösterecektir. Bu değişimlerin konuma bağlılığı, yani sistematığı araştırılmalıdır.

Bu yerel değişimler hakkında daha sağlıklı sonuçlara varabilmek için, hangi parametre üzerinde hangi koordinat bileşeninin daha etkili olduğunu ortaya koymak gerekir. Bu amaçla (3.39) eşitliklerinden yararlanarak, Türkiye'nin ortalarına rastlayan 40° enlem ve 32° boylamında, dönüşüm parametrelerindeki birim değişimlere karşılık, koordinat farkları hesaplanmış ve Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 $\varphi=40^\circ$ ve $\lambda=32^\circ$ için koordinat değişimleri ve dönüşüm parametreleri arasındaki ilişkiler

	Δt_x 1m	Δt_y 1m	Δt_z 1m	$\Delta \epsilon_x$ 1"	$\Delta \epsilon_y$ 1"	$\Delta \epsilon_z$ 1"	Δk 1ppm	$a_{ED}-a_{WGS}$ ve $f_{ED}-f_{WGS}$
$\Delta \varphi(^{\circ})$	-0,0177	-0,0110	0,0248	-0,5305	0,8490	0	-0,0007	2,9154
$\Delta \lambda(^{\circ})$	-0,0223	0,0357	0	0,7068	0,4417	-1	0	0
$\Delta h(m)$	-0,650	-0,406	-0,643	0,054	-0,087	0	-6,369	213,326

Tablodaki değerler farklı bölgeler için belli oranda değişse de, bu tablodan yararlanarak, koordinatlardaki olası hataların parametreler üzerindeki etkisi sınıflandırılabilir. Burada ve daha önce verilen grafiklerde, bazı parametrelerin bazı koordinat bileşenlerinden bağımsız olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni, (3.39) diferansiyel eşitliğinden bulunan değerlerin nokta bazında ve zorlamasız olarak elde edilmesidir. Gerçekte dönüşüm parametreleri En Küçük Kareler Yöntemine göre çok sayıda özdeş noktadan dengelemeyle hesaplanmaktadır. Bu bağlamda, bağımsız gibi

görünen koordinat bileşenlerinin de, dönüşüm parametrelerine belli oranda etkisi olacaktır. Buna göre;

- ✓ Ötelemeler üzerinde yükseklik hatası diğerlerine göre daha etkilidir. Tablodan görüldüğü üzere, herhangi bir ötelemede 1m'lik değişim için, enlem ve boylamda uygulamada karşılaşılmaması mümkün olmayan büyük hataların ortaya çıkması gerekirken, yükseklikte 40-60cm arası hata yeterli olmaktadır. Ülke nirengi ağı noktalarının yükseklik bilgileri, çoğunlukla trigonometrik nivelmanla belirlendiğinden, duyarlılıkları $\pm 50\text{cm}$ 'ye kadar değişebilmektedir. Bunun yanında, ülke düşey datumu da belirlenmediğinden, bu nivelman bilgileri elipsoidal yüksekliklere dönüştürülememekte ve jeoit ondülasyonu kadar sistematik hataya neden olmaktadır. Böylece yükseklik bilgisindeki hatalar metreleri bulabilmektedir. AGTA , İGA-96 ve ZGA-96 için hesaplanan öteleme parametreleri arasında, 5m'ye varan farklar görülmektedir ki, bunda en büyük payın yükseklik bilgilerindeki hatalar olduğu söylenebilir.
- ✓ Yüksekliklerdeki değişimin, ε_x ve ε_y dönüklüklerinde de oldukça etkili olduğu görülmektedir. Buna karşılık ε_z dönüklüğü üzerinde boylam en önemli belirleyicidir.
- ✓ Ölçek üzerinde enlem değişimi yüksekliğe göre daha baskındır. Şöyle ki; çeşitli uygulamalarda, iki sistem arasında 10ppm'e varan ölçek farkları görülmektedir ve bu kadar bir ölçek farkına yüksekliğin tek başına neden olabilmesi için, Tablo 5.1'e göre 64m civarında bir hatayla yüklü olması gerekir. Oysa 10ppm'lik bir ölçek farkı enlemdeki $\pm 0.007''$ lik ($\approx 20\text{ cm}$) bir hata ile oluşabilmektedir.

Tablo 5.2 Parametre-koordinat etkileşim sırası

Parametreler	Etki Sırası		
	1.	2.	3.
t_x	h	φ	λ
t_y	h	φ	λ
t_z	h	φ	λ
ε_x	h	φ	λ
ε_y	h	λ	φ
ε_z	λ	h veya φ	
k	φ	h	λ

Bu sonuçlardan hareketle, parametrelerle koordinat bileşenleri arasında Tablo 5.2'deki gibi etkileşim derecelendirmesi yapılabilir.

Burada en ilgi çekici sonuç, ölçek parametresine ilişkindir. Ölçek farklılığının ortaya çıkmasındaki neden yalnızca yükseklik bilgisindeki hatalar değildir. Bilindiği gibi ülke nirengi ağları geçmişte triangülasyon ağları olarak kurulmuşlardır. Bu tür ağlara ölçek vermek amacıyla, belli aralıklarla kenar ölçmeleri yapılır ve bunlar hatasız kabul edilirler. Bunun sonucunda, kenar ölçmelerindeki rastlantısal hatalar, yer aldıkları ağlar için sistematik hatalara neden olurlar. Aksoy ve Güneş (1990)'da kenar ölçmelerinden kaynaklanan ölçek hatalarının, açılı ölçmeleriyle yayılacağı ve daha önemli değerlere ulaşacağı ifade edilmektedir. İtalya'da Marchesini (1992) tarafından gerçekleştirilen bir araştırma, burada varılan sonucu doğrulamaktadır: "Mekometre ve GPS" ile eğik mesafeler ölçülmüş ve aralarında $-19,51\text{ppm}$ 'e kadar farklar görülmüş, bunların oransal hatası $\pm 9,65\text{ppm}$ olarak belirlenmiştir.

5.3 Üç Boyutlu Dönüşümde Hata Yayılması

(3.64), (3.65) ve (3.66) bağıntıları incelendiğinde, koordinat bileşenleri arasındaki etkileşimlerin, dönüştürülen noktanın geometrik yerine bağımlı olduğu görülmektedir. Dikkat edilirse, eşitliklerde nokta koordinatlarını içinde bulunduran matrisler sıkça yer almaktadır. Bu nedenle dönüştürülecek nokta, özdeş noktaların ağırlık merkezinden uzaklaştıkça bu matrislerin sisteme etkisi, dolayısıyla dönüştürülen koordinatlara hata yayılması büyüyecektir. Ancak bundan daha önemlisi dönüklükleri ve ölçek parametresini içinde bulunduran $\bar{\mathbf{R}}$ matrisi sözkonusu eşitliklerde doğrudan bir etkiye sahiptir. Dönüklük parametreleri büyüdükçe, buna bağlı olarak koordinat bileşenleri arasındaki korelasyonun da büyük değerlere ulaşacağı açıktır.

Bu gözlemlerin doğruluğunu ispatlamak ve nivelman yüksekliklerinin dönüştürülmüş yatay koordinat bileşenlerine etkisini ortaya koymak için, İGA-96, ZGA-96 ve AGTA ağlarında, $H=h_{ED}$ çözümlerine sözkonusu eşitlikler uygulanmıştır. Uygulamada örnek olarak her bölgede, özdeş noktalar için 1 nolu, özdeş olmayan noktalar için ise ağ dışında keyfi noktalar seçilmiştir. Bu noktaların elipsoidal coğrafi koordinatlarına ait başlangıç varyans-kovaryans matrislerinde, enlem ve boylam için daha önce gerçekleştirilen dönüşümlerden edinilen deneyimlere dayanarak

$\sigma_\varphi = \sigma_\lambda = \pm 0''.0007$, yükseklik bilgileri için ise trigonometrik nivelmanla belirlenme olasılıklarına karşılık $\sigma_h = \pm 50$ cm keyfi değeri seçilmiştir. Böylece;

$$K_{E_1 E_1} = \begin{bmatrix} (0''.0007)^2 & & \\ & (0''.0007)^2 & \\ & & (0.5m)^2 \end{bmatrix}$$

olarak belirlenmiştir. (3.64), (3.65) ve (3.66) eşitliklerinin uygulanmasıyla elde edilen koordinatların varyans-kovaryans matrislerinden, koordinat bileşenlerinin birbirine etkisinin daha anlamlı bir biçimde ortaya konulabilmesi amacıyla, elemanları

$$r_i = \frac{m_{XYi}}{m_{Xi} \cdot m_{Yi}} \quad (5.1)$$

eşitliğiyle hesaplanan korelasyon matrislerinin tamamı Ek E'de verilmiştir. Aşağıda örnek olarak, üç ağız özdeş noktalarına ait kartezyen ve coğrafi koordinatlarının korelasyon matrisleri verilmektedir.

a) İGA-96

$$r_{Kar} = \begin{bmatrix} 1 & 0.997 & 0.998 \\ & 1 & 0.996 \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad r_{Coğ} = \begin{bmatrix} 1 & 0.0001 & 0.002 \\ & 1 & -0.067 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

b) ZGA-96

$$r_{Kar} = \begin{bmatrix} 1 & 0.997 & 0.997 \\ & 1 & 0.996 \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad r_{Coğ} = \begin{bmatrix} 1 & -0.145 & 0.400 \\ & 1 & -0.358 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

c) AGTA

$$r_{Kar} = \begin{bmatrix} 1 & 0.997 & 0.997 \\ & 1 & 0.995 \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad r_{Coğ} = \begin{bmatrix} 1 & 0.0004 & 0.011 \\ & 1 & 0.034 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

Buna göre, kartezyen koordinatlar için hesaplanan korelasyonların çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu yüksek korelasyon, kartezyen koordinatlar arasındaki matematiksel bağıın güçlü bir düzeyde olduğunu göstermektedir. Buna karşın dönüştürülmüş elipsoidal coğrafi koordinatlarda korelasyonlar oldukça küçüktür. Uygulamaya konu olan ağlardan İGA-96 ve AGTA'da, elipsoidal coğrafi koordinat bileşenleri arasındaki korelasyonların ihmal edilebilecek düzeyde oldukları gözlenmektedir. Ancak ZGA-96'daki korelasyonlar, AGTA ve İGA-96'nın 30-40 katı büyüklüktedir. Dikkat edilecek olursa, ZGA-96'da $H=h_{ED}$ için hesaplanan dönüklükler 20" nin üzerindedir ki, bu iki sistem için beklentilerin ötesinde büyük değerlerdir. Zaten her üç ağdan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, dönüklük parametreleri büyüdükçe korelasyonların da büyüdüğü görülmektedir. Dolayısıyla nivelman yüksekliklerinin kullanılmasıyla ortaya çıkan ZGA-96 ağındaki gibi büyük dönüklük parametreleri, dönüştürülmüş koordinat bileşenleri arasında yüksek korelasyona , bu da yatay ve düşey konum koordinatlarına ait hataların birbirine bulaşmasına neden olmaktadır. AGTA ve İGA-96 ağlarındaki dönüklükler ZGA-96 ağına oranla daha küçük olduğundan, korelasyonlar daha düşük seviyede kalmakta, bunun sonucunda da düşey konum bilgisindeki hata, büyük oranda yine dönüştürülmüş yüksekliklere yansımaktadır.

Dönüklüklerin hata yayılması üzerindeki etkisi, burada ki uygulamayla da pekiştirilmiş olmaktadır. Sonuç olarak nivelman yüksekliklerinin dönüşüm hesabında kullanılması, elde edilen dönüklükler beklentilerin ötesinde büyük değerlere, örneğin iki basamaklı değerlere ulaşıyorsa, dönüştürülmüş yatay konum koordinatlarının bozulmasına neden olabilir. Aksi takdirde, yüksekliklerin diğer koordinat bileşenlerine olumsuz etkisinden söz edilemeyeceğinden, hatta gerçeğe daha yakın ötelemelerin bulunmasına katkı sağlayacağından, dönüşümde yüksekliklerin kullanılmaları isabetli olacaktır.

5.4 Bursa-Wolf Ve Molodensky-Badekas Modellerinin Karşılaştırması

Her iki model için, dönüşüm hesabı sırasında parametreler arasında ortaya çıkan korelasyonların sayısal değerlerle birlikte ortaya konabilmesine yönelik olarak İGA-96, ZGA-96 ve AGTA ağlarında (3.67) ve (3.69) bağıntılarıyla dengelemenin normal denklemler matrisleri, bunların tersi alınarak bilinmeyenlerin kofaktörler matrisleri hesaplanmıştır. Korelasyonların daha açıkça gözlenebilmesi için, bilinmeyenlerin

kofaktörler matrislerinden (3.70) ile aşağıda verilen korelasyon matrisleri hesaplanmıştır. Buna göre, ötelemelerin diğer parametrelerle arasındaki korelasyonların, Bursa-Wolf modelinde çok yüksek olduğu, buna karşın Molodensky-Badekas modelinde, sadece dönüklüklerin kendi aralarında korelasyonlu oldukları gözlemlenmektedir.

İGA-96'da Molodensky-Badekas için bulunan bilinmeyenlerin korelasyon matrisi:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1 & 0.33 & -0.18 & 0 \\ & & & & 1 & -0.04 & 0 \\ & & & & & 1 & 0 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

İGA-96'da Bursa-Wolf için bulunan bilinmeyenlerin korelasyon matrisi:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.05 & -0.41 & -0.20 & 0.77 & -0.35 & -0.55 \\ & 1 & -0.24 & -0.73 & 0.18 & 0.74 & -0.28 \\ & & 1 & 0.56 & -0.86 & -0.03 & -0.43 \\ & & & 1 & 0.34 & -0.18 & 0 \\ & & & & 1 & -0.04 & 0 \\ & & & & & 1 & 0 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

ZGA-96'da Molodensky-Badekas için bulunan bilinmeyenlerin korelasyon matrisi:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1 & -0.97 & -0.97 & 0 \\ & & & & 1 & -0.96 & 0 \\ & & & & & 1 & 0 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

ZGA-96'da Bursa-Wolf için bulunan bilinmeyenlerin korelasyon matrisi:

$$\begin{bmatrix} \underline{1} & 0.87 & -0.87 & -0.87 & 0.92 & 0.81 & -0.31 \\ & \underline{1} & -0.98 & -0.99 & 0.97 & 0.98 & -0.05 \\ & & \underline{1} & 0.99 & -0.99 & -0.96 & -0.10 \\ & & & \underline{1} & -0.97 & -0.97 & 0 \\ & & & & \underline{1} & 0.96 & 0 \\ & & & & & \underline{1} & 0 \\ & & & & & & \underline{1} \end{bmatrix}$$

AGTA'da Molodensky-Badekas için bulunan bilinmeyenlerin korelasyon matrisi:

$$\begin{bmatrix} \underline{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \underline{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \underline{1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \underline{1} & 0.39 & -0.54 & 0 \\ & & & & \underline{1} & -0.59 & 0 \\ & & & & & \underline{1} & 0 \\ & & & & & & \underline{1} \end{bmatrix}$$

AGTA'da Bursa-Wolf için bulunan bilinmeyenlerin korelasyon matrisi:

$$\begin{bmatrix} \underline{1} & -0.64 & -0.29 & 0.47 & 0.85 & -0.79 & -0.39 \\ & \underline{1} & 0.22 & -0.81 & -0.56 & 0.89 & -0.22 \\ & & \underline{1} & 0.15 & -0.69 & 0.26 & -0.57 \\ & & & \underline{1} & 0.39 & -0.54 & 0 \\ & & & & \underline{1} & -0.59 & 0 \\ & & & & & \underline{1} & 0 \\ & & & & & & \underline{1} \end{bmatrix}$$

(3.71) ve (3.72) bağıntılarından söz konusu üç ağıdaki her bir noktanın dönüklükler ve ölçek nedeniyle her iki dönüşüm modeline katkıları da tek tek hesaplanmış ve bunların ortalaması alınmıştır. Buna göre, Molodensky-Badekas'da dönüklük ve ölçeğin sisteme hiçbir olumsuz katkısının olmadığı görülmektedir (Ek F). Yani ötelemeler özdeş noktalar yardımıyla, diğer parametrelerden bağımsız olarak elde edilmektedir. Bursa-Wolf'deki değerlerin ise, iki modelin dengelemeden bulunan ötelemeleri farkının ters işaretlisine eşit olduğu gözlemlenmektedir. Korelasyonlar nedeniyle, ölçek ve dönüklükler modele artı bir değer eklemekte, ötelemelerde

gerçekte ötelemeye ilgisi olmayan bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için, onun ters işaretlisi kadar değişmeye zorlanmaktadır. Bu değişim, ölçek ve dönüklüklerle doğru orantılı olarak artacaktır.

Bu bağlamda, Bursa-Wolf modeliyle bulunan ötelemeler, matematik modelin gereği olarak dönüklüklerden etkilenmektedir. Molodensky-Badekas'da ise; ölçek ve dönüklüklerin etkileri öteleme parametrelerine yansımadığından, bunların gerçeği daha iyi temsil ettiğini söylemek mümkündür. Farklı bölgelerde yer alan uygulama ağlarından bulunan ötelemelerin, bu modelde daha kararlı oldukları görülmektedir. AGTA, İGA-96, ZGA-96 ve İGNA-2000'de Molodensky-Badekas ile bulunan öteleme parametreleri 3-4m bölgesel farklar gösterirken, Bursa-Wolf ile birbirine yakın dönüklüklerin olduğu bölgelerde 70m'ye, ZGA-96 gibi relatif büyük dönüklüklerde 440m'ye ulaşmaktadır (EK C). O takdirde, parametrelerin başka hizmet alanlarında, pratik hesaplamalarda kullanılabilmesi ve bu amaca yönelik olarak da uygulamalarda belli bir standart oluşturulabilmesi için Üç Boyutlu Dönüşüm'de Molodensky-Badekas Modeli'nin tercih edilmesi yerinde olacaktır.

5.5 İki Boyutlu Benzerlik Dönüşümü Uygulaması

AGTA, İGA-96 ve ZGA-96 ağlarında gerçekleştirilen, iki ve üç boyutlu dönüşüm sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için, üç boyutlu benzerlik dönüşümü ile dönüştürülmüş koordinatların referans koordinatlardan meridyen ve meridyene dik doğrultudaki farkları alınmış, elde edilen farklardan iki boyutlu dönüşümün çıkışma artıkları v_x , v_y 'ye karşılık olan değerlerle k.o.h.'lar hesaplanmıştır. Buna göre AGTA, İGA-96, ZGA-96 için sırasıyla, üç boyutlu dönüşümden $\pm 0.0001m$, $\pm 0.0128m$, $\pm 0.0284m$, iki boyutlu dönüşümden $\pm 0.0004m$, $\pm 0.0124m$ ve $\pm 0.0261m$ değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, küçük boyutlu ağlarla gerçekleştirilecek dönüşümlerde iki boyutlu benzerlik dönüşümünün, üç boyutlu dönüşüme alternatif olabileceğini göstermektedir.

