

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KRONOMETRİK NİVELMAN YÖNTEMİ İLE
YÜKSEKLİKLERİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan Onur IŞIK

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

ARALIK 2019

**KRONOMETRİK NİVELMAN YÖNTEMİ İLE
YÜKSEKLİKLERİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hasan Onur IŞIK
(501161619)**

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Tefik ÖZLÜDEMİR
Eş Danışman: Dr. Kerem HALICIOĞLU**

ARALIK 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501161619 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hasan Onur IŞIK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KRONOMETRİK NİVELMAN YÖNTEMİ İLE YÜKSEKLİKLERİN BELİRLENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. M. Tefik ÖZLÜDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Dr. Kerem HALICIOĞLU**
Freie Universität-Berlin

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Taylan ÖCALAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Caner GÜNEY
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 15 Kasım 2019
Savunma Tarihi : 25 Aralık 2019





Aileme ve Nihan'a,



ÖNSÖZ

Mekan ve zamanın gündelik bakış açıları dışında bilimsel merak ile anlaşılmaya çalışılması için bu çalışma benim yaşadığım ender deneyimlerden biri oldu.

Bu serüven sadece bu çalışmayla sınırlı değildi ve bir de öncesi vardı.

Öncelikle bu tez çalışması sırasında tavsiyeleri ve en büyük özenini benden esirgemeyen Sayın Doç. Dr. M. Tevfik Özlüdemir'e serüvenin akışında yol göstericiliği yaptığı ve her zaman bu çalışmanın devamlılığına yönelik gösterdiği katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Jeodeziye yönelik bilimsel merakım açısından bilgi dağarcığının sınırlı olduğu zamanlarda “gökyüzüne bakmayı” unutturmayarak yeryüzünün uzayla ilişkisini en ince ayrıntılarına kadar öğreterek öğrenme arzumu daha da arttıran ve bunun dışında 6 yıllık süreç boyunca mesleki gelişim açısından desteklerini her zaman hissettiren Sayın Dr. Kerem Halıcıoğlu'na çok teşekkür ederim.

Ayrıca matematiksel gösterimlere ilişkin, sorduğum soruları hiçbir zaman yanıtsız bırakmayan değerli hocam Dr. Erkan Taşdemir'e teşekkür ederim.

Türkiye'nin kırsallarındaki koşullarda, iradesi ile kendi nesillerinin kaderini aile kaderinden ayırarak bugün bu satırları yazmama imkan sağlayan fakat ne yazık ki bu günlerde bizimle birlikte olamayan Köy Enstitüsü mezunu dedem Emekli Öğretmen Hasan Işık'a ve “her şeye” rağmen kızının kaderini değiştiren dedem Raci Yılmaz'a ayrıca teşekkür ederim. Her zaman emeklerini benden esirgemeyen aile üyelerime, tez süreci boyunca çizimleri ile destek sunan ağabeyim Zafer Ertuğrul Işık'a, eşi Işıl Tuğral'a, eğitimci kimlikleri ile hayatıma yön veren annem Sevgi Işık ve babam Ercan Işık'a sonsuz teşekkürler.

Son 6 yılda bütün süreçlerde her zaman yanımda olup bir hayatı paylaşmanın güzelliklerini gösterdiği için eşim Nihan Öz'e çok teşekkür ederim.

Aralık 2019

Hasan Onur IŞIK
(Geomatik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Yükseklik Belirlemede Newtoncu Kavramlar	3
1.2 Yükseklik Sistemleri	6
1.3 Geoit ve Geoit Belirleme Yöntemleri	10
1.3.1 Geoit Belirleme Yöntemlerine Bakış	10
1.3.2 Geoit Belirleme Yöntemleri	11
1.3.2.1 Küresel eşpotansiyel açılım kullanılarak geoit belirleme	11
1.3.2.2 Astrojeodezik çekül sapmaları kullanılarak geoit belirleme	12
1.3.2.3 Nokta gravite ölçmeleri yöntemi ile geoit belirleme	12
1.3.2.4 GNSS yöntemi kullanılarak geoit belirlenmesi	13
1.4 Küresel Bir Yükseklik Sistemine Doğru	13
2. TÜRKİYE'DE ZAMANSAL-KONUMSAL AĞLAR VE ULUSAL YÜKSEKLİK REFERANS SİSTEMİ	17
2.1 Türkiye'de Ulusal Jeodezik Ağlar	17
2.2 Türkiye'de Ulusal Geoit Belirleme Çalışmaları	19
2.3 Türkiye'de Zaman Referans Ölçümleri	24
3. GENEL GÖRELİLİK TEORİSİNİN TEMELLERİ	27
3.1 Fiziksel ve Matematiksel Kavramsal Temeller	27
3.1.1 Einstein Alan Denklemlerinin Schwarzschild çözümü	30
3.1.2 Post Newtoncu Formalizm metrik parametreler	30
3.1.3 IAU 2000 Çözümlerine göre metrik parametreler	31
4. KRONOMETRİK NİVELMAN YÖNTEMİ	33
4.1 Zaman Sistemleri	33
4.2 Atomik Saatler ile Zamanın Belirlenmesi	34
4.2.1 Atomik saat sistemleri	35
4.2.2 Zaman transfer teknikleri	38
4.2.2.1 Taşınabilir saatler aracılığıyla zaman transferi	39
4.2.2.2 GNSS Ortak Görüş yöntemi ile zaman transferi	40
4.2.2.3 Tek yönlü zaman transferi	42
4.2.2.4 Çift yönlü zaman transferi	43
4.2.2.5 Zaman Transfer Teknikleri Uygulamalarının Karşılaştırılması	43
4.2.3 Zaman transfer altyapıları	46

4.3 Atomik Saatler ile Yüksekliklerin Belirlenmesi.....	47
4.4 Zaman Referans Sistemleri ve Atom Saati Ağları	51
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR.....	63
EKLER	69
ÖZGEÇMİŞ	79



KISALTMALAR

BGI	: Bureau Gravimétrique International
BIH	: Bureau International de l'Heure
BIPM	: Le Bureau International des Poids et Mesures
CORS	: Continuously Operating Reference Station
EAL	: Echelle Atomique Libre
EGM	: Earth Gravity Model
EIGEN	: European Improved Gravity Model
ESA	: European Space Agency
EKKK	: En Küçük Kareler Kollokasyon
GGM05C	: Combined GRACE Gravity Model 05 C
GGOS	: Global Geodetic Observing System
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems
GECO	: GOCE-EGM2008 COmbined Model
GOCE	: Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
GOCO05C	: Gravity Observation Combination 05 C
GPS	: Global Positioning System
GRS80	: Geodetic Reference System 1980
GRACE	: Gravity Recovery and Climate Experiment
GRACE-FO	: The Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-on
GTOPO30	: Global Topographic 30 arc-second
HGK	: Harita Genel Komutanlığı
HGM	: Harita Genel Müdürlüğü
IAG	: International Association of Geodesy
IAU	: International Astronomical Union
ICOF	: International Clock Comparisons via Optical Fiber
IERS	: International Earth Rotation and Reference Systems Service
ISG	: International Service for the Geoid
IGeS	: International Geoid Service
IGSN	: International Gravity Standardization Net
ITR	: International Terrestrial Reference Frame

IUGG	: The International Union of Geodesy and Geophysics
İKÜ	: İstanbul Kültür Üniversitesi
LNE-SYRTE	: Laboratoire national de métrologie et d'essais - Système de Références Temps-Espace
LORAN	: Long Range Navigation
MPQ	: Max-Planck-Institut für Quanten Optik
NEAT-FT	: Network for European Accurate Time and Frequency Transfer
NIST	: National Institute of Standards and Technology
NGA	: National Geospatial Intelligence Agency
NKY	: Newton Kütleçekim Yasası
NPL	: The National Physical Laboratory
OBSPARIS	: Observatoire de Paris
PTB	: Physikalisch Technische Bundesanstalt
REFIMEVE+	: Réseau Fibre Métrologique à Vocation Européenne +
RLS	: Repeater Laser Station
TAI	: Time Atomique International
THG-09	: Türkiye Hibrid Geoidi
TCG	: Temps-coordonnée Géocentrique
TG-03	: Türkiye Geoidi-2003
TG-91	: Türkiye Geoidi-1991
TG-99	: Türkiye Geoidi 1999
TG-99A	: Düzenlenmiş Türkiye Geoidi-1999
TKGM	: Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü
TT	: Terrestrial Time
TTGA	: Türkiye Temel Gravite Ağı
TUBITAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TUD	: Türkiye Ulusal Datumu
TUDES	: Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi
TUDKA	: Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı
TUSAGA-AKTİF	: Türkiye Ulusal Sabit GNSS İstasyonları Ağı-Aktif
TUTGA	: Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
UTC	: Universal Time Coordinated
VLBI	: Very-long-baseline Interferometry
WGS84	: World Geodetic System 1984

SEMBOLLER

H	: Ortometrik Yükseklik
h	: Elipsoidal Yükseklik
N	: Geoit Ondülasyonu
M, m	: Kütle
F	: Kütleçekim Kuvveti
G	: Evrensel Newton Çekim Sabiti
g	: Yerçekimi İvmesi
V	: Yerçekimi Potansiyeli
U	: Normal Potansiyel
ρ	: Yoğunluk
v	: Hacim
$\vec{c}$	: Merkezkaç İvme
r	: Daire Yarıçapı
ω	: Açısal Hız
V_c	: Merkezkaç Potansiyel
W	: Ağırlık Potansiyeli
C	: Jeopotansiyel Sayı
H^D	: Dinamik Yükseklik
g_R	: Referans Gravite Değeri
$\bar{g}$	: Ortalama Gravite
H^H	: Helmert Ortometrik Yüksekliği
g^H	: Dinamik Yükseklik
γ	: Normal Gravite Değeri
ζ	: Yükseklik Anomalisi
θ	: Enlem
λ	: Boylam
P_{nm}	: Tam Normalleştirilmiş Legendre Fonksiyonu
C_{nm}, S_{nm}	: Yersel Çekim İvme Alanının Tam Normalleştirilmiş Küresel Harmonik Katsayıları
Δg	: Bouguer Sapması

t	: Parametrik Zaman
$\mathcal{R}_{\mu\nu}$	: Ricci Eğrilik Tensörü
$\mathcal{R}$	: Ricci Eğrilik Skaleri
$g_{\mu\nu}$	: Metrik Tensör
$T_{\mu\nu}$	: Stres Enerji Tensörü
Υ, β	: Eddington-Robertson-Schiff Parametreleri
ξ, α, γ	: Post-Newtoncu Parametreler
δ_{ij}	: Kronecker Delta Sembolü
E	: Enerji
σ_y	: Allan Sapması
Ω	: Etkileşim Süresi
τ	: Gerçek (Uygun) Zaman
c	: Işık Hızı
$\hbar$	: Planck Sabiti

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Mikrodalga Zaman ve Frekans Sistemi.....	25
Çizelge 4.1 : Atom saatleri konsepti.....	36
Çizelge 4.2 : Transfer Teknikleri Uygulamalarının Doğruluk Karşılaştırmaları.	44





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : $\Delta h_{12} = P_1 P_2 dh$ ve $\Delta h_{12} = P_1 P_2 \delta h$ yükseklik farklarının yola bağımlılığı.....	7
Şekil 1.2 : Yükseklik Sistemleri.	9
Şekil 2.1 : 1976 Türkiye Geoidi	20
Şekil 2.2 : Türkiye Geoidi 1991 (TG-91).	21
Şekil 2.3 : Geoidi-2003 (TG-03)	22
Şekil 2.4 : GPS/nivelman geoidinin hesaplanmasında kullanılan 625 Nokta	24
Şekil 2.5 : Türkiye Hibrid Geoidi 2009 (THG-09).	24
Şekil 4.1 : Frekans ile frekans farkı karşılaştırmasının atom standartları ile ilişkisi.	37
Şekil 4.2 : Taşınabilir saat yöntemi ile frekans transferi: iki farklı sabit atomik saat istasyonu ve taşınabilir atomik saat.	39
Şekil 4.3 : GNSS ortak görüşü ile zaman transferi.	40
Şekil 4.4 : Tek yönlü zaman transferi.	42
Şekil 4.5 : Çift yönlü zaman transferi.	43
Şekil 4.6 : İstasyonlarda uzay-zaman metriğinin belirlenmesini esas alan yükseklik belirleme yöntemi olarak Kronometrik Nivelman.	48
Şekil 4.7 : Atomik saatlerin dünya üzerindeki dağılımı	52
Şekil 4.8 : NEAT-FT mevcut ve geliştirilmekte olan fiber bağlantıları	53
Şekil 4.9 : Torino (TO), Milano (MI), Bolonya (BO) ve Floransa (FL) arasındaki fiber optik ağı.	54
Şekil 4.10 : MPQ ve PTB'yi bağlayan ~ 920 kilometrelik fiber bağlantı boyunca erişim noktaları ağı	55
Şekil 4.11 : Sırasıyla Paris ve Braunschweig'de bulunan Ulusal Metroloji Enstitüleri SYRTE ve PTB arasında bulunan Stronsiyum kafes saat ağı şeması.	56
Şekil 4.12 : REFIMEVE+ Ağı.....	57
Şekil B.1 : İki boyutlu uzayda X ve Y koordinat sistemleri ilişkisi.	72
Şekil B.2 : İki boyutlu uzayda Kovaryant ve Kontravaryant bileşenlerin gösterimi.	73



KRONOMETRİK NİVELMAN YÖNTEMİ İLEYÜKSEKLİKLERİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Genel Görelilik teorisinin bir sonucu olarak, kütleçekimsel alanlar gözlemci zaman akışını etkilemektedir. Zaman akışının aynı hıza sahip olduğu yüzeyler, Newton potansiyeli ile tariflenen eşpotansiyel yüzey kavramı ile aynı yüzeyleri tarif etmektedir. Eşpotansiyel yüzeyler klasik anlamda uzun yıllardır gravite ve yükseklik ölçmelerine bağlı olarak belirleniyordu.

Yükseklik belirleme için kullanılan geleneksel yöntemler bütünsel açıdan bakıldığında ölçme sonuçlarını etkileyebilecek önemli hata kaynakları barındırmaktadır. Bunlardan biri nokta üzerindeki potansiyel değerlerin doğrudan ölçülememesi nedeni ile yükseklik taşınması ile artan derecelerde hata birikmesidir. Ortalama deniz seviyeleri farklı olarak belirlenen karasal kütleler arasındaki yükseklik entegrasyonunun zorluğu da ayrı bir sorun oluşturmaktadır. Gözlemlerin yatay düzlemde gerçekleşmesi ve arazi zorlukları nedeniyle engebeli arazilerde işgücü, ekipman gücü ve yol uzunluğunun artması ile klasik yöntemlerde büyük zorluklar yaşanabilmektedir. Bu ciddi olumsuzlukları aşabilmek açısından, son yıllarda uydu teknolojileri önde gelen çözümlerden birisi olarak kullanılmaktadır. Fakat son 10 yıldır, temelleri 20. yüzyılın ikinci yarısına dayanan bir yöntem olan kronometrik nivelman, doğrulukları artan saatler ve ağ teknolojilerinin kullanıldığı test gözlemleri sonucunda önemli sonuçlar ortaya koymaya başlamıştır.

Zaman bilgisi atomik saat teknolojilerindeki gelişmeler ile birlikte atomik frekans standardında optik spektrumda yüksek frekansta gözlemler yapılarak artan ölçüde doğruluklarla belirlenebilmektedir. Bugüne kadar kullanılan mikrodalga atom saatlerinin daha düşük düzeydeki doğruluk ve kararlılıklarına karşı 100 kat daha iyileştirilmiş olan optik atomik saatler yükseklik belirlenmesinde yeni bir yöntem olarak kronometrik nivelman yönteminin önünü açmaktadır. Ayrıca fiber iletim teknolojileri ile birlikte optik atomik saat karşılaştırmaları 10^{-19} mertebelerinde bir hassasiyetle yapılabilmektedir. Yerçekimi ivmesi $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ ve $c \approx 300\,000\,000 \text{ m/s}$

olmak üzere; 1 santimetrelik yükseklik değişimlerinde $\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-18}$ frekans kayması oranı elde edilebilmektedir. Böylece optik atomik saatlerin 1 santimetrelik yükseklik farklarını belirleyebilecek hassasiyette olduğu söylenebilir.

Bu kapsamda, bu tez çalışmasında atom saatleri arasında yapılan frekans karşılaştırmaları neticesinde kütle-çekimsel Doppler etkisi ile ortaya çıkan farktan yararlanılarak potansiyel farkların belirlenmesi konusundaki teorik temellere, yöntemin genel çerçevesine ve güncel atomik saat test ağlarına değinilmektedir.

Bu bağlamda kronometrik nivelman yönteminin teorik temelleri ve güncel çalışmalar incelenmekte, uluslararası yükseklik referans sistemine olabilecek katkıları, sistemin çalışma mekanizmaları ve geoit belirleme yöntemlerine katkıları tartışılmaktadır.



DETERMINATION OF HEIGHTS WITH CHRONOMETRIC LEVELLING

SUMMARY

Height determination as the subject of Modern Geodesy is based on theoretical foundations of Newtonian physics. After Einstein introduced Special Relativity in 1905 and General Relativity in 1915, the concept of absolute space in Newtonian mechanics was altered.

With this revolutionary development in physics, the content of classical mechanics has changed. This development, which created a great transformation in applied sciences, caused an important transformation in Geodesy. Over the last decades, serious effects of relativity are discussed in Geodesy.

As a result of the general theory of relativity, gravitational fields affect the observer time flow. Surfaces where the time flow has the same velocity describe the same surfaces as the equipotential surface described by the Newtonian potential. The equipotential surfaces have been determined in the classical measurement methods for many years due to gravity and height measurements.

Conventional methods used to determine heights have important error sources that affect the measurement results. One of these is the fact that the potential values at the point cannot be measured directly, and that the error propagation increases with increasing height. The difficulty of height integration between terrestrial masses with differing sea levels is another problem. Great difficulties can be experienced in classical methods with increasing road path due to the occurring observations in the horizontal plane and difficulties of working in mountainous terrain. In order to overcome these serious problems, satellite technologies have been used as one of the leading solutions in recent years. But for the last 10 years, chronometric levelling, which had been introduced in the second half of the twentieth century, has started to produce important results as a result of test observations with improvements of clock accuracy and network technologies.

In addition, the concept of time has been one of the most widely considered concepts in science, philosophy, mythology, art and many other fields throughout history. The concept of time continues to deepen with practical applications. In addition, many discussions about the content of the concept continue to be up to date.

The time measurement principles of clocks are formed by repetitive movements of objects or particles. Thus, they become time scale determination equipment. However, the frequencies of repetition, ie frequencies, may vary according to the frame of reference. Astronomical measurements based on the repetitive motion of large bodies in space as a traditional method of time determination, yielded accurate results at the beginning and near future. But in recent years, motion of objects in space can decrease the measurement reliability due to getting involved of several parameters to the models that will vary according to reference frames and propagation of the error by taking into account the reference frame where the object is located.

Thanks to advances in atomic clock technologies, time is determined with increasing accuracy by observing high frequency in the optical spectrum in the atomic frequency standard. Optical atomic clocks, which are 100 times superior to the lower accuracy and stability of microwave atomic clocks used to date, pave the way for chronometric levelling as a new method for determining heights. In addition, optical atomic clock comparisons with fiber transmission technologies can be performed with an accuracy 10^{-19} . Assuming the gravitational acceleration is $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ and $c \approx 300\,000\,000 \text{ m/s}$; 1 centimeter height changes, we obtain the frequency shift ratio $\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-18}$. Thus, we can say that optical atomic clocks are accurate enough to detect height differences of 1 centimeter.

Therefore, atomic clock comparison networks can be seen as systems that will make a significant contribution in the near future in order to obtain a global geoid model with centimeter accuracy.

However, there are current problems due to the method is new. One of these problems is being of the insufficient number of trained personnel. Also, since the method is multidisciplinary, training of new qualified people requires time and cost. In addition, the cost of measuring instruments is too high. It also requires high-precision measuring processes and high attention. Another problem is that it is difficult to carry measuring instruments.

Today, many test steps are carried out on the measurement method. In this context, optical atomic clock measurements and fiber frequency transfer applications made by institutions such as Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) and Laboratoire national de métrologie et d'essais - Système de Références Temps-Espace (LNE-SYRTE) in Paris were examined within the scope of the thesis. These applications can be seen as the early stages of the continental atomic clock network in Europe.

TUBITAK UME's Time-Frequency Laboratory in Gebze, Turkey has contributed to the establishment of a universal time unit in the TAI club membership with 5 Cs atomic clocks and 2 GPS receivers since 1994. As of 2018, the work on the optical atomic clock has been started and it has been announced that the project will start in 2019. After the implementation of the project, connection using with fiber frequency transfer technologies to an optical atomic clock network to be established at European continent will be able to provide determination of the unified height reference system. It will also be able to associate Turkey Geodetic Systems with unified height reference system. An international optical atomic clock network is important not only in terms of spatial parameter but also in determining the international precise time parameter. In addition, a relative geoid to be determined in centimeter precision will make the ellipsoidal heights obtained by GPS useful due to the high accuracy model.

Within the scope of this thesis, the theoretical basis for identifying potential differences using the gravitational Doppler effect, the general framework of the method and the current atomic clock test networks as a result of frequency comparisons between optical atomic clocks are discussed.

In the first chapter, Newtonian concepts used to determine the height are studied and the need for a high-precision global height system is examined.

In Chapter 2, height systems and accuracies in Turkey were researched and studies were examined.

In Chapter 3, the mathematical and physical conceptual foundations of General Relativity Theory are examined.

In Chapter 4, the theoretical foundations of the Chronometric Levelling Method are discussed, and the applications, systems and methods are examined.



1. GİRİŞ

Mekan ve zaman kavramları tarih boyunca insanlığın düşünce temellerini oluşturmuş, yaşadıkları çevreye ilişkin gözlemlerin sonucu ürettikleri kavramlar ile maddeye soyut düzey katmaları bilimi ilerletmiştir. Bir tasarı olarak kurguladığımız düşünce evrenimiz deneylerden çok farklılık göstermemekte, yerkabuğu ise cisimlerin konumlarını belirlemede bizim için temel bir deneyim uzayı oluşturmaktadır (Einstein, 1922). Mekana ve zamana ilişkin olarak insanlığın ortak miras alanlarından biri de küresel anlamda bir ihtiyaç ve uygulanabilir bir bilim dalı olan Jeodezi bilim dalının sorunlara ilişkin ürettiği yanıtlardır.

1880 yılında F.R. Helmert Jeodezi bilimini “dünya yüzeyinin ölçülmesi ve haritalanması” bilimi olarak tanımladı. Bu tanım bugün hala güncelliğini korumakta iken, yerin ve yerçekimi alanının zaman değişkenine bağlı içeriğinin incelenmesi ve uzay-zamanda ölçülebilir her türlü olayın bu tanıma dahil edilmesi gerekmektedir (Torge ve Müller 2012).

Bu kapsamda pratik olarak, uzay-zamanda konumsal saptamaları yapmak ve bunların çeşitliliklerini doğru tespit etmek, bilimsel olarak ise yerçekimsel alanlar, şekiller ve dinamik olayları belirlemek Jeodezi biliminin amaçları arasında yer almaktadır.

Jeodezi bilimi eski çağlardan beri yaratılan birikime dayanarak, disiplinlerarası çalışmaların yaygınlaşması ve ilerlemesi ile birlikte 19. Yüzyıldan bugüne büyük gelişmeler yaşadı. 1821-1825 yılları arasında Göttingen ile Altona arasında, kendisinin öncülüğünde ilerleyen ağ ölçmelerinde karşılaşılan astronomik noktalardan taşınan jeodezik enlem ve boylamlar ile astronomik yöntemlerle belirlenen enlem ve boylamlar arasındaki farkın rastlantısal olamayacağını öne sürerek, çekül sapması kavramını geliştiren Gauss, yeryüzünün şeklini ağırlık kuvveti doğrultusuna dik ve elipsoitten değişken dalgalı sapmalarla (ondülasyon) ifade edilecek bir yüzey olarak tanımlamıştır (Ayan ve Deniz, 2000). Bu yüzeyin *geoit* olarak ifade edilmesi Listing tarafından 1872’de yapılmış, çekül doğrultularının dik olduğu yüzeylere ilişkin tanımlar ise Bruns tarafından ortaya atılmıştır. Yeryüzünün şeklinin algılanışına

yönelik olarak bileşik verilerin kullanımıyla, çeşitli küresel, bölgesel ve yerel çalışmalar sürdürülmektedir. Her bir ölçekte yapılan çalışmalar için temel alınacak karşılaştırma uzayını oluşturacak bir matematiksel model ve fiziksel model tasarımı bu amaçla Jeodezinin ana gündemlerinden birini oluşturmaktadır.

Yerkabuğunun fiziksel etkilerinin uzay dokusunda bıraktığı izlerin çokyönlü algılanabilirliği, onun şekline ilişkin örneklem kümesi üretme süreçleri açısından farklı yöntemlerin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Son yıllarda GNSS (Global Navigation Satellite Systems-Global Seyrüsefer Uydu Sistemleri) teknolojilerinin gelişimi, 1983'te ABD'nin NGA (National Geospatial Intelligence Agency-Ulusal Yermekansal Haberalma Ajansı) kurumu tarafından gerçekleştirilen uygulamalar ve Engeliş tarafından önerilen

$$H = h - N \quad (1.1)$$

ortometrik yükseklik (H) ve yüksek doğruluklu elipsoidal yükseklik (h) aracılığıyla geoid ondülasyonlarının (N) elde edilmesine olanak sağlayan metodoloji (Engeliş ve diğ., 1984) ile geoid belirlenmesi GNSS nivelmanını bilinen ve güncel bir konu haline getirmiştir.

Jeodezi bilimindeki kuramsal gelişmelerin yanında yüksek hassasiyette ölçme mekanizmalarının gelişimiyle, büyük ölçeklerde milyarda 1'den daha iyi hassasiyetlerde ölçmeler yapılabilmektedir (Mehlstäubler ve diğ., 2018).

Yakın bir zamana kadar Newton'un çekim yasası, uzay mekaniği açısından bilim insanları için yeterli oluyordu. Uydu teknolojisine geçiş dönemi ile birlikte görelilik etkisinin gözardı edilemeyeceği açıkça görüldü. Bugün ise, Jeodezi'nin temel bir problemi olarak kurgulanan küresel yükseklik referans sistemleri doğruluk açısından desimetre mertebesinde kalmakta ve homojen bir dağılıma sahip olmamaktadır. Atomik saatlerin santimetre geoidi belirlemek açısından yeterli hassasiyete ulaştığı optik atomik saatler, atom soğutma teknolojileri, kuantum sensör teknolojisi, lazer teknolojisi ve fiber iletişim teknolojisindeki gelişmeler Jeodezi çalışmalarını yeni bir yönetime ilişkin girişimlere yönlendirmiştir. Bunun en önemli sonucu yakın bir geleceğe kadar potansiyel sayının dolaylı yollardan elde edilmesi sorununun aşılması, ilk kez doğrudan ölçümünün gerçekleştirilebilmesidir.

Atomik saat teknolojisinde ulaşılan hassasiyet, santimetre geoidinin belirlenmesi ve küresel homojen bir ağ sisteminin kurulmasını mümkün kılabılır. Ancak atom saati frekanslarının iletimi için uydu temelli tekniklerin, gün boyu ölçmeler sonucu 10^{-15} hassasiyete sahip olarak yeterli doğruluk sağlamaması, bu çalışmaların -şimdilik- kıtasal ölçekle sınırlı kalacağını göstermektedir (Hachisu ve diğ., 2014).

