



Medžida Mulić radi na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Sarajevu, na Odsjeku za geodeziju i geoinformatiku. Predaje predmete iz oblasti više geodezije: Satelitska geodezije, Geodetski referentni sistemi, Satelitska navigacija.

Prof. Dr. Asim Bilajbegović, TU Dresden

"Knjiga predstavlja nesumnjivon dobar, nov i neophodno potreban udžbenik za studente Građevinskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu, posebno za studente Odsjeka za geodeziju, te ispunjava prazninu u pisanoj literaturi vezanoj za Geodetske referentne sisteme na širim prostorima. Na osnovu prethodno navedenog, zadovoljstvo mi je predložiti da se ponudeni rad pod nazivom „Geodetski referentni sistemi“ štampa kao univerzitetski udžbenik za predmet Geodetski referentni sistemi kao i za druge predmete koji se bave ovom problematikom."

Doc. Dr. Miran Kuhar, Univerza v Ljubljani

"Rukopis je napisan na način da služi kao univerzitetski udžbenik za studente geodezije i geoinformatike. Publikacija svakako može poslužiti i studentima master studija, a naravno i svim inženjerima i magistrima geodezije u praksi, koji se u svom radu susreću sa određivanjem koordinata geodetskih tačaka pomoću satelitske tehnologije GNSS i postupcima transformacije tih koordinata u državni koordinatni sistem."



**GRAĐEVINSKI
FAKULTET
UNIVERZITETA
U SARAJEVU**

MEDŽIDA MULIĆ



**GEODETSKI
REFERENTNI
SISTEMI**

GRAĐEVINSKI FAKULTET UNIVERZITETA U SARAJEVU

**MEDŽIDA
MULIĆ**

GEODETSKI

REFERENTNI

SISTEMI

**GRAĐEVINSKI
FAKULTET
UNIVERZITETA
U SARAJEVU**

IZDAVAČ:

Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu

ZA IZDAVAČA:

Prof. Dr. Mustafa Hrasnica, dipl. inž. građ.

RECENZENTI:

Prof. dr.sci. Asim Bilajbegović, dipl. inž. geod.

Doc.dr. Miran Kuhar, dipl. inž. geod.

OBRADA TEKSTA I PRELOM:

Medžida Mulić i Dževad Krdžalić

ILUSTRACIJA NA NASLOVNOJ STRANICI:

Zemlja kao „Sistem sfera“ i nebeski svod u pozadini

IZRADA ILUSTRACIJA:

Ajdin Mulić

ŠTAMPA:

Štamparija Fojnica, d.o.o Fojnica

TIRAŽ X primjeraka

Medžida Mulić

Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu

Odlukom Vijeća Građevinskog fakulteta broj 02-1-1268-6/17 na I sjednici održanoj 17.01.2018. odobrilo je izdavanje publikacije (udžbenik) „Geodetski referentni sistemi“.

Sva prava su pridržana. Ni jedan dio ovog izdanja ne smije se reproducirati, pohranjivati ili reproducirati u bilo kojem obliku ili na bilo koji način, elektronski, mehanički, fotokopiranjem, snimanjem ili na drugi način, bez prethodnog pismenog odobrenja autora.

CIP - Katalogizacija u publikaciji
Nacionalna i univerzitetska biblioteka Bosne i
Hercegovine, Sarajevo

528(075.8)

MULIĆ, Medžida

Geodetski referentni sistemi / Medžida Mulić ;
[izrada ilustracija Ajdin Mulić]. - Sarajevo:
Građevinski fakultet, 2018. - XV, 236 str. : ilustr. ;
25 cm

Bibliografija: str. 206-218; bibliografske i druge
bilješke uz tekst. - Registri.

ISBN 978-9958-638-50-3

COBISS.BH-ID [24960262](#)

<-----

Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu

Geodetski referentni sistemi

Medžida Mulić

Sarajevo, 2018.

SADRŽAJ

PREDGOVOR.....	v
POPIS SKRAĆENICA	ix
Glava 1	1
1 UVOD	1
1.1 DEFINICIJA I ZADATAK GEODEZIJE	2
1.2 KRETANJA ZEMLJE U PROSTORU I VREMENU.....	10
1.3 GRAĐA ZEMLJE	13
1.4 SISTEM ZEMLJA.....	19
1.5 TRI GLAVNA STUPA GEODEZIJE	22
1.6 PRECESIJA I NUTACIJA.....	24
1.7 INTERDISCIPLINARNOST GEODEZIJE.....	28
1.8 MEĐUNARODNE GEODETSKE ORGANIZACIJE.....	28
1.8.1 Međunarodna unija za geodeziju i geofiziku	29
1.8.2 Međunarodna asocijacija za geodeziju.....	30
1.8.3 GGOS kao vitalna infrastruktura geoznanosti	32
1.8.4 Geodetske tehnike koje se kombiniraju u GGOS	35
1.9 OSVRT NA POGLAVLJE.....	50

Glava 2	51
2 OBLIK ZEMLJE.....	51
2.1 APROKSIMACIJA ZEMLJE SFEROM.....	51
2.2 APROKSIMACIJA ZEMLJE ELIPSOIDOM	53
2.2.1 Rotacijski dvoosni elipsoid.....	54
2.2.2 Besselov elipsoid	61
2.2.3 Geodetski referentni sistem 1980.....	62
2.3 Osvrt na poglavlje.....	64
Glava 3.....	66
3 KOORDINATE I KOORDINATNI SISTEMI.....	66
3.1 SISTEMATIZACIJA KOORDINATA	66
3.2 SISTEMATIZACIJA KOORDINATNIH SISTEMA	68
3.3 GEODETSKI REFERENTNI SISTEMI- osnovni pojmovi	70
3.4 UVODNA MATEMATIČKA RAZMATRANJA	71
3.4.1 Nebeska sfera	71
3.4.2 Rotacijske matrice	73
3.5 VRIJEME U GEODEZIJI.....	75
3.5.1 Prirodni procesi i skale vremena.....	76
3.6 GEODETSKE KOORDINATE	80
3.6.1 Glavne linije na elipsoidu i radijusi zakrivljenosti	85
3.6.2 Veza geodetskih i Kartezijevih koordinata.....	88

3.7	PRIRODNE KOORDINATE.....	92
3.8	LOKALNE TERESTRIČKE KOORDINATE.....	95
3.8.1	Lokalni astronomski koordinatni sistem	96
3.8.2	Lokalni geodetski koordinatni sistem	100
3.9	Razlike geodetskih i astronomskih veličina.....	103
3.10	NEBESKE KOORDINATE	107
3.10.1	Zvezdani katalozi	108
3.10.2	Astronomske koordinate u geodeziji	110
3.10.3	Horizontski nebeski sistem.....	112
3.10.4	Ekvatorski nebeski sistem.....	114
3.10.3	Nebeski mjesni ekvatorski sistem.....	117
3.11	TRANSFORMACIJA KOORDINATA	119
3.12	ODREĐIVANJE ASTRONOMSKIH KOORDINATA	121
Glava 4	126

4 TERESTRIČKI REFERENTNI SISTEMI..... 126

4.1	DEFINICIJE OSNOVNIH POJMOVA	127
4.2	OSNOVNI KONCEPT TERESTRIČKOG RS	130
4.2.1	Terestrički referentni sistemi u satelitskoj geodeziji	136
4.2.2	Terestrički referentni okvir oslonjen na Zemlju	138
4.2.3	Međunarodni terestrički referentni sistem.....	139
4.2.4	Deformacije Zemljine kore	141
4.2.5	IERS terestrički referentni okviri.....	144
4.2.6	ITRF kao IERS realizacija ITRS	146
4.2.7	Historija razvoja ITRF-a.....	148
4.2.8	IGS referentni sistemi i servisi.....	158

4.3	OSVRT NA POGLAVLJE.....	167
Glava 5.....		169
5	EVROPSKA REFERENTNA MREŽA	169
5.1	DEFINICIJA I REALIZACIJA ETRS89.....	171
5.2	REALIZACIJA ETRS89	173
5.3	EVROPSKA PERMANENTNA MREŽA	174
5.4	EPN PROJEKTI	178
5.4.1	EULN i EUVN	178
5.5	EUREF MREŽA NA TERITORIJU BiH.....	186
5.5.1	GPS mreže BIHREF98 i BIHREF2000.....	186
5.5.2	Mreža CEGRN.....	188
5.5.3	GNSS permanentne mreže i servisi za pozicioniranje	191
5.5.4	BIHPOS.....	195
Glava 6		197
6	SISTEMI VREMENA.....	197
6.1	VRIJEME KAO KOORDINATA	198
6.2	PRIRODNI PROCESI ZA MJERENJE VREMENA.....	199
6.2.1	Sideričko vrijeme	200
6.2.2	Univerzalno vrijeme	201
6.2.3	Vremenske skale GNSS sistema	204
6.3	OSVRT NA POGLAVLJE.....	205
	POPIS LITERATURE	206
	POPIS SLIKA	219
	POPIS TABLICA.....	224
	INDEX POJMOVA	225

PREDGOVOR

Geodetski referentni sistemi i njihove realizacije, tj. okviri, neophodna su infrastruktura za provođenje geodetskih zadataka, bilo da se radi o praktičnim geodetskim projektima ili istraživačkim aktivnostima u oblasti svih geoznanosti. Osim geodetima i geoznanstvenicima uopće, geodetski referentni sistemi i okviri su neophodni inženjerskim disciplinama koje za implementaciju svojih projekata trebaju geoprostorne informacije, kao što su građevinarstvo, urbanizam i prostorno planiranje, arhitektura, šumarstvo, poljoprivreda, elektroprivreda, saobraćaj, turizam, itd. Posebno je aktualno u zadnjem desetljeću da se geodetski referentni okviri intenzivno koriste za navigaciju pokretnih objekata, kao i njihovo navođenje u 3D prostoru. Specijalnu pažnju zahtijeva navigacija aviona u civilnom saobraćaju. Veliku pažnju u profesionalnim i istraživačkim krugovima privlače sve aktualnije primjene bespilotnih letjelica koje se koriste za geodetske ili neke druge svrhe.

Većina tekstova razmatra uglavnom geometriju referentnih sistema, iako pri rješavanju inženjerskih zadataka fizika Zemlje ima važnu ulogu. Međutim, relevantna poglavlja geofizike i geodinamike se ne proučavaju u predmetu Geodetski referentni sistemi, osim izuzetno, a i tada ne detaljno, ali se proučava u drugim predmetima, uglavnom na diplomskom studiju. Dakle, cilj je ovog teksta upoznavanje i razumijevanje geometrijske definicije referentnih sistema i njihovih praktičnih realizacija, ukoliko je uopće moguće razumjeti geodeziju i njenu potrebu za definiranjem koordinatnih sistema za rješavanje osnovnih zadataka geodezije, bez poznavanja fizike i utjecaja fizikalnog okruženja na našu planetu.

Ova knjiga je napisana da u prvom redu posluži kao udžbenik studentima dodiplomskog studija geodezije za lakše savladavanje gradiva i efektivno postizanje planiranih ishoda učenja za predmet *Geodetski referentni sistemi*. Naravno, tekstovi mogu biti zanimljivi za studente diplomskog studija kao i inženjerima i diplomiranim inženjerima geodezije u procesu neformalnog cjeloživotnog učenja, tokom realizacije svojih svakodnevnih profesionalnih zadataka.

Prvo poglavlje ima za cilj upoznavanje s historijskim razvojem definicije moderne geodetske profesije tokom zadnjih nešto više od dva stoljeća. Međutim, treba imati

na umu da geodezija kao disciplina datira od ishoda civiliziranih društvenih zajednica.

O geodetskoj aktivnoj primjeni svjedoče neki od najstarijih pisanih dokumenata čovječanstva. Geodezija se zato s razlogom zove „najstarijom geoznanstvenom disciplinom“. O geodetskim poslovima svjedoče glinene ploče iz stare Mezopotamije kao i hijeroglifski zapisi sa zidova hramova drevnog Egipta. U ovim drevnim kulturama obavljanje raznih zadataka vezanih za registraciju informacija o zemljištu je bilo neophodno za prikupljanje poreza i punjenje kase vladara bogatih država starog svijeta. Kako je rijeka Nil svake godine plavila plodno obradivo zemljište na svojim obalama, često je voda uništavala obilježja granice posjeda, to je bilo potrebno napraviti evidenciju o geometrijskim oblicima i dimenzijama posjeda. Tako se razvila veoma cijenjena profesija tog vremena koja je „dijelila zemlju“. Otuda i naziv geodezija, što na starogrčkom jeziku znači: *geo*-zemlja, *dezi*s-dijeliti.

Međutim, ocem geodezije smatra se slavni grčki znanstvenik Eratosten, koji je rođen na teritoriji današnje Libije, ali je svoju istraživačku aktivnost provodio na teritoriji današnjeg Egipta, gdje je radio kao upravitelj znamenite biblioteke u Aleksandriji. Bio je, prema danas poznatim artefaktima, prvi čovjek u historiji, koji je na osnovu opažanja nebeskih tijela i mjerenja dužina, potvrdio Aristotelovu tezu da Zemlja ima sferni oblik i odredio njene dimenzije.

Eratostenov pristup reflektira koliko je opažanje okoline i aktivno razmišljanje bilo, kao što i danas jeste, osnova za znanstvenu zbilju i progresivne ideje. Naime, Eratosten je svoju hipotezu o zakrivljenosti Zemlje zasnivao na opažanju dužine sjene koju Sunce baca u bunaru, u podne, tj. kad se Sunce nalazi u zenitu, u dva Egipatska grada, Sieni i Aleksandriji. Primijenio je mjerenje uglova, tj. visine Sunca iznad horizonta i napravio mjerenja dužine između Siene i Aleksandrije, te obradom podataka odredio dimenzije Zemlje i potvrdio njen sferni oblik. Zanimljivo je da je radijus sferne Zemlje koji je Eratosten odredio nevjerovatno blizak onim vrijednostima koje su određene geodetskim tehnikama prošlog stoljeća. Današnja promišljanja geodeta otvorenog uma tvrde da to nije slučajnost, nego je rezultat dobro osmišljene metode mjerenja i računanja.

Prvo poglavlje osim navedenog predočava čitateljima osnovne pojmove o Zemlji, njenom kretanju kroz svemir, nastanku i građi, te procesima koji se dešavaju u njenoj unutrašnjosti, litosferi, hidrosferi, atmosferi. Također je dat kratak uvod o kretanjima Zemljine obrtne osi u prostoru, precesiji, nutaciji i pomjeranju polova, zbog djelovanja sila privlačenja nebeskih tijela Sunčevog sistema, a sve u cilju razumijevanja potrebe definiranja geodetskog referentnog sistema, koji je vezan

za svemir/prostor/vrijeme, te njegove veze s terestričkim referentnim geodetskim sistemima, koji se primjenjuju u modernoj geodetskoj praksi pozicioniranja.

Opisan je također način organizacija geodetske znanosti na svjetskom nivou, s posebnim fokusom na Integrirane globalne geodetske opažачke sisteme - IGGOS, kao glavnu komponentu Internacionalne asocijacije za geodeziju – IAG. Veoma kratko su opisane geodetske svemirske tehnike koje se primjenjuju za definiranje i realizaciju Geodetskih referentnih sistema i geodetskog datuma. Detaljna razmatranja ovih pojmova su izostavljena jer je takva materija planirana za studente diplomskog ili doktorskog studija.

Drugo poglavlje razmatra oblik i dimenzije Zemlje, kao i aproksimacije njenog oblika sferom i elipsoidom. Detaljnije se razmatra pojam rotacijskog elipsoida te njegova geometrija, kao i niz elipsoida koji su kroz historiju služili kao referentna tijela za geodetska računanja, uključujući savremeni elipsoid pod nazivom Globalni referentni sistem – GRS80.

Treće poglavlje sistematizira vrste koordinata i koordinatnih sistema, te daje definicije osnovnih pojmova: geodetskog referentnog sistema, referentnog okvira i geodetskog datuma. Ovo poglavlje također detaljno opisuje različite vrste koordinata: geodetske, astronomske, prirodne, nebeske, vrijeme, itd. Ukratko su opisani nebeski koordinatni sistemi i njihove međusobne relacije. Formule predočene u ovom poglavlju imaju notaciju kao u (Jekeli, 2012), a većina slika u trećem poglavlju je nacrtana i modificirana prema slikama iz istog izvora.

Četvrto poglavlje razmatra u detalje terestričke koordinatne sisteme, razvrstane u dvije grupe: ITRS koje publicira Međunarodni servis za Zemljinu rotaciju i referentne sisteme i njegove realizacije, tj. okvire ITRF (International Terrestrial Reference Frame), kao i IGS sisteme i okvire koje publicira Međunarodni GNSS servis - IGS.

Peto poglavlje opisuje koordinatni sistem vezan za evroazijsku ploču, tj. Evropski terestrički referentni sistem - ETRS, te njegove veze s ITRS sistemima. Također su predočeni: Evropski referentni okvir – EUREF te Evropska permanentna mreža kao kičma EUREF-a, Ujedinjena evropska nivelmanska mreža UELN i Evropski vertikalni referentni sistem - EVRS. Osim toga su kratko opisane aktivnosti u Bosni i Hercegovini vezane za EUREF i ETRS 89, te su veoma kratko opisani savremeni servisi za pozicioniranje u realnom vremenu, u Evropi, regiji Zapadnog Balkana te bosanskohercegovački pozicionirajući servis BIHPOS.

Šesto poglavlje daje osnovno upoznavanje različitih sistema vremena, toliko da se mogu razumjeti dinamički koordinatni sistemi i pozicioniranje pomoću GNSS.

Dodatna poglavlja su popis korištene i citirane literature, popis skraćenica, popis slika, popis tablica, index pojmova te sadržaj na engleskom jeziku.

Na kraju predgovora bih željela izraziti svoju iskrenu zahvalnost recenzentima, uvaženom profesoru dr. Asimu Bilajbegoviću, redovnom i doživotnom profesoru TU Dresden i redovnom profesoru Građevinskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu, kao i doc. dr. Miranu Kuharu sa Građevinsko - geodetskog fakulteta Univerziteta u Ljubljani. Veoma pažljivim čitanjem teksta te sugestijama i korekcijama su značajno unaprijedili kvalitet ove knjige. Neophodno je istaći da je profesor dr. Bilajbegović kontroliranjem formula na svoj prepoznatljivo pedantan način dao neprocjenjiv doprinos.

Također, dugujem zahvalnost za podršku dekanu Građevinskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu, profesoru dr. Mustafi Hrasnici, dipl.ing.građ., kao i mojim kolegama na Odsjeku za geodeziju. Posljednje, ali nikako najmanje važno, imam potrebu iskazati duboku zahvalnost mojoj porodici za strpljenje, a posebno mom sinu Ajdinu za pomoć pri crtanju slika i dizajniranju naslovnice.

Sarajevo, novembar 2017.

Medžida Mulić

POPIS SKRAĆENICA

AGROS	Aktivna Geodetska Referentna Osnova Srbije
AGU	American Geophysical Union
AJ	Astronomska jedinica
APKIM	Actual Plate Kinematic Model
AT	Atomic Time
BDS	BeiDou Navigation Satellite System
BDT	Baricentric Dynamical Time
BDT	BeiDou Time
BIH	Bureau International l'Heur
BIHPOS	BiH Pozicionirajući Servis
BIHREF	BiH Reference Frame
BIPM	Bureau International de Poids et Measures- Section Time, Frequency and Gravimetry
BTS	Buro d'Heur Terrestrial System
CEGRN	Central European GPS Research Network
CERGOP	Central European Regional Geodynamical Project
CHAMP	Challenging Minisatellite Payload
CIO	Conventional International Origin
CORS	Continously Operating Reference Stations
CRF	Conventional Reference Frame
CROPOS	CROatian POSitining System
CTRS	Conventional Terrestrial Reference System
DGNSS	Differential GNSS
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
DSP	Differential Service of Positioning
DT	Dynamical Time
ECEF	Earth-Centered Earth-Fixed

ECGN	European Combined Geodetic Network
ECI	Earth-Centered Inertial
EOP	Earth Orientation Parameters
EPN	EUREF Permanent Network
ETE	Ephemeris Time
ETRF	European Terrestrial Reference Frame
ETRS	European Terrestrial Reference System
UELN	Unified European Leveling Network
EUPOS	EU Positioning Service
EUREF	European Reference Frame
EUVN_DA	European Unified Vertical Densification Action
EVRS	European Vertical Reference System
FBIHPOS	Federation BiH Positioning Service
GAST	Greenwich Apparent Sidereal Time
GGOS	Global Geodetic Observing System
GIS	Geo-Information System
GLNT	GLONASS Time
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GLONASST	GLONASS Time
GMST	Greenwich Mean Apparent Sidereal Time
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GOCE	Gravity field and Ocean Circulation Explorer
GPS	Global Positioning System
GPSP	Geodetski precizni servis pozicioniranja
GPST	GPS Time
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GST	Greenwich Sidereal Time
GRS	Geodetic Reference System
GST	Galileo System Time
GTRS	Geocentric Terrestrial Reference System

IAG	International Association of Geodesy
IAS	International Altimeter Service
IAU	International Astronomical Union
IBS	IAG Bibliographic Service
ICET	International Centre for Earth Tides
ICGEM	International Center for Global Gravity Field Models
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICSU	International Council for Sciences
IDEMS	International Digital Elevation Model Service
IDS	International DORIS Service
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGB	International Gravimetric Bureau
IGeS	International Geoid Service
IGFS	International Gravity Field Service
IGGOS	Integrated Global Geodetic Observing System
IGS	International GNSS Service
ILRS	International Laser Ranging Service
ILS	International Latitude Service
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
IRP	IERS Reference Pole
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
KOPOS	KOsovo Positioning Servis
LAGEOS	Laser Geodynamics Satellite
LAST	Local Apparent Sidereal Time

LEO	Low Earth Orbiting
LLR	Lunar Laser Ranging
LMST	Local Mean Sidereal Time
MAKPOS	MAKedonija Pozicionirajući Servis
MERIT	Monitor Earth Rotation and Intercompare Techniques
MONTEPOS	MONTEnegro Pozicionirajući Servis
NASA	National Aeronautical Space Agency
NCP	North Celestial Pole
NIMA	National Imagery Mapping Agency of US
NNR	No Net Rotation
NUVEL	Northwest University Velocity
PPP	Precise Point Positioning
PSD	Post Seismic Deformations
PSMSL	Permanent Service for Mean Sea Level
QZSS	Quazi-Zenith Satellite System
RTK	Real Time Kinematic
SAPOS	Satellite Positioning Service of the Official German Surveying and Mapping
SI	Système international (<i>fr.</i>) (International Standard of Units)
SIGNAL	Slovenija Geodezija-Navigacija-Lokacija
SINEX	Software independent exchange format
SLR	Satellite Laser Ranging
SRPOS	Srpska Republika Positioning Service
TAI	Time Atomic International
TCB	Time Coordinated Baricentric
TCG	Time Coordinated Geocentric
TDT	Terrestrial Dynamical Time
TEC	Total Electrons Content
TRF	Terrestrial Reference Frame

TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TT	Terrestrial Time
UELN	United European Leveling Network
USNO	United States Naval Observatory
UT	Universal Time
UTC	Universal Time Coordinated
VLBI	Very Base Interferometry

Glava 1

1 UVOD

Geodeti današnjice eksploatišu i neprekidno primjenjuju inovativne tehnologije da bi izveli osnovna mjerenja i opažanja, s različitim zadacima, kao što su: pozicioniranje, realizacija referentnih okvira, mjerenje i distribucija vremena, određivanje polja Zemljine teže i njegovih vremenskih varijacija, monitoring i modeliranje plimnih valova, snimanje topografije, batimetrije¹, određivanje parametara orijentacije Zemlje u svemiru, monitoring okeanskih vjetrova, itd. Uvodeći klimatski-senzitivna opažanja omogućavaju se praćenja ili opažanja: promjena u nivou mora, ledenom i snježnom pokrivaču, glečerima, kopnenom (biljnom) pokrivaču, deformacijama čvrste Zemlje, glacijalnom izostatičkom povratnom efektu, cirkulacijama okeana, "rasipanju plimnih valova", svemirskim „meteorološkim“ uvjetima, poznatim pod nazivom *svemirsko vrijeme*, geomagnetizmu, meteorologiji, atmosferi, hidrološkim procesima, itd. (Chao, 2003).

Postignuća ovih interdisciplinarnih opažanja, (kao i baze podataka koje ih registriraju i prate), proširuju naše razumijevanje potencijalnih antropogenih procesa koji uvjetuju globalne klimatske promjene, te smanjuju ljudska i materijalna stradanja zbog prirodnih katastrofa, nastale zbog vulkanske erupcije, zemljotresa, tektonskih pomjeranja, klizišta, izdizanje nivoa svjetskog mora, poplava i udara oluja.

Nabrojani inovativni zadaci su izazovi za geodete 21. stoljeća, a nisu bili ostvarivi u predsatelitskoj eri. Razvoj tehnologije umnogome se ogledao u geodetskoj praksi, pa su se u skladu s tim mijenjali zadaci i definicija geodezije.

¹Batimetrija je također nova disciplina kojom se određuje dubina i oblik, tj. reljef dna mora i okeana. Batimetrija primjenjuje integraciju satelitskih tehnika i mjerenja pomoću sonara za mjerenje dubina vode.

1.1 DEFINICIJA I ZADATAK GEODEZIJE

Kroz historiju civilizacije i razvoja geodetske profesije, koju je neminovno uvjetovao napredak teorijskih spoznaja i primjenjive tehnologije, razvile su se brojne definicije geodezije, odnosno *više geodezije*, kako se po tradiciji ova disciplina naziva u govornom području Zapadnog Balkana.

U skladu s Helmertovom klasičnom definicijom geodezija je “znanost mjerenja i kartografisanja Zemljine površine”. Ovo se postizalo pomoću direktnih mjerenja, kao što su terestrička triangulacija, elektrooptičko mjerenje dužina, nivelman i gravimetrijska opažanja. Torge je u (2001) ovu definiciju proširio za određivanje terestričkog vanjskog gravitacijskog polja, kao i površine okeanskog dna. Tokom zadnjih 50-tak godina, definicija geodezije proširila se tako da uvrštava svemirske tehnike, koje se primarno zasnivaju na praćenju udaljenosti vještačkih Zemljinih satelita.

Slijede različite definicije geodezije prema (Braun, 2008, str. 5-9). One oslikavaju razvoj definicije i zadataka (više) geodezije od 19. do 21. stoljeća. Navedene definicije geodezije prema autorima: Zakatov, Heiskanen i Vening Meinesz, Dupuy i Dufour, Groten, Pellinen/ Deumlich, preuzete su iz (Braun, 2008.), a originalna djela nisu bila dostupna te nisu navedena u popisu literature. Ovdje su te definicije navedene jer ilustriraju hronološki razvoj geodetske profesije, koja se razvijala zajedno s razvojem tehnologije.

1. Bruns, 1878: Zadatak geodezije je da odredi potencijalnu funkciju $W(x,y,z)$.
2. Helmert, 1880: Geodezija je znanost mjerenja i kartografisanja Zemljine površine.
3. Zakatov, 1957: Geodezija je grana znanosti koja istražuje metode za tačno mjerenje elemenata Zemljine površine i iz tih mjerenja određuje geografske položaje tačaka na ovoj površini, ali i proučava oblik Zemlje s teorijske tačke gledišta, kao i procijenjenih rezultata mjerenja.
4. Heiskanen i Vening Meinesz, 1958: Geodezija je i teorijska i praktična. Njena teoretska funkcija je da odredi veličinu i oblik Zemljine kore, ali i da u konjunktiji s drugim geoznanostima proučava strukturu Zemljine kore i njenih slojeva. Njena praktična funkcija je da izvodi mjerenja i računanja koja će dati koordinate izabranih kontrolnih tačaka na Zemljinoj površini, tj. odrede njihove položaje na Zemljinoj površini.
5. Dupuy i Dufour, 1969: U etimološkom smislu riječi, geodezija je znanost čiji je cilj da mjeri dimenzije Zemlje. Prvo treba odrediti oblik i precizne dimenzije planete; S druge strane, treba ostvariti, prvenstveno pomoću triangulacije, mjerenje na površini Zemlje, kako bi se omogućila izrada tačnih karata koje daju preciznu geometrijsku predstavu, a za različita inženjerska preduzeća, što bi bili zaista glavni istraživački i praktični ciljevi geodetskih aktivnosti.

6. Krakiwski i Wells, 1971: Geodezija proučava veličinu i oblik Zemlje i određivanje koordinata tačaka na ili iznad površine Zemlje.
7. Groten, 1979: Geodezija se smatra disciplinom koja se bavi uglavnom kartografisanjem Zemlje i monitoringom varijacija na njenoj površini. Od prvih početaka, ovi zadaci su bili povezani s gravitacijskim vektorom g (apsolutne vrijednosti i pravca).
8. Torge, 1980: Problem geodezije je da odredi oblik vanjskog gravitacijskog polja Zemlje i drugih nebeskih tijela, kao vremenski ovisnu funkciju, kao i da odredi srednji Zemljin elipsoid iz parametara opažanih na i izvan Zemljine površine.
9. Pellinen/ Deumlich, 1981: Teoretska geodezija je onaj dio geodezije koji ima zadatak da riješi znanstvene probleme geodezije - određivanje oblika Zemlje i njenog vanjskog gravitacijskog polja, kao i njihovih temporalnih varijacija, a na osnovu geodetskih mjerenja.
10. Muminagić, 1981: Geodezija (viša) obuhvata teoriju, istraživanja, metode i postupke mjerenja, način obrade mjerenja, razvoj instrumenata i pribora za mjerenje Zemlje u najširem smislu: počev od Zemlje kao planete, preko premjera i inventarisanja prostora širokog spektra, do najsitnijih mjerenja geodetskim metodama radi određivanja neke dužine ili ugla. Pod mjerenjem Zemlje kao planete podrazumijeva se određivanje parametara njene veličine i oblika, a u najnovije vrijeme - fizičkih osobina, u prvom redu sile privlačenja, kao i praćenja promjena ovih parametara sa vremenom.
11. Vanicek i Krakiwsky, 1982: Geodezija je disciplina koja se bavi mjerenjima i predstavljanjem Zemlje, uključujući gravitacijsko polje, u trodimenzionalnom, vremenski promjenljivom prostoru.
12. Torge, 2001: Geodezija je znanost koja se bavi određivanjem oblika i vanjskog polja ubrzanja sile teže Zemlje i drugih nebeskih tijela, kao vremenski promjenljivih veličina, kao i određivanjem srednjeg Zemljinog elipsoida na temelju parametara opažanih na i iznad fizičke površine Zemlje. Dopunjena definicija uključuje: određivanje oblika površine okeanskog dna.
13. Seeber, 2003: Satelitska geodezija sadrži mjerne i računске tehnike koje omogućavaju rješavanje geodetskih problema, koristeći precizna mjerenja do, od, ili između vještačkih, uglavnom bliskih Zemlji, satelita. Za proširenje Helmertove definicije, koja u osnovi još vrijedi, ciljevi satelitske geodezije su danas razmatrani na funkcionalan način. Oni također uključuju, zbog povećane tačnosti mjerenja, vremenski ovisne varijacije. Osnovni problemi su:
 - a. Određivanje preciznih globalnih, regionalnih i lokalnih 3D položaja (tj. ustanovljavanje geodetskih kontrolnih mreža).
 - b. Određivanje Zemljinog gravitacijskog polja i linearnih funkcija ovog polja, (tj. geoida).
 - c. Mjerenje i modeliranje geodinamičkih fenomena tj. pomjeranje polova, rotaciju Zemlje i deformacije Zemljine kore.

Pažnje vrijednu definiciju objavilo je Nacionalno istraživačko vijeće Nacionalnih akademija Sjedinjenih Američkih Država u (2010), koje definira geodeziju kao: “znanost koja se bavi tačnim mjerenjima u cilju razumijevanja tri fundamentalne osobine Zemlje: njen geometrijski oblik, njenu orijentaciju u prostoru i njeno gravitacijsko polje, kao i promjene ovih osobina kroz vrijeme.

Postoje i druge i drugačije definicije od onih navedenih ranije. Još jedna zanimljiva definicija, publicirana na internet strani Američke geofizičke unije (AGU_Geodesy, 2017 a) glasi: „Geodezija je *grana geofizike* koja proučava geometrijske, strukturalne i gravitacijske osobine Zemlje, njenu evoluciju kroz vrijeme, te dinamičku interakciju čvrste Zemlje sa drugim fizičkim komponentama (atmosfera, hidrosferom, kriosferom, jezgrom), kroz duge vremenske periode i u širokom prostoru. Geodeti također proučavaju odgovarajuće teme za *druge planete* u Solarnom sistemu“.

Prema Jekeli (2012, str. 1-1) “geodezija je znanost mjerenja i kartografskog predstavljanja Zemljine površine, i budući je uglavnom primijenjena matematika, koristi se koordinatama i pridruženim referentnim sistemima”. U geodetskoj profesiji se za rješavanje inženjerskih ili istraživačkih zadataka, koriste različiti referentni sistemi, te će se kroz ovu knjigu razmatrati različiti lokalni, regionalni ili globalni referentni sistemi.

Ovi sistemi se koriste za definiranje koordinata geodetskih tačaka na Zemljinoj površini ili njenoj bližoj okolini, te za uspostavljanje relacije između tih tačaka, kao i relacije s „apsolutnim“ sistemima, koje nazivamo nebeskim sistemima. Geodezija je evoluirala od svoje originalne klasične definicije da „proučava kretanja nebeskih tijela, oblik i dimenzije Zemlje“ u „znanost koja osim rečenog, proučava njene promjene i kompleksne dinamičke procese, koji djeluju unutar Zemlje, na njenoj površini i iznad njene površine, kao i u svemiru koji je okružuje.

Pioniri ranije definiranog pojma geodezije, dakle geodeti, uključuju slavna imena kao što su: Galileo, Descartes, Kepler, Newton, Euler, Bernoulli, Kant, Laplace, Airy, Lord Kelvin, Jeffreys, Cassini, Gauss, i drugi. Tokom zadnjih nekoliko desetljeća satelitska odnosno svemirska² geodezija je esencijalni, integralni dio Zemlje, (Shum, 2003, str.1). Istraživanja planete satelitskim misijama u prvom

²Svemirska geodezija je u bosanskom jeziku novi pojam koji opisuje ne samo tehnike satelitske geodezije (GNSS, LLR, SLR, itd), nego i VLBI koja nije satelitska tehnika. Međutim i u engleskom je to nova definicija: „Svemirska geodezija koristi skup tehnika koje se oslanjaju na precizna mjerenja dužina ili faznih razlika, emitiranih ili reflektiranih od izvanzemaljskih tijela, kao što su kvazari, Mjesec ili vještački sateliti“, (Wdowinski i Eriksson, 2009 str.153).

redu su uspješne zbog tehnološkog napredka za tačno mjerenje i transfer vremena, određivanja 3D koordinata i brzina pomjeranja stanica (pomoću opažanja satelita) te inženjeringa u oblasti razvoja senzora.

Navedeni ambiciozni ciljevi savremene geodezije koji uključuju praćenje klimatskih promjena bili su predmet brojnih debata. Stručnjaci iz raznih oblasti su diskutirali o tome da li su široko - obuhvatni nabrojani ciljevi zadatak geodezije i geodeta. Međutim, implementirani međunarodni geodetski programi su riješili ove dileme i pokazali da su timovi geodeta sposobni za rješavanje kompleksnih globalnih, regionalnih i lokalnih zadataka. Navodi se samo mali broj implementiranih međunarodnih geodetskih programa koji su pokazali da su geodeti ključna grupa sposobna za istraživanje klimatskih promjena. Takvi programi su:

- a. "Živjeti na nemirnoj planeti", NASA (National Aeronautic Space Administration)-in Program integrirane procjene nivoa mora (Chao i dr. 2003; Rummel, i dr., 2003);
- b. "Earth Observing System", NASA-in program (Rothrock i dr., 1997);
- c. "Living Planet" satelitski program Evropske svemirske agencije - ESA, itd.

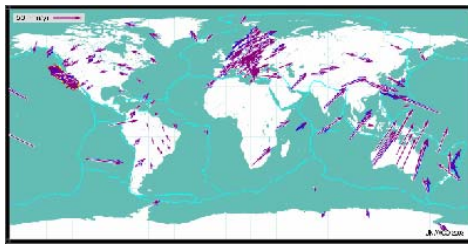
Ove organizacije, institucije i programi su pokazali da su upravo geodetska mjerenja i daljinska istraživanja iz svemira, kritične tehnološke komponente koje su pogodne za opažanja u cilju proučavanja Zemlje. Time je geodezija naznačena kao znanstvena disciplina za planetarna istraživanja u 21.- om stoljeću i ubuduće, (Wdowinski, i Eriksson, 2009). Primjeri mogućih primjena geodetskih satelitskih tehnika pokazuju: Slika 1-1, Slika 1-2 i Slika 1-3.

Primjene geodetskih metoda se ne ograničavaju na naprijed navedene primjere. Jednostavno, nije moguće pokazati sve primjere primjene geodetskih svemirskih/satelitskih tehnika. Međutim, kao što je ranije navedeno, za pravilnu primjenu prikupljenih podataka i njihovu pravilnu interpretaciju, neophodno je imati prerekvizit - dobro definiran sistem koji će poslužiti za računanje koordinata tačaka ili nekih drugih geodetskih proizvoda: deformacije terena ili građevinskih objekata, količine vodene pare u troposferi, itd.

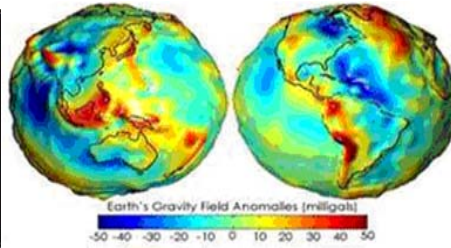
Da bi se odredile koordinate tačaka u nekom prostoru, potrebno je prvo odrediti koordinatni sistem, kojeg definiraju: ishodište sistema, orijentacija njegovih osi i mjerilo. U skorijoj prošlosti se definiranje koordinatnog sistema na globalnom nivou moglo uraditi pomoću zamišljene nebeske sfere na kojoj se „nalaze“ zvijezde. Historijski gledano, ovakav sistem su koristili i narodi starih, naprednih civilizacija, za navigaciju i crtanje karata, dok se u skorijoj historiji nebeski sistem koristio kao osnovni sistem pomoću kojeg su se orijentirali terestrički koordinatni sistemi. Ovaj sistem se i danas koristi za ove svrhe i može se smatrati osnovnim.

Nakon definiranja osnovnog, nebeskog sistema, definira se koordinatni sistem koji je pričvršćen za Zemlju s različitim mjestom ishodišta (također postoji mogućnost različitih orijentacija i mjerila). Prema tome, potrebno je uraditi dva temeljna koraka:

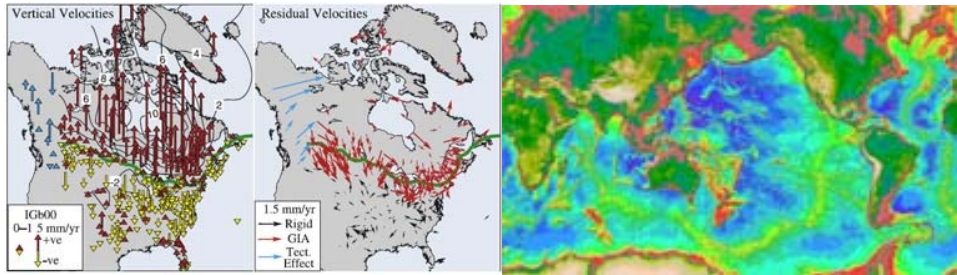
- ustanoviti vanjski (inercijski) koordinatni sistem u bližem svemiru. Pri tom se smatra da takav sistem ne rotira zajedno sa Zemljom.
- ustanoviti koordinatni sistem pričvršćen za Zemlju, koja rotira oko svoje obrtne osi. Prema tome, neophodno je odrediti relacije između ova dva koordinatna sistema.



(a) pomjeranje tektonskih ploča

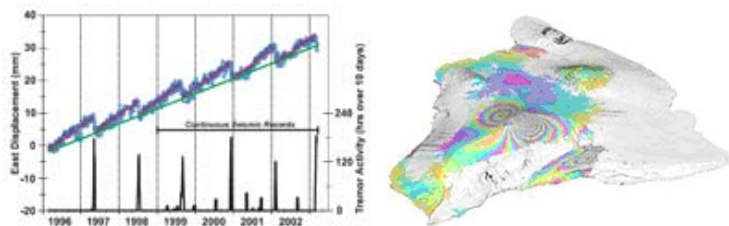


(b) određivanje globalnog geoida



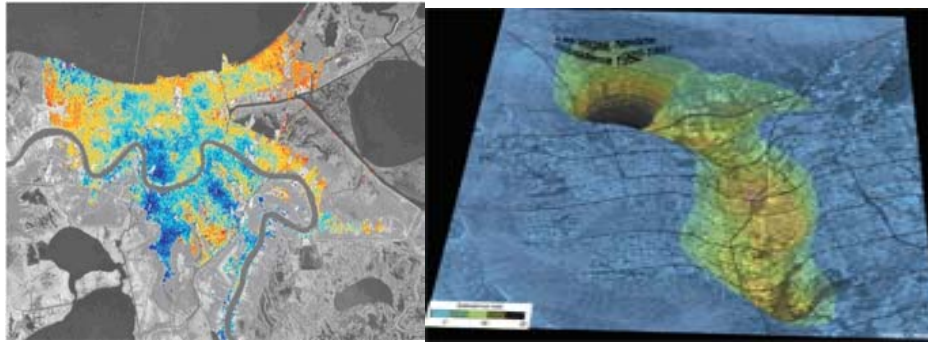
(c) glacijalno-izostatičko izjednačenje (d) batimetrija-topografija morskog dna

Slika 1-1: (a-d): Primjena satelitske (svemirske) geodezije u raznim disciplinama geoznanosti na globalnom i kontinentalnom nivou. (Wdowski i Erikson, 2009)



(a) ciklične deformacije položaja stanice zbog zemljotresa (b) deformacije zbog izbačene magme

Slika 1-2: Primjena satelitske geodezije i daljinskih istraživanja za monitoring geodinamičkih procesa i promjena Zemljine kore na lokalnom nivou. (Wdowski i Erikson, 2009)



(a) monitoring slijeganja urbanih područja (b) monitoring reakcija sistema vodotoka;

Slika 1-3: Primjena satelitske geodezije i daljinskih istraživanja u hidrologiji na lokalnom nivou. (Wdowski i Erikson, 2009)

Zanimljivo je spomenuti da se u vrijeme intenziviranja svemirskih istraživanja, do kojih je došlo oko polovine prošlog stoljeća, na sjednicama Međunarodne asocijacije za geodeziju (International Association of Geodesy – IAG) se diskutiralo o uvođenju naziva profesija za istraživače planeta i drugih nebeskih tijela u našem Sunčevom sistemu, koji bi primjenjivali geodetske metode za određivanje oblika, dimenzija, parametara orijentacije u svemiru, gravitacijskog polja, te promjena kroz vrijeme svih ovih parametara. Tako Muminagić (1981) navodi da su postojali prijedlozi da se znanost koja istražuje, opaža i određuje navedene parametre Mjeseca (Luna) zove **lunodezija**, za istraživanje Marsa, **marsodezija**, itd³. Od ovih se prijedloga odustalo, tako da je zadatak geodezije da istražuje, opaža, određuje navedene parametre i njihove temporalne promjene, kako naše planete, tako i drugih nebeskih tijela u svemiru.

AGU internet strana također navodi: „Opažanja i mjerenja su srž geodezije. Mjerenja statične Zemlje imala su kroz niz stoljeća (i milenijuma) za cilj razumijevanje njene veličine, oblika i kretanja, što je geodeziji pribavilo laskavi nadimak „najstarija geoznanost“.

³ Ovakva imena za istraživačke grane su apsurdna zbog porijekla riječi **geodezija**. Riječ je složenica u staro-grčkom jeziku (*geo*-zemlja, *dezi*-dijeliti). Riječ ima grčko porijeklo ali je nastala na teritoriji Starog Egipta, gdje su veleposjednici zemljišta morali dijeliti svoje parcele nakon redovnih godišnjih poplava rijeke Nil. Detaljnije o ovoj temi historijskog razvoja geodetske djelatnosti može se pročitati u izvorima (Mulić, 2012; Mulić i dr. 2015).

Primjena svemirskih i satelitskih tehnika kojima se opažaju izvanterestrički objekti, doprinijela je da su istraživanja i primjena geodezije doživjela revolucionarni napredak, te se uveo pojam „svemirska geodezija“, ponekad „satelitska geodezija“, „globalna geodezija“, a u novije vrijeme se u literaturi može sresti pojam „GNSS geodezija“, aludirajući na primjenu Globalnih navigacijskih satelitskih sistema, koji se širom planete tokom zadnjih decenija, rutinski koriste za određivanje položaja geodetskih tačaka. Svemirske geodetske tehnike se danas primjenjuju za prikupljanje geodetskih opažanja za mjerenje i određivanje:

- a) globalnih, regionalnih, i lokalnih deformacija Zemljine kore,
- b) varijabilnosti gravitacijskog polja, koje se javljaju zbog širokog spektra geofizičkih procesa,
- c) za istraživanje pomjeranja masa, koje se dešavaju zbog globalnog kruženja vode u prirodi,
- d) za monitoring atmosferskog tlaka i temperature,
- e) za istraživanje dinamike i kinematike glečera i ledenih ploča,
- f) za proučavanje promjena momenta inercije i rotacije planete, itd.

Zbog ovakve raznovrsnosti i širine opsega primjenjivosti geodetskih svemirskih tehnika za prikupljanje opažanja i mjerenja, svemirska geodezija je postala nezaobilazna za istraživanje geofizičkih pojava i procesa, te je postala multidisciplinarna znanost.

Da bi sve nabrojane, i mnoge druge, kompleksne primjene geodetskih svemirskih ali i terestričkih opažajkih tehnika, ispunile visoka očekivanja, uz zahtjevanu tačnost rezultata, temeljni zadatak geodezije postaje **definirati i realizirati geodetske referentne sisteme** u kojima bi se obradila opažanja, ne samo za geodete i geofizičare, nego i za sve druge inženjerske primjene gdje je neophodna visoka tačnost geoprostornih podataka. Upravo je geodezija profesija koja ima težak i zahtjevan zadatak da za sve geoznanosti definira i realizira koordinatne referentne sisteme.

Zemlja se kreće i deformira zbog sila koje djeluju na nju, izvana ili iznutra naše planete. Geodinamička istraživanja uključuje veliki broj fenomena povezanih sa Zemljinom rotacijom i njenom orijentacijom u svemiru, kao što su: kretanje polova, Univerzalno/svjetsko vrijeme (UT), dužina dana, precesija i nutacija. Ovo su samo neki od važnih fenomena koje je neophodno opažati i razumjeti za pravilnu transformaciju između geodetskih geocentričnih referentnih sistema čvrsto vezanih za Zemlju (Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF) i onih referentnih

sistema čvrsto vezanih za svemir (Earth-Centered Space-Fixed, ili Earth-Centered Inertial-ECI)⁴.

Moderna dostignuća i savremeni problemi istraživanja naše planete i modernog problema klimatskih promjena, kao i istraživanje okolnog svemira, zahtijevaju da se opažaju i uzmu u razmatranje pri definiranju savremenih geodetskih globalnih referentnih sistema, sljedeći fenomeni:

1. valovi plime i oseke, koji odražavaju ne samo dnevno/poludnevno kretanje svjetskog okeana (koji su nastali djelovanjem privlačnih sila nebeskih tijela iz bližeg svemira, Mjeseca, Sunca i okolnih planeta), nego se plimni valovi odražavaju na pomjeranje čvrste Zemljine kore,
2. deformacije Zemljine kore i omotača, koje su povezane s pomjeranjem tektonskih ploča i izostatičkog izjednačenja, itd.

Zemlja kao mehanički sistem odgovara na unutrašnje i vanjske sile. Odgovor na ova djelovanja je ponekad međusobno udružen, te problem postaje još kompleksniji. Potrebno je zbog toga proučavati širok spektar različitih fizikalnih procesa koji su povezani s kretanjem i deformacijama čvrste Zemlje. Površina Zemlje neprekidno mijenja svoj oblik, što uzrokuju pojave kao što su: zemljotresi, vulkanske erupcije, klizišta, promjene nivoa mora i ledenih santi, postglacijalni efekti koji imaju povratno geodinamičko djelovanje, itd.

Ponekad ove promjene iznose samo nekoliko milimetara na godinu, te istraživači moraju provoditi veoma precizna mjerenja površine kopna i okeana u prostoru i vremenu, da bi proučavali ove pojave i poništili njihov utjecaj. Polazište za ova visoko-precizna mjerenja je **terestrički referentni sistem** i njegova realizacija/**okvir**, koji služi istoj svrsi kao putokazi na putu, koji nas vode ka zacrtanom cilju.

Zbog navedenih složenih problema, geoznanstvenici su usvojili novi termin kojim nazivaju planetu na kojoj živimo, te umjesto Zemlja, u novijim istraživačkim studijama je zovu *Sistem Zemlja*. U cilju dobivanja uvida u kompleksnost zadatka definiranja geodetskog referentnog sistema potrebno je razumjeti nastanak i građu Zemlje i njena kretanja kroz svemir.

⁴Za vizualizaciju međusobnih relacija ova dva geodetska geocentrična referentna sistema, vidjeti video zapis na (GRS, 2009).