Bunun en az iki dilime yayılmış bölgesel nitelikli ağlarda da böyle olup olmadığının araştırılabilmesi için aynı uygulamalar, 5.1'de sözü edilen İstanbul ağı üzerinde de gerçekleştirilmiş ve üç boyutlu dönüşümden $\pm 0.1029m$, iki boyutlu dönüşümden $\pm 0.1041m$ k.o.h.'ları hesaplanmıştır. Bununla yetinmeyerek, ülke geneline yayılmış daha geniş alanlarda kıyaslama yapabilmek için, ZGA-96 ağının 1 nolu, İGA-96

ağının 2 nolu, AGTA ağının 4 nolu, İGNA-2000 ağının 4004 nolu noktaları kullanılarak, iki ve üç boyutlu dönüşümler gerçekleştirilmiş, dönüşümlerin sonucunda aynı yolla, iki boyutlu dönüşüm için $\pm 0.4132m$, üç boyutlu dönüşüm için $\pm 0.4246m$ k.o.h'ları hesaplanmıştır.

Tüm bu uygulamalar, ağın boyutları ne olursa olsun projeksiyon düzleminde gerçekleştirilecek iki boyutlu dönüşümün, yatay konum koordinatlarını, en az üç boyutlu dönüşüm kadar iyi dönüştürdüğünü göstermektedir.

Eğer uygulamada amaç, sadece yatay konum koordinatlarını dönüştürmekse, iki boyutlu benzerlik dönüşümü, üç boyutlunun yerine rahatlıkla tercih edilebilir. Üstelik iki boyutlu dönüşümün matematik modeli daha basit olduğundan, bu tercih uygulamacı için de daha kolay bir yol olacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken husus; dönüşüm hesabında kullanılacak projeksiyon koordinatlarının aynı dilim orta meridyenine göre tanımlanmasının gerekliliğidir.

5.6 Dönüşüm Hesabında Güvenirlik Araştırması

5.6.1 Dönüşüm hesabında ölçüler için güvenirlik sınırı

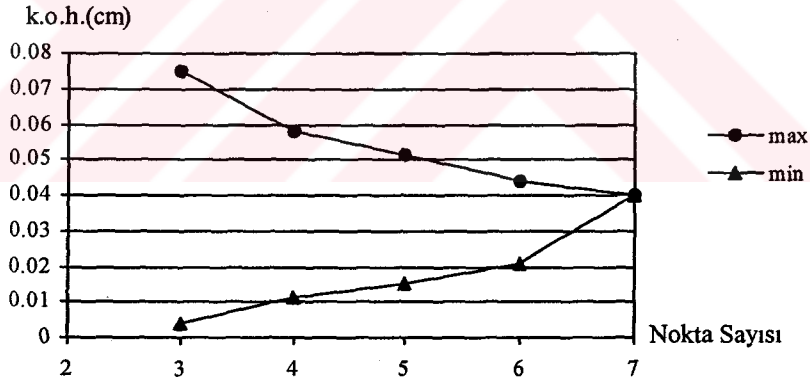
(3.95), (3.98) ve (3.104) eşitliklerinden yararlanarak, gerek iki gerekse üç boyutlu dönüşüme giren ölçülerin güvenirlik değerleri elde edilebilir. Ancak bu ölçülerin güvenilirliklerinin değerlendirilebilmesi için bir güvenirlik sınır değerine ihtiyaç duyulur. Jeodezik kontrol ağları için kullanılan bilinen sınır değerler, dönüşüm hesabının taşıdığı farklı özellikler nedeniyle bu amaca uygun düşmez. Çünkü ağ dengelemesinin fonksiyonel model eşitlikleri ile dönüşüm hesabının fonksiyonel model eşitlikleri farklıdır. En başta, dönüşüm hesabına giren her noktanın, çözüme belli bir oranda da olsa katkısı vardır; oysa ağ dengelemesinde bu böyle olmayabilir. Örneğin ölçü sayısının bir arttırılması $r_i=0$ olan ölçünün güvenirliliğine bir katkı sağlamaz. Yine (3.95), (3.98) ve (3.104) bağıntıları incelendiğinde, güvenirliliğinin yüksek olmasında, mutlak konumlardan daha çok ağırlık merkezine yakınlıkların etkili olduğu görülmektedir. Bağıntılarda gözlenen diğer bir önemli husus da, nokta sayısı arttıkça güvenirlik değerinin artacağıdır. Ancak özdeş nokta sayısının arttırılması da, bu noktaların ağın ağırlık merkezinde kümelenmesi de dönüşüm pratiğini olanaksızlaştırmaktadır. Dönüşümün niteliğinin arttırılabilmesi için bir

yandan özdeş nokta sayısı, diğer yandan da bu noktaların ağ içerisindeki dağılımı için uygulanabilir öneriler geliştirilmesi gerekmektedir.

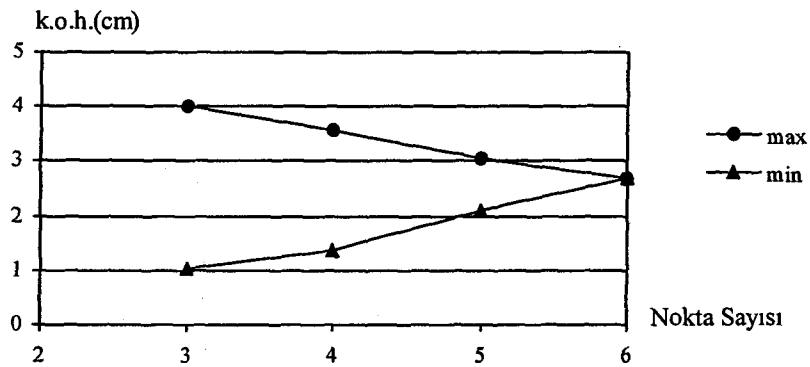
(3.91) ve (3.95) eşitliklerinden yararlanarak, güvenilirlik ölçütü r ve ölçülerin düzeltmeleri v arasında;

$$v = -r l \quad (5.2)$$

bağıntısı yazılabilir. Bu bağıntı, düzeltmelerle güvenilirlik ölçütleri arasındaki ilişkinin doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, bir güvenilirlik sınır değeri önerebilmek için, yine düzeltmelerle ilgili bir büyüklük olan karesel ortalama hata kavramından yararlanılabilir. Bu amaçla, İGA-96, ZGA-96, AGTA ağlarının dönüşüm hesabında sıfırdan farklı güvenilirlik değeri üreten minimum özdeş nokta sayısından başlayarak, mevcut özdeş nokta sayısına kadar olası tüm alternatif kombinasyonlarıyla iki boyutlu dönüşüm hesabı gerçekleştirilmiş ve bu dönüşümlerden elde edilen m_0 değerlerinin min. ve max. sınır değerleri Şekil 5.10, 11 ve 12’de gösterilmiştir.

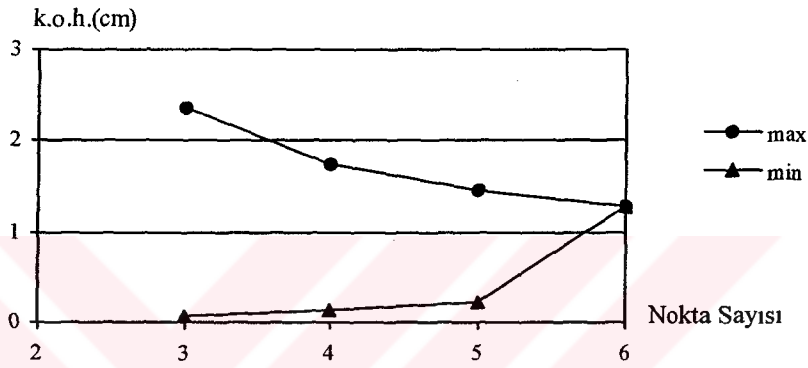


Şekil 5.10 AGTA'daki alternatif çözümlerin k.o.h'ları



Şekil 5.11 ZGA-96'daki alternatif çözümlerin k.o.h'ları

Bu şekillerin tamamında, nokta sayısı azaldıkça k.o.h'ların min. ve max. değer aralıklarının giderek arttığı dikkat çekmektedir. Bu aralık 3 noktalı dönüşümlerde maksimum seviyededir ki, bu elde edilen sonuçların tutarlılığının da minimum seviyede olacağı anlamına gelir. Min. ve max. değer aralığı nokta sayısı arttıkça daralmaktadır. Daha açık bir ifadeyle, nokta sayısı azaldıkça çözümler nokta bağımlı olmakta, nokta sayısı arttıkça bu bağımlılık azalmaktadır. Ancak arazi koşullarında özdeş nokta bulabilmenin zorlukları düşünüldüğünde 4 noktalı çözümler makul karşılanabilir.



Şekil 5.12 İGA-96'da alternatif çözümlerin k.o.h'ları

Bu durumda belirlenecek güvenilirlik kriteri 3 noktalı çözümlere izin vermemelidir. 3 noktalı dönüşümde sağlanabilecek en ideal geometri eş kenar üçgendir. İki boyutlu dönüşümde 3 noktalı çözüm için serbestlik derecesi 2, böylesi bir geometriye sahip 3 noktanın her bir koordinatının serbestlik derecesine katkı payı ise ≈ 0.34 'tür. O takdirde, iki boyutlu dönüşümde üç noktalı çözüme olanak tanımamak için, güvenilirlik sınır değeri 0.35 olarak kabul edilebilir. Koordinatlar noktalara ait olduklarından, koordinat güvenirliliği yerine nokta güvenirliliğinden söz etmek yerinde olur. Bu durumda, her bir noktanın iki koordinat bileşeni bulunduğundan, nokta bazında güvenilirlik ölçütü 0.70 olacaktır.

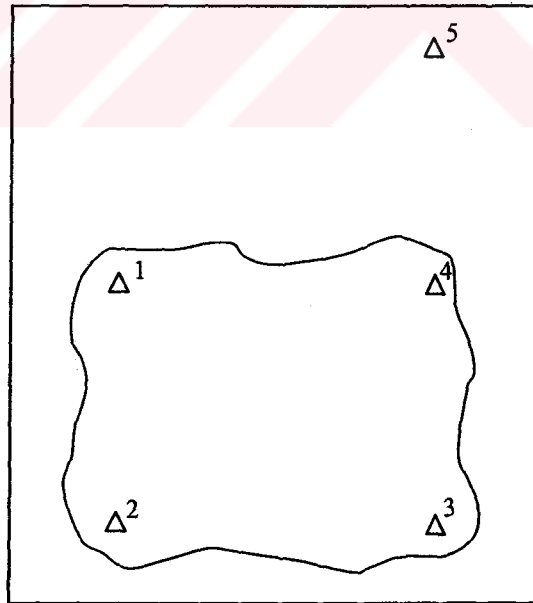
Üç boyutlu dönüşümde durum, iki boyutludakinden farksızdır. 3 noktalı çözüm için serbestlik derecesi, iki boyutlu dönüşümde olduğu gibi yine 2'dir. Bu durumda, üç noktalı çözümü dışarıda bırakacak güvenilirlik sınır değeri, üç boyutlu dönüşüm için de nokta bazında 0.70 olarak alınabilir.

5.6.2 Özdeş noktaların dağılımı

Yukarıda belirlenen güvenilirlik sınır değerinden yararlar, iki ve üç boyutlu dönüşümde, nokta sayısı ve dağılımının ölçülerin serbestlik derecesine etkisinin araştırılabilmesi için, yaklaşık 25-30 km²'lik bir çalışma alanının içerisinde dönüşüm için ideal dağılımlı 4 nokta ile bu kümeden 10 km uzakta 1 nokta olmak üzere, 1. sistem projeksiyon koordinatları Tablo 5.3'de verilen Şekil 5.13'deki gibi bir sanal ağ tasarlanmıştır. Bu sanal ağın, üç boyutlu dönüşüm için esas olan kartezyen dik koordinatları, noktaların elipsoidal yükseklikleri sıfır kabulüyle, projeksiyon koordinatlarından çevrilerek bulunmuştur.

Tablo 5.3 Sanal ağın projeksiyon koordinatları

Nokta No	Sağa (m)	Yukarı (m)
1	434486.876	4432738.386
2	434486.876	4427738.386
3	439486.876	4427738.386
4	439486.876	4432738.386
5	439486.876	4442738.386



Şekil 5.13 Sanal ağ

Bu ağ üzerinde, özdeş noktaların 3'lü, 4'lü kombinasyonlarını ve 5 noktanın tamamını içeren alternatif dönüşümler ele alınmış ve dönüşüme ölçü olarak giren her koordinat bileşeni için güven ölçütleri hesaplanmıştır (Tablo 5.4, 5.5).

Tablo 5.4 2 boyutlu dönüşümde değişik nokta kombinasyonları için ölçülerin güven ölçütleri

Nokta Komb.	Sıraya göre nokta koordinatlarının güven ölçütleri (r_x, r_y)
123	0.25 0.25 0.50 0.50 0.25 0.25
125	0.62 0.62 0.31 0.31 0.06 0.06
134	0.25 0.25 0.25 0.25 0.50 0.50
135	0.56 0.56 0.31 0.31 0.12 0.12
145	0.40 0.40 0.50 0.50 0.10 0.10
234	0.25 0.25 0.50 0.50 0.25 0.25
345	0.29 0.29 0.64 0.64 0.07 0.07
1234	0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50
1235	0.71 0.71 0.57 0.57 0.57 0.57 0.14 0.14
1245	0.70 0.70 0.43 0.43 0.70 0.70 0.17 0.17
1345	0.64 0.64 0.45 0.45 0.73 0.73 0.18 0.18
2345	0.52 0.52 0.59 0.59 0.74 0.74 0.15 0.15
12345	0.75 0.75 0.61 0.61 0.64 0.64 0.78 0.78 0.22 0.22

Tablolar incelendiğinde, ağ 5 nolu nokta dışında iyi bir geometriye sahip olmasına karşın, gerek iki gerekse üç boyutlu dönüşümde 3'lü nokta kombinasyonlarındaki ölçüler, belirlenen güvenilirlik sınırının altında kalmaktadır. Bu üç boyutlu dönüşüm için daha da belirgindir. 4 noktalı çözümlerde ise, homojen dağılımlı noktalar seçildiğinde tüm ölçüler söz konusu sınır değeri geçmektedir. Dikkat çekici bir diğer konu ise; nokta sayısı arttıkça sınır değerinin altında kalan ölçülerin oranının azalmasıdır. Diğer bir deyişle, çözümün nokta dağılımına bağımlılığı azalmaktadır.

Yukarıdaki değerlendirmeler sanal bir ağ üzerinde gerçekleştirilen incelemeler sonucunda yapılmıştır. Gerçekte böyle ideal bir ağla karşılaşmak olası değildir. Bu nedenle benzer incelemeler, İGA-96, ZGA-96, AGTA ağlarıyla da

gerçekleştirilmiştir. Bunlardan elde edilen sonuçlar da sanal ağ için yapılan değerlendirmeleri doğrulamaktadır.

Tablo 5.5 3 boyutlu dönüşümde değişik nokta kombinasyonları için ölçülerin güven ölçütleri

Nokta Komb.	Sıraya göre nokta koordinatlarının güven ölçütleri (r_x, r_y, r_z)
123	0.14 0.21 0.15 0.29 0.42 0.29 0.14 0.21 0.15
125	0.36 0.52 0.37 0.18 0.26 0.18 0.04 0.05 0.04
134	0.14 0.21 0.15 0.14 0.21 0.15 0.29 0.42 0.29
135	0.33 0.47 0.33 0.18 0.26 0.18 0.07 0.10 0.07
145	0.23 0.33 0.23 0.29 0.42 0.29 0.06 0.08 0.06
234	0.14 0.21 0.15 0.29 0.42 0.29 0.14 0.21 0.15
345	0.20 0.08 0.29 0.45 0.19 0.64 0.05 0.02 0.07
1234	0.39 0.46 0.40 0.40 0.46 0.40 0.40 0.46 0.40 0.40 0.46 0.40
1235	0.60 0.67 0.60 0.52 0.55 0.52 0.35 0.48 0.36 0.10 0.12 0.10
1245	0.57 0.65 0.57 0.42 0.43 0.42 0.45 0.60 0.45 0.14 0.16 0.14
1345	0.37 0.53 0.37 0.38 0.43 0.38 0.69 0.71 0.69 0.14 0.16 0.14
2345	0.30 0.43 0.30 0.46 0.54 0.47 0.70 0.73 0.70 0.12 0.13 0.12
12345	0.62 0.70 0.63 0.54 0.58 0.54 0.51 0.59 0.51 0.72 0.76 0.72 0.18 0.21 0.18

Uygulamada bu tür yerel ağların dönüşümü için, işin ekonomisi gözönünde tutularak, güvenilir çözüm sağlayan yeter sayıda özdeş nokta seçmek yerinde olacaktır. Bu bağlamda, söz konusu üç ağda güvenilir çözüm sağlayan uygun dağılımlı yeter sayıda nokta kombinasyonları belirlenmiştir. Buna göre iki boyutlu dönüşüm için, İGA-96'da 1234-1245-1246-1345-1346-1456, AGTA'da 1245-1246-1256-2346-3456-3457-3567-4567, ZGA-96'da 1234-1236-1245-1246-1256, üç boyutlu dönüşüm için, İGA-96'da 1245-1246-1345, AGTA'da 1236-1245-1246-1247-1256-2345-2346-2356-2457-2567-3456-3457-3567-4567, ZGA-96'da 1234-1246-1256 nokta grubu seçeneklerinden herhangi biri yeterli güvenilirliğe sahiptir. Dikkat edilirse bu alternatif çözümlerden hiçbirinde 4'ten az nokta bulunmamaktadır.

Dönüşüm hesabında belirlenecek parametrelerin, dönüşüm bölgesinin genelini temsil edecek güvenilir parametreler olması son derece önemlidir. Yeter sayıda olmayan

ve/veya bölgeye uygun dağılmamış noktalardan gerçekleştirilecek çözümlerde, uyumsuz ölçülerin tespiti ve bölge için geçerli parametrelerin belirlenebilmesi mümkün olmayabilir. Böylesi bir çözümden elde edilen parametrelerle dönüştürülecek koordinatlar da, beklenen doğrulukları sağlamayabilir.

Dönüşümün olabildiğince fazla sayıda özdeş noktayla gerçekleştirilmesi kuşkusuz en güvenilir çözümü sağlar. “Ancak, minimum nokta sayısı ne olmalıdır?” sorusu karşısında, tek bir 3 derecelik dilime sığacak kadar alana yayılmış küçük yerel ağlarda her iki dönüşüm türü için, üç noktayla gerçekleştirilecek çözümün güvenilirliğinin kuşkulu olacağı söylenebilir. Buna karşın uygun dağılımda seçilen 4 nokta yeterli güvenilirlik sağlayabilecektir. Eğer uygun dağılımda 4 nokta bulunamıyorsa, arazide yeni noktalar aranmalı, gerekirse güvenilir çözüm sağlayıncaya kadar özdeş nokta sayısı artırılmalıdır. Bu amaçla, gerçekleştirilecek dönüşüm türüne göre, (3.95), (3.98) ve (3.104) eşitliklerinden biriyle, büro aşamasında uygun nokta sayısı ve dağılımını sağlayan özdeş nokta kombinasyonları önceden belirlenebilir.