1.1 Yükseklik Belirlemede Newtoncu Kavramlar

Modern Jeodezinin konusu olarak yükseklik belirleme, Newton fiziğine dayalı kuramsal temeller üzerine kurulmuştur. Bu kapsamda uzayda yer alan bir cisme ilişkin Newton tarafından ortaya atılan kütleçekim kanununa göre; aralarında r kadar mesafe bulunan M kütleli cisim tarafından m kütleli cisme etkiyen kütleçekim kuvveti

$$F = -\frac{MmG}{r^3}r \quad (1.2)$$

olarak ifade edilir. Burada F kütleçekim kuvveti, $G \approx 6.67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$ evrensel Newton çekim sabitidir (Anderson ve diğ., 2015; Rosi ve diğ., 2014).

Kütleçekim yasasına göre cisimler arasında ikili bir etkileşim olurken, etkisel olarak cisimlerden biri diğerine doğru ivmelenmektedir. Bu durumda m kütesinin kazanacağı ivme g ile gösterilir ve Newton'un 2. Hareket yasası gereği;

$$F = mg = -\frac{MmG}{r^3}r \quad (1.3)$$

olması nedeniyle

$$g = -\frac{MG}{r^3}r = -\frac{MG}{r^2} \quad (1.4)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir.

Birbirlerinden sonsuz uzaklıktaki m kütesinin M kütesine r mesafesine kadar yaklaşması için yapılması gereken iş kütle-çekimsel potansiyel olarak adlandırılır, V ile gösterilir ve

$$V(r) = \int_{\infty}^r gMdr = \int_{\infty}^r -\frac{MG}{r^2}dr = \frac{MG}{r} \quad (1.5)$$

olarak ifade edilir.

Eşitlik (1.5)'te elde edilen kütle-çekimsel potansiyel, skaler bir ifadeye sahiptir ve skaler bir alan oluşturur. Kütle-çekimsel etkiler nedeniyle oluşan skaler alandaki değişim yönü ve büyüklüğü kütle-çekimsel ivme vektörünü vermektedir. Bu değişimi elde etmek için kütle-çekimsel potansiyelin gradyenini almak gereklidir. Bunun için

$$g = \frac{dV}{dr} = \text{grad}(V) \quad (1.6)$$

eşitliği kullanılmaktadır.

Homojen dağılıma sahip bir küre cismi açısından küre dış noktasındaki herhangi bir noktada oluşan kütle-çekimsel potansiyel, ρ cismin kütle yoğunluğu dv diferansiyel anlamda hacim elemanı olmak üzere;

$$V(r) = G \iiint \frac{\rho}{r} dv \quad (1.7)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesinden kaynaklanan merkezkaç kuvveti ise, kendi merkezinden, kütleçekim alanında bulunan cisme, cisim doğrultusunda dış yönlü merkezkaç ivmeye neden olur. Bu merkezkaç ivme;

$$\vec{c} = \omega^2 r_\varphi \quad (1.8)$$

olarak gösterilir. Burada belirtilen ω kürenin kendi eksenini etrafında dönme hızıdır. Burada kutup hareketi göz ardı edilerek oluşturulan daire yarıçapı,

$$r_\varphi = \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (1.9)$$

olarak ifade edilmektedir ve buradan da merkezkaç ivme bileşeni

$$\vec{c} = \omega^2 \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (1.10)$$

olacaktır. M kütleli cismin z eksenini etrafındaki hareketi nedeniyle yapılması gereken iş miktarı

$$V_c = \int_0^{r_\varphi} \vec{c} M dr = \int_0^{r_\varphi} r \omega^2 dr = \frac{1}{2} \omega^2 \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (1.11)$$

olacaktır ve merkezkaç potansiyeli verecektir.

Eşitlik (1.5) ve (1.11)'de ifade edilen iki potansiyel bileşenin toplamı ise nihayetinde ağırlık potansiyelini verecektir. Ağırlık potansiyeli W ile gösterilir ve şu şekilde ifade edilmektedir:

$$W = V + V_c = G \iiint \frac{\rho}{r} dv + \frac{1}{2} \omega^2 \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (1.12)$$

Burada ağırlık kuvvetinin birinci dereceden türevleri yer kürenin iç ve dış ortamlarında sürekli, tanımlı ve sonlu fonksiyon olduğunu gösterir. Fakat ikinci türevleri için aynı durum söz konusu değildir. Ağırlık kuvveti potansiyelinin laplasyeni alındığında, yer küre içindeki bir nokta için;

$$\Delta W = -4\pi G\rho + 2\omega^2 \quad (1.13)$$

genişletilmiş Poisson denklemi ve yeryuvarının dışındaki herhangi bir nokta için

$$\Delta W = 2\omega^2 \quad (1.14)$$

genişletilmiş Laplace denklemi elde edilir. Bu durum ağırlık ivmesi potansiyelinin ani yoğunluk değişimine karşı süreksizlik eğilimi taşıdığını, atmosferden katı yeryüzüne geçiş sınırlarında yoğunluk değişiminin bu süreksizliği açığa çıkardığını gösterir.

Ağırlık kuvveti potansiyelinin eş değerlere sahip olduğu yüzeyler “nivo yüzeyi” ya da “eşpotansiyel yüzeyler” olarak adlandırılır ve

$$W = W(x, y, z, t) = \text{sabit} \quad (1.15)$$

olarak ifade edilir.

Farklı eşpotansiyel yüzeylerde bulunan herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farklar,

$$dW = \vec{g} \cdot \vec{ds} = g ds \cos\gamma \quad (1.16)$$

olacaktır. Bu denklemin bir sonucu olarak, $\vec{ds}$ yolu diferansiyel anlamda düşünüldüğünde, eşpotansiyel yüzey boyunca potansiyel değişimin sıfır olması gerektiğinden, $\vec{g}$ 'nin her zaman yüzeye dik olması gerektiği sonucu açığa çıkacaktır. Bütün eşpotansiyel yüzeyler boyunca diferansiyel anlamda alınabilecek bu ivmeler

bize herhangi bir noktadaki çekül eğrisinin teğetini vermektedir. Eğer $\overrightarrow{ds}$ yolu çekül eğrisi boyunca alınır, diferansiyel toplamalar sonucu $\cos\gamma = -1$ olacağı için

$$dW = -gds = -gdH \quad (1.17)$$

bağıntısı elde edilir. Bu eşitlik yüksekliğin geometrik tanımı ile fiziksel tanımı arasındaki temel bağlantıyı sağlamaktadır. Ek olarak bağıntının bir sonucu olarak potansiyel değişiminin yoldan bağımsız olduğu söylenebilir.

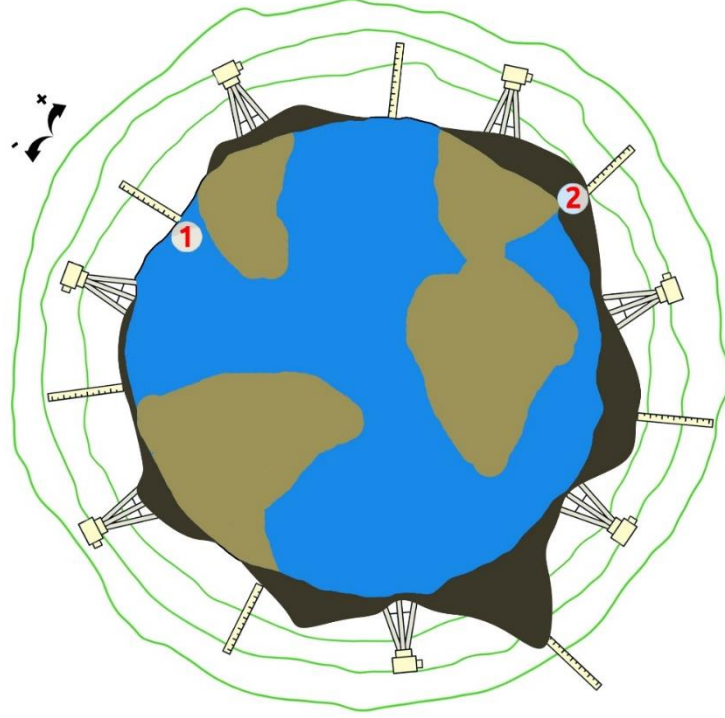
Newton Yasaları çerçevesinde belirlenmiş temel kavramlar bu bölümde incelenmiştir. Bu kavramların ötesinde, ilişkilendirilebilirlik açısından referans tanımları yapmak gerekmektedir. Bu nedenle çeşitli modellere dayanan referans kavramları geliştirilmiştir.

1.2 Yükseklik Sistemleri

Yükseklik temel olarak iki kavramsal düzey ifade etmektedir. Bunlardan ilki çekimsel etkinin gözardı edildiği matematiksel yüksekliği karşılıyor iken, ikincisi ise kütle-çekimsel etki nedeniyle değişen uzay-zaman metriğine göre potansiyellerin farklılığına dayanan yükseklik kavramıdır (metrik kavramına ilişkin detaylı bilgi için EK B ve Bölüm 3'e bkz.).

Yükseklik kavramındaki bu iki kavramsal ifadenin eşdeğer sonuçlar vermediği önemli bir farklılıkla anlaşılabilir. Geometrik nivelman yolu ile elde edilen yükseklik farklılıkları matematiksel olarak ifade edilmektedir. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi dünya üzerinde bulunan iki nokta arasında büyük daire yayı boyunca yapılan zıt yönlerdeki ölçmeler bu farklılığı anlayabilmek açısından örnek gösterilebilir. Bu ölçmelerden birbirine yakın uzaklıkta olan ölçmeler pozitif yönlü kabul edilerek, iki nokta arasındaki yükseklik farkı Δh_{12}^+ olarak ifade edilsin. Diğeri ise birbirinden daha uzak daire yayı aralığına sahip ve negatif yönlü olsun ve Δh_{12}^- olarak ifade edilsin. Yol boyunca yapılan ölçme sonucu elde edilen yükseklik farkları $\Delta h_{12}^+ = \int_{P_1}^{P_2} \delta h$ ve $\Delta h_{12}^- = \int_{P_1}^{P_2} \delta h$ olsun. Bu iki nokta arasındaki + ve - yönlü yollardaki potansiyel yüzeylerin birbirine paralel olmaması nedeniyle, geometrik anlamda $\Delta h_{12}^+ \neq \Delta h_{12}^-$ eşitsizliği ortaya çıkmaktadır. Yani nivelman ölçmeleri yola bağımlıdır denilebilir.

Fakat bu iki nokta arasındaki potansiyel farklar + ve – yönlü olarak eşit olacaktır yani $\Delta W_{12}^+ = \Delta W_{12}^-$. Bu da potansiyel farkların yoldan bağımsız olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.1 : $\Delta h_{12}^+ = \int_{P_1}^{P_2} dh$ ve $\Delta h_{12}^- = \int_{P_1}^{P_2} \delta h$ yükseklik farklarının yola bağımlılığı.

Yüksekliklerin bu 2 farklı karakteristiği, kullanım amaçlarına göre değişiklik gösteren farklı yükseklik sistemleri tanımlarına yol açmıştır.

Nivelman ile elde edilen yükseklik farklarının yoldan bağımlılıklarının ortadan giderilmesi için çeşitli kavramsal öneriler getirilmiştir. Bunun için gravite potansiyeli en uygulanabilir yükseklik kavramıdır. Eğer iki nokta arasındaki yükseklik farkları dh ve gravite değeri g ölçülürse, (1.17) bağıntısı ile potansiyel farka ulaşılabilmektedir. Bunun yerine Baeschlin'in belirttiği üzere Tardi tarafından geoid potansiyeli ile noktanın potansiyel farkı jeopotansiyel sayı olarak tanımlanmış ve şu şekilde ifade edilmiştir (Vaníček ve Krakiwsky, 1986'da atıfta bulunulduğu gibi):

$$C_i = W_0 - W_i = \int_{P_1}^{P_2} g dh \quad (1.18)$$

Jeopotansiyel sayılar geoidte sıfır, geoidin üstünde pozitif değere sahip olurlar.

Uluslararası Jeodezi Birliği (International Association of Geodesy – IAG) tarafından jeopotansiyel sayı birimi “kilogal.metre” olarak kabul edilmiştir (Balazs ve Young, 1982). Bu birimin uzunluk biriminde olmaması, bir küresel ortak birimde çalışmanın önünde engeller oluşturur. Bu nedenle bu değerin uzunluk biriminde ifade edilmesi gerekmektedir. Bu noktada dinamik yükseklik tanımı ilk kez 1884 yılında Helmert tarafından yapılmış (W. E. Featherstone ve M. Kuhn, 2006’da atıfta bulunulduğu gibi) ve,

$$H_i^D = \frac{C_i}{g_R} \quad (1.19)$$

olarak ifade edilmiştir. Buradaki g_R , i noktasının referans enlemi φ_R ’deki normal gravite değeridir. Bu değer birim olarak ne kadar uzunluk biriminde olsa da geometrik uzaklık olarak düşünülmemelidir. Eşpotansiyel yüzeylere benzer şekilde geometrik uzaklıkları farklıdır.

Bu sistemler arasında en sık kullanılan yükseklik, aynı zamanda geometrik olması nedeniyle daha çok algılanabilir olan ortometrik yüksekliktir. H_i^O olarak gösterilen ortometrik yükseklik, P_i noktasının geoide çekül eğrisi boyunca olan uzaklığıdır. Ortometrik yükseklikler,

$$H_i^O = \frac{C_i}{\bar{g}_i} \quad (1.20)$$

ilişkisi ile hesaplanabilmektedir. Burada $\bar{g}_i$ değeri çekül eğrisi boyunca ortalama gravite değeridir. Uygulamada bu değerin ölçülmesi ya da yoğunluk dağılımları ile kestirimi mümkün olmadığı için çeşitli modeller aracılığıyla ortalama değerlere ulaşılır. Bu değerler yaklaşık değerlerdir ve uygulamada en çok Helmert Ortometrik yükseklikleri kullanılmaktadır ve

$$H_i^H = \frac{C_i}{g_i^H} \quad (1.21)$$

olarak ifade edilmektedir. Ortometrik yükseklikler aynı eşpotansiyel yüzeyden geçmezler.

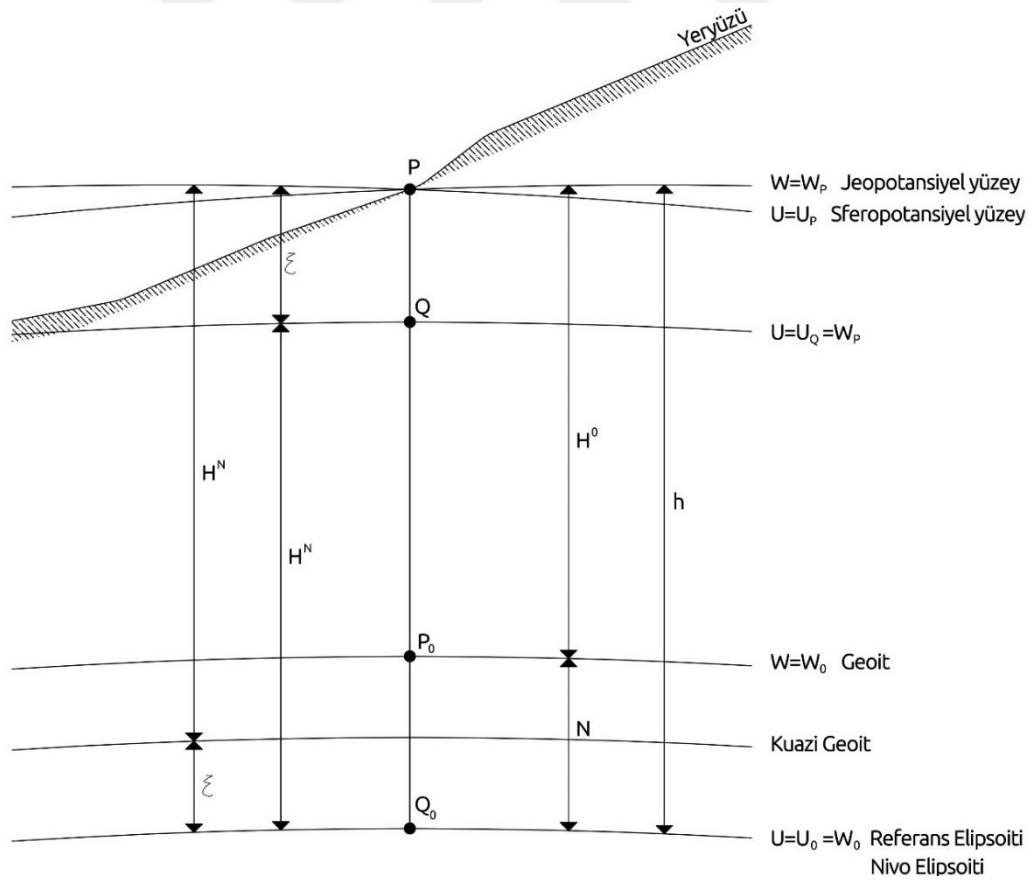
Yer üzerindeki bir nokta ile referans alınan yüzey olarak elipsoit arasında elipsoit normali üzerindeki mesafeye elipsoidal yükseklik denir. Elipsoidal yükseklik ile

ortometrik yükseklik arasında, astronomik normal ile elipsoidal normal arasındaki çekül sapması ihmal edilecek derecede az olması nedeniyle $H_i^E = H_i^O + N_i$ ilişkisi kurulabilir. Burada N_i elipsoit ile geoit arasındaki fark olan geoit ondülasyonudur.

Ortometrik yüksekliklerin kuramsal olarak gerçekleşmesi zor olmalarından dolayı Molodensky tarafından “Normal Yükseklikler” önerilmiştir(Molodensky, 1945). Normal yükseklikler

$$H_i^N = \frac{C_i}{\bar{\gamma}_i} \quad (1.22)$$

olarak ifade edilir. $\bar{\gamma}_i$ normal gravite değeri çekül eğrisi boyunca ortalama olarak hesaplanmaktadır. Elde edilen H_i^N değeri, kuazi geoit ile P_i noktası arasındaki mesafeyi verir. Kuazi geoit ile referans elipsoidi arasındaki mesafe ζ ile gösterilir ve yükseklik anomalisi olarak adlandırılır. Eğer $U_Q = W_P$ olarak seçilirse potansiyel değeri noktanın potansiyeline eşit olan elipsoit elde edilir ki bu yüzeye tellüroit denir. Yükseklik sistemlerinin grafiksel gösterimi (Şekil 1.2)’de görülebilmektedir.



Şekil 1.2 : Yükseklik Sistemleri.

1.3 Geoit ve Geoit Belirleme Yöntemleri

Geoit, fiziki etkilerden arındırılarak oluşturulan ve bir önkabul olarak durgun okyanus yüzeyinden geçen noktalar kümesinin oluşturduğu kapalı bir yüzey olarak tanımlanır (Sideris, 2011). Bu yüzey, karşılaştırma elipsoidinden olan yükseklik farkı ile matematiksel olarak tanımlanabilir. Geoit belirlemede bahsedilen karşılaştırma yüzeyinden olan yüksekliklerin belirlenmesi esastır ve elde edilen bu verilerle modeller oluşturulur. Modellerin oluşturulmasına ilişkin çeşitli yöntemler vardır.

Aşağıdaki alt bölümlerde geoit belirleme yöntemlerine ilişkin kısa bilgiler verilecektir.

1.3.1 Geoit Belirleme Yöntemlerine Bakış

Yeryüzü üzerinde herhangi bir noktanın konumunu ifade etmek için birbirine dik 3 eksen parametreleri kullanılmaktadır. Fakat kütle-çekimsel etki altında bulunan kütle-çekimsel alanda, kütleçekim merkezi yönündeki mesafeyi tanımlayacak bir referans yüzeyine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gereksinim ise temel bir yüzey ile ifade edilmelidir. Geoit belirlemenin temel amacını oluşturan şey, herhangi bir nokta için geoit yüksekliğine erişilebilecek modeli yaratabilmektir. Bu modeller yerel ölçekte geliştirilebilirken, bölgesel ve küresel ölçekte de geliştirilebilir durumdadır ve bu farklı ölçeklerin birbirleriyle karşılaştırılması doğrulukların irdelenmesi açısından önemlidir. Bu kapsamda Tscherning ve Rapp yerçekimsel ivme alanının küresel spektral tutumu ile yerçekimsel ivme alanı ve geoit yüksekliklerinin küresel ortalama hataları arasındaki ilişkiyi vermiştir ve bu ilişkiden yararlanılarak veri sıklığı-doğruluğu hakkında bir fikir edinilebilir (Ayan ve Deniz, 2000’de atıfta bulunulduğu gibi).

Bu modele göre çıkarılabilecek sonuç, bir santimetre geoidi için birkaç kilometre aralıkta $\pm 1-2$ mGal doğrulukta gravite anomalilerine ihtiyaç duyulduğudur (Ayan ve Deniz, 2000). Küresel santimetre geoidi ile ilgili birçok uluslararası kuruluş (IAG, Uluslararası Gravite Servisi-BGI vb.) küresel ölçekte çalışmalar yürütmektedir. Bu çalışmaları gerçekleştiren kuruluşlar gravite ölçmeleri, gradiometre, uydu yükseklikölçer ve astrojeodezik yöntemlere ilişkin verileri kullanarak yerel, bölgesel ve küresel gravite alanları ve geoitlerin belirlenmesi çalışmalarını yürütmektedirler ve benzer şekilde ABD’nin ulusal kuruluşlarından biri olan NGA yersel çekim alanı ve küresel geoit belirleme çalışmalarını benzer değişkenleri kullanarak Dünya Jeodezik Sistemi 1984 (World Geodetic System 1984 – WGS84) datumunda Yeryüvarı Çekim

Modeli 1996'yı (Earth Gravity Model 1996-EGM96) yayımlamıştır (Halıcıoğlu, 2015).

Ayrıca, ITG-GRACE03S çekim modeli ile geliştirilmiş 5'x5' gridinde tanımlanmış EGM2008 yayımlanmış durumdadır. EGM2008, ilk küresel gravite alanı modeli olarak yüksek doğrulukta ve ayrıntılı gravimetrik verilerle geniş bir uygulama yelpazesinde ihtiyaçlara yanıt üretebilir (Pavlis ve diğ., 2012).

1.3.2 Geoit Belirleme Yöntemleri

Geoit belirleme yöntemleri, yöntem ve örneklem kümeleri temel alındığında;

- I. Küresel Eşpotansiyel açılım kullanılarak
- II. Astrojeodezik çekül sapmaları ile
- III. Nokta gravite ölçmeleri ile
- IV. GNSS yöntemi ile
- V. Küresel Jeopotansiyel açılım ve gravite ölçmelerinin bileşimi ile
- VI. Sayısal yoğunluk modelleri ile

geoit belirleme şeklinde sınıflandırılabilir. Bu yöntemler arasında gravimetrik yöntemler 2000'li yılların başlangıcında en yaygın olarak kullanılan yaklaşımdı (Akyılmaz ve diğ., 2003).

1.3.2.1 Küresel eşpotansiyel açılım kullanılarak geoit belirleme

Gravite alanının küresel harmonik biçimi olan W ;

$$W(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \right\} + V_c \quad (1.23)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada, r yermerkezsiz yarıçap, θ enlemlerin 90 derece ile farkı, λ boylam, $P_{nm}(\cos \theta)$ tam normalleştirilmiş Legendre fonksiyonu, C_{nm} ve S_{nm} yersel çekim ivme alanının tam normalleştirilmiş küresel harmonik katsayıları, V_c merkezkaç potansiyel olmaktadır.

Geoitten sapmalar için, γ ; $P(r; \theta, \lambda)$ noktasındaki normal yerçekim değeri olmak üzere;

$$N(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r\gamma} \left\{ \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \right\} \quad (1.24)$$

bağıntıları kullanılır.

Yukarıdaki eşitliklerle ifade edilen model, Jeodezi biliminin erken dönemleri için yeryuvarı şekli ve potansiyel alanının tespiti ve yakın dönemde uydu yörünge hesabında kullanılırken, güncel uygulamalarda geoit yüksekliklerinin belirlenmesi için kullanılmaya başlanmıştır. Bugün dünyada eşpotansiyel katsayıların kullanımı ile model oluşturma çalışmaları devam etmektedir.

1.3.2.2 Astrojeodezik çekül sapmaları kullanılarak geoit belirleme

Engabeli arazi koşullarında, Sayısal Zenit Kamera Sistemi kullanıldığı astrojeodezik yöntem diğer yöntemlere göre daha üstün konumdadır. Böyle bir düzenek aracılığı ile ölçmeler hızlı, kolay ve eşgüdümlü gerçekleştirilebilmektedir. Çalışma bölgesi dışı dayanak noktaları olmadan bu başarılabilmekte ve ayrıca gravimetrik geoide göre daha az nokta ile sonuca ulaşılabilir. Gözlem süresi uzunlukları bir sorun olarak değerlendiriliyor olsa da yöntem araçlarının gelişimi ile bu sürenin kısaltılabileceği öngörülmektedir. Ancak hava durumu, gözlemleri etkileyen en önemli faktörlerden birisidir ve bu nedenle gözlemin gerçekleştirilebileceği gece sayısı kısıtlıdır (Halıcıoğlu, 2015).

1.3.2.3 Nokta gravite ölçmeleri yöntemi ile geoit belirleme

Geoit yükseklikleri Stokes entegrali ile elde edilebilir.

$$N = \frac{T}{\gamma} = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_a S(\Psi) \Delta g d\sigma \quad (1.25)$$

Δg Bouguer sapmasını ifade ederken, sapma hesabında en önemli pay arazi indirgemesine aittir. Bu yöntemle yüksek doğruluk elde edebilmek için geniş alanlarda hassas sayısal arazi modellerinin 250x250 metre kadar küçük kapalı alan içi arazi düzeltmelerinin hesaplanması gerekir. Günümüzde Fourier dönüşümü, kollokasyon, süzgeçleme teknikleri ile hesaplar eskiye nazaran daha hızlı yapılabilir. Bu yöntemde en önemli hata kaynaklarından biri yeryüzü yoğunluk değişimleri olmaktadır.

1.3.2.4 GNSS yöntemi kullanılarak geoit belirlenmesi

GNSS teknolojisinin en çok uygulama alanlarından birisi Jeodezi bilim dalında olmuştur. Engeliş'in eşitlik (1.1) olarak verilen yöntem önerisi (Engeliş ve diğ., 1984) yakın zamanlara kadar kullanışlı olmayan bu teknolojiyi kullanılır hale getirmiştir.

Bu yöntem GPS/Nivelman tekniği olarak adlandırılmaktadır. Uygulamada GNSS ağlarında normal yüksekliğinin bilindiği noktalarda o noktaya ilişkin geoit yükseklikleri hesaplanmakta, başka noktalara ait geoit yükseklikleri ise enterpolasyon yöntemleri ile belirlenmektedir (Acar ve diğ., 2006).

1.4 Küresel Bir Yükseklik Sistemine Doğru

Dünya içindeki dinamik sistemler arasındaki ilişkileri anlayabilmek ve tanımlayabilmek açısından, Jeodezinin katkısı yadsınamaz. Bu anlamda günlük pratik çözümler dışında, gezegenlerin hareketleri, gelgitler, depremler gibi süreçler açısından jeodezik gözlemler önem taşımaktadır. Bu gözlemlerin değerlendirilmesine olan güvenilirlik; güncellik, doğruluk ve homojenlik gibi önemli niteliklere bağlıdır. Küresel ya da büyük ölçekli bir çözümleme için bütünlük taşıyan referans çerçevesine ihtiyaç vardır. Küresel Jeodezik Referans Çerçevesi konumlama, zamanlama, yön belirleme, harita üretimi ve yerbilimleri uygulamaları açısından artan talebi desteklemektedir (IAG, 2016). Aynı zamanda gözlemlenebilir yersel dinamik sistem verileri açısından temel oluşturmaktadır.

Referans sistemleri yeryüzü özelinde, yeryüzü şeklini matematiksel ya da fiziksel açıdan tanımlayabilmek için gerekli olan değişkenleri ve sabitler bütünü tanımlamaktadır. Referans çerçevesi ise bu sistemin gerçekleştirilmesidir. Sistemin gerçekleştirilmesi, sistem kapsamında uygulanan istasyonların referans sistemi ile ilişkisinin kurulmasını içermektedir. Böylece yükseklik referans sistemleri kurgulanırken, referans alınacak bir yüzey (potansiyeli sıfır olarak kabul edilen yüzey, yani geoit) ve yüzeyle düşeyde ilişkisini tanımlayan bir yükseklik kavramına ihtiyaç vardır.