1.2 KRETANJA ZEMLJE U PROSTORU I VREMENU

Kretanje Zemlje kroz svemir je veoma složeno, iako posmatrač na njenoj površini to ne vidi, bez dubokog promišljanja i pažljivog opažanja svoje okoline. Opažanje neba golim okom može pomoći pri zaključivanju o stalnoj promjeni međusobnog položaja opažača na površini Zemlje, u odnosu na nebeski svod, ali bez pomoći tehničkih pomagala, nije moguće detaljnije opažanje bližeg i dubokog svemira. Obavljajući dnevnu rutinu prosječan stanovnik planete teško da je svjestan da se stalno krećemo i to velikom brzinom kroz svemir, na veoma kompleksan način.

Živeći i radeći na površini planete, čovjek rotira zajedno s njom oko njene osi, dok Zemlja obilazi Sunce po eliptičnoj putanji, pri tom prateći Sunce na njegovom obilasku oko centra galaksije, u kojoj je naše Sunce samo jedna zvijezda srednje veličine, između ogromnog mnoštva zvijezda u Mliječnom putu, a koji predstavlja samo jedinku od velikog broja miliona galaksija, čijeg je postojanja svjesna današnja civilizacija. Ovo kompleksno kretanje kroz svemir može se lakše razumjeti ako se rastavi u komponente.

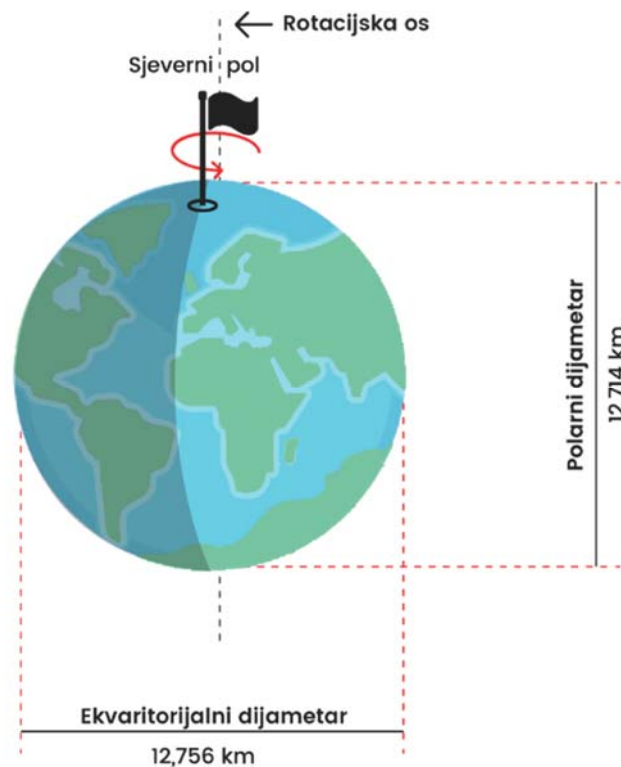
Zemljina rotacija predstavlja kretanje planete oko svoje osi (Slika 1-4), što uzrokuje smjenu dana i noći u periodu 24 sata u odnosu na Sunce ili 23 sata, 56 minuta i 4 sekunde, u odnosu na zvijezde. Spljošten oblik na polovima Zemlje je posljedica njene rotacije.

Neka tačka na ekvatoru, rotirajući oko Zemljine osi, kreće se kroz svemir brzinom od 465,1 m/s ili 1.674,4 km/h. To znači da se svaki student Građevinskog fakulteta u Sarajevu (i svi koji se nalaze u radijusu od oko desetak metara oko Fakulteta, ili bilo gdje na Zemlji na geodetskoj širini od $43^{\circ} 52' 04''$) kreće kroz svemir rotirajući oko obrtne osi planete brzinom od 335,3 m/s ili 1.207,14 km/h.

Nije teško zaključiti zašto je planeta služila ljudima kao najstariji prirodni sat za mjerenje vremena. Međutim, odavno je uočeno da taj sat kasni. Drugim riječima, Zemlja usporava svoju rotaciju, pa prema tome, dani su trajali kraće u proteklim stoljećima kroz historiju. Ovo usporavanje je posljedica utjecaja plimnih valova na Zemlji, koji nastaju zbog privlačne sile mase Mjeseca⁵.

⁵ Mjesec (latinski-luna, što znači: pratilac, satelit) naše planete je najveći mjesec u Sunčevom sistemu, a kreće se oko Zemlje po skoro kružnoj orbiti, na srednjoj udaljenosti od oko 384 401 km, prosječnom brzinom od 1,02 km/s. Radijus Mjeseca iznosi oko 3 647 km. Ako se usporedi sa Zemljom može se reći da je: njegova masa 14 puta, obim 50 puta, a po masi 81 puta manji od Zemlje. Ubrzanje sile teže je na Mjesecu 6 puta manje nego na Zemlji. Mjesec se oko Zemlje obrne za 27

Moderni atomski sat pokazuje da su dani “modernog” doba duži za oko 1,7 ms nego u prošlom stoljeću. Usporavanje rotacije se intenzivira, te se univerzalna skala vremena (UT) korigira prema atomskom satu, uvođenjem tkz. *prestupne sekunde*, što se provodi obično jednom ili izuzetno dvaput godišnje.

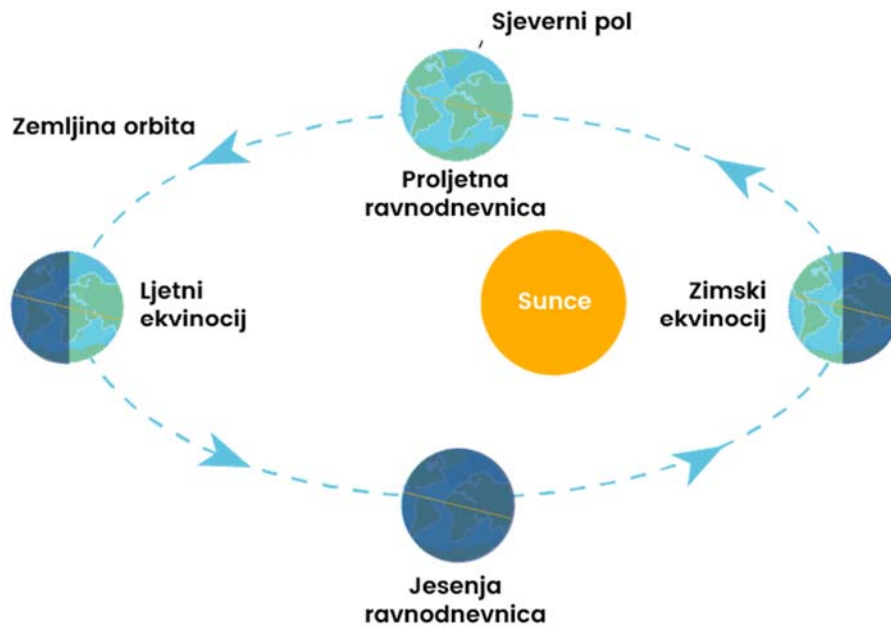


Slika 1-4: Zemljina rotacija oko svoje osi

Analiza historijskih zabilješki astronomskih opažanja ukazuje na trend usporenja od 2,3 sekunde po stoljeću, počevši od osmog stoljeća prije nove ere, a od 1980. godine, oko 0,5 s po godini. Stalni monitoring Zemljine rotacije obavlja se primjenom svemirskih geodetskih tehnika, kao npr.: VLBI, koordinirano s tehnikama GNSS, SLR, itd. Ova opažanja osiguravaju apsolutnu referencu za određivanje univerzalne skale vremena, precesije i nutacije.

dana, 7 sati, 43 minute i 11,6 sekundi po zvjezdanoj skali vremena. Ovaj period se zove siderički mjesec.

Zemljina revolucija naziva se kretanje planete oko svoje zvijezde, po eliptičnoj putanji⁶, dok se Sunce nalazi u jednom fokusu elipse, (Slika 1-5). Jedna revolucija traje jednu godinu, a smjenjivanje godišnjih doba na planeti je upravo posljedica njenog kretanja oko Sunca, a nagnutost ekvatorske ravnine u odnosu na ravan ekliptike po kojem se kreće Sunce, rezultira u varijacijama dužine dana i noći tokom različitih godišnjih doba.



Slika 1-5: Revolucija Zemlje i smjena godišnjih doba.

⁶ Za razumijevanje elemenata orbite satelita vidjeti (Seeber, 2003). Za vizualizaciju putanje (tj. orbite) po kojoj se kreću objekti u svemiru, npr. vještački sateliti oko Zemlje, čitalac može pogledati (Orbite, 2013)

1.3 GRADA ZEMLJE

Geolozi procjenjuju starost jedine naseljene planete našeg solarnog sistema na oko 4.5 milijardi godina, ili čak više. Razvoj planete kroz glavne epohe izražava se u geološkoj skali vremena, uz niz hipoteza. Ipak, neoborivi dokazi će tek uslijediti kao rezultat mnogih aktuelnih istraživanja našeg Sunčevog sistema, tj. obradom podataka brojnih satelitskih misija koje su završile, implementiraju se ili su tek u pripremi. Dakle, prema sad važećim hipotezama, Zemlja se formirala od ostatka solarne magline skupljene u oblik diska, građene od mješavine užarene svemirske prašine i ostatka gasova preostalih poslije formiranja Sunca.

Slijedeći čitav niz geoloških hipoteza smatra se, da su se iz iste magline formirala ostala tijela Sunčevog sistema. U sljedećoj fazi svoje evolucije Zemlja je bila istopljena masa. U procesu hlađenja postepeno se stvarala kora, koja je stalno mijenjala svoj oblik pod utjecajem ogromnog broja ekstremno snažnih vulkana, kao i zbog čestih sudara s drugim nebeskim tijelima različite veličine. Mjesec je formiran u tom ranom stadiju razvoja planete. Jedna od hipoteza smatra da je Mjesec nastao kao rezultat kolizije Zemlje s nekom malom planetom. Gasovi koje su emitirali vulkani formirali su primordijalnu atmosferu. Vanjski sloj Zemlje je nastao hlađenjem kad se voda počela akumulirati u atmosferi. Primordijalni okeani nastali su od kondenzirane vodene pare i komada leda iz kometa koje su se sudarale s mladom Zemljom.

Činjenice o Zemlji iz njenih ranijih epoha razvoja, sadržane su u stijenama koje sačinjavaju njenu koru. Slojevi stijena, kao listovi duge i komplicirane historije, bilježe dokaze o prošlosti. U stijenama su pokopani ostaci živih organizama, biljaka i životinja, koje su se razvile iz organskih struktura koje su postojale prije tri milijarde godina. Stijene sadrže, kad su istopljene, radioaktivne elemente, čiji izotopi daju Zemlji „atomska sat“. Unutar ovih stijena, „roditelj“ izotopa razlaže se po predvidljivoj stopi da bi formirao izotop „kćerku“.

Starost ovih stijena se može izračunati ako se odrede relativne količine izotopa roditelja i kćerke. Prema tome, znanstvene činjenice iz slojeva stijena, tj. fosila, te iz starosti stijena, pomoću mjerenja atomskim satovima, potvrđuju da je Zemlja veoma stara, (USGS, 2008).

Površina Zemlje je neprestano mijenjala svoj oblik tokom stotina miliona godina, kontinenti su se postepeno formirali i cijepali. Plovili su na površini rastopljene lave, ponekad formirajući superkontinente. Prije oko 750 miliona godina najstariji poznati superkontinent Rodinia se počeo raspadati.

Kasnije su se manji kontinenti ponovo sastavili u Pannotia (prije oko 600 do 540 miliona godina) i konačno, superkontinent Pangea, koji se razdijelio na kontinente prije oko 200 miliona godina. Prije oko 40 miliona godina počelo je ledeno doba, koje se intenziviralo na kraju Pliocena⁷. Polarni regioni su prolazili kroz ponavljane cikluse glacijacije i otopljanja, ponavljajući se u periodima u trajanju od 40 000 do 100 000 godina. Zadnje ledeno doba⁸ završilo je oko prije 10 000 godina.

Građa Zemlje se može opisati terminom „svijet sfera“⁹, koje se nalaze izvan i ispod fizičke površine planete, na kojoj se odvijaju svakodnevne, normalne ljudske aktivnosti. Sve sfere su podijeljene na unutrašnje i spoljašnje:

- Unutrašnje sfere su: *jezgro Zemlje, omotač Zemljinog jezgra i Zemljina kora*. Materija ovih sfera je u čvrstom ili rastopljenom stanju i u njihovoj građi učestvuju razni minerali i stijene.
- Spoljašnje sfere su *hidrosfera, atmosfera, i biosfera*, i one se sastoje od vodene, gasovite i organske materije.

Materija unutrašnjih i spoljašnjih sfera nalazi se u stalnom kretanju. One karakteriziraju kompleksnu prirodu Zemlje i u međusobnoj su zavisnosti. Proces i u Zemljinoj unutrašnjosti manifestiraju se i na njenoj površini, pa se tokom historije, pod utjecajem tih procesa, mijenjala priroda na samoj površini. Unutrašnjost Zemlje vizuelno predstavlja Slika 1-6.

Građa Zemlje ispod površine se može ukratko opisati kao u (Jordan, 1979):

1. *Zemljino jezgro*, ima poluprečnik oko 3 500 km, a građeno je od mješavine gvožđa i nikla. Razlikuje se:
 - a. unutrašnje jezgro, koje je u čvrstom stanju,
 - b. vanjsko jezgro, u tečnom stanju.

⁷ Pliocen je epoha u geološkoj skali vremena koja se proteže od prije 5,3 miliona do 2,6 miliona godina. To je ustvari najmlađa epoha Neogen perioda u eri Kenozoika, (vidjeti Sliku 1-7).

⁸ Još jedna u nizu hipoteza geologa je da je kroz dugu historiju razvoja Zemlje, čak deset puta tokom zadnjih 30 miliona godina, dolazilo do potpunog izumiranja života na planeti zbog ekstremnih vulkanskih aktivnosti.

⁹ Ovaj termin nije u suštini ispravan, ali je u širokoj upotrebi. Osim unutrašnjeg jezgra koje ima približno sferni oblik, ni jedan drugi dio Zemlje nije sfera, nego ima oblik kao isječak sfere, ali se po debljini sloja (razlika između unutrašnjeg i vanjskog radijusa sfere) značajno razlikuju.

2. *Zemljin omotač* jezgra je po sastavu najbliži kamenim meteoritima, kod kojih preovlađuju jedinjenja silicijuma i magnezijuma. Zahvata prostor ispod Mohorovičićevog¹⁰ ili Moho sloja, doseže debljinu od oko 2 800 km i može se podijeliti na više zona:
- a. Gornji sloj je u čvrstom stanju, periodotitskog sastava i zajedno sa korom čini zonu koja se naziva litosfera. Ispod čvrstog gornjeg omotača nalazi se astenosfera. Ovo je veoma značajna zona, jer se nalazi u plastičnom ili po nekima poluplastičnom stanju, što omogućuje da se u njoj dešavaju plastične deformacije i konvekcijska strujanja materije, koju uzrokuju eventualni toplotni poremećaji. Smatra se da u astenosferi treba tražiti uzroke vulkanske aktivnosti, zemljotresa i pomjeranja kontinenata. Astenosfera je smještena ispod okeanske kore na dubini 80-150 km, a ispod kontinentalne na 150-200 km.
 - b. Donji omotač, *mezosfera*, je u čvrstom stanju i prostire se od dubine oko 670 do 2 900 km, gdje seizmički valovi naglo mijenjaju brzinu uslijed promjene agregatnog stanja. Ovaj diskontinuitet se naziva Weichert-Gutenbergov i odvaja mezosferu od jezgra. (Jovanović i Srećković-Batočanin, 2009).



Slika 1-6: Slojevita građa Zemlje ispod površine, pojednostavljen prikaz: jezgro, unutrašnje i vanjsko, omotač, unutrašnji i vanjski, kora.

¹⁰ Ovaj diskontinuitet dobio je ime po hrvatskom geofizičaru Andriji Mohorovičiću, koji je rođen u okolini Opatije. Bio je profesor Sveučilišta u Zagrebu. Smatra se osnivačem savremene seizmologije.

3. *Zemljina kora* je površinski, čvrsti, stjenoviti omotač, koji gradi kontinente i okeansko dno, prosječne debljine 20 km. Kora graniči s Moho¹¹ diskontinuitetom. Zemljina kora je veoma heterogenog sastava, različitog postanka i starosti. Zemljina kora ispod kontinenata i okeanskog dna bitno se razlikuje po debljini, sastavu, načinu postanka i starosti. Dakle, dva su tipa Zemljine kore:
- kontinentalna - njena prosječna debljina iznosi 35 km, a najviše do 70 km; uglavnom je izgrađena od granita, a prosječna gustina je oko 2700 kg/m³.
 - okeanska - izgrađuje čvrstu podlogu okeana. Seizmičkim mjerenjima pokazalo se da ne varira ni horizontalno ni vertikalno u sastavu, već je uglavnom izgrađena od bazičnih magmatskih stijena (bazalt i gabro) i u njoj nije zastupljen granitni sloj. Njeni najstariji dijelovi obrazovani su prije 160 miliona godina. Debljine je od 10 do 12 km i gustine oko 3000 kg/m³.



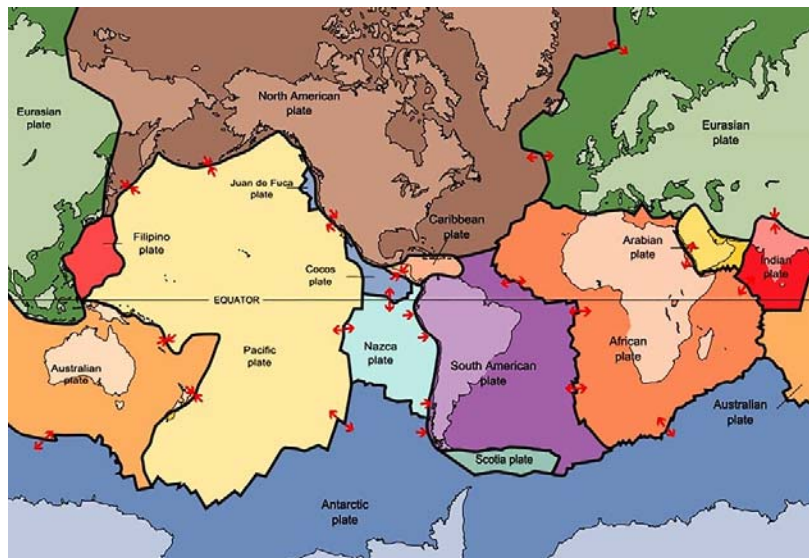
Slika 1-7: Vizualni prikaz geološke vremenske skale i razvoja planete te života na njoj. (izvor: Graham, i dr. 2008)

¹¹ Mohorovičićevom seizmičkom granicom, koja se ispod kontinenta nalazi na dubini 30-70 km, a ispod okeanskog dna na dubini od 3 do 7 km.

Zemlja, čija je površina danas sastavljena od šest kontinentalnih i velikih okeanskih prostranstava još uvijek je dinamična i nestabilna. Zemljotresi, vulkani, cunamiji, klizišta, te sudari s meteorima iz svemira su ne tako rijetke pojave. Pojave koje se kontinuirano dešavaju na sastavima tektonskih ploča od kojih je sačinjena Zemljina kora, je međusobno sporo kretanje.

Radi ilustracije se može brzina pomjeranja npr. Euroazijske ploče ka sjeveroistoku, usporediti s brzinom rasta nokta na ljudskoj ruci. Sporo? Da, to su mali iznosi, ali za godinu dana nokat naraste do dužine od oko 3 cm! Druge regije u svijetu imaju brzinu pomjeranja i po 20 ili više cm po godini.

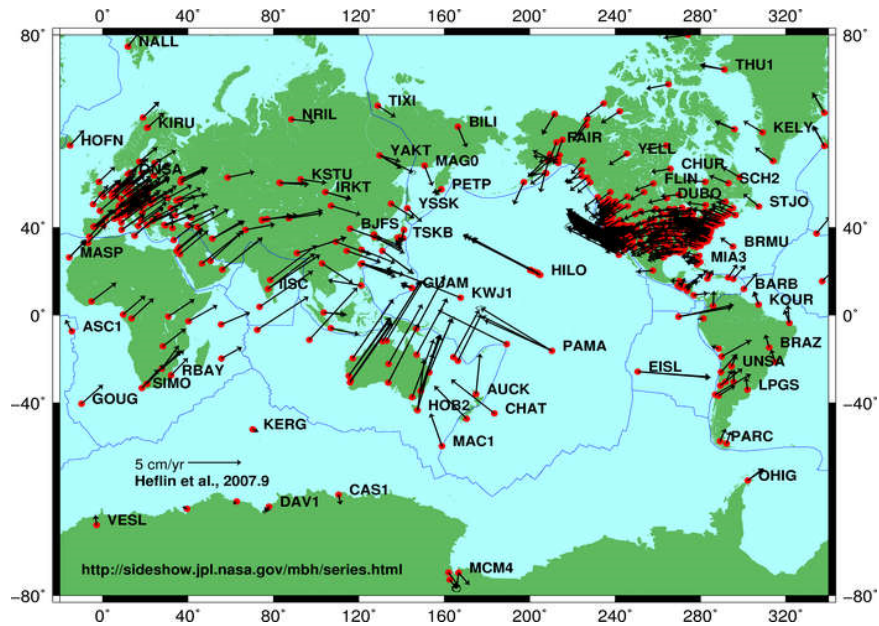
Ovakve pojave se ne smiju nikako zanemariti kad se definira ili koristi referentni okvir, nego se treba pri obradi podataka satelitskih opažanja voditi računa o ovim geodinamičkim pomjeranjima. Pomoć pri obradi podataka opažanja daju različiti dostupni modeli tektonskih ploča. Jedan od brojnih dostupnih modela pokazuje Slika 1-8. Najveća tektonska ploča je pacifička, na čijim rubovima se svakodnevno pojavljuju vulkani i zemljotresi različitog intenziteta. Poznata je kao „Vatreni prsten“.



Slika 1-8: Model tektonskih ploča (uključuje 15 glavnih ploča) s naznačenim strelicama njihovog međusobnog pomjeranja. (Tectonics, 2013 a)

Geodetska opažanja GNSS satelita se uspješno primjenjuju za određivanje vektora pomaka opažanih stanica, što geolozi i geofizičari koriste za interpretacije u svojim analizama tektonskih pomjeranja. Rezultat preciznog određivanja brzina

pomjeranja tektonskih ploča primjenom opažanja GNSS stanica pokazuje Slika 1-9.



Slika 1-9: Brzine GNSS stanica koje precizno pokazuju geodinamičke pomake.
(Tektonics, 2013 b)

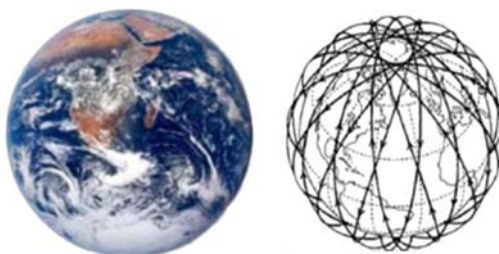
Kad se usporedi s drugim nebeskim tijelima u njenom okruženju, Zemlja se ističe na mnogo načina. Možda jedna od najneobičnijih osobina Zemlje jeste trajna obnova njene površine¹², (Sills, 2010 str. 208). Znanstvenici današnjice su u svojoj terminologiji termin Zemlja zamijenili terminom *Sistem Zemlja*. Novi termin bolje oslikava njenu kompleksnost, kako u pogledu njene građe, tako i pogledu kompleksnih pojava, koje se neprekidno dešavaju u njenoj unutrašnjosti, na površini, ili njenom okruženju. Sistem Zemlja opisan je u sljedećem podpoglavlju.

¹² Istraživači su pronašli da većina sila koje neprekidno obnavljaju površinu naše planete uopće ne postoje na drugom mjestu u našem Sunčevom sistemu, prema tome čine našu planetu jedinstvenom. Neke od sila i pojava koje izazivaju ovakvo podmlađivanje Zemlje su: postojanje atmosfere i pogodnih atmosferilija, erozija, vjetar, životinje, biljke, itd.. Zemlja je jedina čovječanstvu poznata planeta koja ima vodu u tečnom obliku. Voda u svom kruženju u prirodi značajno doprinosi podmađivanju površinskih slojeva naše planete, (Sills, 2010 str. 208).

1.4 SISTEM ZEMLJA

Termin Sistem Zemlja je relativno novi pojam u geoznanostima, a reflektira svu kompleksnost međudjelovanja mnoštva fizikalnih, hemijskih i bioloških fenomena koji se kontinuirano odvijaju na površini, u unutrašnjosti, ili iznad površine planete.

Zadatak definiranja i realizacije globalnog referentnog sistema zahtijeva detaljno poznavanje naše planete. U cilju upoznavanja s procesima i pojavama koje imaju utjecaj na definiranje i realizaciju pogodnog, prikladnog, tačnog, pouzdanog, globalnog referentnog koordinatnog sistema, potrebno je upoznati se s dostignućima na polju istraživanja Zemlje. Rana opažanja iz svemira osvijetlila su kompleksnu dinamičnu prirodu Sistema Zemlja. Primjeri historijskih projekata satelitske ere utrlji su put i omogućili današnja i buduća istraživanja, što pokazuju Slika 1-10 i Slika 1-11.

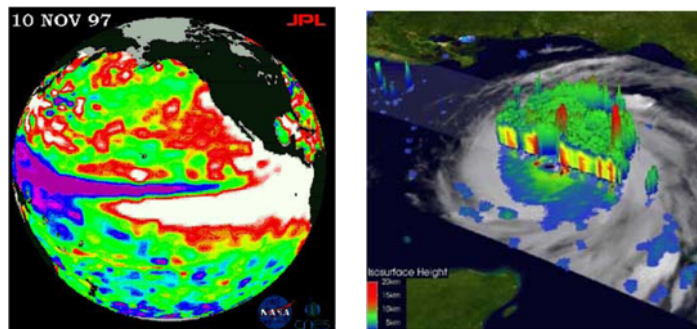


Slika 1-10: Vjerovatno jedna od prvih fotografija Zemlje napravljena iz svemirske letjelice, 1972. godine, tokom misije Apollo 17 (lijevo). Sateliti u orbiti koji su sinhronizirani sa sunčevim vremenom (desno). Kako jedan instrument može „vidjeti“ cijelu Zemlju za samo jedan dan, satelitski podaci se ponavljano prikupljaju toliko često da imaju uvid u promjenjivost planete. (Minster i dr., 2008).

Dinamički procesi u Zemljinoj unutrašnjosti potiču različite pojave koje se mogu opažati na Zemljinoj površini. Primjer je dinamički proces koji se naziva konvekcija Zemljinog omotača. Konvekcija omotača je proces prenošenja topline ili elektriciteta, kretanjem zagrijane ili elektrizirane materije unutar Zemljinog omotača.

Konvekciji omotača se pridružuje pojava premještanja masa i deformacija oblika, a to kao rezultat daje kompleksnu građu Zemljine kore u obliku tektonskih ploča, te pojave aktivnih vulkana i zemljotresa. Iako je uobičajen naziv tektonske ploče, treba napomenuti da to ustvari nisu ravne ploče, nego su zakrivljene kao da su

dijelovi školjke, koja ima veličinu i oblik Zemlje. Anomalije i premještanje masa ne dešavaju se samo u dubokoj unutrašnjosti Zemlje zbog dinamike jezgra i omotača, nego i u atmosferi, kontinentalnoj hidrosferi, okeanima i kriosferi (Slika 1-11).

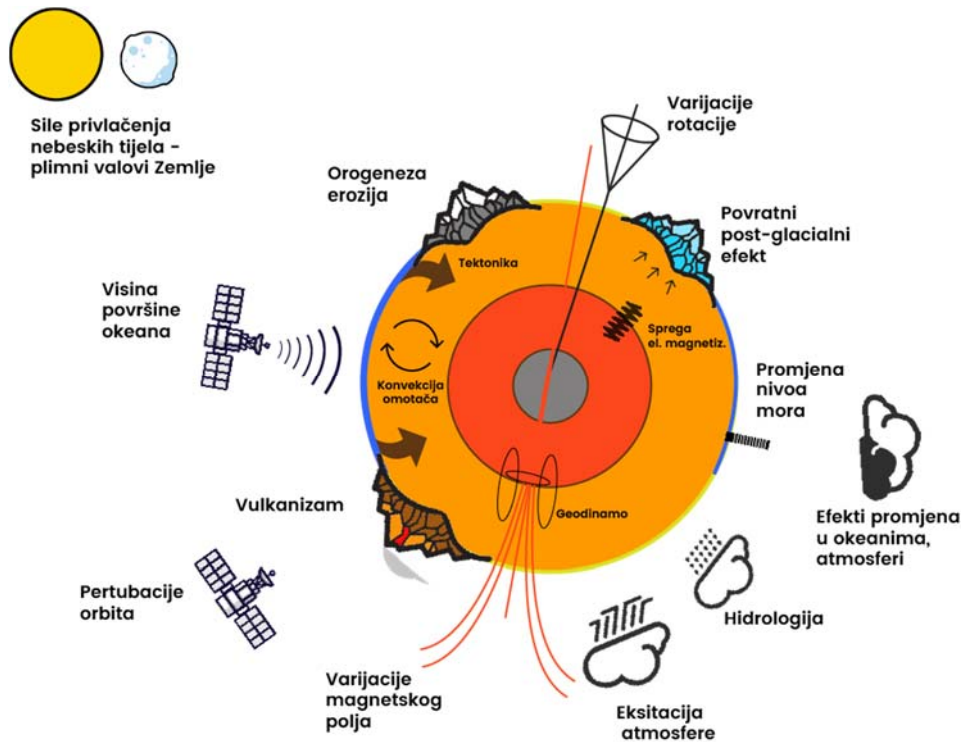


Slika 1-11: Slika Pacifičkog okeana, pokazuje uvjete tokom pojave poznate pod imenom El Niño u 1997. godini (lijevo). Slika je rezultat mjerenju sa satelita TOPEX/ Poseidon. Crvena i bijela boja indiciraju veoma visok (iznad uobičajenog) nivo površine mora, što reflektira povećanu temperaturu na površini. Ovi su uvjeti rezultirali značajnom smanjenju populacije ribe u blizini zapadne obale Južne Amerike. Slika desno pokazuje poprečni presjek kroz uragan Katrina, kao što ga je “vidio” satelit TRMM. Da bi se popravilo predviđanje putanje i jačine uragana, meteorolozi trebaju dobiti mnoga opažanja i alate uključujući: satelitska opažanja brzine vjetrova, temperature površine mora, visine nivoa površine mora, količinu vlažnosti zraka i vodene pare, a zatim primijeniti sofisticirane modele obrade satelitski prikupljenih podataka, koji se kombiniraju s opažanjima na površini Zemlje, (Minster i dr., 2008).

Kriosfera je (iz grčkog jezika: *krios*- κρύος što znači: hladan, smrznut, led; i *sfera*, σφαῖρα, lopta) onaj dio Zemljine površine gdje je voda u čvrstom stanju, uključujući: sante leda na morima, jezerima, rijekama, te snježni pokrivač, glečere, ledene kape na vrhovima planina, i konačno, smrznute površine zemljišta (što uključuje permafrost, tj. tlo zamrznuto dvije godine ili duže). Dakle postoji veliko preklapanje kriosfere s hidrosferom. Kriosfera je integralni dio globalnog klimatskog sistema. Znanost koja proučava kriosferu naziva se kriologija. Zbog dinamike klimatskog sistema, ova stalna premještanja masa u sistemu Zemlja, bivaju u uskoj sprezi s promjenama dnevnih meteoroloških parametara, klime i globalnih promjena.

Ovi dinamički procesi imaju mnogostruke posljedice, uključujući i neke posljedice na geodetska opažanja, kao npr. post-glacijalni povratni efekt, koji teži da poveća eliptičnost Zemlje i njenog geopotencijala. Kao što pokazuje Slika 1-12, mnoge pojave djeluju na oblik Zemlje, njeno polje sile teže, njenu rotaciju, itd. Geodezija se bavi otkrivanjem i rješavanjem problema iz svih nabrojanih fenomena. Uspjeh geodezije može se mjeriti visokom preciznošću opažanja. Upravo ova preciznost

geodetskih opažanja i mjerenja omogućava interpretacije u oblasti geofizike. Geodezija daje jedinstven **referentni okvir** i mogućnosti za monitoring, razumijevanje i prognoze različitih pojava i dinamičkog procesa, koji se dešavaju u sistemu Zemlja u cjelini, kako na globalnom tako i na lokalnom nivou.



Slika 1-12: Struktura Zemljine unutrašnjosti i dinamički procesi unutar i izvan Zemlje koje proučava geodezija¹³.

¹³ Slika 1-12 nacrtana je prema online publikaciji autorice Veronique Dehant, ali izvor više nije dostupan. Pronađen je na http://bncgg.oma.be/contactforum10_05/abstract-contrib/contrib2.doc, 16. 04. 2011. Slika sa sličnim sadržajem dostupna je na (Chao, 2017)

1.5 TRI GLAVNA STUPA GEODEZIJE

Geodezija uglavnom koristi tri skupa različitih opažanja odnosno tehnika, koje se u geodetskoj literaturi često zovu stupovi geodezije, Slika 1-13.

Oblik Zemlje se mjeri opažanjem stanica (geodetskih tačaka, na kojim su postavljeni senzori/instrumenti za opažanje različitim geodetskim tehnikama) u geodetskoj mreži na površini Zemlje i na površini okeana. Ova opažanja postaju pogodna alatka za određivanje lokalnih i globalnih deformacija Zemlje, brzina pomjeranja nekih regionalnih pod-mreža, povezanim s tektonskim pločama. Veoma aktuelna primjena ovih opažanja u svjetlu klimatskih promjena je monitoring izdizanja nivoa okeana i mora. Ovo se često naziva geometrijskim i kinematičkim dijelom geodezije.

Stanice u mreži rotiraju (i također pomjeraju) u odnosu na inercijalni referentni okvir. Monitoring ovih mreža tako omogućuje određivanje parametara Zemljine orijentacije u svemiru te njihovih vremenskih varijacija.

Gravitacijsko polje Zemlje utječe na većinu geodetskih instrumenata, uključujući i satelite. Zbog ove činjenice se može reći da geodezija također radi monitoring gravitacijskog polja i njegovih varijacija kroz vrijeme. Interpretacija ovih opažanja, a koja su posljedica dinamike Zemlje (prenos masa unutar i izvan Zemlje) je predmet lokalne i globalne geofizike.

Ovo daje za pravo geodetima da kažu da je geodezija interdisciplinarna, što je čini snažnom, ali u isto vrijeme predstavlja realan izazov.



Slika 1-13: Tri stupa geodezije. Prema (IAG_GGOS, bez datuma)

Geokinematika je polje koje otkriva i rješava probleme vezane za površinu Zemlje i referentne mreže. Položaji i brzine pomjeranja stanica prate se primjenom različitih geodetskih svemirskih tehnika:

1. GNSS (Global Navigation Satellite Systems), kao što je američki GPS (Global Positioning System), ruski GLONASS (Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema), evropski Galileo, te kineski BDS (BeiDou Navigation Satellite System),
2. SLR (Satellite Laser Ranging),
3. LLR (Lunar Laser Ranging),
4. VLBI (Very Long Baseline Interferometry),
5. DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite).

Površina mora i okeana prati se satelitskom altimetrijom i mareografima. Stručnjaci iz ove oblasti nastoje osigurati stabilnost, pouzdanost i pristupačan referentni okvir, ustanovljavanjem vremenskih serija lokalnih i globalnih opažanja nivoa mora.

Orijentacija i rotacija Zemlje se mjeri istim gore spomenutim tehnikama. Rotacija Zemlje je i globalna rotacija geodetskih mreža. Geodeti aproksimiraju Zemlju (radi pojednostavljenja matematičke obrade opažanja) **elipsoidom**. Ovaj elipsoid rotira ujednačenom uglovnom brzinom oko svoje male osi. Ova os se održava u pravcu koji je određen u svemiru, tj. u odnosu na pravac “nepomičnih zvijezda”, tj. nebeskih tijela koje zovemo kvazarima. Kvazari su dovoljno udaljeni u svemiru da se mogu smatrati nepomičnim.

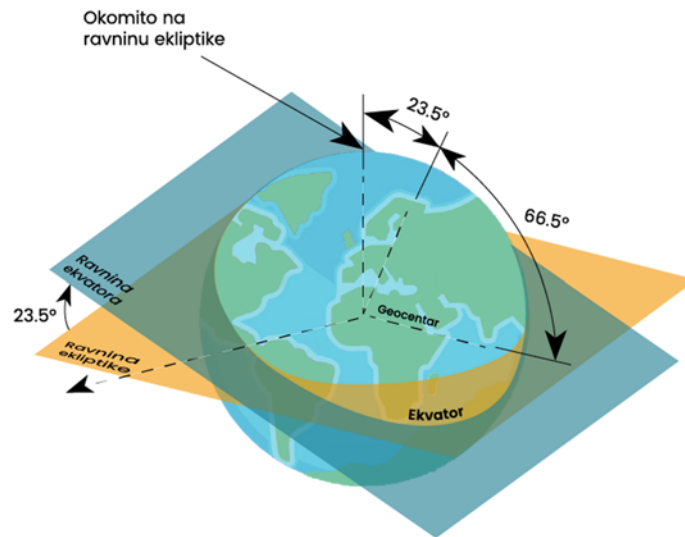
Gravitacija drži u ravnoteži elipsoid simetričnim u odnosu na obrtnu os. Razlika dužine osi na ekvatoru i polu je oko 21 km. Uglovna brzina ili rotacija Zemlje nije konstantna, a pravci Zemljinih osi variraju u prostoru, kao i jedna u odnosu na drugu. Zemljini parametri orijentacije (Earth Orientation Parameters - EOP) su rotacije koje su potrebne da se izrazi relativna orijentacija Zemljinog (terestričkog) referentnog okvira i svemirskog referentnog okvira.

Za orijentaciju Zemlje u svemiru potrebno je poznavati orijentacijske tj. rotacijske parametre, koji se primjenjuju za ostvarivanje veze (transformacije) između osnovnog tj. nebeskog i terrestričkog referentnog sistema. Ove transformacije izvode se pomoću rotacija: precesije, nutacije i pomjeranja polova. Ovi pojmovi nisu ovdje detaljno razmatrani, ali je dovoljno za razumijevanje veze nebeskog (osnovnog) i terrestričkog referentnog sistema.

Za detaljno upoznavanje s precesijom, nutacijom i pomjeranjem polova, zainteresirani čitaoci se upućuju na (Dehant i Mathews, 2015).

1.6 PRECESIJA I NUTACIJA

Zemljina os rotacije, kao i Zemljina ekvatorska ravnina, nije fiksirana u prostoru (tj. u odnosu na „fiksirane zvijezde“) nego rotira oko pola ekliptike, Slika 1-14. Kretanje rotacijske osi naše planete kreće se (približno) tako da formira konus okomit na ekvatorsku ravninu, kao što pokazuje Slika 1-15. Konus je nagnut za ugao ε od oko $23,5^\circ$ u odnosu na pol, a pod tim uglom se sijeku ravnine ekvatora i ekliptike.



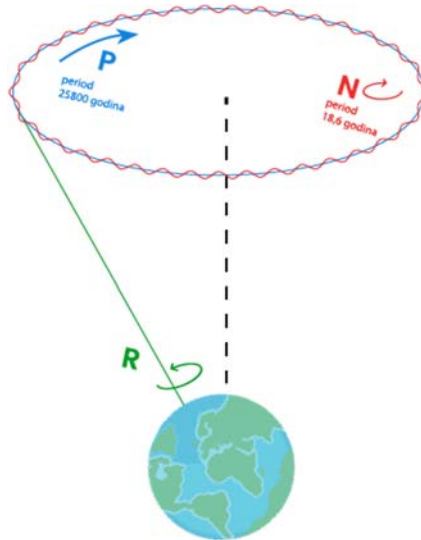
Slika 1-14: Odnos ekvatorske i ekliptičke ravnine, rotacijske osi Zemlje te polova.

Ova pojava javlja se zbog utjecaja sile privlačenja Mjeseca i Sunca, kao i većih planeta u bližem svemiru, na elipsoidni oblik tijela Zemlje. Precesija je bila poznata u doba antičke Grčke, i obično se ovo otkriće pripisuje astronomu Hiparhu¹⁴. Moderna saznanja indiciraju da je Hiparh ustvari samo koristio opažanja nebeskih tijela zabilježenih na glinenim pločama starim preko 600 godina, poznatim kao Babilonski astronomski dnevnic, te da je podatke sistematično analizirao i tako ustanovio precesiju proljetnog ekvinocija ili tačke proljetne ravnodnevnice.

¹⁴ Hiparh (grčki Ἱππαρχος, Hipparkhos; 190-120 p.n.e) je bio astronom, geograf i matematičar u doba antičke Grčke. Pripisuje mu se ustanovljavanje trigonometrije. Međutim, najpoznatiji je po otkriću precesije proljetnog ekvinocija.

Precesija nije u potpunosti pravilno kretanje, nego pokazuje „kratkoperiodične“ varijacije. Ukupno kretanje se može podijeliti na dvije komponente:

1. sekularnu, naziva se precesija, koja ima period oko 26 000 godina, (tačnije oko 25 800)
2. periodičku, koja se naziva nutacija, s periodom od 18,6 godina.



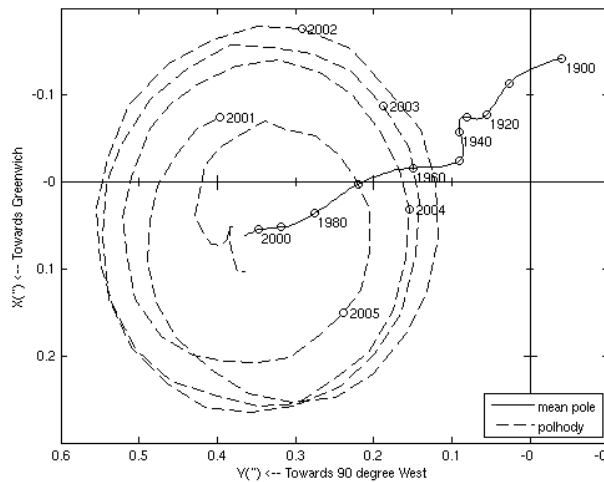
Slika 1-15: Precesija (P) i nutacija (N), rotacijska os Zemlje (R).

Polarno kretanje je posljedica pomjeranja Zemljine rotacijske osi po površini Zemlje. Smatra se da je polarno kretanje uglavnom posljedica dugoperiodičnih varijacija obrtne osi Zemlje oko Sjevernog pola. Položaj sjevernog pola je definiran iz šestogodišnjeg opažanja (1900-1905.), i takav položaj je nazvan međunarodni konvencijski referentni pol (Conventional International Origin - CIO) i odnosi se na epohu 1903. Ova pomjeranja nisu velika, iznose po nekoliko metara, i uglavnom se zadržavaju u kvadratu, čije su dužine strana od oko 20 m. Prikazuje se u dvodimenzionalnom koordinatnom lokalnom sistemu s ishodištem u CIO.

Polarno kretanje se može smatrati periodičnim oscilacijama, te rastaviti u tri osnovne komponente:

1. *Slobodne oscilacije polarnog kretanja*, poznate pod nazivom Chandlerov period (Chandler wobble), s periodom od 435 dana. Amplituda ove komponente varira za faktor tri, a frekvencija za oko 7%. Maksimalna amplituda za proteklo stoljeće nije prešla 230 mas.
2. *Godišnje oscilacije polarnog kretanja*. Amplituda ove komponente je konstantna, a frekvencija varira za oko 1-2%.
3. *Nepravilni pomaci polarnog kretanja*, u pravcu zapada (ka 80° meridijanu) pa se kasnije pomjerio ka istoku.

Polarno kretanje se danas rutinski opaža primjenom geodetskih svemirskih tehnika: VLBI, LLR, SLR, ali se također za ova istraživanja primjenjuje i GNSS.



Slika 1-16: Polarno kretanje zabilježeno za period od 2001 do 2006. godine, pokazano crtkastom linijom. Srednji položaj kretanja pola za period od 1900. do 2006. godine pokazan je punom linijom. Vidi se kako srednji položaj ima nepravilan „hod“ u smjeru oko 80° ka zapadu, a u novije vrijeme lagano skreće ka istoku. (IERS, 2013)

Precesija i nutacija se smatraju uglavnom dugoperiodičnim varijacijama različitih osi u svemiru. Varijacije ovih pravaca su posljedica u prvom redu torzije izazvane gravitacijskim silama Mjeseca i Sunca, (i u malom iznosu okolnih većih planeta), koje djeluju na ispupčenja na ekvatoru. Kako je Zemlja rotirajuće tijelo, ona na torziju reagira kao žiroskop, i tako podržava varijacije osi.

Zašto je potrebno razumjeti pojave kao što su precesija i nutacija te pomjeranje polova na ovom nivou studija geodezije? Jednostavan odgovor bi bio da se utjecaj precesije i nutacije mora primijeniti ako se želi izračunati transformacija koordinata iz nebeskog referentnog okvira (Celestial Reference Frame - CRF) u terestrički referentni okvir (Terrestrial Reference Frame – TRF). Formule za računanje se ovdje neće razmatrati¹⁵.

Varijacije parametara orijentacije povezane su s varijacijama rotacije Zemlje. Ove su varijacije nepravilne, a kao posljedica se javljaju: pomjeranje polova,

¹⁵ Ova materija se proučava na diplomskom studiju. Zainteresirani čitalac se upućuje na (Seeber 2003, poglavlja 2.1. i 2.3) ili (Dehant i Mathews, 2015)

varijacije dužine dana (Seitz i Scuh, 2010) i precesija i nutacija (Dehant i Mathews, 2015). Zbog potrebe razumijevanja veze između terestričkog i nebeskog referentnog sistema, orijentacijski parametri Zemlje su ukratko razmatrani u sljedećem poglavlju, a detaljna proučavanja ovih problema predviđa se za diplomski ili doktorski studij.

Zbog činjenice da je Sistem Zemlja veoma kompleksan sistem, provode se stalna istraživanja u ovom polju s ciljem određivanja vrlo preciznog modela nutacije, uzimajući u obzir sofisticirani koncept elastične Zemlje, s čvrstim unutarnjim jezgrom, tečnim vanjskim jezgrom, konvektivnim omotačem podložnom deformacijama, kompleksnom atmosferom i okeanima. Ovo zahtijeva saradnju sa znanstvenicima iz oblasti nebeske mehanike, geofizike, dinamike atmosfere i okeana kao i astronoma. Napredak se postiže samo upornim i istrajnim usporedbama i „takmičenjima“ između teorije i praktičnih opažanja.

Poznavanje i modeliranje Zemljine orijentacije u svemiru od vitalnog je značaja za mnoge aplikacije, kao npr. navigacija ili svemirska/satelitska geodezija. U zadnje vrijeme su ostvarena poboljšanja u poznavanju i modeliranju fizikalnih procesa povezanih s nutacijom. Npr., pomoću modela nutacije, koji je usvojen 1980. godine, mogla se izračunati amplituda nutacije s tačnošću od oko 2 metra. Danas se ova pogreška smanjila na 2-3 cm. Ovo je veoma važno za satelitske misije. U isto vrijeme dozvoljava znanstvenicima da saznaju mnogo o Zemljinoj unutrašnjosti, koja se ne može direktno opažati iz satelita.

Kad bi Zemlja imala oblik sfere i imala homogen sastav i čvrstu koru, gravitacijsko polje bi bilo isto kao za tačkastu masu, ili sferno simetrično tijelo. Heterogeni raspored masa unutar Zemlje stvara nesimetrične oblike u gravitacijskom polju. Tako, npr., zbog pojave izbacivanja plinova i pare unutar omotača, Zemlja odgovara na pritisak i pojavljuju se anomalije masa, koje se očituju u anomalijama gravitacijskog polja.

Proučavanje gravitacijskog polja je recimo zanimljivo za bolje razumijevanje donjih slojeva litosfere i strukture omotača. Nasuprot tome, vanjske gravitacijske sile, zbog djelovanja nebeskih tijela iz Sunčevog sistema, uzrokuju pojave na Zemlji koje zovemo precesija i nutacija. Ove pojave povećavaju deformacije na čvrstoj Zemlji. „Plimni valovi“ čvrste Zemlje, kao i plimni valovi okeana, igraju važnu ulogu u svim aspektima varijacija Zemljine rotacije i varijacija njenog gravitacijskog polja. Vremenske varijacije gravitacije nisu nastale samo zbog periodičkih plimnih valova gravitacijskog ishodišta, nego su posljedica i promjena u atmosferi, okeanima ili hidrosferi. Veoma preciznim mjerenjem gravitacijskih promjena u periodima sati/minute, omogućuje monitoring normalnog modela Zemlje.

1.7 INTERDISCIPLINARNOST GEODEZIJE

Geodezija je interdisciplinarna oblast, što joj daje prednost, ali to ujedno predstavlja veliki izazov. Međunarodna geodetska zajednica je spremna da pruži svoj doprinos za novi i veoma važan segment proučavanja sistema Zemlja. Ona daje na globalnom, kao i na lokalnom nivou, prostorne i temporalne promjene:

1. oblika naše planete, (uključujući okeane, ledeni prekrivač i kopnene površine),
2. rotacije Zemlje i
3. gravitacijskog polja.

Dakle, geodezija daje globalnu sliku dinamike na površini jedine planete pogodna za razvoj živih organizama u bližem svemiru. Osim toga geodezija daje procjenu anomalija masa, prenosa masa, te procesa razmjene masa, u kompleksnom Sistemu Zemlja. Ova dva elementa zajedno su ključ za određivanje ravnoteže globalnih masa, a važan su doprinos za razumijevanje globalne količine energije, što je važna informacija za današnje globalno društvo u cjelini.