Dönüşümde güvenilirliğin bir ifadesi olarak serbestlik derecesi bileşeni r_1 nin büyük değerlerde elde edilmesi, dönüşüm parametrelerinin güvenilirliğinden başka, özdeş noktaların uyum testlerinde, testin daha duyarlı olması sonucunu da birlikte getirir. Böylece sonuçlar kaba hata ve model hatlarından arındırılmış olur.

5.7 Dönüşüm Sonuçlarının İyileştirilmesi Üzerine Araştırmalar

İGNA-2000 ağında, GPS ve ülke sistemi koordinatları arasında gerçekleştirilen benzerlik dönüşümleri sonucu elde edilen k.o.h.'lar, yükseklikleri de içeren üç boyutlu benzerlik dönüşümünde $\pm 0.169\text{m}$, yükseklik olmaksızın gerçekleştirilen üç boyutlu benzerlik dönüşümünde $\pm 0.070\text{m}$, projeksiyon düzleminde iki boyutlu dönüşümde $\pm 0.0852\text{m}$ 'dir. Yalın dönüşüm yöntemlerinden elde edilen bu doğruluklar, İGA-96, AGTA ve ZGA-96 örneklerindeki gibi küçük ağlara oranla oldukça düşük kalmaktadır.

İGNA-2000 ağı, geniş bir alana yayıldığından özdeş nokta olarak çeşitli dereceden noktalar bulundurmaktadır. Bu noktaların bir kısmı ülke nirengi ağının 1. ve 2. derece noktalarıyken, bir kısmı da daha sonraki yıllarda bunlara dayalı olarak belirlenen ve Metropolitan Nirengi Ağı olarak da adlandırılan 3. derece sıklaştırma

noktalarıdır. Ülke sisteminde üretilen nokta koordinatlarının üretim teknolojisindeki farklılıkların dönüşüm hesabı sonrası hesaplanan düzeltmelere yansması beklenen bir sonuçtur. Nitekim özdeş noktaların düzeltmeleri arasında böyle bir korelasyon gözlenmektedir (Ek G).

Bu nedenlerle, İGNA-2000 üzerinde klasik benzerlik dönüşümü yöntemlerinin dışında, yukarıda tanımları yapılan Regresyon, Kollokasyon ve Filtreleme yöntemleri de uygulanarak dönüşüm sonuçlarının nokta gruplarının ortak özelliklerinden yararlanarak iyileştirilmesi yoluna gidilmiştir.

Regresyon yöntemi uygulanırken, çıkış verisi olan coğrafi koordinatlar, İstanbul için $\varphi_0=40^\circ$, $\lambda_0=28^\circ$ başlangıcına kaydırılmış, ölçek faktörü $k=100/\rho^\circ$ alınmış, $\Delta\varphi$ ve $\Delta\lambda$ 0".001 biriminde değerlendirmeye katılmışlardır. Ölçüler, yani $\Delta\varphi$ ve $\Delta\lambda$ (4.1) ve (4.2)'deki ikinci dereceden polinomlarla ifade edilerek, A_i ve B_i katsayıları 31 noktadan elde edilen 62 denklemle en küçük kareler yöntemiyle hesaplanmışlardır. Elde edilen katsayılara signifikans testleri uygulanmış, bunlar arasında A_2 , B_1 , B_3 , B_4 parametrelerinin sıfır kabul edilebileceği görülmüştür (Koch, 1999). Geriye kalan parametreler Tablo 5.6.'da standart sapmalarıyla gösterilmiştir.

Tablo 5.6 İGNA-2000 için regresyon yöntemiyle belirlenen parametreler

Param.		Param.	
Ao	-185.814±14.8	Bo	-167.687±2.2
A1	85.632±15.5	B2	38.634±2.8
A3	-9.166±3.9	B5	3.468±0.9
A4	-2.225±0.6		
A5	0.787±0.4		
$m_0(m)$	±0.051	$m_0(m)$	±0.116

Bölüm 4.3 ve 4.4'de matematik esasları açıklanan kollokasyon ve filtreleme yöntemlerinde $I+n=Bx+s$ ifadesindeki deterministik terim Bx Bölüm 3'de açıklanan yalın dönüşüm bağıntılarına karşılık gelmektedir. n ve s ise çakışma artıklarının modellenmesidir. Kollokasyon ve filtreleme yöntemlerinde, deterministik terim Bx için yükseklikli ve yüksekliksiz üç boyutlu dönüşüm, projeksiyon düzleminde iki

boyutlu dönüşüm, sadece ötelemelerin sözkonusu edildiği dönüşüm gibi çok sayıda yaklaşım ele alınabilir. Bunların çakışma artıklarının modellenmesi sırasında, her koordinat bileşeni ile ilgili korelasyon sistematığının farklı olabileceği düşüncesiyle (4.34) ile verilen Hirvonen korelasyon fonksiyonu için tek bir q_0 değeri yerine, her bir eksene karşılık üç boyutlu dönüşümde q_x , q_y , q_z olmak üzere üç, iki boyutlu dönüşümde q_x , q_y olmak üzere iki ayrı değer araştırılmıştır. Kollokasyon ve filtrelemede değişik yaklaşımlar için bulunan q değerleri Tablo 5.7 ve 5.8' de verilmiştir.

Tablo 5.7 İGNA-2000 için 3B dönüşüm ile hesaplanan q değerleri

Hirvonen Fonk. Değeri (q)	Kollokasyonla 3B Dönüşüm		Filtrelemeyle 3B Dönüşüm	
	$H=h_{ED}$	$h=0$	$H=h_{ED}$	$h=0$
q_x	1	57	6	46
q_y	26	21	24	17
q_z	17	9	15	9

Tablo 5.8 İGNA-2000 için 2B dönüşüm ile hesaplanan q değerleri

Hirvonen Fonk. Değeri (q)	Kollok. 2B Dön.	Filtre. 2B Dön.
q_x	9	9
q_y	25	19

Seçilen dönüşüm modeli kollokasyon yönteminin içerisinde uygulanmış ve bulunan parametreler, yalın benzerlik dönüşümünden elde edilen sonuçlarla birlikte Tablo 5.9 ve 5.10'da verilmiştir. Filtrelemede ise yalın benzerlik dönüşümünden bulunan parametreler kullanılarak trend ayrılmış, çakışma artıkları ikinci bir aşamada filtrelenmiştir.

Tablo 5.9 ve 5.10 incelendiğinde kollokasyonun deterministik kısmı (trend) ile yalın dönüşümün parametreleri arasında küçük sayılabilecek farkların ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum kollokasyon ile filtreleme uygulamalarındaki hesap hacmi

karşılaştırıldığında ve çakışma artıklarındaki değişimin gözlenmesindeki yarar düşünüldüğünde, pratikte filtrelemenin kollokasyona tercih edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 5.9 Kollokasyon ve yalın 3B benzerlik dönüşümü sonuçları

Param.	Yalın Dönüşüm		Kollokasyonla Dönüşüm	
	H=h _{ED}	h=0	H=h _{ED}	h=0
t _x (m)	87.848±0.03	112.226±0.01	87.849±0.03	112.264±0.04
t _y (m)	91.051±0.03	104.505±0.01	91.016±0.07	104.478±0.02
t _z (m)	127.051±0.03	151.341±0.01	127.036±0.06	151.339±0.02
ε _x (")	-2.968±0.21	-1.815±0.09	-3.031±0.25	-1.814±0.10
ε _y (")	0.914±0.51	2.943±0.21	1.033±0.53	2.973±0.22
ε _z (")	0.536±0.21	-1.742±0.09	0.478±0.21	-1.716±0.11
k (ppm)	0.846±0.77	6.661±0.32	0.418±1.00	6.167±0.42
m ₀ (m)	±0.169	±0.070	±0.117	±0.050

Tablo 5.10 Kollokasyon ve yalın 2B benzerlik dönüşümü sonuçları

Parametre	Yalın 2B Benzerlik Dönüşümü	Kollokasyonla 2B Ben. Dönüşümü
t _x (m)	151.783±0.01	154.222±1.80
t _y (m)	67.701±0.01	67.720±1.55
a (ppm)	6.799±0.39	6.272±0.39
b (ppm)	-6.587±0.39	-6.523±0.34
m ₀ (m)	±0.085	±0.045

İGNA-2000’de 5 farklı yöntemle 10 ayrı dönüşüm gerçekleştirilmiştir. Dönüşümlerin bir kısmı kartezyen koordinatlar, bir kısmı projeksiyon koordinatları, bir tanesi de coğrafi koordinatlar üzerinden gerçekleştirildiğinden, doğrudan doğruya karşılaştırılabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle, tüm yöntemlerle dönüştürülmüş koordinatlar, öncelikle elipsoidal coğrafi koordinatlara çevrilmiş, özdeş noktalara ait referans koordinatlardan farkları alınmış ve bu farklar meridyen doğrultusunda ve meridyene dik doğrultuda bileşenler olarak hesaplanmıştır. Böylece elde edilen çakışma artıklarının daha kolay yorumlanabilmesi için çizimsel olarak, vektörlerle

EK G’de gösterilmiştir. Ayrıca dönüşüm sonuçları karesel ortalama hataları ile Tablo 5.11’de listelenmiştir.

Tablo 5.11 İGNA-2000’de farklı yöntemlerle elde edilen k.o.h’lar

Param.	2B Fil.	3B Kol. H=h _{ED}	3B Filt. H=h _{ED}	2B Kol.	3B Fil. h=0	3B Kol. h=0	Regr.	3B Ben. H=h _{ED}	2B Ben.	3B Ben. h=0
m ₀ (m)	0.054	0.054	0.054	0.056	0.056	0.057	0.084	0.103	0.104	0.104

Buna göre, en iyi dönüşümler filtreleme ve kollokasyon yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Klasik benzerlik dönüşümlerine oranla, regresyon yöntemi küçük bir iyileştirme sağlarken, kollokasyon ve filtreleme yöntemlerinde iyileştirme m₀’ı yarıya düşürecek biçimde gerçekleşmektedir. Kollokasyon ve filtrelemenin sonuçlar üzerindeki etkisi EK G’de verilen çakışma artıklarının bileşkesi $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ ’lerin incelenmesi ile daha ayrıntılı olarak görülebilir. Örneğin Şekil G.1’deki h=0 yaklaşımıyla yalın 3 boyutlu dönüşüm ile Şekil G.4’deki filtreleme sonuçları karşılaştırıldığında vektörlerin yönlerinin aynı kaldığı, buna karşın büyüklüklerin yarılanarak bir iyileşme sağlandığı görülmektedir. Keza Şekil G.7’den kollokasyonda da durumun böyle olduğu görülüyor. Ancak relatif olarak daha az iyileşmenin sağlanabildiği ağın orta kesiminde, Hirvonen fonksiyonu ile belirlenen analitik korelasyon değerlerinin etkili olmadığı söylenebilir. Bu durum, ağın bu kesiminde kümelenen ülke ağı noktalarından ayrı karakterli ağ noktaları ile açıklanabilir. Gerçekten de bu kesimde metropolitan nirengi ağından alınan özdeş noktalar çoğunluktadır ve bu noktalar ülke nirengi ağı noktalarından ayrı stokastik özelliklere sahiptir. Şekil G.2, G.5 ve G.8’in incelenmesiyle H=h_{ED} yaklaşımıyla gerçekleştirilen dönüşümler için de aynı yorumlara ulaşılabileceği görülmektedir. Dönüşüm bölgesinin sınırları büyüdükçe, örneğin ülke genelini kapsayan bir dönüşümde, yalın benzerlik dönüşümlerinin doğruluklarının daha da düşeceği açıktır. Burada gerçekleştirilen uygulamalar, filtreleme ve kollokasyon yöntemlerinin, daha üst düzey doğruluk gerektiren büyük alanlara yayılmış projelerde, yalın benzerlik dönüşümlerine göre daha tatminkar sonuçlar sağlayacağını göstermektedir. Ancak bunların kullanımındaki hesap yoğunluğu göz önünde bulundurulduğunda, uygulamacılar tarafından benimsenmeleri zor görünmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, birbirine dönüşümleri sözkonusu edilen jeodezik ağlardan, ülke nirengi ağı bir Relatif Jeosentrik Elipsoidal Koordinat Sistemine, GPS ağları ise Mutlak Jeosentrik Elipsoidal Koordinat Sistemlerine dayalıdır. Böyle iki koordinat sistemi arasında en temel dönüşüm Üç Boyutlu Benzerlik Dönüşümüdür. Ancak çoğunlukla ülke ağlarından kaynaklanan ve daha önceki bölümlerde dile getirilen nedenlerle üç boyutlu dönüşümlerde çeşitli problemlerle karşılaşilmektedir. Bu problemlerin çoğunun kaynağı olarak ülke ağına ait yükseklikler görülmektedir. Bu amaçla Bölüm 5.2’de gerçekleştirilen analizler, koordinat bileşenlerinden yüksekliğin, dönüşüm parametreleri üzerinde gerçekten de önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Üç boyutlu benzerlik dönüşümünün 7 parametresinin 5’inde yükseklik birinci derecede etkiliyken, boylam Z eksenini yönündeki dönüklükte, enlem ölçeğinde baskındır. Bu durum, ülke ağına ait yükseklik bilgilerini, yatay konum koordinatlarına göre düşük doğrulukta olmaları ve jeoit ondülasyonlarının ya yeterli doğrulukta olmamaları veya tamamen eksikliği gibi nedenlerle, dönüşüm parametrelerinin yerel değişimler göstermesinde öne çıkan bir faktör konumuna getirmektedir.

Yükseklik bilgisinin olumsuz etkisinden kaçınmak amacıyla, yükseklik bilgileri kullanılmaksızın üç boyutlu benzerlik dönüşümleri de gerçekleştirilmektedir. Ancak bu yolla elde edilen sonuçların, yükseklikli dönüşümlerden her zaman daha iyi sonuç verdiği genellemesini yapabilmek mümkün değildir. Örnek olarak ZGA-96’da bu yolla olumlu sonuçlar elde edilirken, İGA-96, AGTA ve son olarak da İGNA-2000 ağları için böyle bir yorum yapılamaz (Ek D).

Yükseklikteki hataların, koordinatlara etkisini ortaya koyabilmek için, Bölüm 3.2.1.4’de Üç Boyutlu Dönüşümde Hata Yayılması eşitlikleri çıkarılmıştır. Amaç; yatay konum koordinatlarına etkileri araştırmak olduğundan, dönüştürülmüş kartezyen koordinatlara hata yayılmasıyla yetinilmemiş, buradan dönüştürülmüş elipsoidal coğrafi koordinatlara geçiş de ele alınmıştır. Çıkarılan bu bağıntılarda,

özdeş noktaların özdeş noktaların ağırlık merkezine uzaklığının ve bundan daha önemlisi dönüklüklerin hata yayılmasında etkili olduğu gözlenmiştir. Bu bağıntılar bir başlangıç varyans-kovaryans matrisi seçilerek, İGA-96, AGTA ve ZGA-96 ağlarına uygulanmış, elde edilen sonuçlardan dönüştürülmüş coğrafi koordinat bileşenlerinin korelasyon matrisleri hesaplanmıştır (Ek E). ZGA-96 dışında elde edilen sonuçlar, koordinatlar arasındaki korelasyonların oldukça düşük olduğunu göstermektedir. ZGA-96 ağından bulunan dönüşüm parametreleri incelendiğinde, dönüklüklerin oldukça büyük olduğu görülmektedir. Oysa, sözkonusu iki koordinat sistemi için iki basamaklı rakamların altında değerler beklenilir. Bu değerlendirmeler çerçevesinde, üç boyutlu benzerlik dönüşümünde hata yayılması için şunlar söylenebilir: Dönüştürülmüş koordinat bileşenleri arasındaki korelasyonlarda ve hata yayılmasında belirleyici etken dönüklük parametreleridir. Dönüklükler büyüdükçe, korelasyon, dolayısıyla da hata yayılması artar. Eğer yükseklik bilgisinin kullanılması sonucu elde edilen dönüklük parametreleri, iki koordinat sistemi için beklenenin ötesinde büyük değerlere ulaşırsa, yükseklik hataları dönüştürülmüş yatay konum koordinatlarını bozacağından, yükseklikli çözüm tercih edilmelidir. Aksi takdirde, gerçek geometriye daha uygun olduğundan, bu nedenle de daha tutarlı dönüşüm parametreleri elde edileceğinden, yükseklikli çözüm kullanılmalıdır. Bunu test edebilmenin tek yolu her iki yaklaşımla da dönüşümü gerçekleştirip, sonuçları karşılaştırmaktır.

Üç boyutlu dönüşümde karşılaşılan diğer problem, uygulamada en sık kullanılan Bursa-Wolf ve Molodensky-Badekas Modelleri'nden kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere, her iki modelle ötelemeler dışında elde edilen tüm sonuçlar birbirinin aynıdır. Ötelemeler arasındaki farklar ise, son derece büyüktür ve bunlardan sadece birine ait olan gerçekçi olabilir. Bölüm 5.4'de gerçekleştirilen uygulamalar, Molodensky-Badekas'tan bulunan ötelemelerin dönüklüklerden bağımsız olmaları nedeniyle daha gerçekçi olduğunu ortaya koymuştur. Uluslararası literatürde verilen değerlerde bunu doğrulamaktadır (DMA, 1988). Üretilen parametreler, başka uygulamacılar tarafından çok çeşitli amaçlarla kullanılabilirler. Bu nedenle sadece dönüştürülmüş koordinatlara değil, dönüşüm parametrelerinin doğruluğuna da önem verilmelidir. Bu amaçla uygulamada Molodensky-Badekas modelinin kullanılması yerinde olacaktır.

Sadece yatay konum koordinatlarının dönüştürülmesi amaçlandığında ise, projeksiyon koordinatlarıyla gerçekleştirilecek iki boyutlu benzerlik dönüşümü,

sağladığı doğruluk bakımından üç boyutlu benzerlik dönüşümüne iyi bir alternatif oluşturulabilir. Fakat projeksiyon koordinatlarında dilim kısıtlaması vardır. Bütünlüğün sağlanabilmesi için, tüm koordinatlar tek bir dilim orta meridyenine göre belirlenmelidir. Böyle bir durumda da, dilim orta meridyeninden uzaklaştıkça, projeksiyon deformasyonları artacağından, dönüşüm doğruluğunun azalacağı düşünülebilir. Ancak gerek İstanbul ağında, gerekse daha geniş bir alandaki durumu gözlemlemek için her bölgeden birer nokta alınarak oluşturulan özel ağda gerçekleştirilen dönüşümler, en az üç boyutlu dönüşümdekiler kadar iyidir. Bu bağlamda, yükseklikler kullanılmak istenmediğinde, iki boyutlu benzerlik dönüşümü, üç boyutlu dönüşümün yerine rahatlıkla kullanılabilir.