Küresel anlamda bir Yükseklik Referans Sistemi, dünya ile birlikte dönen bir eşpotansiyel yüzey kümesi olarak tanımlanabilir. Yükseklik Referans Çerçevesi ise, potansiyel değeri sıfır olarak kabul edilen bir yüzey referans alınarak jeopotansiyel

sayıları belirlenen istasyonlar ile birlikte yer merkezli Kartezyen koordinatlar ile tanımlanmaktadır (Ihde ve diğ., 2017).

Yeryüzü içindeki sistemler hareketli karakterli olup sürekli olarak yüzeyde deformasyonlara neden olurken, yeryüzünün şeklinin belirlenmesi açısından gelişen teknik ve uygulama araçları da referans sistemlerinin sürekli güncelleştirilmesi gerekliliğine neden olur. IAG bir anlamıyla artan uygulama teknikleri ile birlikte uygulanabilir yüksek hassasiyetlerde ve yerel ölçekte yapılan güncel çalışmaların küresel olarak birleştirilmesi yardımıyla jeodezik referans sistemlerini gerçekleştirmektedir.

Birçok çalışma (Pavlis ve diğ., 2012; Halıcıoğlu, 2015; Papadopoulos ve diğ., 2019; Peprah ve diğ., 2017; Gwaleba, 2018; Vu ve diğ., 2019) göstermektedir ki küresel anlamda, yüksek hassasiyette, eş dağılımlı istasyon ölçmeleri ya da teknikleri ile üretilmiş bir geoit henüz uygulamanın gereksinimlerini karşılayacak doğrulukta geliştirilememiştir ve her bölge için güncel geoit modeli oluşturulamamıştır. Bu nedenlerle IAG'nin en güncel amaçlarından birisi yeryüzü şekline ilişkin parametrelerin, benzer özellikte ve güncel ölçmeler neticesinde yüksek hassasiyette belirlenerek küresel jeodezik referans çerçevesinin uygulanmasıdır.

Yeryüzü üzerinde bilimsel ve teknik anlamda birçok çalışmada kullanılan konum belirleme tekniklerinde temel bir referans yüzeyi olması nedeniyle geoidin önemi büyüktür. Küresel yükseklik sistemlerinin birleştirilmesi, IAG'nin alt kuruluşu olan Uluslararası Gravite Servisi (International Gravimetric Bureau – BGI) ve Uluslararası Geoit Servisi (IgeS) tarafından yürütülmektedir (Halıcıoğlu, 2015). BGI 1951 yılında IUGG Genel Kurulunda IAG bünyesinde kurulan ve o günden bugüne kamu ve özel sektör kullanıcıları için küresel sayısal yerçekimi veritabanı oluşturmak için dünya genelinde ağırlık ölçmelerini toplayan bir kuruluştur ve sunduğu verilerin doğruluğu güncel gelişmelerle birlikte giderek iyileşmektedir (Url 1). IgeS ise 2007-2011 yılları arasında yeni geoit hesaplama üzerine Auvergne testi, EGM2008'in onaylanma sürecine katılım, GOCE verileri ile küresel bir jeopotansiyel model geliştirilmesi, eğitim alanında organizasyonlar ve çeşitli bölgelerde geoit geliştirilmesi destekleri faaliyetlerini yürütmüştür (Url 2). Ayrıca IAG bünyesinde bulunan ISG'nin (International Service for the Geoid-Uluslararası Geoit Servisi) amaçları ise küresel çapta geoit verilerini toplayarak birleştirmek, yazılımsal destekler sunmak, çalışmalarını desteklemek ve eğitim amaçlı programlar yürütmek olarak özetlenebilir (Url 3). Fakat

bu kurumlar tarafından küresel anlamda santimetre hassasiyetinde bir geoit henüz belirlenebilmiş değildir.

Küresel yükseklik referans sisteminin belirlenmesi, aynı zamanda referans elipsoidinde W_0 'ın tanımlayıcı bir parametre olması nedeni ile önemlidir. Gelgit etkilerinden dolayı değişimlerin, yükseklik referans sistemine ilişkin parametrelere güncelleme olarak yansıtılmaması nedeni ile elipsoit parametreleri ile tutarsızlık sözkonusudur.

Küresel bir geoit modelinin yüksek hassasiyetle gerçekleşmesi, aynı zamanda en güncel uygulama alanlarından birisi olan elipsoidal yüksekliklerin elde edildiği GNSS teknolojisi sonucunda ortometrik yüksekliklerin elde edilmesi nedeniyle önemlidir. Eşitlik (1.1) kullanılarak, yüksek hassasiyette bir küresel geoit modeli, yeryüzünde GNSS teknolojisi aracılığı ile yapılan ölçmelere güvenilirliği arttıracaktır.

GNSS teknolojisi ile elde edilen elipsoidal yüksekliklerin fiziksel değil geometrik yükseklik olmasına karşın küresel bir yerçekimi modeline dönük görevini 2017 yılında tamamlamış GRACE, ve onun devamı olan GRACE-FO, ya da GOCE gibi uydular küresel ölçekli yerçekimi modellerinin geliştirilmesine ve ortalama deniz seviyesinin belirlenmesine katkı sağlamaktadırlar (Drinkwater ve diğ., 2003; Tapley ve diğ., 2004; NASA-JPL, 2019).

Bu kapsamda GRACE uydusu 2002 yılında yerküre üzerindeki kütle yoğunluk dağılımını tespit etmek üzerine göreve başlamıştır. İkiz uydular olarak aralarında yaklaşık olarak 200 kilometre mesafe olan bu uydular, yerçekimi farklılıkları nedeniyle birbirlerine göre göreceli hızlarının değişimi aracılığıyla yeryüzü kütle yoğunluğundaki değişimlerin belirlenmesine 15 yıl boyunca katkıda bulunmuşlardır. Yeryüzündeki su kütlelerinin değişimlerini santimetre mertebesinde algılayabilecek hassasiyette, ömürleri boyunca deniz seviyesi değişimleri ve yerin kütle-çekimsel modeli hakkında bilgi vermişlerdir.

Benzer şekilde GOCE uydusu da Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından görevine başlamış ve santimetre doğruluğunda küresel geoit modeli geliştirmek için 2009-2013 yılları arasında birçok modele olanak sunacak verileri sağlayarak hizmet vermiştir (Peidou ve Pagiatakis, 2019).

Yapılan çalışmalar sonucunda EGM96 bir küresel global jeopotansiyel model olarak oluşturulmuş ve 0.5 metreden daha iyi doğruluk sınırları içinde geliştirilmiştir.

Günümüzde ise Dünya'nın herhangi bir noktasında ± 15 cm doğruluğa sahip geoid yüksekliklerinin elde edilebildiği EGM08 modeli geliştirilmiştir (Pavlis ve diğ., 2012).

Yılmaz ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada, GRACE, GOCE vb. uydu verileri ile çeşitli yöntemlerle oluşturulan küresel jeopotansiyel modeller EGM08, EIGEN6C4, GECO, GGM05C, GOCO05C küresel modelleri iç Ege Bölgesi'nde GNSS/Nivelman geoidi ile karşılaştırılmış; EGM08 ± 0.2803 m karesel ortalama hata ile GNSS/Nivelman geoidine en iyi uyum sağlayan geoid modeli, EIGEN6C4, GECO, GGM05C, GOCO05C sırasıyla birbirini takip eden modeller olmuştur.

Küresel bir yükseklik referans sisteminin belirlenmesinin, büyük mühendislik projeleri (özellikle kıtalararası projeler) açısından önemli olacağı aşîkardır. Jeodezinin ana sorunlarından biri olan santimetre hassasiyetinde bir geoidin belirlenmesi yakın gelecekte de esas konulardan biri olarak gözükmektedir.

Bu kapsamda 2. Bölüm'de Türkiye'de yükseklik sistemleri ve doğrulukları araştırılmış ve yapılan çalışmalar incelenmiştir.

3. Bölüm'de ise 4. Bölüm'e de bir hazırlık niteliği taşıyarak Genel Görelilik Teorisinin (GGT) matematiksel ve fiziksel kavramsal temelleri incelenmiştir. GGT salt fiziksel değil, evrenin geometrisi ile de derinden ilişkili bir teoridir. Bu nedenle GGT'ye ilişkin matematiksel temel kavramlara Ekler bölümünden ulaşılabilir. Fiziksel kavramlar olarak ise Newton Kütleçekim Yasasının (NKY) zaman değişkeninden bağımsız olması ele alınarak, Einstein Alan Denklemleri, Post Newtoncu Formalizm, IAU 2000 çözümleri ve alan denklemlerinin Schwarzschild çözümü incelenmiştir.

4. Bölüm'de Kronometrik Nivelman Yöntemi'ne ilişkin teorik temeller ele alınarak, sistemler ve yöntemlerle birlikte yöntemin uygulamaları incelenmiştir.

Sonuç olarak yöntemin gelecekte küresel yükseklik sistemlerine olabilecek katkıları ve Türkiye'nin güncel gelişmelere dönük entegrasyonu tartışılmıştır.

2. TÜRKİYE’DE ZAMANSAL-KONUMSAL AĞLAR VE ULUSAL YÜKSEKLİK REFERANS SİSTEMİ

Türkiye’de jeodezik ağlara ilişkin çalışmalar 20. yüzyılın ikinci çeyreğinde başlamış olup, geoit belirleme çalışmaları ise aynı yüzyılın dördüncü çeyreğine denk gelmektedir. Türkiye’nin Uluslararası Atomik Zaman (TAI) kulübü üyeliği ile birlikte 1995 yılında atom saatleri ile zaman belirleme ve uluslararası sisteme entegrasyonu sağlanmıştır.

2.1 Türkiye’de Ulusal Jeodezik Ağlar

Türkiye’de Düşey Kontrol Ağı çalışmaları 1935 yılına dayanmaktadır. Antalya’da kurulan mareograf istasyonu ile ortalama deniz seviyesi belirlemeleri yapılmaya başlanmış, geometrik nivelman ölçmeleri ile düşey referans sistemine dönük çalışmalar 1970 yılına kadar devam etmiştir. 1956-58 yılları arasında HGK tarafından Türkiye Temel Gravite Ağı (TTGA) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Fakat gravite ağı çalışmalarının geç başlaması ve Uluslararası Gravite Standardizasyon Ağı’na entegrasyonun 1971 yılında sağlanması, nivelman ölçmeleri ile değerlendirilmelerin geç yapılmasına neden olmuştur. 1973-93 yıllarında geometrik nivelman ölçmeleri ile düşey kontrol ağı yenilenmiş, onarılmış ve aynı zamanda gravite ölçüleri gerçekleştirilmiş ve neticede TUDKA-92 oluşturulmuştur. Gravite ölçüleri IGSN71 sistemine yakın Düzenlenmiş Potsdam Gravite Datumunda yapılmıştır. TUDKA-92’de meydana gelen uyumsuz geçki, değerlendirme dışında kalan noktaların tekrar değerlendirilmesi ve kimi noktaların değerlendirme dışı tutulması neticesinde ek ölçmelerle birlikte TUDKA-99 oluşturulmuştur. Benzer şekilde TTGA-56 doğrulukları yetersiz olması nedeniyle 55 noktalı TTGA-99 çalışmaları 1993-99 yılları arasında yapılmıştır. Antalya’da 1936-71 yılları arasında yapılan mareografik ölçmeler sonucu deniz seviyesi ölçülerinin aritmetik ortalaması ise TUDKA için düşey datumu oluşturmuştur (Demir ve Cingöz, 2002).

17 Ağustos 1999 İzmit Depremi ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri nedeniyle Bursa, İstanbul, İzmit, Adapazarı, Zonguldak, Düzce ve Bolu şehirlerinde bulunan 14 adet I.

ve II. Dereceden noktalarda Mayıs-Eylül 2000 tarihleri arasında nivelman ve gravite ölçmeleri yenilenmiştir.

TUDKA'nın dengelenmesinde yükseklik sistemi olarak jeopotansiyel sayılar seçilerek, (1.18) eşitliğinde belirtildiği üzere yükseklik farkları nivelman ve gravite ölçmeleri aracılığı ile hesaplanmıştır. 1936-71 yılları arasında yapılan ölçüler sonucu elde edilen ortalama deniz seviyesi, geçerli yöntemler uygulanmadığı için sistematik etkilerle yüklüdür ve bunun sonucunda bir yükseklik farkı meydana gelmiştir. Ayrıca Samsun ortalama deniz seviyesi ile Akdeniz ortalama deniz seviyesi arasında 0.406 santimetrelilik bir fark meydana gelmektedir. TUDKA-99 ağı noktalarında jeopotansiyel sayılar ile yapılan dengeleme sonucunda jeopotansiyel sayı duyarlılıkları ± 0.3 cm ile ± 9 cm arasında değişmektedir (Demir ve Cingöz, 2002).

Türkiye'de ortalama deniz seviyesi izleme çalışmaları ise Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından gerçekleştirilmektedir. 20 mareograf istasyonu ile 30 saniyelik ölçmelerin 15 dakikalık ortalamaları ile belirlenmiş Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) kıyı hattı boyunca meydana gelen deniz seviyesi değişimlerini TUDKA için altyapı kurulacak şekilde sağlamaktadır.

Ayrıca Türkiye'de tektonik hareketler nedeniyle, nokta konumlarında yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Bu durum güncel bir düşey ve yatay datum sorununa neden olmaktadır. Bu kapsamda yersel teknikler kullanılarak oluşturulan Türkiye Ulusal Datumu-1954 (TUD-54) hem ölçülerin görece düşük doğrulukları hem de meydana gelen yeryüzü hareketleri nedeniyle yeterli güvenilirliğe sahip bir sistem olmaktan gittikçe uzaklaşmıştır. Aynı zamanda benzer durum, ölçülerin 20 yıllık dönemlerle yenilendiği ve noktalarının tahrip olması, fiziki olarak yerinde mevcut olmaması gibi nedenlerle güncel ve yeterli olmayan düşey kontrol ağı için de geçerlidir. GNSS teknolojisinin 1980'li yılların sonunda yaygın olarak kullanılması ile birlikte yeni bir jeodezik ağa olan ihtiyaç artmıştır. Bu kapsamda GNSS teknolojisine dayalı, koordinat, ortometrik yükseklik ve geoit ondülasyonları bilinen eşdağılımlı bir ağ olarak Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) kurulmuş ve ölçmeleri 1997-99 yılları arasından tamamlanmıştır. 2000 yılına gelindiğinde İzmit ve Düzce depremleri nedeni ile 159 GPS ölçüsü, aynı zamanda GPS/Nivelman geoidi çalışmalarına temel oluşturması açısından deprem bölgesi dışında kalan bölgelerde 2001 yılına kadar ölçmeler yapılmaya devam edilerek TUTGA-99A güncel ağ olarak tamamlanmıştır (Ayhan ve diğ, 2002).

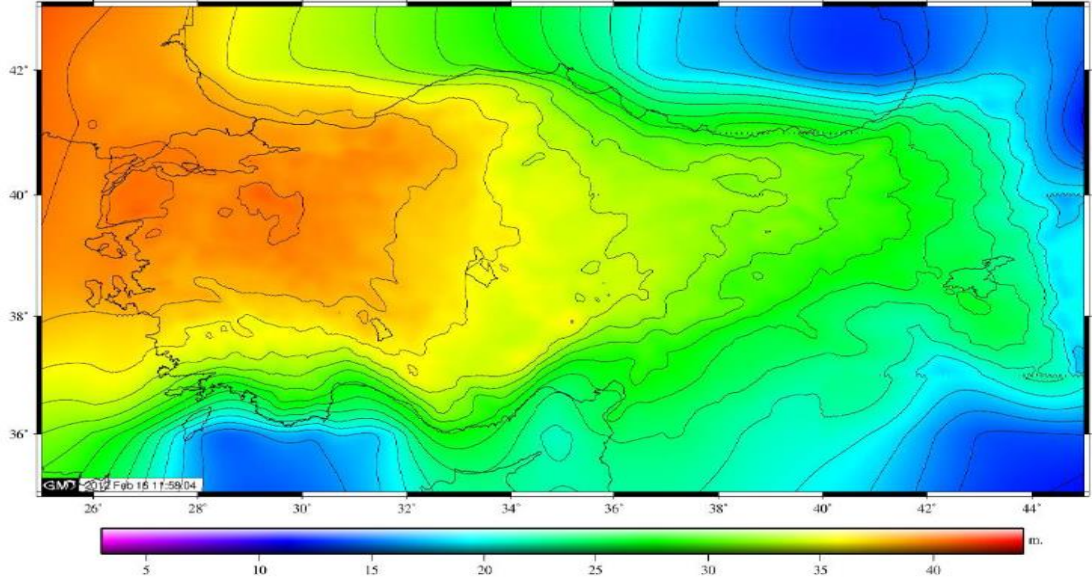
Gerçek zamanlı bağıl konum belirleme tekniğinin ölçme doğruluklarını arttırması neticesinde sabit istasyonlara dayalı bir ağ fikri gelişmiş ve dünya genelinde CORS (Continuously Operating Reference Station) ağları geliştirilmeye başlanmıştır. Eren'e göre Türkiye'de 2008 yılında bu tekniğe dayalı Türkiye Ulusal Sabit GPS Ağı (TUSAGA-Aktif), TUBİTAK Kamu ve Ar-Ge projeleri kapsamında TKGM ve HGK müşterekliği ve İKÜ yürütücülüğünde ITRF2008 datumuunda 146 adet istasyon ve 2 adet kontrol merkezi ile hizmet vermeye başlamıştır (Ateş, 2011 atıfta bulunulduğu gibi).

Jeodezik referans noktalarının koordinat ve hızlarının doğru belirlenebilmesi için güncel, tutarlı, uluslararası ağlara dayalı ve ortak bir referans sisteminde tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Harita Genel Müdürlüğünce, gerek belirli yıllarda yapılan periyodik gözlemlerle oluşturulan Türkiye Ulusal Temel GPS Ağında, gerekse 365 gün 24 saat sürekli gözlem yapan ve kadastral anlamda çalışmalara altlık teşkil eden TUSAGA-Aktif sisteminde toplanan verilerin kalite kontrolü, gözlemlerin kaba hatalardan arındırılması, zaman serisi analizleri ve ortak bir referans sisteminde koordinat ve hızlarının belirlenmesi çalışmaları sürekli bir faaliyet olarak sürdürülmektedir.

2.2 Türkiye'de Ulusal Geoit Belirleme Çalışmaları

Ülkemizde ulusal yükseklik referans sistemine ilişkin olarak çalışmalar 1976 yılında başlamıştır. O günden bugüne de Jeodezi alanında bu konuda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. 1976'da gerçekleştirilen ilk çalışmada astro-jeodezik yöntemle bir geoit hesaplanmıştır (Şekil 2.1). Çalışma kapsamında üç tip ağ kurulmuştur. Bunlardan ilki bağlantı kenarları uzunluğu 87 km olan 30 çevrimlik I. Dereceden zincir ağıdır. Batı-Doğu doğrultusunda 38° paralelinde 24 çevrim, 2 köşegenli dörtgen ve 63 üçgen kesişimi ile ortalama kenar uzunluğu 93 kilometre olan ikinci bir zincir ağı meydana getirilmiştir. İlk örneklem kümesindeki kenar kesişimleri ihmal edilerek ortalama kenar uzunluğu 111 kilometre olan 173 üçgene sahip üçüncü örneklem kümesi elde edilmiştir. Geoit yükseklikleri hesaplanan 106 nokta ile geoit, enterpolasyon sorunu barındırmıştır. Engebeli arazilerde sorunun daha da arttığı sonuçları ortaya çıkmıştır. Karşılaşılan sorunlar sonucu bağlantı kenarı boyunca geoit kesitinin kübik parabol ifadesi önerilmiştir. Hesaplanan geoidin diğer geoitler ile karşılaştırılması sonucu Asya Geoidi ile iyi uyum göstermediği, astro-jeodezik yöntemle hesaplanan

hesap geliştirilerek ve ulusal çapta uygulanarak TG-91 elde edilmiştir (Şekil 2.2). Örneklem kümesi veri sıklığı ve Sapma Dereceli Ayırık fark Örneklem Kümesi'nde belirtilen dalga boylarına sadık kalan bir örneklem kümesidir. Doğruluk araştırmasının yapılması için 32 GPS gözlem noktasından 11'i seçilerek GPS/Nivelman tekniği ile hesaplanan yükseklikler karşılaştırılmış ve TG-91 geoidinin 45 kilometre ortalama kenar uzunluğunda 1.5-2.1 ppm doğruluk sağladığı öngörülmüştür (Direnç ve diğ., 2012).

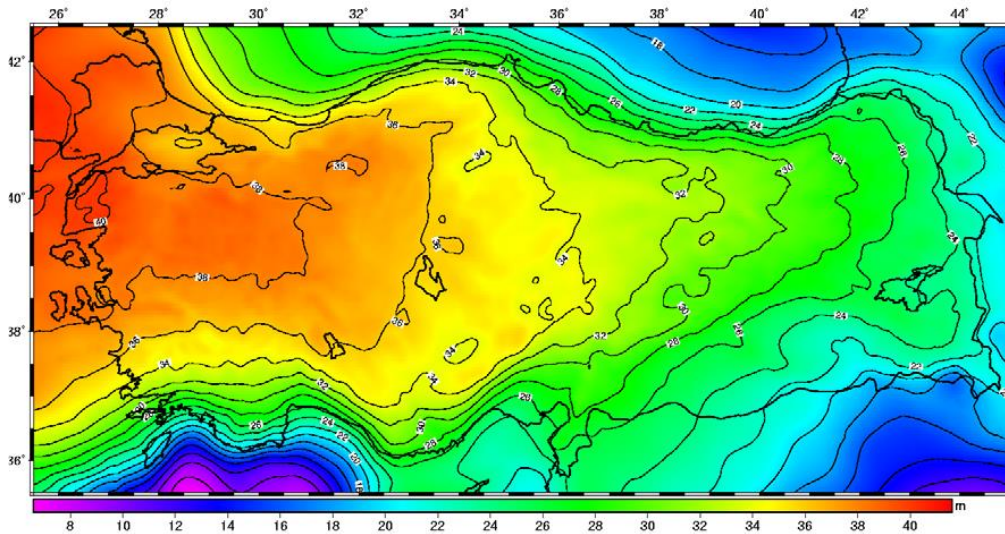


Şekil 2.2 : Türkiye Geoidi 1991 (TG-91) (Direnç ve diğ., 2012).

Bir diğer çalışma 1999 yılında gerçekleştirilmiştir. Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı'nın (TUTGA) kurulması sonucu sağlıklı elipsoid yükseklik bilgileri üretilmeye başlanmıştır. TUTGA'ya ait 197 noktası için Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağına (TUDKA) bağlı olarak gerçekleştirilen geometrik nivelman verilerinin de kullanılmasıyla ortometrik yükseklikler elde edilebilmiştir. Elde edilen veriler ile bir GPS/Nivelman geoidi oluşturulmuş, uzun dalga boyunda TG-91 ile uyumluluk sorununun yanı sıra bu dalga boyunda kayıklık ve eğim gibi sorunlar da yaşanmıştır. Bu uyumluluk sorununun giderilmesi amacıyla yapılan Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999 (TUTGA-99) çalışması sonucu Türkiye Geoidi-1999 (TG-99) örneklemlendirilmiştir. Örneklem kümesinin oluşturulmasında 187 GPS/Nivelman noktası 2001 yılındaki ölçmelerin 10 tanesinin eklenmesiyle birlikte 197'ye çıkmış, bu noktalara ilişkin TUTGA-99A konum değişkenleri ve geoid yükseklikleri alankesişim kütüğünden hesaplanarak TG-91 ve GPS/Nivelman geoidi arasındaki farklarla iki örneklem kümesinin birleştirilmesinde ölçü değerleri sorunu giderilmiştir. Farkların

ortak eğilimi ölçülerden çıkarılarak değişimler hesaplanmış, hesaplanan değerler TG-99A'nın hesaplanmasında kullanılmıştır. TG-99A geoit yüksekliklerinin emterpolasyonu ile GPS/Nivelman yüksekliklerinin karşılaştırılması sonucu iç kontrol, 122 denetim noktasında TG-99A geoit yüksekliklerinin emterpolasyonu ile GPS/Nivelman yüksekliklerinin karşılaştırılması sonucu dış denetim ve tüm bu kontrol noktaları ile alankesişim köşelerinde karşılaştırma sonucunda tam denetim gerçekleştirilmiştir. Geoit örneklem kümesinin sonuçta ± 10 cm iç duyarlılık ve ± 15 cm doğruluğa sahip olduğu tespit edilmiştir (Direnc ve diğ., 2012).

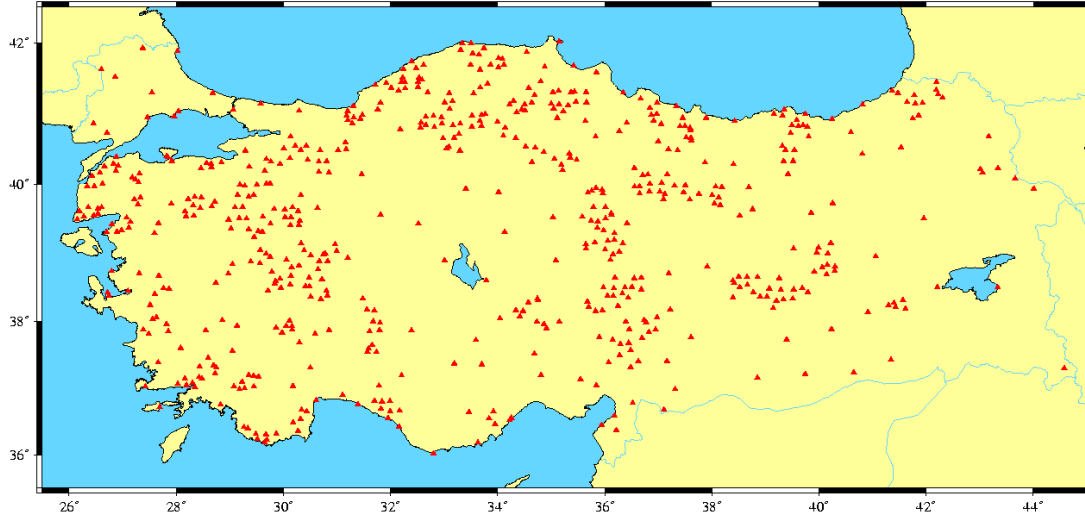
Bir diğ er geoit örneklem kümesi ise 2003 yılında geliştirilen Türkiye Geoidi-2003'tür (TG-03) (Şekil 2.3). Kaldır-Yerine Koy ve verilerde EKKK yöntemleri ile hesaplar gerçekleştirilmiştir. 61597 noktadaki yerçekimsel ivme verileri ile yüzeydeki sapmalar çalışmada kullanılmıştır. Yerçekimsel ivme değerleri Türkiye Temel Gravite Ağına (TTGA) dayalıdır ve Uluslararası Standart Yerçekimsel İvme Ağı-1971 (IGSN71) başlangıç değerlerinde ± 3 mGal duyarlılık olduğu öngörülmektedir. GRS80 sisteminde serbest hava sapmaları hesaplanmış, veriler Türkiye sınırları içinde sınırlı kalmış, yersel taslaksı yükseklikler GTOPO30 sayısal yükselik modeli verilerinden elde edilmiştir. Küresel yer potansiyel model olarak Yeryuvarı Jeopotansiyel Modeli 1996 (EGM96) kullanılmıştır. TG-03 Geoit hesabında 450x450 m gibi yüksek çözünürlüklü sayısal arazi örneklem kümesi 1:25000 ölçekli haritaların sayısallaştırılması sonucu elde edilmiştir. Kıyı hattında batimetrik veriler kullanılmış, TG-99A hesabı için kullanılan 197 GPS/Nivelman noktası kullanılarak uyumlu yüzey sağlanmıştır. Düzeltme değerleri büyük olan beş nokta hesaplamalardan çıkartılmıştır.