Svemirska/satelitska geodezija je tokom prve tri decenije aktivnog angažmana, napravila trostruki napredak u postizanju nivoa tačnosti, i po prvi put zauzima važnu ulogu u opažanju transporta ukupnih masa, koji se odvija u Sistemu Zemlja, počevši od visoke atmosfere, do duboke unutrašnjosti omotača i jezgre. Kao takva svemirska geodezija je postala važna alatka za daljinska istraživanja, u monitoringu klimatskih i geofizičkih promjena, s tačnošću boljom nego se mogla i zamisliti u skorijoj i daljoj prošlosti, s tendencijom njenog popravljavanja.

Transport masa i energije su ključni procesi koji određuju dinamiku Sistema Zemlja. Sistem Zemlja se može pogodno posmatrati i opažati kroz njene komponente, tkz. geofizičke fluide: atmosferu, hidrosferu, kriosferu, biosferu, litosferu, astenosferu i duboku unutrašnjost omotača i jezgre. Svi geofizički fluidi su pogodna sredina za transport masa, iz mnogo razloga, kako vanjskih tako i unutarnjih. Proučavanje ovih procesa je nesumnjivo najinterdisciplinarnije polje u svim geoznanostima, (Chao, 2003, str.145).

1.8 MEĐUNARODNE GEODETSKE ORGANIZACIJE

Geodezija doprinosi funkcioniranju modernog društva na bezbroj načina, (Rizos i dr., 2009, str. 209-249). U cilju upoznavanja šire geodetske zajednice sa ulogom i značajem međunarodnih organizacija u kojima geodeti imaju aktivnu i značajnu

ulogu, navest će se samo osnove informacije o krovnim geodetskim organizacijama važnim za oblast (više) geodezije.

1.8.1 Međunarodna unija za geodeziju i geofiziku

Međunarodna unija za geodeziju i geofiziku, (International Union of Geodesy and Geophysics - IUGG), je nevladina, znanstvena organizacija, ustanovljena 1919. godine, u Rimu. Jedna je od 30 znanstvenih Unija koje su trenutno grupirane unutar Međunarodnog vijeća za znanost (International Council for Sciences - ICSU). IUGG je posvećena međunarodnoj promociji i koordinaciji znanstvenih istraživanja Zemlje i njezine okoline u prostoru, (primjenom metoda fizike, hemije i matematike).

Ove studije uključuju oblik Zemlje, njezino gravitacijsko i magnetsko polje, dinamiku Zemlje kao cjeline i njenih sastavnih dijelova, Zemljinu unutarnju strukturu i sastav, tektoniku, stvaranje magme, vulkanizam i formacije stijena, hidrološke cikluse, uključujući snijeg i led, sve aspekte okeana, atmosfere, ionosfere, magnetosfere kao i relacija između Sunca i Zemlje, i analogno, probleme povezane s Mjesecom i planetama.

IUGG potiče primjenu tog znanja na društvenim potrebama, kao što su mineralne sirovine, smanjenje prirodnih rizika i očuvanje okoliša. IUGG se sastoji od osam polu-autonomnih asocijacija, od kojih je svaka odgovorna za specifičan raspon tema unutar cjelokupnog opsega aktivnosti Unije. Osim toga, IUGG uspostavlja inter-asocijacije i komisije. Također uspostavlja odnose s drugim znanstvenim tijelima koja imaju slične interese, (npr. Međunarodnom astronomskom unijom-IAU, International Astronomical Union).

Istraživačka saradnja u geodeziji i geofizici, po svojoj prirodi je međunarodnog karaktera. Ona okuplja znanstvenike iz raznih dijelova svijeta s ciljem istraživanja i prema tome razumijevanju planete Zemlje i njenog okruženja. Znanje i podaci o Sistemu Zemlja, prikupljeni tokom istraživanja u međunarodnoj saradnji, daju neophodne informacije za otkrivanje (i odgovornu upotrebu) prirodnih resursa, održivog upravljanja i smanjenja utjecaja prirodnih katastrofa, te da zadovolji našu pozitivnu radoznalost o Zemljinom prirodnom okolišu i smanji posljedice ljudskih aktivnosti.

1.8.2 Međunarodna asocijacija za geodeziju

Internacionalna asocijacija za geodeziju – IAG je najstarija međunarodna znanstvena organizacija. Prve koraka međunarodnog organiziranja bilježi 1862. godine na inicijativu njemačkih geodeta. Osnovana je da koordinira istraživanja u polju geodezije. Promovira znanstvenu saradnju i geodetska istraživanja na lokalnom i globalnom nivou, koordinira osnivanje i održavanje međunarodnih servisa za međunarodnu znanstvenu zajednicu, i predstavlja geodete u toj zajednici.

Slijedi navod iz IAG Statuta: “Misija Asocijacije je unapređenje geodezije, znanosti o Zemlji, koja uključuje proučavanje planete i njenih satelita. IAG implementira svoju misiju unapređujući geodetsku teoriju kroz istraživanje i podučavanje, prikupljanje, analiziranje i modeliranje podataka opažanja, stimulirajući tehnološki napredak i dajući konzistentno predstavljanje oblika, rotacije i gravitacijskog polja Zemlje i okolnih planeta i njihovih temporalnih varijacija”.

IAG aktivnosti provode se kroz rad četiri komisije (IAG, 2003 a):

- a. Komisija 1: Referentni okviri,
- b. Komisija 2: Polje sile teže,
- c. Komisija 3: Rotacija Zemlje i geodinamika,
- d. Komisija 4: Pozicioniranje i primjene.

Međunarodna asocijacija za geodeziju je u saradnji s drugim međunarodnim znanstvenim asocijacijama i unijama ustanovila je i održava sljedeće servise, za sve glavne svemirske/satelitske tehnike, koje se primjenjuju u geodeziji i geofizici (IAG, 2003 b):

1. **Međunarodni GNSS servis**, (International GNSS Service – IGS), koji je osnovan 1. januara 1994. godine, nakon pilot faze koja je trajala oko jedne godine. Ovaj servis radi na dobrovoljnom udruživanju geodetskih istraživačkih institucija u svijetu, i danas predstavlja jedan od najvažnijih servisa za GNSS zajednicu. Najpoznatiji proizvod IGS servisa su precizne efemeride¹⁶ satelita. Preuzimaju se s web portala, besplatne su za sve korisnike.

¹⁶ Efemeride satelita (ili orbite) su podaci o položajima satelita za vremenske intervale (obično 15 minuta za „broadcast“ efemeride, koje su sadržane u satelitskom signalu, a predstavljaju položaje satelita koji su unaprijed izračunati po matematičkim modelima nebeske mehanike i prethodnim opažanjima). Efemeride mogu biti različite tačnosti i latentnosti, tako da postoje precizne (ili konačne), rapidne ili brze rapidne efemeride/orbite.

2. **Međunarodni servis za Zemljinu rotaciju i referentne sisteme**, (International Earth Rotation and Reference Systems Service - IERS), osnovan 1987. godine, a preimenovan je 2003. godine. U svom radu usko surađuje s Međunarodnom astronomskom unijom – IAU (International Astronomical Union). IERS servis ustvari ima dugu historiju jer baštini i nastavlja aktivnosti ranijih međunarodnih organizacija. Prvo je 1899. godine osnovan poznati Međunarodni servis za širinu - ILS (International Latitude Service). Od 1912. radi kao BIH, potom mijenja ime u IPMS i konačno, 1987 u IERS. Najpoznatiji proizvod ovog servisa su ITRF geodetski referentni okviri i parametri orijentacije Zemlje - EOP.
3. **Međunarodni servis za laserska mjerenja** (do Mjeseca i vještačkih satelita), (International Laser Ranging Service - ILRS).
4. **Međunarodni DORIS servis**, (Doppler Orbitography Radiopositioning Integration by Satellite) (International DORIS Service - IDS).
5. **Međunarodni VLBI servis** (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry - IVS).
6. **Međunarodni biro za težinu i mjere**. (Bureau International de Poids et Mesures-Section Time, Frequency and Gravimetry - BIPM). IAG je odgovorna za BIMP sekciju za vrijeme. Radi od 1875. godine.
7. **Međunarodni servis za gravitacijsko polje** (International Gravity Field Service-IGFS)
8. **Međunarodni servis za altimetriju** (International Altimeter Service - IAS), ustanovljen za slobodan pristup altimetrijskim podacima u standardnom formatu, godine 2008.
9. **Međunarodni biro za gravimetriju** (International Gravimetric Bureau - IGB), osnovan 1951. godine.
10. **Međunarodni servis za geoid** (International Geoid Service-IGeS), osnovan 1992. godine.
11. **Međunarodni servis za plimne valove** (International Centre for Earth Tides - ICET). Osnovan je 1956. godine.
12. **Permanentni servis za srednji nivo mora** (Permanent Service for Mean Sea Level - PSMSL). PSMSL servis je osnovan 1933. godine.
13. **Međunarodni centar za globalne gravitacijske modele** (International Center for Global Gravity Field Models - ICGEM).
14. **Međunarodni servis za digitalni model terena** (International Digital Elevation Model Service - IDEMS). Ovaj servis je osnovan 1999. godine.
15. **IAG bibliografski servis** (IAG Bibliographic Service - IBS), ima zadatak formirati i održavati bazu podataka literature iz geodezije, fotogrametrije i kartografije (GEOFOKA).

Svi IAG servisi su infrastruktura i služe za napredak geoznanosti i civilnog društava uopće. Podaci i rezultati njihovog rada se mogu dobiti besplatno za istraživačke, neprofitabilne projekte, ukoliko korisnici pismeno zatraže podatke s obrazloženjem načina korištenja i distribuiranja. Svi IAG servisi surađuju i po

potrebi međusobno razmjenjuju podatke. Glavne zajedničke aktivnosti svih servisa pokazuju se u glavnoj sastavnici IAG koja se naziva GGOS (Globalni geodetski opažački sistem).

1.8.3 GGOS kao vitalna infrastruktura geoznanosti

Akronim GGOS (Global Geodetic Observation System) ima dva vrlo različita značenja i treba razlikovati:

1. Organizaciju GGOS, koju čine komponente kao što su komiteti, radne grupe, okrugli stolovi i slično.
2. Opažački sistem GGOS, koji se sastoji od brojnih različitih instrumenata, satelitskih misija, kao i istraživačkih centara koji prikupljaju i analiziraju podatke opažanja. Ova komponenta se naziva i IGGOS što je akronim za Integrirani globalni geodetski opažački sistem.

Organizacija GGOS je novi sastavni dio IAG, koji je nedavno ustanovio svoju strukturu. Za razliku od organizacije, opažačka infrastruktura za IGGOS sistem je uveliko obezbijedena kroz IAG servise.

Opažački IGGOS sistem ima nimalo jednostavan zadatak da zadovolji veoma zahtjevne potrebe širokog kruga različitih korisnika. **Korisnici IGGOS sistema zahtijevaju visoku tačnost referentnog okvira** i njegovu široku i jednostavnu dostupnost, njegovu dobru prostornu i temporalnu distribuciju. IGGOS ima težak zadatak da kombinira i sublimira, te napravi jaku sinergiju od podataka opažanja prikupljenih veoma različitim mjernim tehnikama.

Mjerne tehnike trebaju imati sposobnost da mjere varijacije u obliku Zemlje, njenom gravitacijskom polju, njenoj rotaciji, s veoma visokom tačnošću i konzistentnošću od 0,1 do 1 ppb¹⁷, a da pri tom imaju tendenciju smanjenja latentnosti određivanja. Zahtjevna zajednica korisnika ima sve više pretenzija za prikupljanjem prostornih i drugih relevantnih podataka u realnom vremenu.

Kao što je u ranijim poglavljima naglašeno, Sistem Zemlja je kompleksan sistem u kojem se dešavaju različiti fizikalni, hemijski i biološki procesi. Ti procesi se u Sistemu Zemlja dešavaju u različitim razmjerima, pa se tako posljedice tih procesa mogu uočiti ili uvjetuju posljedice u prostoru koji varira, od mikrometra do

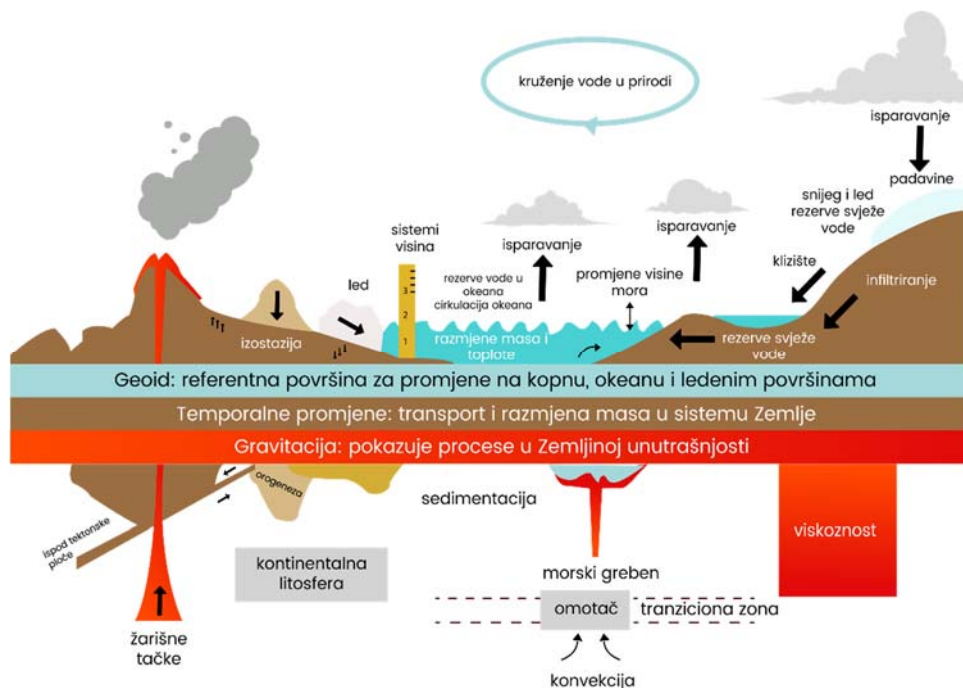
¹⁷ ppb je skraćenica od engl. „one part per bilion“, što znači jedan milijarditi dio (10^{-9})

globalne razmjere. Varira i vrijeme pojavljivanja i trajanja ovih procesa. Tako, različiti procesi i pojave mogu trajati od nekoliko sekundi do više milijardi godina.

Imajući u vidu kompleksnost Sistema Zemlja i visoke zahtjeve korisnika GGOS sistema za osiguravanjem tačnih, pouzdanih i pravovremenih prostornih informacija, može se zaključiti da je zahtjeve moguće zadovoljiti samo kroz integraciju „tri stupa geodezije“ u jedan sistem.

Samo takav sistem osigurava informacije o premještanju Zemljinih masa, zatim o deformacijama na površini Zemlje kao i o dinamici Zemlje, i samo takav sistem pruža mogućnost da se opaža cjelovita Zemlja (Slika 1-17). GGOS treba primijeniti sinergiju znanja svih geoznanosti. Više o znanstvenim i društvenim zahtjevima korisnika GGOS sistema vidjeti u (Gross, i dr., 2009, str. 209-224).

Za postizanje planiranih funkcija, GGOS treba da služi kao veliki savremeni „geodetski instrument“ za monitoring Sistema Zemlja.



Slika 1-17: Geofizički procesi su u vezi s redistribucijom masa i promjena u dinamici Sistema Zemlja, što utječe na njeno gravitacijsko polje, geometriju i rotaciju. (modificirano prema: Ilk i dr., 2005, str.4)

Dakle, GGOS treba posmatrati kao veliku Zemaljsku opservatoriju, koja služi znanosti i društvu. GGOS obuhvata globalne terestričke mreže opservatorija, koje

opažaju različitim geodetskim tehnikama, kao i svemirske misije koje su posvećene geodetskim opažanjima i istraživanjima Zemlje, ali i komunikacijsku infrastrukturu, analitičke i koordinacijske centre, internet portale, dostupne sisteme i centre za alarmiranje, itd. GGOS će vjerojatno u skoroj budućnosti biti u prilici razviti dobro definirane proizvode, koji će davati osnovu za geoznanosti i navigaciju.

Kombiniranje i integriranje podataka prikupljenih različitim geodetskom infrastrukturom, omogućava određivanje i održavanje geodetskog referentnog okvira, Zemljinog gravitacijskog polja i njene rotacije. Terestričke geodetske mreže i navigacijski sateliti su neophodni za određivanje referentnog okvira potrebnog za moderno pozicioniranje. Za aktualnu i buduću organizaciju GGOS sistema i dalje perspektive vidjeti (Beutler, i dr., 2009, 273-281). Primjena GGOS-a je široka i služi civilnom društvu općenito, a samo mali broj koristi navedene su u Tablica 1-1.

Tablica 1-1: Koristi za širu društvenu zajednicu koje prepoznaje i podržava Integrirani globalni sistem za opažanje Zemlje, (Sahagian, i dr. 2009, str. 155).

Područje	Ciljevi i aktivnosti
Katastrofe	Smanjenje gubitaka ljudskih života i materijalnih dobara u prirodnim katastrofama kao i nesrećama izazvane ljudskim aktivnostima.
Zdravlje	Razumijevanje faktora iz prirodne čovjekove okoline koji utječu na zdravlje ljudi i njihovo blagostanje.
Energetski resursi	Popravljanje upravljanja energetske resursima.
Klima	Razumijevanje, procjenjivanje, predviđanje i ublažavanje, prilagođavanje klimatskim varijacijama i promjenama.
Voda	Popravljanje upravljanja vodenim resursima kroz bolje razumijevanje kruženja vode u prirodi.
Vrijeme	Popravljanje informacija o vremenu, vremenske prognoze i upozoravanja.
Ekosistem	Popravljanje upravljanja i zaštite terestričkog, obalskog i pomorskog ekosistema.
Agrikultura	Podrška samoodrživoj agrikulturi i suzbijanje desertificiranja.
Biodiverzitet	Razumijevanje, monitoring i očuvanje biodiverziteta.

1.8.4 Geodetske tehnike koje se kombiniraju u GGOS

Geodezija je znanstvena “disciplina mjerenja”, slično astronomiji, a svoj brzi napredak umnogome duguje razvoju znanosti o svemiru (Rummel, i dr, 2009, str. 89). Geodetske svemirske tehnike kao: VLBI, SLR, LLR, GNSS i DORIS dostigle su visok nivo tačnosti, što ih smješta na visoki nivo na listi dostignuća u geoznanostima. GGOS kombinira i spaja u jednu globalnu cjelinu (Slika 1-18), unutar globalnog referentnog okvira, dugu listu svemirskih tehnika:

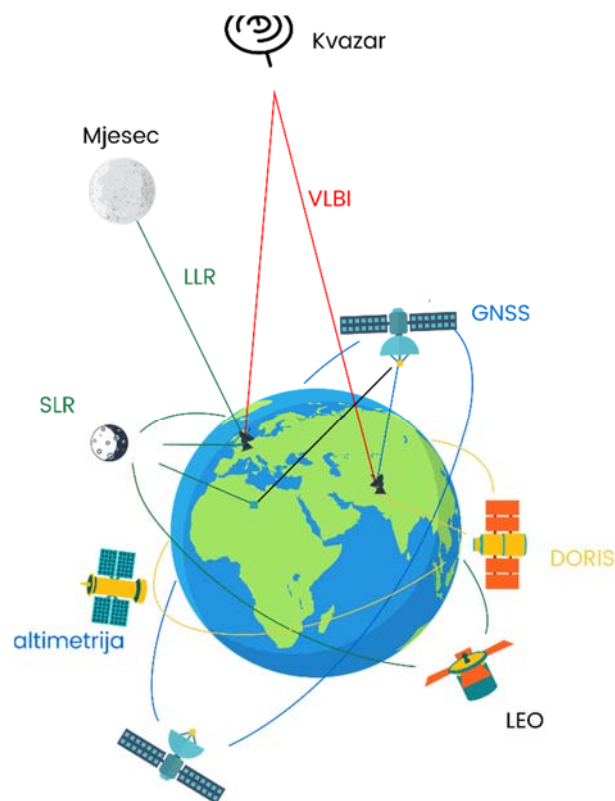
1. SLR/LLR,
2. VLBI,
3. GNSS,
4. DORIS,
5. (diferencirani) InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar),
6. okeanska altimetrija,
7. altimetrija ledenih površina,
8. različite gravimetrijske satelitske misije¹⁸: CHAMP, GRACE i GOCE,
9. različite astrometrijske tehnike i misije, npr. Gaia,
10. geodetske tehnike ispitivanja atmosfere pomoću GNSS-a, mjerenjem do nisko-orbitirajućih satelita – LEO, ili do prijemnika koji su postavljeni na opažачkim stanicama na površini Zemlje.

Jedan od osnovnih i najteže ostvarivih ciljeva Međunarodne geodetske asocijacije je da sve ove tehnike moraju imati unificirane tačnosti i integrirane do nivoa 1 ppb¹⁹, (Rummel i dr., 2009, str. 91).

Svemirske geodetske tehnike kao što su: VLBI, SLR, LLR, GNSS i DORIS i Altimetrija, (Slika 1-18) koje se koriste pri realizaciji referentnog terestričkog sistema TRS, su vrlo kratko opisane u sljedećem podpoglavlju, ali samo radi razumijevanja njihove primjene u definiranju i realizaciji geodetskih referentnih sistema.

¹⁸ Gravitacijske misije imaju različite zadatke da ispituju npr.: perturbacije satelitskih orbita, inter-satelitska ispitivanja, ubrzanja satelita i njihovu međusobnu udaljenost-metodama radiometrije. Najveći doprinos geodeziji dale su kroz nove modele globalnih geoida.

¹⁹ ppb je jedan milijarditi dio (10^{-9}). Treba imati na umu da je 1ppm skraćenica za jedan milioniti dio (10^{-6}), te je 1ppb hiljadu puta manji od 1 ppm.



Slika 1-18: Simbolična predstava geodetskih svemirskih tehnika koje su integrirane u GGOS. Kvazari su veoma udaljeni, SLR satelit je malih dimenzija, LEO satelit predstavlja veliku grupu satelita s različitim zadacima, uključujući: gravitacijske satelitske misije, kao i satelite koji nose DORIS prijemnike, te satelite za altimetriju i na kraju satelite za različite metode daljinska istraživanja. Modificirano prema: (GGOS-D, 2013)

1.8.4.1 Dugobazisna interferometrija

VLBI (Very Long Baseline Interferometry) ili dugobazisna interferometrija je geodetska svemirska tehnika koja je prvobitno razvijena za kreiranje slika i kartografskih prikaza visoke rezolucije objekata u svemiru. Primjenjuje se u geoznanostima²⁰ za brojne namjene, kao što su npr.:

²⁰ softveri i metode koji su prvotno razvijeni za obradu opažanja VLBI tehnikom primjenjuju se u medicini za kompjuteriziranje x-zraka tomografije.

1. definiranje nebeskog referentnog okvira,
2. proučavanje pomjeranja tektonskih ploča,
3. polarnog kretanja,
4. varijacija Zemljine rotacije,
5. određivanja parametara troposfere,
6. identificiranje potencijalnih zona pojave zemljotresa preko preciznog mjerenja kretanja geoloških rasjeda.

Ova je tehnika kasnije zamijenjena jeftinijom metodom - GPS. Međutim, VLBI je ostao nezamjenjiv za definiranje nebeskog referentnog okvira, koji se zasniva na položajima ekstremno udaljenih izvora zračenja u svemiru - kvazarima. Ova mjerenja su osnova za periodično kalibriranje GPS referentnih satova. Opažanje kvazara tj. VLBI tehnika i primjena Einsteinove teorije općeg relativiteta igra glavnu ulogu u preciznoj navigaciji (uključujući navigaciju svemirskih letjelica), geodeziji i mjerenju vremena²¹.

Šta je to geodetska VLBI metoda? Ukratko, metoda za koju je neophodno imati par radio antena velikog radijusa (Slika 1-19) koje simultano opažaju signal s istog udaljenog radio izvora - kvazara (Slika 1-20). U srcu modernih VLBI antena nalazi se atomski sat vrijedan oko 300 000 \$, koji je neophodan za mjerenje vremena s visokom tačnošću.

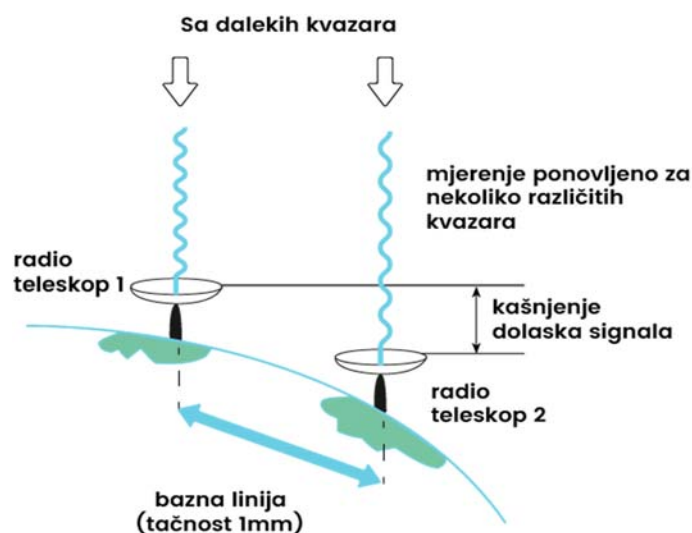
Ovo omogućuje da su VLBI antene/radio teleskopi raspoređeni širom planete i na velikom rastojanju (od 400 do 12 000 km), a da su međusobno povezane (Slika 1-21). Radio teleskopi na vrlo dugim bazama rade interferometrijska mjerenja. Ova se mjerenja mogu iskoristiti da se odredi dužina bazne linije između radio teleskopa s veoma visokom tačnošću. Ovo predstavlja važnu tehniku koja se koristi u svemirskoj geodeziji za ustanovljavanje globalnih referentnih okvira.

VLBI je geometrijska tehnika koja mjeri vremensku razliku između trenutaka prijema (između dva ili više radio teleskopa postavljenih na Zemljinoj površini) radio valova koje emitiraju udaljeni kvazari. Podaci koji se prikupe u anteni se kombiniraju s visokotačnim informacijama o vremenu, prikupljenim pomoću atomskog sata, tkz. hidrogenskog maserskog sata. Uspoređujući podatke koji su prikupljeni pomoću para antena, može se odrediti relativni položaj antena na velikom rastojanju s tačnošću od nekoliko milimetara.

²¹VLBI tehnika igra važnu ulogu u refiniranju hidrogenskih maserskih satova, što je danas važno za održavanje standarda frekvencija u aplikacijama koje zahtijevaju visoku preciznost ($1:10^{-15}$) kroz period od ~1000 sekundi.



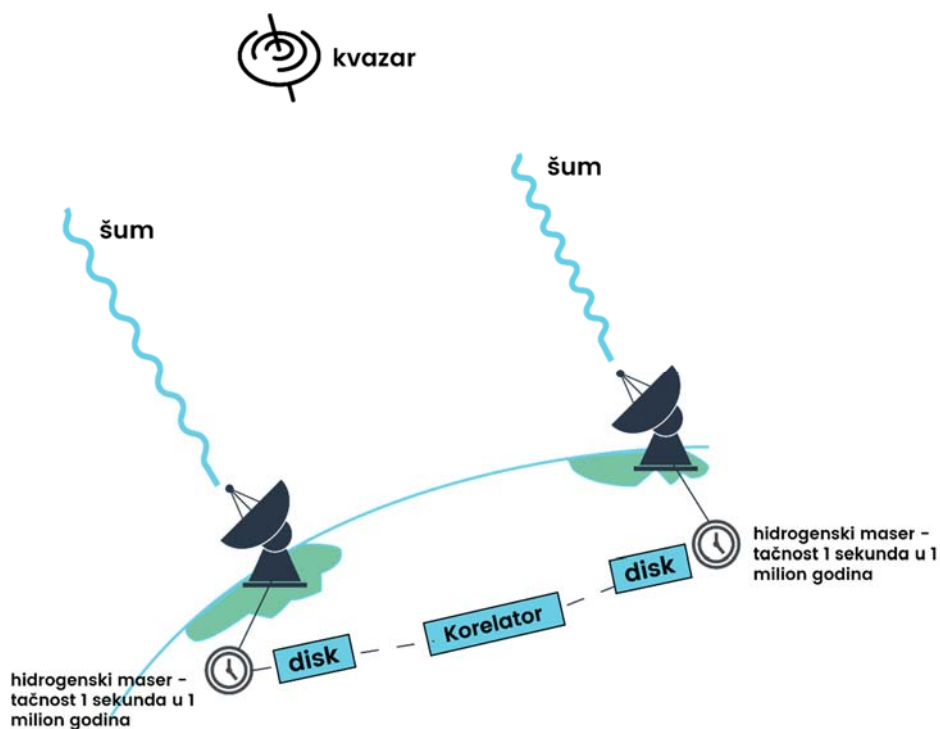
Slika 1-19: VLBI antena promjera 32 m, kolocirana s GNSS na EPN stanici Noto u Italiji, (EPN, 2017 b) lijevo. Desno je Tsukuba VLBI antena radijusa 32 metra, u Japanu. (GSI, 2017)



Slika 1-20: Princip rada VLBI za geodetske primjene: mjeri se razlika u vremenu dolaska radio signala sa udaljenih kvazara.

“Konstelacija” kvazara osigurava prirodni fundamentalni referentni okvir u kojem naša dinamična Zemlja rotira. Kvazari su kvazi-zvezdani objekti najudaljeniji u svemiru, i zato su prividno nepomični na nebu, a ujedno su najjači radio izvori u svemiru. Ovo ih čini pogodnim objektima za definiranje visokotačnog međunarodnog nebeskog referentnog okvira - ICRF (International Celestial Reference Frame). ICRF definira trenutnu orijentaciju Zemlje i daje osnovu za navigaciju svemirskih letjelica.

Dakle, VLBI je važna tehnika koja se koristi za realizaciju međunarodnog terestričkog referentnog okvira – ITRF, te ima učešće u određivanju globalnog referentnog okvira na kojem se zasnivaju moderni državni geodetski datumi. ITRF je geometrijski povezan s nebeskim ICRF preko vremenskih serija Zemljinih orijentacijskih parametara, koji se, kao što je ranije navedeno, primarno određuju VLBI tehnikom. Znači VLBI povezuje nebeski, ICRF s terestričkim, ITRF referentnim okvirom. Danas se samo dvije tehnike koriste za određivanje Zemljinih dimenzija kao parametara, na osnovu kojih se određuje mjerilo, a to su: VLBI i SLR.



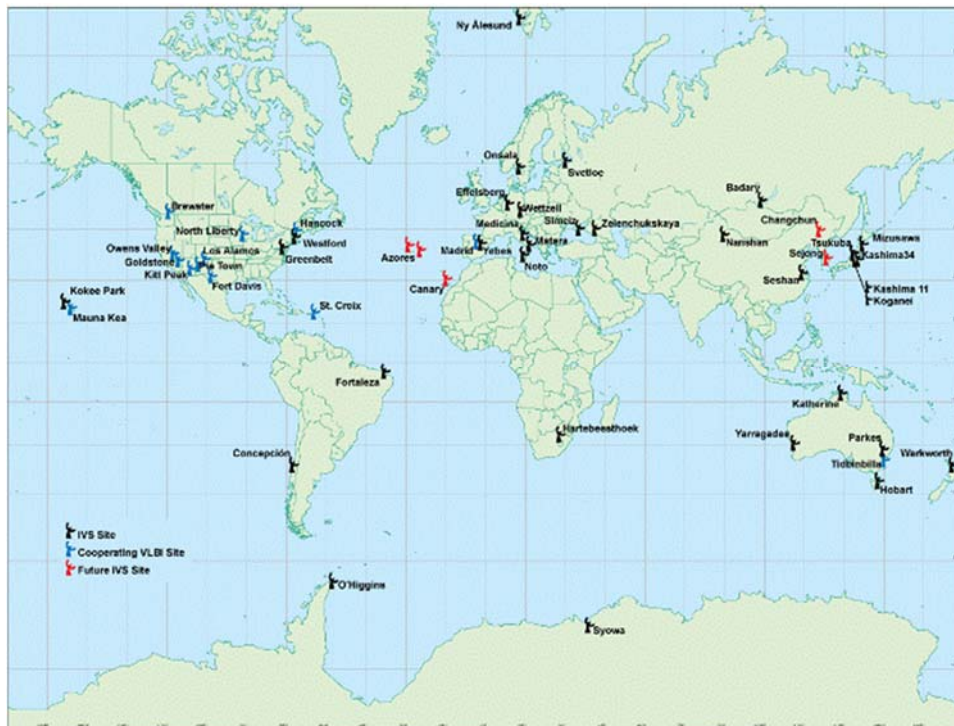
Slika 1-21: VLBI stanice su postavljene na velikoj udaljenosti. Opremljene su velikim radio antenama, prijemnicima radio signala, te visokotačnim satovima. Satovi na udaljenim stanicama su međusobno sinhronizirani. Podaci opažanja registriraju se na diskove i šalju u korelator gdje se obrađuju.

Određivanje tačnog globalnog referentnog okvira zahtijeva mjerenja izvedena različitim svemirskim/satelitskim tehnikama. Osim VLBI koriste se:

1. SLR, kao veoma važna mjerenja kao pomoć za tačno određivanje Zemljinog geocentra.

2. GNSS mjerenja su važna, kao relativno jeftina. Služe kao geodetska mreža kojom se proglašuje VLBI i SLR kostur. Koristi se za određivanje pomjeranja ploča i istraživanja deformacija Zemljine kore.
3. DORIS mjerenja su dopuna GNSS mjerenjima.

Sve ove tehnike se kombiniraju pri određivanju globalnog referentnog okvira, Zemljinih parametara rotacije i orijentacije u svemiru. GNSS tehnika je kao jeftina pogodna za monitoring u relativno gustom rasporedu stanica opažanja pomjeranja Zemljine kore/površine. Veoma je važno da se različite tehnike kolociraju, tj. postavljaju se instrumenti na bliskim stanicama na istoj lokaciji (u krugu iste opservatorije), te se rješenja položaja, dobivena pomoću različitih tehnika, mogu kombinirati za dobivanje najboljeg globalnog modela. Postoji nekoliko stotina stanica opremljenih različitim sensorima, koji učestvuju u određivanju globalnog referentnog okvira, dok samo oko 70 stanica ima kolocirane senzore, 25 stanica ima 3 kolocirana senzora i 6 stanica sa 4 kolocirana senzora. Slika 1-22 pokazuje raspored VLBI opservatorija.



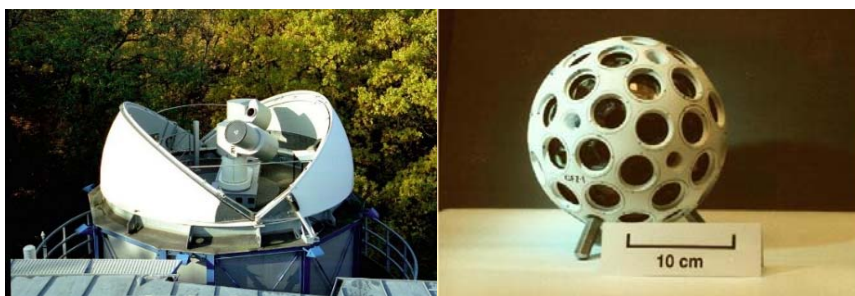
Slika 1-22: Mreža IVLBI servisa (IVS, 2013)

1.8.4.2 Lasersko mjerenje dužina do satelita

Tehnika laserskog mjerenja dužina do satelita, ili SLR tehnika ima mogućnost da mjeri temporalne varijacije rasporeda Zemljinih masa (što se reflektira u temporalnim varijacijama Zemljinog gravitacijskog polja). SLR je najtačnija metoda za određivanje geocentričnog položaja Zemljinih satelita.

To je tehnika koja može pratiti ponašanje u mreži SLR stanica²² na Zemlji u odnosu na geocentar. Može da prati vertikalno pomjeranje u apsolutnom referentnom sistemu. SLR je jedinstvena metoda za modeliranje i procjenjivanje dugoperiodičnih klimatskih promjena. Ova metoda daje jedinstvenu kalibraciju za eksperimentalnu verifikaciju specijalne predikcije teorije općeg relativiteta.

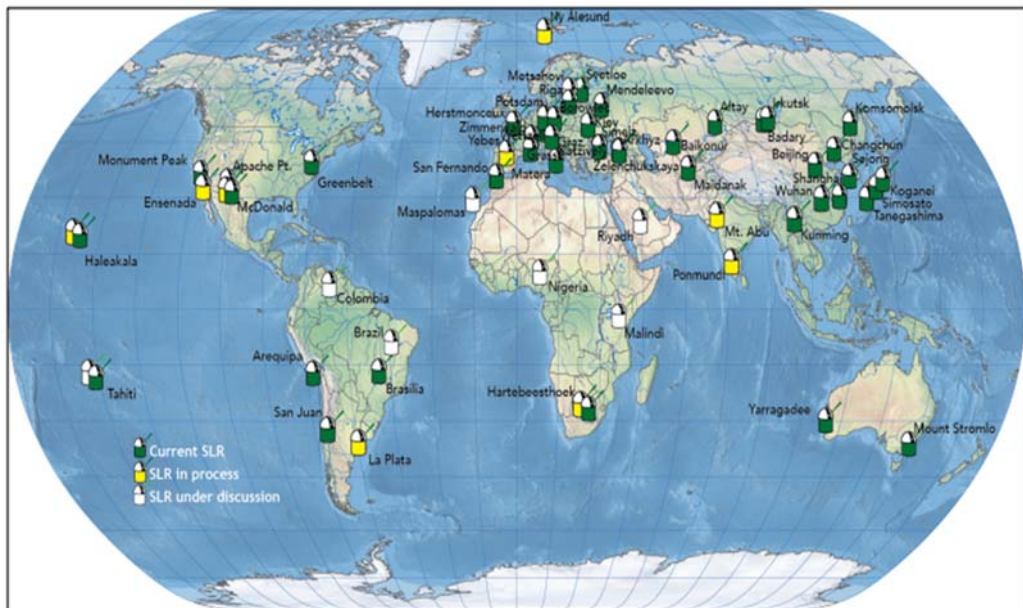
Slika 1-23 pokazuje uređaj za lasersko mjerenje dužina do satelita u njemačkom geoistraživačkom centru GFZ (Geo Forschungs Zentrum) u Potsdamu, kao i mini sferni satelit koji je razvijen u GFZ za SLR opažanje. Satelit je nazvan GFZ-1, promjera je 21,5 cm, a sadržavao je 60 retroreflektirajućih prizmi. Satelit je bio težak 20,63 kg, orbitirao je na visini oko 400 km. Satelit su opažale 33 SLR opservatorije širom svijeta, a uspješno je završio misiju 1999. godine, nakon četiri godine i 64 dana u svemiru, te nakon 5 402 završene orbite.



Slika 1-23: Tehnika laserskog mjerenja dužina do satelita: opservatorija na Zemlji (GFZ, 2015 a) i sferni satelit GFZ-1 (GFZ, 2015 b)

²² Prema (IERS, 2009, str. 43) u 2007. godini je bilo ukupno ~30 satelita (uključujući Mjesec) koji su se opažali laserskim mjerenjem dužina. Međutim, u skladu s IAG rezolucijom usvojenom na IUGG 2007 simpoziju u Perugi, svi novolansirani GPS (odnosno GNSS) sateliti trebaju imati ugrađene reflektorske prizme za lasersko mjerenje dužina. Znači da je aktualni broj satelita koji se mogu opažati SLR tehnikom veći od navedenog broja.

Slika 1-24 pokazuje globalni raspored SLR opservatorija, koje su često kolocirane sa instrumentima za druge svemirske tehnike.



Slika 1-24: Međunarodna SLR mreža opservatorija, status maj 2017.
(izvor: Pavlis i dr. 2017)

1.8.4.3 Lasersko mjerenje dužina do Mjeseca

Geodetska svemirska tehnika laserskog mjerenja dužina do Mjeseca ili LLR (Lunar Laser Ranging) je tehnika mjerenja koja se koristi od vremena²³ kad je posada svemirske letjelice s ljudskom posadom, Apollo 11, postavila prvi niz reflektorskih prizmi na Mjesec (Slika 1-25). Znači, ova se metoda koristi već skoro pola stoljeća. Ova svemirska tehnika ima veliki potencijal za buduće

²³ Svemirska letjelica Apollo 11 spustila se na površinu Mjeseca, 20. jula 1969. godine. Sljedećeg dana su astronauti izašli iz malog modula, pod nazivom Eagle (orao), u historijski zabilježenom herojskom poduhvatu. TV je prenosio prve ljudske korake na drugom nebeskom tijelu. Posada je imala nekoliko historijski važnih znanstvenih zadataka, od kojih je jedan bio postavljanje reflektirajućih prizama, koje služe za mjerenje dužina do površine Mjeseca.

razumijevanje dinamike sistema Zemlja - Mjesec. Primjenjuje se za određivanje Zemljinih orijentacijskih parametara, ili pak, sekularnog povećanja udaljenosti između naše planete i njenog jedinog prirodnog satelita, koje iznosi oko 3,8 cm/godini, (Muler i Biskupek, 2006, str. 55).

LLR metoda ima potencijal da odredi relativističke veličine, kao što su princip ekvivalencije ili pak bilo koje druge vremenske varijacije gravitacijske konstante. Nedostatak ove metode je mali broj niza reflektorskih prizmi, njihova loša ukupna distribucija na površini Mjeseca, te mali broj zemaljskih opservatorija koje izvode mjerenja udaljenosti do Mjeseca.

Prema (IERS, 2009, str. 41), broj ILRS stanica koje imaju mogućnost laserskog mjerenja dužina do Mjeseca je sedam, ali su čak njih šest raspoređene na sjevernoj hemisferi (tri u Evropi, dvije u SAD i jedna na Havajima) a samo jedna na južnoj hemisferi, u Australiji.

Tačnost određivanja udaljenosti metodom LLR opažanja, zahvaljujući poboljšanjima u tehnici opažanja, kao i u metodama obrade podataka, iznosi oko 2 cm. Najvažnija primjena LLR tehnike za geodeziju je u postupcima za određivanje Zemljinih orijentacijskih parametara: nutacija, precesija, pomjeranje polova i UT1, a posebno istraživanju dugoperiodičnih vremenskih varijacija ovih parametara.

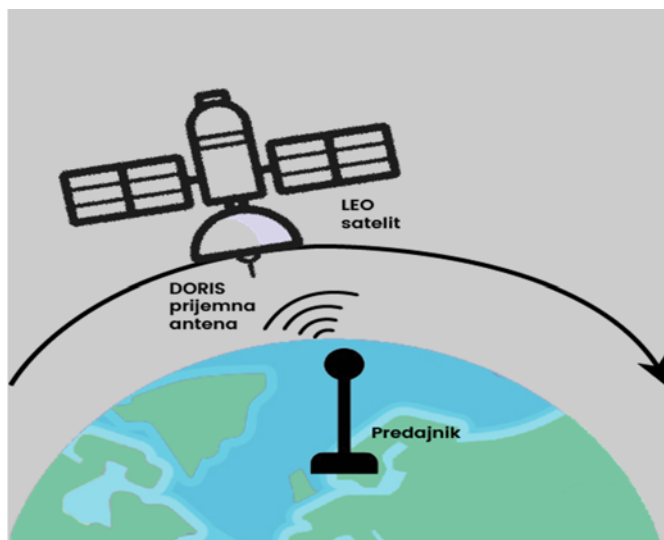


Slika 1-25: Tehnika laserskog mjerenja dužina do Mjeseca: Goddard opservatorija postavljena je na površini Zemlje (GGAO, 2017 a) a reflektore na površini Mjeseca postavile su Apollo misije 11, 12 i 14, (GGAO, 2017 b)

1.8.4.4 DORIS tehnika

DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) je dvofrekventni sistem koji radi na principu Dopplerovog efekta, Slika 1-26. Sistem

je započet kao eksperiment. Danas su DORIS prijemnici signala postavljeni u brojne LEO satelite, najčešće u satelite altimetrijskih misija.



Slika 1-26: Princip rada DORIS sistema: signal se emitira sa Zemlje, a prijemnici signala su postavljeni na LEO satelitima.

Antena prijemnika signala (Slika 1-27, lijevo) prima elektromagnetne radio signale, koji se emitiraju sa predajnika postavljenih na Zemljinoj površini, uglavnom na obalama svjetskih okeana, kao što pokazuje Slika 1-27, u sredini. Međutim, zadnjih godina se zbog popravljavanja geometrije DORIS mreže, predajnici postavljaju i na kopnu, tako da je jedan predajnik postavljen u blizini najvećeg sibirskog grada Krasnojarska, (Slika 1-28).

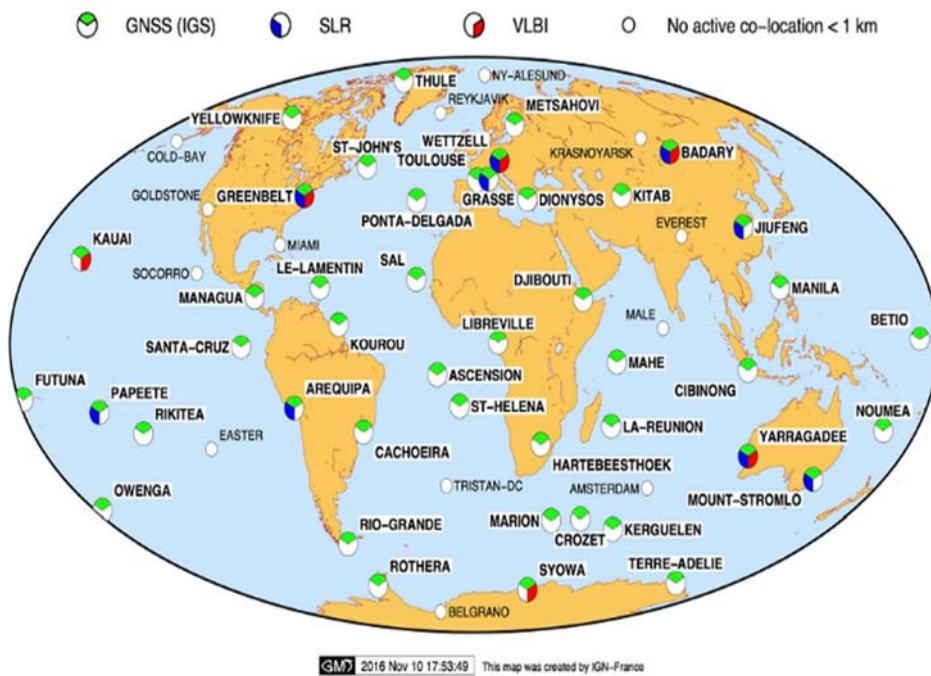


Slika 1-27: Antena DORIS sistema, duga 42 cm, koja se postavlja na LEO satelite, slika lijevo. (DORIS, 2017); Antena prima signale koji emitiraju predajnici na Zemlji, slika u sredini, (eoP, 2017 b); Rezultat opažanja DORIS tehnikom, između ostalog, može biti praćenje pomjeranja pola (slika desno). (Alitimetry, 2017 a)

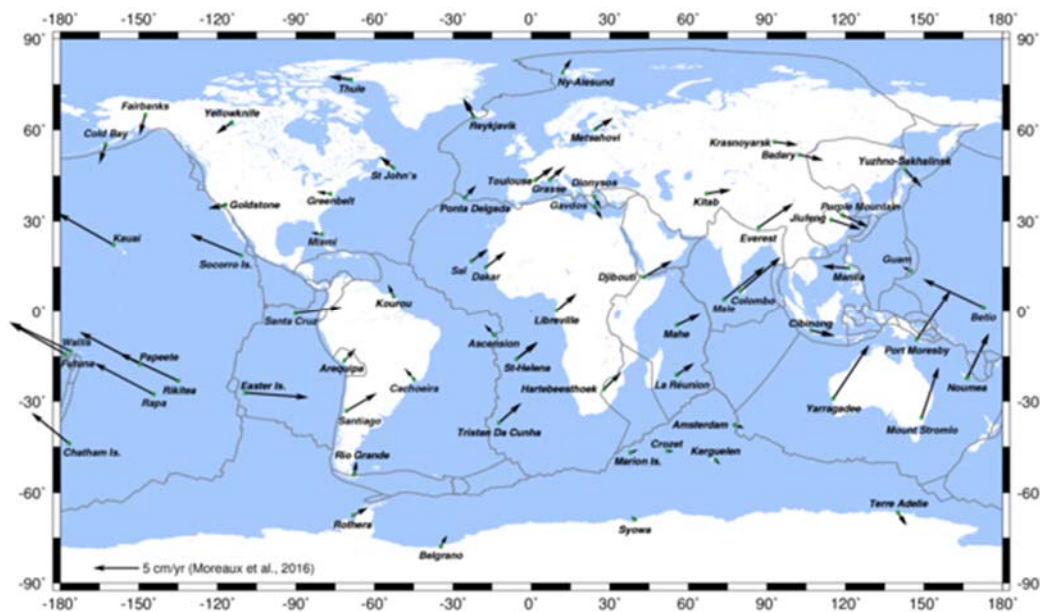
Rezultati pokazuju da se ovaj sistem može primjenjivati za određivanje pomjeranja polova (Slika 1-27, desno), kao i za praćenje pomjeranja tektonskih ploča, kao što ilustrira Slika 1-29. Sateliti, koji danas na sebi nose DORIS prijemnike su TOPEX/Poseidon, Jason-1, Envisat, SPOT-2, -4, -5, dok su predajnici postavljeni kao što je već izloženo, na površini Zemlje.

DORIS sistem ima permanentnu mrežu za praćenje, koju čini 51 „svjetionik“, koji su raspoređeni po cijelom svijetu. Mrežu koriste sve misije koje su na sebi nosile ili nose DORIS prijemnike.