Dönüşüm hesabında karşılaşılan en önemli problemlerden birisi de, arazi koşullarında özdeş nokta bulmanın zorluğudur. Bu nedenle çok çeşitli uygulamalarla karşılaşılmaktadır. Oysa dönüşüm hesabı bir dengeleme problemidir ve bu dengelemenin ölçüleri de nokta koordinatlarıdır. Düşük güvenilirlikli ölçülerle gerçekleştirilecek dönüşümün doğruluğuna da güvenilemez. Güvenilir bir dönüşüm için, çalışma alanına iyi dağılmış uygun sayıda özdeş noktaya ihtiyaç vardır. Bölüm 5.6'da gerçekleştirilen detaylı analizler sonucunda iki ve üç boyutlu dönüşümler için, bir noktanın diğer noktalar tarafından kontrol edilebilirliğinin bir ölçütü olarak nokta bazında 0.70 güvenilirlik sınır değeri tespit edilmiştir. Bu sınır değere göre üç noktayla gerçekleştirilecek dönüşümler güvenilirlik sınırının altında kalacaktır. Üç derecelik bir dilime sığacak kadar küçük alanlarda, uygun dağılımlı dört nokta ise yeterli güvenilirliği sağlayabilir. Güvenirlik değerlerinin gerçeği yansıtabilmesi için, seçilecek özdeş noktaların belirlediği alanın dönüştürülecek noktaların belirlediği alanı büyük oranda çevrelemesine de dikkat edilmelidir.

Daha üst seviye doğruluk beklentileri için gerçekleştirilen uygulamalarda, filtreleme ve kollokasyonla, yalın benzerlik dönüşümlerine oranla iki kat daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bu yöntemin matematiksel modelinin karmaşıklığı ve küçük çaplı yerel ağlarda önemli bir getirisi olmaması gibi nedenlerle, uygulamacılar tarafından benimsenmesi zor görünmektedir. Bu iki yöntem klasik benzerlik dönüşümlerine oranla daha tatminkar doğruluklar sağlayacağından, ülkenin tamamını veya önemli bir kısmını kaplayan ve akademik yaklaşımlar gerektiren çalışmalarda daha çok tercih edilebilir. Filtrelemenin kollokasyondan üstünlüğü hesap hacminin azlığı ve yalın dönüşümlerden arta kalan çakışma artıklarını modellemesidir. Regresyon

yöntemi ise, klasik dönüşüm yöntemlerine oranla küçük de olsa bir iyileşme sağlasa da, bu miktar onun diğer yöntemlere tercih edilebilmesi için yeterli görülmemektedir.

Bu çalışmanın sonunda Ülke ağlarından GPS ağlarına dönüşüm için parametreler hesaplanmış ve bunlar Ek H'da verilmiştir. Bilindiği üzere, ülkemizde gerçekleştirilen uygulamalar halen, GPS ağlarının ülke ağlarına dönüştürülmesi şeklinde olmaktadır. Oysa GPS ağları, ülke ağlarına oranla daha doğruluklu ve homojen yapıda ağlardır. Bu yapıdaki ağlar kendisinden daha az doğruluklu ülke nirengi ağlarına dönüştürüldüğünde, arazide elde edilen doğruluğun ve gelişmiş bir teknoloji kullanmanın önemi kalmamaktadır. Gelişen teknolojinin, gizlilik olayını ortadan kaldırdığı bir dönemde, artık global bir koordinat sistemiyle çalışmanın kolaylıkları gözönünde bulundurulmalı, üst seviye ağlarla eski ağların yamanmasına çalışmak yerine, tam tersi bir yol izleyerek eski ağların iyileştirilmesine çaba gösterilmelidir. İlk planda böyle bir uygulamanın getireceği pek çok sıkıntılarla karşılaşılabilir, özellikle kadastro ve imar haritalarında yılların yanlışlıkları ortaya çıkabilir. Ancak bir süre sonra, herkesin gönül rahatlığıyla kullanabileceği doğruluğuna güvenilir, homojen, kontrol edilebilir, kolaylıkla iyileştirilebilir ve yenilenebilir yeni dayanak noktalarına kavuşulmuş olacaktır. Bunun için gerekli ilk adım atılmış Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) oluşturulmuştur (HGK, 1999). Yeniliğin ve gelişmenin cesaret ve atılım gerektirdiği gözden uzak tutulmayarak, ilgili kurumlar böyle bir değişim için üzerlerine düşen alt yapı hazırlıklarını tamamlayarak, çağdaş teknolojiye geçişi sağlamalıdır.

KAYNAKLAR

- Aksoy, A., 1985, Kısa Tarihçe ve Modern Ülke Ağlarından Örnekler, *Ülke Nirengi Ağları ve Türkiye Nirengi Ağı Konferanslar Dizisi*, İstanbul, Mart 27-Mayıs 22.
- Aksoy, A. ve Güneş, İ.H., 1990. Jeodezi I, İ.T.Ü Matbaası, İstanbul.
- Aksoy, A., Ayan, T., Deniz, R., 1998. Global, Bölgesel ve Ülke Jeodezi Ağları Hakkında, *HKMO Dergisi*, 84, 6-16.
- Aksoy, A., Ayan T., Çelik, R. N., Demirel, H., Deniz, R., Gürkan, O., 1999. Güncel Gelişmeler Işığında Mekansal Bilgi Sistemleri İçin Jeodezik Altyapı ve Problemler, *Harita Mühendisliğinde 50. Yıl Semineri*, İstanbul, Mayıs 28.
- Aksoy, A., Ayan T., Demirel, H., Öztürk, E., Ünal, T., 1989. Nirengi Ağları ve Türkiye'deki Sorunlarına Genel Bakış, *Sivil Harita Mühendisliğinde 40. Yıl Sempozyumu*, İstanbul, Ekim 11-13.
- Arslan, E.; 1987. Ülke Nirengi Ağlarında İki ve Üç Boyutlu Dengeleme Modellerinin Uygulamalı Karşılaştırılması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ashkenazi, V., 2000, Galileo Challenge and Opportunity, *Galileo's World*, Winter 2000, 42-46.
- AUSLIG, 2000, <http://www.auslig.gov.au/geodesy/datums/smil.htm>
- Ayan, T., 1997. Jeodezik Ağların Analizi, *Ders Notları*, İ.T.Ü, İstanbul.
- Ayan, T., Çelik, R. N., Alanko, G., 1997a. Densification of National Network Using GPS Techniques in Izmir, *Second Turkish-German Joint Geodetic Days*, Berlin, Germany, May 28-30, 291-298.
- Ayan, T. Çelik, R. N., Alanko, G., 1997b, İzmir Metropolitan Nirengi Ağı 96, 6. *Harita Kurultayı*, Ankara, Mart 3-7.
- Ayan, T. Çelik, R. N., Alanko, G., 1997c, GPS ile Lokal Geoid Belirleme İzmir Örneği, 6. *Harita Kurultayı*, Ankara, Mart 3-7.
- Balmino, G., 1978. Introduction to Least-Squares Collocation, Ferd Dümmlers Verlag, Karlsruhe.
- Bock, Y., 1996. GPS for Geodesy, Springer, New York.
- Bursa, M., 1966. Fundamentals of the Theory of Geometric Satellite Geodesy, Travaux de l'institut Geophysique de l'academie Tehecoslovaque des Sciences, Czechoslovakia.
- Cross, P.A., 1989. Geodetic Appreciation, *Lecture Notes*, Polytechnic of East London Department of Land Surveying, London.

- Dana, P.H.**, 1995, <http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/coordsys/coordsys.html>
- DEHA**, 1998, http://www.walis.wa.gov.au/current_walis_projects/gda/home/geobas14.htm
- Demirel, H.**, 1983. Kollokasyon, *Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Dergisi Ulsoy'a Armağan Özel Sayısı*, **45, 46, 47**, 75-98, Ankara.
- Deniz, R.**, 1993. Uydu Jeodezisine Giriş, *Ders Notları*, İTÜ, İstanbul.
- DMA**, 1988. Technical Report, Washington, USA.
- Dinter, G., Illner, M., Jager, R.**, 1997. A Synergetic Approach for the Transformation of Ellipsoidal Heights into a Standard Height Reference System, Reports of the EUREF Technical Working Group, Munich, Germany.
- Elmotaal, H. and Tokhey, M.**, 1997. The Role of the Geoid in the Coordinate Transformation, *Survey Review*, **34**, 31-40.
- Fricke, W.**, 1985. Fundamental Catalogues, Past, Present and Future, Celestial Mechanics, *Veröff. Astron.Recheninst.*, **31**, Heildelberg.
- Ghosh, S., K.**, 1979. Analytical Photogrammetry, Pergamon Press, Oxford.
- Groten, E.**, 1979. Geodesy and the Earth's Gravity Field, Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.
- Gürkan, O.**, 1983. Differential Relations Between Earth Fixed Coordinate Systems, *IAG Symp. on Geodetic Reference Systems*, Hamburg, Germany, August 15-27.
- Harsson, B. G.**, 1994. Norway national Report, *Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe*, Wettzell, Germany.
- Harvey, B. R.**, 1986, Transformation of 3D Coordinates, *The Australian Surveyor*, **33**, 105-125
- Heiskanen, W. A., Moritz, H.**, 1967. Physical Geodesy, W.H. Freeman and Company, San Fransisco.
- HGK**, 1997. Ankara GPS Test Ağı, **97/1**, Ankara.
- HGK**, 1988. Tükiye 1. Derece Yatay Kontrol Ağı'nın 1954 Yılı Dengelemesine Göre Konum Hataları, *Bilimsel Rapor*, **1**, Ankara.
- HGK**, 1999. National Report for Turkey, *Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe*, Praque, Republic of Czech.
- Hoffmann, B., Lichtenegger, H. and Collins, J.**, 1997. GPS Theory and Practice, Springer-Verlag, New York.
- IERS**, 2000. International Reference System, <http://hpiers.obspm.fr/>
- IGS**, 1998, Technical Report, Pasadena, USA.
- İTÜ**, 1996a. GPS Tekniği ile İzmir Metropolitan Nirengi Ağı Sıklaştırma ve İyileştirme Projesi, *Teknik Rapor*, İzmir.
- İTÜ**, 1996b. Zonguldak GPS Ağı Projesi, *Teknik Rapor*, İstanbul.
- İTÜ**, 2000. İstanbul GPS Nirengi Ağı Projesi, *Teknik Rapor*, İstanbul.

- King, R.W., Master, E.G., Rizos, C., Stolz, A., 1987.** Surveying with GPS, Verlag, Berlin.
- Koch, K. R., 1999.** Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, Springer-Verlag, Berlin.
- Koçak, E., 1994.** Jeodezik Astronomi, *Ders Notları*, Z.K.Ü Matbaası, Zonguldak.
- Kutoğlu, H., 1997.** WGS84 Koordinat Sisteminden Ülke Koordinat Sistemine Dönüşümler, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Krakiwsky, E.J., Wells, D.E., 1971,** Coordinate Systems in Geodesy, *Lecture Notes*, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.
- Leick, A., 1995.** GPS Satellite Surveying, John Wiley and Sons Inc., New York.
- Marchesini, C., 1992.** Comparison Between GPS and Classical Measurements on Geodetic Networks for Monitoring Ground Displacements, *VI. International FIG Symposium on Deformations*, Hanover, Federal Republic of Germany, February 24-28.
- Moritz, H., 1975.** Least-Squares Collocation, *DGK, 75*, München.
- Moritz, H., 1978.** Introduction to Interpolation and Approximation, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Öztürk, E., 1992.** Dengeleme Hesabı 3, K.T.Ü Matbaası, Trabzon.
- POSCE, 2000.** [http:// www. posc. org/ Epicentre.2_2/ DataModel/ Examplesof Usage/ eu_cs35.html](http://www.posc.org/Epicentre.2_2/DataModel/ExamplesofUsage/eu_cs35.html)
- Seeber, G., 1993.** Satellite Geodesy, Walter de Gruyter, New York.
- Şerbetçi, M., 1979.** İlk Çağlardan Günümüze Kadar Yerin Biçimi ve Büyüklüğü, KTÜ Matbaası, Trabzon.
- Şimşek, M., 1995.** Uydu Tekniklerinin Ağ Sıklaştırmasında Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Torge, W., 1991.** Geodesy, Walter de Gruyter, New York.
- USNO, 1983.** Introduction of the Improved IAU System of Astronomical Constants, Time Scales and Reference Frames into the Astronomical Almanac, Supplement to the Astronomical Almanac 1984, Washington.
- Vanicek, P. and Krakiwsky, E., 1982.** Geodesy: the Concepts, North-Holland Publishing Company, Oxford.
- Wolf, H., 1963.** Geometric Connection and Re-orientation of Three Dimensional Triangulation Nets, *Bulletin Geodesy*, **68**, 165-169.
- Wolf, H., 1977.** Zur Grundlegung Der Kollokation Method, *Zfv*, **102**, 237.
- Wolf, H., 1978.** Die Sonderfaelle Der Diskreten Kollokation, *Österr. Zsch. F. Verm.*, **314**, 132-138.
- Wahr, J., M., 1981.** The Forced Nutations of an Elliptical, Rotating Elastic and Oceanless Earth, *Geophys. J.R.Astr. Soc.*, **64**, 705-727.

EK A: UYGULAMALARDA KULLANILAN NOKTALARIN ELİPSOİDAL COĞRAFI KOORDİNATLARI

Tablo A.1 İGA-96 elipsoidal coğrafi koordinatları

Nokta No	ED50 Koordinatları			WGS84 Koordinatları		
	ϕ (°, ', ")	λ (°, ', ")	H (m)	ϕ (°, ', ")	λ (°, ', ")	h (m)
1	38 39 20.42420	26 54 20.70700	81.995	38 39 16.67960	26 54 18.96150	120.025
2	38 31 41.45290	27 17 25.54510	578.766	38 31 37.70640	27 17 23.84430	616.581
3	38 30 8.95320	27 22 51.76330	473.416	38 30 5.20660	27 22 50.07330	511.225
4	38 22 39.07640	26 47 18.38750	37.92	38 22 35.30170	26 47 16.63990	76.128
5	38 20 34.83280	27 10 51.65900	301.958	38 20 31.06560	27 10 49.95450	339.922
6	38 18 39.77780	27 5 50.21830	530.501	38 18 36.00520	27 5 48.50630	568.49

Tablo A.2 ZGA-96 elipsoidal coğrafi koordinatları

Nokta No	ED50 Koordinatları			WGS84 Koordinatları		
	ϕ (°, ', ")	λ (°, ', ")	H (m)	ϕ (°, ', ")	λ (°, ', ")	h (m)
1	41 26 30.30690	31 46 25.24900	268.3694	41 26 26.89872	31 46 23.94652	301.3876
2	41 26 4.16860	31 43 43.46080	88.27	41 26 0.76106	31 43 42.15632	121.2049
3	41 29 45.15060	31 51 20.94840	280.9867	41 29 41.74880	31 51 19.64683	313.2957
4	41 29 40.31600	31 52 59.09800	62.024	41 29 36.91395	31 52 57.79957	94.5203
5	41 31 37.19220	31 55 46.90420	205.472	41 31 33.79226	31 55 45.60837	237.5971
6	41 30 53.91090	31 53 12.92970	152.106	41 30 50.51025	31 53 11.63241	184.3058

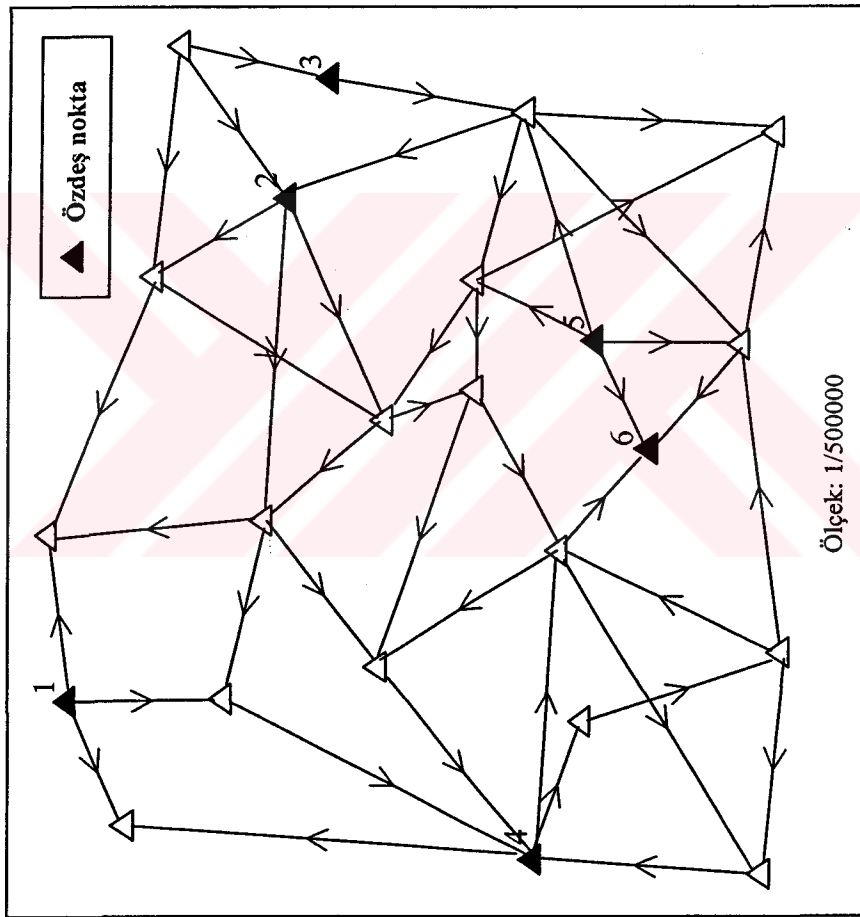
Tablo A.3 AGTA elipsoidal coğrafi koordinatları

Nokta No	ED50 Koordinatları			WGS84 Koordinatları		
	ϕ (°, ', ")	λ (°, ', ")	H (m)	ϕ (°, ', ")	λ (°, ', ")	h (m)
1	40 1 38.43577	32 13 58.34663	1282.833	40 1 34.90484	32 13 57.07565	1319.807
2	39 51 42.24395	32 9 23.00289	1570.262	39 51 38.69976	32 9 21.73213	1607.219
3	39 43 45.12383	32 11 12.88219	1594.343	39 43 41.57111	32 11 11.61871	1631.253
4	39 33 40.09027	32 12 39.47094	1743.994	39 33 36.52646	32 12 38.21553	1780.849
5	39 36 2.59533	32 23 18.96873	1348.255	39 35 59.03817	32 23 17.72571	1385.055
6	39 42 54.20658	32 27 1.42737	1581.677	39 42 50.65867	32 27 0.18503	1618.483
7	39 45 30.91977	32 15 41.80157	1549.249	39 45 27.37073	32 15 40.54284	1586.138