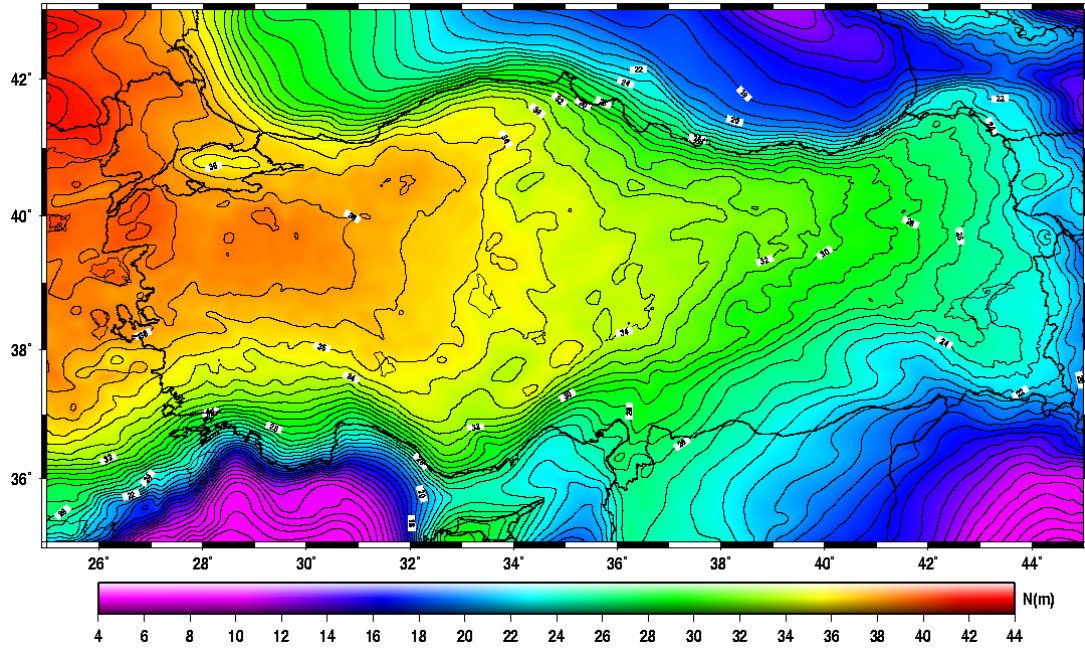
Şekil 2.3 : Geoidi-2003 (TG-03) (Direnc ve diğ., 2012).

Kıyı derinlik ölçmeleri ile geoit kıyı doğruluğu öncüllerine göre daha iyi olan TG-03 teknolojik yöntemlerin kullanımı ile birlikte daha bütüncül sonuçlar içermektedir. Son aşamada yerçekimsel ivme geoidi ve GPS/Nivelman geoidi birleştirilerek karma bir örneklem kümesi elde edilmiştir. TG-03'ün doğruluk denetimi TG-99A'ya benzer olarak gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak Helmert ortometrik yüksekliklerinin ± 9 cm doğrulukla elde edilebilirliği öngörülmüştür (Direnc ve diğ., 2012).

Son çalışma ise Türkiye Hibrid Geoidi 2009 (THG-09) olmuştur (Şekil 2.5). Çalışmalara 2008 yılında veri elde edilmesi ve jeopotansiyel örneklem kümesi yayımlanması ile başlanmıştır. Çalışmada yer potansiyel modeli olarak EGM08, kara gravite ölçüleri, denizlerde uydu yükseklikölçer yerçekimsel ivme sapmaları, sayısal arazi örneklem kümeleri ve GPS/nivelman geoit yükseklikleri birleştirilerek Kaldır-Yerine Koy yöntemi ile Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılmış ve yeni gravite geoidi hesaplanmıştır. Harita Genel Müdürlüğü, Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı Genel Müdürlüğü ve Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından 262212 noktada yerçekimsel ivme ölçmeleri yapılarak ölçmelere ilişkin sapmalar kullanılmıştır. Bütün noktaların Türkiye Temel Gravite Ağı'na bağlı, GRS80 normal yerçekimsel ivme alanına göre ve düzenlenmiş Potsdam başlangıç değerlerinde ± 3 mGal duyarlık içerdiği öngörülmektedir. Hesaplanan geoit HGM tarafından ölçmeleri gerçekleştirilen 203, TKGM'den elde edilen 2714 adet GPS/Nivelman noktasından seçilen 2464 nokta ile ülke yükseklik sistemiyle ilişkilendirilmiştir. 635 nokta GPS/Nivelman geoidi için, 1839 nokta ise dış kontrol için kullanılmıştır. THG-09 çalışmaları sırasında GPS/nivelman geoidi için 625 GPS/nivelman noktası (Şekil 2.4) kullanılarak hesaplar gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan geoidin TUDKA ile uyumlu olmadığı, bu sorunun giderilmesi için GPS/Nivelman geoit yüksekliklerinin birleştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Birleştirilen verilerle elde edilen karma geoit örneklem kümesi ulusal yükseklik sistemleri için kullanılabilir niteliktedir. THG-09'un iç ve dış kontrolleri sonucu GPS ölçmeleri ile elde edilecek ortometrik yüksekliklerin ± 8.38 cm doğruluğunda olacağı öngörülmüştür (Direnc ve diğ., 2012).



Şekil 2.4 : GPS/nivelman geoidinin hesaplanmasında kullanılan 625 Nokta (Direnç ve diğ., 2012).



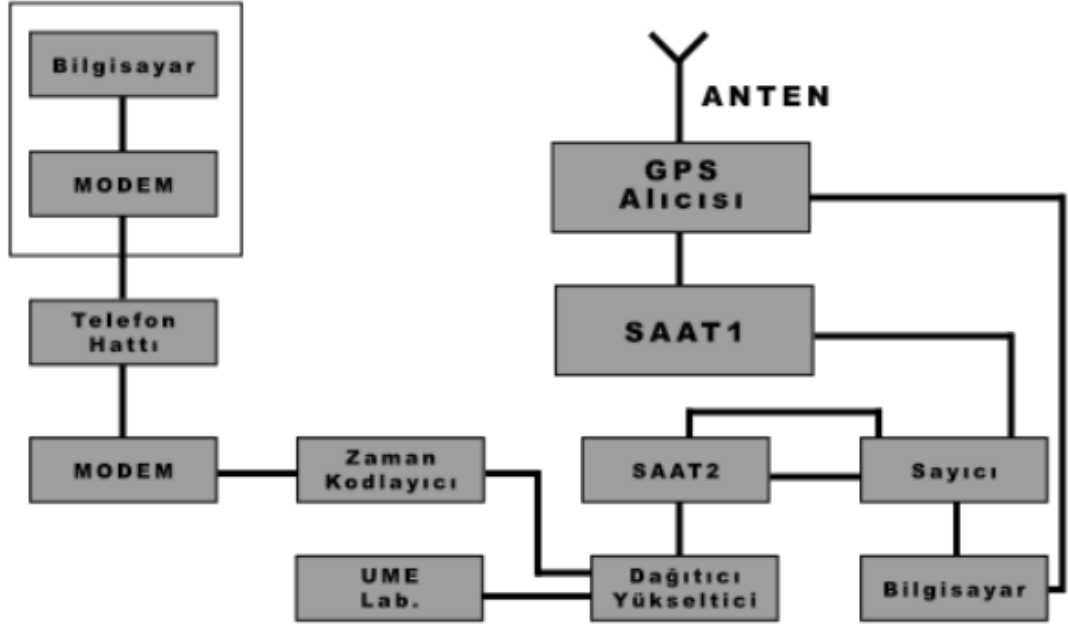
Şekil 2.5 : Türkiye Hibrid Geoidi 2009 (THG-09) (Direnç ve diğ., 2012).

2.3 Türkiye’de Zaman Referans Ölçümleri

Türkiye’de zaman standartının belirlenmesine ilişkin lazer ışığı ile Cs atomlarının soğutulmuş atom fışkıması temelli mikrodalga frekans sistemlerine ilişkin çalışmalar 6×10^{-13} kararlılığına varan ölçüde başlatılmış ve Eylül 1997 yılından itibaren BIPM TAI kulübü üyeliği başlatılarak veriler uluslararası ölçekte karşılaştırılmıştır (Hamid, R. ve diğ., 1995a; Hamid, R. ve diğ., 1995b)

Detayları Bölüm 4.2.2.2’de verilen GNSS ile ortak görüş teknikleri ile UME saatleri ile UTC zaman farklılıkları incelenerek bu yolla BIPM’ın TAI zaman ölçeğine katkıda bulunmaktadır. Sistemin detaylarına ilişkin blok şema Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Mikrodalga Zaman ve Frekans Sistemi (Hamid ve diğ., 1997).



HP 5071A sezyum saati referans olarak kullanılarak, UTC zaman farkları sürekli izlenilerek karşılaştırmalar yapılmaktadır. (Hamid ve diğ., 1995a)

Aynı zamanda elde edilen zaman bilgisi, Zaman Kodlayıcı, modem ve telefon hattı aracılığıyla, zaman bilgisi talep eden kuruluşlarla senkronize edilir (Hamid ve diğ., 1999).

UME laboratuvarı 2019 yılı itibarıyla hala zaman yayma yetkili laboratuvarlardan biri olarak hizmet vermektedir. (BIPM, 2018)

Çalışma kapsamında yapılan kaynak taramaları ve TUBITAK UME Zaman ve Frekans Laboratuvarı personeli ile yapılan görüşmeler sonucunda, Türkiye’de mevcut atom saat sistemleri ve ağları konusunda güncel bir kaynağa rastlanılamamıştır.



3. GENEL GÖRELİLİK TEORİSİNİN TEMELLERİ

Kronometrik nivelman yöntemi görelilik ilişkilerine dayanmaktadır. Bu nedenle bu bölümde temel fiziksel ve matematiksel kavramlara yer verilecektir. Ryder (2009) ve Carroll (2014) genel görelilik konusunda geniş bir perspektif oluşturmaktadır. Kavram ve gösterimlere ilişkin detaylı bilgilere ise Ekler bölümünden erişilebilir.

3.1 Fiziksel ve Matematiksel Kavramsal Temeller

Hareketli cisimlerin görelî referans sistemleri arasındaki ilişkisi de Andrade Martins'e göre genellikle Galilei'nin 1632 tarihli "*Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*" çalışmasına atfedilse de benzer tartışmalar 1377 yılında Nicole Oresme, 1584 yılında Bruno ve 1624 yılında Galileo tarafından yapılmıştır (Abreu ve Guerra, 2008'de atıfta bulunulduğu gibi). Galileo'nun görelilik ilişkileri, Newton mekaniği ile uyumluluk gösterse de Maxwell tarafından 1865 yılında oluşturulan Maxwell Denklemleri bu dönüşümlerle uyumsuzdur (Sasso, 2007). Maxwell denklemlerine göre elektromanyetik dalgalar ışık hızında yayılmaktadır, fakat bu sabitlik referans çerçevesi sorununu ortaya çıkararak, uzayın dokusunu oluşturduğu öne sürülen ether kavramının ortaya atılmasına neden olmuştur. Fakat 1887 yılında gerçekleştirilen Michelson-Morley Deneyi, uzay dokusunun etherden oluşmadığını göstermiştir (Michelson ve Morley, 1887). Deneye göre, dünya hareketi yönünde bir ışın gönderilir ve ışın yarı geçirgen ayna kullanılarak dünyanın hareket yönüne paralel ve dik iki elektromanyetik dalga olarak ayrılarak eşit mesafedeki aynalara ulaştırılırlar. Galileo'nin görelilik kuramına göre gönderilen ışınlar dünyanın hareketinden kaynaklı olarak zamansal farklılık göstermelidir. Deney birçok kez tekrar edilmesine rağmen bu fark saptanamamıştır.

Fizikte gerçekleşen bu gelişmeler neticesinde 1905 yılında Özel Görelilik ve 1915 yılında Genel Görelilik teorileri ortaya atılmıştır (Ryder, 2009). Einstein'ın özel görelilik teorisi Newton mekaniğinin mutlak uzay anlayışında değişikliğe neden olmuştur. Yeni bir teoriye dönük ihtiyaç neticesinde iki önemli çalışma Hendrik Lorentz ve Einstein tarafından bu yıllarda yayımlanmıştır. Lorentz'in teorisi sonuçlara

yönelik olarak, toerinin daha sonradan matematiksel altyapısını oluştursa da Einstein'ın çözümü fiziksel algılayışta değişiklik yaratarak evren işleyişine ilişkin yeni bir mantığı ortaya koymuştur. Bu mantık ışık hızının her sabit referans sistemi için aynı olmasıdır. Bu mantık çerçevesinde Einstein mutlak uzay kavramı yerine görelî uzay kavramını literatüre sokmuştur. Böylece uzay ve zaman birbirinden ayrık olarak değil içiçe geçmiş olarak algılanmaya başlanmıştır.

Özel görelilik teorisi ivmesiz referans çerçevelerinde uygulanırken, ivmeli referans çerçevelerini kapsamamaktadır. Bu nedenle genel görelilik teorisi ivmeli referans çerçeveleri için özel göreliliğin genelleştirilmiş halidir. Teoriye göre, Einstein ivmeli referans çerçeveleri ile kütle-çekimsel ivme alanının benzer olduklarını kabul ederek eşdeğerlilik prensibini ortaya atmıştır.

Newton'ın kütleçekim kanunu yüz yıllar boyunca birçok disiplinde kullanılmıştır. Klasik Jeodezi de bu kanun üzerinden inşa edilmiştir. Eşitlik (1.2)'ye göre, sonsuz hızda ilerlemekte olan kütleçekim kuvvetine erişilmektedir. Yani denklem t anında m kütleli cisim tarafından hissedilen, aynı t zamanında M kütleli cisim tarafından etkileyen kütleçekim kuvvetini vermektedir. Kütleler zamanın birer fonksiyonu olarak;

$$F = -\frac{M(t)m(t)G}{r^3}r \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir.

Einstein'ın özel görelilik teorisi Newton Kanunu'nda zaman ve ışık hızının sabitliği eksikliklerini ortaya koymuştur. Elektromanyetizma ve özel görelilik kapsamında öngörülen zaman gecikmesi denklemde yer almamaktadır. Bunu elde etmek açısından $M(t)$ yerine, m kütleli cisme t anında etkileyen ve M kütleli cisim tarafından $\left(t - \frac{r}{c}\right)$ süre önce sahip olunan kütle, yani $M\left(t - \frac{r}{c}\right)$ düzeltmeleri gerçekleştirilmelidir (Ryder, 2009). Newton fiziğinde, kütleçekim yasasına göre kütleçekim dalgalarının sonsuz hızda ilerlemesi gerekliliği sorunu, Einstein'ın genel görelilik kuramı ile aşılmıştır. Bu kuramsal katkının sonucunda elektromanyetik dalgaların kütle-çekimsel alanlarda aynı potansiyele sahip yüzeyleri takip etmesi gerektiği görülmüştür. Bu öngörü beraberinde birçok uygulamalı alana öncülük etmiştir.

Genel görelilik kuramı, hassas hesaplarda daha doğru sonuç veren bir denklem sunmaktadır. Fiziksel Jeodezi'de, Newton Fiziği üzerine kurulu olan temel

hesaplamalarda artan ölçüde Newton Fiziği yerine Genel Görelilik kullanılmaya başlanmaktadır.

Klasik Jeodezi’de ölçmeler, zaman parametresinin ayrık ölçmeleri ile tanımlanır. Ayrıca uzay ve zamanın mutlaklık olgusu vardır. Fakat görelilik, konum ve zaman parametrelerini bağımlı hale getirmiştir. Büyük hassasiyet gerektirmeyen işlerde görelilik kuramı uzun hesaplamalar nedeniyle ekonomik değildir; fakat yüksek hassasiyet gerektiren ölçmelerde göz ardı edilmemelidir. Bunun en güncel ve bilinen örneği GNSS sistemlerinde kullanılan atomik saatler ile uzun süreli kütle-çekimsel etkilerin ve uydu hızları etkisinin tayin edilerek alıcı-verici arasındaki sinyallere düzeltme olarak getirilmesinde kullanılmasıdır.

Benzer şekilde birim zamanın belirlenmesi konusunda birçok çalışma hala sürmekte iken; bugün uzay araçları ve uçakların rotalarının belirlenmesi, görelilik teorisi gereğince 2 nokta arasındaki en kısa yol olan uzay eğrileri (jeodezikler ya da jeodezik eğriler) aracılığı ile sağlanmaktadır. 2 nokta arasındaki yol mesafesi ise, eğrilerin üzerinden geçtiği topolojik olarak manifold olarak isimlendirilen objeler ve manifoldun yerel geometrisini belirleyen metrikler üzerinden ifade edilmektedir. Genel görelilikte uzay-zaman ise 4 boyutlu manifold ve Lorentz Metriği g parametreleri ile tanımlanmaktadır.

Einstein, kütle-çekimsel etki neticesinde uzay-zaman dokusunda meydana gelen değişimi hareket denklemleri olarak tariflemiştir. Bu denklemler Einstein alan denklemleri olarak

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \mathcal{R} g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (3.2)$$

şeklinde genelleştirilmiştir(Rindler, 2006). Burada Ek B’de açıklandığı gibi $\mathcal{R}_{\mu\nu}$ Ricci Eğrilik Tensörü, $\mathcal{R}$ Ricci Eğrilik Skaleri, $g_{\mu\nu}$ metrik tensör ve $T_{\mu\nu}$ stres enerji tensörüdür.

Genel görelilik teorisinin fiziksel ve matematiksel temelleri Einstein alan denklemlerine dayanmaktadır. Denklem, enerji varlığında uzay-zamanın nasıl eğildiğinin ifade edilmesidir (Pe’er, 2014a). Bu nedenle denklem setinin kütle varlığında çözüme ulaştırılması gerekmektedir. Bu denklemlerin Schwarzschild çözümü, Reissner–Nordström çözümü, Kerr çözümü gibi çeşitli çözümleri

bulunmaktadır (Bičák, 2000). Bu çözümlerle Einstein alan denklemlerinden anlamlı bir formda hareket denklemlerine ulaşılması hedeflenmiş olur.

Uzay-zaman metriğinin belirlendiği çeşitli teorilerin farklılıkları katsayılarla dayanmaktadır ve K. Nordtvedt(1968) ile Will (1974) tarafından Post Newtoncu Formalizm (PPN) katsayıların genelleştirilmesini içerecek parametreler seti olarak önerilmiştir. Ayrıca IAU, dünya çevresinde veya güneş sisteminde Einstein denklemlerinin çözümlerine ilişkin metrik ifadelerin genelleştirilmesine ilişkin parametreler seti yayımlamıştır (IAU, 2000).

3.1.1 Einstein Alan Denklemlerinin Schwarzschild çözümü

Schwarzschild çözümü statik ve küresel simetrik bir cismin kütle-çekimsel alan nedeniyle çevresinde oluşturduğu metriği vermektedir (Pe'er, 2014b). 2 nokta arasındaki mesafe $ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$ ve $m = \frac{GM}{c^2 r}$ olmak üzere, kutupsal koordinatlarla Schwarzschild çözümünde uzay-zaman aralığı

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2m}{r}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \quad (3.3)$$

olarak ifade edilir.

3.1.2 Post Newtoncu Formalizm metrik parametreler

PPN'de metrik ifadeler, Υ ve β Eddington-Robertson-Schiff parametreleri; ξ , α ile γ diğer Newton-sonrası parametreler olmak üzere aşağıdaki gibi genelleştirilmiştir (Will, 2006):

$$\begin{aligned} g_{00} = & -1 + 2U - 2\beta U^2 - 2\xi\Phi_w + (2\Upsilon + 2 + \alpha_3 + \gamma_1 - 2\xi)\Phi_1 \\ & + 2(3\Upsilon - 2\beta + 1 + \gamma_2 + \xi)\Phi_2 + 2(1 + \gamma_3)\Phi_3 \\ & + 2(3\Upsilon + 3\gamma_4 - 2\xi)\Phi_4 - (\gamma_1 - 2\xi)A \\ & - (\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)w^2 U - \alpha_2 w^i w^j U_{ij} \\ & + 2(\alpha_3 - \alpha_1)w^i V_i + O(\epsilon^3) \end{aligned} \quad (3.5a)$$

$$\begin{aligned}
g_{0i} = & -\frac{1}{2}(4Y + 3 + \alpha_1 - \alpha_2 + \gamma_1 - 2\xi)V_i \\
& -\frac{1}{2}(1 + \alpha_2 - \gamma_1 + 2\xi)W_i - \frac{1}{2}(\alpha_1 - 2\alpha_2)w^i U \\
& - \alpha_2 w^j U_{ij} + O(\epsilon^{5/2})
\end{aligned} \tag{3.5b}$$

$$g_{ij} = (1 + 2\gamma U)\delta_{ij} + O(\epsilon^2) \tag{3.5c}$$

Burada O sembolü, ilgili dereceli katsayılar ve daha yüksek derecelilerin ihmal edildiğini göstermektedir (Taşdemir, 2019).

3.1.3 IAU 2000 Çözümlerine göre metrik parametreler

IAU 2000 çözümlerine göre Barisentrik metrik katsayıları g için w Newton potansiyeli ve yermerkezcil metrik G için W Newton potansiyeli olmak üzere;

$$g_{00} = -1 + \frac{2w}{c^2} - \frac{2w^2}{c^4} \tag{3.5a}$$

$$g_{0i} = -\frac{4}{c^3} w^i \tag{3.5b}$$

$$g_{ij} = \delta_{ij} \left(1 + \frac{2}{c^2} w \right) \tag{3.5c}$$

ve

$$G_{00} = -1 + \frac{2W}{c^2} - \frac{2W^2}{c^4} \tag{3.6a}$$

$$G_{0a} = -\frac{4}{c^3} w^a \tag{3.6b}$$

$$G_{ab} = \delta_{ij} \left(1 + \frac{2}{c^2} W \right) \tag{3.6c}$$

eşitlikleri metrik tensör katsayılarını vermektedir (IAU, 2000).



4. KRONOMETRİK NİVELMAN YÖNTEMİ

Kronometrik Nivelman yöntemi zaman parametresi ile temelden bağlantılı bir kavramdır. Bu nedenle yöntemin detayları zaman sistemleri, atom saati mekanizmaları ve zaman transfer tekniklerinin ardından incelenecektir.

4.1 Zaman Sistemleri

Zaman kavramı, bilimden felsefeye, mitolojiden sanata kadar tarih boyunca üstünde en çok düşünülen kavramlardan birisi olmuştur. Başlangıçta dünyanın dönme hızına bağlı olarak tanımlanmış olan zaman birimi saniye, ortalama güneş gününün $1/86400$ 'ü olarak tanımlanmıştır. Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM) tarafından 1967 yılında atomik saat teknolojisi ile birlikte bu tanımda değişikliğe gidilmiş ve 2018 yılındaki Genel Ağırlıklar ve Ölçüler Konferansı'nda (CGPM) güncellenerek, zaman tanımı son halini almıştır. Bu tanıma göre (SI) birimi olarak saniye “ ^{133}Cs atomunun bozulmamış temel enerji durumunda iki süper ince düzey arasındaki geçişe denk gelen ışımanın 9 192 631 770 periyotluk süreye eşit olması” olarak ifade edilmektedir (Url 4). Bu zaman birimine ulaşmak için önce serbest bir atomik zaman ölçeği (EAL) oluşturulmaktadır. EAL oranı birkaç sezyum atomik saati ile karşılaştırılarak ölçülür ve TAI, hız düzeltmeleri ile birlikte dönen geoit üzerinde bu orandan türetilir (Delva ve Lodewyck, 2013).

Göreliliğe bağlı frekans kaymalarının atomik saatlerde hesaba katılması nedeniyle, TAI için bir paradigma değişikliği gündeme gelmiş, UAI kararlarına göre TAI, Yermerkezcil Koordinat Zamanına (TCG) sabit bir oran düzeltmesi ile Karasal Zamanın (TT) gerçekleştirilmesi olarak ele alınmıştır (Soffel ve diğ., 2003)

Zaman kavramı pratik uygulamalarla birlikte derinleşmeye ve kavramın içeriğine dönük yaşanan birçok tartışma güncelliğini koruyarak devam etmektedir (Ashtekar, 2006; Fraassen, 2013). Fizikte mutlak zaman fikrinden görelî zaman fikrine geçilmesi ile birlikte “her şeyin teorisi” gibi birleşik kuram arayışlarında doğanın 4 temel kuvvetinin birleştirilmesi esas alınarak birleşik bir zaman olgusu arayışı sürmektedir.

Bu bakımdan bilimsel açıdan zaman 3 farklı biçimde sınıflandırılabilir: parametrik zaman, öz zaman (uygun zaman) ve birleşik zaman (Mai, 2013).

4 boyutlu uzay-zamanda yer alan zaman koordinatı parametrik zamanı vermektedir. Gerçek zaman, gözlemcinin referans çerçevesinin zamanıdır. Birleşik zaman ise henüz olgunlaştırılmamış bir katkı olup, kuantum mekaniğini de içeren bir kavram olarak keşfini beklemektedir. Elbette böylesi bir keşif, henüz daha uygulamaların yaygınlaşmadığı Relativistik Jeodezi alanında büyük bir katkı sağlayacaktır. Nitekim göreliliğin zaman tayinine ilişkin kullanılan mekanizmalar büyük oranda kuantum yasaları çerçevesinde değerlendirilmektedir ve birleşik bir zaman kuramı, kullanılan yöntemlerden daha doğruluklu bir biçimde yararlanmayı sağlayabilir.

Cisimlerin ya da parçacıkların tekrarlı hareketleri aracılığıyla oluşturulan saatler, zaman ölçeğini belirlemek açısından belirleyici olurlar. Fakat bulundukları referans çerçevesine göre tekrarlanma sıklıkları, yani frekansları değişiklik gösterebilir. Bu durumda referans çerçevelerine göre değişmeyen bir sabitten yararlanmak gerekmektedir. Bunun için elektromanyetik dalgalardan ya da kütle-çekimsel alandan yararlanılabilir.

4.2 Atomik Saatler ile Zamanın Belirlenmesi

Zaman tayinine yönelik geleneksel bir yöntem olan uzaydaki büyük cisimlerin tekrarlı hareketlerinin incelenmesine dayanan astronomik ölçmeler başlangıçta ve yakın geleceğe kadar yeterli hassasiyette sonuçlar vermekteydi. Fakat günümüzde uzaydaki cisimlerin hareketleri, referans çerçevelerine göre değişiklik gösterecek birçok parametrenin devreye girmesi ve cismin bulunduğu referans çerçevesinin hesaba katılması sonucu hatanın yayılması nedeniyle ölçme güvenilirliğini düşürebilmektedir.

Zaman kavramı atomik düzeylerde belirsizlik ilkesine bağlıdır ve istatistiksel hesaplar gerektirir. Bu ölçekte parçacığın ölçme eylemi öncesi süperpozisyon durumu zaman kavramının kaybolduğu bir ölçek yaratmaktadır. Büyük ölçekli cisimlerin oluşturduğu mekanik sistem, zaman ve hareketin artık istatistiksel değil belirlenebilir bir davranış sergilediğini göstermektedir. Zaman böylece uzayın içinde içsel bir hale gelir. Burada kuantum mekaniği, atom saatleri için düşünüldüğünde büyük ölçekte zamanın belirlenmesinin temellerini oluşturmaktadır.