Instalacija i održavanje ove terestričke mreže je u nadležnosti IAG, iako je DORIS u početku bio francuski sistem. Zbog značajno popravljene tačnosti u zadnjem desetljeću, uvršten je u oficijelne IAG servise, a predajnici, postavljeni uglavnom na obalama mora, kolocirani su s mareografima (Slika 1-28).



Slika 1-28: Raspored DORIS predajnika kolociranih s drugim tehnikama (IDS, 2016)



Slika 1-29: Horizontalni pomaci DORIS stanica, što reflektira pomjeranje tektonskih ploča (Plate tectonics by DORIS, 2017)

1.8.4.5 Globalni navigacijski satelitski sistemi

Globalni navigacijski satelitski sistemi – GNSS, je zajednički naziv za satelitske navigacijske sisteme, koji omogućavaju autonomno globalno geoprostorno pozicioniranje. Do sada²⁴ su u potpunosti razvijeni američki Globalni pozicionirajući sistem – GPS i ruski Globalni navigacijski satelitski sistem (Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema) – GLONASS. Evropski sistem Galileo i kineski BeiDou najavljuju završetak razvoja sistema i potpunu operabilnost do 2020. godine.

Osim globalnih postoje i različiti regionalni navigacijski sistemi kao što su indijski regionalni navigacijski satelitski sistem IRNSS i japanski QZSS (Quazi-zenith satellite system). Korisnici danas imaju na raspolaganju GNSS signale sa oko 80 satelita, dok se očekuje da će poslije 2020. godine broj navigacijskih satelita porasti na oko 120 do 150. Ako se tome doda činjenica da u procesu modernizacije GNSS sistema, novi sateliti emitiraju signal na tri frekvencije, to je značajan porast

²⁴ Godina 2017.

broja signala za opažanje, (a broj civilnih kodova je također povećan) čime se povećava tačnost, brzina i pouzdanost određivanja položaja opažanih prijemnika.

Najstariji i najpoznatiji, GPS sistem, razvijen je za vojne ciljeve, kao i svi ostali, izuzev Galileo sistema. GPS je od svojih početaka, u ranim 80-tim godinama prošlog stoljeća, (kasnije je postao dostupan za upotrebu u civilnom društvu), napravio revolucionarne promjene u skoro svim aplikacijama koje zahtijevaju pozicioniranje visoke tačnosti, navigaciju ili mjerenje vremena. Među prvim civilnim korisnicima bili su ustvari geodeti, koji su počeli koristiti GPS za sljedeće zadatke:

- Opažanje geodetskih kontrolnih mreža prvog reda, koje služe kao osnova za izradu državnih karata kao i za proglašavanje mreže nižim redovima.
- Ustanovljavanje globalnih geodetskih mreža koje su imale cilj da definiraju međunarodni referentni okvir, kao i monitoring pomjeranja Zemljine kore, u odnosu na taj referentni okvir.

Danas, globalni navigacijski satelitski sistemi, nastavljaju biti temeljna tehnologija za ove geodetske aplikacije. Međutim, kao rezultat progresivnog poboljšanja proizvoda, GNSS tehnologija danas ispunjava zahtjeve za pozicioniranjem visoke tačnosti, što se primjenjuje u inženjerskim geodetskim radovima kao što su katastar, planiranje okoliša, premjer za geoinformacione sisteme (GIS), te niz novih aplikacija, kao što su: precizno određivanje lokacije i upravljanje raznim mašinama (naročito u poljoprivredi i u područjima opasnim za ljudsko zdravlje, npr. pri havarijama nuklearnih postrojenja, ili u hemijskoj industriji), navođenje aviona, brodova, automobila, kao i upravljanje automobila, letjelica, podmornica bez posade, itd. Nadalje, GNSS se počeo upotrebljavati za aplikacije koje u osnovi ne rade pozicioniranje, kao što je npr. transfer vremena i monitoring atmosfere.

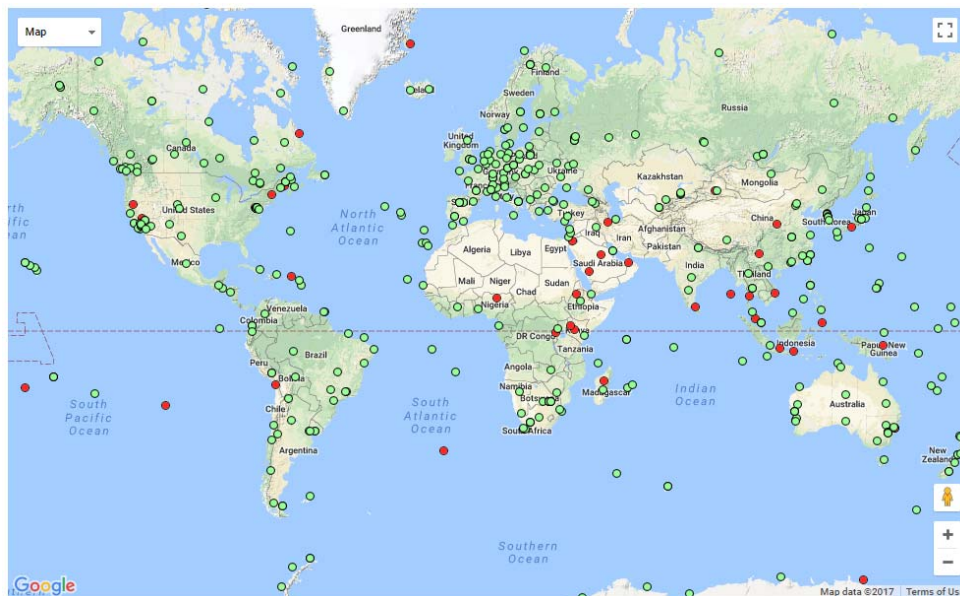
Geodetski premjer primjenom GNSS tehnologije obično koristi tehniku diferenciranja (relativno pozicioniranje), gdje se može postići centimetarski nivo tačnosti, ako se koriste prijemnici koji mjere fazu osnovnog nosećeg vala signala. Vjerojatno se može ustvrditi da su geodetske aplikacije bile prve koje su koristile prednosti postojanja više satelitskih konstelacija za navigaciju i pozicioniranje.

GNSS premjer koristi beneficije brojnih tehnoloških poboljšanja postignutih tokom zadnjih 20-tak godina, što omogućava pozicioniranje u realnom vremenu, s centimetarskom tačnošću, dok je prijemnik u pokretu, i to na rastojanju među prijemnicima od više desetina kilometara, a da pri tom geodeti ne moraju imati svoje vlastite operativne referentne stanice. Tehnika faznih mjerenja, koja postiže visoku tačnost pozicioniranja, razvila se u ranim 1980-tim godinama iz prvih

geodetskih mjerenja kontrolne mreže primjenom statičke metode, pa sve do današnje najefikasnije GNSS-RTK tehnike.

GNSS tehnika danas omogućava rutinsko pozicioniranje, ali i niz drugih proizvoda, koje nudi Međunarodni GNSS servis-IGS. IGS proizvodi, koji za osnovu imaju opažanja IGS mreže GNSS stanica (Slika 1-30) koji se objavljuju s različitom latentnošću, mogu biti sljedeći:

1. geocentrične koordinate i njihove brzine za više od 350 IGS stanica, sedmična rješenja u SINEX (software independent exchange format) formatu, s tačnošću 3 mm za horizontalni položaj i 6 mm za visine (za brzine: 1 mm/god odnosno 3 mm/god za visine),
2. podaci opažanja na IGS stanicama, u RINEX (receiver independent exchange) formatu,
3. precizne efemeride/orbite GNSS satelita, u SP3 formatu, tačnosti 1-2 cm za finalne orbite,
4. korekcije sata u GNSS satelitima i prijemnicima, CLK format,
5. parametri orijentacije/rotacije Zemlje, (polarno kretanje, njegove promjene i dužina dana),
6. parametri troposferskog zenitnog kašnjenja, TRP,
7. parametri jonosferskih TEC karata, IONEX., itd.

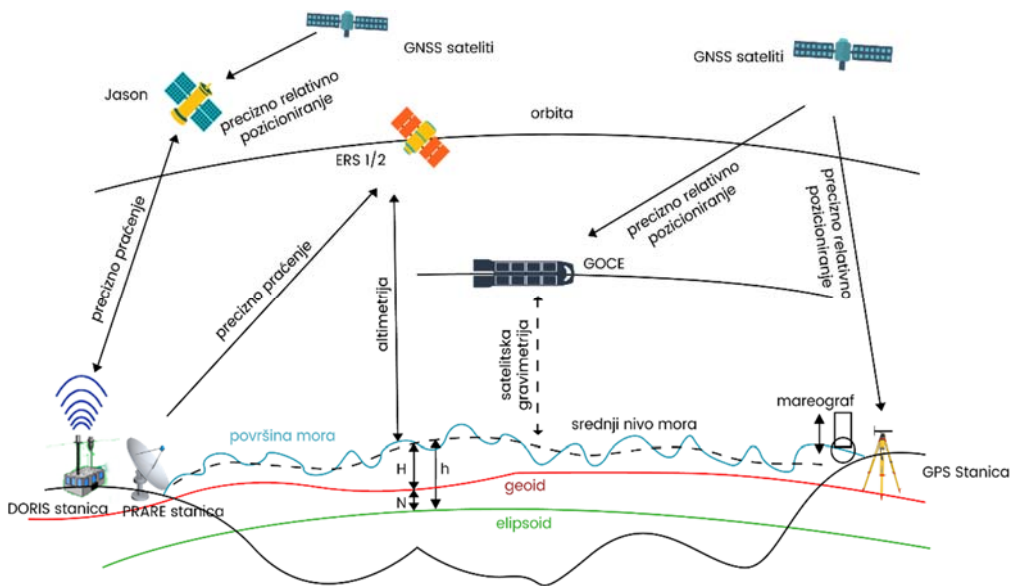


Slika 1-30: Raspored stanica IGS servisa (IGS, 2017)

1.8.4.6 Altimetrija

Altimetrija uopće, je mjerna tehnika koja mjeri visine objekata iznad Zemljine površine, uz pomoć različitih instrumenata - altimetara. Satelitska altimetrija mjeri visinu satelita. Visina se određuje na osnovu vremena koje je potrebno da radarski signal pređe put od satelitske antene do površine Zemlje (mora) i nazad do satelitskog prijemnika.

Kad se altimetrija kombinira s preciznim podacima o položaju satelita (koji se dobije pomoću prijemnika GNSS signala na LEO satelitu) dobiju se visine površine od koje se signal reflektirao: okeana, mora, jezera, rijeka, te ledenih i snježnih površina. Podaci prikupljeni tokom GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) satelitske misije u kombinaciji s altimetrijom popravili su tačnost određivanja nivoa svjetskog mora i globalnog geoida (Slika 1-31).



Slika 1-31: GOCE satelit u kombinaciji sa satelitskom altimetrijom za određivanje nivoa mora i globalnog geoida. (Modificirano prema: Belmino i dr., bez datuma).

Položaji satelita dobiju se pomoću GNSS prijemnika koji su postavljeni na satelit, ili pak SLR tehnikom, ako sateliti imaju ugrađenu reflektorsku prizmu. Upravo je altimetrija tehnika koja je napravila revolucionarni napredak u opažanju i istraživanju površine svjetskog okeana. Ovom tehnikom se ustanovilo izdizanje nivoa mora, te je altimetrija tehnika koja služi kao glavni alat za praćenje klimatskih promjena. Zadaci prvih satelitskih altimetrijskih misija su završeni,

(Slika 1-32). Aktivnosti se nastavljaju altimetrijskim satelitskim misijama nove generacije, koji na LEO satelitima imaju postavljene preciznije instrumente.



Slika 1-32: Altimetrijske misije koje su završile rad (Altimetry, 2017 b)

1.9 OSVRT NA POGLAVLJE

Sve ranije navedeno u poglavlju, imalo je za cilj predočiti kompleksnost Sistema Zemlja, čiju površinu treba vizualizirati ili istraživati na bilo koji način. Za vizualno predstavljanje ili kartografisanje njenih površina, kao i svih drugih geodetskih zadataka iz oblasti premjera teritorija, bilo kojom od metoda, (kao što su: klasične terestričke geodetske mjerne metode, fotogrametrija, GNSS pozicioniranje, daljinska istraživanja, lasersko skeniranje, uključujući LIDAR (Light Detection and Ranging), te uz pomoć alatki za geoinformacijske sisteme-GIS, kao i bilo koja od savremenih metoda zasnovana na integraciji nekih od nabrojanih ili izostavljenih), treba u prvom redu pristupiti kompleksnom zadatku definiranja geodetskog referentnog sistema, koji odgovara potrebama geodezije, geofizike i drugih geoznanosti, navigacije te svih inženjerskih zadataka.

S nadom da je prvo poglavlje dalo fundament za razumijevanje problema geodezije, njenih zadataka u 21. stoljeću, te tehnika kojima se ti zadaci ostvaruju, sljedeće poglavlje razmatra još jedan važan geodetski problem, a to je aproksimacija kompleksnog **oblika** Zemljinog tijela, relativno jednostavnim geometrijskim tijelom, na kojem je moguće praktično izvoditi zadatak obrade geodetskih mjerenja i opažanja.

Glava 2

2 OBLIK ZEMLJE

Sistem Zemlja ima veoma kompleksan i geometrijski nepravilan oblik, a njegove dimenzije u prošlosti nije bilo jednostavno, brzo i precizno odrediti, kao što je već razmatrano u prethodnom poglavlju. Savremenim geodetskim mjernim metodama, zasnovanim na svemirskoj, odnosno satelitskoj tehnologiji, ustanovljeno je tokom proteklih decenija da se oblik i dimenzije Zemlje stalno mijenjaju. Nadalje, ustanovljeno je da te promjene nisu uniformne. Dakle, promjene oblika, dimenzija i polje sile teže planete variraju prostorno i vremenski.

Tokom proteklih nekoliko stoljeća, otkako su u Evropi geodetski premjer državnog teritorija radi na matematički (i fizikalno) zasnovanim geodetskim metodama, geodeti su bili svjesni da, obradu podataka opažanja i mjerenja nije moguće provoditi bez pojednostavljenja kompleksnog oblika fizičke površine Zemlje. Zato se mora pristupiti različitim aproksimacijama oblika planete. Najjednostavnija aproksimacija oblika planete je sfera, čiji poluprečnik bolje ili lošije aproksimira dimenzije planete. Koordinate koje se primjenjuju u ovom slučaju, nazivaju se sferne koordinate, a uglavnom se u terestričkim referentnim sistemima primjenjuju u geografiji, ali i u astronomiji/geodeziji kad se računa na nebeskoj sferi. Ovo zadnje će se detaljnije razmatrati u poglavlju 3.

2.1 APROKSIMACIJA ZEMLJE SFEROM

Prema dostupnim pisanim dokumentima, u antičko doba su znanstvenici (filozofi) zaključili da oblik Zemlje mora biti sferičan. Tako u razmatranjima Aristotela (384-322 p.n.e., Slika 2-1) piše:

“... Iz ovog slijedi da oblik Zemlje mora biti sfera, a također i da je njena veličina mala u odnosu na udaljenosti od drugih nebeskih tijela.”



Slika 2-1: Aristotel (384-322. p.n.e.), isječak. (Wikimedia, 2017)

Međutim, prva stvarna numerička određivanja veličine i potvrđivanja sfernog oblika Zemlje, u skladu s Aristotelovom tvrdnjom, pripisuju se grčkom znanstveniku, upravitelju čuvene aleksandrijske biblioteke, Eratostenu (grč. Ἐρατοσθένης, Eratosthénēs, 276-195 p.n.e.). On je uočio da se u posebnom dijelu godine, kad se Sunce nalazi direktno iznad glave (tj. u zenitu), u mjestu Siena²⁵ istovremeno, u sjevernijoj Aleksandriji pravi sjenu, i prema njegovim mjerjenjima iznosi $7^{\circ} 12''$ (Jekeli, 2012 str. 1-6).

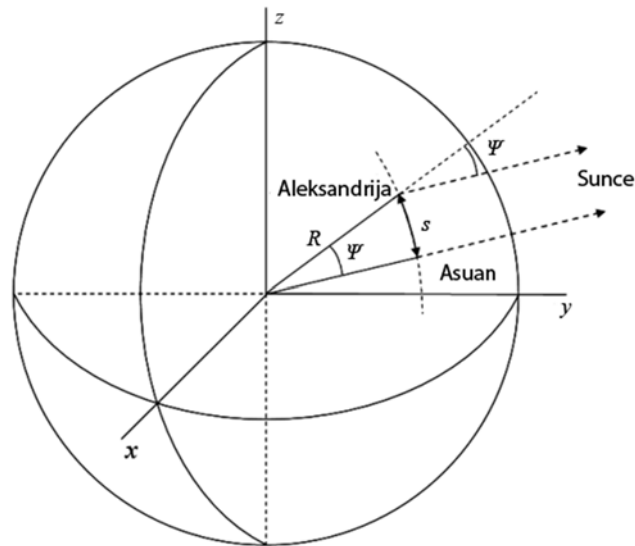
Eratosten je potom organizirao i proveo čuvena gradusna mjerenja, te izmjerio dužinu između ova dva staroegipatska grada, (Slika 2-2). O metodama i instrumentima koje je koristio stavovi znanstvenika nisu usaglašeni i reflektiraju njihovo osobno poimanje nivoa razvijenosti tehnologije tog vremena²⁶. Primjenjujući jednostavnu geometriju kao što pokazuje jednačina (2.1), (Jekeli, 2012 str.1-7)

$$R = \frac{s}{\psi} \quad (2.1)$$

²⁵ Siena, današnji Asuan

²⁶ Dok jedni misle da je Eratosten dužinu mjerio brojem koraka kamile koja putuje u karavanu (uz „kalibriranu“ dužinu potkoljenice), drugi misle da su dužinu mjerili brojem obrtaja točka (preteča odometra), ali samo mali broj ih vjeruje da je Eratosten poznavao geodetske principe računanja dužine iz lanca trouglova ili poligonometrije, itd. Ljudi zaboravljaju da živimo u doba fantastičnih dostignuća i istražujemo svemir ali još nismo neoborivo dokazali kako su u drevnom Egiptu gradili piramide i druge kolosalne objekte vrijedne divljenja.

izračunao je da radijus Zemlje iznosi: $R = 6267 \text{ km}$, što se razlikuje od aktualne srednje vrijedosti Zemljinog radijusa za 104 km, odnosno za 1,6 %. Dugo su znanstvenici smatrali da je tako dobro podudaranje sretna okolnost, jer su se pri obradi mjerenja morale napraviti različite aproksimacije. Međutim, nova istraživanja indiciraju da dobro podudaranje nije slučajnost, nego je rezultat dobro osmišljene metodologije mjerenja i računanja! Eratosthenes se često zove ocem geodezije.



Slika 2-2: Eratostenova gradusna mjerenja. (prema: Jekeli, 2012 str. 1-7)

2.2 APROKSIMACIJA ZEMLJE ELIPSOIDOM

Zemlja jeste skoro sfernog oblika, ali ima malo ispupčenje oko ekvatora, što radijus na ekvatoru čini za oko 0.33% ili za oko 21 km većim od radijusa na polovima. Zbog te blage spljoštenosti planete na polovima, pogodno je za aproksimaciju oblika usvojiti dvoosni elipsoid, trodimenzionalno tijelo koje nastaje rotacijom elipse oko svoje kraće osi. Također se može reći da je elipsoid matematički (geometrijski) definirana površ, koja se dobije rotacijom elipse čije su poluosi dimenzija a i b . Kraća os b elipsoida približno koincidira s rotacijskom osi Zemlje.

Rezultirajući elipsoid se često u geodeziji naziva *rotacijski elipsoid*. Bilo koji elipsoid, koji je usvojen za računanje geodetskih mreža neke regije ili cijele naše planete, (ali drugih planeta i nebeskih tijela u svemiru) naziva se referentnim, a po definiciji bi trebao da najbolje aproksimira oblik geoida naše planete Zemlje ili

nekog njenog regiona. Isti principi se primjenjuju za određivanje referentnog elipsoida za druga nebeska tijela. Danas postoje dobro definirani elipsoidi za Mjesec i Mars.

Engleski matematičar, astronom i fizičar, Sir Isaac Newton, (rođen 25. 12. 1642. a živio do 20. 03.1726. godine, Slika 2-3) je prvi u svom poznatom filozofskom djelu „Matematički principi prirodne filozofije“ naveo:“ rotirajuće fluidno tijelo koje ima svoje polje sile teže, u stanju ravnoteže ima oblik spljoštenog elipsoida revolucije. Takvo tijelo Newton je nazvao *spljoštenim sferoidom*.



Slika 2-3: Portret Sir Isaaca Newtona u poznim godinama života, naslikan 1727. god. (wiki, 2016)

Moderna spoznaja kazuje da bi se postigla bolja aproksimacija globalnog geoida Zemlje (i mnogih nebeskih tijela) usvajanjem troosnog elipsoida, ali bi računanja postala veoma kompleksna, čak i uz pomoć današnjih modernih kompjutera. Zbog jednostavnosti računanja, ali uz poštivanje sadašnjih zahtjeva tačnosti, dvoosni elipsoid zadovoljava, ako se parametri elipsoida definiraju i koriste s dovoljnim brojem decimalnih mjesta.

2.2.1 Rotacijski dvoosni elipsoid

Određivanje oblika i dimenzija elipsoida koji je pogodan za geodetski premjer na bilo kojem nivou, nije jednostavan zadatak. Za implementaciju takvih projekata potrebno je imati važne resurse: znanje, vrijeme i novac. Zavisno od raspoložive tehnologije, nivoa teorijskih spoznaja, **zahtijevane tačnosti**, raspoloživosti materijalnih i ljudskih resursa, kao i nivoa i kvaliteta njihovih stručnih/znanstvenih

kvalifikacija, potrebno je ozbiljno pristupiti planiranju kompleksnog projekta, organizirati i provesti brojna mjerenja te obraditi podatke. Kroz historiju su definirani različiti parametri oblika i dimenzija elipsoida, na osnovu gradusnih mjerenja²⁷ provedenih na različitim dijelovima planete, u različitim državama ili grupama država, na osnovu kojih se određivao oblik i dimenzije elipsoida koji aproksimira oblik i dimenzije Zemlje.

Geodeti u Evropi, u početku samo njemački i austrijski, pioniri evropske geodezije, predvođeni čuvenim Helmertom (Friedrich Robert Helmert, 1843–1917.), ustanovili su 1862. godine međunarodnu radnu grupu, što predstavlja preteču današnje dobro strukturirane Internacionalne asocijacije za geodeziju – IAG, prije više od 150 godina (Torge, 2005).

Cilj udruživanja bio je organizirati i provesti gradusna mjerenja, a radi određivanja oblika i dimenzija geometrijskog tijela, koje bolje od sfere aproksimira planetu. Napravljena su precizna astro-geodetska mjerenja dužine meridijanskih lukova²⁸.

Kao rezultat obrade njihovih mjerenja u kombinaciji s ranije izvedenim gradusnim mjerenjima, usvojen je 1841. godine, poznati Besselov elipsoid, nazvan po njemačkom geodeti Friedrich Wilhelm Besselu, (koji je živio od 22.07.1784. do 17.03.1846. godine). Besselov elipsoid najbolje je aproksimirao teritorij Centralne Evrope i Zapadnog Balkana, uključujući teritorij Bosne i Hercegovine, prema tada raspoloživoj tehnologiji.

²⁷ Gradusna mjerenja, odnosno mjerenje dužine meridijanskog luka, između tačaka na kojima je određivana astronomska širina, a sve u cilju određivanja oblika Zemlje, provođena su od strane evropskih znanstvenika, u 18. i 19. stoljeću, ali na različitim dijelovima planete. Najpoznatija gradusna mjerenja provedena su na sljedećim lokacijama: Lapland (teritorij Finske, u periodu 1736-1737.), Peru (na teritoriju današnjeg Ekvadora, u periodu 1735-1744.), Indija, Francuska, Engleska, Hanover, Danska, Pruska, Rusija, Švedska. Vojno-geografski institut iz Beča je potom proveo mjerenja na teritoriji država koje su tada pripadale Austrougarskoj monarhiji, ali i na teritoriji tadašnje osmanske Turske. Detaljnije o historiji gradusnih mjerenja vidjeti (Torge i Muller, 2012 str. 9-13).

²⁸ Gradusna mjerenja koja su provedena u devetnaestom stoljeću u Centralnoj i Jugoistočnoj Evropi, organizirana su u cilju određivanja parametara Besselovog elipsoida. Konkretno, urađena su mjerenja uglova u triangulacijskoj mreži koja je imala oblik lanaca a prostirala se duž meridijana. Lanci su se protezali i preko teritorija Bosne i Hercegovine, koja je tada bila dio osmanske Turske. Austrijski oficiri su napravili mjerenja uz dozvolu (ferman) sarajevskog paše. Mjerenja su provedena i u drugim državama Zapadnog Balkana koje su u to doba pripadale osmanskoj Turskoj. (Kovacs i Timar, 2009).

Oblik i dimenzije Besselovog elipsoida određene su mjerenjem dužine meridijanskih lukova na različitim dijelovima planete, primjenom metode triangulacije, dok su se za orijentaciju koristile metode optičke astronomije.

Dakle, rotacijski elipsoid, kojeg su geodeti „zapadnog svijeta“ prije oko dva stoljeća²⁹ usvojili je, *dvoosni rotacijski elipsoid*, koji je trebao da služi kao „jednostavno“ geometrijsko tijelo, na kojem se treba raditi obrada geodetskih mjerenja, koja su napravljena na *fizičkoj površini Zemlje*. Elipsoid koji služi za računanja u oblasti (više) geodezije (kao i primjene u različitim drugim inženjerskim granama, kad se zahtijeva najviša tačnost geoprostornih podataka³⁰), nastaje rotacijom elipse oko svoje *manje osi*. Zbog vizualizacije se pretpostavlja da je ta os paralelna (ili se poklapa) sa obrtnom osi planete Zemlje. Tako nastaje površina koja je simetrična u odnosu na polarnu os i ekvator. Zbog ove simetrije elipsoid se često u teorijskom razmatranju predstavlja kao elipsa, tj. predstavlja se presjekom elipsoida s ravninom koja sadrži polarnu os.

2.2.1.1 Geometrija elipse

Za geometrijsko predstavljanje elipse neophodno je poznavati njene parametre. Tako se može reći da, za bilo koju tačku P na elipsi, postoji par *fokalnih tačaka*, za koje važi pravilo da je suma rastojanja ovih tačaka od tačke P konstantna. Ako se pretpostavi dvodimenzionalni koordinatni sistem (x, z) s ishodištem na presjeku međusobno okomitih linija $\overline{F_1F_2}$ i z osi, onda se presjek nalazi na polovini ove dvije linije, kao što pokazuje Slika 2-4.

Kad se tačka P nalazi na x osi, onda je naprijed spomenuta konstantna udaljenost jednaka dvostrukoj dužini od P do ishodišta. Ovo predstavlja dužinu velike poluosi elipse a , kao što pokazuje jednačina (2.2):

$$\overline{PF_1} + \overline{PF_2} = 2a \quad (2.2)$$

gdje je: b dužina male poluosi, E linerani ekscentricitet elipse i elipsoida.

²⁹ Preciznije, Besselov elipsoid je usvojen 176 godina prije pisanja teksta.

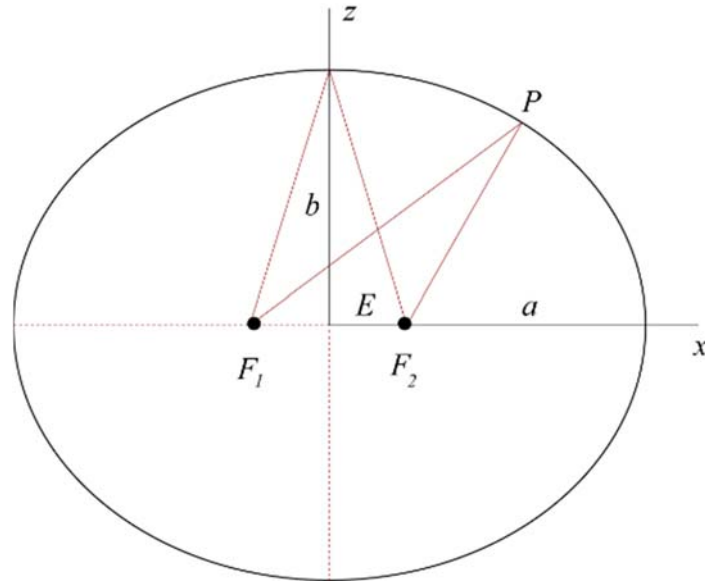
³⁰ Treba imati na umu da uz primjenu GNSS tehnike određivanja položaja tačaka u globalnom geocentričnom referentnom sistemu, referentni elipsoid nije neophodan, teorijski posmatrano, jer se položaji tačaka izražavaju Dekartovim koordinatama XYZ.

Jednačina elipse poznata je iz matematike, a izgleda kao jednačina (2.3):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (2.3)$$

Elipsa je definirana (kao i rotacijski elipsoid) s dva bitna parametra:

- parametrom koji definira oblik i
- parametrom koji definira dimenzije.



Slika 2-4: Presjek kroz elipsoid predstavljen meridijanskom elipsom koja se dobije kad se elipsoid presiječe ravninom postavljenoj kroz malu (polarnu) os.

(prema Jekeli, 2012, str. 2-2)

Velika poluos a se obično koristi za definiranje veličine elipse/elipsoida, dok se za parametar koji definira oblik može odabrati jedan od skupine različitih parametara. Jedan od tih je već spomenut, linearni ekscentricitet E . Najčešće korišteni parametar koji definira oblik elipse/elipsoida zove se *spljoštenost*. Spljoštenost se dobije korištenjem sljedeće jednačine:

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (2.4)$$

U ove parametre spadaju također prvi i drugi ekscentricitet, a računaju se prema jednačinama (2.5) i (2.6) respektivno.

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (2.5)$$

$$e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b} \quad (2.6)$$

Za dalja i detaljnija razmatranja geometrije elipse čitalac se upućuje na (Muminagić, 1981).

Tokom zadnja oko dva stoljeća, geodeti su odredili brojne dvoosne elipsoide koje su usvajali kao prikladne za aproksimaciju tijela Zemlje, u regionu ili državi u kojoj su djelovali, te su na njima računali tj. obrađivali podatke svojih mjerenja i opažanja (Slika 2-5).

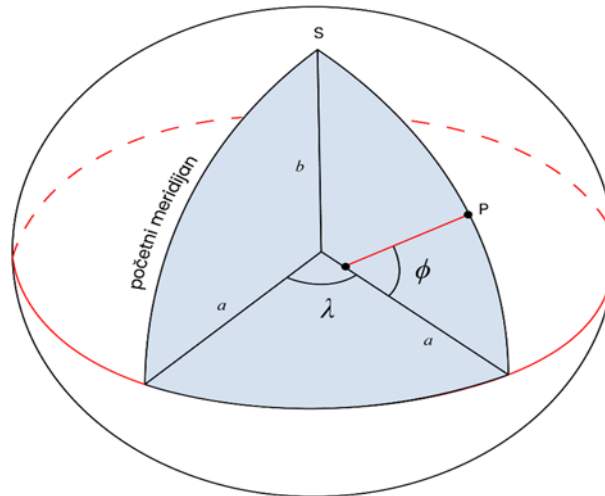
Regionalni dvoosni elipsoidi koji su određeni na osnovu samo terestričkih geodetskih mjerenja, imali su različitu tačnost, različite dimenzije i različito su bili smješteni u odnosu na tijelo Zemlje. Ovdje se navodi ograničen broj se različitih regionalnih elipsoida, uz navedenu godinu usvajanja za geodetski premjer: Airy, 1830, Everest, 1830, Bessel, 1841, Clark, 1866, 1880, Modificirani Clark, 1880, Internacionalni, 1924, Krassovski, 1940, itd. Dakle, tokom zadnja dva stoljeća u upotrebi su bili različiti elipsoidi kao referentna tijela za obradu mjerenja napravljenih na fizičkoj površini Zemlje.

Satelitska tehnologija omogućila je da se odrede dimenzije i oblik cijele planete, te su elipsoidi koji su određeni iz takvih mjerenja dobro aproksimirali cijelu Zemlju, preciznije rečeno, globalni geoid. Takvi elipsoidi nazivaju se još općim elipsoidima, dok se oni koji najbolje aproksimiraju pojedine države ili regije nazivaju relativnim elipsoidima, kao što je primjer Besselovog koji najbolje odgovara za područje Njemačke, Austrije i Balkana. U bivšim SSSR zemljama usvojen je elipsoid Krassovskog, u Velikoj Britaniji elipsoid Airy 1830, itd. Za više detalja vidjeti (Muminagić, 1981).

Dakle, najprikladniji lokalni elipsoidi određivani su iz terestričkih mjerenja, a najbolje odgovaraju lokalnim regionima, i bolje aproksimiraju oblik fizičke površine Zemlje u tim regijama nego globalni GRS80³¹, ali nisu pogodni i korisni za ostale dijelove svijeta.

³¹ Parametri elipsoida GRS80 određeni su iz mjerenja satelitskim navigacijskim sistemom Transit, koji je bio preteča GPS sistema.

Razni “najprikladniji lokalni elipsoidi” razlikuju se po veličini i obliku. Također se razlikuju u orijentaciji i međusobnim položajima, kao i po položaju u odnosu na tijelo Zemlje.



Slika 2-5: Dvoosni (a, b) elipsoid je usvojen kao najoptimalniji geometrijski oblik da služi kao referentni za računanja geodetskih mreža. Satelitski podaci su pokazali da troosni elipsoid (ekvator je u obliku elipse) bolje aproksimira stvarnom obliku globalnog geoida, ali bi računanja bila puno kompleksnija.

Lista različitih referentnih elipsoida i njihove geometrijske parametre pokazuje Tablica 2-1. Zadnja kolona pokazuje države u kojima se elipsoidi koriste ili su se u prošlosti koristili. Besselov elipsoid se koristio u različitim državama Evrope, uključujući države Zapadnog Balkana, ali zanimljivo, koristio se i u Japanu.

Neki od navedenih elipsoida nisu nikad bili u upotrebi. Primjer su elipsoidi IERS(1989) i IERS(2003). Njihovi parametri su određeni IERS konvencijama, ali se zbog kompliciranosti čestog mijenjanja referentnog elipsoida nisu nikad koristili u praksi. IERS servis za svoje potrebe³² još uvijek koristi elipsoid GRS-80, čiji su parametri određeni prije GPS ere, tj. određeni su na osnovu mjerenja Transit sistema. Razlike dužine velike i male poluosi (a, b) elipsoida IERS (2003) i GRS-80 iznose 0,6 m i 0,4141 m, respektivno. Parametar spljoštenosti razlikuje se za 0.000802101 (vidjeti IERS, 2003, poglavlje 1, str. 12).

³² Treba imati na umu da elipsoid nije neophodan za računanje koordinata stanica u satelitskoj eri. Elipsoid se koristi za konverziju koordinata iz Dekartovih (X, Y, Z) u elipsoidne (ϕ, λ, h) .

Tablica 2-1: Pregled različitih referentnih elipsoida koji su određivani i primjenjivani u svijetu.(izvor: NIMA TR8350.2; IERS, 2003, poglavlje 1, str.12)

Naziv referentnog elipsoida	Radijus ekvatora (m)	Radijus na polovima (m)	Inverzna vrijednost spljoštenosti $1/f$	Gdje se koristio/koristi
Maupertuis (1738)	6 397 300	6 363 806,283	191	Francuska
Plessis (1817)	6 376 523,0	6 355 862,9333	308,64	Francuska
Everest (1830)	6 377 299,365	6 356 098,359	300,80172554	Indija
Everest 1830 Modified (1967)	6 377 304,063	6 356 103,0390	300,8017	Zapad. Malezija i Singapur
Everest 1830 (1967 Definiranje)	6 377 298,556	6 356 097,550	300,8017	Bruneji i Zapadna Malezija
Airy (1830)	6 377 563,396	6 356 256,909	299,3249646	Britanija
Bessel (1841)	6 377 397,155	6 356 078,963	299,1528128	Evropa, Japan
Clarke (1866)	6 378 206,4	6 356 583,8	294,9786982	Sjeverna Amerika
Clarke (1878)	6 378 190	6 356 456	293,4659980	Sjeverna Amerika
Clarke (1880)	6 378 249,145	6 356 514,870	293,465	Francuska, Afrika
Helmert (1906)	6 378 200	6 356 818,17	298,3	*
Hayford (1910)	6 378 388	6 356 911,946	297	SAD
International (1924)	6 378 388	6 356 911,946	297	Evropa
Krassovsky (1940)	6 378 245	6 356 863,019	298,3	Bivši SSSR, Rusija, Rumunija
WGS66 (1966)	6 378 145	6 356 759,769	298,25	SAD/DoD
Australian National (1966)	6 378 160	6 356 774,719	298,25	Australija
New International (1967)	6 378 157,5	6 356 772,2	298,24961539	*
GRS-67 (1967)	6 378 160	6 356 774,516	298,247167427	*
South American (1969)	6 378 160	6 356 774,719	298,25	Južna Amerika
WGS-72 (1972)	6 378 135	6 356 750,52	298,26	SAD/DoD
GRS-80 (1979)	6 378 137	6 356 752,3141	298,257222101	Globalni ITRS
WGS-84 (1984)	6 378 137	6 356 752,3142	298,257223563	Globalni GPS
IERS (1989)	6 378 136	6 356 751,302	298,257	*
IERS (2003)	6 378 136,6	6 356 751,9	298,25642	*

2.2.2 Besselov elipsoid

Parametri Besselovog elipsoida, određeni primjenom trigonometrijskih mreža koje su obično imale oblik lanaca duž meridijanskih lukova, najbolje odgovara zakrivljenosti geoida u Evropi (uključujući Bosnu i Hercegovinu³³) i Euroaziju.

Zbog toga je to **bilo** optimalno rješenje za državni premjer u državama regiona, usprkos činjenici da su njegove osi kraće za oko 700 m od globalnih elipsoida, čiji su parametri oblika, dimenzija i orijentacije, izvedeni iz satelitskih opažanja. Polovinom prošlog stoljeća oko pola državnih triangulacijskih mreža bile su izračunate na Besselovom elipsoidu i oko 20% drugih neevropskih država (u Aziji i Africi).

Međutim, zbog činjenice da se danas geodetski premjer radi satelitskim metodama, kao optimalno rješenje je neophodno usvojiti referentni elipsoid koji je određen na osnovu satelitskih mjerenja. Zbog usporedbe i aktuelnosti Svjetskog geodetskog sistema WGS84, kao referentnog za GPS, navode se i parametri njemu pridruženog općeg/globalnog elipsoida GRS80.

Besselov elipsoid, određen 1841. godine definiran je samo pomoću geometrijskih parametara, i to njihovih logaritamskih vrijednosti³⁴, velike poluosi a i spljoštenosti f .

- $a = 6\,377\,397,155\text{ m}$
- $f = 1 / 299,1528153513233$ (0,003342 773154 ± 0,000005)
- $b = 6\,356\,078,963\text{ m}$.

³⁴ Treba imati na umu da obrada podataka nije bila automatizirana, nego su računanja rađena „ručno“ ili kako se ponekad kaže „pješke“, uz pomoć logaritmara i logaritamskih tablica, koje su služile kao „alat“ za olakšano računanje. Zamislite računanje bez kalkulatora s velikim brojevima i/ili velikim brojem decimalnih mjesta, u kompliciranim geodetskim formulama, gdje se primjenjuju obrasci sferne trigonometrije. Probajte da računate „pješke“, npr.: $(\sin^2 45^\circ \times \cos^2 45^\circ) \times 23\,567,266\text{ m}$. Ovo je samo vrlo pojednostavljen primjer. Pokušajte praktičnu vježbu bez upotrebe kalkulatora ili kompjutera, mobitela, pa ćete istinski poštovati stare geodete i naslijeđene geodetske podatke iz proteklih stoljeća.

Opći Zemljin elipsoid GRS80, pridružen je globalnom referentnom sistemu WGS84, (World Geodetic System) a njegovi geometrijski parametri su definirani direktno pomoću velike poluosi a i spljoštenosti f :

- $a = 6\,378\,137,0$ m
- $f = 1 / 298,257223563$
- $b = 6\,356\,752,30$ m.

Zbog globalne kompatibilnosti postoji težnja da se svi državni koordinatni sistemi temelje na GRS80. Zato se pojam lokalni - najprikladniji elipsoid, sada smatra staromodnom idejom, ali je ta ideja još uvijek važna, jer je mnogo takvih elipsoida „ugrađeno“ u stare državne koordinatne sisteme, koji su bili fundament za kartografiju i detaljni fotogrametrijski premjer, na osnovu kojeg se napravila katastarska registracija zemljišta. Premjer države je veoma skup, tako da se podaci starog premjera neće brzo ostaviti po strani. Osim toga, njihova historijska vrijednost je ogromna.

Budući da je GRS80 elipsoid modernog vremena, a globalno se primjenjuje za geodetska istraživanja i geodetski premjer, detaljno je opisan u narednom podpoglavlju.

2.2.3 Geodetski referentni sistem 1980

Internacionalna unija za geodeziju i geofiziku - IUGG je, na svom XVII Generalnom zasjedanju (XVII General Assembly of the IUGG), organiziranom u Kanberi, u decembru 1979. godine, Rezolucijom broj 7, usvojila novi globalni elipsoid GRS80 kao najbolji određen u tom trenutku, čime je zamijenjen do tada važeći (elipsoid) referentni sistem GRS67.

Na istom skupu je IAG tokom svog zasjedanja, prateći preporuku krovne organizacije IUGG, usvojila Rezoluciju broj 1, kojom je usvojila GRS80 elipsoid kao oficijelnu referencu za geodetske radove. Važno je istaći da GRS80 ima geometrijske, kao i pridružene fizikalne parametre, (Moritz, 2000). Geometrijski i fizikalni parametri se dalje razvrstavaju na definirajuće (direktne) i izvedene.

Definirajući direktni geometrijski parametri elipsoida GRS80 su: velika poluos i spljoštenost:

- $a = 6\,378\,137,0$ m
- $f = 1 / 298,257\,222\,100\,882\,711\,243$

Definirajući fizikalni parametri za GRS80 su:

- GM ili geocentrična gravitacijska konstanta, izračunata uz hipotezu da elipsoid ima masu čvrste Zemlje, (uniformno distribuiranu, tkz. „Normalnu masu”), okeana, mora, ali je uračunata i masa atmosfere.
- J_2 ili dinamički formirajući faktor koji je povezan sa spljoštenošću f
- ω srednja uglovna brzina rotacije elipsoida (Zemlje).

Njihove vrijednosti iznose:

$$GM = 398\,600,5 \text{ km}^3/\text{s}^2$$

$$J_2 = 108\,263 \times 10^{-8}$$

$$\omega = 7,292115 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$$

Izvedeni geometrijski parametri za GRS80 su (svi zaokruženi):

Spljoštenost: = 0,003 352 810 681 183 637 418;

Recipročna spljoštenost: = 298,257 222 100 882 711 243;

Mala poluos: = 6 356 752,314 140 347 m;

Odnos osi: $a/b = 0,996\,647\,189\,318\,816\,362$;

Srednji radijus (usvojen od IUGG): $R_1 = (2a+b)/3 = 6\,371\,008,7714$ m;

Srednji radijus sfere iste površine: = 6 371 007,1810 m;

Radijus sfere istog volumena: = 6 371 000,7900 m;

Linearni ekscentricitet: = 521 854,0097 m;

Ekscentricitet eliptičkog presjeka kroz polove: = 0,081 819 191 0435;

Radijus zakrivljenosti na polovima: = 6 399 593,6259 m;

Radijus zakrivljenosti meridijana na ekvatoru: = 6 335 439,3271 m;

Dužina meridijana od ekvatora do pola: = 10 001 965,7293 m;

GRS elipsoidu je pridruženo “normalno” polje sile teže i definirani su specifični fizikalni parametri, ali se oni ovdje ne razmatraju. Za više detalja vidjeti (Moritz, 2000)

2.2.3.1 Ishodište i orijentacija elipsoida GRS80

Geodetski referentni sistem (elipsoid) je geocentričan, tj. ishodište sistema je u centru mase Zemlje. Drugim riječima, centar elipsoida koincidira s geocentrom. Orijehtacija sistema je definirana na sljedeći način:

- Rotacijska os referentnog elipsoida ima pravac međunarodnog konvencijskog ishodišta za polarno kretanje (Conventional International Origin for the Polar Motion – CIO),
- Nulti meridijan definiran je prema Međunarodnoj službi za vrijeme (BIH - Bureau International de l'Heure).

Prema ovoj definiciji postoji skup odgovarajućih, međusobno okomitih koordinatnih osi XYZ, čije se ishodište nalazi u geocentru, a Z os je rotacijska os referentnog elipsoida, definirana položajem CIO, a X os prolazi kroz nulti (referentni) meridijan u skladu s BIH.

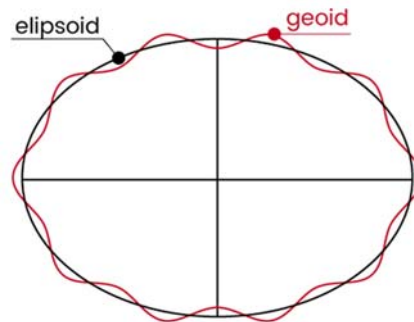
2.3 Osvrt na poglavlje

Geodezija kao znanost, na kojoj se zasnivaju kartografija, navigacija, itd., pomaže prvo da se odredi oblik i veličina pojednostavljenog “oblika Zemlje”, a zatim se ide na određivanje lokacija fundamentalnih stanica koje će poslužiti, na kraju dugog procesa, da se odrede npr. oblici na kartama te prikažu detalji: Zemljinih kopnenih površina, tektonskih ploča, linija obala okeana i mora, rasprostiranja planina, puteva i naselja, pa sve do kontrolnih tačaka korištenih za geodetska mjerenja, koje imaju svoje različite ciljeve.

Tačnost, oblik, tehnologija, cijena koštanja (uzimajući u obzir i utrošeno vrijeme) geodetskih mreža nije uvijek ista, i varira npr., za projekte izrade karata različitih regija, razmjera, i namjena. Dakle, eksperti geodetske profesije izabiru pogodan položaj fundamentalnih stanica ili kontrolnih tačaka. Njihov položaj mora zadovoljavati različite kriterije, koji se razlikuju za različite geodetske mjerne tehnike koje će se primjenjivati za mjerenje, ali je također važno da lokacije stanica budu na geološki stabilnim podlogama.

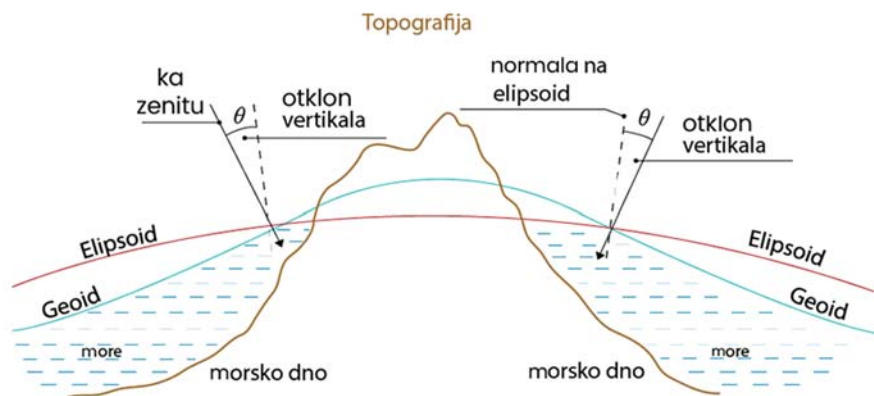
Čitalac bi trebao sebi postaviti osnovno pitanje geodezije: “**Koji je najbolji osnovni, pojednostavljeni oblik Zemlje**”? Kad se ustanovi odgovor na ovo pitanje, uz osiguranje zadovoljavajuće tačnosti pri rješavanju zadataka specifičnog projekta, odabrani oblik se može koristiti kao referentna površina, u odnosu na koju se mjeri npr. topografija.

Geodeti u principu, imaju dva vrlo korisna odgovora na naprijed postavljeno pitanje, a glase: *elipsoid* i *geoid*.



Slika 2-6: Odnos globalnog geoida i referentnog apsolutnog elipsoida.

Da bi se uistinu razumjeli koordinatni sistemi koji se primjenjuju u geodeziji, potrebno je razumjeti prvo ove koncepte koje ilustriraju Slika 2-6 i Slika 2-7.



Slika 2-7: Detalj odnosa geoida, referentnog elipsoida i topografske površine.

Dakle, geodetska opažanja se izvode na fizičkoj površini Zemlje, koja se često naziva topografskom površinom, jer se ta površina prikazuje na topografskim kartama. Topografska površina je geometrijski nepravilnog oblika, i nemoguće je geodetska mjerenja obrađivati na toj površini. Zato se za računanja usvaja neka aproksimacija tog oblika, najčešće referentni rotacijski elipsoid. Na taj elipsoid se svode (reduciraju) i dalje obrađuju geodetska mjerenja, te se u odnosu na njega računaju položaji geodetskih tačaka, koji se izražavaju koordinatama u nekom pogodno definiranom koordinatnom/referentnom sistemu. Detalje o koordinatama i koordinatnim sistemima razmatra sljedeće poglavlje.

Glava 3

3 KOORDINATE I KOORDINATNI SISTEMI

Koordinate su parametri kojima se izražava „položaj“ relevantne tačke u nekom odabranom koordinatnom sistemu. Koordinatama se uvijek pridružuju jedinice mjere, kao npr., metar, stepen, sekunda (za vrijeme), itd. Postoji velika skupina različitih tipova koordinata i koordinatnih sistema, koji se mogu različito sistematizirati, a potrebno je razumjeti porijeklo mnoštva naziva.