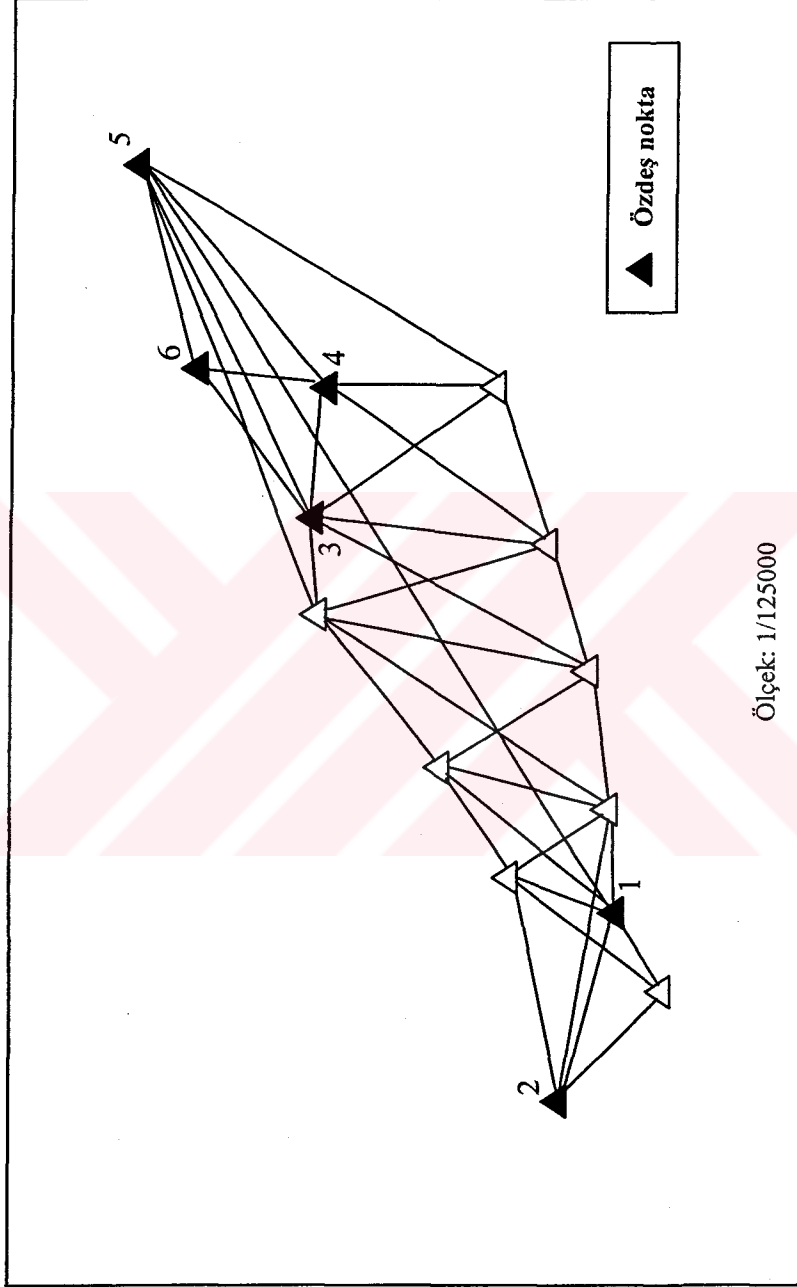
Tablo A.4 İGNA-2000 elipsoidal coğrafi koordinatları

Nokta No	ED50 Koordinatları							WGS84 Koordinatları						
	ϕ (° ' ")			λ (° ' ")			H (m)	ϕ (° ' ")			λ (° ' ")			h (m)
4004	41	5	47.57209	28	39	13.62959	183.917	41	5	44.11533	28	39	12.00659	221.143
4015	41	1	52.99648	28	45	30.27091	60.274	41	1	49.52958	28	45	28.65789	97.265
4031	40	58	33.56216	28	52	22.82561	52.766	40	58	30.09110	28	52	21.22308	89.534
4296	41	22	47.09095	28	1	52.16737	236.552	41	22	43.65887	28	1	50.50029	274.582
4304	41	8	49.98657	28	25	48.66314	325.883	41	8	46.53109	28	25	47.02885	363.468
4308	41	16	43.42796	28	23	55.19332	306.449	41	16	39.98623	28	23	53.55670	344.073
4301	41	6	56.63002	28	4	9.49618	259.510	41	6	53.17573	28	4	7.83099	297.125
4295	41	29	14.33372	28	4	25.15918	484.981	41	29	10.90724	28	4	23.49308	523.219
4020	41	8	50.53955	28	47	39.14896	241.764	41	8	47.08105	28	47	37.54903	278.827
4005	41	8	1.31816	28	39	37.90498	174.166	41	7	57.86327	28	39	36.28779	211.431
4007	41	10	38.95415	28	40	51.33366	139.976	41	10	35.50132	28	40	49.72282	177.242
4008	41	8	27.20716	28	43	8.07192	173.660	41	8	23.75026	28	43	6.46149	210.846
4009	41	6	25.60463	28	41	20.85323	181.307	41	6	22.14604	28	41	19.23889	218.510
4024	41	8	58.69579	28	51	9.29821	194.747	41	8	55.23813	28	51	7.69951	231.707
4037	41	7	40.43588	28	53	16.32164	156.451	41	7	36.97700	28	53	14.72467	193.374
4041	41	15	37.29283	28	51	20.87464	120.895	41	15	33.84320	28	51	19.26963	157.574
4057	41	11	32.71441	29	1	21.47405	233.866	41	11	29.26151	29	1	19.88387	270.410
4059	41	15	11.03548	29	3	8.65207	59.909	41	15	7.58797	29	3	7.06415	96.180
4151	41	9	51.11345	28	55	30.40251	115.309	41	9	47.65718	28	55	28.80629	152.114
4153	41	9	33.49318	28	41	53.60308	136.853	41	9	30.03837	28	41	51.99164	174.071
4070	40	58	55.80204	29	1	24.36089	44.183	40	58	52.33179	29	1	22.76984	80.921
4082	41	13	42.64495	29	13	23.18322	41.330	41	13	39.19434	29	13	21.61122	77.402
4093	40	54	35.14884	29	8	44.51281	112.584	40	54	31.67260	29	8	42.92946	149.214
4140	41	0	24.11591	29	12	11.88564	158.223	41	0	20.64798	29	12	10.30909	194.994
4337	41	0	52.54800	29	50	56.86589	521.639	41	0	49.07959	29	50	55.36427	557.139
4339	40	52	43.18496	29	40	17.35727	643.590	40	52	39.70238	29	40	15.83182	680.554
4111	40	49	11.47896	29	16	50.16272	33.824	40	49	7.99281	29	16	48.60067	70.426
4117	41	0	48.60392	29	22	10.65243	161.628	41	0	45.13843	29	22	9.09424	198.352
4118	41	3	22.62170	29	23	52.78613	150.929	41	3	19.16014	29	23	51.23032	187.523
4126	41	0	44.61722	29	18	8.95243	174.723	41	0	41.15059	29	18	7.38895	211.445
4158	40	48	24.34987	29	20	45.18863	2.349	40	48	20.86492	29	20	43.63583	39.031

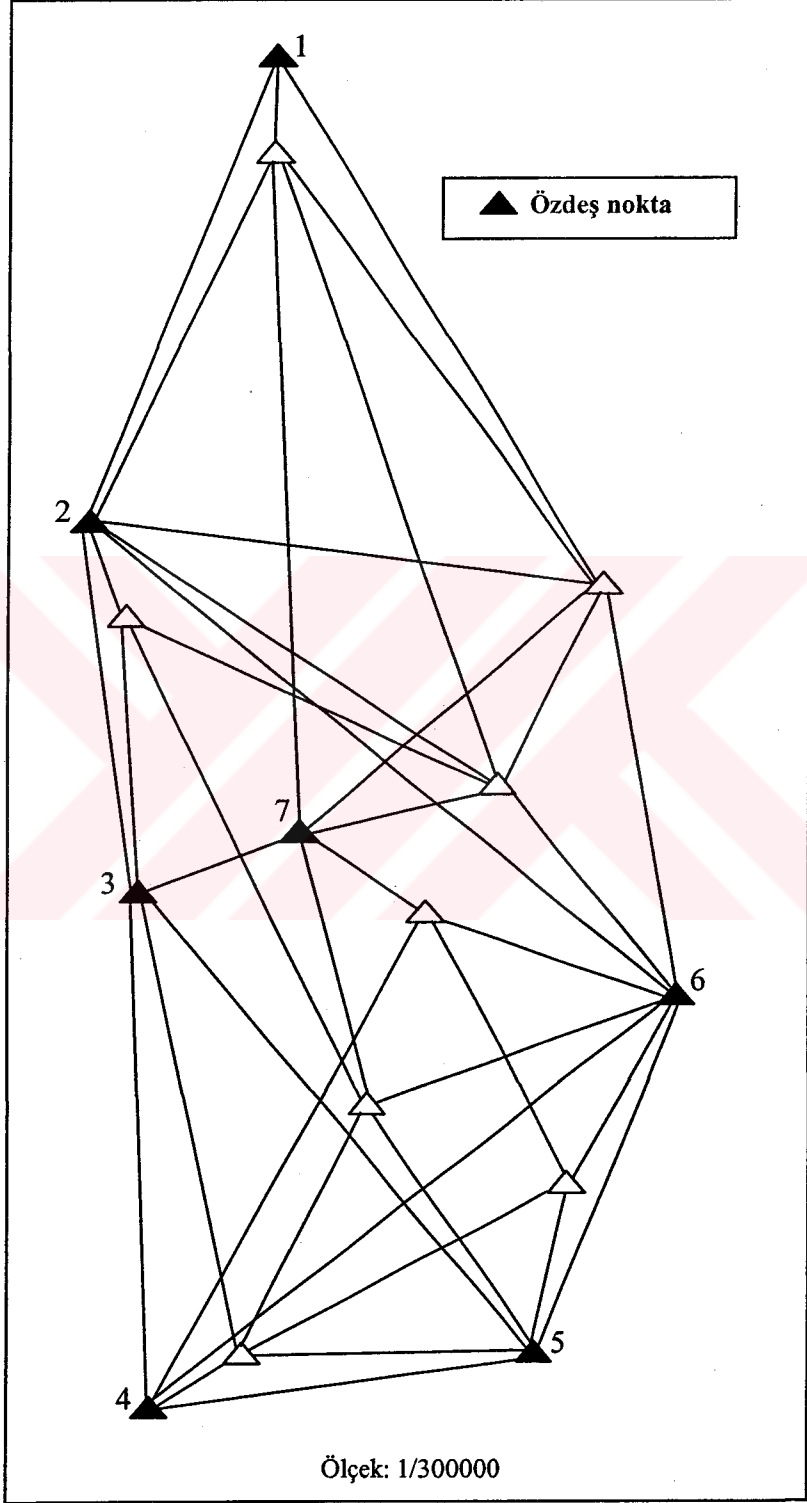
EK B: UYGULAMALARDA KULLANILAN JEODEZİK AĞLAR



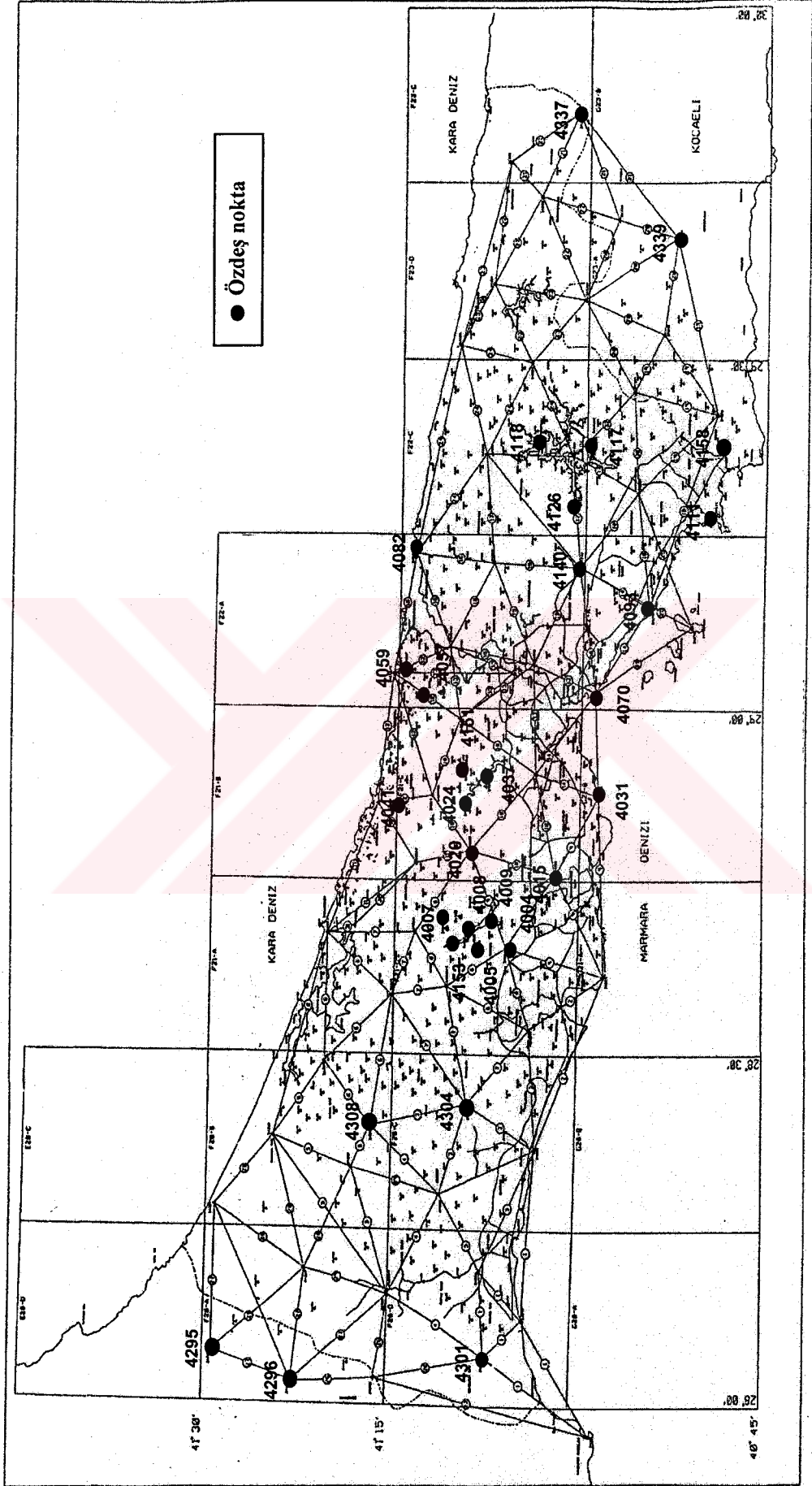
Şekil B.1 İzmir GPS Ağı-96 Ana Ağı



Şekil B.2 Zonguldak GPS Ağı-96 Ana Ağı



Şekil B.3 Ankara GPS Test Ağı



Şekil B.4 İGNA-2000 Ana Ağı

EK C: ÜÇ VE İKİ BOYUTLU BENZERLİK DÖNÜŞÜMLERİYLE HESAPLANAN PARAMETRELER

Tablo C.1 $H=h_{ED}$ varsayımıyla Molodensky-Badekas modelinden hesaplanan parametreler

Parametre	İGA-96	ZGA-96	AGTA	İGNA-2000
t_x (m)	90.020±0.007	89.584±0.014	88.305±0.000	87.848±0.030
t_y (m)	92.846±0.007	91.142±0.014	91.182±0.000	91.051±0.030
t_z (m)	131.680±0.007	128.977±0.014	128.230±0.000	127.051±0.030
ε_x (")	-0.966±0.084	22.183±3.316	-1.597±0.001	-2.968±0.214
ε_y (")	3.126±0.106	-21.042±2.307	3.777±0.001	0.914±0.512
ε_z (")	0.620±0.078	-7.957±1.862	0.490±0.001	0.536±0.206
k (ppm)	-4.809±0.326	9.686±2.062	3.381±0.003	0.846±0.766
m_0 (m)	±0.0179	±0.0353	±0.0002	±0.1687

Tablo C.2 $h=0$ varsayımıyla Molodensky-Badekas modelinden hesaplanan parametreler

Parametre	İGA-96	ZGA-96	AGTA	İGNA-2000
t_x (m)	116.493±0.004	110.278±0.009	112.302±0.000	112.226±0.013
t_y (m)	106.394±0.004	103.993±0.009	106.326±0.000	104.505±0.013
t_z (m)	155.287±0.004	150.513±0.009	151.795±0.000	151.341±0.013
ε_x (")	-0.382±0.051	-0.881±2.168	-0.833±0.003	-1.815±0.089
ε_y (")	4.021±0.063	3.444±1.506	3.669±0.003	2.943±0.213
ε_z (")	-0.539±0.047	-0.368±1.215	-0.210±0.004	-1.742±0.086
k (ppm)	1.102±0.196	14.751±1.337	9.177±0.009	6.661±0.319
m_0 (m)	0.0108	0.0229	0.0005	±0.0702

Tablo C.3 $H=h_{ED}$ varsayımıyla Bursa-Wolf modelinden hesaplanan parametreler

Parametre	İGA-96	ZGA-96	AGTA	İGNA-2000
t_x (m)	164.359±2.655	-281.150±27.378	142.331±0.036	96.713±12.311
t_y (m)	135.672±2.630	-542.148±103.562	123.588±0.039	160.056±5.072
t_z (m)	72.507±3.020	774.479±85.934	18.168±0.024	71.383±12.533
ε_x (")	-0.966±0.084	22.183±3.316	-1.597±0.001	-2.968±0.214
ε_y (")	3.126±0.106	-21.042±2.307	3.777±0.001	0.914±0.512
ε_z (")	0.620±0.078	-7.957±1.862	0.490±0.001	0.536±0.206
k (ppm)	-4.809±0.326	9.686±2.062	3.381±0.003	0.846±0.766
m_0 (m)	0.0179	0.0353	0.0002	±0.1687

Tablo C.4 $h=0$ varsayımıyla Bursa-Wolf modelinden hesaplanan parametreler

Parametre	İGA-96	ZGA-96	AGTA	İGNA-2000
t_x (m)	194.435±1.601	125.004±17.859	149.021±0.099	163.318±5.125
t_y (m)	99.559±1.586	77.444±67.665	94.416±0.110	90.135±2.111
t_z (m)	59.935±1.821	9.857±56.145	30.137±0.067	42.969±5.218
ε_x (")	-0.382±0.051	-0.881±2.168	-0.833±0.003	-1.815±0.089
ε_y (")	4.021±0.063	3.444±1.506	3.669±0.003	2.943±0.213
ε_z (")	-0.539±0.047	-0.368±1.215	-0.210±0.004	-1.742±0.086
k (ppm)	1.102±0.196	14.751±1.337	9.177±0.009	6.661±0.319
m_0 (m)	0.0108	0.0229	0.0005	±0.0702

Tablo C.5 İki boyutlu benzerlik dönüşümünden hesaplanan parametreler

Parametre	İGA-96	ZGA-96	AGTA	İGNA-2000
t_x (m)	184.407±0.005	119.059±0.011	146.026±0.000	151.783±0.015
t_y (m)	24.267±0.005	7.705±0.011	5.571±0.000	67.701±0.015
a (ppm)	1.109±0.230	14.682±1.570	9.130±0.001	6.799±0.390
b	$(4.011±0.230)*10^{-6}$	$(2.945±1.570)*10^{-6}$	$(4.190±0.001)*10^{-6}$	$(6.587±0.390)*10^{-6}$
m_0 (m)	±0.0127	±0.0268	±0.0004	±0.0852

EK D: ÜÇ VE İKİ BOYUTLU BENZERLİK DÖNÜŞÜMÜ ÇAKIŞMA ARTIKLARI

Tablo D.1 Ankara GPS Test Ağı

H=h _{ED} yaklaşımı			h=0 yaklaşımı		
V _{kuzey}	V _{doğu}	V _h	V _{kuzey}	V _{doğu}	V _h
0.0000	0.0000	-0.0001	0.0003	-0.0006	-0.0005
0.0000	0.0000	-0.0001	0.0000	0.0006	0.0001
0.0000	0.0000	0.0004	0.0000	0.0003	0.0004
0.0000	0.0000	-0.0003	0.0000	0.0003	-0.0005
0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	-0.0012	-0.0001
0.0003	0.0000	-0.0000	-0.0003	0.0006	0.0001
0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0007