4.2.1 Atomik saat sistemleri

Bir elementin dış etkilerden arındırılmış atomları aynı enerji seviyelerine sahip olup, elektromanyetik alan ile girdikleri etkileşim sonucunda enerji seviyeleri arasında elektron geçişleri yaşarlar. Pratikte dış enerji seviyesinde tek elektron bulunan rubidyum, sezyum ve hidrojen gibi alkali atomların hiperfin geçişleri zaman belirlemede kullanışlıdır ve bu geçiş sırasında enerji seviyelerine bağlı olarak belirli frekansta elektromanyetik dalga yayılır ya da emilir ve herhangi bir geçişe karşılık gelen frekans belirsizliği Heisenberg belirsizlik ilkesi ile sınırlıdır ve

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2\pi} \quad (4.1)$$

olarak ilişkilendirilir (McCarthy ve Seidelmann, 2009). Bohr tarafından 1913'te önerilen teoriye göre tüm atomik spektral çizgiler, ayrı enerji seviyeleri arasındaki geçişlerden kaynaklanmaktadır (Blinder, 2004). Atomların enerji seviyeleri arasındaki fark $\Delta E = E_2 - E_1$ ve $\hbar$ Planck sabiti olmak üzere;

$$\nu = \frac{\Delta E}{\hbar} \quad (4.2)$$

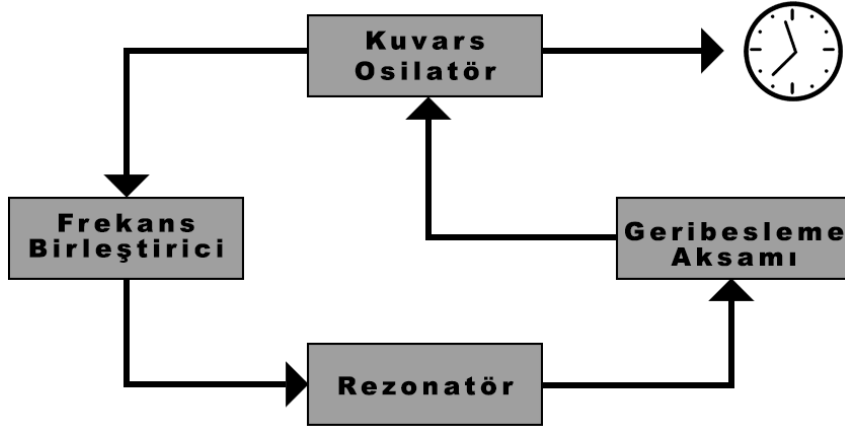
atom saatlerinin birer salıngaç olarak kullanılabileceği ilişkiyi vermektedir. Atomik saatler görelilik algılayıcıları olarak düşünülebilir. Çünkü enerji durumları arasındaki geçişler, özdeş atomlar için her zaman ve her yerde geçerlidir ve bu nedenle dünyanın periyodik hareketi ya da sarkacın periyodik hareketinden daha güvenilir sonuç verirler (Bauch, 2012).

Çizelge 4.1'de atom saatlerine ilişkin konsept atomik saat mekanizmaları genel hatlarıyla osilatör, atomik rezonatör ve yardımcı araçlar ile oluşturulur. İlk olarak, temel durumda maksimum sayıda atom hazırlanır ve istenen geçişe karşılık gelen uygun frekansa yakın bir frekansta mikrodalga enerjisi uygulanır ve bu frekans daha yüksek enerji seviyesinde maksimum atom sayısına ulaşmak için değiştirilir (McCarthy ve Seidelmann, 2009).

Örneğin; NIST-F1, NIST-F2 çeşme saatlerinde sezyum atomları altı adet lazer ışını ile yoğunlaştırılarak soğutulurlar ve yukarı yönlü hareket ettirilerek mikrodalga boşluğuna gönderilirler. Atomlar bu hareket sırasında her bir ölçmede frekansı

değiştirilen mikrodalga ışınına maruz bırakılarak, maksimum sayıda atom sayısına ulaşılan frekans değeri üzerinden atomik saniye tespiti yapılır (Url 5).

Çizelge 4.1 : Atom saatleri konsepti (McCarthy ve Seidelmann, 2009).



Bir frekans standartına ilişkin kalite; doğruluk, hassasiyet ve kararlılık ile ifade edilebilir (McCarthy ve Seidelmann, 2009). Atom saatlerinin kararlılığını belirleyen bir ölçüt olarak Allan Sapması, ν_0 saat geçiş frekansı, Ω etkileşim süresi ve N atom sayısı olmak üzere

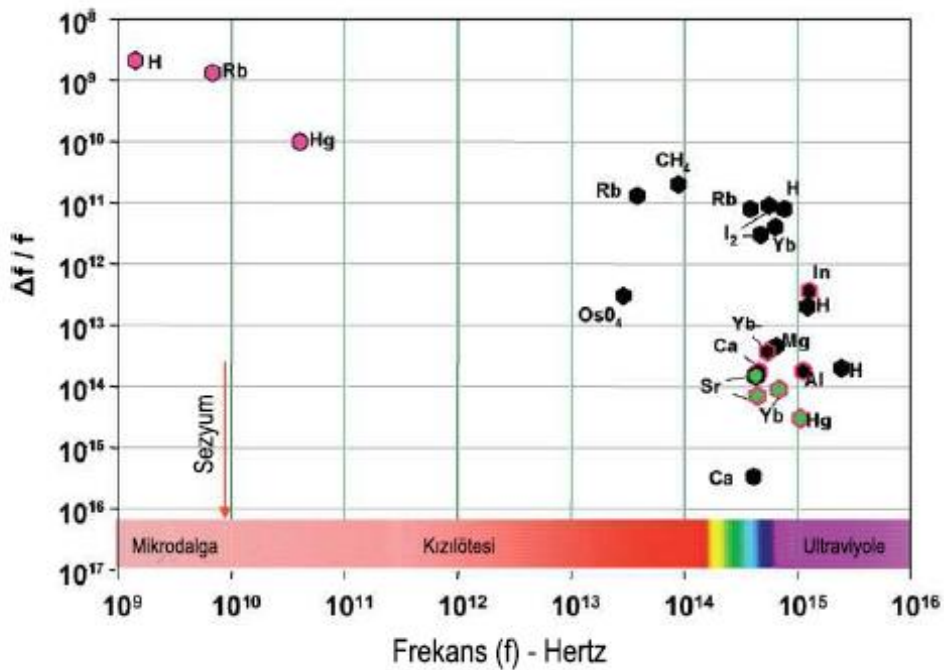
$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\nu_0 \sqrt{N \Omega \tau}} \quad (4.3)$$

olarak ifade edilir (McCarthy ve Seidelmann, 2009). Bu nedenle atom kararlılığını arttırmak için etkileşim süresinin ve atom sayısının artırılması gerekmektedir.

Atomik saatlerde sıcaklık, nem, atmosfer basıncı, titreşim, dış elektrik ve manyetik alanların varlığı, devre elektroniği gürültüsü ve yerçekimi alanındaki değişiklikler önemli hata kaynakları oluştururlar. Bir atom saatinin yeniden üretilebilirliği standart bir zaman kavramı açısından önemlidir. Belirli bir türdeki atomlar, ayırt edilemez özellikleri nedeniyle konumu ve üreticisinden bağımsız olarak aynı frekansı üretmektedir. Fakat laboratuvar koşullarında, elektronik durumlarında bozulma yaratan ve bu nedenle frekanslarında değişimler yaratan deneysel ortamla çevrilmiştir. Bu sistematik etkiler üzerinde düzeltmeler uygulanmadığı takdirde atomik saat evrenselliğini yitirecektir. Bir atom saati, üzerine etkiyen sistematik etkilerin belirsizliği ölçüldüğü oranda doğrudur.

Atomik saatlerin erken örnekleri Hidrojen benzeri atomların tersine 1934 yılında amonyak molekülü ile başlasa da; 1955 yılında L. Essen ve J.V.L. Parry, Teddington, İngiltere'deki Ulusal Fizik Laboratuvarı'nda (NPL) ilk sezyum demeti atomik saatini üretmiş, Rubidyum standartı 1950'lerde, Hidrojen maserleri 1960'lı yıllarda ve iyon saati standartları 1970'lerde cıva ile başlayarak devam etmiştir. Günümüzde en iyi mikrodalga atom saatleri göreceli olarak 2×10^{-16} doğruluk oranına sahiptir (Delva ve Lodewyck, 2013).

Uzun bir süre boyunca Sezyum saatler zaman biriminin belirlenmesi konusunda tartışmasız öncü konumunda olmuşlardır. Son 15 yılda (Esitlik 4.3)'ten de görüleceği gibi frekansın artırılması ile daha yüksek doğruluğa sahip, optik alandaki (300-800 THz) elektromanyetik radyasyonun dar bir elektronik geçişe kilitlenmesinden oluşan optik atomik saatler geliştirilmeye başlanmıştır (Delva ve Lodewyck, 2013). Bu gelişme mikrodalga atomik saatler karşısında yüksek hassasiyette bir alternatif sunmaktadır. Fakat 100 GHz'den daha yüksek frekansların ölçümü, ancak femtosaniye (10^{-15} saniye) uzunluğunda ışık atımları üretebilen mod kilitli lazerlerin kullanılabilir hale gelmesi sonucu frekans taraklarının üretilmesi ile mümkün hale gelmiştir (McCarthy ve Seidelmann, 2009).



Şekil 4.1 : Frekans ile frekans farkı karşılaştırmasının atom standartları ile ilişkisi (McCarthy ve Seidelmann, 2009).

Yüksek kararlılıkta lazerler aracılığı ile daha kararlı atomik saate imkan tanıyan sorgulama işlemi gerçekleştirilmektedir. Bir frekans standardında performans, frekans kaymaları ve gürültü kaynakları nedeniyle düşmektedir. Göreli etkiler, fiziksel süreçler, elektrik ve manyetik alanlar ve atom çarpışmaları frekans kaymalarına neden olabilirken, gürültü kaynaklarının azaltılarak sinyal ve gürültü ayrımının tespit edilmesi yüksek performansta sonuçlar almaya imkan verecektir. Bu nedenle saatleri vakum ortamında çalıştırmak, sorgulama tekniğini optimize etmek ve ölçme sürelerini arttırmak gibi yöntemler uygulanmaktadır. Sarsım etkileri azaltılabildiği ölçüde yüksek performansa ulaşılabilir. Termal kaynaklı gürültüler lazer soğutma teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte, izole edilmiş atom veya iyonların kararlılığı artırılabilir.

Atom saatlerinin hassasiyetlerindeki bu ilerleme ve kararlılıkları, metroloji ve temel fizik uygulamaları açısından birçok yeni kapıyı aralamıştır. Atomik saatler fiziksel temel sabitlerin sürekliliklerini test etmek, kuantum elektrodinamiğinin öngörülerini doğrulamak için deneysel olanak sunmaktadır. Bunun yanında, Jeodezi, GNSS ve VLBI tekniklerinde atom saatlerinin artan yüksek hassasiyetinden yararlanılabilir (Predehl ve diğ., 2012). Aynı zamanda son dönemde kronometrik nivelman yönteminde atomik saatlerin kullanılabilirliği üzerine birçok çalışma devam etmektedir.

4.2.2 Zaman transfer teknikleri

Atomik saatler aracılığı ile ölçme işlemi gerçekleştirmek için kuantum süreçleri dikkate alınmaktadır. Uzak saatleri karşılaştırma işlemi, taşınabilir bir saati diğerine taşıyarak ya da saatler arası elektromanyetik frekans aktarımı sağlanarak gerçekleştirilir. Bunlardan ilkinde taşıma nedeniyle değişen koordinat zamanı hesaba katılmalıdır. İkincisinde ise aktarım süresini doğru hesaplamak esastır.

Atom saatleri frekans transfer teknikleri ile uzak mesafelerde yüksek doğrulukla karşılaştırılabilir ölçme aletleridir. Frekans transferi neticesinde frekans farkları ve dolayısı ile potansiyel farkların yüksek hassasiyette belirlenebilmesi için zaman transfer tekniklerinin seçimi, sinyal iletimi sırasında etkiyen gürültü nedeniyle doğruluğu etkilemektedir. Bu nedenle zaman ve frekans aktarma yöntemleri zaman ölçeklerinin geliştirilmesi konusunda en önemli araştırma konularından birisidir (Imae, 2003).

4.2.2.1 Taşınabilir saatler aracılığıyla zaman transferi

Taşınabilir saat yönteminde iki farklı sabit atomik saat istasyonu, iki bölge arasındaki taşınabilir bir atomik saat aracılığı ile ölçülür. Taşınabilir saat t_1 anında sabit iki istasyondan birindeki saat ile karşılaştırılır ve sabit ikinci istasyona taşınarak t_2 anında zaman farkları elde edilir. İki istasyonda elde edilen zaman farklarının farkları böylece sabit istasyonlar arasındaki zaman farkının elde edilmesine olanak tanımaktadır. Sabit istasyonlarda zamanın fonksiyonu T_1 , T_2 ve taşınabilir saatin zaman fonksiyonu T_T olmak üzere;

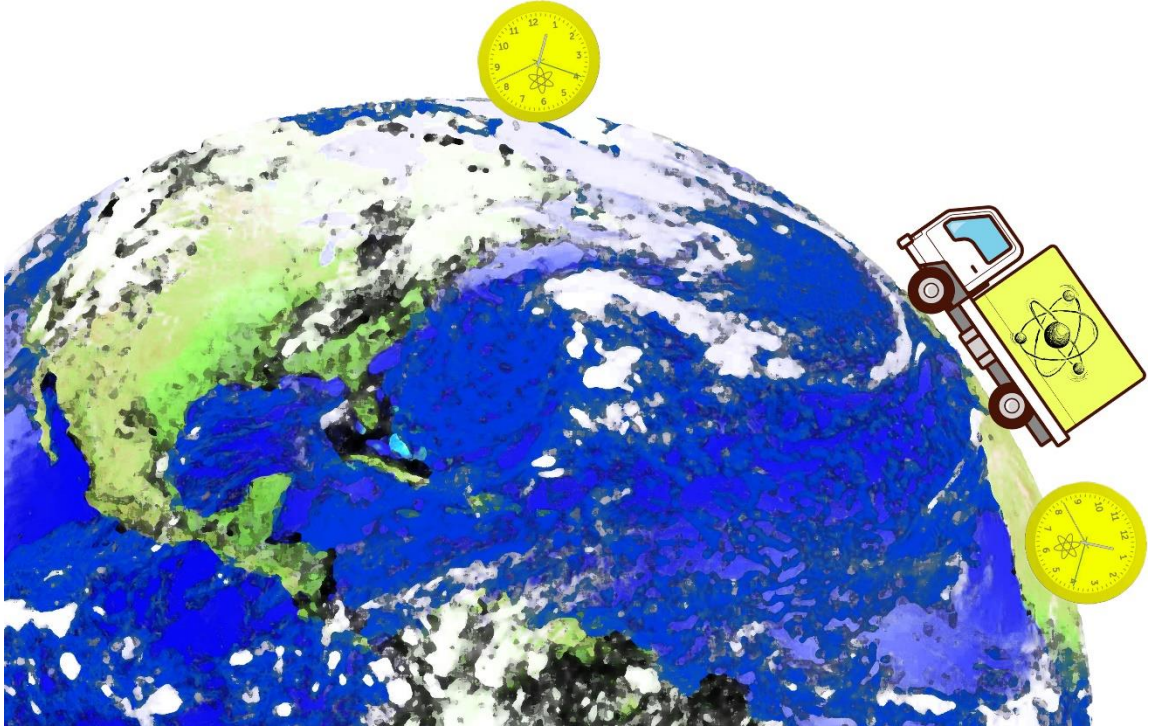
$$\Delta T_1(t_1) = T_1(t_1) - T_T(t_1) \quad (4.4a)$$

$$\Delta T_2(t_2) = T_2(t_2) - T_T(t_2) \quad (4.4b)$$

eşitlikleri yazılabilir. Bu eşitlikler aracılığıyla;

$$T_1(t_1) - T_2(t_2) = \Delta T_1(t_1) - \Delta T_2(t_2) - \{T_T(t_1) - T_T(t_2)\} \quad (4.5)$$

eşitliği elde edilmiş olur.



Şekil 4.2 : : Taşınabilir saat yöntemi ile frekans transferi: iki farklı sabit atomik saat istasyonu ve taşınabilir atomik saat.

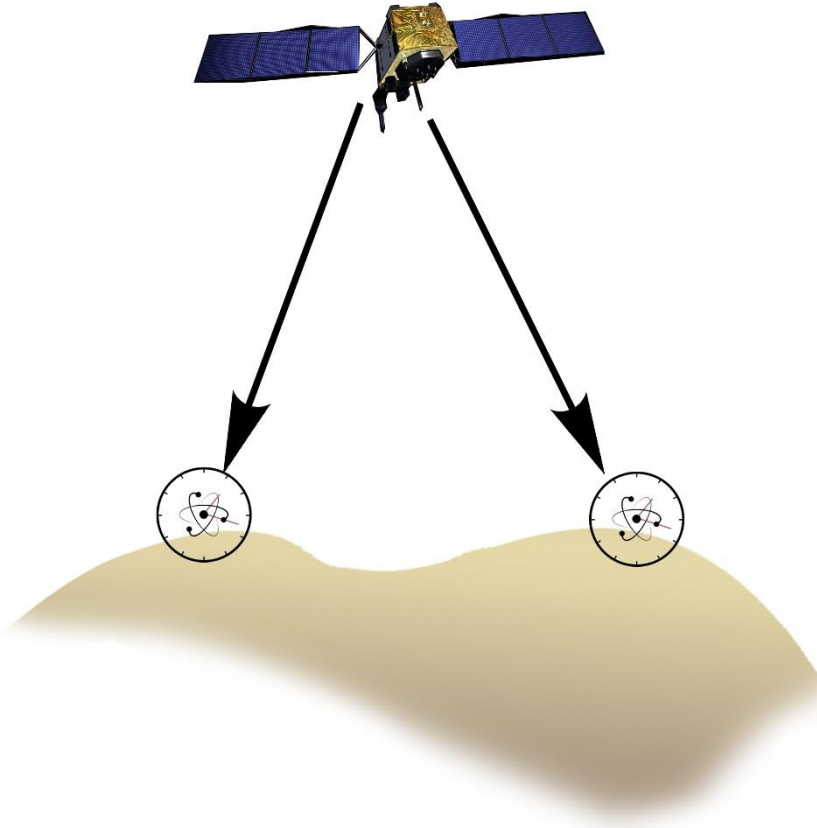
Taşınabilir saatler diğer yöntemlere nazaran, dolaylı yoldan bir karşılaştırmadır. Diğer yöntemlerde frekanslar doğrudan karşılaştırılabilirken, taşınabilir saatlerle karşılaştırma iki farklı ölçünün farkından elde edilmektedir. Yöntemin muhtemel hata kaynakları

1. karşılaştırma konusu olan atomik saatlerin kararlılıkları
2. taşınabilir saatin kararlılığı
3. taşınabilir saatin çevresel bağımlılıkları

şeklinde ifade edilebilir. İlk iki hata kaynağı Zaman Aralığı Hatası olarak saate özgü modellenerek taşıma süresine bağlı olarak kestirilebilmektedir (Imae, 2003).

4.2.2.2 GNSS Ortak Görüş yöntemi ile zaman transferi

GNSS ortak görüşü ile zaman transferi iki veya daha fazla atom saati istasyonlarının GNSS uyduları aracılığı ile anlık olarak izlenmesidir (Allan ve Weiss, 1980). BIPM tarafından belirlenen TAI, uluslararası atom saatlerinden veri toplanması için,



Şekil 4.3 : GNSS ortak görüşü ile zaman transferi.

Uluslararası Zaman Bağlantısı aracılığıyla oluşturulmaktadır. Erken dönemlerde LORAN-C (Long Range Navigation) kullanılarak yapılan transfer aktarımı, daha sonradan LORAN-C'nin erişemeyeceği doğruluklara sahip olduğu için GPS kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Godoh ve diğ.,2003).

GNSS ortak görüşü ile zaman transferi istasyonlarda zamanın fonksiyonu T_1 , T_2 ve GPS saatinin zaman fonksiyonu T_{GNSS} olmak üzere;

$$\Delta T_1(t) = T_1(t) - T_{GNSS}(t) \quad (4.6a)$$

$$\Delta T_2(t) = T_2(t) - T_{GNSS}(t) \quad (4.6b)$$

ve bu eşitlikler aracılığıyla;

$$T_1(t) - T_2(t) = \Delta T_1(t) - \Delta T_2(t) \quad (4.7)$$

şeklinde elde edilmiş olur. (4.5) ile (4.7) eşitlikleri karşılaştırıldığında, GNSS ortak görüşü yönteminin anlık olması nedeniyle, t anında doğrudan karşılaştırılmasının mümkün olduğu görülür.

GNSS ortak görüşü zaman transferinde sinyal, ortam etkileri nedeniyle hata yüklüdür. Bu nedenle α istasyonunda $\Delta T_\alpha(t)$ zaman farkı, s_α α istasyonu ile uydu arası mesafe, $\hat{s}_\alpha$ efemeris bilgisine göre türetilen mesafe, $(T_\alpha)_{iyon}$ uydu ile α istasyonu arası iyonosferik gecikme, $(\hat{T}_\alpha)_{iyon}$ uydu ile α istasyonu arası iyonosferik gecikmenin ümit değeri, $(T_\alpha)_{atm}$ uydu ile α istasyonu arası troposferik gecikme, $(\hat{T}_\alpha)_{atm}$ uydu ile α istasyonu arası troposferik gecikmenin ümit değeri ve $(T_\alpha)_{alc}$ alıcı gürültüsü olmak üzere;

$$\begin{aligned} \Delta T_\alpha(t) = & \frac{s_\alpha(t)}{c} - \frac{\hat{s}_\alpha(t)}{c} + \Delta(T_\alpha)_{iyon}(t) - \Delta(\hat{T}_\alpha)_{iyon} \\ & + \Delta(T_\alpha)_{atm}(t) - \Delta(\hat{T}_\alpha)_{atm} + T_\alpha(t) - T_{GNSS}(t) \\ & + \Delta(T_\alpha)_{alc}(t) \end{aligned} \quad (4.8)$$

zaman farkı düzeltmeleri denklemini vermektedir. Eşitlik (4.8) kullanılarak

$$T_1(t) - T_2(t) = \Delta T_1(t) - \Delta T_2(t) + \delta\rho + \delta T_{iyon} + \delta T_{atm} + \Delta T_{alc} \quad (4.9)$$

olarak bulunur. Böylece GNSS ortak görüş yöntemindeki hata kaynakları

1. uydu yörünge kestirim hatası
2. alıcı anten konum hatası
3. iyonosferik gecikme hatası
4. atmosferik gecikme hatası
5. alıcı gürültüsü
6. iyonosferik ve troposferik modellerin hassasiyeti
7. multipath hatası

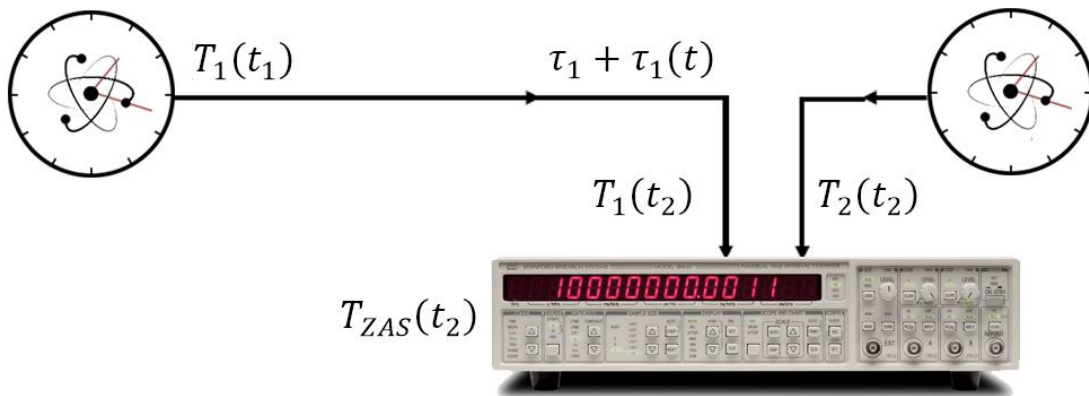
olarak sınıflandırılabilir (Imae, 2003; Ebenhag, 2013).

4.2.2.3 Tek yönlü zaman transferi

Tek yönlü zaman transferinde, istasyonlardan biri tek yönlü olarak frekans aktarımını diğer istasyona gönderir. Genelde gönderici tarafa iletim mümkün olmadığında tercih edilmektedir. Zaman aralığı sayacı (ZAS) ve 1. istasyon 2. istasyona göre daha uzak mesafede olmak üzere, istasyonlarda zamanın fonksiyonları T_{ZAS} , T_1 , T_2 ; gerçek zaman τ_1 ve gerçek zamanın zamana bağlı değişimi $\tau_1(t)$, uzak vericiden sinyalin gönderim zamanı t_1 ve yakın vericiden sinyalin gönderim zamanı t_2 olmak üzere;

$$T_{ZAS}(t_2) = T_2(t_2) - T_1(t_2) = T_2(t_2) - (T_1(t_1) + \tau_1 + \tau_1(t)) \quad (4.10)$$

eşitliği kurulabilir (Ebenhag, 2013).



Şekil 4.4 : Tek yönlü zaman transferi.

Tek yönlü yöntem, sistematik etkiler ele alındığında, dönüş ölçüleri olmadığı için hataların elimine edilmesi zor bir yöntemdir.

4.2.2.4 Çift yönlü zaman transferi

Çift yönlü zaman transferinin tek yönlü zaman transferi ile arasında oluşan tek farkı, istasyonlarda hem zaman bilgisinin alınması hem de gönderilmesidir. Bu yöntemde iki istasyon arasındaki zaman farkını belirlemek için,

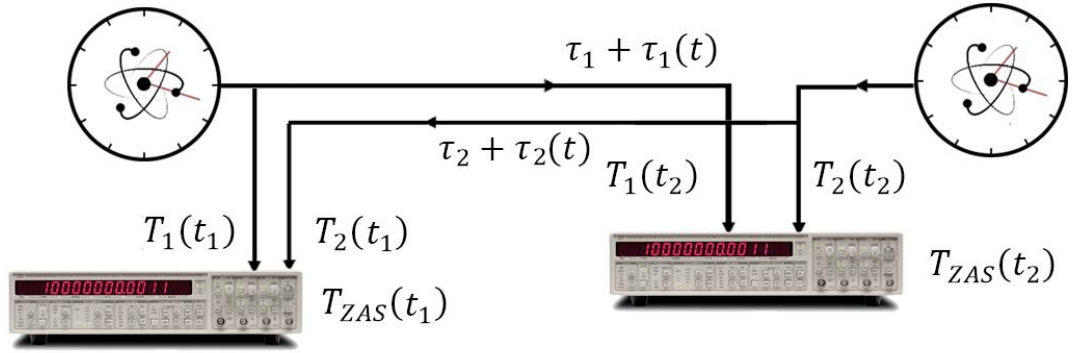
$$T_{ZAS}(t_1) = T_1(t_1) - T_2(t_1) = T_1(t_1) - (T_2(t_2) + \tau_2 + \tau_2(t)) \quad (4.11a)$$

$$T_{ZAS}(t_2) = T_2(t_2) - T_1(t_2) = T_2(t_2) - (T_1(t_1) + \tau_1 + \tau_1(t)) \quad (4.11b)$$

eşitlikleri aracılığıyla,

$$T_1(t_1) - T_2(t_2) = \frac{T_{ZAS}(t_1) - T_{ZAS}(t_2) - (\tau_1 - \tau_2) - (\tau_1(t) - \tau_2(t))}{2} \quad (4.12)$$

sonucuna ulaşılır.



Şekil 4.5 : Çift yönlü zaman transferi.

4.2.2.5 Zaman Transfer Teknikleri Uygulamalarının Karşılaştırılması

Mehlstäubler ve diğ., (2018) zaman transfer teknikleri uygulamaları arasında bir karşılaştırma yapmıştır. Bu karşılaştırma (Çizelge 4.2)'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Transfer Teknikleri Uygulamalarının Doğruluk Karşılaştırmaları (Mehlstäubler ve diğ., 2018).