3.1 SISTEMATIZACIJA KOORDINATA

Čitalac se do sad susretao s raznovrsnim nazivima tipova koordinata. Ti nazivi mogli bi se nazvati atributima, jer opisuju *meta podatke* geoprostornih informacija, tj. koordinata. Prije detaljnih razmatranja geodetskih referentnih sistema i njihovih realizacija, dobro je razumjeti kako su koordinate i koordinatni sistemi dobili te atribute. Tako, koordinate se mogu razvrstati na različite načine:

Po obliku koordinatnih osi koje ih definiraju:

- 1) *krivolinijske koordinate*: izražavaju položaj tačke dužinama krivih linija na odabranoj referentnoj površi, tj. u odnosu na neko referentno tijelo:
 - a. sferne,
 - b. elipsoidne
 - c. cilindrične,
 - d. hiperbolične,
 - e. konusne,
 - f. bilo kojeg drugog odabranog geometrijski definiranog jednostavnog ili složenog oblika. Koriste se često u inženjerskoj geodeziji kod iskolčavanja ili monitoringa građevinskih ili arhitektonskih objekata modernih struktura i oblika. Karakterističan primjer objekata gdje geodeta mora biti kreativan pri odabiru i definiranju vrsta koordinata i koordinatnih sistema su moderni natkriveni fudbalski stadioni i velike dvorane različitih namjena, i slično.

- 2) *krivolinijske koordinate* u ravnini:
 - a. koordinate u ravnini elipse:
 - i. koordinate u meridijanskoj elipsi,
 - ii. koordinate u ravnini orbite (eliptičnog oblika),
 - b. koordinate u ravni kružnice, npr. geocentrična širina, itd.
- 3) *pravolinijske koordinate*: izražavaju položaj tačke dužinama pravih linija od ishodišta ili specifično odabranih lokalnih tačaka. Primjer su:
 - a. Kartezijeve pravougle koordinate,
 - b. koordinate pod specifičnim odabranim uglom, itd.
- 4) *uglovne koordinate*: izražavaju položaj tačke uglovima u odnosu na referentne pravce ili ravnine.
 - a. geodetske,
 - b. geocentrične,
 - c. astronomske,
 - d. geografske, itd.
- 5) Kombinacija naprijed navedenih vrsta. U tu skupinu spadaju npr.:
 - a. *polarne koordinate*, kombinacija uglova i dužina u horizontalnoj ili vertikalnoj ravnini.
 - b. *Zoldnerove koordinate*, koje se koriste u kartografiji, a kombiniraju npr. geodetsku/geografsku širinu i dužinu paralele.
- 6) Posebnu, a za geodete važnu skupinu, predstavljaju koordinate koje su dobile naziv prema osnovnom pravcu koji ih definira. Tako se u geodeziji koriste termini:
 - a. *prirodne koordinate* jer ih definira pravac težišnice, tj. pravac djelovanja polja sile Zemljine teže, koji je po definiciji okomica na geoid.
 - b. *elipsoidne koordinate* jer ih definira okomica tj. normala na referentni elipsoid.
- 7) Koordinate se također nazivaju po znanstvenim disciplinama u kojima se definiraju ili koriste, te su u upotrebi sljedeći termini:
 - a. geodetske koordinate,
 - b. astronomske koordinate,
 - c. geografske koordinate.
- 8) Koordinate koje definiraju položaj u koordinatnom sistemu vezanom za neka tijela mogu se razvrstati kao:
 - a. terestričke koordinate,
 - b. nebeske koordinate, itd.

3.2 SISTEMATIZACIJA KOORDINATNIH SISTEMA

Koordinatni sistemi se općenito, također mogu razvrstati po više kriterija:

- 1) po broju dimenzija, pa tako postoje:
 - a. *Jednodimenzionalni koordinatni sistemi*, koji su pogodni za predstavljanje:
 - i. visina iznad neke referentne površine,
 - ii. vremena, na odabranoj vremenskoj skali.
 - b. *Dvodimenzionalni koordinatni sistemi*, koji su pogodni za predstavljanje položaja u horizontalnoj, vertikalnoj ili kosoj ravnini. Primjeri mogu biti, npr.:
 - i. pravougle Kartezijeve koordinate u horizontalnoj ravnini,
 - ii. polarne koordinate u horizontalnoj ravnini, (α, d)
 - iii. bilo koje koordinate u ravnini kartografske projekcije,
 - iv. kombinacija navedenog u nekoj vertikalnoj ili kosoj ravnini.
 - c. *Trodimenzionalni koordinatni sistemi*, su se počeli intenzivno koristiti u eri satelitskih metoda pozicioniranja. Tako se položaj tačke može izraziti pomoću:
 - i. tri dužine/udaljenosti tačke duž koordinatnih osi od ishodišta (X, Y, Z) .
 - ii. elipsoidnim koordinatama, tj. širinom, dužinom i visinom iznad elipsoida.
 - d. *Višedimenzionalni koordinatni sistemi*, gdje četvrta dimenzija može biti vrijeme. Dakle, primjenjuje se za dinamičke sisteme. Osim primjene u geodeziji i geoznanostima uopće, primjenjuju se u savremenoj industriji, gdje se kod robotizirane proizvodnje (npr. dijelova automobila, dijelova aviona, te njihove montaže) kontrola kvaliteta proizvodnje dijelova (i njihove montaže), nadgleda također automatski, pomoću robotiziranih totalnih stanica. Takvi referentni sistemi zahtijevaju posebnu pažnju i kreativnost pri dizajniranju, realizaciji i implementaciji.
- 2) po mjestu ishodišta:
 - a. *geocentrični*, u centru mase Zemlje;
 - b. *kvazigeocentrični*, u blizini centra mase Zemlje;
 - c. *topocentrični*, na fizičkoj površini Zemlje;
 - d. *baricentrični*, u centru mase Sunčevog sistema;

- e. *izvanzemaljski*, u centru mase nekog letećeg objekta (aviona, svemirskog broda, ...) ili neke planete ili drugog nebeskog tijela, npr. Mars, Mjesec, Venera,..
- f. *galaktički*, u centru mase galaksije, itd.

3) po osnovnim referentnim ravninama:

- a. *horizontski*, kad je referentna ravnina horizont tačke posmatranja;
- b. *ekvatorski*, referentna površ je ekvatorska ravnina,
- c. *ekliptički*, referentna površ je ravnina ekliptike,
- d. *orbitalni*, u ravnini satelitske orbite, itd.

4) Koordinatni sistemi mogu biti **čvrsto vezani za neko tijelo** i kretati se s njim, te se prema tom kriteriju razlikuju:

- a. *koordinatni sistem fiksiran za Zemlju*, koji rotira zajedno s njom u dnevnom kretanju oko njene osi.
- b. *koordinatni sistem fiksiran za nebesku sferu*, koji ne rotira sa Zemljom ali se kreće zajedno s njom u njenoj revoluciji oko Sunca. Ovdje se razlikuju:
 - i. *inercijalni koordinatni sistem*, koji miruje ili se pravolinijski kreće jednolikom brzinom.
 - ii. *kvazi-inercijalni koordinatni sistem*, koji se kreće ali brzina kretanja nije posve uniformna, nego postoji ubrzanje pri kretanju, kao što je slučaj s kretanjem Zemlje oko Sunca.
- c. *koordinatni sistem fiksiran za pokretni objekt*, kao npr., kad je ishodište takvog sistema smješteno u težište: aviona, automobila, pješaka, svemirskog broda, itd. Takav sistem se često zove „*body*“ *koordinatni sistem*.
- d. *koordinatni sistem fiksiran za neko nebesko tijelo*, itd.

Da se zaključiti da se, za opis nekog koordinatnog sistema koristi više kriterija koji pobliže opisuju svojstva koordinatnog sistema. Tako se npr., za neki moderan koordinatni sistem, koji se koristi za satelitsko pozicioniranje tačaka na površini Zemlje može reći da je: globalni, geocentrični, ekvatorski, trodimenzionalni Dekartov pravougli sistem, čvrsto vezan za Zemlju.

U drugačijem primjeru, npr. za opis koordinatnog sistema pogodnog za određivanje položaja satelita u prostoru moglo bi se reći da je: kvazi - inercijalni, nebeski, geocentrični i fiksiran za svemir. Važno je razumjeti naprijed predstavljenu terminologiju da bi se razumjela sljedeća razmatranja koordinatnih sistema.

3.3 GEODETSKI REFERENTNI SISTEMI - osnovni pojmovi

Koordinatni sistem može biti definiran na mnogo načina. Kad geodeti definiraju neki koordinatni sistem koji je prikladan za geodetske potrebe (znanstvene i praktične) onda se odabrani sistem naziva referentni geodetski sistem.

Referentni geodetski sistem može biti lokalni ili globalni, ovisno od vrste projekta i geodetskih zadataka za koje se definira i realizira. Moderna geodetska praksa koja se uglavnom oslanja na metode *globalne geodezije*, zahtijevala je nove definicije globalnog geodetskog referentnog sistema, njegove realizacije i pridruženog geodetskog datuma.

Ovi pojmovi su detaljno razmatrani u sljedećem poglavlju, a ovdje se navode samo definicije (Petit i Luzum, 2010):

- **Referentni sistem** je definiran pomoću: konvencija, konstanti, modela i parametara, koji služe kao neophodna osnova za matematičko predstavljanje geometrijskih i fizikalnih veličina. Primjer je 3D Kartezijev koordinatni sistem s ishodištem u geocentru, čija se osnovna ravnina XY podudara s ravninom ekvatora, metričkog je mjerila, a koji rotira zajedno sa Zemljom oko njene obrtne osi Z .
- **Referentni okvir** realizira referentni sistem, fizički i matematički. Realizacija referentnog sistema fizički znači obilježavanje čvrstim materijaliziranim tačkama, dok realizacija sistema matematički znači određivanje parametara (geometrijskih koordinata). Primjeri su terestričke biljege (npr. stupovi kojim su stabilizirane geodetske tačke) ili pak objekti u prostoru (ili svemiru, npr. vještački sateliti ili nebeska tijela, zvijezde, sunce, kvazari...), čije su koordinate izračunate tako što su se poštovale definicije i konvencije referentnog sistema.
- **Geodetski datum** nedvosmisleno određuje relacije između referentnog okvira i referentnog sistema, tako da dodjeljuje skup "datih" parametara, tj. koordinata ishodišta sistema (X_0, Y_0, Z_0), pravce koordinatnih osa X, Y i Z , i mjerila kao jedinice dužine (tj. metar).

Pojmovi koji su naprijed definirani, bit će kasnije detaljno razmatrani, zbog svoje važnosti. Ovdje su navedeni da bi se razumjeli pojmovi u modernom geodetskom shvaćanju. Kao dodatak ovom poglavlju navode se neka preliminarna matematička razmatranja.

3.4 UVODNA MATEMATIČKA RAZMATRANJA

Sferne koordinate i sferna trigonometrija se smatraju osnovnim alatima za matematičku manipulaciju koordinata nekog objekta na nebeskoj sferi.

3.4.1 Nebeska sfera

Nebeskom sferom se naziva zamišljena sfera beskonačno velikog radijusa, na čiju površinu se projiciraju zvijezde i drugi udaljeni nebeski objekti. Ova nebeska tijela, u stvarnosti se nalaze na različitim udaljenostima od Zemlje. Često su hiljadama ili milionima svjetlosnih godina udaljeni između sebe i od naše planete. Međutim, za naša teorijska razmatranja ove pretpostavke zadovoljavaju. Radijus takve zamišljene sfere jednak je 1. Centar nebeske sfere se nalazi u centru mase Sunca ili često Zemlje, zbog jednostavnosti računanja. Razlika u udaljenosti između Zemlje i Sunca se može zanemariti zbog ogromnog radijusa nebeske sfere.

Dakle, u svemirskim razmjerama, rastojanje između centra Zemlje (*geocentar*), centra Sunca (*heliocentar*) ili pak, centra mase Sunčevog sistema (*baricentar*) može se zanemariti. Srednje rastojanje između Zemlje i Sunca naziva se jedna astronomska jedinica, (AJ) i služi kao mjera za udaljenost koja se koristi u astronomiji i ne pripada SI sistemu mjernih jedinica. Jedna astronomska jedinica iznosi $1 \text{ AJ} = 149\,597\,890 \text{ km}$.

Druga mjerna jedinica za izražavanje udaljenosti u svemiru je svjetlosna godina (*gs*, *engl. ly*), a služi kao mjera udaljenosti do zvijezda i drugih udaljenih objekata u svemiru. To je udaljenost koju svjetlost prođe za godinu dana, krećući se brzinom od $300\,000 \text{ km/s}$. Svjetlosna godina ne pripada SI sistemu mjernih jedinica, a iznosi $1 \text{ gs} = 9\,461 \text{ milijardi km}$.

Bilo koja kružnica na nebeskoj sferi, koja je rezultat presjeka sfere s ravninom koja prolazi kroz centar sfere, naziva se *veliki krug*. Definicije ostalih važnih linija i tačaka na nebeskoj sferi bit će date kasnije.

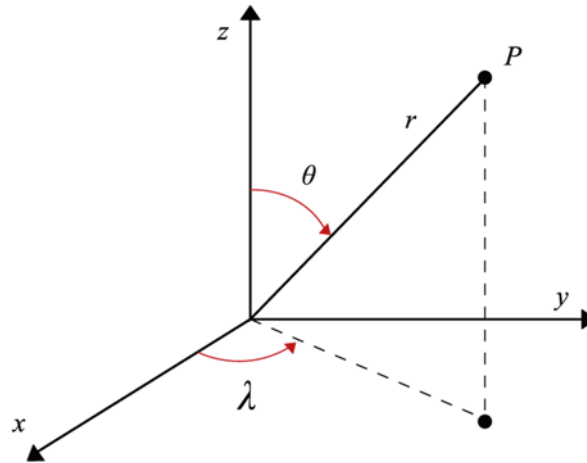
Stari kartografi i geografi su koristili sferne koordinate za predstavljanje objekta u globalnom terestričkom koordinatnom sistemu. Međutim, danas se sferne koordinate rijetko koriste za terestričke sisteme, osim za provjeru približnih vrijednosti.

Korisno je zato dati pregled *polarnih* sfernih koordinata, (Slika 3-1) gdje je:

θ polarni ugao (ugao od pola do posmatrane stanice, tj. dopuna širine ϕ do 90° ili se ponekad sreće naziv ko-latituda), λ je dužina (*engl. longitude*) (ugao od x-osi,

odnosno od ravnine početnog/referentnog meridijana ³⁵), dok r predstavlja radijalnu udaljenost tačke od ishodišta sistema. Ponekad se umjesto polarnog ugla koristi širina ϕ – ali će se kroz ovaj tekst oznaka ϕ koristiti za “geodetsku širinu” (engl. *latitude*), dok se λ koristi kao oznaka za “geocentričnu” dužinu (engl. *longitude*).

Za detaljno proučavanje ovih pojmova vidjeti (Muminagić,1981, str. 26-35).



Slika 3-1: Sferne polarne koordinate

“Dužina” (u radijanima) luka velikog kruga na jediničnoj sferi jednaka je centralnom uglu (Slika 3-2). Za sferne trouglove postoje sljedeća pravila sferne trigonometrije, koja se često koriste u astronomiji i geodeziji, a izražavaju se jednačinama (3.1) i (3.2), respektivno:

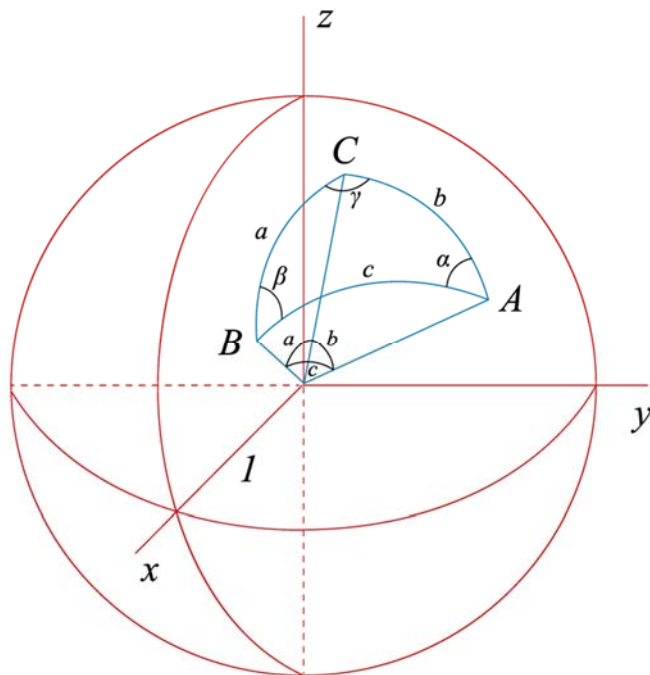
- a. Sinusno pravilo:

$$\frac{\sin a}{\sin \alpha} = \frac{\sin b}{\sin \beta} = \frac{\sin c}{\sin \gamma} \quad (3.1)$$

- b. Kosinusno pravilo:

$$\begin{aligned} \cos a &= \cos c \cos b + \sin c \sin b \cos \alpha \\ \cos b &= \cos a \cos c + \sin a \sin c \cos \beta \\ \cos c &= \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos \gamma \end{aligned} \quad (3.2)$$

³⁵ Po međunarodnoj konvenciji to je meridijan kroz Greenwich, astronomsku opservatoriju u Londonu.



Slika 3-2: Sferni trokut ABC na nebeskoj sferi

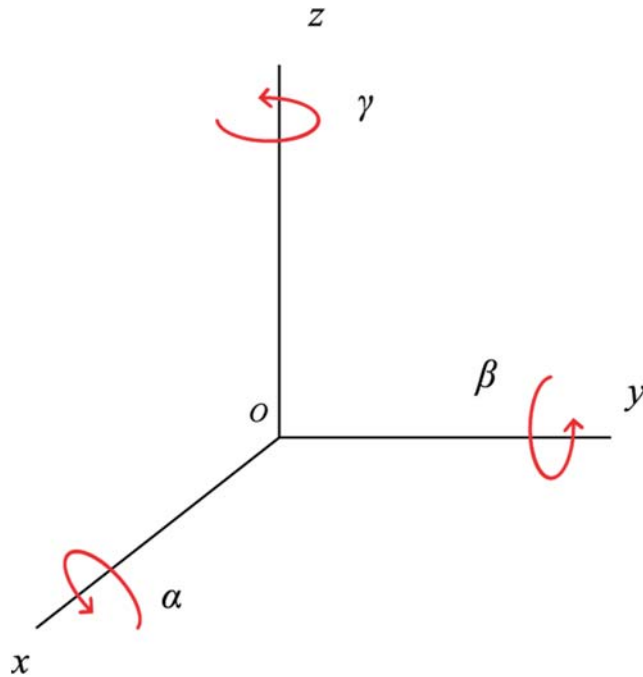
3.4.2 Rotacijske matrice

Ako koordinatne osi rotiraju oko bilo koje osi, Kartezijeve koordinate date tačke računaju se kao promjena u rotiranom skupu. Koordinate se mijenjaju u skladu s ortogonalnom transformacijom, poznatom kao rotacija, a definirana je matricom 3x3, koja se često obilježava kao $\mathbf{R}(\alpha)$.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{novi}} = \mathbf{R}(\alpha) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{stari}} \quad (3.3)$$

U formuli (3.3) ugao α predstavlja ugao rotacije, koji je pozitivan ako raste u smjeru obrnutom od kretanja kazaljke na satu, kad se posmatra u smjeru ka ishodištu koordinatnog sistema. Slika 3-3 pokazuje primjere rotacije oko koordinatnih osi, x , y i z . Tako, ako se izvršava rotacija oko x -osi za ugao α , tada rotacijska matrica izgleda kao u formuli (3.4).

$$\mathbf{R}_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3.4)$$



Slika 3-3: Rotacije oko koordinatnih osi

Slično, za rotaciju oko osi y za ugao β , rotacijska matrica izgleda kao u formuli (3.5):

$$\mathbf{R}_2(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Rotacijska matrica za rotaciju oko osi z za ugao γ pokazana je formulom (3.6):

$$\mathbf{R}_3(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Poznata osobina ortogonalnosti matrica pokazana je jednačinom (3.7):

$$\mathbf{R}_j^{-1} = \mathbf{R}_j^T \quad \text{gdje je } j = 1, 2, 3 \quad (3.7)$$

Rotacije se mogu primijeniti jedna za drugom, te će ukupna rotacija opet biti ortogonalna transformacija. Međutim, rotacije nisu komutativne i generalno važi pravilo pokazano nejednačinom (3.8).

$$\mathbf{R}(\alpha)\mathbf{R}(\beta) \neq \mathbf{R}(\beta)\mathbf{R}(\alpha) \quad (3.8)$$

3.5 VRIJEME U GEODEZIJI

Vrijeme se kao jednodimenzionalna koordinata u geodeziji i astronomiji koristi na više načina. U klasičnoj astronomiji se pri opažanju nebeskih tijela, koja se vremenom pomjeraju na nebeskom svodu, skoro uvijek mjeri vrijeme opažanja. U modernoj GNSS geodeziji, vrijeme putovanja signala od satelita do prijemnika se mjeri u procesu određivanja položaja opažanih stanica.

Međutim, da bi se uopće moglo mjeriti vrijeme, potrebno je obezbijediti sljedeće:

1. neki periodičan proces/pojavu,
2. brojač koji će brojati i/ili bilježiti broj perioda, i
3. definirano „ishodište“ gdje počinje brojanje, odnosno trenutak mjerenja vremena.

Da bi bilo moguće sinhronizirano mjeriti vrijeme na različitim lokacijama, također je potrebno imati sredstvo za transfer vremena.

Historijski gledano, astronomskim opažanjima su direktno određivane tkz. *prirodne vremenske skale*. To su sistemi vremena koje čovječanstvo poznaje hiljadama godina. Savremeni čovjek je, u svojoj težnji da poveća tačnost mjerenja vremena, osmislio *teorijske skale vremena*, uvodeći dinamičke teorije. Međutim, činjenica je da se *dinamičko vreme* nije moglo određivati u realnom vremenu, te je određivano pomoću aposteriori postupaka.

Problemi su prevaziđeni kad se definirala *atomska skala vremena*. Dužina trajanja sekunde definirana je kao trajanje sekunde dinamičkog vremena, te se problem mjerenja prenio na subatomske nivo, što je drastično povećalo tačnost mjerenja i održavanja vremena općenito. Tako je 1967. godine, usvojena definicija sekunde, koja se odnosi na atom cezija, u njegovom osnovnom stanju pri temperaturi 0° K. Ova definicija, koja je u skladu s IS³⁶ standardima glasi:

„1 sec = trajanje 9 192 631 770 perioda radijacije, koja odgovara tranziciji između dva hiperfina nivoa osnovnog stanja atoma cezija 133“.

Tačnost koja se može postići cezijevim satovima je 10^{-14} do 10^{-16} . Ako se usporedi sa stabilnošću Zemljine rotacije koja iznosi oko 10^{-8} , odnosno (0.3 sec/god)

³⁶ IS je kratica za International standard.

razumljivo je da je atomska skala vremena postala općeprihvaćeni međunarodni standard.

U geodetskoj praksi je atomska skala vremena dobila na značaju primjenom satelitskih tehnika za određivanje koordinata geodetskih tačaka, jer se GNSS skale vremena zasnivaju na atomskoj skali vremena, a nazivaju se *GPS vrijeme* (GPS Time – GPST), *GLONASS vrijeme* (GLONASS Time – GLONASST ili GLNT), Galileo vrijeme (Galileo System Time - GST), itd. GPS vrijeme osigurava visoku preciznost mjerenja vremena i globalnu dostupnost u realnom vremenu.

3.5.1 Prirodni procesi i skale vremena

Očigledno je da postoji veliki broj različitih sistema ili skala vremena. Definirani su različitim prirodnim periodičkim pojavama ili procesima i to: Zemljinom rotacijom oko svoje osi, Zemljinom revolucijom oko Sunca te atomskim radijativnim procesima.

Prema (Green, 1985, str. 236) skale vremena se općenito mogu razvrstati kao što slijedi:

1. zvjezdano vrijeme (engl. sidereal time)
2. sunčevo vrijeme (engl. solar time)
3. atomsko vrijeme (engl. atomic time)
4. dinamičko vrijeme (engl. dynamical time)
5. vlastito vrijeme (engl. proper time)
6. koordinatno vrijeme (engl. coordinate time).

Zemljina rotacija oko svoje osi definira dva sistema vremena:

- *sideričko* ili zvjezdano (definira se iz opažanja prolaza zvijezda kroz meridijan mjesta)
- *sunčevo* (definira se opažanjem prolaza sunca kroz meridijan mjesta).

Sunčevo vrijeme dalje može biti definirano kao: pravo, srednje i svjetsko ili *univerzalno vrijeme* – UT (Universal Time).

Civilno ili građansko vrijeme definirano je iz srednjeg sunčevog vremena, koje je uvećano za 12 h, tako da svaki dan počinje u ponoć. Građansko vrijeme je lokalno vrijeme, tj. referentni meridijan za njegovo određivanje je meridijan kroz opažanu stanicu. Da bi se dobila globalna skala vremena koja nije povezana s lokalnim meridijanima definirano je univerzalno vrijeme UT, koje predstavlja građansko vrijeme u Greenwichkom meridijanu.

Međutim Zemljina rotacija nije uniformna te ni skala koju definira ovo kretanje nije uniformna, što realno predstavlja problem.

Zemljina revolucija definira niz različitih skala (sistema) vremena, koji su *dinamički sistemi* vremena, a koriste se za istraživačke svrhe ili teorijske primjene, a to su:

- *Efemeridno vrijeme* (Ephemeris Time - ET), usvojeno 1960. godine, u cilju eliminiranja neujednačenosti Zemljine rotacije. Tačnost ove skale vremena bila je oko 10^{-10} , tj. (0,05 s kroz 10 godina). Danas ova skala nema veliki praktični značaj jer su uvedene druge tačnije skale vremena, koje se zasnivaju na atomskoj skali vremena (Time Atomic International – TAI). $ET = TAI + 32,184 \text{ sec.}$
- *Terestričko dinamičko vrijeme* (Terrestrial Dynamical Time - TDT), predstavlja skalu vremena koja se zasniva na relativističkim efektima u pogledu srednjih brzina i gravitacijskog potencijala. Međunarodna astronomska unija - IAU je 1992. godine usvojila dvije skale vremena: *Terestričko vrijeme* (Terrestrial Time - TT), što je novi naziv za Terestričko dinamičko vrijeme, te novu skalu nazvanu *Geocentrično koordinatno vrijeme* (Time Coordinate Geocentric - TCG). Terestričko vrijeme izražava se u SI sekundama, kao da se mjeri na geoidu i predstavlja nastavak efemeridnog vremena ET. Tako se može reći da je: $TT = TDT = ET = TAI + 32,184 \text{ sekunde.}$
- *Geocentrično koordinatno vrijeme* – TCG predstavlja vrijeme 4D referentnog sistema i razlikuje se od TT za konstantni faktor mjerila koji iznosi $1-L$, gdje je $L = 6,9692903 \cdot 10^{-10}$. Po konvenciji se TCG slaže s TT za epohu 1. januar 1997. godine, a što daje relaciju: $TCG = TT + L(JD - 24431445) \times 86400 \text{ sekundi.}$ Oko epohe J2000 razlika između TCG i TT iznosila je približno oko 0,5 sekundi.
- *Baricentrično koordinatno vrijeme* (Time Coordinate Baricentric - TCB). Ova skala vremena je uvedena da bi se opisalo kretanje objekata u našem Sunčevom sistemu u nerotirajućem relativističkom okviru čiji je centar smješten u centar mase tog sistema tj. baricentar. TCB i TCK su definirani tako da odgovaraju TAI u epohi 1. januar 1977. godine.
- *Baricentrično dinamičko vrijeme* (Baricentric Dynamical Time - BDT) je skala vremena koju je IAU usvojila 1976. godine, a definirana je tako da se razlikuje od TDT (sada važeći naziv TT) samo za periodičan izraz. Iako je definicija TDB u prvi mah izgledala korisna zbog male amplitude vremenske razlike TDB-TT ova skala ima suptilan utjecaj za model dinamike Sunčevog sistema. Iako je još u upotrebi ovdje se neće u detalje razmatrati.

Vlastito vrijeme je prema (Green, 1985, str. 239) vrijeme koje mjeri opažatelj bilo kakvim satom na površini Zemlje. Atomsko vrijeme je također oblik vlastitog vremena.

Historijski gledano, istraživači su u prirodi pronašli prirodne „satove“ koji su im za primjenu klasične (pedsatelitske) tehnologije mjerenja vremena osiguravali stabilne periodične oscilacije:

- Zemljina revolucija, tj. njeno kretanje oko Sunca,
- Mjesečevo kretanje oko Zemlje,
- Zemljina rotacija oko svoje osi.

Osnovni periodi navedenih prirodnih procesa, *godina*, *mjesec* i *dan*, su usko povezani s prirodnim procesima kao što su godišnja doba. Svakodnevni život na našoj planeti je pod utjecajem naprijed navedenih oscilacija odnosno vremenskih perioda, i moglo bi se reći da ovi periodi definiraju strukturu i način života.

Iz ovih prirodno definiranih perioda izvedena je osnovna dugoperiodična struktura za brojanje vremena, koja se naziva *kalendar*. Važeći kalendar koji se koristi u građanskom životu naziva se *Gregorijanski kalendar*, a usvojen je 1582. godine. Postoji veliki broj drugih kalendara koji se koriste u različitim kulturama ili su se kroz historiju koristili u različitim starim civilizacijama.

Za istraživačke projekte se preferira kontinuirano brojanje zbog komplicirane strukture brojanja mjeseci ili godina različite dužine. Za ove svrhe usvojen je *Julijanski datum* (JD) s fiksnim brojem (36 525) dana u stoljeću.

Dakle, Zemlja je od davnina čovjeku služila kao prirodni sat, a i danas u životu svakog pojedinca predstavlja važan pokazatelj prirodne skale vremena. Međutim, odavno je ustanovljeno da rotacija Zemlje nije uniformna. Uočene su varijacije u njenoj rotaciji, različitog intenziteta i s različitim periodima. Evidentne su varijacije rotacije, koje se mogu svrstati kao: dnevne, dvosedmične, mjesečne, itd., pa sve do usporavanja Zemljine rotacije u geološkoj skali vremena³⁷.

Osim potrebe definiranja jedinica vremena, također je, kao što je naprijed navedeno, potrebno definirati ishodište sistema vremena, tj. nultu tačku, odnosno, neku epohu/trenutak, u kojoj je vrijednost vremena specificirana. Međutim, kako

³⁷ Za osnovne informacije vidjeti npr.: (GST, 2016)

god da je sistem vremena definiran, potrebno ga je realizirati, tj. dati vremenski okvir.

Sideričko ili zvjezdano vrijeme se definira kao satni ugao γ tačke ili tačke Ovna Υ . Ako se za definiciju koristi pravi ekvinocij (prava γ tačka), radi se o pravom zvjezdanom vremenu (GAST – Greenwich Apparent Sidereal Time). Ukoliko se uzme u obzir nutacija i za računanje zvjezdanog vremena koristi srednja Υ tačka, kojom je definiran srednji ekvinocij, dobije se zvjezdano vrijeme nazvano srednjim zvjezdanim vremenom (GMST - Greenwich Mean Apparent Sidereal Time). Ako bi se zvjezdano vrijeme računalo za proizvoljni meridijan, za pravo i srednje mjesno (lokalno) zvjezdano vrijeme, onda bi tako definirali *lokalno pravo sideričko vrijeme* – LAST (Local Apparent Sidereal Time) i *lokalno srednje sideričko vrijeme* – LMST (Local Mean Sidereal Time).

Jedan *siderički* (zvjezdani) *dan* predstavlja vremenski interval između dvije gornje kulminacije γ tačke. Zvjezdano vrijeme zavisi od Zemljine rotacije i , u manjoj mjeri, od precesije. Uslijed tih utjecaja, ova vremenska skala je neravnomjerna.

Srednje zvjezdano vrijeme je uniformna vremenska skala, ukoliko se zanemare male promjene do kojih dolazi uslijed neravnomjernosti Zemljine rotacije. Ipak, ova vremenska skala se ne koristi u svakodnevnom životu, već samo u meridijanskim posmatranjima (opažanjima), zbog činjenice da se kulminacije Υ tačke dešavaju u različito doba dana, u poređenju sa kulminacijama Sunca. Uslijed toga, ustanovljeno je mjerenje vremena prema kretanju Sunca.

Mjerenjem vremena između dvije gornje kulminacije središta Sunčevog diska dobije se *pravi Sunčev dan*. Satnim uglom pravog Sunca mjeri se *pravo Sunčevo vrijeme*. Međutim, uveden je pojam fiktivnog srednjeg Sunca, koje se ravnomjerno kreće po ekvatoru i u isto vrijeme prolazi tačku proljetnog ekvinocija, kao i srednje ekliptično Sunce. Srednje sunčevo vrijeme se mjeri satnim uglom srednjeg Sunca. Konvencijom je uveden pojam *svjetsko sunčevo vrijeme* ili *univerzalno vrijeme-UT* (Universal time), tako da je sunčevom srednjem vremenu dodano 12 sati, da bi se izbjeglo da dan počinje/završava u podne.

Prije 60-tih godina dvadesetog stoljeća, definirana je jedinica za mjerenje vremena, nazvana sekunda, kao 1/86 400 interval srednjeg sunčevog dana. Eksperimenti su pokazali da se atomski standard vremenskog intervala, koji se bazira na tranziciji između dva energetska nivoa nekog atoma ili molekule, može realizirati i reproducirati mnogo preciznije. Stoga je, kao što je ranije konstatirano, godine 1967. usvojena definicija sekunde koja se odnosi na atom cezija, u njegovom osnovnom stanju pri temperaturi 0° K.

3.6 GEODETSKE KOORDINATE

Ove koordinate nazivaju se i elipsoidne jer se računaju u odnosu na površinu referentnog elipsoida. Dakle, pretpostavka je da je konvencijom usvojen elipsoid, čiji je geometrijski centar lociran u centru mase Zemlje, i ima osi (x, y, z) . Ova pretpostavka omogućuje praktično definiranje položaja tačaka (izraženih koordinatama) u odnosu na elipsoid. Prije detaljnog razmatranja potrebno je definirati osnovne pojmove.

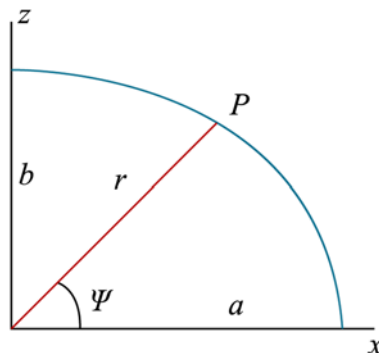
Ravnina meridijana neke tačke je ravnina koja prolazi kroz posmatranu tačku, a sadrži malu poluos elipsoida.

*Geodetska dužina*³⁸ (engl. *longitude*) za bilo koju tačku P u prostoru, data je uglom u ekvatorijalnoj ravni, od usvojene x osi do meridijanske ravni kroz posmatranu tačku. Zbog rotacijske simetrije geodetska dužina je ista kao sferna dužina (Slika 3-4).

Za definiranje širine na elipsoidu, tj. udaljenosti od ekvatorske ravnine, postoje različite mogućnosti. Tako se položaji tačaka mogu izražavati pomoću tri tipa širine:

- geocentrična,
- geodetska i
- reducirana širina.

Geocentrična širina tačke P je ugao Ψ , s vrhom u ishodištu elipsoida, a počinje od ekvatora i ide do radijalne linije kroz tačku P , kao što pokazuje Slika 3-4.

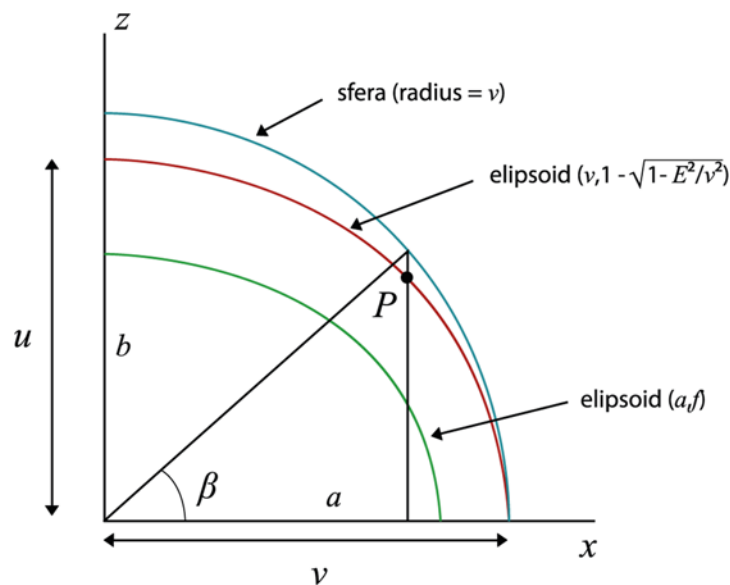


Slika 3-4: Geocentrična širina (prema Jekeli, 2012, str. 2-8)

³⁸ zove se i elipsoidna dužina.

Međutim, važno je reći da geocentrična širina nije ovisna o definiranom elipsoidu, i jednaka je komplementarnom uglu polarnog ugla θ , definiranom ranije kod sfernih koordinata.

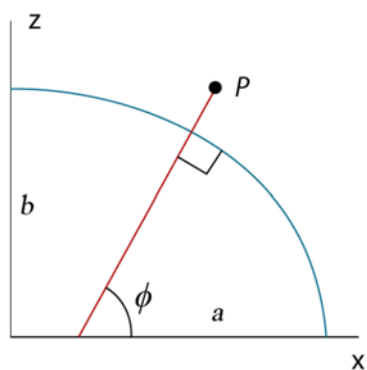
Za neki proizvoljno odabrani elipsoid na kojem se nalazi tačka P , može se reći da je konfokalan, tj. da ima iste fokalne tačke kao i elipsoid, definiran s parametrima (a, f) . Drugim riječima, ima isti linearni ekscentricitet E . Mala poluos ovog elipsoida (Slika 3-5) je u što može biti smatrano *koordinatom* tačke P . Moguće je definirati *reduciranu širinu* (engl. reduced latitude) tačke P koja će se označiti kao β . Reducirana širina je ugao u ishodištu elipsoida, polazi od ekvatora i ide do radijalne linije koja siječe projekciju tačke P , duž okomice na ekvator, na sferi radijusa $v = \sqrt{E^2 + u^2}$.



Slika 3-5: Reducirana širina (prema Jekeli, 2012, str. 2-9)

Ipak, u geodetskoj praksi se najčešće koristi *geodetska širina* (engl. geodetic latitude).

Može se definirati kao ugao ϕ u meridijanskoj ravnini, od ekvatora do linije kroz tačku P , koja je okomita na osnovni elipsoid (a, f) , kao što pokazuje Slika 3-6. Okomica na elipsoid naziva se *normala* na elipsoid. Reducirana širina i geodetska širina ovise o odabranom elipsoidu s definirajućim parametrima (a, f) .



Slika 3-6: Geodetska širina (prema Jekeli, 2012, str. 2-9)

Potrebno je poznavati relacije između ovih različitih tipova širina. Za pojednostavljenje prikaza ovih relacija uvodi se pojam *pravougljih koordinata u ravnini meridijanske elipse* (x, z). Za potrebe izvođenja ovih relacija smatrat će se da se tačka P nalazi na elipsoidu. Kasnije će se vidjeti da je moguće izvesti Kartezijeve koordinate za tačke bilo da se one nalaze na/unutar/izvan elipsoida.

Za geocentričnu širinu ψ te koordinate za tačku P na elipsoidu (Slika 3-4) daje jednačina (3.9):

$$x = r \cos \psi \quad z = r \sin \psi \quad (3.9)$$

Za reduciranu širinu, jednostavna trigonometrija daje izraze (3.10), (Slika 3-5):

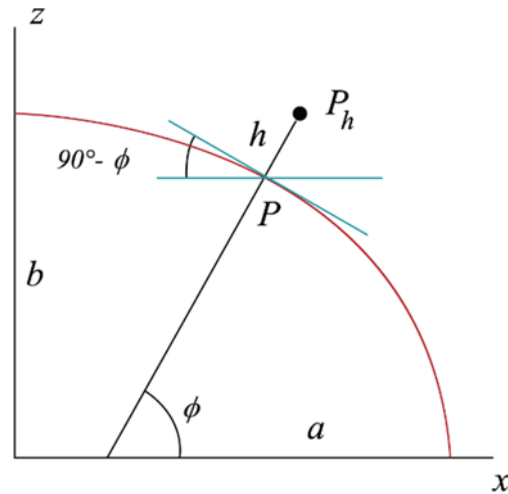
$$x = v \sin \beta \quad z = u \sin \beta \quad (3.10)$$

Za slučaj geodetske širine, razmotrit će se prvo tačka P na elipsoidu, koji je definiran parametrima (a, f) . Slika 3-6 i Slika 3-7 daju sljedeće geometrijske interpretacije derivacije, ili nagiba tangente elipse (3.11):

$$\tan(90^\circ - \phi) = \frac{dz}{-dx} \quad (3.11)$$

Desna strana je određena iz jednačine elipsoida, koja izgleda kao u jednačini (3.12) i dobije se jednačina (3.13):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (3.12)$$



Slika 3-7: Nagnutost elipsoida.
(prema Jekeli, 2012, str. 2-10)

$$z^2 = b^2 \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right) \Rightarrow 2zdz = -2 \frac{b^2}{a^2} x dx \Rightarrow \frac{dz}{-dx} = \frac{b^2 x}{a^2 z} \quad (3.13)$$

Kad se uvede zamjena u jednačinu (3.11), nakon sređivanja dobije se izraz (3.14):

$$b^4 x^2 \sin^2 \phi = a^4 z^2 \cos^2 \phi \quad (3.14)$$

Iz jednačine elipse se može izvesti izraz (3.15):

$$b^2 x^2 + a^2 z^2 = a^2 b^2 \quad (3.15)$$

Množenjem gornje jednačine s izrazom $-b^2 \sin^2 \phi$ te dodavanjem rezultata jednačini (3.14) i poslije sređivanja izraza, dobije se jednačina (3.16):

$$z^2 (a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi) = b^4 \sin^2 \phi \quad (3.16)$$

Ova jednačina se može svesti na izraz za računanje koordinate z po jednačini (3.17):

$$z = \frac{a(1 - e^2) \sin \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (3.17)$$

Sličnim postupkom može se dobiti koordinata x za tačku na elipsoidu, a rezultat je jednačina (3.18):

$$x = \frac{a \cos \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (3.18)$$

Kad se žele izvesti matematički izrazi za računanje koordinata x i z , za slučaj da se tačka nalazi iznad površine elipsoida, potrebno je uvesti elipsoidnu visinu.

Izrazi za određivanje koordinata x i z za tačku koja se nalazi na širini ϕ i visini h iznad elipsoida, izgledaju kao jednačine (3.19) i (3.20):

$$x = \frac{a \cos \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} + h \cos \phi \quad (3.19)$$

$$z = \frac{a(1 - e^2) \sin \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} + h \sin \phi \quad (3.20)$$

Između geodetske, geocentrične i reducirane širine se mogu relativno jednostavno pronaći veze za slučaj kad je tačku na elipsoidu ($h = 0$). Kombiniranjem jednačina (3.9) i (3.10) za računanje koordinata x, z u ravnini meridijanske elipse iz geocentrične i reducirane širine, (koje se odnose na osnovni elipsoid, tj. $u = b$) s jednačinama za računanje koordinata iz geodetske širine (3.19) i (3.20) dobiju se matematičke relacije ove tri širine, koju pokazuje jednačina (3.21).

$$\tan \psi = \frac{b}{a} \tan \beta = \frac{b^2}{a^2} \tan \phi \quad (3.21)$$

Iz ovog se može zaključiti da je:

$$\psi \leq \beta \leq \phi \quad (3.22)$$

Relacija (3.21) važi samo za slučaj da se tačka nalazi na elipsoidu. Za slučaj da se tačka nalazi iznad ili ispod elipsoida (h je tada negativna vrijednost) relacije su povezane s računanjem pravougljih Dekartovih koordinata, a to će biti pokazano kasnije.

Dakle, geodetska visina, geodetska širina i geodetska dužina (h, ϕ, λ) predstavljaju geodetske koordinate tačke u odnosu na odabrani elipsoid s parametrima (a, f). Moglo bi se reći da su ovo „ortogonalne koordinate“ u smislu

da su površine s konstantnim parametrima h, ϕ, i, λ ortogonalne međusobno. Međutim, elipsoidne visine se ne koriste često u geodetskoj praksi³⁹. Zašto?

Zato što površina konstantne elipsoidne visine nije jednostavnog geometrijskog oblika, tj. nije elipsoid. Može se reći da se umjesto geodetskih visina, za matematička izvođenja formula, češće koriste reducirane elipsoidne koordinate (u, β, λ) koje su također ortogonalne. Također treba reći da su geodetske koordinate (h, ϕ) razumljivo više intuitivne u odnosu na u, β , te se zato često biraju za mnogobrojne geodetske primjene.

3.6.1 Glavne linije na elipsoidu i radijusi zakrivljenosti

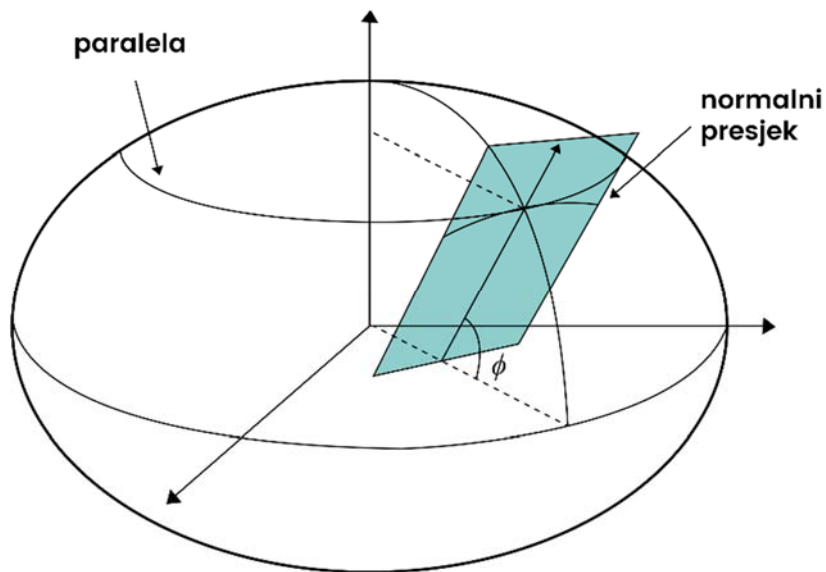
Kroz bilo koju tačku na elipsoidu može se provući normala, tj. okomica na površinu elipsoida u toj odabranoj tački. Kroz svaku normalu je moguće postaviti bezbroj ravnina, koje imaju različite azimute. Sve ove ravnine dakle sadrže normalu, te se stoga nazivaju *normalne ravnine*. Normalne ravnine sijeku se s elipsoidom, a rezultat presjeka svake normalne ravnine i elipsoida, daje krivu liniju na elipsoidu koja se naziva *normalni presjek*.

Takvih normalnih presjeka ima bezbroj, ali su dva glavna: *meridijan* i *prvi vertikal*. Prvim vertikalom se naziva kriva linija koja je nastala presjekom normalne ravnine koja je okomita na meridijan u odabranoj tački. To je dakle normalni presjek koji je okomit na meridijan u posmatranoj tački (Slika 3-8). *Paralele* su općenito, krugovi paralelni ekvatoru⁴⁰, nisu veliki krugovi, osim *ekvatora* koji je jedina paralela koja jeste normalni presjek i jeste veliki krug. Dakle, svi meridijani su normalni presjeci, dok paralele to općenito nisu.

Za razumijevanje problema povezivanja i konverzije geodetskih koordinata s Kartezijevim pravouglim koordinatama, potrebno je poznavati pojmove zakrivljenosti osnovnih krivih linija na elipsoidu. Zakrivljenost krive linije koja leži u ravnini je definirana kao apsolutna vrijednost promjene nagiba tangente na krivu liniju u odnosu na dužinu luka krive linije.

³⁹ Osim ako su poznate undulacije geoida, pa se geodetske visine koriste za računanje ortometrijskih visina tačaka određenih iz GNSS mjerenja.

⁴⁰ Paralele se nazivaju kosim presjecima, jer općenito, nastaju kao presjek ravnine koja ne sadrži normalu.

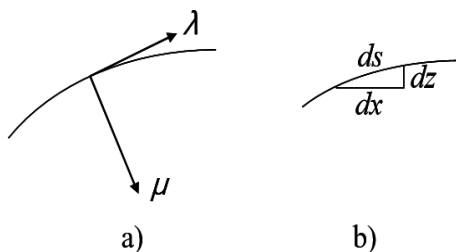


Slika 3-8: Normalni presjek na elipsoidu kroz tačku geodetske širine ϕ . Pokazan je prvi vertikal. (modificirano prema⁴¹ Jekeli, 2016, str. 2-19)

$$\chi = \left| \frac{d\alpha}{ds} \right| \quad (3.23)$$

Iz matematike je poznato da se recipročna vrijednost izraza (3.23) naziva radijus zakrivljenosti. Radijus zakrivljenosti je dužina uzduž glavne normale na krivu liniju.

$$\rho = \frac{1}{\chi} \quad (3.24)$$



Slika 3-9: Zakrivljenost krive linije u ravnini (prema Jekeli, 2016, str. 2-15)

⁴¹ Sve slike u poglavlju 3 su nacrtane i modificirane prema (Jekeli, 2012 ili Jekeli 2016). Također, formule ovog poglavlja imaju notaciju prema istom izvoru.