Tablo D.2 Zonguldak GPS Ağı-96

H=h _{ED} yaklaşımı			h=0 yaklaşımı		
V _{kuzey} (m)	V _{doğu} (m)	V _h (m)	V _{kuzey} (m)	V _{doğu} (m)	V _h (m)
-0.0534	0.0120	0.0252	-0.0377	0.0056	0.0001
0.0333	0.0117	-0.0040	0.0201	0.0179	-0.0001
0.0056	-0.0528	-0.0596	0.0225	-0.0599	0.0002
0.0198	-0.0207	-0.0098	0.0012	-0.0136	0.0000
-0.0176	0.0161	0.0066	-0.0145	0.0151	-0.0001
0.0127	0.0333	0.0420	0.0083	0.0352	0.0001

Tablo D.3 İzmir GPS Ağı-96

H=h _{ED} yaklaşımı			h=0 yaklaşımı		
V _{kuzey} (m)	V _{doğu} (m)	V _h (m)	V _{kuzey} (m)	V _{doğu} (m)	V _h (m)
0.0037	0.0349	-0.0059	0.0018	0.0337	0.0005
0.0093	-0.0090	-0.0187	0.0090	-0.0071	0.0003
0.0090	-0.0034	0.0242	0.0086	-0.0028	-0.0010
-0.0158	-0.0114	0.0174	-0.0151	-0.0127	-0.0008
0.00062	-0.0043	0.0104	0.0009	-0.0056	0.0006
-0.0065	-0.0068	-0.0274	-0.0049	-0.0056	0.0006

Tablo D.4 İGNA-2000

H=h _{ED} yaklaşımı			h=0 yaklaşımı		
V _{kuzey}	V _{doğu}	V _h	V _{kuzey}	V _{doğu}	V _h
-0.0834	0.1513	-0.0328	-0.0846	0.1526	0.0030
0.0550	0.1124	-0.1816	0.0544	0.1161	0.0037
0.0334	0.0883	-0.2997	0.0327	0.0923	0.0037
-0.0772	-0.1208	0.1809	-0.0723	-0.1220	-0.0125
0.0253	-0.0914	0.0817	0.0238	-0.0939	-0.0002
-0.0639	-0.0855	0.1686	-0.0639	-0.0865	-0.0011
-0.0615	-0.1127	-0.3626	-0.0611	-0.1174	-0.0103
0.0219	-0.0179	0.5137	0.0263	-0.0213	-0.0122
0.0868	-0.1736	0.0118	0.0852	-0.1736	0.0043
-0.0479	-0.0043	0.0392	-0.0491	-0.0028	0.0032
-0.0025	-0.1396	0.0944	-0.0034	-0.1371	0.0036
0.0272	-0.0547	0.0373	0.0259	-0.0531	0.0038
-0.0034	-0.0195	-0.0050	-0.0046	-0.0179	0.0034
0.0611	-0.0547	-0.0178	0.0596	-0.0537	0.0044
0.0405	-0.0173	-0.0256	0.0392	-0.0154	0.0045
0.0939	0.1646	-0.2222	0.0926	0.1674	0.0044
0.0077	0.1489	-0.1966	0.0059	0.1485	0.0042
-0.0080	0.1658	-0.3938	-0.0093	0.1686	0.0038
0.0482	0.0652	-0.0739	0.0473	0.0676	0.0045
0.0111	-0.0772	0.0558	0.0102	-0.0747	0.0036
0.0099	0.1402	-0.1402	0.0096	0.1442	0.0034
0.0096	0.1319	-0.4003	0.0086	0.1334	0.0023
0.0006	0.2214	-0.1460	0.0009	0.2242	0.0017
-0.0164	0.1847	0.1297	-0.0167	0.1850	0.0019
-0.0442	-0.3715	-0.3542	-0.0423	-0.3882	-0.0154
0.0679	-0.1396	0.8078	0.0698	-0.1529	-0.0101
0.0667	-0.0889	-0.0686	0.0689	-0.0846	-0.0014
-0.0908	0.0686	0.2900	-0.0902	0.0670	-0.0008
-0.1065	0.0791	0.2224	-0.1059	0.0769	-0.0011
-0.0519	0.0503	0.2055	-0.0516	0.0494	0.0006
-0.0102	-0.2014	0.0825	-0.0071	-0.1967	-0.0027

Tablo D.5 Ankara GPS Test Ağı

Nokt. no	$V_{kuzey}(m)$	$V_{dogu}(m)$
1	0.0003	-0.0003
2	0.0000	0.0006
3	0.0000	0.0003
4	-0.0003	0.0003
5	0.0003	-0.0012
6	-0.0003	0.0003
7	0.0000	0.0000

Tablo D.6 Zonguldak GPS Ağı-96

Nok. no	$V_{kuzey}(m)$	$V_{dogu}(m)$
1	-0.0377	0.0056
2	0.0201	0.0179
3	0.0225	-0.0599
4	0.0012	-0.0136
5	-0.0142	0.0151
6	0.0083	0.0352

Tablo D.7 İzmir GPS Ağı-96

Nok. no	$V_{kuzey}(m)$	$V_{dogu}(m)$
1	0.0022	0.0340
2	0.0086	-0.0071
3	0.0083	-0.0031
4	-0.0154	-0.0130
5	0.0009	-0.0053
6	-0.0049	-0.0053

Tablo D.8 İGNA-2000

Nok. no	V _{kuzey} (m)	V _{doğu} (m)
1	-0.0846	0.1523
2	0.0547	0.1155
3	0.0327	0.0917
4	-0.0735	-0.1204
5	0.0241	-0.0939
6	-0.0639	-0.0865
7	-0.0605	-0.1158
8	0.0244	-0.0204
9	0.0852	-0.1739
10	-0.0488	-0.0034
11	-0.0034	-0.1377
12	0.0263	-0.0537
13	-0.0043	-0.0185
14	0.0599	-0.0544
15	0.0392	-0.0161
16	0.0926	0.1668
17	0.0059	0.1479
18	-0.0090	0.1680
19	0.0473	0.0670
20	0.0102	-0.0754
21	0.0093	0.1436
22	0.0083	0.1331
23	0.0003	0.2236
24	-0.0173	0.1847
25	-0.0454	-0.3854
26	0.0670	-0.1516
27	0.0676	-0.0849
28	-0.0911	0.0673
29	-0.1072	0.0772
30	-0.0522	0.0494
31	-0.0090	-0.1970

**EK E : 3B BENZERLİK DÖNÜŞÜMÜYLE (H=h_{ED}) DÖNÜŞTÜRÜLEN
KOORDİNAT BİLEŞENLERİNİN KORELASYONLARI**

a) Dönüştürülmüş Kartezyen Koordinatların Korelasyonları

İGA-96:

1.Dön. Par. Sabit

2.Dön.par. değişken

(Özdeş noktalar)

(Diğer noktalar)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.995 & 0.996 \\ & 1 & 0.994 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.997 & 0.998 \\ & 1 & 0.996 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.994 & 0.996 \\ & 1 & 0.992 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

ZGA-96:

1.Dön. Par. Sabit

2.Dön.par. değişken

(Özdeş noktalar)

(Diğer noktalar)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.996 & 0.996 \\ & 1 & 0.995 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.997 & 0.997 \\ & 1 & 0.996 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.991 & 0.994 \\ & 1 & 0.990 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

AGTA:

1.Dön. Par. Sabit

2.Dön.par. değişken

(Özdeş noktalar)

(Diğer noktalar)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.996 & 0.996 \\ & 1 & 0.995 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.997 & 0.997 \\ & 1 & 0.995 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.996 & 0.996 \\ & 1 & 0.995 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

b) Dönüştürülmüş Elipsoidal Coğrafi Koordinatların Korelasyonları

İGA-96:

1.Dön. Par. Sabit

2.Dön.par. değişken

(Özdeş noktalar)

(Diğer noktalar)

$$\begin{bmatrix} 1 & 5*10^{-6} & -6.10^{-5} \\ & 1 & -0.0002 \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0.0001 & 0.002 \\ & 1 & -0.067 \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 7*10^{-6} & -7*10^{-5} \\ & 1 & -2*10^{-4} \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

ZGA-96:

1.Dön. Par. Sabit

2.Dön.par. değişken

(Özdeş noktalar)

(Diğer noktalar)

$$\begin{bmatrix} 1 & -3*10^{-6} & -0.004 \\ & 1 & 0.002 \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -0.145 & 0.400 \\ & 1 & -0.358 \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -0.001 & -0.006 \\ & 1 & 0.004 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

AGTA:

1.Dön. Par. Sabit

2.Dön.par. değişken

(Özdeş noktalar)

(Diğer noktalar)

$$\begin{bmatrix} 1 & 4*10^{-6} & 6*10^{-5} \\ & 1 & -1*10^{-4} \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 4*10^{-4} & 0.011 \\ & 1 & 0.034 \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 4*10^{-6} & 6*10^{-5} \\ & 1 & -1*10^{-4} \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

**EK F : DÖNÜKLÜKLERİN ÜÇ BOYUTLU DÖNÜŞÜM MODELİNE
KATKISI**

a) İGA-96

Tablo F.1 Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_x ötelemesine katkısı

Nokta No	H=h _{ED}		h=0	
	Bur-Wolf	Mol-Bad.	Bur-Wolf	Mol-Bad.
1	-74.647	-0.308	-78.232	-0.291
2	-74.348	-0.009	-78.113	-0.172
3	-74.279	0.059	-78.092	-0.151
4	-74.387	-0.048	-77.736	0.206
5	-74.184	0.154	-77.775	0.167
6	-74.187	0.152	-77.700	0.241
Ortalama	-74.339	0.000	-77.941	0.000
$t_{xBur}-t_{xmol}^*$	74.339		77.942	

Tablo F.2 Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_y ötelemesine katkısı

Nokta No	H=h _{ED}		h=0	
	Bur-Wolf	Mol-Bad.	Bur-Wolf	Mol-Bad.
1	-42.788	0.039	6.766	-0.069
2	-42.880	-0.054	6.805	-0.030
3	-42.900	-0.074	6.812	-0.023
4	-42.737	0.089	6.868	0.033
5	-42.837	-0.011	6.873	0.038
6	-42.815	0.011	6.886	0.051
Ortalama	-42.826	0.000	6.835	0.000
$t_{yBur}-t_{ymol}^*$	42.826		-6.835	

Tablo F.3 Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_z ötelemesine katkısı

Nokta No	H=h _{ED}		h=0	
	Bur-Wolf	Mol-Bad.	Bur-Wolf	Mol-Bad.
1	58.915	-0.258	95.243	-0.109
2	59.020	-0.154	95.149	-0.202
3	59.035	-0.138	95.121	-0.230
4	59.359	0.186	95.640	0.288
5	59.320	0.147	95.433	0.082
6	59.390	0.217	95.523	0.172
Ortalama	59.173	0.000	95.352	0.000
$t_{zBur}-t_{zmol}^*$	-59.173		-95.352	

* Bursa-Wolf ve Molodensky-Badekas modellerinden dengeleme sonrası bulunan öteleme değerleriyle hesaplanmıştır.

b) ZGA-96

Tablo F.4 Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_x ötelemesine katkısı

Nokta No	H=h _{ED}		h=0	
	Bur-Wolf	Mol-Bad.	Bur-Wolf	Mol-Bad.
1	370.556	-0.179	-14.575	0.150
2	370.620	-0.115	-14.524	0.201
3	370.804	0.070	-14.760	-0.035
4	370.693	-0.042	-14.778	-0.053
5	370.858	0.124	-14.887	-0.162
6	370.877	0.143	-14.827	-0.102
Ortalama	370.735	0.000	-14.725	0.000
$t_{xBur}-t_{xmol}^*$	-370.734		14.724	

Tablo F.5 Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_y ötelemesine katkısı

Nokta No	H=h _{ED}		h=0	
	Bur-Wolf	Mol-Bad.	Bur-Wolf	Mol-Bad.
1	633.104	-0.186	26.526	-0.022
2	633.086	-0.203	26.490	-0.058
3	633.356	0.066	26.549	0.001
4	633.298	0.008	26.577	0.029
5	633.465	0.175	26.588	0.040
6	633.429	0.139	26.559	0.011
Ortalama	633.289	0.000	26.548	0.000
$t_{yBur}-t_{ymol}^*$	-633.290		-26.549	

Tablo F.6 Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_z ötelemesine katkısı

Nokta No	H=h _{ED}		h=0	
	Bur-Wolf	Mol-Bad.	Bur-Wolf	Mol-Bad.
1	-645.782	-0.281	140.685	0.029
2	-645.704	-0.203	140.704	0.048
3	-645.427	0.075	140.650	-0.005
4	-645.505	-0.004	140.639	-0.017
5	-645.296	0.205	140.619	-0.037
6	-645.294	0.207	140.637	-0.018
Ortalama	-645.501	0.000	140.656	0.000
$t_{zBur}-t_{zmol}^*$	645.502		-140.656	

c) AGTA

Tablo F.7 Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_x ötelemesine katkısı

Nokta No	H=h _{ED}		h=0	
	Bur-Wolf	Mol-Bad.	Bur-Wolf	Mol-Bad.
1	-54.538	-0.512	-37.262	-0.544
2	-54.235	-0.209	-36.889	-0.170
3	-53.989	0.037	-36.635	0.084
4	-53.677	0.349	-36.305	0.414
5	-53.744	0.282	-36.473	0.245
6	-53.958	0.068	-36.736	-0.017
7	-54.041	-0.015	-36.731	-0.012
Ortalama	-54.026	0.000	-36.719	0.000
$t_{xBur}-t_{xmol}^*$	54.026		36.719	

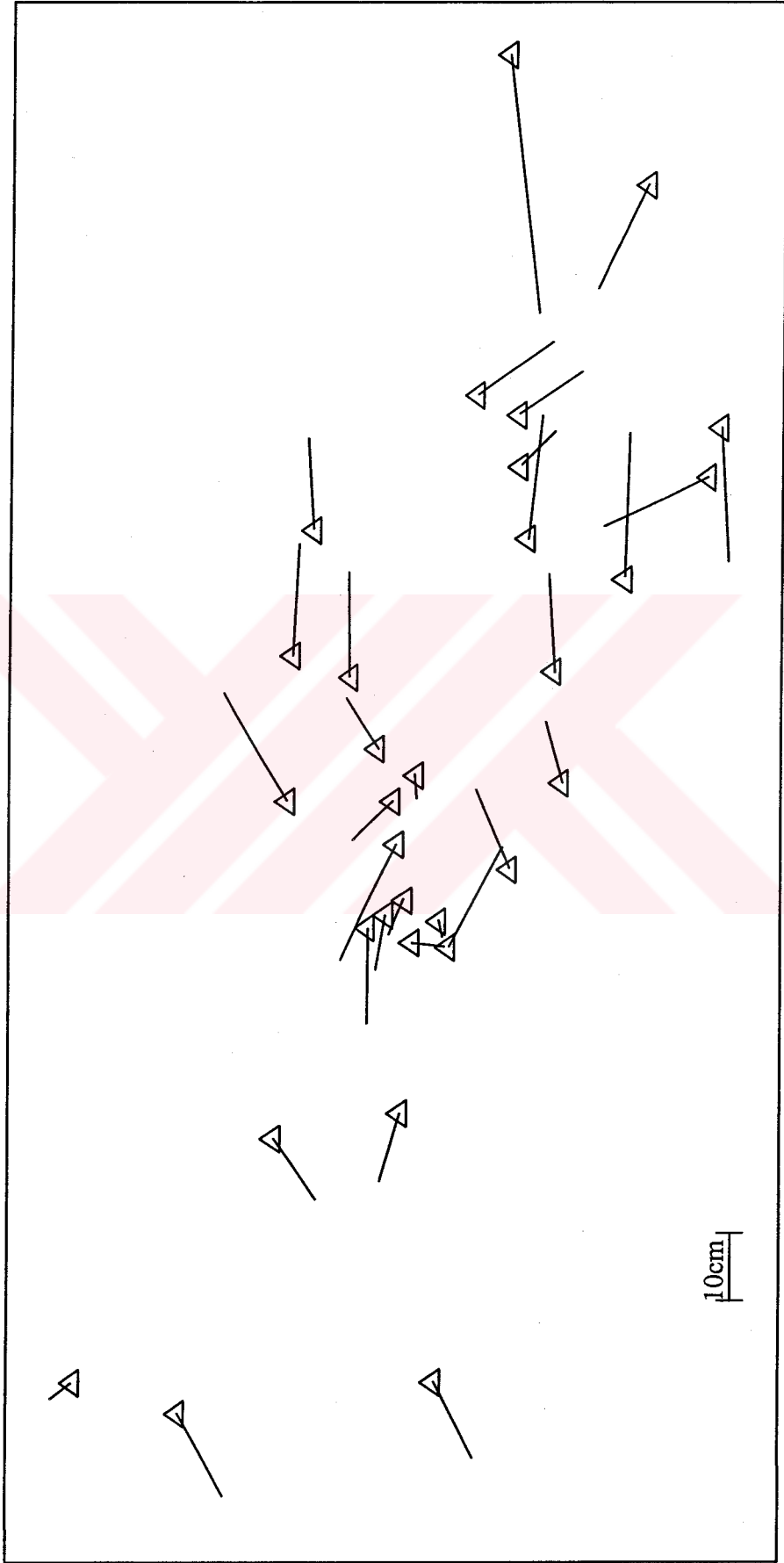
Tablo F.8 Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_Y ötelemesine katkısı

Nokta No	H=h _{ED}		h=0	
	Bur-Wolf	Mol-Bad.	Bur-Wolf	Mol-Bad.
1	-32.596	-0.191	11.678	-0.231
2	-32.518	-0.112	11.756	-0.154
3	-32.422	-0.016	11.874	-0.035
4	-32.305	0.101	12.016	0.106
5	-32.266	0.140	12.096	0.187
6	-32.319	0.086	12.048	0.138
7	-32.414	-0.008	11.898	-0.011
Ortalama	-32.406	0.000	11.909	0.000
$t_{YBur}-t_{Ymol}^*$	32.406		-11.910	