Bağlantı tipi	Uygulanma dönemi	Gelişim seviyesi(2017)			Coğrafi esneklik	Çalıştırma maliyeti / elverişlilik	Kronometrik nivelman desteği <10 cm
		kesirli frekans belirsizliği	kesirli frekans kararsızlığı	performansla ilişkin bağlantı uzaklığı			
PPP’li GNSS-CP’nin pasif alıcısı	1980’ler	$\sim 1 \times 10^{-16}$ (Petit, 2015)	$> 1 \times 10^{-15}$ @ 1g $> 1 \times 10^{-16}$ @ 30g	290 km coğrafik uzaklık	dünya çapında kapsama, gnss alıcısı		-/daima
TWSTFT	1993	$\sim 1 \times 10^{-15}$ (Huang, 2016)	$\sim 1 \times 10^{-15}$ @ 1g	2080 km	özel uydu yer terminalleri kurulumu gerektiriyor		uydu bant genişliği için kiralama bedeli
TWSTFT-CP	2004	$< 10^{-15}$ (Fujieda, 2014)	birkaç 10^{-16} @ > 2000 s	9000 km	özel uydu yer terminalleri kurulumu gerektiriyor		uydu bant genişliği için kiralama bedeli
ACES-MWL	<2009	hedeflenen: $< 2 \times 10^{-17}$ (Schafer, 2016)	hedeflenen: $< 10^{-16}$ @ 1 g $< 10^{-17}$ @ 10 g	hedeflenen: küresel ölçekte	uydu yer terminalleri		18 aydan 3 yıla kadar uluslararası uzay istasyonu görevi (iss)
Lazer Bağlantı Arazılığıyla Zaman Transferi (T2L2)	<1997	belirlenen: $\sim 10^{-15}$ (Samain, 2014)	belirlenen: 10^{-15} @ 1000 s	belirlenen: kıtalararası	performans yaklaşık yeterlilikte		

Çizelge 4.2 (devam) : Transfer Teknikleri Uygulamalarının Doğruluk Karşılaştırmaları (Mehlstäubler ve diğ., 2018).

Bağlantı tipi	Uygulanma dönemi	Gelişim seviyesi(2017)			Coğrafi esneklik	Çalıştırma maliyeti / elverişlilik	Kronometrik nivelman desteği <10 cm
		kesirli frekans belirsizliği	kesirli frekans kararsızlığı	performansla ilişkin bağlantı uzaklığı			
Femtosaniye Sinyal Transferi	<2014	doğrudan boş uzay bağlantısı: <10 ⁻¹⁸ (Deschénes, 2016)	<10 ⁻¹⁸ @ > 1000 s	4 km	optik yer terminalleri		taahsisli uydu/uydu geçişi, uygun hava koşulları
Optik fiber bağlantıları: gürültü dengelemeli IM-DD	1980ler	<4x10 ⁻¹⁹ (lopez 2010a)	~10 ⁻¹⁵ @ 1s ~4x10 ⁻¹⁹ @ 10 ⁵ s	86 km fiber bağlantı	görüş hattı		teleskop/uygun hava koşulları
Optik fiber bağlantıları: tek yönlü frekans transferi	<1994	-(sliwczynski ,2010)	4x10 ⁻¹⁶ @ 30 g	6 km fiber bağlantı	optik fibere erişim		fiber kiralaması
Optik fiber bağlantıları: çift yönlü frekans transferi	1994	~1x10 ⁻²⁰ (raupach, 2015)	2 x 10 ⁻¹⁵ / τ (s) ~2x10 ⁻²⁰ @ 1 g	1400 km fiber bağlantı	optik fibere erişim		fiber kiralaması

4.2.3 Zaman transfer altyapıları

Erken frekans transferi uygulamalarında saat taşıma tekniği kullanılmakta iken, uydu teknolojisindeki gelişmeler bu yöntemin terkedilmesine neden olmuştur. Bu nedenle saat taşıma tekniği doğruluk nedeniyle, bugün çok sık kullanılan bir yöntem değildir. Fakat artık fiber iletim teknolojisi, uydu teknolojisinin de önüne geçecek bir hassasiyet sağlamaktadır.

GNSS veya çift yönlü uydu saati ve frekans aktarımı (TWSTFT) gibi mevcut uydu tabanlı tekniklerin kararlılıkları bir günlük saat karşılaştırmalarından sonra 10^{-15} seviyesine ulaşmaktadır (Predehl ve diğ., 2012). Uydu teknikleri ile saat karşılaştırması için yöntem olarak GNSS Ortak Görüşü ile uydu tarafından oluşturulan kodlar, yerel istasyonlardaki kodlarla karşılaştırılmaktadır. Örneğin bu yöntemde GPS kodları 1 Mbps'ye (1.6 GHz'de iletilen C/A) veya 10 Mbps'ye (1.6 / 1.2 GHz'de iletilen P1/P2) modüle edilir (Petit ve Wolf, 2005). Yerel istasyonlar ve uydu saatleri arasındaki karşılaştırma, sinyalin yayılım koordinat zamanı ile kodlar arasındaki zaman farkından çıkartılarak yapılır.

Çift yönlü zaman transfer yöntemi ile uydu altyapılarının kullanılması bir diğer uygulamadır. Teknik yermerkezli iletişim uyduları üzerinden radyo sinyalleri; ya da optik fiber veya uyduya yapılan özel ekler ile lazer dalgaları gönderilerek gerçekleştirilir. Uydu yayınları ticari iletişim uyduları kullanılarak, Ku bandında (11 GHz to 14 GHz) yapılır.

Güncel bir uygulama olarak fiber-optik bağlantı yoluyla zaman transferi yüksek hassasiyette iletim sağlar. Fakat optik fiberlerde iletimi etkileyen en temel etkenlerden birisi olan dağılım (dispersiyon) darbe genişlemelerine neden olarak, hata oranının artmasına neden olabilmektedir ve aralarında en bilinenlerden biri olan polarizasyon mod dağılımı alıcıda elde edilen güç seviyelerinde azalmaya neden olmasındır (Karlík ve diğ., 2002). Bu hatanın minimize edilmesi amacıyla sürekli dalga lazer sistemi, polarizasyon mod dağılımına daha fazla duyarlı olduğu için büyük mesafelerde iletim için uygun görülebilmektedir (Predehl ve diğ., 2012).

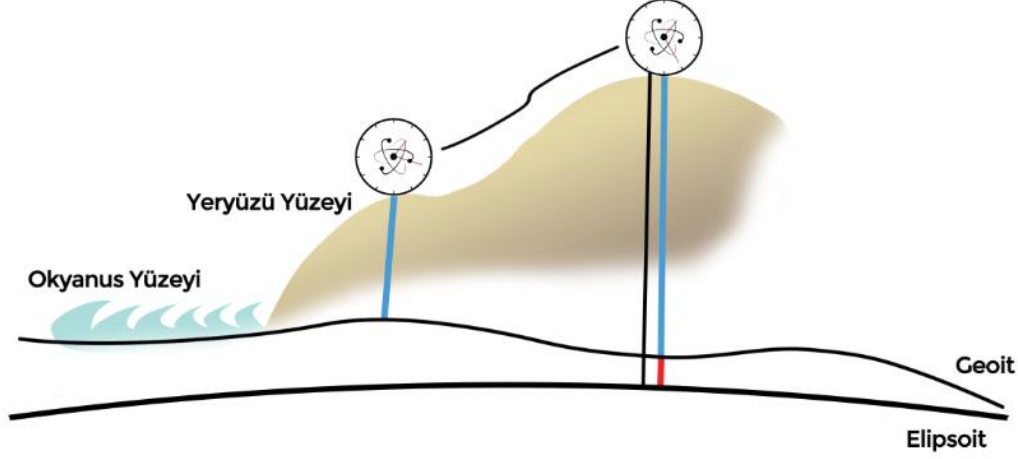
Optik fiber bağlantılarında önemli hata kaynaklarından bir diğeri sıcaklık değişimlerinin bağlantı boyunca yarattığı gürültüdür. Sıcaklık değişimleri ve mekanik gerilimden kaynaklı hataları minimize etmek açısından çift yönlü zaman transferi tekniğinin kullanılması önerilmektedir (Hedekvist ve Ebenhag, 2012).

4.3 Atomik Saatler ile Yüksekliklerin Belirlenmesi

Yükseklik belirlemede kullanılan geleneksel yöntemler bütünsel açıdan bakıldığında ölçme sonuçlarına etkileyecek önemli hata kaynakları barındırmaktadır. Bunlardan ilki, yöntemlerin nokta üzerindeki potansiyel değerleri dolaylı olarak elde etmesinden kaynaklanır. Referans alınan yüzeyden yükseklik taşınması beraberinde hata da taşınmaktadır ve bu, artan derecelerde hata birikmesine neden olmaktadır. Ortalama deniz seviyeleri farklı olarak belirlenen karasal kütleler arasındaki yükseklik entegrasyonunun zorluğu diğer bir kaynak olarak görülebilir. Gözlemlerin yatay düzlemde gerçekleşmesi ve arazi zorlukları nedeniyle engebeli arazilerde işgücü, ekipman gücü ve yol uzunluğunun artması da önemli bir engel oluşturmaktadır. Bu ciddi olumsuzlukları aşabilmek açısından, son yıllarda uydu teknolojileri önde gelen çözümlerden birisi olarak kullanılmaktadır (Flury ve Rummel, 2006). Fakat son 10 yıldır, temelleri 20. yüzyılın ikinci yarısına dayanan bir yöntem olarak kronometrik nivelman, artan ölçme aletleri ve ağ teknolojileri ile test aşamasında olup, umut verici sonuçlar ortaya koymaya başlamıştır. Yapılan birçok çalışma, 1 cm'lik yükseklik farklarının belirlenmesine imkan tanıyacak hassasiyet aşamalarına geldiğini göstermektedir (Chou ve diğ., 2010; Leopardi ve diğ., 2017; Denker ve diğ., 2018; Müller ve diğ., 2018; Mehlstäubler ve diğ., 2018; Gozzard ve diğ., 2018; McGrew ve diğ., 2019). Bu bölümde kronometrik nivelman yönteminin teorik temelleri, sistemin çalışma mekanizmaları ve uluslararası yükseklik referans sistemine olabilecek katkıları tartışılacaktır.

Bjerhammar (1986) kronometrik nivelman fikrini ortaya atan kişidir. Fikre göre yöntemin temelini genel görelilik teorisinin öngördüğü kütle-çekimsel zaman bükülmesi etkilerinin atom saatleri üzerinde gözlemlenmesi sonucu gravite potansiyellerinin belirlenmesi oluşturmaktadır. Bu durumda gravite potansiyellerinin belirlenmesi, gerçek zamanların ölçülerek o noktadaki uzay-zaman metriğinin belirlenmesi ile mümkün olabilir. Bölüm 3.1.1'de belirtilen Schwarzschild Çözümü'ne ilişkin metrik katsayılar

$$g_{\mu\nu} = diag \left[- \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right), \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{-1}, r^2, r^2 \sin^2 \theta \right] \quad (4.13)$$



Şekil 4.6 : İstasyonlarda uzay-zaman metriğinin belirlenmesini esas alan yükseklik belirleme yöntemi olarak Kronometrik Nivelman.

dikkate alınarak Schwarzschild uzay-zamanında sabit iki olay arasındaki mesafe:

$$ds^2 = -c^2 d\tau^2 = -g_{00} c^2 dt^2 \quad (4.14)$$

ve böylece metrik tensörden;

$$d\tau = \sqrt{g_{00}} dt \quad (4.15)$$

eşitliği elde edilmiş olur.

Burada $\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) < 1$ olduğu için kütle-çekimsel alandaki gerçek zaman daha yavaş akmaktadır.

İki farklı eşpotansiyel üzerinde iki olay bu durumda farklı zaman akışlarını göstermektedir ve bu noktalar farklı gerçek zamanlara sahip olmaktadır. Bu durumun ölçülmesi için P_2 'den gönderilerek P_1 'de gözlemlenen iki ardışık elektromanyetik dalga, iki dalga arasındaki koordinat zamanı, gönderildiği anda dt olsun. Bu koordinat zaman iki dalga tepesi aynı zamanda yol alacağı için P_1 olayında da dt olmaktadır. Bu iki olayda dalga tepeleri arası gerçek zamanlar ise $d\tau_1, d\tau_2$; iki olay üzerinde elektromanyetik dalga frekansı da sırasıyla ν_1 ve ν_2 olsun. Bu durumda;

$$d\tau_{P1} = \frac{1}{\nu_{P1}} = \sqrt{g_{00}(P_1)} dt \quad (4.16a)$$

$$d\tau_{P2} = \frac{1}{v_{P2}} = \sqrt{g_{00}(P_2)} dt \quad (4.16b)$$

eşitlikleri elde edilmiş olur.

eşitlik (4.14) , (4.16a) ve (4.16b)'den iki frekans arasındaki oran

$$\frac{v_{P1}}{v_{P2}} = \sqrt{\frac{g_{00}(P_2)}{g_{00}(P_1)}} = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r_2}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r_1}\right)^{-1/2} \quad (4.17)$$

olacaktır. Binom açılımı uygulanarak, 2. dereceden terim ve sonrasındaki terimler c^2 katsayısının büyük olması nedeniyle ihmal edilecek derecede küçük olduğundan:

$$\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r_{P2}}\right)^{\frac{1}{2}} = 1 - \frac{1}{2} \frac{2GM}{c^2 r_{P2}} + O(2) \quad (4.18a)$$

$$\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r_{P1}}\right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2} \frac{2GM}{c^2 r_{P1}} + O(2) \quad (4.18)$$

olacak ve bu durumda

$$\frac{v_{P1}}{v_{P2}} \approx \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r_{P2}}\right) \left(1 + \frac{2GM}{c^2 r_{P1}}\right) \approx 1 + \frac{GM}{c^2} \left(\frac{1}{r_{P1}} - \frac{1}{r_{P2}}\right) \quad (4.19)$$

olacaktır. Eşitlik (4.19), eşitlik (1.5)'ten yararlanarak Newton kütleçekim potansiyeli olarak ifade edilmek üzere, frekans oranını şu şekilde tanımlanabilir:

$$\frac{v_{P1}}{v_{P2}} = 1 + \frac{V(r_{P1}) - V(r_{P2})}{c^2} \quad (4.20)$$

Benzer ilişkiye Bölüm 3.1.3'te belirtilen IAU 2000 Çözümleri için uygulandığında ulaşılabilir. Benzer şekilde, ν frekansındaki fotonun kinetik enerjisini veren Planck-Einstein denklemi $E = \hbar\nu$ ile eylemsizlik kütlelerinin enerjisini veren $E = m_i c^2$ denkelmleri aynı denkleme ulaşmak için kullanılabilir. Öyle ki, eşdeğerlilik prensibine göre eylemsizlik kütlesi ile kütle-çekimsel kütle eşit kabul edilerek ($m_i = m_G$); m_G kütleli parçacığın yerçekimi alanında yapacağı iş eşitlik (1.7)'de gösterildiği üzere birim kütlelerin potansiyel enerjisi denkleminde göre, $m_G dV$ olmalıdır. Bu

durumda enerjinin korunumu kanunundan parçacığın kazandığı kinetik enerji, enerji değişimine eşit olmalıdır.

$$\hbar dv = -m_G dV \quad (4.21)$$

olmak ve $E = m_i c^2$ denkleminde m_G kütlesi türetilmek üzere,

$$\hbar dv = -\frac{E}{c^2} dV \quad (4.22)$$

ve buradan da

$$\frac{dv}{v} = -\frac{dV}{c^2} \quad (4.23)$$

eşitliği kurulmuş olmaktadır. P1 ve P2 yolu boyunca frekans farkı:

$$\int_{P2}^{P1} \frac{dv}{v} = -\int_{P2}^{P1} \frac{dV}{c^2} \quad (4.24)$$

ve buradan integrallerin alınması yoluyla,

$$\ln v|_{P2}^{P1} = -\frac{1}{c^2} (dV)|_{P2}^{P1} \quad (4.25)$$

eşitliğine ulaşılmış olur ve buradan da

$$\ln v_{P1} - \ln v_{P2} = -\frac{1}{c^2} V(r_{P1}) - V(r_{P2}) \quad (4.26)$$

aracılığıyla

$$\frac{v_{P1}}{v_{P2}} = e^{-\left(\frac{V(r_{P1})-V(r_{P2})}{c^2}\right)} \quad (4.27)$$

eşitliği frekans oranını potansiyel farkların eksponansiyel fonksiyonlar ile ifade edilmesine imkan tanımaktadır. Potansiyel farkın eksponansiyel fonksiyonlarla ifade edilmesi eksponansiyel metriklerin kullanıldığı çözümlerde kullanışlıdır (örnek bir uygulama için Philipp (2018)'e bakınız).

Eşitlik (4.20) ve (4.27) kronometrik nivelman tekniğinin teorik altyapısını özetlemektedir. İki atomik saat arasındaki frekans farklılıkları yeterli hassasiyette gözlemlenebilirse aralarındaki potansiyel fark belirlenebilmektedir.

Yerçekimi ivmesi $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ ve $c \approx 300\,000\,000 \text{ m/s}$ olmak üzere; 1 santimetrelilik yükseklik değişimlerinde $\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-18}$ frekans kayması oranı elde edilmektedir. Bugün gelişen atom saati ve fiber iletim teknolojileri bölüm 4.4'te bahsedilen çalışmalarda göstermektedir ki 10^{-18} hassasiyette frekans farklılıklarını ölçmek mümkündür.

Bjerhammar (1986) bu kavramsal temellerden yola çıkarak geoide yeni bir tanım getirmiş ve göreceli geoidi hassas saatlerin aynı hızla çalıştığı deniz seviyesine en yakın yüzey olarak tanımlamıştır. Bu tanım deniz denge yüzeyi ile eşzaman akışı gösteren yüzey olarak da düşünülebilir.

Böylece Fiziksel Jeodezi'nin en temel tanımlarından birisi olan eşpotansiyel yüzey ve geoide ilişkin olarak, yeni bir yöntem ve tanım getirilmiştir. Bu tekniğin temelleri, zaman parametresini, belirleyici konuma getirmiştir.

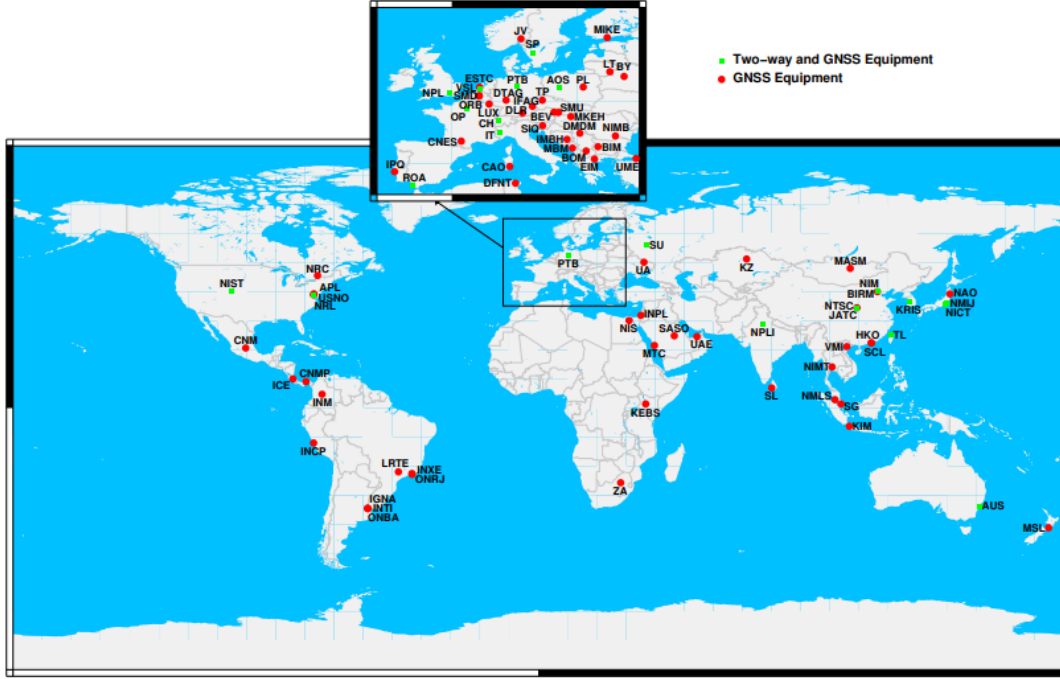
Böylece geoit modeli artık bir nokta kümesi yerine olaylar kümesine dönüşmektedir ve olay kümesinin tarifinde zaman önemli bir parametredir.

4.4 Zaman Referans Sistemleri ve Atom Saati Ağları

Küresel anlamda bir zaman ölçeği için bu ölçeğin gerçekleşmesi ve zamansal referans sistemine ihtiyaç duyulur. Zaman sisteminin belirlenmesi, bir saatin diğer bir veya – daha iyi olacak şekilde- birden fazla saatle karşılaştırılmasını gerektirmektedir. Bu yüzden, saat hassasiyetine uygun bir iletim teknolojisi ile bu saatleri birbirine bağlamak önemlidir. Mikrodalga saatleri için uydu temelli aktarım hassasiyeti yeterli olsa da; optik saatler daha hassas oldukları için, onların karşılaştırmalarında bu hassasiyet yetersizdir.

TAI, BIPM verilerine göre dünya genelinde yayılmış 50'den fazla farklı ulusal laboratuvar da yaklaşık 200 atom saati verisi dikkate alınarak oluşturulur (bu laboratuvarlardan birisi de Gebze'de bulunan 3 adet Cs atom saati barındıran Ulusal Metroloji Enstitüsü laboratuvarıdır). Birim olarak TAI sezyum standartlarına uygun ulusal laboratuvar verileri aracılığıyla SI birimine uyumlu haldedir. Fakat bu durum dünya dönüş hızındaki değişiklikler nedeniyle sapmalar yaşanmasına neden

olmaktadır. Bu nedenle dünya dönüşüne bağlı zaman sistemleri ile TAI arasında ilişki kurulması gerekmektedir. Saniyenin bu uygulanma takvimine Uluslararası Dünya Rotasyon Servisi (IERS) tarafından karar verilirken, TAI saat karşılaştırmaları için BIPM, uluslararası zaman bağlantıları ağı düzenlemektedir.

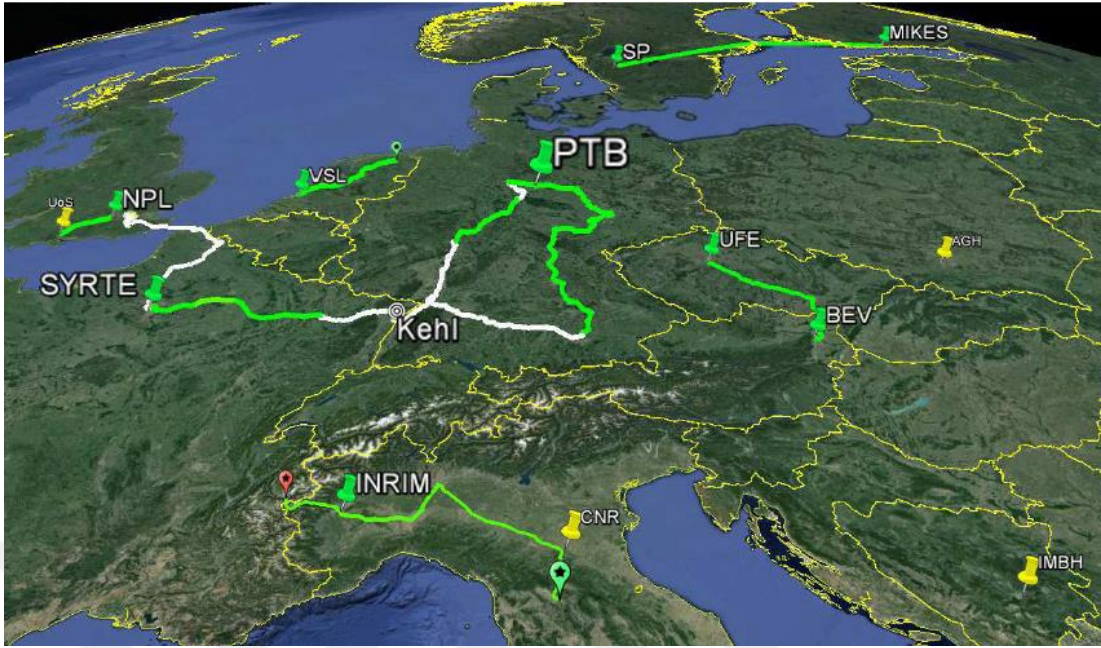


Şekil 4.7 : Atomik saatlerin dünya üzerindeki dağılımı (BIPM, 2018).

Kararlı ve hassas bir zaman koordinatını elde etmek için saatlerin uyumlu çalışmaları gerekmektedir. Resmi zaman ölçeği olarak belirlenen Koordinatlandırılmış Dünya Zamanı (UTC), atomik saatler aracılığıyla elde edilen Yersel Zaman'dan (TT) türetilmektedir. Zaman parametresinin aktarımı GNSS ve diğer uydu teknikleri ile sağlanmaktadır. Burada TAI, yermerkezcil referans sisteminde zaman koordinatının karşılaştırmalara dayanak olacak uyumlulukta belirlenmesidir (Petit ve Wolf, 2005).

Atom saatleri ağı konusunda ilk çalışmalardan birisi Ashby ve Allan'ın (1979) makalesidir. Bu çalışmada saat karşılaştırmalarının mümkün olabilmesi için yermerkezcil dönmeyen koordinat çerçevesinin benimsenmesi gerektiği, aksi takdirde mobil saatlerde ± 200 ns'lik hatalar olabileceği tartışılmıştır. Yermerkezli koordinat saat oranı ve ve Uluslararası Zaman Dairesi (BIH) tarafından oluşturulan UTC zaman ölçeğinin belirlenmesi için referans yüzeyi olarak geoidin kullanılması önerilmiştir. Gelişen GPS teknolojisi ile birlikte jeosentrik koordinat zaman ölçeğinin karışıklığı engelleyeceği öngörülmüştür.

Atomik saat karşılaştırmalarına ilişkin test çalışmaları yürütülmeye devam etmektedir.



Şekil 4.8 : Mayıs 2014 itibariyle mevcut fiber bağlantılar (yeşil ile gösterilmiştir) ve geliştirilmekte olan bağlantılar (beyaz ile gösterilmiştir). Yeşil olan noktalar NEAT-FT, Sarı noktalar ise NEAT-FT ile işbirliği yapan laboratuvarları göstermektedir (EURAMET, 2014).

Network for European Accurate Time and Frequency Transfer (NEAT-FT) optik fiber bağlantıları aracılığıyla optik atomik saatlerin karşılaştırılması amacıyla transfer tekniklerini inceleyen bir proje olarak 2011 yılında başlatılmış ve 2015 yılında tamamlanmıştır. (Schnatz ve diğ., 2014; Url 6)

Bu proje kapsamında Milano'daki Fotonik ve Nanoteknoloji Enstitüsü, Medicina'daki Radyo-Astronomi Enstitüsü (Bolonya) ve Floransa-Avrupa Üniversitesi arasındaki 642 kilometrelik bir bağlantı üzerinden 5- mHzlik bant genişliğinde 1000 saniyelik aktarım süresinde 3×10^{-19} Allan sapması ve 5×10^{-19} doğruluğu elde edilmiş; bağlantı 1248 kilometre olarak iki katına çıkarılmış ve çift gidiş dönüş tekniği ile önceki tekniklerden farklı olarak uzun mesafeli kıta ağları açısından önerilmiştir (Calonico ve diğ. 2014).

Bu çalışmalar arasında en kapsamlılarından birisi Almanya ve Fransa arasında ortak bir çalışma olarak yürütülen atom saati test gözlemleridir. Bu kapsamda bir örnek 920 kilometrelik fiber ağ boyunca 2 optik atom saatinin karşılaştırıldığı çalışmadır (Predehl ve diğ, 2012). 1 saniyelik bir sürede 5×10^{-15} hassasiyetine ulaşılarak, 1000 saniyeden daha az sürede 10^{-18} aralığında kararlılık yakalanmıştır. Bu mertebede bir hassasiyete

erişebilmek açısından, Alan dağılımı kullanılmış ve iki ters paralel fiber bağlantı kullanılmıştır. Uzun sürelerde, ümit edilen frekans değerinden sapma, 4×10^{-19} aralığında tutulmuştur.