Specijalni slučaj javlja se kad je zakrivljenost konstantna, te je i radijus zakrivljenosti konstantna vrijednost, kao što je slučaj kod kružnice. Radijus zakrivljenosti u nekoj tački krive linije koja leži u ravnini jednak je radijusu kružnice tangente na krivu liniju u posmatranoj tački, a ima istu zakrivljenost.

$$ds = \sqrt{dx^2 + dz^2} \quad (3.25)$$

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} dx \quad (3.26)$$

Nagib tangente na krivu (Slika 3-9) je tačno iznad krive dz/dx pa je:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{dz}{dx} \right) \quad (3.27)$$

Ako se ovo primijeni na zakrivljenost meridijanskog luka, dobije se izraz za računanje radijusa zakrivljenosti meridijana u posmatranoj tački, po formuli (3.28):

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{3/2}} \quad (3.28)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{d\phi}{ds} \quad (3.29)$$

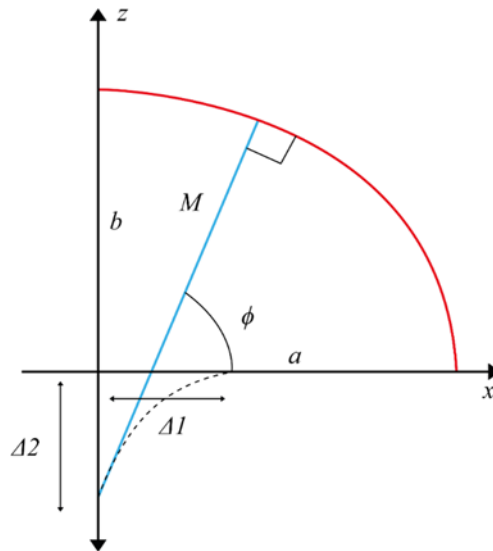
Radijus zakrivljenosti M je glavna normala na meridijanski luk. Zato leži duž normale (okomice) na površinu elipsoida (Slika 3-10). Nagnutost meridijanske elipse za $90 - \phi$, je uvijek $M > 0$.

Općenito, ako je $ds_{\text{meridijana}} = M d\phi$, onda je radijus zakrivljenosti meridijanskog luka na ekvatoru jednak $M_{\text{ekvatora}} = a(1 - e^2) < a$;

Radijus zakrivljenosti meridijanskog luka na polovima izračuna se po sljedećem

izrazu: $M_{\text{na polu}} = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2}} > a$; Radijus zakrivljenosti meridijanske elipse

monotono raste od ekvatora ka polovima, gdje ima najveću vrijednost kao što pokazuje Slika 3-10.



Slika 3-10: Radijus zakrivljenosti meridijanske elipse.
(prema Jekeli, 2012, str. 2-18)

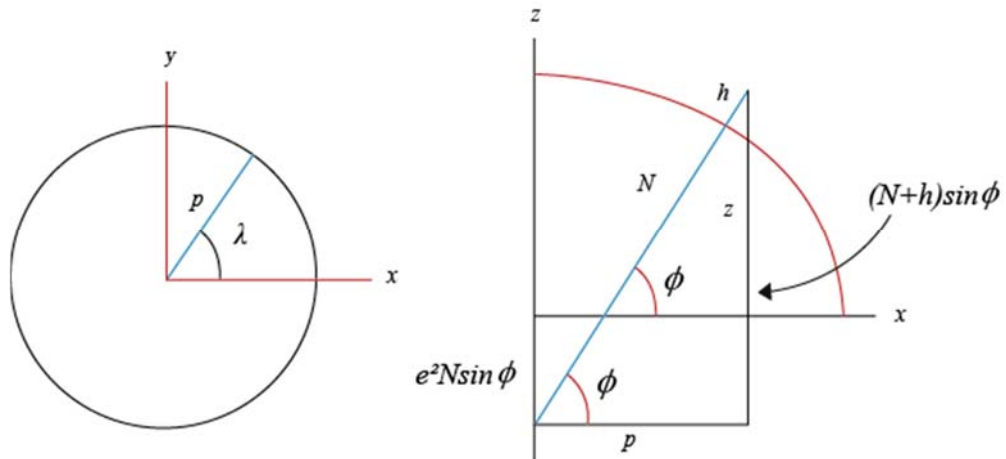
3.6.2 Veza geodetskih i Kartezijevih koordinata

U geodetskim zadacima se često javlja potreba da se geodetske koordinate (ϕ, λ, h) prevedu ili kako se često kaže konvertiraju u Kartezijeve⁴² koordinate (x, y, z) i obratno. Pri tom treba imati na umu da se geodetske koordinate uvijek odnose na ranije definiran odabarani elipsoid s poznatim parametrima (a, f) .

Pretpostavlja se da je Kartezijev sistem trodimenzionalni sistem kojem:

- su osi međusobno okomite duž manje osi i ekvatorske ravnine elipsoida
- je ishodište postavljeno u centar elipsoida.

⁴² Zasluga za otkriće Kartezijevog koordinatnog sistema, pripala je francuskom matematičaru Reneu Descartesu (1596-1650.) koji ga je imenovao po latinskoj inačici svog imena Cartesius. Često se koordinate nazivaju i Dekartove.



Slika 3-11: Geodetska širina: pogled sa sjevernog pola na ekvatorsku ravninu (lijevo) i veza s Kartezijevim koordinatama (desno) (prema Jekeli, 2016, str. 2-43)

Slika 3-11 (lijevo) pokazuje kako se mogu napisati jednačine (3.30):

$$\begin{aligned} x &= p \cos \lambda \\ y &= p \sin \lambda \end{aligned} \quad (3.30)$$

Gdje je:

$$p = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.31)$$

Pošto je:

$$p = (N + h) \cos \phi \quad (3.32)$$

Slika 3-11 desno daje logičnu osnovu za pisanje izraza (3.33):

$$\begin{aligned} x &= (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\ y &= (N + h) \cos \phi \sin \lambda \end{aligned} \quad (3.33)$$

Iz jednačina (3.19) i (3.20) za računanje koordinata (x, z) u ravnini meridijanske elipse iz geodetskih koordinata (ϕ, λ, h) , te jednačine za računanje radijusa zakrivljenosti prvog vertikala N , dobije se jednačina (3.34):

$$z = (N(1 - e^2) + h) \sin \phi \quad (3.34)$$

Formula za računanje zakrivljenosti prvog vertikala je, kao što je navedeno u prethodnom poglavlju:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (3.35)$$

Konačno, geodetske koordinate (ϕ, λ, h) , za tačku iznad elipsoida definiranog parametrima (a, f) i Kartezijeve koordinate (x, y, z) imaju relaciju pokazanu izrazom (3.36):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N + h) \cos \phi \sin \lambda \\ (N(1 - e^2) + h) \sin \phi \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Prevođenje ili konverzija geodetskih koordinata (ϕ, λ, h) u Kartezijeve koordinate (x, y, z) ne može se napraviti bez poznavanja parametara elipsoida, uključujući informacije o ishodištu i orijentaciji osi. Ovo se mora imati na umu kad se razmatraju različiti geodetski datumi i referentni sistemi.

Obrnuti postupak prevođenja (konverzije) Kartezijevih koordinata u geodetske nije tako jednostavan. Obično se koristi iterativni postupak iako postoji i drugi način.

Izraz za računanje geodetske dužine λ se jednostavno izvede iz prethodne jednačine te se dobije jednačina (3.37):

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (3.37)$$

Problem se javlja kod računanja geodetske širine, ali samo za slučaj kad je $h \neq 0$.

Slika 3-11 (desno) pokazuje kako se može izvesti sljedeća relacija:

$$\tan \phi = \frac{(N + h) \sin \phi}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (3.38)$$

Iz jednačine (3.38) se dobije sljedeće:

$$(N + h) \sin \phi = z + Ne^2 + \sin \phi \quad (3.39)$$

Sad se može napisati:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \left(1 + \frac{e^2 N \sin \phi}{z} \right) \right) \quad (3.40)$$

Izraz (3.40) važi za $z \neq 0$. Ako je $z = 0$ onda je naravno i geodetska širina ϕ također jednaka nuli.

Dakle, postupak računanja geodetske širine ϕ primjenjuje iterativni postupak računanja po formuli (3.40), a početna vrijednost za visinu se uzima nula, tj., $h = 0$. Nakon prvog iterativnog koraka se zamijeni rezultat za izračunatu približnu vrijednost z kao u (3.41):

$$\phi^0 = \tan^{-1} \left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \left(1 + \frac{e^2}{1 - e^2} \right) \right) \quad (3.41)$$

Poslije se iterativni postupak nastavlja prema formuli (3.42):

$$\phi^j = \tan^{-1} \left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \left(1 + \frac{e^2 N^{j-1} \sin \phi^{j-1}}{z} \right) \right) \quad (3.42)$$

gdje je: N^{j-1} radijus zakrivljenosti prvog vertikala za geodetsku širinu ϕ^{j-1} , kad je $j = 1, 2, 3, \dots$

Iterativni postupak računanja geodetske širine se nastavlja sve dok razlika između novih i starih vrijednosti za ϕ bude manja od prethodno definirane tolerancije. Ova procedura je poznata pod nazivom *Hirvoven-Moritz algoritam*. Za većinu aplikacija ovaj postupak brzo konvergira i obično je potrebno dva do tri iterativna koraka da se dobije milimetarska tačnost.

Prema (Rapp, 1991, str. 123-124) Bowring algoritam za iterativno računanje geodetske širine iz Kartezijevih koordinata brže konvergira. Međutim, Međunarodni servis IERS (International Earth Rotation and Reference Frame Service) preporučuje direktni postupak (Borkowski, 1989) koji se zasniva na računanju korijena iz kvadratne jednačine (Jekeli, 2012, str. 2-43).

Kad je postupak računanja ϕ završen, onda se elipsoidna visina tačke h može izračunati po različitim formulama.

Npr.: za $\phi \neq 90^\circ$ primjenjuje se sljedeća formula:

$$h = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos \phi} - N \quad (3.43)$$

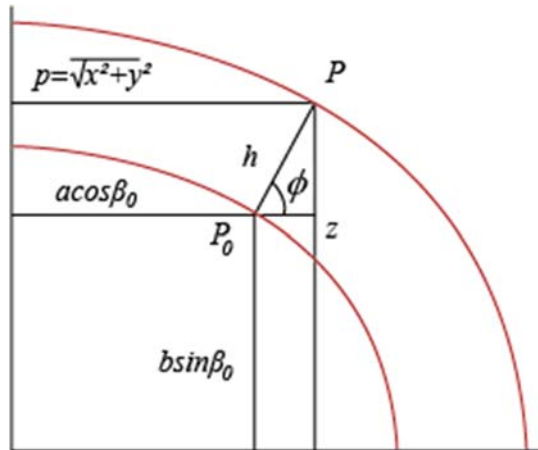
dok se za slučaj $\phi \neq 0^\circ$ primjenjuje formula (3.44):

$$h = \frac{z}{\sin \phi} - N(1 - e^2) \quad (3.44)$$

Za sve vrijednosti širine se može koristiti izraz (3.45):

$$h = \sqrt{((p - a \cos \beta_0) \cos \phi)^2 + ((z - b \sin \beta_0) \sin \phi)^2} \quad (3.45)$$

gdje je β_0 reducirana širina (za projekciju P_0 tačke P na elipsoid duž normale, kao što pokazuje Slika 3-12).



Slika 3-12: Određivanje elipsoidne visine h tačke P iz Kartezijevih koordinata (x, y, z) i geodetske širine ϕ . (prema Jekeli, 2016, str. 2-45)

3.7 PRIRODNE KOORDINATE

Pri mjerenjima uz primjenu tehnika tradicionalne terestričke geodezije, npr. uz korištenje teodolita, mjere se veličine kao što su: horizontalni uglovi ili pravci, te vertikalni uglovi. Mjerenja uglova se rade u odnosu na pravac sile teže u odabranoj tački, tj. u odnosu na tangentu vektora sile teže ili težišnicu. U cilju vizualizacije

može se tangenta na vektor sile teže zamisliti kao konac mehaničkog viska⁴³ koji je postavljen na teodolit.

Pravac sile teže u bilo kojoj tački definiran je prirodnim zakonima, tj. poljem sile Zemljine teže. Zbog specifičnog rasporeda masa na/unutar Zemlje, linija viska definirana ovim zakonima, je različita za svaku tačku. Pravac sile teže se mijenja doslovno od tačke do tačke (čak i po vertikali kroz istu tačku), definirajući oblik težišnice (ili vertikale) kao prostornu krivu liniju. Poznato je da postoji ograničenje tačnosti mjernih instrumenata i tehnika geodetskog mjerenja. Međutim, nije uvijek neophodna najviša tačnost mjerenih veličina u geodetskoj praksi, te se u nekim situacijama može zanemariti ovako strog pristup definiranju pravca sile teže.

Ranije su se mjerili uglovi primjenjujući ovu filozofiju, ka zvijezdama i drugim nebeskim tijelima s poznatim koordinatama. Tako se određivala specifična vrsta (astronomskog) azimuta i astronomske širine i dužine. Terestričke koordinate određene ovim metodama poznate su kao *astronomske koordinate* ili prirodne koordinate, jer su definirane prirodom (pravcem sile teže), a ne pomoću nekog usvojenog elipsoida.

Treća os z ovakvog koordinatnog sistema određena je (po konvenciji) Zemljinom obrtnom osi. Obrtna os nije fiksirana u odnosu na Zemljinu površinu zbog poznate pojave kretanja pola. Usvojena je srednja vrijednost z osi, ali također i srednja vrijednost x osi. Usvojene srednje osi su dio ITRS (International Terrestrial Reference System) terestričkog referentnog sistema, kojeg ustanovljava Međunarodni servis za Zemljinu rotaciju i referentne sisteme - IERS. Zbog činjenice da je ITRS usvojen po međunarodnoj konvenciji, isti se u literaturi nekad naziva Konvencionalni terestrički referentni sistem (CTRS - Conventional Terrestrial Reference System).

Srednji pol se ranije nazivao *Konvencionalni međunarodni pol-CIO* (Conventional International Origin). Međutim, aktuelan naziv za srednji pol je skraćeno IRP (IERS Reference Pole) ili *Međunarodni referentni pol*. Ravnina koja sadrži srednju z os i x os naziva se ravnina *srednjeg Greenwichkog meridijana*, ili ravnina IERS referentnog meridijana (IERS Reference Meridijan).

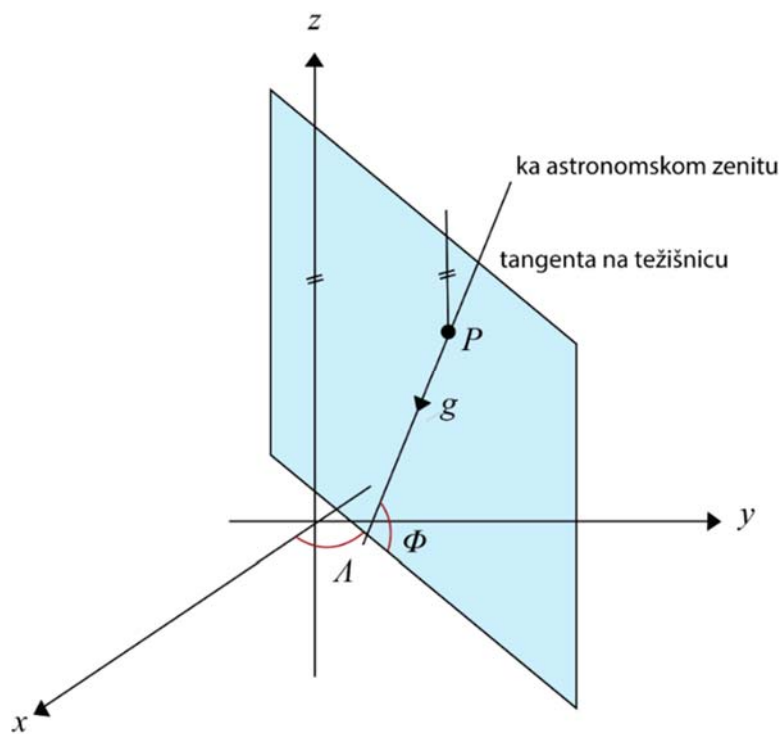
⁴³ Mehanički visak se u tradicionalnoj geodeziji (prije nego se izumio optički visak) isključivo koristio za centrisanje instrumenta iznad geodetske biljege.

Potrebno je definirati i ravninu *astronomskog meridijana*. Ravnina astronomskog meridijana definirana je tangentom na liniju težišnice (pravac viska) u posmatranoj tački, i (samo) paralelom sa z osi (Slika 3-13). Treba imati na umu da ravnina geodetskog meridijana sadrži normalu i manju poluos meridijanske elipse, odnosno elipsoida.

Dakle, ravnina astronomskog meridijana **ne sadrži**, generalno govoreći, z os. Da bi se pokazalo da ovakva ravnina postoji za svaku tačku, treba smatrati da u svakoj tački P postoji vektor, koji je paralelan sa z osi.

Ravnina astronomskog meridijana (uvijek) postoji za svaku specifičnu tačku našeg prostora (u/na/iznad površine Zemlje). Ovo pokazuje postojanje vektora sile teže u bilo kojoj tački P .

Paralela sa z osi i tangenta na ovaj vektor definiraju ravninu astronomskog meridijana. Napominje se da tangenta na težišnicu, generalno govoreći, ne siječe centar mase Zemlje (niti obrtnu os) zbog specifičnog skretanja pravca sile teže.



Slika 3-13: Ravnina astronomskog meridijana koju definiraju paralela sa z osom i tangenta na težišnicu (prema Jekeli, 2016, str. 2-48)

Astronomska širina Φ je ugao u ravnini astronomskog meridijana, od ekvatora (ravnina okomita na z os) do tangente na težišnicu u posmatranoj tački P .

Astronomska dužina Λ je ugao u ravnini ekvatora, od osi x do ravnine astronomskog meridijana kroz posmatranu tačku P .

Astronomske (prirodne) koordinate (Φ, Λ) određuju pravac tangente na težišnicu, kao što geodetske (elipsoidne) koordinate (ϕ, λ) definiraju pravac normale na elipsoid. Razlika između ova dva (veoma važna) pravca u višoj geodeziji naziva se *otklon težišnice* ili *odstupanje vertikalne*.

Astronomska azimut A je ugao u astronomskom horizontu tačke P . *Astronomska horizont* je ravnina okomita na tangentu težišnice u posmatranoj tački. Ovaj ugao je definiran sjevernom polovinom astronomskog meridijana i ide do ravnine koja sadrži i težišnicu stajališne i navizirane (ciljne) tačke. Ova ravnina naziva se *vertikalna ravnina*. Kroz svaku tačku na Zemlji, se može postaviti bezbroj vertikalnih ravnina, ali uvijek sadrži vertikalnu. Azimut raste ka istoku, tj. u pravcu kretanja kazaljke na satu.

Astronomska zenitni ugao (astronomska zenitna daljina) je ugao u vertikalnoj ravnini, od tangente (dijela usmjerenog ka zenitu, dakle prema gore) na težišnicu (pravcem ka astronomskom zenitu) do vizirane tačke.

Visine nisu definirane kao dio astronomskih koordinata. Međutim, visine se mogu pridružiti astronomskim koordinatama, ali su to visine definirane geopotencijalom sile teže.

3.8 LOKALNE TERESTRIČKE KOORDINATE

Lokalne terestričke koordinate čine osnovu za tradicionalnu trodimenzionalnu (višu) geodeziju, kao i za lokalni premjer manje teritorije. Radi se o lokalnom trodimenzionalnom koordinatnom sistemu u kojem se rade tradicionalna geodetska mjerenja dužina i uglova ili pravaca. Pri tom se geodeti služe mjernim instrumentima: elektrooptičkim daljinomjerima za mjerenje dužina, teodolita za mjerenje uglova, ili u moderno doba, kombinacijom teodolita i daljinomjera, tj. instrumentom koji se naziva totalna stanica. Lokalne terestričke koordinate se također koriste za moderne mjerne sisteme koji se primjenjuju u fotogrametriji, laserskom skeniranju, za referenciranje geoprostornih podataka ili pak u navigaciji. Lokalni koordinatni sistem se može definirati na dva načina:

-u odnosu na lokalnu normalu na elipsoid i tada se zove *lokalni geodetski sistem*,

-u odnosu na lokalni vektor sile teže i tada se zove *lokalni astronomski sistem*.

Razvoj oba sistema je identičan. Jedina razlika je da li je sistem specificiran pomoću geodetske širine i dužine izabrane geodetske tačke, ili pravcem njene

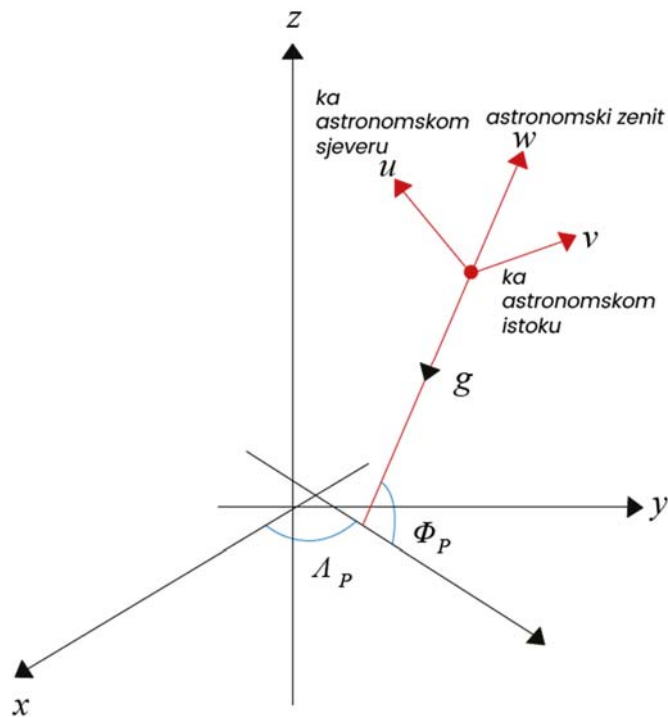
vertikale (težišnice). Lokalni terestrički sistem je Kartezijev pravougli koordinatni sistem, sačinjen dakle od tri međusobno okomite osi. Njihovi glavni pravci ne prate uvijek konvencijske definicije, pa tako se primjenjuju sljedeće orijentacije:

- a) u geodetskim mjerenjima: pravci ka sjeveru, istoku i prema gore;
- b) u navigaciji: ka sjeveru, istoku i prema dole (u avijaciji) ili pak ka sjeveru, zapadu i prema gore.

Zbog praktične vizualizacije razmotrit će se prvo lokalni astronomski sistem.

3.8.1 Lokalni astronomski koordinatni sistem

Lokalni astronomski koordinatni sistem je trodimenzionalni Kartezijev sistem s ishodištem u stajalištu geodetskog instrumenta. Treća os w poravnata je s tangentom na težišnicu u ishodištu lokalnog koordinatnog sistema P , kao što pokazuje Slika 3-14. Tačka P je istovremeno tačka opažača. Prva os u je ortogonalna na w . Usmjerena je ka sjeveru, koji je definiran astronomskim meridijanom. Druga os, v okomita je na w i u . Usmjerena je ka istoku. Treba zapaziti da su koordinate (u, v, w) u lijevo orijentiranom koordinatnom sistemu.

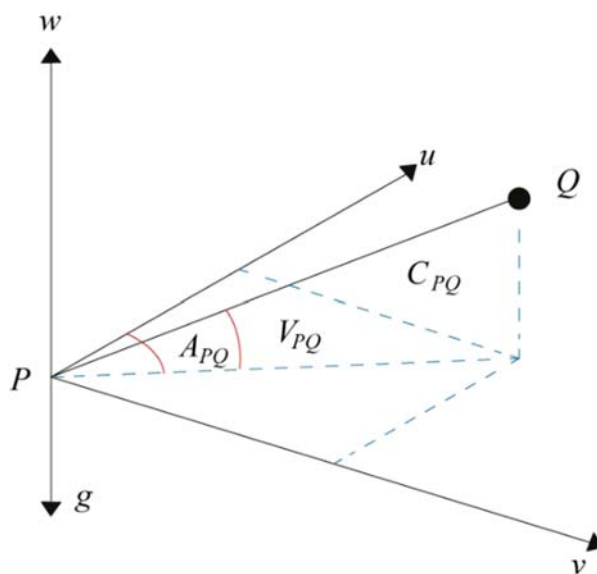


Slika 3-14: Lokalni astronomski koordinatni sistem (prema Jekeli, 2016, str. 2-51)

Dakle, ishodište sistema je u tački P. Ako je tačka Q ciljna tačka, treba razmotriti kako odrediti njene koordinate u lokalnom astronomskom sistemu, u čemu pomaže Slika 3-15, na kojoj su pokazane mjerene veličine u lokalnom astronomskom koordinatnom sistemu:

- kosa dužina od tačke P do tačke Q, koja je obilježena kao C_{PQ} .
- astronomski azimut na tački P ka tački Q, obilježen kao A_{PQ} .
- vertikalni ugao na tački P ka tački Q, obilježen kao V_{PQ} .

Ovdje se astronomski azimut navodi kao mjerena veličina, ali treba imati na umu da se astronomski azimut ne mjeri direktno nego se dobiva posredno tj. izvodi iz opažanja zvijezda.



Slika 3-15: Lokalne astronomske koordinate i mjerene veličine.
(prema Jekeli, 2016, str. 2-52)

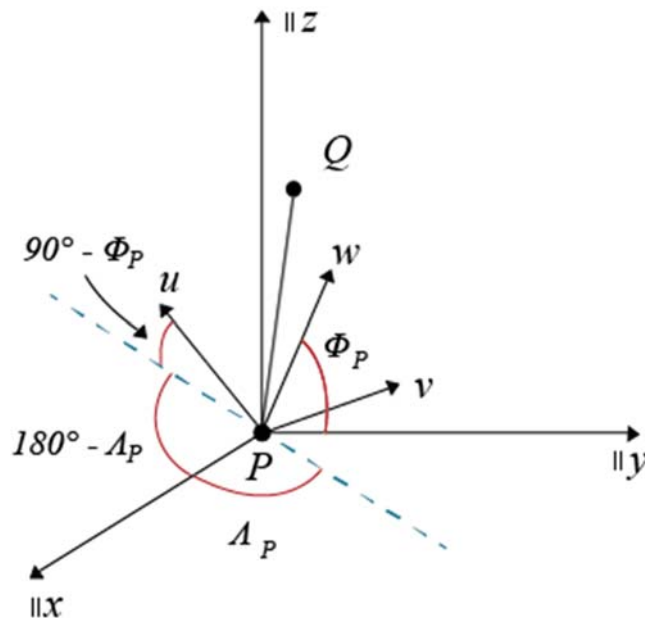
Na osnovu mjerenih veličina: C_{PQ} , A_{PQ} i V_{PQ} , moguće je odrediti tri Kartezijeve koordinate tačke Q (u_{PQ} , v_{PQ} , w_{PQ}) u koordinatnom sistemu centriranom u tački P, po formulama (3.46):

$$\begin{aligned}
 u_{PQ} &= C_{PQ} \cos V_{PQ} \cos A_{PQ} \\
 v_{PQ} &= C_{PQ} \cos V_{PQ} \sin A_{PQ} \\
 w_{PQ} &= C_{PQ} \sin V_{PQ}
 \end{aligned}
 \tag{3.46}$$

Kako ove koordinate u lokalnom sistemu povezati s globalnim koordinatnim sistemom? Da bi se izvele potrebne matematičke relacije može pomoći koordinatni sistem koji je smješten u tačku P a osi su mu paralelne s osima globalnog geocentričnog sistema (x, y, z) , kao što pokazuje Slika 3-16.

Koordinatne osi pomoćnog sistema su obilježene kao $\parallel x, \parallel y, \parallel z$, respektivno. Os v je uvijek u ravnini koju kreiraju paralele s koordinatnim osima x i y , jer je ravnina (u, w) okomita na ekvator, zbog definicije meridijanske ravnine. Kartezijeve koordinate tačke Q u ovom sistemu se mogu izračunati kao razlike koordinata tačaka P i Q, kao što pokazuju jednačine (3.47).

$$\begin{aligned} \parallel x_{PQ} &\equiv \Delta x_{PQ} = x_Q - x_P \\ \parallel y_{PQ} &\equiv \Delta y_{PQ} = y_Q - y_P \\ \parallel z_{PQ} &\equiv \Delta z_{PQ} = z_Q - z_P \end{aligned} \quad (3.47)$$



Slika 3-16: Veza između lokalnih sistema (u, v, w) i $(\parallel x, \parallel y, \parallel z)$
(prema Jekeli, 2016, str. 2-51)

Veza između ova dva sistema je rotacija i računa se za različitu orijentaciju dva sistema. Može se primijeniti transformacija za prelazak iz (u, v, w) koordinata u $\parallel x, \parallel y, \parallel z$ koordinate, prema izrazima u (3.48):

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{PQ} \\ \Delta y_{PQ} \\ \Delta z_{PQ} \end{bmatrix} = R_3(180^\circ - \Lambda_P) R_2(90^\circ - \Phi_P) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{PQ} \\ v_{PQ} \\ w_{PQ} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

gdje dijagonalna jedinična matrica na desnoj strani jednačine (3.48) transformira sistem iz lijevog u desni koordinatni sistem (tek poslije toga se mogu primijeniti rotacijske matrice), a rotacijske matrice \mathbf{R}_2 i \mathbf{R}_3 su date ranije u ovom poglavlju. Rezultirajuća transformacija je pokazana izrazom (3.49):

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{PQ} \\ \Delta y_{PQ} \\ \Delta z_{PQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \Phi_P \cos \Lambda_P & -\sin \Lambda_P & \cos \Phi_P \cos \Lambda_P \\ -\sin \Phi_P \sin \Lambda_P & \cos \Lambda_P & \cos \Phi_P \sin \Lambda_P \\ \cos \Phi_P & 0 & \sin \Phi_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{PQ} \\ v_{PQ} \\ w_{PQ} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Kad se u gornju jednačinu uvrsti izraz (3.46) dobije se jednačina (3.50) koja iz mjenjenih geodetskih veličina (C_{PQ}, V_{PQ}, A_{PQ}) u lokalnom astronomskom sistemu, izračuna Kartezijeve *koordinatne razlike* u globalnom geocentričnom sistemu. Ovdje je očigledno da je potrebno poznavati astronomske koordinate tačke P u kojoj stoji opažač, tj. geodetski instrument.

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{PQ} \\ \Delta y_{PQ} \\ \Delta z_{PQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \Phi_P \cos \Lambda_P & -\sin \Lambda_P & \cos \Phi_P \cos \Lambda_P \\ -\sin \Phi_P \sin \Lambda_P & \cos \Lambda_P & \cos \Phi_P \sin \Lambda_P \\ \cos \Phi_P & 0 & \sin \Phi_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{PQ} \cos V_{PQ} \cos A_{PQ} \\ C_{PQ} \cos V_{PQ} \sin A_{PQ} \\ C_{PQ} \sin V_{PQ} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Značajno je da se konvencijalna mjerenja astronomske širine i dužine, kao i astronomskog azimuta, vertikalnih uglova i dužina mogu koristiti za određivanje ovih relativnih Kartezijevih koordinata. Ovo je osnova za tradicionalnu 3D geodeziju, tj. računanja sve tri koordinate tačaka iz terestričkih mjerenja geometrijskih parametara (horizontalnih i vertikalnih pravaca i uglova, te dužina). Treba naglasiti da su ova određivanja relativna, nikako apsolutna. Apsolutna određivanja se mogu odrediti samo ako su specificirane koordinate tačke opažača u globalnom sistemu.

Naravno, danas postoje satelitski sistemi pomoću kojih “rutinski” i “jednostavno” određujemo 3D koordinate u globalnom sistemu. Historijski gledano (u predsatelitskoj eri) 3D koordinate se nisu mogle realizirati veoma tačno, a zbog jakog utjecaja atmosfenske refrakcije na terestrička mjerenja vertikalnih uglova. Ovo je jedan od glavnih razloga da su državne geodetske kontrolne mreže bile razdvojene na horizontalne i vertikalne mreže. Da bi se postigla viša tačnost vertikalnih mreža, one su rađene nivelmanom. Tako se može reći da vertikalne

(nivekmanske) mreže nisu strogo govoreći geometrijske jer se zasnivaju na geopotencijalu.

Obrnuta transformacija iz $(\Delta x_{PQ}, \Delta y_{PQ}, \Delta z_{PQ})$ u (C_{PQ}, V_{PQ}, A_{PQ}) dobije se jednostavno jer je transformacijska matrica ortogonalna.

$$\begin{bmatrix} u_{PQ} \\ v_{PQ} \\ w_{PQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \Phi_P \cos \Lambda_P & -\sin \Lambda_P & \cos \Phi_P \cos \Lambda_P \\ -\sin \Phi_P \sin \Lambda_P & \cos \Lambda_P & \cos \Phi_P \sin \Lambda_P \\ \cos \Phi_P & 0 & \sin \Phi_P \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta x_{PQ} \\ \Delta y_{PQ} \\ \Delta z_{PQ} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Primjenom jednačine (3.51) može se dokazati da je:

$$\tan A_{PQ} = \frac{v_{PQ}}{u_{PQ}} = \frac{-\Delta x_{PQ} \sin \Lambda_P + \Delta y_{PQ} \cos \Lambda_P}{-\Delta x_{PQ} \sin \Phi_P \cos \Lambda_P - \Delta y_{PQ} \sin \Phi_P \cos \Lambda_P + \Delta z_{PQ} \cos \Phi_P} \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} \sin V_{PQ} &= \frac{w_{PQ}}{C_{PQ}} = \\ &= \frac{1}{C_{PQ}} (\Delta x_{PQ} \cos \Phi_P \sin \Lambda_P + \Delta y_{PQ} \cos \Phi_P \sin \Lambda_P \\ &\quad + \Delta z_{PQ} \sin \Phi_P) \end{aligned} \quad (3.53)$$

$$C_{PQ} = \sqrt{\Delta x_{PQ}^2 + \Delta y_{PQ}^2 + \Delta z_{PQ}^2} \quad (3.54)$$

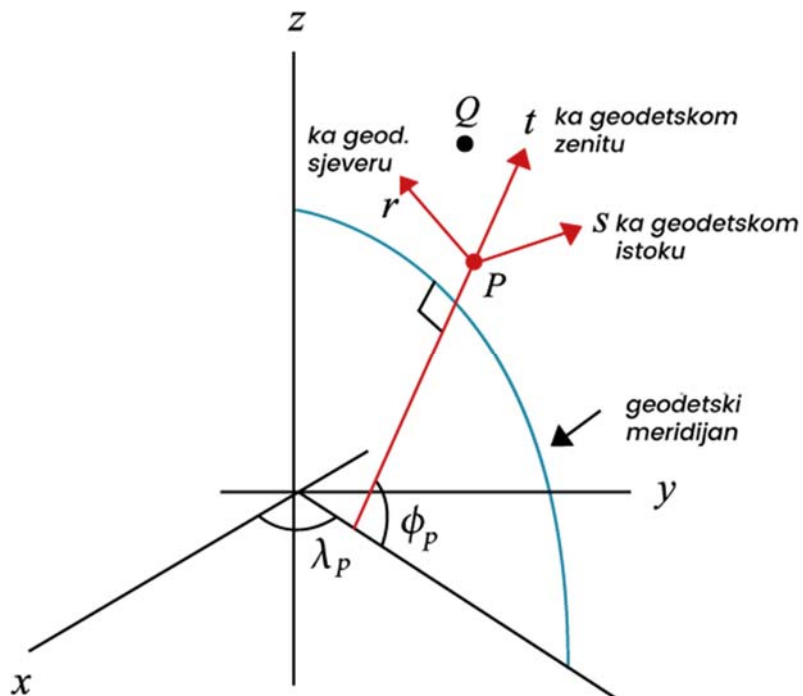
Analogne jednačine se mogu izvesti za lokalni geodetski koordinatni sistem.

3.8.2 Lokalni geodetski koordinatni sistem

U slučaju lokalnog geodetskog koordinatnog sistema normala na elipsoid definira položaj treće osi, kao što pokazuje Slika 3-17. Ostale dvije osi su međusobno okomite i pozicionirane slično kao u lokalnom astronomskom sistemu: usmjerene su ka sjeveru i istoku, a leže u ravnini koja je okomita na normalu, tj. u horizontalnoj (približno) ravnini stajališta instrumenta.

Pretpostavlja se da je elipsoid centriran u ishodištu Kartezijevog geocentričnog (x, y, z) sistema. Koordinatne osi lokalnog geodetskog sistema

označene se ovdje kao $(r, s, t)^{44}$. Glavna razlika između lokalnog geodetskog i lokalnog astronomskeg koordinatnog sistema je pravac koji definira odgovarajuće osi. Posebno se naglašava specifičnost treće osi, koja je u slučaju geodetskog lokalnog sistema definirana pomoću geodetske širine i dužine.



Slika 3-17: Lokalni geodetski koordinatni sistem
(prema Jekeli, 2016, str. 2-55)

Ovo znači da se, analogno transformacijama za lokalni astronomskeg sistem (3.50), (3.52), (3.53) i (3.54), jednostavno mogu dobiti transformacije za lokalni geodetski sistem, ako se u formulama iz prethodnog podpoglavlja, jednostavno zamijene astronomske koordinate, širina i dužina, (Φ_P, Λ_P) , s geodetskom širinom i dužinom, (ϕ_P, λ_P) te se dobije izraz (3.55):

⁴⁴ Koordinatne osi ovog lokalnog geodetskog referentnog sistema se u literaturi često označavaju kao N, E, U (engl. north, east, up, u prevodu: sjever, istok, gore) ili malim slovima n, e, u . Ovdje su oznake prema (Jekeli, 2012).

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{PQ} \\ \Delta y_{PQ} \\ \Delta z_{PQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \phi_P \cos \lambda_P & -\sin \lambda_P & \cos \phi_P \cos \lambda_P \\ -\sin \phi_P \sin \lambda_P & \cos \lambda_P & \cos \phi_P \sin \lambda_P \\ \cos \phi_P & 0 & \sin \phi_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{PQ} \cos V_{PQ} \cos A_{PQ} \\ C_{PQ} \cos V_{PQ} \sin A_{PQ} \\ C_{PQ} \sin V_{PQ} \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

gdje je α_{PQ} azimut normalnog presjeka sa tačke P na tačku Q, a v_{PQ} je vertikalni ugao u normalnoj ravnini sa tačke P ka tački Q. Obrnute relacije su data kao (3.56), (3.57) i (3.58):

$$\tan \alpha_{PQ} = \frac{v_{PQ}}{u_{PQ}} = \frac{-\Delta x_{PQ} \sin \lambda_P + \Delta y_{PQ} \cos \lambda_P}{-\Delta x_{PQ} \sin \phi_P \cos \lambda_P - \Delta y_{PQ} \sin \phi_P \cos \lambda_P + \Delta z_{PQ} \cos \phi_P} \quad (3.56)$$

$$\sin V_{PQ} = \frac{w_{PQ}}{C_{PQ}} = \frac{1}{C_{PQ}} (\Delta x_{PQ} \cos \phi_P \sin \lambda_P + \Delta y_{PQ} \cos \phi_P \sin \lambda_P + \Delta z_{PQ} \sin \phi_P) \quad (3.57)$$

$$C_{PQ} = \sqrt{\Delta x_{PQ}^2 + \Delta y_{PQ}^2 + \Delta z_{PQ}^2} \quad (3.58)$$

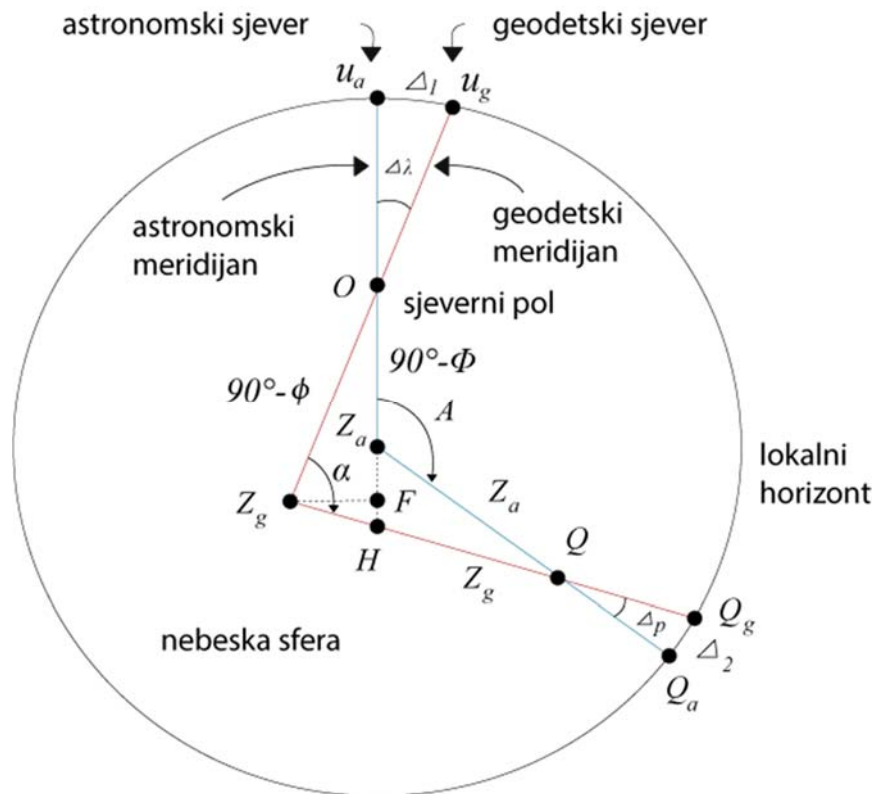
Posljednje formule se primjenjuju kad je potrebno odrediti azimut normalnog presjeka, vertikalni ugao (u normalnoj ravnini) i dužinu iz Kartezijevih koordinatnih razlika između dvije tačke, ako su koordinatne razlike izvedene iz GNSS satelitskih mjerenja. Ove formule važe za bilo koju tačku, a ne samo tačke koje se nalaze na površini elipsoida. Treba zapamtiti da formula (3.56) služi za računanje azimuta normalnog presjeka, a ne geodetskog azimuta⁴⁵.

⁴⁵ Geodetski azimut je ugao koji u horizontalnoj ravnini zaklapaju geodetski meridijan (prolazi kroz geodetski sjever) i geodetska linija. Geodetska linija je najkraće rastojanje između dvije tačke. U ravnini ima oblik pravca, na sferi je to kružnica, a na elipsoidu je to kriva linija koju i matematičari nazivaju geodetskom linijom. Za detalje vidjeti (Muminagić, 1981).

3.9 Razlike geodetskih i astronomskih veličina

Astronomska širina, dužina i azimut se mogu opažati na osnovu koordinatnog sistema koji se definira i realizira po prirodnim zakonima, a obrađeni su u prethodnom podpoglavlju. Ove veličine su ovisne o pravcu vektora sile teže u posmatranoj tački. Međutim, za mnoge geodetske projekte i kartografisanje se koriste geodetske koordinate, koje se zasnivaju na matematički definiranom elipsoidu. Da bi se mjerene veličine povezale s matematičkim i geografski korisnim vrijednostima, potrebno je definirati jednačine za razlike između geodetskih i astronomskih koordinata, također za razliku između geodetskih i astronomskih azimuta. Ove jednačine su veoma važne u realizaciji pravilne međusobne orijentacije ova dva sistema.

Slika 3-18 pokazuje nebesku sferu, kad je posmatrana izvana, tj. iz tačke astronomskog zenita. Drugim riječima, posmatra se duž tangente na težišnicu, ili duž koordinate w lokalnog astronomskog koordinatnog sistema.



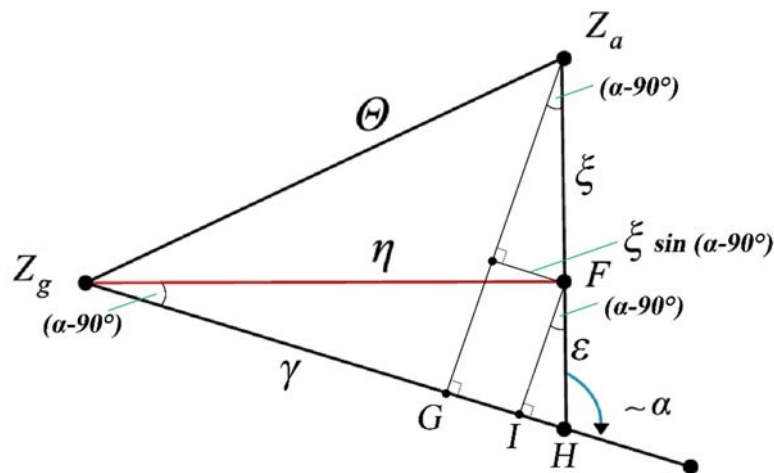
Slika 3-18: Astronomska i geodetska azimut (prema Jekeli, 2016, str. 2-59)

Sve tačke na ovoj sferi su projekcije radijalnih pravaca. Kako su za ova razmatranja važni samo pravci, vrijednost radijusa nije važna, i može se smatrati da je jednaka 1 (jedinični radijus). Tako su uglovi između radijalnih pravaca ekvivalentni lukovima velikih krugova na sferi, izraženi u radijanima.

Krug koji predočava Slika 3-18 je astronomski horizont. Tačka Z_a označava astronomski zenit, tačka Z_g je geodetski zenit, tj. projekcija normale na elipsoid kroz opažanu tačku P . Luk između dva zenita, obilježen kao Θ , predstavlja *astro-geodetski otklon težišnice* ili *otklon vertikale*. Drugim riječima, to je odstupanje tangente na pravac sile teže od matematički definirane vertikale, tj. normale na elipsoid.

Ovaj otklon Θ se može rastaviti na dvije komponente, tj. dva ugla, kao što pokazuje Slika 3-:

1. meridijanska komponenta otklona-ugao u pravcu jug-sjever, označen kao ξ , tj. luk $Z_a F$.
2. komponenta u smjeru prvog vertikala-ugao u pravcu zapad-istok, označen kao η , tj. luk $Z_g F$.



Slika 3-19: Komponente otklona težišnice (modificirano prema Jekeli, 2016, str. 2-59)

Projekcije astronomskog meridijana i geodetskog meridijana sijeku se na nebeskoj sferi zbog pretpostavke da su polarne osi dva sistema paralelne. Čak i kad ravnina astronomskog meridijana ne sadrži z os, činjenica da su obje ravnine paralelne z osi implicira da se na nebeskoj sferi njihove projekcije sijeku u projekciji sjevernog pola. Na horizontu međutim, postoji razlika između astronomskog i geodetskog sjevera, koja je na slici obilježena kao Δ_1 .

Zbog pretpostavke da su x osi oba sistema paralelne, ugao u sjevernom polu između astronomskog i geodetskog meridijana je $\Delta\lambda = \Lambda - \lambda$. Iz indiciranih koordinata, astronomske i geodetske širine, može se dokazati da je iz trougla Z_gOF po kosinusnom poučku:

$$\cos(90^\circ - \phi) = \cos \eta \cos(90^\circ - \Phi + \xi) + \sin \eta \sin(90^\circ - \Phi + \xi) \cos 90^\circ \quad (3.59)$$

Zbog činjenice da je η mali ugao (obično reda veličine ne većeg od $10''$) dobije se nejednačina (3.60):

$$\sin \phi \approx \sin(\Phi - \xi) \quad (3.60)$$

Prema tome, formula za računanje približne vrijednosti komponente otklona težišnice u pravcu meridijana izgleda kao jednačina (3.61):

$$\xi \approx \Phi - \phi \quad (3.61)$$

Ako se na sferni trougao Z_gOF primijeni sinusni poučak, dobije se jednačina (3.62):

$$\frac{\sin \eta}{\sin \Delta\lambda} = \frac{\sin(90^\circ - \phi)}{\sin 90^\circ} \quad (3.62)$$

Uz aproksimaciju se dobije otklon težišnice u smjeru prvog vertikalala, koja izgleda kao jednačina (3.63):

$$\eta = (\Lambda - \lambda) \cos \phi \quad (3.63)$$

Prema tome, sjeverna i istočna komponenta otklona težišnice ξ i η su u biti razlike između astronomske i geodetske širine i dužine, respektivno.