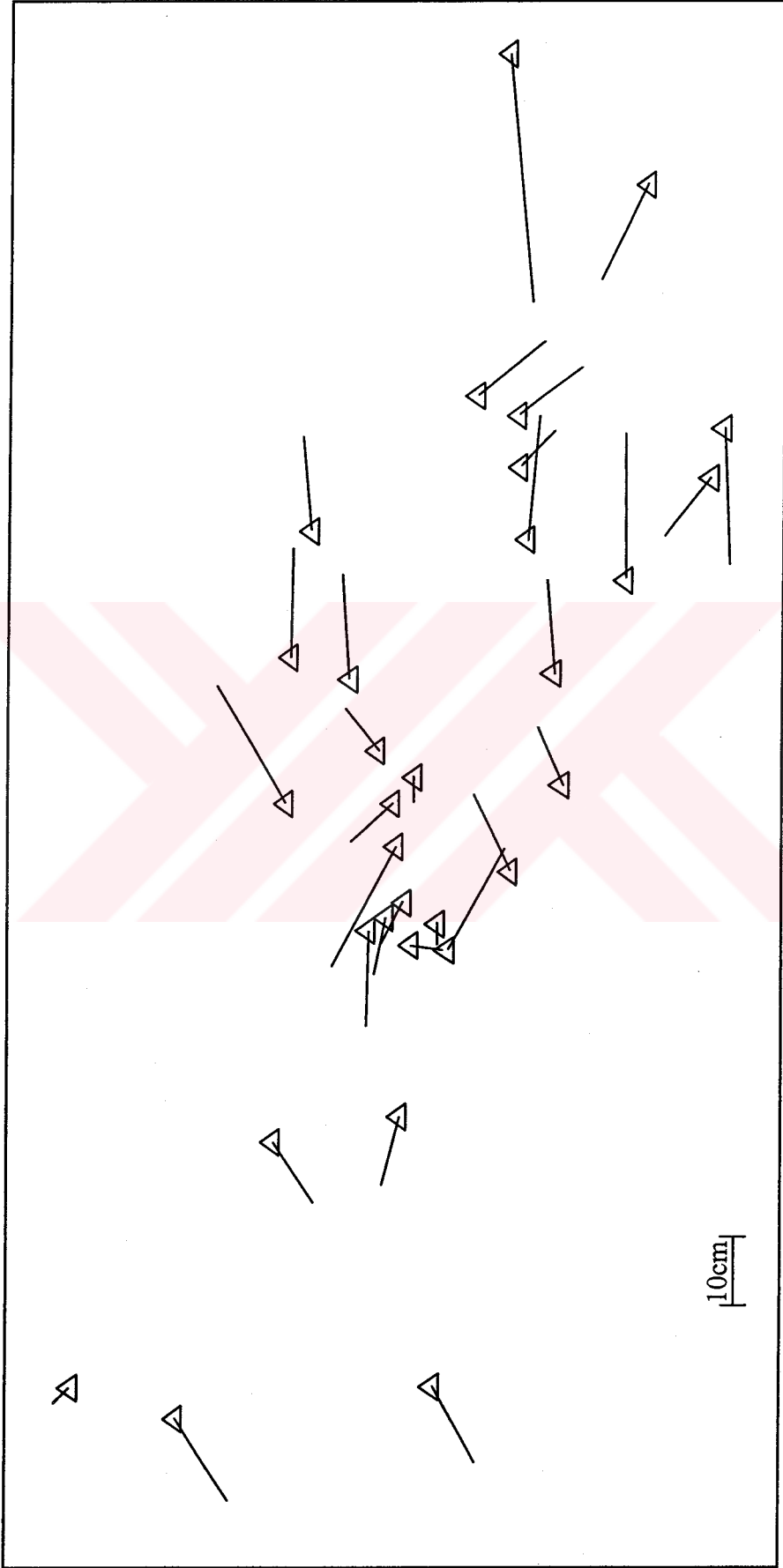
Tablo F.9 Üç boyutlu dönüşümle hesaplanan dönüklüklerin t_Z ötelemesine katkısı

Nokta No	H=h _{ED}		h=0	
	Bur-Wolf	Mol-Bad.	Bur-Wolf	Mol-Bad.
1	109.761	-0.300	121.555	-0.103
2	109.971	-0.091	121.669	0.010
3	110.110	0.048	121.711	0.053
4	110.291	0.229	121.771	0.113
5	110.191	0.129	121.661	0.003
6	110.052	-0.010	121.579	-0.079
7	110.056	-0.006	121.659	0.001
Ortalama	110.062	0.000	121.658	0.000
$t_{ZBur}-t_{Zmol}^*$	-110.062		-121.658	

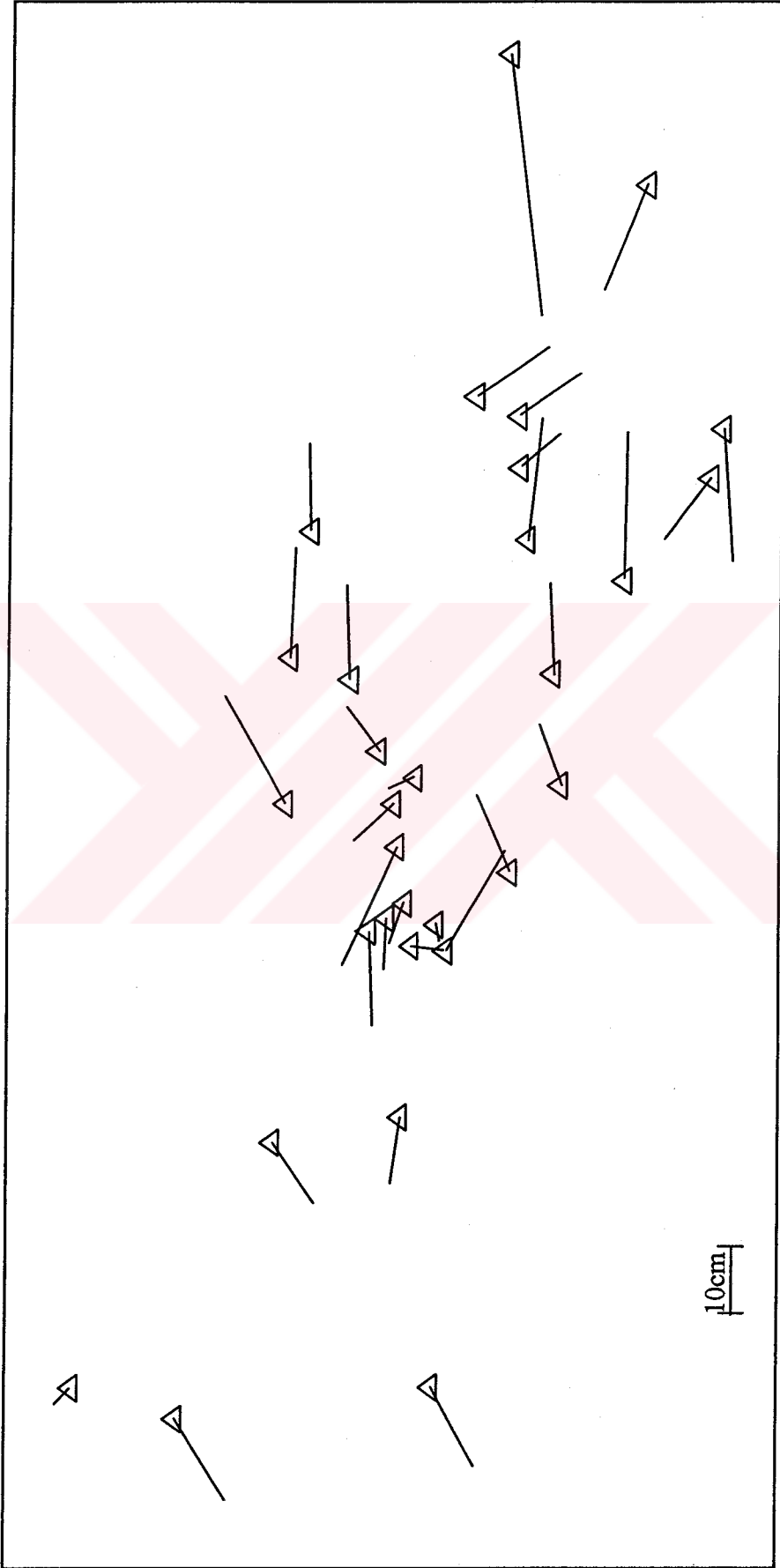
EK G: İGNA-2000'DE HESAPLANAN DÜZELTME VEKTÖRLERİ



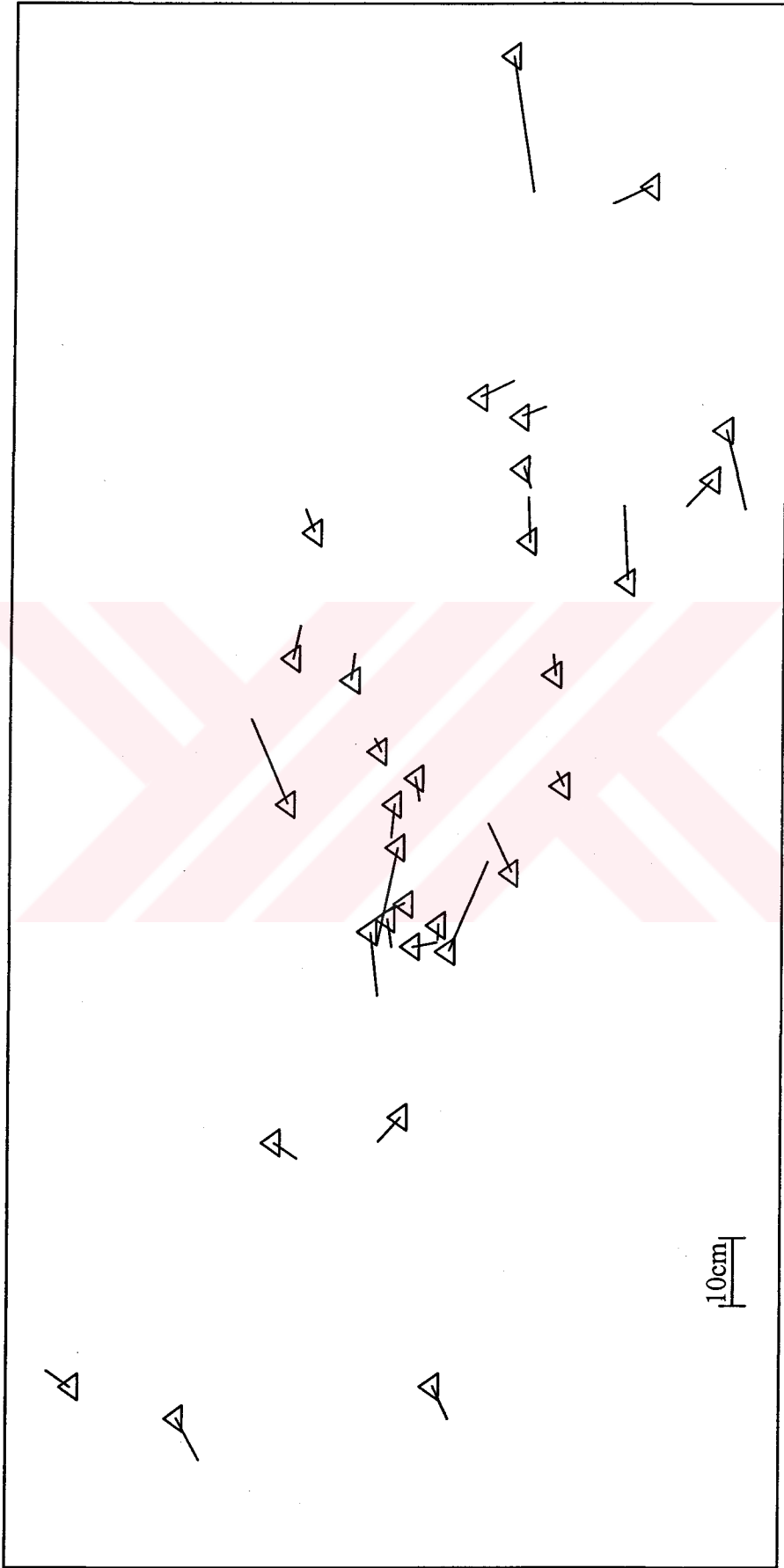
Şekil G.1 $h=0$ yaklaşımıyla 3 boyutlu benzerlik dönüşümü



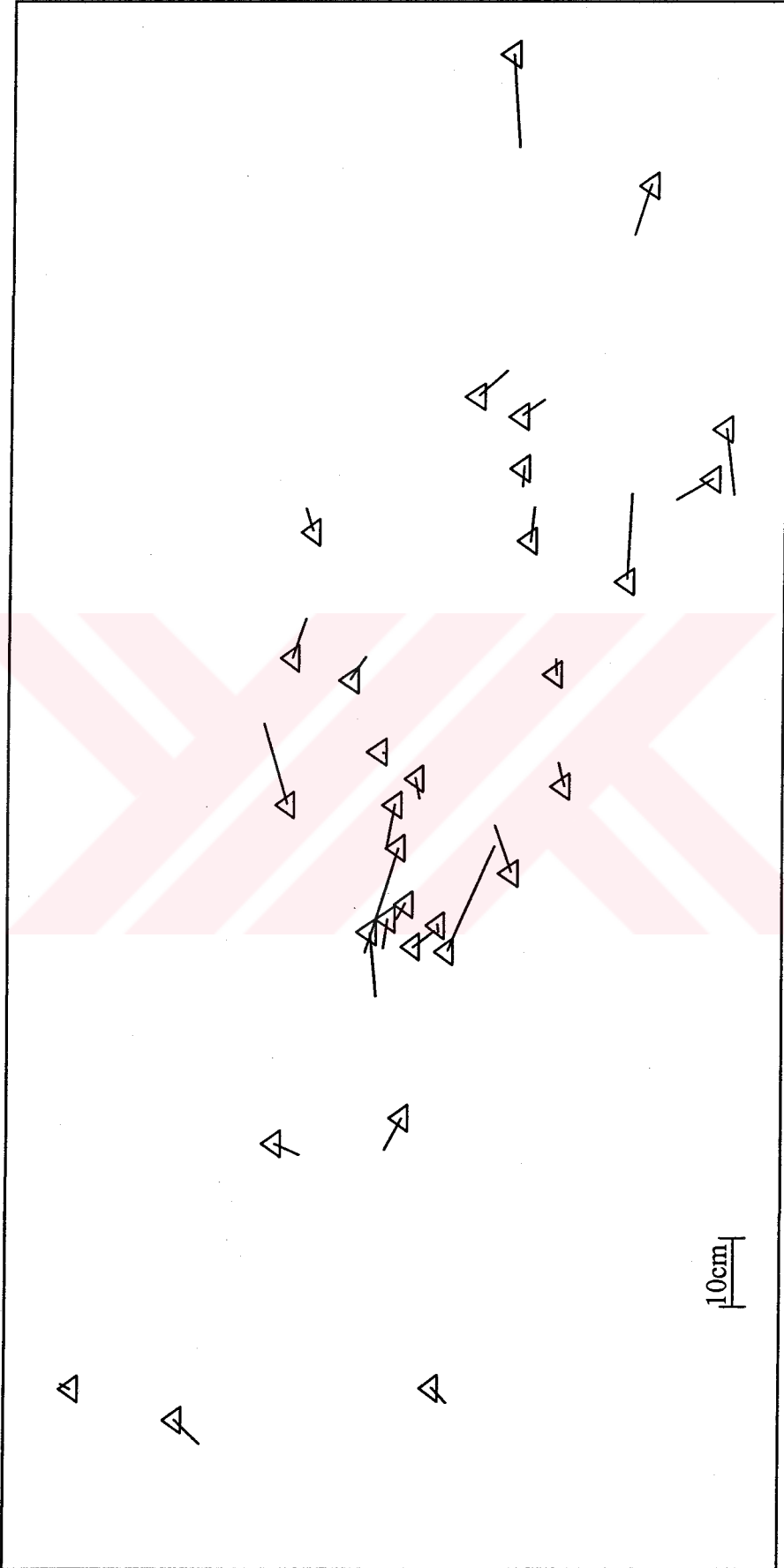
Şekil G.2 $H=h_{ED}$ yaklaşımıyla 3 boyutlu benzerlik dönüşümü