Şekil 4.9 : Torino (TO), Milano (MI), Bolonya (BO) ve Floransa (FL) arasındaki fiber optik ağ (Calonico ve diğ. 2014).

Bu hattın önemi, Avrupa çapında bir optik frekans yayılım ağının bir parçası olarak hizmet verebileceği düşünülmektedir. Çalışmada 3 farklı frekans iletim yöntemi irdelenmiştir:

- I. genlik modülasyonlu lazer ile kararlı mikrodalga frekans aktarımı
- II. radyo frekansı ve optik frekans tırağıyla elde edilen optik sinyallerin birleşik transferi
- III. kararlı sürekli dalga lazer sisteminin optik taşıyıcı dalgasının iletimi

Çalışmada sürekli dalga lazer sistemi, polarizasyon mod dağılımına daha fazla duyarlı olduğu için tercih edilmiştir. Çalışmada aralarında 600 km mesafe olan Almanya, Garching'deki Max-Planck-Institut für Quanten optik (MPQ) ve Almanya'nın Braunschweig kentinde bulunan Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) noktaları arasında gaz boru hatlarının yanında bir kablo kanalı ile iletilen 920 km

uzunluğunda 2 bağlantı hattı kullanılmıştır. PTB’de Cs-eşme saati ve MPQ’da hidrojen atom saatleri karşılaştırılmıştır. Gürültü ve sıcaklık kaynaklı olarak ortaya



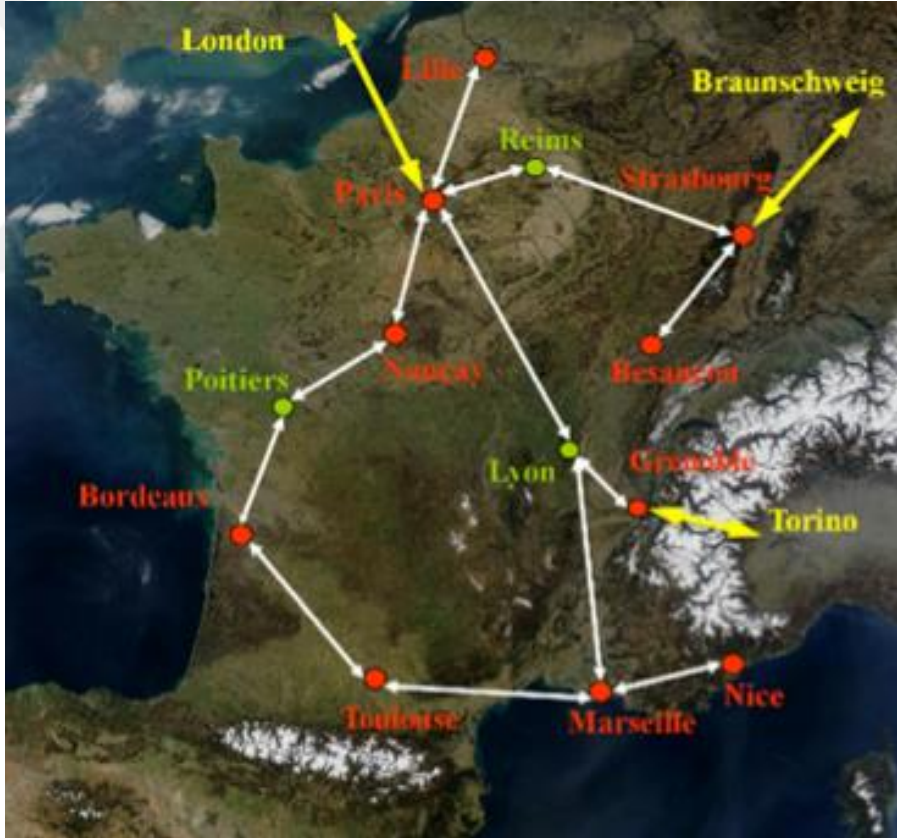
şekil 4.10 : MPQ ve PTB'yi bağlayan ~ 920 kilometrelik fiber bağlantı boyunca erişim noktaları ağı (Predehl ve diğ, 2012).

ıkan 5×10^{-14} mertebesindeki belirsizlikler akusto-optik frekans değiştirici ile giderilmiştir. Kilometrede 0.23 dB’lik doğal zayıflama için 920 km’de öngörülen 200 dB’lik tek yönlü zayıflama, dokuz noktada yerleştirilmiş erbiyum katkılı fiber yükseltici sistemleri ile giderilmiş, bağlantının iki ucunda ise net iletim sağlamak için Fiber Brillouin Yükselticiler kullanılmıştır.

yükselticiler ile aşılmıştır. Tüm sistemin belirsizliği sonuçta 10^{-19} seviyesinde bir belirsizliğe karşılık gelmektedir.

GÉANT tarafından İngiltere ve Fransa Ulusal Metroloji Enstitüleri arasında gerçekleştirilen ICOF projesi NPL ve OBSPARIS istasyonları arasında 800 kilometrelik fiber bağlantı ile 10^{-16} hassasiyetinde optik saat karşılaştırılması amacıyla gerçekleştirilmiş ve ulaşılan son tarihli yayın olarak yayımlanan yıllık rapora göre bağlantının % 96 oranda tamamlandığı ve test edilecek yaklaşık 30 kilometrelik bir kısmının kaldığı belirtilmiştir (Open Call Deliverable OCL-DS3.2 Final Report, 2013).

Fransız Equipex projesi REFIMEVE+ (Reseau Fıbre Metrologique a Vocation Europeenne +) optik frekans transferini temel alan bir proje olarak 2012 yılında başlamış ve 2024'e kadar süreceği planlanmaktadır (Url 7) Proje kapsamında tasarlanan Avrupa kıta geneli ağ Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : REFIMEVE+ Ağı (Url 8).

Bir diğer çalışmada Hinkley ve diğ. (2013) $^{27}\text{Al}^+$ iyonlarına dayalı iki optik atomik saat karşılaştırılarak, 0.33 m yüksekliğindeki görelî zaman değişimlerinin belirlenebileceği ifade edilmektedir. $^{27}\text{Al}^+$ iyonlarına dayalı iki optik atom saat, 8.6×10^{-18} ve 2.3×10^{-17} sistematik frekans belirsizlikleri ile karşılaştırılmıştır. ^{27}Al optik

atomik saatler, 2 ayrı laboratuvara yerleştirilmiş ve aralarında 75 metrelik faz-kararlı optik fiber iletimiyle frekans karşılaştırmaları yapılmıştır. Yerçekimi potansiyeli arasındaki potansiyel farklılıklar (4.20) ile incelenmiş, iki saatin lazer seviyesi arasındaki fark 17 cm olarak alınmış ve yükseklik farkı karşılaştırılmıştır. Ardından aradaki yükseklik farkı 33 santimetreye çıkartılarak yeniden ölçmeler yapılmıştır. Sırası ile 100 000 s ve 40 000 s yükseklik verileri ile saatlerin $(4.1 \mp 1.6) \times 10^{-17}$ belirsizliğinde olduğu tespit edilerek 37 ± 15 cm'lik bir yükseklik farkı hesaplanmıştır.

Örnekler göstermektedir ki optik atomik saatlerin frekans standartlarının yakın gelecekte daha da geliştirilmesiyle yüksek hassasiyette sonuçlar üretmeleri açısından olumlu gelişmeler yaşanabilecektir. Örneklerdeki test ağı gözlemleri ve frekans standardının iletimindeki kararlılığı arttırmaya dönük tüm çabalar ise kıtasal bir ağı geliştirilmesine dönük ilk adımlar olarak görülebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın konusu olan kronometrik nivelman yöntemi, öncelikli ihtiyaç olarak görülen santimetre hassasiyetinde küresel geoidi mümkün kılacak gelişmeler kaydetmektedir. Gelişen atomik saat teknolojileri ile birlikte karşılaştırma yapılacak iki saat arasındaki yükseklik farkı 1 cm'ye kadar belirlenebilmektedir. Burada önemli nokta, fiziksel bir yükseklik değeri olan potansiyel sayı değerine doğrudan ulaşılmasıdır. Genelde modeller ya da ölçme sayısı ile orantılı olarak artan hataya sahip yükseklikler aracılığı ile ulaşılan jeopotansiyel değerlerin doğrulukları desimetre mertebesinde kalmaktadır. Aynı zamanda yerel geoid modellerinin birleştirilmesinde uyumsuzluklar meydana gelmektedir. Bunun nedeni yerel ortalama deniz seviyelerine bağlı yerel, referans yüzeylerindeki değişimlere göre dinamik olmayan ve farklı yöntemler ile farklı doğruluklarda ölçmeler kullanılmış modellerin birleştirilmesi nedeniyle aralarında 2 metreye varan tutarsızlıklar olmasıdır (Ihde ve diğ., 2017). Ayrıca referans sisteminin belirlenmesinde Bouguier indirgemesi, arazi indirgemesi gibi varsayımsal modellere dayalı indirgemeler gerçekleştirilmektedir (Hofmann ve Moritz, 2006). İndirgemelerde kullanılan modellerin yerel ölçekte farklılıkları birleşik bir yükseklik sistemine dönük engeller yaratacaktır. Yerel ölçekte oluşturulmuş yükseklik sistemleri arasındaki kayma, uzun mesafeli ölçme ve doğrudan yüksekliklerin belirlenmesini sağlayacak bir yöntemle giderilebilir. Bu anlamda Vaníček'e göre atomik saat ağırları, 1.000 kilometreden uzun mesafeli ölçmelerde biriken hatalar taşımadığından birleşik bir yükseklik sisteminin oluşturulması konusunda önemli gözükmemektedir (Takano ve diğ., 2016'da atıfta bulunulduğu gibi).

Bu nedenle santimetre hassasiyetindeki bir küresel geoid modelinin elde edilmesi için atomik saat karşılaştırma ağırları yakın gelecekte önemli katkı sağlayacak sistemler olarak görülebilir.

Günümüzde

1. gelişmekte olan ve çok disiplinli bir konu olduğu için yetiştirilmiş personel bulunmaması

2. yüksek maliyetli ölçme aletleri kullanılması
3. yüksek hassasiyette ölçme süreçleri gerektirmesi
4. taşınması kolay ölçme aletleri olmaması

yöntemin güncel sorunları olarak görülebilir. Ölçme yöntemi üzerine birçok test aşaması yapılmakta ve kıtasal ağların kurulması üzerine çeşitli tartışmalar yürütülmektedir. Bu kapsamda özellikle Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ve Paris'teki Ulusal Metroloji Enstitüsü LNE-SYRTE gibi kuruluşlarca optik atom saatlerle karşılaştırma test ölçüleri yapılmaktadır. Kurulan fiber bağlantılar Avrupa'da kıtasal atomik saat ağının erken evreleri olarak görülebilir.

Türkiye'de metroloji çalışmaları Ulusal Metroloji Enstitüsü (TÜBİTAK UME) öncülüğünde yürütülmektedir. TÜBİTAK UME'nin Gebze'de bulunan Zaman-Frekans Laboratuvarı 1994 yılından bugüne 5 adet Cs atom saati ve 2 GPS alıcısı ile TAI kulübü üyeliğinde evrensel zaman biriminin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır (Url 9). 2018 yılı itibarı ile optik atom saati çalışmalarına başlanmış, projenin 2019'da başlayacağı duyurulmuştur (Url 10). Projenin hayata geçirilmesinin ardından, Avrupa kıtasal ölçeğinde kurulacak bir optik atomik saat ağına fiber bağlantı altyapısı ile dahil olunması birleşik yükseklik referans sisteminin belirlenmesi ve Türkiye jeodezik ağlarının bu sistemle ilişkilendirilmesi ilerleyen gelecekte tasarlanabilir. Uluslararası ölçekte bir ağ, sadece konumsal açıdan değil uluslararası hassas zaman parametresinin belirlenmesi açısından da önemlidir.

Geoidin belirlenmesi elipsoid koordinatları bilinen bir noktada geoid ondülasyonları aracılığı ile ortometrik yüksekliklerin hesaplanmasını sağlamaktadır. GNSS teknolojisi ile belirlenen matematiksel yüksekliklerin anlamlı hale gelebilmesi açısından, cm geoidinin belirlenmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Fakat bu mertebede küresel bir geoid modeli henüz oluşturulamamış durumdadır ve yerel modeller küresel modellerden farklılık göstermektedir.

Ulusal yükseklik sistemlerinin güncelliği için ulusal düşey referans sistemleri, küresel ve yerel ölçekteki sistemlerle ilişkilendirilebilir olmalıdır. Güncellik, geçmişe bağlı değerlendirilebilirken, gelecekle de ilişkilidir. Bu nedenle düşey referans sistemlerinin geçmiş sistemlerle ilişkisi kurulabildiği kadar, geleceği öngörebilir uygulanabilirlikte olmalıdır. Bu kapsamda ulusal yükseklik referans sistemleri için güncel gelişmeleri

içeren standart bir atkinsonun oluşturulması, yöntemin ulusal ölçekte uygulanabilirliği açısından ilk adım olabilir.

Türkiye’de yükseklik sistemlerinin güncelliği, bölgenin tektonik açıdan aktif olması nedeniyle, kritik bir konudur. Güncel geoit doğruluğu yeterli değildir ve yaşanan yer hareketleri sonucu doğruluğu daha da azalmaktadır. Kronometrik nivelman tekniği ile statik bir geoit modelinden, zamana bağlı izlenebilen güncel bir modele geçilebilir.

Aynı zamanda Delva ve Gerşl (2017), IAG’ın GGOS (Global Geodetic Observing System-Global Jeodezik Gözlem Sistemi) projesinin küresel ve tutarlı görelilik prensiplerine dayalı yüksek doğruluklu teorik ereve geliştirmeyi amaçladığını belirtmiştir.

lme tekniklerinde artan hassasiyetler, kuramsal açıdan da daha iyi doğrulukları zorlar. Gelişmeler ve talepler, görelili kütleçekim yasalarında alan denklemlerindeki parametre ihmal derecesini büyütebilir (Mai, 2013). Kozmolojik modeller, kusursuz matematiksel cisimlere dayanırken, alan denklemlerinin görelili geoit için çözülmesi gerekebilir.

Teknolojik açılardan ise kıtalararası frekans iletiminin mümkün olmaması, maliyet ve taşınabilirlik güçlüğü yöntemin en ciddi sorunlarındanır. Bu nedenle uydu tabanlı frekans aktarımlarının yüksek hassasiyetlere eriştirilmesi, daha az maliyetli ve taşınabilir atom saatleri üretimi birer araştırma konusu olabilir.



KAYNAKLAR

- Acar, M., Ozludemir, M. T., & Çelik, R. N. Ayan, T. (2006). Local geoid surface approximation by Fuzzy inference systems: case studies in Turkey. In *Proceeding of the 1st international symposium of the international gravity fields service: "Gravity Field of the Earth* (Vol. 28).
- Akyılmaz, O., Ayan, T., Özludemir, M. T., (2003). Geoid surface approximation by using Adaptive Network based Fuzzy Inference Systems. *AVN*, 8-9, 22-27, Wichmann, Hüthig, Almanya.
- Allan, D. W., & Weiss, M. A. (1980, May). Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite. In *34th Annual Symposium on Frequency Control* (pp. 334-346). IEEE.
- Anderson, J. D., Schubert, G., Trimble, V., & Feldman, M. R. (2015). Measurements of Newton's gravitational constant and the length of day. *EPL (Europhysics Letters)*, 110(1), 10002.
- Ashby, N., & Allan, D. W. (1979). Practical implications of relativity for a global coordinate time scale. *Radio Science*, 14(4), 649-669.
- Ashtekar, A. (2006). Space and time: From antiquity to Einstein and beyond. *Resonance*, 11(9), 4-19.
- Ateş, H. B. (2011). *TUSAGA-Aktif Gps Ağ Verileri ile Bölgesel İyonosferik Modelin Oluşturulması* (Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli).
- Ayan, T. (1976). 1976 Türkiye Geoidi. *Harita Dergisi*.
- Ayan, T. ve Deniz, R. (2000). Fiziksel Jeodezi Ders Notu. İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi, Jeodezi Anabilim Dalı.
- Ayhan M.E., Demir C., Lenk O., Kılıçoğlu A., Aktuğ B., Açıkgöz M., Fırat O., Şengün Y. S., Cingöz A., Gürdal M. A., Kurt A. İ., Ocak M., Türkezer M., Türkezer A., Yıldız H., Bayazıt N., Ata M., Çağlar Y. ve Özerkan A. (2002). Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA-99A). *Harita Dergisi, Özel*, (16), 67.
- Balazs, E. I., & Young, G. M. (1982). Corrections applied by the National Geodetic Survey to precise leveling observations.
- Bauch, A. (2012). Time—the SI Base Unit “Second”. *MITTEILUNGEN S*, 25.
- Bičák, J. (1999). Selected solutions of Einstein’s field equations: their role in general relativity and astrophysics. In *Einstein’s field equations and their physical implications* (pp. 1-126). Springer, Berlin, Heidelberg.
- BIPM. (2018), *BIPM Annual Report on Time Activities* Volume 13. Pavillon de Breteuil, F-92312 SÈVRES Cedex, France
- Bjerhammar, A. (1986), Relativistic geodesy. NOAA Technical Report.
- Carroll, S. (2014). *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Calonico, D. , Bertacco, E. K., Calosso, C. E., Clivati, C., Costanzo, G. A., Frittelli, M., Godone, A., Mura, A., Poli, N., Sutyrin, D. V., Tino, G. M., Zucco,

- M. E., Levi, F.** (2014). High-accuracy coherent optical frequency transfer over a doubled 642-km fiber link. *Applied Physics B*, 117(3), 979-986
- Chou, C.W., Hume, D.B., Koelemeij, J.C.J., Wineland, D.J. ve Rosenband, T.** (2010). Frequency comparison of two high-accuracy Al⁺ optical clocks. *Physical review letters*, 104(7), 070802.
- de Abreu, R., & Guerra, V.** (2007). The principle of relativity and the indeterminacy of special relativity. *European Journal of Physics*, 29(1), 33.
- Delva, P., & Lodewyck, J.** (2013). Atomic clocks: new prospects in metrology and geodesy. *arXiv preprint arXiv:1308.6766*.
- Delva, P., & Geršl, J.** (2017). Theoretical Tools for Relativistic Gravimetry, Gradiometry and Chronometric Geodesy and Application to a Parameterized Post-Newtonian Metric. *Universe*, 3(1), 24.
- Demir C. ve Cingöz A.** (2002). Türkiye Ulusal Düşey Kontrol (Nivelman) Ağı-1999 (TUDKA-99), TUJK 2002 yılı Bilimsel Toplantısı, Tektonik ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı, 10-12 Ekim 2002, İzmir.
- Denker, H., Timmen, L., Voigt, C., Weyers, S., Peik, E., Margolis, H.S., Delva, P., Wolf, P. ve Petit, G.** (2018). Geodetic methods to determine the relativistic redshift at the level of 10⁻¹⁸ in the context of international timescales: a review and practical results. *Journal of Geodesy*, 92(5), 487-516.
- Direnç, A., Simav, M., Türkezer, A., Kurt, A., & Kurt, M.** (2012). Türkiye’de Jeoit Belirleme Çalışmaları. *Türkiye Ulusal Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu Çalıştayı, Zonguldak*. (pp. 28-30).
- Drinkwater, M. R., Floberghagen, R., Haagmans, R., Muzi, D., & Popescu, A.** (2003). VII: Closing session: GOCE: ESA's first earth explorer core mission. *Space Science Reviews*, 108(1-2), 419-432.
- EURAMET** (2014). Latest news from NEAT-FT, a joint research project of the EMRP https://www.ptb.de/emrp/neatft_project.html?&no_cache=1&cid=2519&did=8595&sechash=d762ea7d
- Ebenhag, S. C.** (2013). *Frequency transfer techniques and applications in fiber optic communication systems*. (Doktora Tezi). Chalmers University of Technology, Gothenburg, İsveç.
- Einstein, A.** (1922). *The Meaning of Relativity*. Princeton University Press.
- Engelis, T., Rapp, R.H. ve Tscherning, C.C.** (1984) The precise computation of geoid undulation differences with comparison to results obtained from the Global Positioning System. *Geophysical Research Letters*, 11(9): 821–824.
- Eren K. ve Uzel T.** (2006) *Ulusal CORS Sisteminin kurulması ve Datum dönüşümü projesi*. 1.Gelişme Raporu, İKÜ Yayınları.
- Featherstone W. E. ve Kuhn Kuhn** (2006) Height systems and vertical datums: A review in the Australian context, *Journal of Spatial Science*, 51(1), 21-41.
- Flury, J., & Rummel, R. (Eds.).** (2005). *Future satellite gravimetry and earth dynamics*. Dordrecht: Springer.
- Forsberg, R.** (1991). A new high-resolution geoid of the Nordic area. In *Determination of the geoid* (pp. 241-250). Springer, New York, NY.
- Gozzard, D. R., Schediwy, S. W., Stone, B., Messineo, M., & Tobar, M.** (2018). Stabilized free-space optical frequency transfer. *Physical Review Applied*, 10(2), 024046.
- Gwaleba, M.J.** (2018). Comparison of Global Geoid Models Against the GPS/Levelling-Derived Geoid Heights in Tanzania, *Journal of Geomatics*, Vol. 12, No.2.

- Hachisu, H., Fujieda M., Nagano S., Gotoh T., Nogami A., Ido T., Falke St., Huntemann N., Grebing C., Lipphardt B., Lisdat Ch. ve Piester D.** (2014). Direct comparison of optical lattice clocks with an intercontinental baseline of 9000 km. *Optics letters*, 39(14), 4072-4075.
- Hahcıoğlu, K.** (2015). *Sayısal Zenit Kamera Sistemi ile Astro-Jeodezik Çekül Sapmalarının Belirlenmesi* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hamid, R., Taskin, I., Cetintas, M.** (1995a). "Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde Mikrodalga Zaman ve Frekans Standardı Sistemi ve Zaman Skalasının İzlenebilirliği", I. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, Eskişehir: 7 s.
- Hamid, R., Taskin, I., Cetintas, M., Sautenkov, V.** (1995b). "UME'de Primer Frekans Standardı Kurulması için Sürdürülen Çalışmalar", I. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, Eskişehir, 8 s.
- Hamid, R., Yakar, A., Cetintas, M., Araz, I., Araz, I.** (1997). "UME Zaman ve Frekans Standardı Sistemi", II. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, Eskişehir: 6 s.
- Hamid (Gamidov), R., Cetintas, M., Dereli (Corman), A.** (1999). "Telefon Hattı Vasıtasıyla UME Zaman Dağıtım Sistemi Kullanılarak Kişisel Bilgisayarların Zaman Senkronizasyonu", 3. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, Eskişehir: 4 s
- Hedekvist, P. ve Ebenhag, S.C.** (2012). Time and frequency transfer in optical fibers. *Recent Progress in Optical Fiber Research*, 371-386.
- Helmert, F.R.** (1884). *Die mathematischen und physikalischen theorieen der höheren geodäsie..* (Vol. 2). BG Teubner.
- Hinkley, N., Sherman, J.A., Phillips, N.B., Schioppo, M., Lemke, N.D., Beloy, K., Pizzocaro, M., Oates, C.W. ve Ludlow, A.D.** (2013). An atomic clock with 10^{-18} instability. *Science*, 341(6151), 1215-1218.
- Hofmann-Wellenhof, B. ve Moritz, H.** (2006). *Physical Geodesy*. Springer Science & Business Media.
- Ihde, J., Sánchez, L., Barzaghi, R., Drewes, H., Foerste, C., Gruber, T. ve Sideris, M.** (2017). Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHRs). *Surveys in geophysics*, 38(3), 549-570.
- IAG** (2016). Description of the global geodetic reference frame; position paper adopted by the IAG Executive Committee, April, 2016. Retrieved October 17, 2019, from http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/GGRF_description_by_the_IAG_V2.pdf
- IAU.** (2000) International Astronomical Union, Resolutions from the XXIVth General Assembly Manchester, UK, Retrieved November 5, 2019, from <http://www.iau.org/static/resolutions/IAU2000>
- Imae, M.** (2003). Basic measurement techniques on time and frequency transfer. *Journal of the National institute of information and communications Technology*, 50(1), 105-122.
- Karlık S.E., Yılmaz G. ve Geren K.,** (2002). "Optik fiberlerdeki polarizasyon mod dispersiyonunun sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemleriyle ölçülmesi", ELECO'2002 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, c. 2, s. 275-279
- Leopardi, H., Davila-Rodriguez, J., Quinlan, F., Olson, J., Sherman, J.A., Diddams, S.A. ve Fortier, T.M.** (2017). Single-branch Er: fiber frequency comb for precision optical metrology with 10^{-18} fractional instability, *Optica* 4(8), 879-885.
- Lisdat, C., Grosche, G., Quintin, N., Shi, C., Raupach, S.M., Grebing, C., Nicolodi, D., Stefani, F., Al-Masoudi, A., Dörscher, S., Häfner, S., Robyr,**

- J.L., Chiodo, N., Bilicki, S., Bookjans, E., Koczwara, A., Koke, S., Kuhl, A., Wiotte, F., Meynadier, F., Camisard, E., Abgrall, M., Lours, M., Legero, T., Schnatz, H., Sterr, U., Denker, H., Chardonnet, C., Le Coq, Y., Santarelli, G., Amy-Klein, A., Le Targat, R., Lodewyck, J., Lopez, O. ve Pottie, P.E. (2016). A clock network for geodesy and fundamental science, *Nature Communications*, 7, 12443.
- Mai, E.**, (2013). *Time, atomic clocks, and relativistic geodesy*. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der CH Beck'schen Verlagsbuchhandlung.
- McCarthy, D.D. ve Seidelmann, P.K.** (2009). *Time: from Earth rotation to atomic physics*. Wiley-VCH, Weinheim, doi:10.1002/9783527627943.
- McGrew, W.F., Zhang, X., Leopardi, H., Fasano, R.J., Nicolodi, D., Beloy, K., Yao, J., Sherman, J.A., Schäffer, S.A., Savory, J., Brown R.C., Römisch, S., Oates, C.W., Parker, T.E., Fortier, T.M. ve Ludlow, A.D.** (2019). Towards the optical second: verifying optical clocks at the SI limit. *Optica*, 6(4), 448-454.
- Mehlstäubler, T., Grosche, G., Lisdar, C., Schmidt, P. ve Denker, H.** (2018). Atomic Clocks for Geodesy. *Reports on Progress in Physics*. 81(6), 064401.
- Michelson, A.A., and Morley, E.W.** (1887). On the Relative Motion of the Earth and of the Luminiferous Ether. *Sidereal Messenger*, 6, 306-310.
- Molodenskiy, M. S.** (1945). *Basic problems of geodetic gravimetry*. US Department of Commerce, Office of Technical Services.
- Moon, P. ve Spencer, D.E.** (1986). *Theory of holors: A generalization of tensors*. Cambridge University Press.
- Müller, J., Dirkx, D., Kopeikin, S.M., Lion, G., Panet, I., Petit, G. ve Visser, P.N.** (2018). High performance clocks and gravity field determination. *Space Science Reviews*, 214(1), 5.
- NASA-JPL** (2019). *GRACE D-103133 Gravity Recovery and Climate Experiment Level-3 Data Product User Handbook*. NASA-JPL: Pasadena, CA, USA.
- Nordtvedt, K.** (1968). Equivalence principle for massive bodies. II. Theory. *Physical Review*, 169(5), 1017.
- Papadopoulos, N., Paraskevas, M., Ioannis, K. ve Georgios, N.** (2019). Calculating a geoid model for Greece using gravity and GPS observations, 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring, 15-17 May 2019, Athens, Greece.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. ve Factor, J.K.** (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of geophysical research: solid earth*, 117(B4).
- Peprah, M.S., Yevenyo Ziggah, Y., ve Yakubu, I.** (2017). Performance evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)—a case study. *South African Journal of Geomatics*, 6(1), 47-72.
- Pe'er1, A.** (2014a), Einstein's field equation.
<http://www.physics.ucc.ie/appeer/PY4112/Sch.pdf>
- Pe'er1, A.** (2014b), Schwarzschild Solution and Black holes.
<http://www.physics.ucc.ie/appeer/PY4112/Sch.pdf>
- Peidou, A. ve Pagiatakis, S.** (2019). Gravity Gradiometry With GRACE Space Missions: New Opportunities for the Geosciences. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(8), 9130-9147.
- Petit, G. ve Wolf, P.** (2005). Relativistic theory for time comparisons: a review, *Metrologia*, 42(3), S138.