Luk velikog kruga, $u_a Q_a$ na Slika 3-18 je astronomski azimut A , ka ciljnoj tački Q . Luk velikog kruga (približno, jer su dva zenita bliska) $u_g Q_g$ je geodetski azimut normalnog presjeka ciljne tačke α . Prema tome, iz Slika 3-18 se dobije razlika astronomskog i geodetskog azimuta kao u jednačini (3.64):

$$A - \alpha = u_a Q_a - u_g Q_g = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (3.64)$$

Za rješenje jednačine (3.64) potrebno je izvesti matematičke izraze za Δ_1 i Δ_2 . Iz sinusnog poučka koji se primijeni na trougao $u_g O u_a$, a uz aproksimaciju malih uglova, slijedi da je:

$$\frac{\sin \Delta_1}{\sin \Delta \lambda} = \frac{\sin \phi}{\sin 90^\circ} \Rightarrow \Delta_1 = \Delta \lambda \sin \phi \quad (3.65)$$

Slično, iz trougla $Q_g Q Q_a$ sinusni poučak daje izraz (3.66):

$$\frac{\sin \Delta_2}{\sin \Delta_p} = \frac{\sin(90^\circ - z_g)}{\sin 90^\circ} \Rightarrow \Delta_2 = \Delta_p \cos z_g \quad (3.66)$$

Također, iz trougla $Z_a Q H$ (Slika 3-18) slijedi (3.67):

$$\frac{\sin \Delta_p}{\sin(\xi + \varepsilon)} = \frac{\sin \alpha}{\sin z_a} \Rightarrow \Delta_p = (\xi + \varepsilon) \frac{\sin \alpha}{\sin z_a} \quad (3.67)$$

Konačno se iz približno ravnog trougla $Z_g F H$ dobije jednačina (3.68) :

$$\varepsilon = \frac{\eta}{\tan(180^\circ - \alpha)} \quad (3.68)$$

Ovaj izraz (3.68) se može dobiti ako se primijeni sinusni i kosinusni poučak na sferne trouglove, te ako se primijene aproksimacije za male uglove. Ako se jednačine (3.67) i (3.68) uvrste u jednačinu (3.66) dobije se izraz (3.69):

$$\Delta_2 = (\xi + \varepsilon) \sin \alpha \cot z = (\xi \sin \alpha - \eta \cos \alpha) \cot z \quad (3.69)$$

U gornjem izrazu je uvedena aproksimacija $z \approx z_g \approx z_a$ zbog toga što je Δ_2 mala veličina. Do konačnih formula dolazi se kombiniranjem jednačina (3.65) i (3.69) s jednačinom (3.64):

$$A - \alpha = (\Lambda - \lambda) \sin \phi + (\xi \sin \alpha - \eta \cos \alpha) \cot z \quad (3.70)$$

Jednačina (3.70) poznata je kao prošireni *Laplaceov*⁴⁶ uvjet. Treba imati na umu da je u gornjim formulama α označavao azimut normalnog presjeka, a ne geodetske linije. Drugi član na desnoj strani jednačine (3.70) je prošireni dio koji

⁴⁶ Pierre-Simon, markiz Laplacea (1740-1827) je bio francuski matematičar i astronom. Smatra se jednim od najvećih znanstvenika svijeta. Njegovo ime nalazi se na listi od 72 znanstvenika ugraviranih na Eiffelovom tornju. Poznat po tome što je sazeo i proširio radove svojih prethodnika, formulirao je jednačinu i utemeljio hipotezu porijekla Sunčevog sistema. Bio je jedan od prvih znanstvenika koji je najavio postojanje crnih rupa i naslutio pojavu gravitacijskog kolapsa. Ponekad se naziva francuskim Newtonom. Otkrio je zakon o nepromjenjivosti srednjih vremena kretanja planeta oko Sunca i ovisnost sekularnih promjena u ekscentricitetu Zemljine putanje o gravitaciji Mjeseca (nutacija). Proučavao je plimne valove. U tumačenju znanstvenih podataka uveo je teoriju vjerovatnoće.

se poništava (ili se približno poništava) za ciljne tačke na horizontu, gdje je zenitni ugao jednak 90° .

Iako je veza između astronomskog i geodetskog azimuta u nekoj tački posljedica pretpostavke da su odgovarajuće osi dva koordinatna sistema paralelne, njegova primjena na opažani astronomski azimut ponovo osigurava ovaj paralelizam, tj. to je dovoljan uvjet. Geodetski azimut normalnog presjeka α , koji je određen u skladu s jednačinom (3.70) iz opažanih astronomskih vrijednosti naziva se *Laplaceov azimut*.

Jednostavni Laplaceov uvjet koji vrijedi kad je z jednako 90° glasi kao (3.71):

$$A - \alpha = (\Lambda - \lambda) \sin \phi \quad (3.71)$$

Ovaj uvjet daje razliku azimuta koja je zajednička za sve ciljne tačke na jednom stajalištu. Javlja se zbog neparalelizma ravnina astronomskog i geodetskog meridijana u tački opažača, kao što pokazuje Slika 3-18.

Jednostavni Laplaceov uvjet je također Besselova jednačina izvedena za geodetsku liniju. Drugi član proširene jednačine Laplaceovog uvjeta (3.70), za ciljne tačke čiji zenitni ugao nije jednak 90° , zavisi od azimuta ciljne tačke. Ovo je analogno pogreškama u mjerenim uglovima pomoću teodolita čija vertikalna os nije u prostoru vertikalna, tj. mjehur libele odstupa.

Na slici 3-19 također je pokazan otklon vertikale u smjeru azimuta α . Označen je kao γ , tj. luk između tačaka geodetskog zenita Z_g i tačke G , može se dobiti kao $\gamma = \widehat{Z_g G} = \widehat{Z_g I} - \widehat{GI}$, a računa se prema sljedećem izrazu:

$$\gamma = \eta \cos(\alpha - 90^\circ) - \xi \sin(\alpha - 90^\circ) = \eta \sin \alpha + \xi \cos \alpha \quad (3.72)$$

3.10 NEBESKE KOORDINATE

U klasičnim geodetskim mrežama su se za određivanje ishodišta koordinatnog sistema i orijentaciju u prostoru referentnih trigonometrijskih mreža najviših redova, primjenjivale različite optičke metode geodetske astronomije. Principi ovih metoda se uglavnom zasnivaju na mjerenjima uglova (ili pravaca) ka zvijezdama ili drugim nebeskim tijelima, u odnosu na položaj opažača na površini Zemlje. U postupku određivanja astronomskih koordinata stanica opažača, astronomska mjerenja se kombiniraju s unaprijed poznatim koordinatama nebeskih tijela, koji se objavljuju u zvjezdanim katalozima.

3.10.1 Zvezdani katalogi

Zvezdani katalog je popis skupova zvijezda i drugih svemirskih objekata, poredanih prema koordinatama zvijezda i drugim važnim osobinama, kao što su: magnituda (jačina sjaja), boja, prividno kretanje, itd.

Najstariji poznati zvezdani katalog napravili su Babilonci, a datira iz perioda oko 1500 godina p.n.e. Ovi katalogi su izrađeni na glinenim pločama a sadrže popis od 36 najsjajnijih zvijezda, s opisom njihovog položaja na nebeskom svodu. Položaji manje sjajnih zvijezda opisani su prema njihovom odnosu na tih 36 sjajnih zvijezda.

Iz perioda antičke Grčke, postoje katalogi koje su sastavili različiti autori. Eudoks (grč. *Eudoksos*) iz Knida je poznat po zvezdanom katalogu nazvanom Pojave, tj. *Phaenomena* (grč. *Φαινόμενα*). Katalog je objavljen 370. g.p.n.e. a sadržavao je opis položaja tada poznatih zvijezda, kao i vremena njihova izlaska i zalaska. U trećem stoljeću prije nove ere, objavljeni su katalogi koji su izrazili položaje u odnosu na ekliptiku. Također je veoma poznat katalog koji je oko 130. g.p.n.e. sastavio Hiparh iz Nikeje koji je sadržavao položaje i prividne magnitute za oko 850 zvijezda. Još jedan slavni autor zvezdanog kataloga iz perioda antičke Grčke je Klaudije Ptolomej. Ovaj katalog objavljen je oko 150. g.p.n.e. a sadržavao je 1022 zvijezde, s njihovim položajima i prividnim magnitudama.

Perzijski astronom Abd al-Rahman al-Sufi u svojoj knjizi o zvijezdama stajačicama⁴⁷ iz 964. godine, (*Kitāb al-kawākib al-thābita al-musawwar*) ažurirao je i dopunio Ptolemejev katalog, te zabilježio položaje, magnitute i boje za 1 018 zvijezda. Mongolski astronom Ulug-beg izradio je 1437. katalog položaja 992 zvijezde. Za više detalja vidjeti (Hrvatska enciklopedija, 2017).

U Evropi se razvoj znanstvene misli zahuktao tek u periodu nazvanom znanstvena renesansa (početak u 15. i 16. stoljeću). Tako je njemački astronom i matematičar Johann(es) Kepler (1571-1630.) objavio 1627. godine, Rudolfske tablice (*Tabulae Rudolphinae*), uključujući katalog koji je obuhvaćao podatke za 1 005 zvijezda. Poznat je, između ostalog, po izumu nazvanom Keplerov teleskop.

Nakon izuma teleskopa, različiti su evropski astronomi objavili kataloge, koji su napravljeni uz pomoć astronomskih opažanja objekata, a koji uključuju i nebeske

⁴⁷ *Kitāb al-kawākib al-thābita al-musawwar*

objekte koji nisu vidljivi golim okom. Tako je broj zabilježenih objekata stalno rastao, a tačnost njihovih položaja je povećavana.

Zvezdani katalozi novijeg doba su naravno bolje tačnosti. U predsatelitskoj eri su bili često u upotrebi njemački Fundamentalni katalozi – FK. Savremeni katalozi su npr. Gaia, Hipparcos i Tycho, koji su izrađeni iz opažanja svemirskih astronomskih misija za mjerenje položaja, dužina, sopstvenih kretanja i boja zvijezda.

Naziv prvog svemirskog satelita za preciznu astrometriju je Hipparcos⁴⁸. Bio je to u potpunosti projekat Evropske svemirske agencije – ESA. Misija je trajala od 1989. do 1993. godine. Ohrabrena rezultatima ove svemirske misije, ESA je lansirala novu misiju nazvanu Gaia⁴⁹. Na osnovu ovih opažanja, objavljen je u septembru 2016. godine, do sad najopsežniji (sadrži milijarde nebeskih objekata) i najtačniji zvezdani katalog. Bio je oko 200 puta tačniji od svog prethodnika Hipparcosa. Rezultirao je to iz podataka prikupljenih tokom hiljadu dana rada Gaia svemirskog instrumenta. Najznačajniji rezultat ove misije je trodimenzionalna karta naše galaksije i okolnog svemira. (eOP, 2017 b)

Dakle, od savremenih zvezdanih kataloga najopsežniji su *Gaia katalog*, potom *Katalog Hipparcos* (eng. Hipparcos Catalogue, 1997.). Hipparcos je sadržavao podatke za položaje 118 218 zvijezda do prividne magnitude $m = 12,4$, s tačnošću od 0,002". Treći savremeni katalog je *Tychov katalog* (eng. Tycho Catalogue, 1997.), s manje preciznim podacima za 1 058 332 zvijezde, i *Drugi Tychov katalog* (eng. Tycho-2 Catalogue, 2000), s poboljšanim podacima za 2 539 913 zvijezda. Zadnja tri navedena kataloga izrađena su na osnovi podataka dobivenih mjerenjima astronomskoga satelita *Hipparcos*.

Postoje također i drugi savremeni specijalizirani zvezdani katalozi, koji se izrađuju za dvojne zvijezde, na primjer *Aitkenov katalog dvojnih zvijezda* (engl. Aitken's Double Star Catalogue - ADS, 1932.), za bliske zvijezde, na primjer *Glieseov katalog bliskih zvijezda* (engl. Gliese Catalogue of Nearby Stars, 1957.), promjenljive zvijezde, na primjer *Opći katalog promjenljivih*

⁴⁸ Prvi svemirski teleskop nazvan je Hipparcos (High precision parallax collecting satellite). Također, ovo ime se odnosi na grčkog astronoma Hiparh od Niceje za kojeg se smatra da je prvi primijenio trigonometriju u astronomiji i prvi otkrio precesiju ekvinocija.

⁴⁹ Misija je dobila ime Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) po prvim namjeravanim ciljevima, koji jesu izmijenjeni ali je ime ostalo nepromijenjeno. Više o ovoj temi razmatra se na diplomskom studiju.

zvijezda (engl. The General Catalog of Variable Stars – GCVS), koji se neprekidno se dopunjava), itd.

Obično su koordinate u katalogima date u ekvatorskom nebeskom koordinatnom sistemu, za epohu ponoć određenog datuma u godini, te ih treba svoditi na epohu opažanja. Pri mjerenima uglova ili pravaca ka nebeskim tijelima mora se mjeriti tačno vrijeme opažanja.

3.10.2 Astronomske koordinate u geodeziji

U klasičnim terestričkim astronomskim metodama određivali su se sljedeći parametri relevantni za geodetsku teoriju i praksu:

- 1) Astronomske koordinate⁵⁰ (Φ, Λ):
 - a) izabrane tačke na fizičkoj površini Zemlje kao ishodišta koordinatnog/referentnog sistema,
 - b) niza kontrolnih stajališta u trigonometrijskoj mreži.
- 2) Astronomske azimut:
 - a) jedne (izlazne) strane triangulacijske mreže u ishodišnoj tački, što je služilo kao orijentacija,
 - b) izabranih trigonometrijskih strana na kontrolnim, tkz. Laplaceovim tačkama, koji su služili kao kontrola orijentacije mreže.

Da bi se odredile astronomske koordinate (Φ, Λ) neke tačke na Zemlji, potrebno je mjeriti pravce (ili uglove) ka zvijezdama, u odnosu na položaj stajališta opažača, koji se nalazi na površini Zemlje.

U postupku određivanja astronomskih koordinata stanica opažača, astronomska mjerenja se kombiniraju s unaprijed poznatim koordinatama nebeskih tijela.

⁵⁰ Astronomske koordinate se u klasičnoj literaturi često nazivaju geografskim koordinatama. Imajući u vidu da ove koordinate određuju astronomi i specijalizirani geodeti, a da geografima visoka tačnost koordinata za izradu geografskih karata u sitnim razmjerama nije neophodna, ovdje se koordinate određene astronomskim metodama ipak nazivaju astronomskim. Toliko dugujemo ljudima koji se bave ovim nimalo jednostavnim zadacima. Tačnost geografskih koordinata nije velika ako se usporedi s geodetskim stavovima. Geografi pri izradi geografskih karata sitnijeg mjerila oblik Zemlje često aproksimiraju sferom i to je sasvim dovoljna tačnost za njihove potrebe.

Potrebno je razumjeti kako se nebeske koordinate definiraju i kako je moguće povezati terestrička opažanja s astronomskim koordinatama. Kasnije će se ukratko, bez detaljnih razmatranja objasniti orijentacija terestričkih koordinatnih sistema u odnosu na inercijski svemir.

Ovdje se razmatraju samo pravci, ili uglovi, jer su nebeski objekti koji su relevantni za ovu materiju, veoma udaljeni od opažača koji se nalazi na površini Zemlje. Prema tome, koordinatni pravci ka opažanim objektima, kao i pravci općenito, projiciraju se radialno na nebesku sferu. Ova imaginarna sfera ima beskonačno dug radijus, i proizvoljno se može izraziti kao da je jednak jedinici.

Formalno, može se smatrati da je centar sfere smješten u centar mase solarnog sistema, koji se zove baricentar. Međutim, budući da su opažani objekti beskonačno udaljeni od opažača, može se zbog pojednostavljenja problema zanemariti udaljenost od geocentra do baricentra ili pak od topocentra do geocentra. Tako, ishodište nebeske sfere za aktualno razmatranje, može biti smješteno u geocentar ili u tačku opažača, što za tačnost klasičnih geodetskih metoda nije bilo relevantno.

Ovo će pojednostaviti transformaciju iz jednog u drugi sistem, a da se pri tom ne moraju uvoditi korekcije, ovisno o zahtijevanoj tačnosti u računanjima. Ovo posebno nije relevantno za veoma udaljene objekte u svemiru, koje zovemo kvazarima (*engl. quasar*⁵¹). Treba naglasiti da je najvažnije da, nebeska sfera ne smije vremenom rotirati, drugim riječima da ona definira inercijski sistem, pri čemu se zanemaruje opći relativitet.

Nebeske koordinate relevantne za geodete, definiraju se u tri različita nebeska koordinatna sistema. Sistemi su razvrstani prema osnovnim ravninama koje ih definiraju. Te ravnine su: horizontska, ekvatorska i ekliptička⁵². Tako, postoje sljedeći koordinatni sistemi za definiranje nebeskih koordinata:

- 1) *Horizontski nebeski koordinatni sistem,*
- 2) *Ekvatorski nebeski koordinatni sistem,* koji se dalje dijeli u dva tipa:
 - a) *Nebeski ekvatorski ili ekvatorski sistem s rektascenzijom,* u kojem se definiraju položaji nebeskih tijela,

⁵¹ Engleska riječ quasar vodi porijeklo od kvazi-zvjezdani radio izvor (*engl. quasi-stellar radio source*).

⁵² Za istraživanja u našoj galaksiji ili izvan galaksije, nebeski sistemi bi se proširili u svojoj definiciji. Ovdje se međutim suzdržavamo tog širenja teme.

- b) *Mjesni nebeski ili ekvatorski sistem satnog ugla*, koji povezuje horizontski i nebeski ekvatorski sistem.

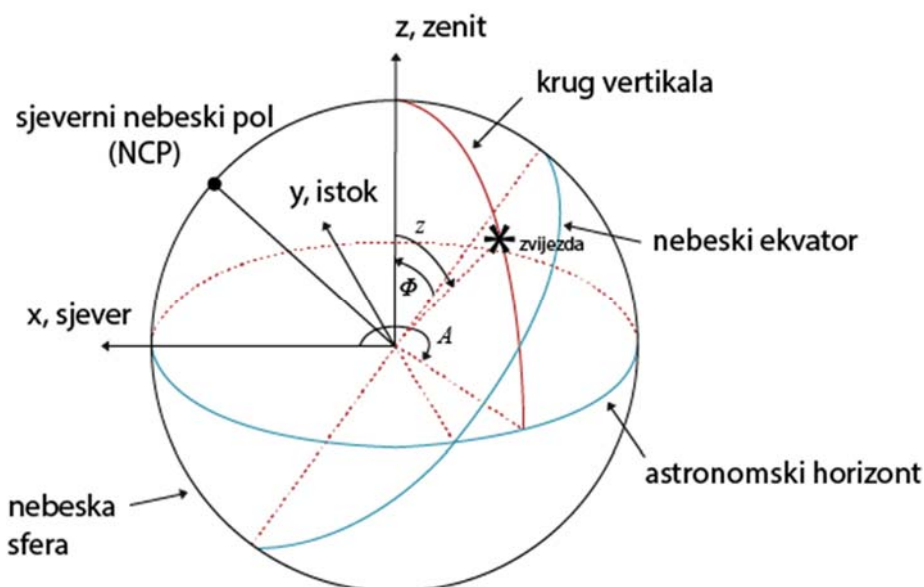
3) *Ekliptički nebeski koordinatni sistem.*

Svaki od navedenih sistema je definiran s tri međusobno okomite osi, koje imaju vezu s specifičnim prirodnim pravcima. Za svaki sistem je potrebno imati najmanje dva takva pravca. Sistemi su ili lijevo ili desno orijentirani.

3.10.3 Horizontski nebeski sistem

Horizontski sistem nebeskih koordinata (Slika 3-) definiran je na nebeskoj sferi pomoću:

1. pravca sile teže u tački opažaća,
2. pravcem Zemljine obrtne osi, koja siječe nebesku sferu u sjevernom nebeskom polu NCP (North Celestial Pole).



Slika 3-20: Horizontski nebeski sistem, u kojem su definirane koordinate zvijezde (A, z) u tački opažanja koja ima astronomsku širinu Φ . (prema Jekeli 2016, str.2-65)

Osnovna ravnina u ovom sistemu je ravnina pravog (nebeskog) horizonta. Druga osnovna ravnina je ravnina astronomskog meridijana koji prolazi kroz stanicu opažača, pa se zove mjesni astronomski (nebeski) meridijan. Prva pretpostavka u ovom razmatranju je: treća os, tj. obrtna os je čvrsto vezana za Zemlju i svemir.

Kasnije će se ovaj problem detaljno razmotriti u smislu definicije pravca ka polu, kako u terestričkim tako i nebeskim koordinatnim sistemima. Pozitivan pravac treće osi horizontskog sistema je usmjeren suprotno pravcu sile teže, tj. os je usmjerena prema gore.

Ukratko, pozitivni dio treće osi usmjeren je ka zenitu. Prva os je definirana kao okomita na treću os, a nalazi se u ravnini mjesnog astronomskog meridijana, te je pozitivna ka sjeveru. Druga os je okomita na prvu i treću, i pozitivna je ka istoku.

Dakle, ovo je *lijevi koordinatni sistem*. Presjek nebeske sfere s ravninom koja prolazi kroz zenit i opažani objekat (zvijezdu) zove se *vertikalni krug*. Trenutne koordinate⁵³ zvijezde ili nekog drugog opažanog objekta, u horizontskom sistemu su *zenitni ugao* i *astronomski azimut*. Ovaj koordinatni sistem se zato ponekad naziva i *nebeski azimutalni koordinatni sistem*.

Astronomski azimut A je ugao između ravnine mjesnog astronomskog meridijana i ravnine vertikala kroz nebesko tijelo (zvijezdu ili satelit). Kreće se od 0° do 360° . *Zenitna daljina z* je ugao u ravnini mjesnog vertikala, između pravca ka zenitu i pravca ka nebeskom tijelu (zvijezdi), mjeren od zenita Z.

Astronomski azimut se određuje posredno iz mjerenih horizontalnih pravaca ka zvijezdi i prema nekom drugom vidljivom objektu ili referentnom pravcu. Sve se ove mjerene veličine nazivaju “astronomske” jer se radi o pravcima i uglovima, koji su definirani pravcem ka astronomskom zenitu opažačke stanice. Horizontski sistem je pričvršćen za tijelo Zemlje, te se koordinate nebeskih objekata vremenom mijenjaju zbog rotacije Zemlje, ali zavise i od položaja opažane stanice, tj. različite su za svaku tačku na Zemlji.

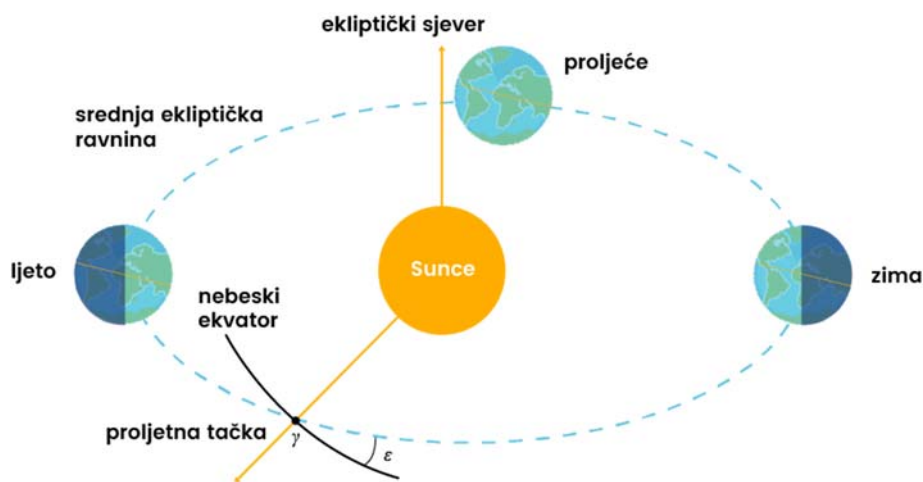
⁵³ Ovdje se uvodi pojam trenutnih koordinata jer se nebeska tijela na nebeskoj sferi kreću, te se koordinate mijenjaju kroz vrijeme.

3.10.4 Ekvatorski nebeski sistem

Ekvatorski nebeski koordinatni sistem naziva se i ekvatorski nebeski sistem s rektascenzijom jer je jedna koordinata u ovom sistemu rektascenzija. U ovom sistemu se jednoznačno određuju položaji nebeskih tijela. Taj položaj je definiran koordinatama: *rektascenzijom α* i *deklinacijom δ* . Osnovna ravnina je nebeski ekvator a sekundarna ravnina naziva se deklinacijska ravnina ili ravnina satnog kruga. Satni krug sadrži Zemljinu obrtnu os i prolazi kroz nebeski objekat (zvijezdu). Za definiranje položaja osnovne i sekundarne ravnine potrebno je imati definirane sljedeće osnovne pravce (odnosno tačke) na nebeskoj sferi:

1. pravac Zemljine obrtne osi (sjevernog nebeskog pola-NCP) za definiranje položaja nebeskog ekvatora,
2. pravac sjevernog ekliptičkog pola (engl. nord ecliptic pole-NEP) za definiranje položaja ekliptike.

Oba ova pravca su definirana u prirodi. Ovdje se također pretpostavlja da je sjeverni ekliptički pol-NEP fiksiran za svemir. Slika 3-19 pokazuje srednju ekliptičku ravninu. Ravnina ekliptike predstavlja ravninu u kojoj se Zemlja kreće oko Sunca⁵⁴.



Slika 3-19: Srednja ekliptička ravnina i tačka proljetnog ekvinocija γ .
(prema Jekeli, 2016, str. 2-66)

⁵⁴ Pojam srednja ekliptička ravnina predstavlja prosječnu ravninu po kojoj se Zemlja kreće oko Sunca.

Na istoj slici se zapaža pravac koji je okomit na ovu ravninu, a prolazi kroz sjeverni ekliptički pol. Tačka u kojoj se ekliptika siječe s nebeskim ekvatorom na nebeskoj sferi ima više naziva: proljetni ekvinocij⁵⁵, proljetna tačka, gama tačka, pa se tada obilježava grčkim slovom γ . Također se u literaturi ponekad naziva tačka Ovna, nazvana po istoimenom sazviježđu, u kojem se ta tačka nalazila u vrijeme antičke Grčke, kad ju je Hiparh⁵⁶ otkrio. Zbog toga se u literaturi sreće i oznaka Υ što je horoskopski znak sazviježđa Ovna. Zbog precesije, ova tačka se pomjerila i danas se nalazi u sazviježđu Riba.

Dakle, Υ tačka predstavlja proljetni ekvinocij. Sunce se u toj tački nađe kad se u prividnom godišnjem kretanju po ekliptici stigne na *nebeski ekvator*, pri svom kretanju od juga ka sjeveru, ako se posmatra sa Zemlje. To je tačka na orbiti Zemlje kad u sjevernoj hemisferi počinje proljeće⁵⁷. Ugao kojeg zaklapaju nebeski ekvator i ekliptika naziva se nagnutost ekliptike, a obilježava se grčkim slovom ε . Približna brojčana vrijednost ovog ugla iznosi 23,44°.

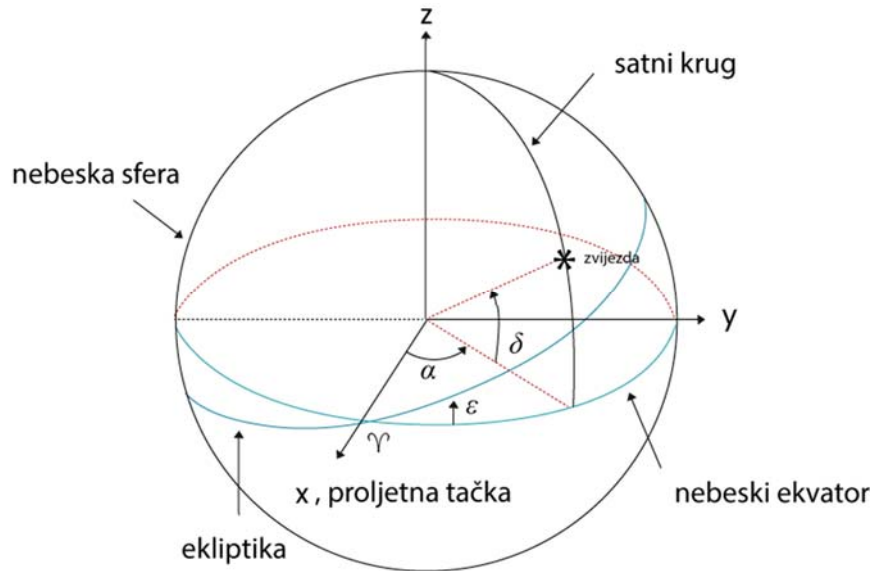
Treća os ekvatorskog nebeskog sistema je definirana pravcem ka sjevernom nebeskom polu (NCP). Prva os ekvatorskog nebeskog sistema (s rektascenzijom) definirana je pravcem ka tački ekvinocija, kao što pokazuje Slika 3-20. Ove dvije osi su po definiciji međusobno okomite, jer, kao što je naprijed navedeno, vektor koji definira pravac proljetne tačke leži u ekvatorskoj ravnini, na koju je obrtna os po definiciji okomita.

⁵⁵ *engl.* vernal equinox.

⁵⁶ Hiparh (grčki Ἰππάρχος , Hípparkhos; rođen je oko 190. godine prije naše ere u Iznik (današnja Turska), a umro je na otoku Rodos, oko 120. godine prije naše ere). Bio je poznati grčki astronom, geograf i matematičar. Već je ranije navedeno da je Hiparh obavljao vrlo tačna mjerenja položaja zvijezda i njihovih prividnih magnituda, koje je odredio u ljestvici od 1 do 6. Pripisuje mu se da je sastavio veliki zvjezdani katalog s 850 zvijezda. U katalogu je pored položaja zabilježio i prividne magnitudo. Mjerio je dužinu tropske godine i sinodičkoga mjeseca. Prema novijim spoznajama smatra se da je Hiparh svojim opažanjima samo potvrdio podatke kojima je na neki način raspolagao iz ranijih kataloga, koje su sastavili opažači starih naroda Kaldejaca, kao i drugih naroda iz stare Mesopotamije. Hiparhu se pripisuje otkriće precesije ekvinocija i nejednolikosti u Mjesečevom kretanju.

⁵⁷ Ova se tačka zove i tačka proljetne ravnodnevnice jer je dužina trajanja dana i noći tada izjednačena (oko 21. marta). Tačka ravnodnevnice nema stalan položaj među zvijezdama, nego se zbog precesije godišnje pomiče za 50,25" u susret Suncu. Zbog ovog pomaka, Sunčeva godina ili kako se još naziva, *tropska godina* je kraća za 20 minuta od zvjezdane ili sideričke godine.

Druga os je okomita na ostale dvije, na način da čini desni koordinatni sistem. Presjek nebeske sfere s ravninom koja sadrži treću os (NCP) i objekat (zvijezdu) naziva se satni krug objekta. Pretpostavlja se da je ovaj ekvatorski sistem fiksiran za svemir. Ovakav sistem je dakle, inercijalni, u smislu da ne rotira u odnosu na svemir.



Slika 3-20: Nebeski ekvatorski sistem s rektascenzijom. Koordinate nebeskih tijela izražavaju se u ovom sistemu, koordinatama (α, δ) .
(prema Jekeli, 2016, str. 2-67)

Naprijed je rečeno da su koordinate kojima se izražava položaj zvijezda ili drugih nebeskih tijela, u ekvatorskom nebeskom sistemu:

- a) deklinacija δ
- b) rektascenzija α .

Analogno sfernim koordinatama, tj. sfernoj širini⁵⁸ i dužini na Zemlji, ove koordinate se definiraju kao što slijedi:

Deklinacija δ je ugao u ravnini satnog kruga, mjeri se od ekvatora do nebeskog objekta, kreće se od 0° do 90° . *Rektascenzija* α ⁵⁹ je ugao u ekvatorskoj ravnini, od

⁵⁸ Neki autori ovu sfernu širinu nazivaju geografskom

⁵⁹ Napomena: Ne miješati rektascenziju s azimutom normalnog presjeka, iako se obilježavaju istim slovom.

proljetne tačke (tj. tačke proljetnog ekvinocija Υ) do satnog kruga kroz opažani nebeski objekat (zvijezdu), u smjeru suprotnom od kretanja kazaljke na satu, gledano iz NCP. Koordinate (δ, α) zvijezda i drugih nebeskih tijela, u ovom koordinatnom sistemu, za geodetsku upotrebu su u principu poznate⁶⁰. Pošto je ovaj koordinatni sistem fiksiran za svemir, proizlazi da su i nebeske koordinate (δ, α) fiksirane za svemir. Međutim, zvijezde imaju svoja “sopstvena kretanja”⁶¹ u ovom koordinatnom sistemu, te ona moraju biti poznata za veoma precizna astronomska mjerenja, ali se ovdje ne razmatraju.

Kao što je već rečeno postoji i ekliptički sistem, za koji se može reći da je desni koordinatni sistem. Prva os ovog nebeskog koordinatnog sistema je ista kao u nebeskom ekvatorskom sistemu. Dakle, prva os ekliptičkog sistema je pravac ka tački proljetnog ekvinocija. U ekliptičkom sistemu treća os je pravac ka sjevernom ekliptičkom polu. Koordinate u ovom sistemu su:

- 1) ekliptička širina⁶², ugao u ekliptičkom meridijanu od ekliptike do nebeskog objekta,
- 2) ekliptička dužina⁶³, ugao u ravnini ekliptike, od proljetne tačke do ekliptičkog meridijana kroz posmatrano nebesko tijelo.

3.10.3 Nebeski mjesni ekvatorski sistem

Da bi se omogućila veza između horizontskog i ekvatorskog nebeskog sistema potrebno je uvesti sistem nazvan mjesni ekvatorski sistem, koji se ponekad i naziva ekvatorski sistem sa satnim uglom. Dakle, mjerenja se rade u horizontskom sistemu, a koordinate nebeskih tijela koja se opažaju izražena su u ekvatorskom nebeskom sistemu, pomoću deklinacije i rektascenzije, (δ, α) . Sistem satnog ugla (mjesni ekvatorski) je sistem definiran pomoću prirodnih pravaca:

- 1) pravac Zemljine obrtne osi (predstavlja treću os sistema) i
- 2) pravac sile teže u opažačkoj stanici, koji zajedno s nebeskim sjevernim polom-NCP definiira ravninu lokalnog (mjesnog) astronomskog meridijana.

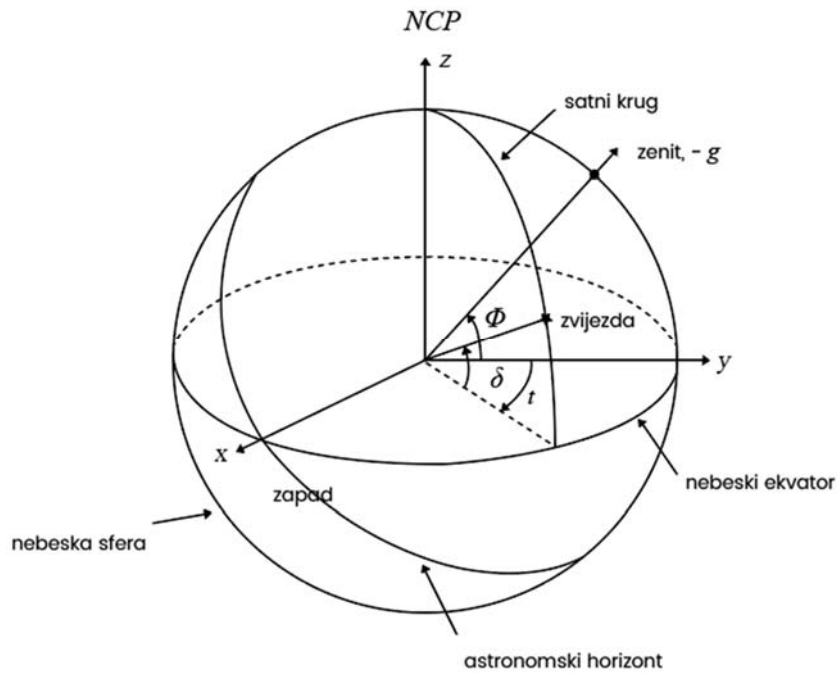
⁶⁰ Kao što je ranije rečeno, u ovom sistemu su objavljene koordinate zvijezda u tkz. Fundamentalnim katalozima FK.

⁶¹ Lateralna pomjeranja.

⁶² *engl.* ecliptic latitude

⁶³ *engl.* ecliptic longitude.

Prva os ovog sistema je presjek ravnine astronomskog meridijana s ravninom nebeskog ekvatora. Druga os je okomita na ostale dvije osi, pozitivna je ka zapadu, te tako čini desni sistem, kao što pokazuje Slika 3-21. Što se tiče satnog ugla, on je kao i u horizontskom sistemu pričvršćen za Zemlju.



Slika 3-21: Mjesni nebeski ekvatorski koordinatni sistem (sa satnim uglom).
Koordinate zvijezde izražene u ovom sistemu su (δ, t) . (Jekeli, 2016, str. 2-68)

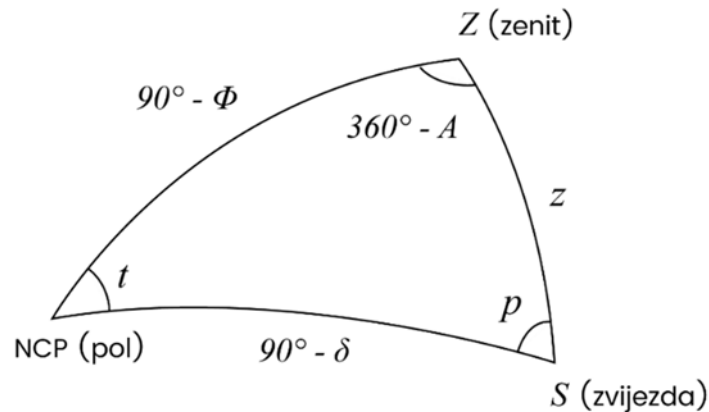
Trenutne koordinate zvijezda ili drugih nebeskih tijela u ovom sistemu su deklinacija (isto kao u ekvatorskom nebeskom sistemu s rektascenzijom) i satni ugao. Satni ugao, na Slika 3-21 obilježen kao t , je ugao u ekvatorskoj ravnini, od lokalnog astronomskog meridijana do satnog kruga kroz opažano nebesko tijelo. Mjeri se u smjeru kretanja kazaljke na satu, kad se gleda iz sjevernog pola - NCP.

Ovaj ugao se povećava u skladu s proteklom vremenom. Izražava se u jedinicama vremena (sati), bolje rečeno, mijenja se za 360° (24 h), kad se završi jedna rotacija Zemlje u odnosu na inercijalni svemir, ali za objekte pričvršćene na nebeskoj sferi. Treba zapamtiti da deklinacija ostaje konstantna kad Zemlja rotira, uz pretpostavku da pravac obrtne osi ostaje fiksna⁶⁴.

⁶⁴ Ova pretpostavka u realnoj situaciji nije tačna, jer obrtna os ima svoja različita kretanja, tj. precesiju, nutaciju i pomjeranje polova.

3.11 TRANSFORMACIJA KOORDINATA

Transformacija koordinata između horizontskog nebeskog sistema i nebeskog ekvatorskog sistema s rektascenzijom izvodi se primjenom rotacijskih matrica. Pri tom se treba voditi računa da se u prvom redu, lijevi sistem (horizontski nebeski sistem), prevede u desni sistem. Moguće je transformaciju raditi i na drugačiji način. Pri ovom drugom postupku, koji je također ispravan, primjenjuju se pravila sferne trigonometrije na nebeskoj sferi. U cilju pokazivanja ovog drugog postupka transformacije, razmotrit će se astronomski trougao, koji pokazuje Slika 3-22. Vrhovi ovog trougla su važne tačke na nebeskoj sferi, a to su zajedničke tačke za ova dva nebeska koordinatna sistema: nebeski sjeverni pol, zenit (iznad tačke opažanja) i zvijezda.



Slika 3-22: Astronomski trougao na nebeskoj sferi.

(prema Jekeli, 2016 str. 2-69)

Primjenom formula sferne trigonometrije: sinusnog poučka izraženog jednačinom (3.1), ili kosinusnog poučka izraženog jednačinom (3.2) može se izvesti sljedeća veza (3.73):

$$\begin{bmatrix} \sin z \cos A \\ \sin z \sin A \\ \cos z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \Phi & 0 & \cos \Phi \\ 0 & -1 & 0 \\ \cos \Phi & 0 & \sin \Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta \cos t \\ \cos \delta \sin t \\ \sin \delta \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Matrica na desnoj strani jednačine (3.73) je ortogonalna, te važi inverzna relacija kao u (3.74):

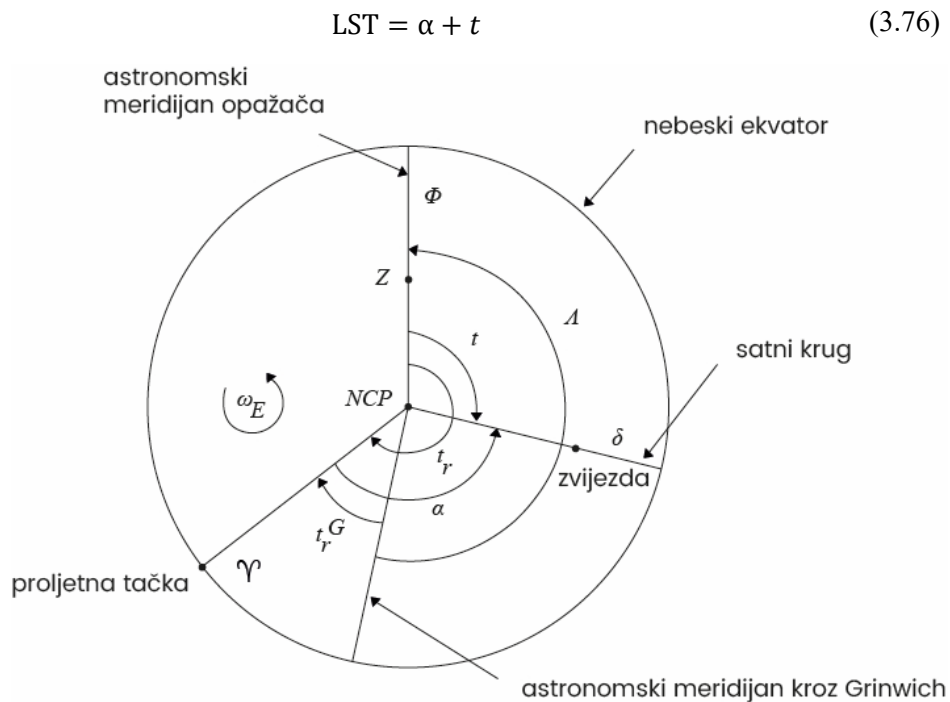
$$\begin{bmatrix} \cos \delta \cos t \\ \cos \delta \sin t \\ \sin \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \Phi & 0 & \cos \Phi \\ 0 & -1 & 0 \\ \cos \Phi & 0 & \sin \Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin z \cos A \\ \sin z \sin A \\ \cos z \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

Transformacija između (ekvatorskih nebeskih) sistema rektascenzije i satnog ugla ilustrira Slika 3-22. Satni ugao je mjera Zemljine rotacije u odnosu na referencu (zvijezdu) na nebeskoj sferi, te se ovaj ugao može specificirati kao vrsta vremena, koje se obično zove *sideričko* ili *zvjezdano vrijeme*⁶⁵.

Ako se definira izraz (3.75) za satni ugao proljetne tačke:

$$t_\gamma = \text{satni ugao proljetne tačke} = \text{lokalno zvjezdano vrijeme (LST)} \quad (3.75)$$

Onda gornja formula (3.75) definira lokalno (mjesno) vrijeme LST (Local Siderial Time), jer se odnosi na astronomski (lokalni ili mjesni) meridijan opažača. Pokazuje satni ugao nekog nebeskog tijela, čiji položaj se definira rektascenzijom α i satnim uglom t .



Slika 3-25: Transformacija između ekvatorskog nebeskog (sistema s rektascenzijom) i mjesnog ekvatorskog (ili sistema satnog ugla). (prema Jekeli, 2016, str. 2-70)

⁶⁵ Vremenske skale će kasnije biti detaljnije razmatrane.

Treba naglasiti da 24 sata sideričkog vremena odgovara satnom uglu od 360° . Satni ugao proljetne tačke za posmatrača u astronomskom meridijanu koji prolazi kroz Greenwich, obilježen je kao t_γ^G a naziva se Greenwichko zvjezdano ili sideričko vrijeme (Greenwich Sidereal Time-GST), kao što pokazuje

Slika 3-

Pregled nebeskih koordinatnih sistema relevantnih za istraživanja u geodeziji na Zemlji pokazuje Tablica 3-1. Galaktički, izvangalaktički ili sistem vezan za neko drugo nebesko tijelo u našem sunčevom sistemu nisu uključeni.

Tablica 3-1: Pregled nebeskih koordinatnih sistema (Ogrizović, 2007)

Nebeski sistem	Referentna ravnina		Parametri koji se mjere od referentne ravnine	
	primarna	sekundarna	od primarne	od sekundarne
Horizontski	nebeski horizont	astronomski meridijan	zenitni ugao	astronomski azimut
Mjesni ekvatorski	nebeski ekvator	satni krug	deklinacija	satni ugao
Nebeski ekvatorski	nebeski ekvator	satni krug (deklinacijski)	deklinacija	rektascenzija
Ekliptički	ekliptika	ekliptički meridijan	ekliptička širina/latituda	ekliptička dužina/longituda

3.12 ODREĐIVANJE ASTRONOMSKIH KOORDINATA

Detaljno razmatranje određivanja astronomskih koordinata i astronomskog azimuta umnogome prevazilazi ciljeve ovog udžbenika. Ipak, zbog potrebe razumijevanja materije definiranja geodetskog datuma klasičnih geodetskih mreža, ovdje će se u kratkim crtama iznijeti suština određivanja astronomskih koordinata iz terestričkih opažanja zvijezda. Zainteresirani čitaoci se za detaljno proučavanje ove teme upućuju na (Ševarlić i Brkić, 1981; Đonlagić, 1991, 1988 i 1986; Ogrizović, 2007).

Određivanje astronomske širine Φ moguće je izvršiti na mnogo načina. Jedna od metoda je opažanje prolaza zvijezde kroz lokalni (ili mjesni) astronomski meridijan⁶⁶ opažača. Tada je satni ugao $t = 0^\circ$, kao što pokazuje Slika 3-22. Izrazi

⁶⁶ Astronomski meridijan naziva se i mjesni meridijan.

za određivanje astronomske širine su dosta jednostavni, što se vidi iz formula (3.77) i (3.78):

$$90^\circ - \Phi = 90^\circ - \delta_N + z_N \Rightarrow \Phi = \delta_N - z_N \quad (3.77)$$

$$90^\circ - \delta_S = 90^\circ - \Phi + z_S \Rightarrow \Phi = \delta_S - z_S \quad (3.78)$$

gdje su δ_N , δ_S i z_N , z_S deklinacije i zenitni uglovi zvijezda koje prolaze sjeverno, odnosno južno od zenita kroz mjesni meridijan. Pretpostavlja se da su deklinacije zvijezda date vrijednosti⁶⁷ a zenitni uglovi su mjerene vrijednosti. Kad se ovo kombinira, dobije se astronomska širina opažane stanice po formuli (3.79):

$$\Phi = \frac{1}{2}(\delta_N + \delta_S) - \frac{1}{2}(z_N + z_S) \quad (3.79)$$

Za ovu metodu određivanje astronomske širine opažane stanice, biraju se zvijezde koje prolaze kroz lokalni astronomski meridijan s obje strane zenita. Razlog za ovo je što će se atmosferska refrakcija u opažanim zenitnim uglovima poništiti u drugom članu formule (3.79), ako su zenitni uglovi približno jednaki.

Poznavanje mjesta gdje prolazi astronomski meridijan nije kritičan faktor kad se mjeri zenitni ugao zvijezde koja se nalazi u *kulminaciji*. Zvijezda je u kulminaciji kad se nalazi u tački najviše elevacije iznad horizonta opažača. Zvijezda doseže taj položaj kad prolazi kroz mjesni meridijan.

Određivanje astronomske dužine opažača također se može raditi po različitim metodama. Ali za sve metode je neophodno unaprijed odrediti, tj. usvojiti referentni meridijan. Referenca za astronomsku širinu je ekvator koji je prirodno ustanovljen, tj. ekvator je okomit na obrtnu os Zemlje. Po konvenciji, referentni meridijan prolazi kroz Opservatoriju Greenwich u Londonu⁶⁸. Astronomska

⁶⁷ Preuzeti iz zvjezdanih kataloga FK.

⁶⁸ U vrijeme kad je ustanovljena ova astronomska opservatorija, Greenwich je bio izvan Londona, jer je za astronomska mjerenja uz primjenu optičkih metoda potrebno eliminirati interferenciju gradske svjetlosti tokom noćnih opažanja. Širenjem urbanih gradskih područja danas je ova opservatorija u Londonu. Međutim, optičke metode mjerenja astronomske geodezije (ili geodetske astronomije) se rijetko koriste u velikim opservatorijama, a zamijenjene su metodama radio-astronomije, kao npr. VLBI. Međutim, optičke metode određivanja astronomske širine, dužine i azimuta nisu potpuno izgubile na

dužina opažača u bilo kojoj drugoj tački je jednostavno razlika lokalnog zvjezdanog vremena LST i Greenwichkog zvjezdanog vremena GST, što pokazuje

Slika 3-25 i formula (3.80):

$$\Lambda = LST - GST \quad (3.80)$$

Ako opažač čeka da zvijezda prođe kroz lokalni astronomski meridijan, kad je $t = 0^\circ$, tada je iz jednačine (3.80), $LST = \alpha$, a rektascenzija zvijezde je poznata iz zvjezdanog kataloga.

Drugi način je primijeniti kosinusni poučak na astronomski trougao, koji pokazuje Slika 3-22. Satni ugao zvijezde se može izračunati, za bilo koji njen položaj, iz mjenog zenitnog ugla, (ali ako je poznata astronomska širina opažane stanice), iz formule (3.81):

$$\cos t = \frac{\cos z - \sin \Phi \sin \delta}{\cos \Phi \cos \delta} \quad (3.81)$$

Pogreške u mjerenju zenitnih uglova najmanje se odražavaju na tačnost određivanja astronomskih širina kad se opažaju zvijezde u blizini kruga koji se zove *prvi vertikal*. Kad se prema tome izračuna satni ugao t , dobije se LST iz jednačine (3.76). Naravno, rektascenzija opažane zvijezde je poznata iz zvjezdanog kataloga.

Kad je satni ugao poznat ili izračunat, potrebno je imati referencu za astronomsku dužinu, i to se dobije preko Greenwichkog zvjezdanog/sideričkog vremena GST. To znači da opažač mora imati sat (hronometar) koji mjeri Greenwichko sideričko vrijeme. Ovo zbog toga što za ovu metodu mjerenja, opažač mora za svaki trenutak kad je napravio mjerenje (očitanje ugla) treba precizno zabilježiti vrijeme mjerenja.