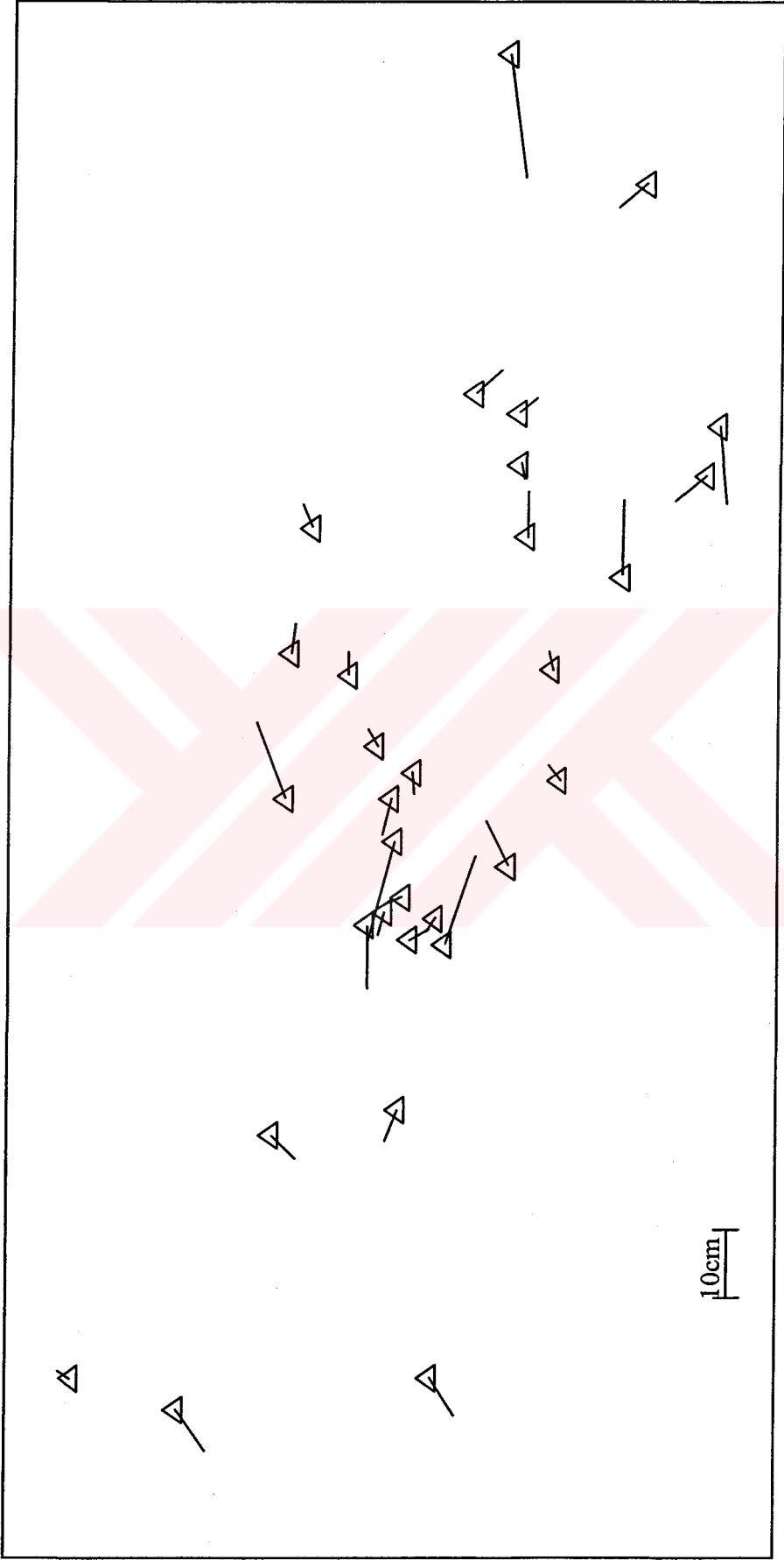
Şekil G.3 2 boyutlu benzerlik dönüşümü



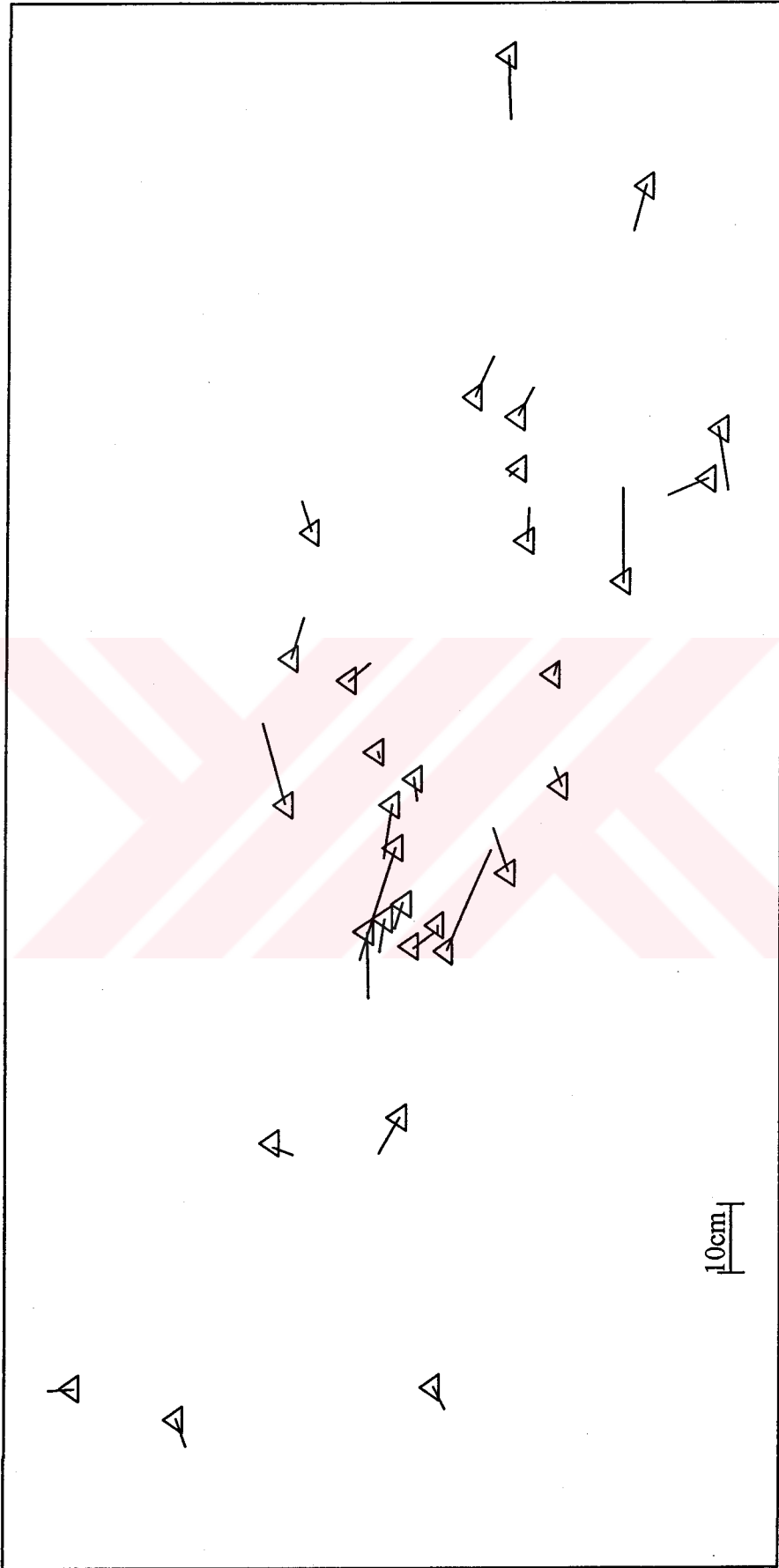
Şekil G.4 $h=0$ yaklaşımla 3 boyutlu filtreleme



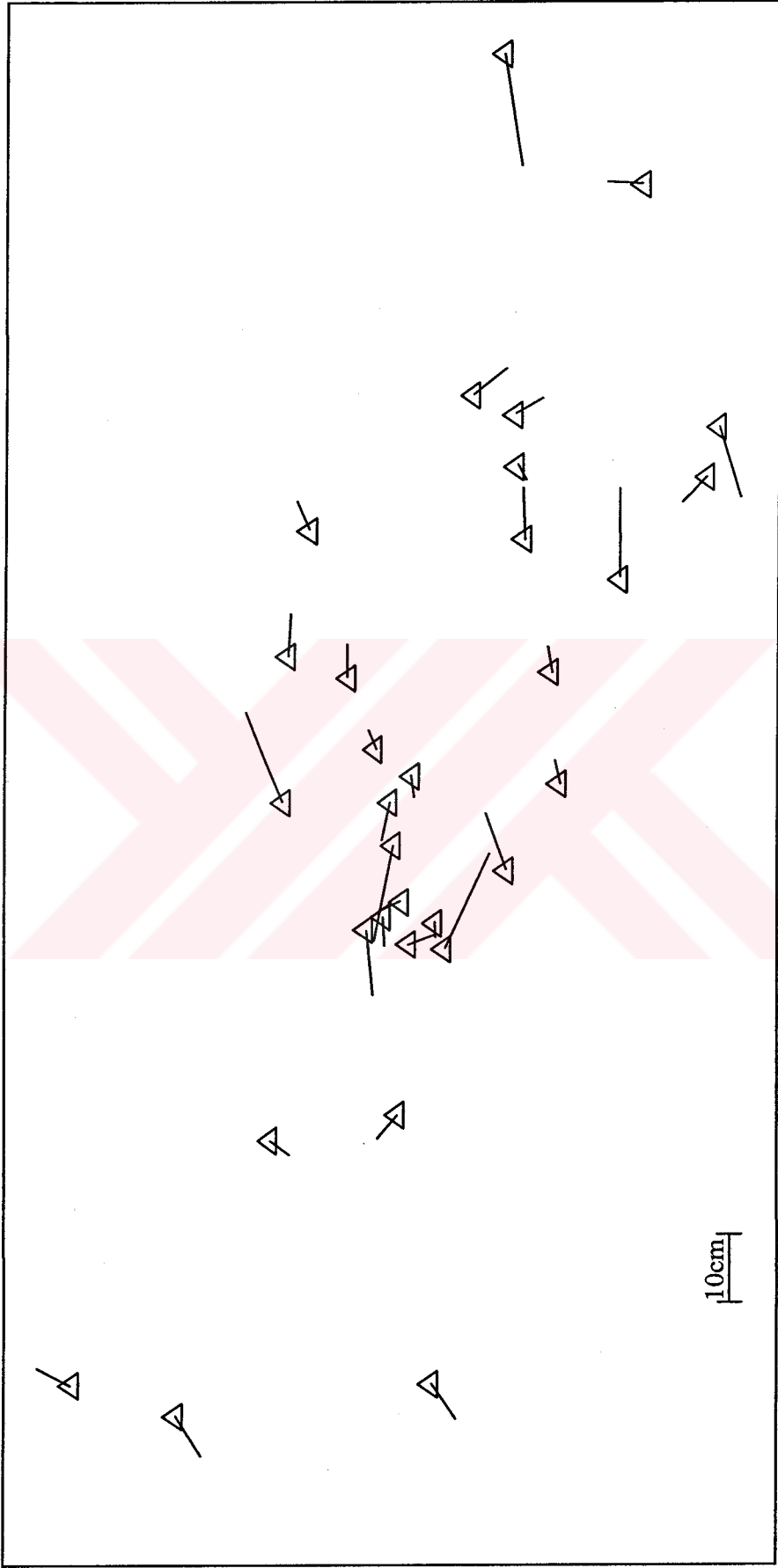
Şekil G.5 $H=h_{ED}$ yaklaşımıyla 3 boyutlu filtreleme



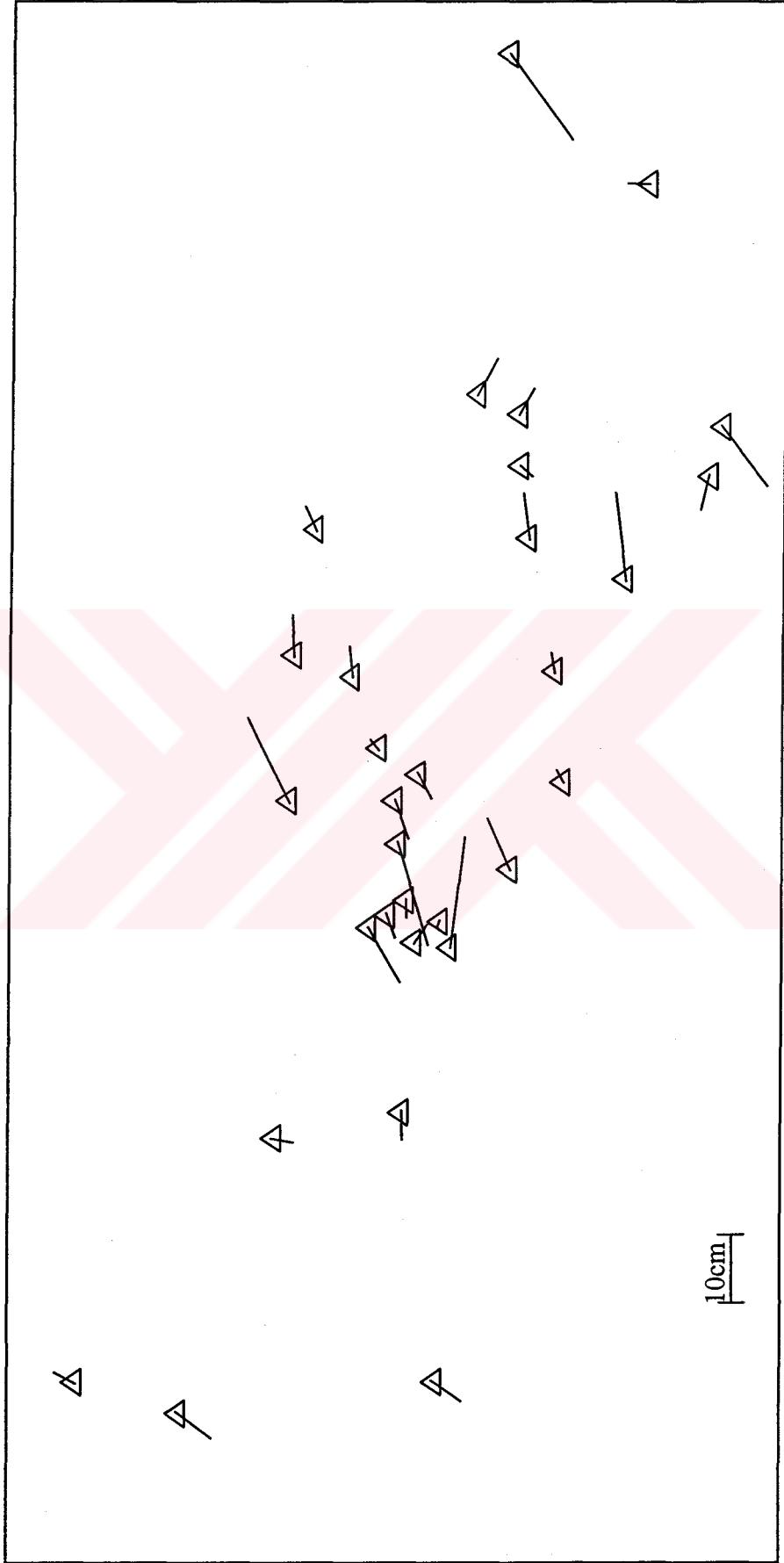
Şekil G.6 2 boyutlu filtreleme



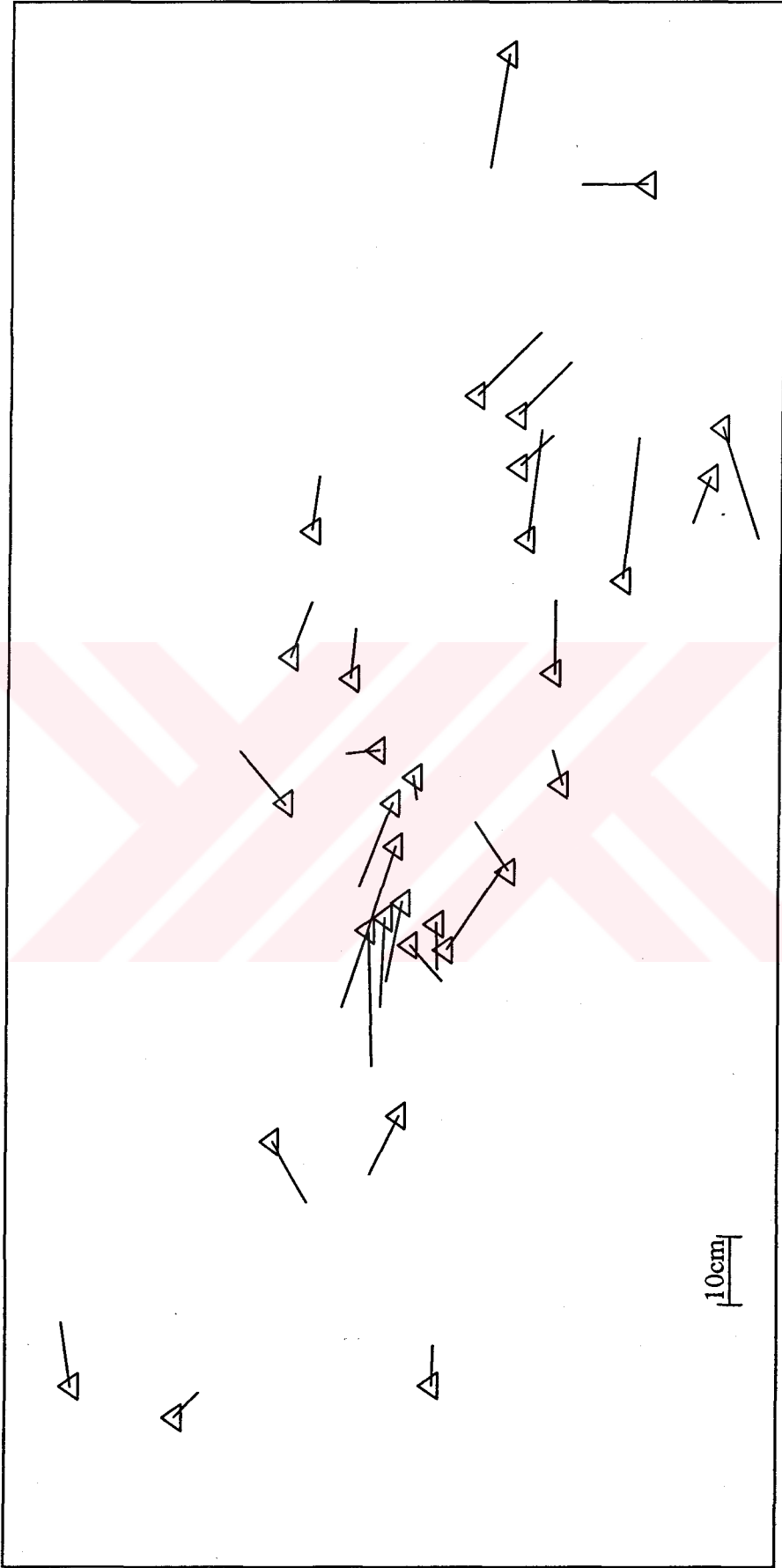
Şekil G.7 $h=0$ yaklaşımıyla 3 boyutlu kollokasyon



Şekil G.8 $H=h_{ED}$ yaklaşımla 3 boyutlu kollokasyon



Şekil G.9 2 boyutlu kolleksyon



Şekil G.10 Regresyon

EK H: ÜLKE NİRENGİ AĞLARINDAN GPS AĞLARINA DÖNÜŞÜM İÇİN HESAPLANAN PARAMETRELER

Tablo H.1 $H=h_{ED}$ varsayımıyla Molodensky-Badekas modelinden hesaplanan parametreler

Parametre	İGA-96	ZGA-96	AGTA	İGNA-2000
t_x (m)	-90.020±0.007	-89.584±0.014	-88.305±0.000	-87.848±0.030
t_y (m)	-92.846±0.007	-91.142±0.014	-91.182±0.000	-91.051±0.030
t_z (m)	-131.680±0.007	-128.977±0.014	-128.230±0.000	-127.051±0.030
ε_x (")	0.966±0.084	-22.181±3.316	1.597±0.001	2.968±0.214
ε_y (")	-3.126±0.106	-21.042±2.307	-3.777±0.001	-0.914±0.512
ε_z (")	-0.620±0.078	-7.957±1.862	-0.490±0.001	-0.536±0.206
k (ppm)	4.809±0.326	-9.685±2.062	-3.381±0.003	-0.847±0.766
m_0 (m)	±0.0179	±0.0353	±0.0002	±0.1687

Tablo H.2 $h=0$ varsayımıyla Molodensky-Badekas modelinden hesaplanan parametreler

Parametre	İGA-96	ZGA-96	AGTA	İGNA-2000
t_x (m)	-116.493±0.004	-110.278±0.009	-112.302±0.000	-112.226±0.013
t_y (m)	-106.394±0.004	-103.993±0.009	-106.326±0.000	-104.505±0.013
t_z (m)	-155.287±0.004	-150.513±0.009	-151.795±0.000	-151.341±0.013
ε_x (")	0.382±0.051	0.881±2.168	0.833±0.003	1.815±0.089
ε_y (")	-4.021±0.063	-3.444±1.506	-3.669±0.003	-2.943±0.213
ε_z (")	0.539±0.047	0.368±1.215	0.210±0.004	1.742±0.086
k (ppm)	-1.102±0.196	-14.751±1.337	-9.177±0.009	-6.661±0.319
m_0 (m)	±0.0108	±0.0229	±0.0005	±0.0702

Tablo H.3 İki boyutlu benzerlik dönüşümünden hesaplanan parametreler

Parametre	İGA-96	ZGA-96	AGTA	İGNA-2000
t_x (m)	-184.407±0.005	-119.057±0.011	-146.026±0.000	-151.782±0.015
t_y (m)	-24.267±0.005	-7.705±0.011	-5.571±0.000	-67.701±0.015
a (ppm)	-1.109±0.230	-14.682±1.570	-9.130±0.001	-6.799±0.390
b	$(-4.011±0.230)*10^{-6}$	$(-2.945±1.570)*10^{-6}$	$(-4.190±0.001)*10^{-6}$	$(6.587±0.390)*10^{-6}$
m_0 (m)	±0.0127	±0.0268	±0.0004	±0.0852

ÖZGEÇMİŞ

22.05.1970 tarihinde Zonguldak'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Zonguldak'ta tamamladı. 1989 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü'ne girmeye hak kazandı. 1994'de lisans öğrenimini tamamladıktan sonra, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Aynı yıl, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 1997 yılında yüksek lisans öğrenimini bitirdi ve aynı enstitüde Doktora Programı'na girdi. 1999'da ZKÜ'de halen sürdürmekte olduğu Öğretim Görevlisi kadrosuna atandı. 21.10.2000 tarihinde İlkay AKTÜRK ile evlendi.