- Philipp, D.** (2018). Theoretical Aspects of Relativistic Geodesy (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, University of Bremen, Germany).
- Predehl, K., Grosche, G., Raupach, S.M.F., Droste, S., Terra, O., Alnis, J., Legero, T., Hansch, T.W., Udem, T., Holzwarth, R. ve Schnatz, H.** (2012). A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place. *Science*, 336(6080), 441-444.
- Rindler, W.** (2006). Rindler, W. (2003). Relativity: special, general, and cosmological.
- Rosi, G., Sorrentino, F., Cacciapuoti, L., Prevedelli, M. ve Tino, G.M.** (2014). Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms. *Nature*, 510(7506), 518.
- Ryder, L.** (2009). *Introduction to general relativity*. Cambridge University Press.
- Sasso D.** (2007). Relativistic effects of the theory of reference frames. *Physics Essays*, 20(1), 23-37.
- Schnatz, H., Bolognini, G., Calonico, D., Dierikx, E., Grosche, G., Hedkvist, P.O., Kuna, A., Marra, G., Merimaa, M., Niessner, A., Pottie, P., Sliwczynski, L., Slavík, R., Smotlacha, V., & Spahic, F.** (2014). NEAT-FT: the European fiber link collaboration.
- Sideris M.G.,** (2011). Geoid Determination, Theory and Principles, In Gupta H.K., (Ed.), Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Encyclopedia of Earth Sciences Series, Springer Science & Business Media B.V. 2011, p. 353
- Soffel, M., Klioner, S.A., Petit, G., Wolf, P., Kopeikin, S.M., Bretagnon, P., Brumberg, V.A., Capitaine, N., Damour, T., Fukushima, T., Guinot, B., Huang, T.Y., Lindegren, L., Ma, C., Nordtvedt, K., Ries, J.C., Seidelmann, P.K., Vokrouhlický, D.C., Will, M. ve Xu, C.** (2003). The IAU 2000 resolutions for astrometry, celestial mechanics, and metrology in the relativistic framework: explanatory supplement. *The Astronomical Journal*, 126(6), 2687.
- Swain, J.** (2014). Measuring Newton's Gravitational Constant With a Gravitational Oscillator. *arXiv preprint arXiv:1405.5528*
- Susskind, L.** (2012). *General Relativity (Stanford Lectures)*, Stanford University [Video Dosyası] erişim adresi: https://www.youtube.com/playlist?list=PLXLSbKIMm0kh6XsMSCEMnM02kEoW_8x-f
- Gotoh, T., Kaneko, A., Shibuya, Y., ve Imae, M.** (2003). 4-2 4-2 GPS Common View. *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology Vol*, 50(1/2).
- Takano, T., Takamoto, M., Ushijima, I., Ohmae, N., Akatsuka, T., Yamaguchi, A., Kuroishi, Y., Munekane, H., Miyahara, B. ve Katori, H.** (2016). Real-time geopotentiometry with synchronously linked optical lattice clocks. *arXiv preprint arXiv:1608.07650*.
- Taşdemir, E.** (2019). On the Asymptotically Periodic Solutions of A Fifth Order Difference Equation.
- Torge, W. ve Müller, J.** (2012). Geodesy. De Gruyter Textbook
- Tscherning, C.C. ve Rapp, R.H.** (1974). Closed covariance expressions for gravity anomalies, geoid undulations, and deflections of the vertical implied by anomaly degree variance models. *Scientific Interim Report Ohio State Univ., Columbus. Dept. of Geodetic Science*.
- Van Fraassen, B. C.** (1970). An introduction to the philosophy of time and space.
- Vaníček, P. ve Krakiwsky, E.J.** (1986). *Geodesy: The Concepts*, 2nd edition. North-Holland, Amsterdam.

- Vanícek, P., Castle, R. O. ve Balazs, E.I.** (1980). Geodetic leveling and its applications. *Reviews of Geophysics*, 18(2), 505-524.
- Vu, D.T., Bruinsma, S. ve Bonvalot, S.** (2019). A high-resolution gravimetric quasigeoid model for Vietnam. *Earth, Planets and Space*, 71(1), 65.
- Will C. M.** (1971). heoretical frameworks for testing relativistic gravity. II. Parametrized post-Newtonian hydrodynamics, and the Nordtvedt effect. *The Astrophysical Journal*, 163, 611.
- Will C. M.** (2006). The confrontation between general relativity and experiment. *Astrophysics and Space Science*, 283(4), 543-552.
- Yilmaz, M., Turgut, B., Gullu, M. ve Yilmaz, I.** (2016). Evaluation of recent global geopotential models by GNSS/levelling data: internal Aegean region. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 1(1), 15-19.
- Url-1** < <https://www.iag-aig.org/doc/5c9613581cba0.pdf> >, erişim tarihi 14.11.2019.
- Url-2** < <https://www.iag-aig.org/doc/5d12072ade8fd.pdf> >, erişim tarihi 14.11.2019.
- Url-3** < <https://www.iag-aig.org/doc/5cb33a06e5f9a.pdf> >, erişim tarihi 14.11.2019.
- Url-4** < <https://www.bipm.org/metrology/time-frequency/units.html> >, erişim tarihi 14.11.2019.
- Url-5** < <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/background-how-nist-f2-works> > erişim tarihi 06.10.2019.
- Url-6** < https://www.ptb.de/emrp/neatft_home.html > erişim tarihi 08.10.2019.
- Url-7** < <http://www.refimeve.fr/index.php/en/presentation-eng.html> > erişim tarihi 21.10.2019.
- Url-8** < <http://www.refimeve.fr/index.php/en/presentation-eng.html> > erişim tarihi 21.10.2019.
- Url-9** < <http://www.ume.tubitak.gov.tr/tr/laboratuvarlarimiz/zaman-frekans-ve-dalgaboyu-laboratuvarlari> >, erişim tarihi 08.11.2019.
- Url-10** < <http://www.ume.tubitak.gov.tr/tr/haber/tubitak-ume-turkiyenin-ilk-optik-atomik-saatini-gelistirecek> >, erişim tarihi 08.11.2019.

EKLER

EK A: Manifold

EK B: Tensörel Analize İlişkin Temel Kavramlar



EK A:

Genel göreliliğin kuramsal katkılarında birisi Öklid uzayında en kısa aralıklarda hareket eden elektromanyetik dalgaların, uzay-zamanda da en kısa mesafeyi katetmesi gerekliliği öngörüsüdür. Bu, elektromanyetik dalgaların kütleçekim ile birlikte uzay-zamanda oluşan eğrilik aralığında hareket etmesini gerektirir. Bu durum geometrik açıdan, maddenin kütle-çekimsel etki sonucu uzayı kendi merkezine doğru büktüğü varsayımı nedeniyle, negatif eğrilige sahip Reimann Uzayı ile ifade edilebilmektedir.

Geometri, genel olarak iki komşuluk ilişkisinin tanımlandığı aksiyomlar bütünü olarak türlere ayrılmaktadır ve Riemann uzayı da eliptik geometri türü arasında yer almaktadır. Geometri türü ve ilişkileri o uzayın içsel özelliklerini tanımlamaktadır ve uzayın boyutları arttırıldığı halde değişmezler.

Reimann Uzayı'nın farklı içsel özellikleri nedeniyle, hareket denklemlerinin türetilmesi açısından birkaç matematiksel kavram ve operatörün bilinmesi önemlidir. Uzay-zaman metriğini ilişkilendirebilmek açısından difernasiyel geometri ve topoloji gibi matematiksel alanlara ait bir takım araçlara ve tanımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Noktaların komşuluk ilişkisini tanımlayan metriklerin fonksiyonel ifadesi uzayın karakteristiğini belirleyen ifadelerdir. Öklid uzayında öteleme, dönme gibi katı dönüşümler bir doğrunun uzunluğunu değiştirmeyecektir. Fakat Öklid Uzayı ile hiperbolik ya da eliptik uzaylar arasında dönüşüm ilişkisi kurulması gerektiğinde, koordinat eksenlerinin Öklid uzayına nazaran eğrilige sahip olması, farklı bir dönüşüm ilişkisinin tanımlanmasını gerektirmektedir. Öklid uzayında herhangi bir vektör kendine paralel biçimde ötelenirse aynı noktaya getirildiğinde ilk konumundaki vektör ile eş vektör olacaktır. Fakat eğri uzaylar boyunca yapılan öteleme işlemi vektörün doğrultusunu değiştirebilmektedir.

Buna karşın eğri uzaylar yerel anlamda Öklid Uzayı ile benzerlik gösterirler. Artan derecelerde ortaya çıkan eğriliklerin ifade edilmesi için yerel özelliklerin birleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle eğri objeler manifold olarak isimlendirilir ve topolojik ilişkiler aracılığıyla Öklid uzayı üzerine yansıtılırlar. U koordinat komşuluğu ve ξ , U üzerindeki koordinat sistemi olmak üzere, M yerel anlamda n -

boyutlu bir Öklid Uzayı iken, M 'in her noktasında R_n açık alt kümesi üzerine U 'dan ξ 'ye homeomorfizma¹ var ise, M topolojik bir Manifold tanımlamaktadır.

Yani $\delta\mu\eta$ R^n boyutlu Öklid uzayında tanımlanmış metrik olmak üzere, n -boyutlu topolojik uzayı diferansiyellenebilir kılmak üzere, Manifold tüm yerel bölgelerde Öklid uzayıyla benzerlik ilişkisi kuran bir kümeyi oluşturmaktadır. Manifold olarak tanımlı bir alandaki işlevler yerel olarak Öklid uzayına dönüştürülerek, diferansiyel işlemler kolaylaştırılır.



¹ Homomorfizma 2 topolojik uzay arasındaki fonksiyonun ve tersinin süreklilik belirtmesine denir.

EK B

GGT'ne ilişkin kavramsal kapsam Susskind'in (2012) derslerinde yer almaktadır ve ekler genel olarak ders videolarından derlenmiştir.

Manifoldun karakteristiğini yansıtan metrik ve diğer uzaylara izdüşüm ilişkilerini kurabilmek açısından tensör olarak adlandırılan araçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Tensörler düz uzaylar ve eğri uzaylar arasında değişen türev ilişkilerini kolaylaştıran araçlardır ve

$$T_{\mu\eta\nu\dots}^{\alpha\beta\gamma\dots} = V^\alpha V^\beta V^\gamma \dots V_\mu V_\eta V_\nu \dots \quad (\text{B.1})$$

olarak gösterilmektedir. Üst ve alt indisler sırasıyla tensörlerin kontravaryant ve kovaryant bileşenleri olarak ifade edilmektedir.

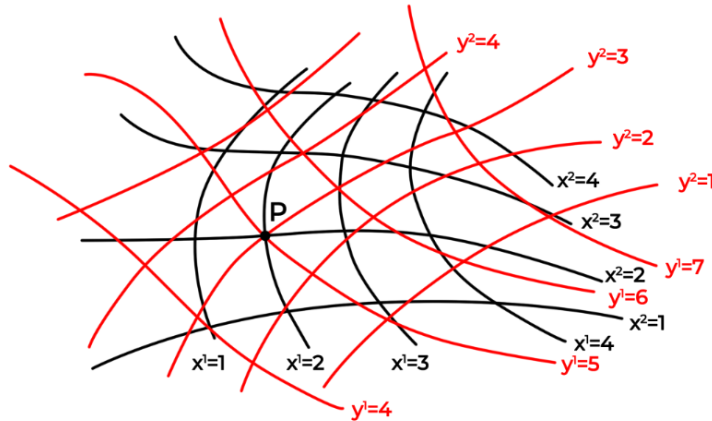
Kovaryant ve Kontravaryant Bileşenler

Tensörler değişen bazlara göre ters dönüşüme sahip kontravaryant ve aynı lineer dönüşme sahip kovaryant bileşenler olarak, farklı uzaylararası dönüşümleri tanımlamak için birbirinden ayrılırlar.

Skaler alanlar 0. dereceden tensörlerdir ve S ile gösterilirler. X ve Y iki farklı koordinat sistemi olmak üzere

$$S'(Y) = S(X) \quad (\text{B.2})$$

iki sistem arasında skaler alan dönüşümünü ifade etmektedir. Burada “'” gösterimi skaler alanın Y koordinat sistemine göre fonksiyonunu ifade etmektedir.



Şekil B.1 : İki boyutlu uzayda X ve Y koordinat sistemleri ilişkisi.

İki sistem açısından düşünüldüğünde, herhangi bir P noktasındaki skaler değer, koordinat sisteminden bağımsız olacaktır. Yani, Şekil 3,1'e göre $S'(5,3)=S(2,2)$ denilebilmektedir.

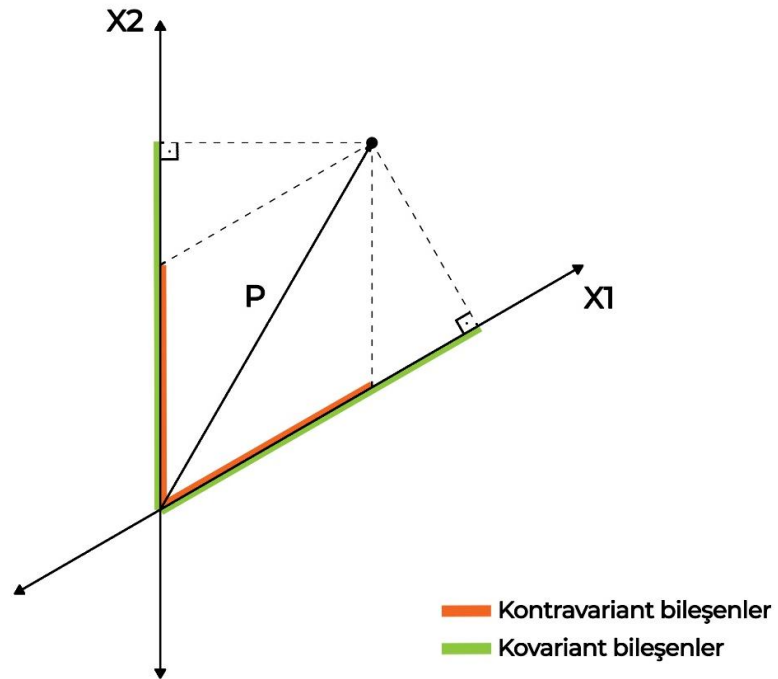
Vektörler, 1. dereceden tensörlerdir ve V ile gösterilir. Vektörler tensör analizinde 1 adet üst indise sahip olmak üzere koordinat sistemlerine bağlı olarak X^μ ve Y^μ olarak gösterilmektedirler. İki sistem arasında koordinat dönüşümü

$$X^\mu = X^\mu(Y) \quad (B.3a)$$

$$Y^\mu = Y^\mu(X) \quad (B.3b)$$

olarak ifade edilmektedir.

Vektörler koordinat sistemlerinde dik izdüşümleri kovaryant ve paralel izdüşümleri kontravaryant bileşenleri aracılığı ile ifade edilirler. Dik koordinat sistemlerinde paralel ve dik izdüşümler çakışmaktadır; fakat dik olmayan ya da eğri koordinat



Şekil B.2 : İki boyutlu uzayda Kovaryant ve Kontravaryant bileşenlerin gösterimi

sistemlerinde bu çakışma gerçekleşmeyebilir. Bu nedenle vektörlerin kovaryant ve kontravaryant bileşenleri farklılaşmaktadır.

Kontravaryant bileşenler V^μ olarak gösterilmektedir. Bu bileşen bir anlamıyla baz vektörün katsayısı olmaktadır. İki koordinat sisteminde arasındaki kontravaryant dönüşüm;

$$(V')^\mu = \sum_{\alpha} \frac{\partial Y^\mu}{\partial X^\alpha} V^\alpha = \frac{\partial Y^\mu}{\partial X^\alpha} V^\alpha \quad (B.4)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada $\frac{\partial Y^\mu}{\partial X^\alpha}$, Y koordinat sistemindeki kontravaryant bileşenler kombinasyonunun X koordinat sistemindeki bütün kontravaryant bileşen kombinasyonlarına göre değişimini vermektedir.

Koordinat eksenine dik olan vektör bileşeni kovaryant bileşen olarak adlandırılır ve V_i olarak gösterilir. Vektörün skaler çarpımı ile;

$$V_\mu = V e_\mu \quad (B.5)$$

olacak şekilde kovaryant bileşene ulaşılmaktadır. İki koordinat sistemi arasındaki kovaryant dönüşüm ise;

$$(V')_\mu = \sum_p \frac{\partial X^\alpha}{\partial Y^\mu} V_\mu = \frac{\partial X^\alpha}{\partial Y^\mu} V_\mu \quad (B.6)$$

olarak ilişkilendirilir.

Einstein Toplama Kuralı

Kontravaryant ve kovaryant bileşenlerin indis gösterimleri yüksek mertebeli matris işlemlerinde uzun işlem adımları içermektedir. Bu nedenle Einstein tarafından geliştirilen toplama kuralı ile toplam gösterimi;

$$V = V^1 e_1 + V^2 e_2 + V^3 e_3 + \dots V^\mu e_\mu \quad (B.7)$$

Kısaca V vektörü, V^μ katsayılar ve e_μ bazlar olmak üzere Einstein toplama kuralına göre lineer biçimde

$$V = V^\mu e_\mu \quad (B.8)$$

olarak ifade edilir.

Metrik Tensör

Kovaryant bileşenle kontravaryant bileşen arasındaki ilişki eşitlik (B.4) ve (B.8) kullanılarak;

$$V_\mu = V e_\mu = V^\mu e_\mu e_\eta \quad (\text{B.9})$$

olarak ifade edilebilir. Burada $e_\mu e_\eta$ ifadesi metrik tensör olarak adlandırılmaktadır ve

$$g_{mn} = e_\mu e_\eta \quad (\text{B.10})$$

olarak gösterilmektedir. Bir vektörün uzunluğunu bulmak için skaler çarpım ile;

$$VV = V^\mu V^\eta (e_\mu e_\eta) = V^\mu V^\eta g_{\mu\eta} \quad (\text{B.11})$$

metrik tensörüne vektör uzunluk denkleminde ulaşılır. Metrik tensör uzayda iki komşuluk ilişkisini tanımlamak için kullanılır.

Öklid uzayı Newton fiziğinin içsel bir unsurudur. Newton'ın Kütleçekim yasası uyarınca cisimler birbirlerine doğru çekim uygularlar ve bu çekim iki cismin merkezinden geçen doğrultu üzerindedir. Einstein'ın özel görelilik kuramı ise ışık hızının sabitliğine dayanarak iki noktanın komşuluğunu

$$ds^2 = -(dx^0)^2 + (dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2 \quad (\text{B.12})$$

olarak tanımlamaktadır. Burada ds iki nokta arası uzaklık, $x^0 = ct$ zaman parametresi, $x^1 = x, x^2 = y, x^3 = z$ mekansal koordinatlardır. Koordinatların indis gösterimleri, uzun gösterimlerde kolaylık sağlamak açısından çalışma kapsamında bu şekilde tercih edilmektedir ve genelleştirilmiş olarak x^μ olarak gösterilecektir.

Denklem (3.1)'den görüleceği üzere katsayı işaretleri $(-, +, +, +)$ olmaktadır ve bu Minkowski Uzayı'na ilişkin bir özelliktir. Bu nedenle eğriliği, Öklid uzayından ayırt etmek açısından Minkowski uzayı metrik tensörü

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.13})$$

olarak ifade edilmektedir. Lorentz uzayında komşuluk uzunluğu eşitlik (3.4)'te ifade edilen Einstein toplama kuralına göre

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} x^\mu x^\nu \quad (\text{B.14})$$

şeklinde de ifade edilebilir.

Çok sık kullanılan bir ifade de Kronecker delta tensörüdür. Birim tensör olan bu ifade;

$$\delta_{\mu\nu} \equiv \begin{cases} 0; & \mu \neq \nu \\ 1; & \mu = \nu \end{cases} \quad (\text{B.15})$$

olarak gösterilir ve köşegen matris formundadır.

Christoffel Sembolü

$A_{\mu\eta\nu}^{\alpha\beta\gamma\dots}$ ve $B_{\mu\eta\nu}^{\alpha\beta\gamma\dots}$ iki farklı tensör olmak üzere; eğer

$$A_{\mu\eta\nu}^{\alpha\beta\gamma\dots} = B_{\mu\eta\nu}^{\alpha\beta\gamma\dots} \quad (\text{B.16})$$

eşitliği varsa, tüm koordinat sistemlerinde bu eşitlik geçerlidir. Fakat tensörlerin farklı eğriliklere sahip koordinat sistemleri altında dönüşümlerinde bu eşitlik geçerli değildir.

Manifoldlar üzerinde yapılan matematiksel işlemler, metrik dönüşümler gerektirmektedir ve eğrilik bu dönüşümle ilişkilendirilebilir. Eğriliğe sahip uzaylarda kısmi türev kullanışlı olmamaktadır ve bu nedenle manifold üzerinde tensör olarak gösterime sahip, Öklid uzayında kısmi türevce dönüşebilen bir operatöre ihtiyaç duyulur. Bu nedenle Manifold'un Öklid uzayında karşılık geldiği noktada, kısmi türeve getirilecek bir düzeltmeyle kovaryant türev alınabilir. Bunu sağlayan operatöre Christoffel Sembolü denmektedir. İki sistem arasındaki dönüşüm için

$$V'^m = V^m + C_{nr}^m V^n V^r \quad (\text{B.17})$$

i sistem arasındaki dönüşüm için eşitliği tanımlanmış olsun. Burada $C_{nr}^m V^n V^r$ ifadesi dönüşüm ilişkisini tanımlayacak düzeltme miktarıdır. Kovaryant türev $D_r V_m$ olmak üzere;

$$D_n V_m = \partial_n V_m - \Gamma_{nm}^r V_r \quad (\text{B.18})$$

eşitliği ile tanımlanır. Kısmi türeve getirilen düzeltme miktarı burada Γ Christoffel Sembolü ile gösterilmektedir. Baz vektörü üzerindeki düzeltme miktarı

$$\Gamma_{nm}^r e_r = \partial_m e_n \quad (\text{B.19})$$

şeklinde tanımlanabilir. Eşitliğin her iki tarafını baz vektörleri ile çarparak;

$$\Gamma_{nm}^r e_r e_l = (\partial_m e_n) e_l \quad (\text{B.20})$$

ve Leibnitz Kuralı aracılığıyla;

$$\Gamma_{nm}^r e_r e_l = \partial_m (e_n e_l) - (\partial_m e_l) e_n \quad (\text{B.21})$$

olur ve 3 üstteki tanım gereği;

$$\Gamma_{nm}^r e_r e_l = \partial_m (e_n e_l) - \Gamma_{lm}^r e_r e_n \quad (\text{B.22})$$

olacaktır. Eşitlik (3.11) yardımıyla

$$\Gamma_{nm}^r g_{rl} = \partial_m g_{nl} - \Gamma_{lm}^r g_{rn} \quad (\text{B.23})$$

olur ve buradan da

$$\Gamma_{nm}^r g_{rl} + \Gamma_{lm}^r g_{rn} = \partial_m g_{nl} \quad (\text{B.24})$$

olur. Burada r indisi toplama gösterimini kısaltmak, diğer indisler ise tensör indisleri olmak üzere;

$$\Gamma_{ml}^r g_{rn} + \Gamma_{nl}^r g_{rm} = \partial_l g_{mn} \quad (\text{B.25})$$

$$\Gamma_{ln}^r g_{rm} + \Gamma_{mn}^r g_{rl} = \partial_n g_{lm} \quad (\text{B.26})$$

Bu işlemlerin ilki ve sonuncusunun toplanması ve ortadakinin çıkartılması ile;

$$2\Gamma_{nm}^r g_{rl} = \partial_m g_{nl} + \partial_n g_{lm} - \partial_l g_{mn} \quad (\text{B.27})$$

bulunur.

$$g_{rl}g^{ml} = \delta_r^m \quad (B.28)$$

Denklemleri aracılığıyla;

$$2\Gamma_{nm}^r g_{rl} g^{kl} = g^{kl} (\partial_m g_{nl} + \partial_n g_{lm} - \partial_l g_{mn}) \quad (B.29)$$

ve buradan da;

$$\Gamma_{nm}^k = \frac{1}{2} g^{kl} (\partial_m g_{nl} + \partial_n g_{lm} - \partial_l g_{mn}) \quad (B.30)$$

olarak Christoffel Sembolü'ne ulaşılmaktadır.

Ricci Eğrilik Tensörü ve Skalari

Riemann Eğrilik Tensörü uzay-zaman eğriliğini ifade eden tensördür ve

$$\mathcal{R}_{lmn}^k = \partial_m \Gamma_{ln}^k - \partial_l \Gamma_{mn}^k + \Gamma_{ln}^r \Gamma_{rm}^k - \Gamma_{mn}^r \Gamma_{rl}^k \quad (B.31)$$

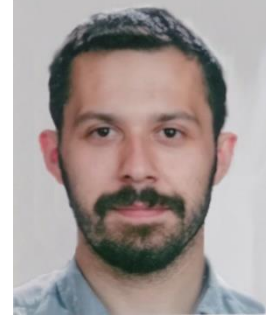
olarak ifade edilmektedir. Fakat Eşitlik (3.2)'de denklemin sağ kısmındaki enerji momentum tensörü 2 indekse sahiptir ve o nedenle tensörel daraltma yapılarak k ve m ya da l parametreleri eşit seçilebilir (n eşit seçilirse sonuç 0 olacaktır). Böylece Ricci Eğrilik Tensörü $\mathcal{R}_{mn}$ elde edilmiş olur.

Susskind'e (2012) göre Riemann Eğrilik Tensörü'nden Ricci Eğrilik Tensörü'ne geçildiğinde bilgi kaybı yaşanmaktadır ve $\mathcal{R}_{mn} = 0$ durumunda (kaynağı olmayan kütleçekim dalgaları örneği gibi), uzay-zaman düz olarak gözükecektir fakat bir eğrilik yine de mevcuttur. Bu nedenle Ricci Eğrilik Tensörü'ne Ricci Eğrilik Skalari eklenir ve Ricci Eğrilik Skalari

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_l^l = \mathcal{R}^{ln} g_{ln} \quad (B.31)$$

olarak ifade edilir.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Hasan Onur IŞIK
Doğum Tarihi ve Yeri : 19.05.1991 / BARTIN
E-posta : isikh@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Lisans Programı
- **Yükseklisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, Geomatik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013-2015 yılları arasında 111Y125 Numaralı TUBİTAK destekli “CCD Kameralar ile Astro-jeodezik Çekül Sapmalarının Belirlenmesi” projesi kapsamında çalıştı.
- 2014 yılında Boğaziçi Üniversitesi Tarih Bölümü tarafından yürütülen Gözlükule Arkeolojik Kazısı’nda ölçme ekibinde yer aldı.
- 2016-2017 yılları arasında Artı-Eksi Mimarlık’ta Geomatik Mühendisi olarak çalıştı.
- 2017 yılında Prohit Mühendislik’te Geomatik Mühendisi olarak çalıştı.
- 2017 yılından itibaren Netyol Mühendislik ve Müşavirlik Ltd. Şti’nde Ulaştırma alanında Proje Mühendisi olarak çalışmaktadır.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Işık, H.O.** (2016). *İstanbul Metropolitan Alanı için Yerel Geoit Modeli Geliştirilmesi* (Lisans Bitirme Proje Tasarımı). İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.