Određivanje astronomskog azimuta može biti urađeno na dva načina:

- a. računanjem satnog ugla iz mjerenja vremena, ili
- b. mjerenjem zenitnog ugla.

značaju, nego se po potrebi koriste u inženjerskoj geodeziji, kad je npr. potrebno precizno poznavati otklon težišnice pri izgradnji dugih tunela.

U svakom slučaju, kad je satni ugao zvijezde poznat ili izračunat potrebna je referenca za dužinu, a što se dobije preko Greenwichkog sideričkog vremena GST. Dakle, opažatelj mora imati sat (hronometar). Pomoću sata u mjestu opažanja mjeri GST za svaki trenutak opažanja.

Iz jednačine (3.73) astronomski azimut se dobije po formuli:

$$\tan A_S = \frac{\sin t}{\sin \Phi \cos t - \cos \Phi \tan \delta} \quad (3.82)$$

gdje je A_S (trenutni) astronomski azimut zvijezde u trenutku opažanja. Astronomska širina opažatelja, te kao uvijek, deklinacija i rektascenzija zvijezde moraju biti poznati.

Astronomska azimut se može dobiti iz mjerenja zenitnog ugla zvijezde i primjenom kosinusnog poučka na astronomski trougao (Slika 3-22) po formuli (3.83):

$$\cos A_S = \frac{\sin \delta - \sin \Phi \cos z}{\cos \Phi \sin z} \quad (3.83)$$

Postupak određivanja azimuta prema formuli (3.82) ne zahtijeva određivanje satnog ugla, što znači da za tu metodu nije potrebno određivanje astronomske dužine i GST vremena. Međutim, ovdje je izražen utjecaj pogrešaka mjerenja zenitnih uglova.

Zenitni ugao z , ili satni ugao t , a prema tome i azimut A_S će se promijeniti ako se opaža ista zvijezda u različito vrijeme. U cilju određivanja astronomske azimuta sa stajališta P ka nekoj terestričkoj tački Q , potrebno je prvo postaviti teodolit tako da se navizira tačka Q . U trenutku opažanja zvijezde, mjeri se također horizontalni ugao D , između ciljne tačke i vertikalnog kruga zvijezde. Astronomska azimut ka terestričkim objektu Q dat je pomoću formule (3.84):

$$A_Q = A_S - D \quad (3.84)$$

Kad se ustanovi astronomski azimut pogodno odabrane, fiksirane ciljne tačke, može se također, indirektno odrediti lokacija lokalnog astronomske meridijana. Ovo predstavlja vertikalni krug postavljen u horizontalnom uglu A_Q , obrnuto od kretanja kazaljke na satu (kad se gleda iz zenita) iz ciljne tačke.

Ovim se završava razmatranje nebeskih koordinata i nebeskih koordinatnih sistema, koji se smatraju „apsolutnim“ sistemima, koji se ne kreću u odnosu na okolni svemir. Nebeski koordinatni sistemi su zbog toga pogodni za praćenje kretanja vještačkih satelita kao što su npr. GNSS sateliti.

Nebeski sistemi se detaljno proučavaju na diplomskom⁶⁹ studiju, a ovo su osnove za razumijevanje metoda određivanja položaja geodetskih mreža tehnikom GNSS.

Položaji tačaka terestričkih mreža određenih GNSS metodom se izražavaju u terestričkom sistemu, koji je fiksno vezan za centar mase Zemlje i rotiraju zajedno sa Zemljom, a razmatraju se u sljedećem poglavlju.

Glava 4

4 TERESTRIČKI REFERENTNI SISTEMI

Napredak u razvoju satelitskih sistema, koji omogućavaju određivanje položaja geodetskih tačaka s visokom tačnošću, imao je enorman utjecaj na napredak u razvoju geodetskih kontrolnih mreža. Za opažača koji se nalazi negdje na površini Zemlje, GNSS satelitski sistemi, kao što su američki GPS, ruski GLONASS, evropski Galileo i kineski BeiDou, osiguravaju tačnost pozicioniranja koja prije pola stoljeća nije bila ni zamisliva.

Tokom zadnjih nekoliko decenija, širom svijeta su se razvili, zahvaljujući dostupnoj satelitskoj tehnologiji, savremeni terestrički geodetski referentni sistemi. Razvijene države su prednjačile u ovim aktivnostima, te su primjenjujući GNSS metodologiju, ustanovile ili redefinirale svoje osnovne geodetske mreže visoke tačnosti. Njihov primjer slijede i ostale države, srednje ili slabo razvijene.

Prednost GNSS tehnologije nad klasičnim terestričkim geodetskim mjernim metodama, osim visoke tačnosti je jednostavnost i ekonomičnost ustanovljavanja i progušćivanja geodetskih kontrolnih mreža. Veoma važna prednost nove tehnologije je uniformna tačnost i mogućnost jednostavnog povezivanja kontrolnih geodetskih mreža širom planete.

Tradicionalni geodetski referentni sistemi su uglavnom zamijenjeni novim, savremenim konceptima u velikom broju država, na svim kontinentima. Ipak, klasične geodetske koncepte referentnih mreža je važno razumjeti i danas, jer su bili referentni za stari državni premjer, te je važno poznavati kako je nastao i znati povezati tradicionalne s modernim referentnim sistemima. Državni premjer je veoma skup i dugotrajan proces, te je njegove podatke veoma važno sačuvati i transformirati u koordinatni sistem definiran po savremenim principima.

4.1 DEFINICIJE OSNOVNIH POJMOVA

Definicija referentnog sistema (RS), njegova realizacija pomoću referentnog okvira i dodijeljeni geodetski datum moraju biti u strogoj saglasnosti. Kod tradicionalnih geodetskih referentnih sistema korištenih u trigonometrijskim i trilateracijskim mrežama, geodetski datum je bio određivan uz pomoć neovisnih (astronomskih) opažanja u odabranim fundamentalnim stanicama. Astronomska opažanja na fundamentalnim stanicama su određivala ishodište i orijentaciju koordinatnog sistema. Geodetski datum modernih geocentričnih referentnih sistema također se mora odrediti neovisnim metodama, tj. parametrima gravitacijskog polja i fizikalnim modelima.

Pojam *geodetski datum* je ponekad nejasan, a navodi u literaturi nisu uvijek konzistentni. Navode se neke od definicija pojma prije daljih razmatranja.

1. Prema Američkoj nacionalnoj agenciji za geodetski premjer (NGS, 1981), geodetski datum je „skup konstanti koje specificiraju koordinatne sisteme koji se koriste za geodetske kontrolne mreže, tj. za računanje koordinata tačaka na Zemlji.“
2. (Jekeli, 2012) navodi da je *geodetski datum* „skup parametara i konstanti koji definiraju koordinatni sistem, uključujući njeno ishodište, orijentaciju i mjerilo, na način da je prihvatljivo za geodetski premjer“.
3. (Torge, 1991) navodi da geodetski datum „definira orijentaciju konvencijskih (koordinatnih) sistema u odnosu na globalni X,Y, Z sistem, i prema tome u odnosu na tijelo Zemlje.
4. (Bonford, 1980) navodi da je datum „elipsoid i/ili tri koordinate tačke ishodišta u odnosu na elipsoid.
5. (Moritz, 1978) i (Rapp, 1992) navode da je datum (horizontalni) obično određen s pet parametara.

Ako je geodetski datum⁷⁰ izveden iz referentnog okvira, tj. iz transformacije koordinata između odabranih referentnih stanica, definicija sistema će se promijeniti: sistem se neće tada odnositi na geocentar nego na centar referentne mreže. Zato je neophodno strogo voditi računa da datum ne bude pod utjecajem mjerenja referentnog okvira i da realizacija okvira ne mijenja definiciju referentnog sistema. Dakle, potrebno je osigurati geodetski referentni sistem, takav

⁷⁰ Treba imati na umu da su zadnja dva autora razmatrali pojam geodetskog datuma u predsatelitskoj eri.

da se geodetska opažanja i procijenjeni parametri odnose na jedinstvenu globalnu osnovu.

Ako se pomoću metoda preciznog pozicioniranja tačaka trebaju pratiti fizikalni procesi globalnih promjena i geodinamike, onda je potrebno imati permanentni referentni okvir visoke tačnosti, koji povezuje sve podatke s jasno i dugoročno stabilnim geodetskim datumom. Ponovo se navode definicije osnovnih pojmova prema (Petit, i Luzum, 2010), budući su to definicije koje uvažava globalna geodetska zajednica i Međunarodna asocijacija za geodeziju - IAG:

Referentni sistem je definiran: konstantama, konvencijama, modelima i parametrima, koji služe kao neophodna osnova za matematičko predstavljanje geometrijskih i fizikalnih veličina. Primjer je 3D Kartezijev koordinatni sistem s ishodištem u geocentru, čija se osnovna ravnina XY podudara s ekvatorom, metričkog je mjerila, a rotira zajedno sa Zemljom oko njene obrtne osi.

Referentni okvir realizira referentni sistem, fizički i matematički. Realizacija referentnog sistema fizički znači obilježavanje čvrstim materijaliziranim tačkama, a realizacija sistema matematički znači određivanje parametara (geometrijskih koordinata). Primjeri su terestričke biljege (npr. stupovi kojim su stabilizirane geodetske tačke) ili pak objekti u prostoru (ili svemiru, npr. vještački sateliti ili nebeska tijela, zvijezde, sunce...), čije su koordinate izračunate tako što su se poštovale definicije referentnog sistema.

Geodetski datum nedvosmisleno određuje relacije između referentnog okvira i referentnog sistema, tako da dodjeljuje skup "datih" parametara, tj. koordinata ishodišta sistema (X_0, Y_0, Z_0), pravce koordinatnih osa X, Y i Z, i mjerila kao jedinice dužine (tj. metar).

Princip realizacije referentnog sistema pomoću referentnog okvira fokusira se na određivanje parametara geodetskog datuma. To je fundamentalni problem za njegovo ustanovljenje, i demonstrira se pomoću terestričkog referentnog okvira, ali slično se može reći i za nebeski referentni okvir.

Referentni sistem, geodetski datum i referentni okvir čine sljedeći hijerarhijski red (Drewes, 2009, str. 3):

-Na definiciju referentnog sistema ne smije utjecati realizacija referentnog okvira i geodetskog datuma, tj. realizacija sistema pomoću okvira i dodjele datuma ne smije mijenjati definiciju.

-Realizacija datuma mora se uraditi metodama koje su neovisne o mjerenjima referentnog okvira, tj. pogreške mjerenja ili fizikalne promjene koje mijenjaju opažanja okvira ne smiju utjecati na datum.

Matematička realizacija referentnog okvira mora se uraditi pomoću algoritama koji drže parametre datuma fiksnim i strogo slijede principe definirane referentnim sistemom.

U tradicionalnim 2D (horizontalnim) geodetskim referentnim sistemima (kontrolnim geodetskim mrežama) moraju se fiksirati (najmanje) četiri parametra datuma: dva za ishodište, jedan za orijentaciju i jedan za mjerilo. Fiksiranje ishodišta znači dati koordinatama ishodišta koordinatnog sistema (φ_0, λ_0) konstantne brojeve. Ovi konstantni brojevi su normalno dodjeljivani fundamentalnim tačkama.

Orijentacija koordinatnih osi definirana je azimutima između izabranih stanica u mreži. Koordinate ishodišta i azimuti su izvođeni iz astronomskih opažanja, što znači neovisni su od mjerenih uglova i dužina u mreži. Razmjera je realizirana pomoću prototipa metra.

Kao primjer se navodi stari referentni (koordinatni) sistem Bosne i Hercegovine, iz devetnaestog stoljeća. To je ustvari bio geodetski datum države Austrougarske monarhije. Kao fundamentalna tačka odabrana je trigonometrijska tačka na brdu kod Beča, pod imenom Hermannskogel.

Današnji izgled ovog mjesta pokazuje Slika 4-1. Koordinate fundamentalne tačke određene su astronomskim metodama i iznose kao što slijedi:

- astronomska širina $\Phi = 48^{\circ}16'15,29 \pm 0,04$;
- astronomska dužina $\Lambda = 33^{\circ}57'41,06$ istočno od Ferra,
- orijentacija mreže definirana je azimutom izlazne strane triangulacije „Hermannskogel–Hundsheimer Berg“ $\alpha = 107^{\circ}31'41,70$.

U klasičnom pristupu, jednom određeni geodetski datum usvajao se jednom zauvijek. Bilo koja pogreška koja bi se otkrila u kasnijim ponovljenim mjerenjima, nastala zbog pomjeranja stanica referentnog okvira, ili pak dodavanjem ili poništavanjem referentnih stanica, nije mijenjalo koordinate ishodišta, orijentaciju ili mjerilo. Na ovaj način se pomjeranje mreže u odnosu na ishodište i orijentaciju može otkriti čak i nakon dugog intervala vremena.

U modernim 3D referentnim sistemima sa Kartezijevim koordinatama, moramo fiksirati sedam parametara datuma. Tri parametra lociraju ishodište koordinatnog sistema, tri orijentiraju koordinatne osi i jedan definira mjerilo, tj. jedinicu dužine. Parametri datuma moraju biti zadani i ne mogu se mijenjati.



Slika 4-1: Današnji izgled mjesta koje je bilo ishodište Austrougarskog geodetskog datuma Hermannskogel, na brdu kod Beča. Samo tabla s natpisom (slika desno) podsjeća na važnost mjesta. (Sagen, 2012)

4.2 OSNOVNI KONCEPT TERESTRIČKOG RS

Na naizgled jednostavno pitanje “šta je to referentni sistem?” u realnosti nije jednostavno odgovoriti. Kretanje i položaj nisu apsolutni koncepti i mogu se opisati samo u odnosu na neke reference. Prema (Fukushima, 1997) „*referentni sistem* je relacija koja povezuje opažanja i njihovo matematičko predstavljanje“.

Princip općeg relativiteta omogućava da se bilo koja vrsta koordinatnog sistema može koristiti da se opiše neki fizikalni fenomen. Prema tome, referentni sistem je samo konvencija. Ne postoji apsolutno istinit referentni sistem. Umjesto toga, znanstvenici tragaju za najboljim referentnim sistemom, čije se značenje može razlikovati, pa je zato potrebno dodatno, ponekad opširno, pojašnjenje. Ako se kao primjer uzme Zemljina rotacija (Seitz i Schuh, 2010, str. 186-221) i diskutira kako naći najbolji referentni sistem, kakav bi se zaključak mogao donijeti?

Definicija najboljeg sistema će se mijenjati zajedno s povećanjem znanstvenih spoznaja i boljim razumijevanjem problema, ali i s razvijanjem računara i tehnoloških dostignuća u tom polju. Zbog toga nije moguće zaustaviti popravljavanje referentnih sistema, pa i njihovih definicija i konvencija koje ih određuju.

Međutim, kad se mijenja neki široko prihvaćeni referentni sistem, „mora se obratiti velika pažnja da se minimalizira nepogodnost koju uvjetuje njegova tranzicija, a posebno nepogodnost koju mogu trpjeti korisnici,“ (Fukushima, 1997, str. 1).

Da bi se istražila holistička i regionalna pomjeranja Zemlje i da bi se otkrili mehanizmi pomjeranja svakog sloja Zemlje, potrebno je imati dobro definiran referentni sistem i njegovu realizaciju u obliku referentnog okvira s visokom tačnošću.

Terestrički referentni sistem je prostorni referentni sistem, koji rotira zajedno sa Zemljom u njenom dnevnom kretanju kroz svemir (Petit, i Luzum, 2010, str. 31). Terestričkom referentnom koordinatnom sistemu uvijek je pridružen pogodno definiran elipsoid, na koji se svode geodetska mjerenja. Općenito gledano, terestrički referentni sistem može biti definiran tako da najbolje odgovara za predstavljanje geoprostora:

- a) Neke odabrane regije, odnosno dijela Zemlje. Tada se prema novoj terminologiji, referentni sistem naziva lokalnim, kojem je pridružen relativno orijentirani elipsoid;
- b) Globalne Zemlje, kad se sistem naziva globalnim. Globalnom referentnom sistemu pridružen je apsolutni referentni elipsoid.

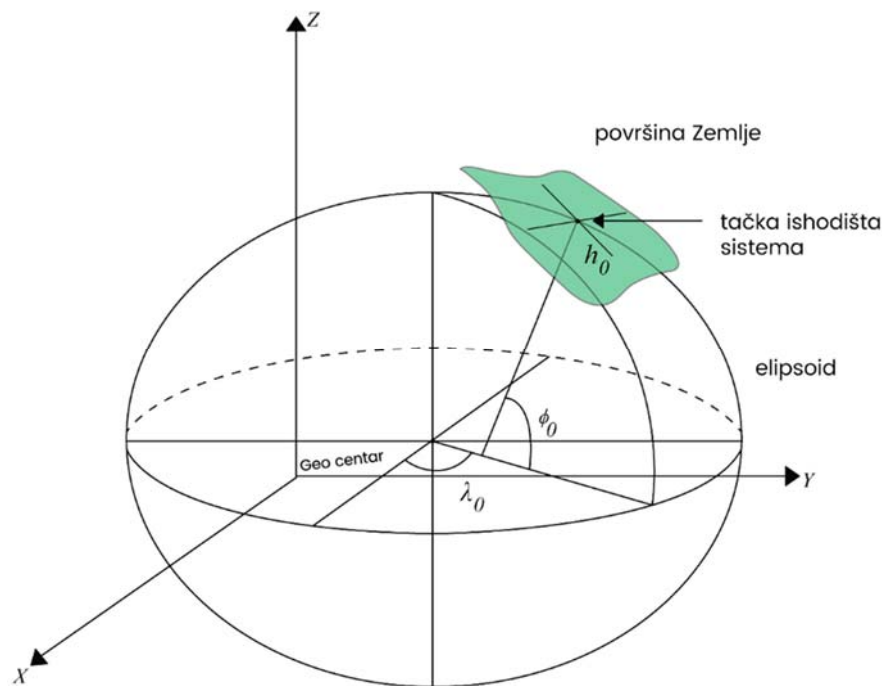
Apsolutnim elipsoidom naziva se globalno orijentirani elipsoid, čije su dimenzije i orijentacija definirani tako da, elipsoid najbolje aproksimira globalni geoid u cijelosti. Za razliku od apsolutnog elipsoida, relativni elipsoid (odnosno, relativno orijentirani elipsoid) najbolje aproksimira geoid neke regije ili države. Takav relativni elipsoid pokazuje Slika 4-2.

Dakle, relativni elipsoid obično nije bio geocentričan⁷¹, a njegove koordinatne osi su trebale biti paralelne⁷² s osima X , Y , Z . Za geodetski premjer Bosne i

⁷¹ Relativni elipsoid nije bio geocentričan ali se nastojalo da centar relativnog elipsoida bude blizu centra mase Zemlje. Međutim, u pre-satelitskoj eri nije bilo moguće odrediti položaj geocentra sa zadovoljavajućom tačnošću. Jedina teorijski poznata metoda za to bila je gravimetrija, metoda mjerenja ubrzanja sile teže. Međutim, gravimetrijska terestrička mjerenja iz tog doba nisu davala zadovoljavajuću tačnost položaja geocentra, uglavnom zbog rasporeda tačaka na kojima su se izvodila mjerenja (velike površine planete su oceani i mora) ali i zbog ograničenja u tačnosti mjerenja ubrzanja sile teže te epohe.

⁷² Ustvari, geodeti su nastojali da osi oba sistema budu paralelne, ali u praksi to nikad nije bio slučaj, zbog različitih pogrešaka pri izvođenju astronomskih i geodetskih mjerenja, kao i zbog pogrešaka obrade mjerenja.

Hercegovine u prošlim stoljećima, bio je usvojen Besselov elipsoid, kao što je konstatirano u poglavlju 2.



Slika 4-2: Ishodište geodetskog sistema, kako je to definirano metodama klasične terestričke geodezije: odabirana je pogodna tačka na površini Zemlje kojoj su određene koordinate: astronomska širina i astronomska dužina. (prema Jekeli, 2016 str. 3-5)

Međusobne relacije dva elipsoida pokazuje Slika 4-3. Lokalni referentni terestrički sistemi su imali široku primjenu za premjer država u proteklim stoljećima, zbog nemogućnosti globalne orijentacije u predsatelitskoj eri. Prilikom odabira lokalnog referentnog koordinatnog sistema za premjer država ili bloka država, dobivala se mogućnost definiranja tzv. “najprikladnijeg elipsoida” koji najbolje aproksimira posmatrani teritorij, na koji se odnose sva računanja državnih geodetskih mreža. Orijehtiranje ovog referentnog elipsoida i pridruženog koordinatnog sistema, rađeno je dostupnim (klasičnim) tehnikama i instrumentarijem.

Redukcija (svođenje) mjerenih veličina (npr. uglova i dužina) na odabrani elipsoid bila je iznimno kompleksna u predkompjuterskoj eri. “Najprikladniji elipsoid” bio je matematičko tijelo, čija je površina za posmatrani teritorij, određena tako da je kvadrat sume odstupanja od geoida jednak minimumu.

Tako određena površina referentnog elipsoida omogućavala je da se *redukcije mjerenja* na elipsoid, umjesto po kompleksnim formulama, računaju po

lineariziranim formulama, a često su se mogli usvojiti samo prvi članovi lineariziranih formula. Ovaj benefit izgubio je na značaju pojavom kompjutera.

Međutim, opći tehnološki napredak nije omogućio samo razvoj i primjena kompjutera u geodetskoj struci. Razvoj i primjena vještačkih Zemljinih satelita u geodeziji u stopu su pratile razvoj kompjuterske tehnologije, što je ustvari omogućilo određivanje apsolutno orijentiranog elipsoida.



Slika 4-3: Relativno (lokalno) i apsolutno (globalno) orijentiran elipsoid.

Najveći nedostatak odabira “najprikladnijih” referentnih sistema za pojedine države pokazao se u nemogućnosti uspoređivanja i korištenja geoinformacija, (tj. geodetskih proizvoda) iz susjednih država, dok je globalna analiza takvih geoinformacija bila nemoguća.

Implementacijom satelitskih sistema omogućeno je opažanje globalne Zemlje, te je postalo moguće definirati i realizirati globalni referentni koordinatni sistem. Najvažnija prednost za geodetski premjer i kartografisanje različitih država, urađenih u globalnom referentnom sistemu, oslikava se u činjenici da su podaci usporedivi, jer se nalaze u istom sistemu. Ovim je geodetski globalni referentni sistem postao osnova za sva geodetska istraživanja u oblasti geodinamike i svih drugih globalnih promjena i fenomena. Ovim je geodetska struka proširila dijapazon djelovanja, te je osim određivanja koordinata tačaka, izrade karata, registara nekretnina, i slično, dobila brojne mogućnosti koje su opisane u poglavlju

1. Zbog značaja za modernu geodeziju i geoznanosti uopće, *globalni geodetski referentni sistemi* su detaljno opisani.

U globalnom terestričkom referentnom sistemu, položaji tačaka, koje su čvrsto vezane ⁷³ za Zemljinu površinu, izraženi su koordinatama. Međutim, ove koordinate trpe veoma male, vremenski ovisne varijacije. Ove su varijacije nastale zbog različitih geofizičkih utjecaja, kao što su: tektonska pomjeranja ili deformacija nastalih zbog utjecaja plimnih valova (a koji su posljedica privlačnih sila nebeskih tijela iz bližeg svemira i djelimične elastičnosti tijela Zemlje), ili neke druge specifične deformacije površine Zemlje, na lokalnom i globalnom nivou, a koje su izazvane procesima i dešavanjima u Zemljinoj unutrašnjosti ili na njenoj površini, ili pak u bližem ili daljem okruženju.

U fizikalnim modelima koji su usvojeni u astrogeodeziji, terestrički referentni sistem - TRS je modeliran kao referentni trihedron (kojeg čine tri prostorna vektora s istim ishodištem) blizak Zemlji i koji rotira zajedno sa Zemljom.

U smislu Newtonove teorije, fizički prostor se smatra Euklidijskim afinim prostorom, koji ima tri dimenzije. U ovom slučaju takav referentni trihedron je Euklidijski afini okvir (O, E) . O predstavlja tačku prostora koja se zove **ishodište**, i E je osnova pridruženog vektorskog prostora. Usvojena restrikcija za E je da je to desni, ortogonalni vektorski prostor, s jednakim dužinama osnovnih vektora.

Ova tri jedinična vektora su kolinearna s osnovnim vektorima koji izražavaju **orijentaciju** TRS-a, a zajednička dužina ovih vektora je **mjerilo**, (Petit i Luzum, 2010, str. 31-32):

$$\lambda = \|\vec{E}_i\|_i \quad \text{gdje je } i = 1,2,3. \quad (4.1)$$

Ovdje se smatra da geocentrični TRS ima ishodište blisko centru mase Zemlje (geocentru), da je orijentacija ekvatorska (tj. da je Z os pravac ka polu) i da je

⁷³ Kako su to geodetske tačke vezane za površinu Zemlje? Jednostavno, različitim tipovima „stabilizacije“ geodetskih tačaka pomoću „biljega“ fiksiranih u zemljište. Fundamentalne tačke, koje čine kičmu modernih referentnih okvira, na kojima su postavljeni instrumenti za mjerenje pomoću geodetskih svemirskih tehnika (VLBI, SLR, LLR,..) su postavljene na betonske stupove koji su ponekad i nekoliko desetina metara duboko fundirane, da bi se izbjegla lokalna nestabilnost terena.

mjerilo blisko SI⁷⁴ metru. Osim u Kartezijevim koordinatama, položaji se mogu izražavati i u drugim, recimo elipsoidnim koordinatama.

Opći detalji o koordinatnim sistemima koji se primjenjuju za GNSS pozicioniranje opisani su u različitim udžbenicima: (Leick, 2004, str. 11-52; Seeber, 2003, str.10-39; Hofmann-Wellenhof, 1997, str.27-40; Torge, 2001, str. 18-39, Jekeli, 2016).

Pod naprijed opisanim hipotezama, opća transformacija Kartezijevih koordinata bilo koje tačke na ili u blizini Zemlje, iz jednog terestričkog referentnog sistema⁷⁵ - TRS (1) u drugi terestrički referentni sistem - TRS (2), može biti izražena pomoću trodimenzionalne transformacije sličnosti ($\vec{T}_{1,2}$ je vektor translacije, $\lambda_{1,2}$ je faktor mjerila i $\mathbf{R}_{1,2}$ je rotacijska matrica):

$$\vec{X}^{(2)} = \vec{T}_{1,2} + \lambda_{1,2} \mathbf{R}_{1,2} \vec{X}^{(1)} \quad (4.2)$$

U primjeni (4.2), IERS koristi linearne formule. Standardna transformacija između dva referentna sistema je Euklidijska slična sedam-parametarska transformacija: tri komponente translacije, faktor mjerila i tri rotacijska ugla, s respektivnim oznakama, $T_1, T_2, T_3, D, R_1, R_2, R_3$ i njihovi prvi izvodi po vremenu: $\dot{T}_1, \dot{T}_2, \dot{T}_3, \dot{D}, \dot{R}_1, \dot{R}_2, \dot{R}_3$. Transformacija vektora koordinata \vec{X}_1 koji je izražen u referentnom sistemu (1) u vektor koordinata \vec{X}_2 izražen u referentnom sistemu (2) dat je kao (Petit i Luzum, 2010):

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_1 + \vec{T} + D\vec{X}_1 + \mathbf{R}\vec{X}_1 \quad (4.3)$$

gdje su $\vec{T} = \vec{T}_{1,2}$, $D = \lambda_{1,2} - 1$, $\mathbf{R} = (\mathbf{R}_{1,2} - \mathbf{I})$, i \mathbf{I} je jedinična matrica tako da je:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

⁷⁴ SI (Standard International)

⁷⁵ Ovdje se misli na dva terestrička sistema iz dvije epohe, tj. TRS (1) definiran je i realiziran u jednoj epohi dok je TRS (2) definiran i realiziran u drugoj epohi. Primjer: ITRF2008 i ITRF2014.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & -R_3 & R_2 \\ R_3 & 0 & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Pretpostavlja se da je formula (4.3) linearna za skup koordinata stanica koje su određene nekom tehnikom svemirske geodezije. Razlike ishodišta su oko nekoliko stotina metara, razlike u mjerilu i orijentaciji su nivoa 10^{-5} . Općenito su $\vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{T}, D$ i \mathbf{R} funkcije zavisne o vremenu.

Diferenciranjem jednačine (4.3) po vremenu dobije se (4.6) (Petit i Luzum, 2010):

$$\dot{\vec{X}}_2 = \dot{\vec{X}}_1 + \dot{\vec{T}} + D\dot{\vec{X}}_1 + D\dot{\vec{X}}_1 + \dot{\mathbf{R}}\vec{X}_1 + \mathbf{R}\dot{\vec{X}}_1 \quad (4.6)$$

D i \mathbf{R} su reda veličine 10^{-5} a $\dot{\vec{X}}_1$ je oko 10 cm na godinu, tako da se izrazi mogu zanemariti jer $D\dot{\vec{X}}_1$ i $\mathbf{R}\dot{\vec{X}}_1$ su reda veličine 0,1 mm na 100 godina, te se nakon sređivanja dobije izraz (4.7).

$$\dot{\vec{X}}_2 = \dot{\vec{X}}_1 + \dot{\vec{T}} + D\dot{\vec{X}}_1 + \dot{\mathbf{R}}\vec{X}_1 \quad (4.7)$$

Važno je praviti razliku između Terestričkih referentnih sistema - TRS, imajući na umu teorijske definicije i njihove realizacije, tj. terestričke referentne okvire kojima korisnici imaju pristup. Terestrički referentni okvir (TRF) je realizacija TRS, preko realizacije ishodišta, orijentacije osi i mjerila, kao i njihovih promjena kroz vrijeme.

4.2.1 Terestrički referentni sistemi u satelitskoj geodeziji

Potrebno je odrediti sedam parametara transformacije da se omogući računanje terestričkog referentnog okvira-TRF u datoj epohi. Da bi se izračunala promjena TRF kroz vrijeme, treba TRF-u u određenoj epohi, dodati njegove izvode po vremenu. Izborom 14 parametara ustanovljava se TRF. Ovi parametri predstavljaju ishodište, mjerilo, orijentaciju i njihove promjene kroz vrijeme, a često se nazivaju “definicija datuma”. Sve tehnike svemirske geodezije nisu osjetljive na sve parametre koji definiraju datum. Ishodište je teoretski moguće odrediti sljedećim dinamičkim tehnikama svemirske geodezije: LLR, SLR, GNSS, DORIS, jer je ishodište ustvari centar mase, oko koje se kreću sateliti. Mjerilo je ovisno samo o fizikalnim parametrima (kao što su geocentrična gravitacijska konstanta GM i brzina svjetlosti) i modeliranju relativiteta.

Orijentaciju nije moguće opažati ni jednom tehnikom, te je ista proizvoljna ili je pak definirana konvencijom. Preporučuje se definiranje orijentacijske evolucije kroz vrijeme korištenjem tkz. uvjeta “no-net-rotation” u odnosu na horizontalno pomjeranje preko površine Zemlje, (Petit i Luzum, 2010, str. 32). Uvjet “no-net-rotation” ili kako se još naziva Tisserand uvjet, ustvari izjednačava s nulom sumu ugaone količine kretanja preko cijele Zemlje⁷⁶.

Pošto opažanja tehnikama svemirske geodezije ne sadrže sve neophodne informacije za potpuno ustanovljavanje TRF-a, potrebno je imati dodatne informacije za kompletiranje definicije datuma. U izrazima normalnih jednačina, (obično sastavljenim iz opažanja tehnikama svemirske geodezije), ova se situacija ogleda u činjenici da je normalna matrica N singularna, pošto rang neodređenosti odgovara broju datumskih parametara koji nisu reducirani opažanjima.

Da bi se riješio problem singulariteta, analitički centri dodaju jednu od sljedećih grupa uvjeta nad podskup stanica, (Petit i Luzum, 2010, str. 32):

1. Prisile koje se mogu otkloniti: rješenja za koja će procijenjeni položaji stanica i/ili brzina biti pod prisilom na vanjske vrijednosti unutar neodređenosti $\sigma \approx 10^{-5}$ m za položaje, te $\sigma \approx 10^{-6}$ m/god za brzine. Ovaj tip prisila se može jednostavno otkloniti.
2. Labave prisile: rješenja gdje su primijenjene prisile s neodređenosti $\sigma \geq 1$ m za položaje i ≥ 10 cm/god za brzine.
3. Minimalne prisile korištene samo da definiraju TRF primjenom minimalno zahtijevanih informacija.
4. Stare metode, gdje su primjenjivane stroge prisile ($\sigma \leq 10^{-10}$ m), (koje se numerički ne mogu jednostavno odstraniti) nisu više pogodne, i mogu mijenjati realni kvalitet procijenjenih parametara.

U slučajevima pod 1 i 2, ovi iznosi se dodaju sljedećim jednačinama opažanja (Petit i Luzum, 2010, str. 32-33):

$$\vec{X} - \vec{X}_0 = \mathbf{0} \quad (4.8)$$

gdje je \vec{X} vektor procijenjenih parametara (položaji i /ili brzine) i \vec{X}_0 je vektor *a priori* poznatih parametara. Međutim, u slučaju minimalne prisile, dodatna jednačina ima oblik:

⁷⁶ Uvjet “no-net-rotation”, znači da je ukupna količina ugaonog kretanja svih tektonskih ploča jednaka nuli. Ovaj uvjet nema utjecaj na relativne brzine ploča.

$$\mathbf{B}(\vec{\mathbf{X}} - \vec{\mathbf{X}}_0) = \mathbf{0} \quad (4.9)$$

gdje je $\mathbf{B} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T$, dok je \mathbf{A} dizajn matrica parcijalnih derivacija, sačinjena od *a priori* vrijednosti, datih kao (Petit i Luzum, 2010):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} \\ 1 & 0 & 1 & x_0^i & 0 & z_0^i & -y_0^i \\ 0 & 1 & 0 & y_0^i & -z_0^i & 0 & x_0^i \\ 0 & 0 & 1 & z_0^i & y_0^i & -x_0^i & 0 \\ \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

kad se računa položaj samo jedne stanice, ili:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} \\ 1 & 0 & 1 & x_0^i & 0 & z_0^i & -y_0^i & & & & & \\ 0 & 1 & 0 & y_0^i & -z_0^i & 0 & x_0^i & & 0 & & & \\ 0 & 0 & 1 & z_0^i & y_0^i & -x_0^i & 0 & & & & & \\ \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} \\ & & & & & & & 1 & 0 & 1 & x_0^i & 0 & z_0^i & -y_0^i \\ & & & & & & & 0 & 1 & 0 & y_0^i & -z_0^i & 0 & x_0^i \\ & & & & & & & 0 & 0 & 1 & z_0^i & y_0^i & -x_0^i & 0 \\ \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} \end{bmatrix} \approx 0 \quad (4.11)$$

kada se rješavaju položaji i brzine. Sedam kolona dizajn matrice \mathbf{A} odgovara sedam parametara datuma. Zato bi ova matrica trebala biti reducirana na one parametre koji bi trebali biti određeni (tj. tri rotacije u skoro svim tehnikama i tri translacije u slučaju VLBI).

4.2.2 Terestrički referentni okvir oslonjen na Zemlju

IERS kroz svoje aktivnosti određuje terestričke referentne okvire koji su oslonjeni na Zemljinu koru. Ova rješenja se dobivaju ili u analitičkim centrima ili se njihovim kombiniranjem dobivaju ultimativni produkti ITRS-a. Opći model koji povezuje položaj tačke koja je čvrsto povezana sa Zemljinom korom u epohi t , $\mathbf{X}(t)$, i regulariziran položaj $\mathbf{X}_R(t)$ izgleda kao što slijedi (Petit i Luzum, 2010, str. 34):

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_R(t) + \sum_i \Delta \mathbf{X}_i(t) \quad (4.12)$$

Svrha uvođenja regulariziranog položaja je da odstrani visokofrekventne varijacije (uglavnom geofizičke) primjenom konvencijskih korekcija $\Delta \mathbf{X}_i(t)$ da bi se dobio položaj s regularnijim vremenskim varijacijama. Bitno je da se usvoje i koriste isti konvencijski modeli u svim analitičkim centrima koji obrađuju podatke svemirske geodezije, (Petit i Luzum, 2010, str. 34).

Ovo nažalost nije bila uvijek praksa u prošlosti, jer su različiti analitički centri primjenjivali različite modele korekcija. To je rezultiralo u netačnostima u realizaciji TRF nakon kombiniranja rješenja koji su različiti analitički centri prijavljivali IERS-u.

4.2.3 Međunarodni terestrički referentni sistem

Međunarodni terestrički referentni sistem (International Terrestrial Reference System-ITRS) je definiran Rezolucijom 2 IUGG koja je usvojena u Beču (1991), a navedeno u (McCarty i Petit, 2003, str. 25-26, i str. 117-126): ITRS je geocentrički, ekvatorski i metrički sistem.

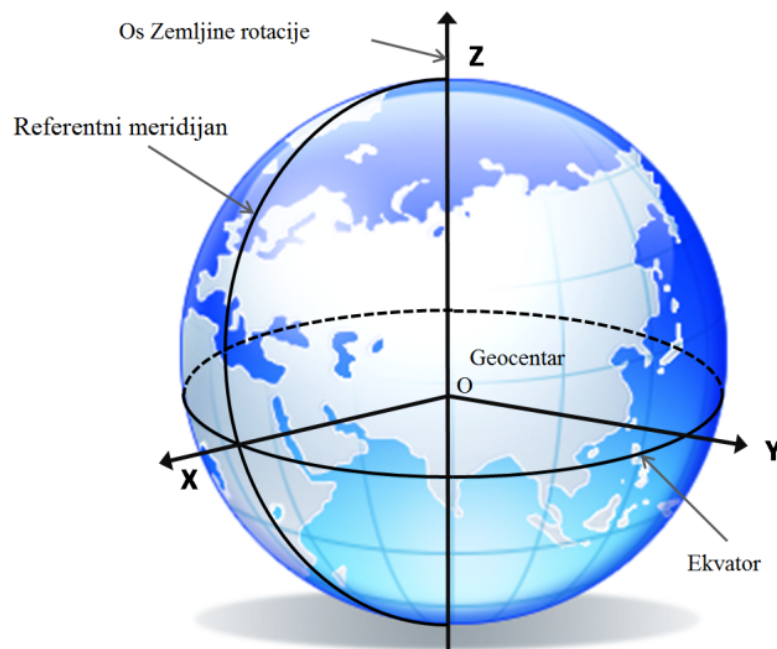
IUGG je na svom Generalnom zasjedanju u Perugi (2007) Rezolucijom 2 formalno usvojila ITRS. Sumarni i sintetizirani tekst ovih rezolucija (IAG i IUGG Rezolucija⁷⁷ 1991 i 2007, koje su konzistentne s zadnjim IAU Rezolucijama) je:

- GTRS (Geocentric Terrestrial Reference System) je nova oznaka za CTRS (Conventional Terrestrial Reference System), dok se CTRS koristi kao generički izraz koji označava identifikaciju specifičnog TRS kroz listu konvencijskih pravila koji fiksiraju ishodište, mjerilo i orijentaciju, Slika 4-4.
- GTRS ima ishodište u geocentru, uzimajući u obzir cijelo tijelo Sistema Zemlja, uključujući okeane i atmosferu.

⁷⁷ Sve IUGG rezolucije su dostupne na <http://www.iugg.org/resolutions/>

- U GTRS-u se koristi koordinirano vrijeme TCG (Geocentric Coordinate Time). Zbog ovoga je mjerilo koordinata konzistentno s ovom činjenicom.
- Evolucija kroz vrijeme GTRS orijentacije slijedi uvjet “no-net-rotation” (NNR) u odnosu na horizontalnu površinu Zemlje.

IAG rezolucije iz 1991. godine, kao i razna znanstvena i praktična razmatranja, eksplicitno idu definiranju ITRS-a kao trodimenzionalnog sistema. Do danas su razvijeni tačni geofizički modeli u skladu s Njutnovim zakonima, i sve praktične aplikacije (kao što su kartografisanje i navigacija) smatraju ITRS trodimenzionalnim.



Slika 4-4: Geocentrični terestrički referentni sistem-GTRS
(GNSS@ROB, 2017)

Dakle, definicija ITRS-a ispunjava sljedeće uvjete (Petit i Luzum, 2010, str.34):

- a) ITRS je geocentrički sistem, tj. centar mase je definiran za cijelu Zemlju, uključujući okeane i atmosferu;
- b) Jedinica mjere je metar (SI). Mjerilo je konzistentno s vremenom TCG (Time Coordinate Geocentric), kao koordinatom vremena za geocentrični lokalni okvir, u skladu s IAU i IUGG rezolucijama (1991). Ovo se dobije pogodnim modeliranjem relativiteta.

- c) ITRS početna orijentacija data je kao orijentacija koju je definirao Međunarodni biro za vrijeme (Bureau International l'Heur-BIH), za epohu 1984.0;
- d) Vremensko evoluiranje orijentacije osigurano je upotrebom uvjeta “no-net-rotation” u odnosu na horizontalno tektonsko pomjeranje po cijeloj Zemlji,
- e) Gore rečeno znači da koordinate date geocentru moraju biti jednake nuli, tj. $X_0 = Y_0 = Z_0 = 0$. Orijentacija Z osi je bliska (varirajućoj) osi Zemljine rotacije, dok X i Y osi leže u ekvatorskoj ravnini. Mjerilo je metričko u skladu s Konvencijom o metru, koja je potpisana 1875. godine.

Sve satelitske efemeride su nedvosmisleno i u bilo kojem vremenu procijenjene u geocentričnom referentnom okviru. Geocentrične efemeride su prevedene u koordinate stanica terestričkog referentnog okvira pomoću mjerenja dužine između satelita i stanice na Zemlji, tehnikom laserskih mjerenja dužina do satelita-SLR. One su također geocentrične, ukoliko nisu uvedene neke dodatne prisile, tj. ako nisu fiksirane neke terestričke koordinate. Takve prisile nisu dozvoljene radi očuvanja datuma. Ovo važi za sve epohe opažanja, te je ishodište uvijek u geocentru, ne može biti pomjeranja ishodišta u odnosu na geocentar i obratno.

4.2.4 Deformacije Zemljine kore

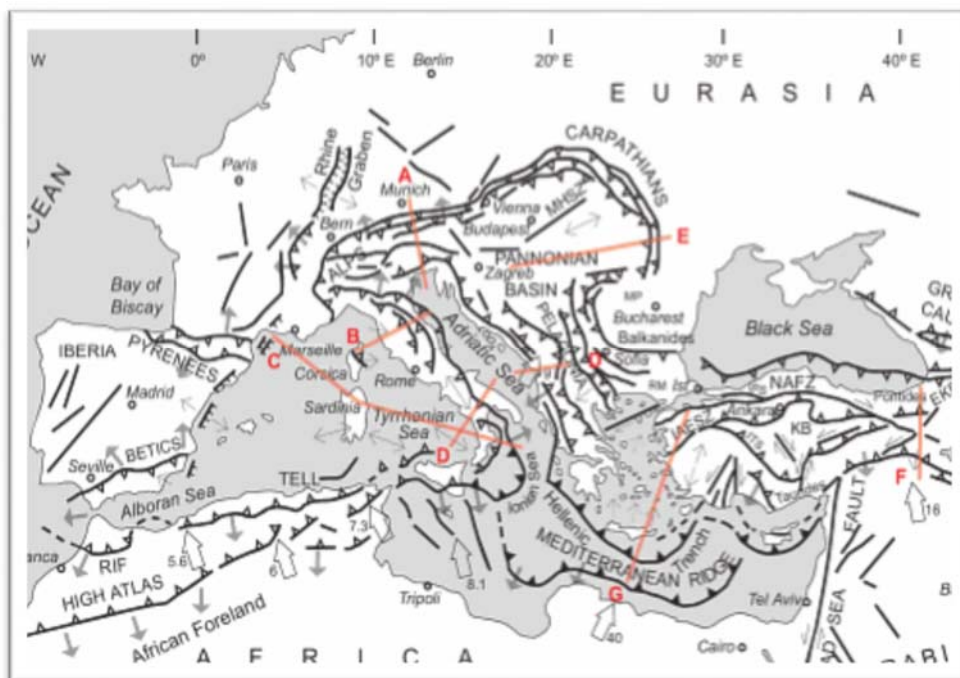
Zemlja se može, hipotetički, posmatrati kao skup veoma malih dijelova, toliko malih da se mogu smatrati tačkama. Ako se usvoji ovakva formulaciju sastava Zemlje, može se reći da se svaka tačka temporalno i permanentno pomjera zbog različitih razloga: pomjeranja tektonskih ploča, efekata plimnih valova, opterećenja zbog atmosfere, hidrosfere (tj. rijeka, jezera i okeana), posljedica egzogenih i erogenih procesa, ili pak drugih lokalnih geoloških procesa, (Altiner, 1999). Tokom zadnjih pedesetak godina pomjeranja ploča Zemljine litosfere opisuju se na osnovi:

- a) analize širenja dna globalnog okeana,
- b) promjena u sistemu geoloških rasjeda, te
- c) tektonike ploča (posmatranjem vektora “klizanja” zemljotresa).

U skladu s modernom teorijom tektonskih ploča, Zemljina kora se sastoji od 14-16 glavnih litosferskih ploča, koje plivaju na fluidnoj astenosferi. Većina deformacija koje nastaju zbog pomjeranja ploča, pojavljuju se u pograničnim područjima i sastavima ploča, dok unutrašnji dio ploče ostaje stabilan, odnosno, u unutrašnjosti se ne pojavljuju značajne deformacije.

Ovo posljednje se može na prvi pogled učiniti besmislenim, posebno u područjima koja su sačinjena od kompleksnih tektonskih oblika, kao što su regije istočnog

Mediterana ili pak Alpi (Slika 4-5). Međutim, ovo pravilo je osnova za objašnjenje tektonskih procesa, kao što su zemljotresi i vulkani. Također, ovo pravilo objašnjava nastanak planina i grebena. Dakle, glavni tektonski procesi javljaju se na granicama ploča.



Slika 4-5: Karta tektonskih oblika Mediteranske oblasti, (Dilek, 2006, str. 3)

Procjena pomjeranja kinematičkih tektonskih ploča danas je aktivno polje geodinamičkih istraživanja iz više razloga:

- a) Pomjeranje ploča igra ključnu ulogu u pravljenju karata seizmičkog rizika, i općenito, u tektonici, definiranje zona deformacija.
- b) Modeliranje pomjeranja tektonskih ploča je još uvijek “mlada” istraživačka disciplina i iz skorije literature proizilazi da još uvijek ne postoji definitivni standard za određivanje granica ploča i iznosa relativnih brzina pomjeranja između do sada identificiranih tektonskih ploča.
- c) Opažanja modernim satelitskim tehnikama kao što su GNSS, SLR, DORIS i VLBI, u cilju određivanja aktualnog horizontalnog pomjeranja Zemljine kore s povećanom tačnošću, koriste se tek od ranih 1990-tih.

Potpuni doprinosi rezultatima istraživanja pomoću ovih tehnika tek bi se trebali doseći. U prirodi postoji zajedničko pomjeranje tektonskih ploča, tj. rotacija i

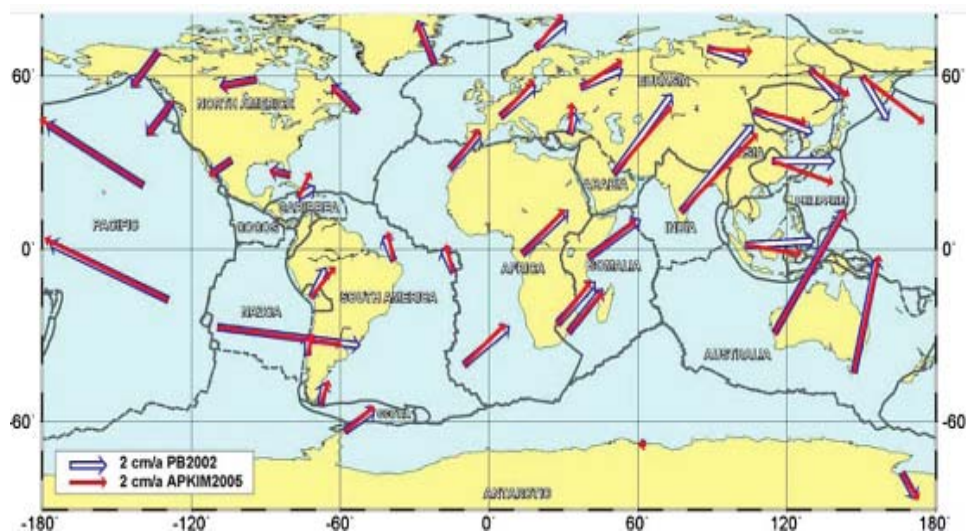
širenje tačaka na Zemljinoj površini. Tektonsko kretanje litosferskih ploča (Slika 4-6) pokazuje sistematsko pomjeranje u sljedećim iznosima:

$$dX/dt = -10 \text{ mm/a}^{78}$$

$$dY/dt = +13 \text{ mm/a}$$

$$dZ/dt = +15 \text{ mm/a.}$$

Ovi brojevi su skoro identični sa svim geološko-geofizičkim “no-net-rotacionim” modelima kretanja ploča kao što su npr.: geološko-geofizički model NNR NUVEL-1A ili geodetski model APKIM (Actual Plate KInematic Model) 1998. Ovo se ne smije interpretirati kao varijacija geo-centra, jer je kretanje gornjih (litosferskih) masa u ravnoteži s konvekcijom u Zemljinom omotaču, kao što je razmatrano u poglavlju 1.



Slika 4-6: Kretanje ploča čvrste litosfere iz geološko-geofizičkih modela PB2002 za glavne ploče identične sa NNR NUVEL-1A kao i geodetskog modela APKIM 2005. Očigledna su sistematska odstupanja kao i opći trend ka sjeveru. (izvor: Drewes, 2009)

Komponente rotacijskog kretanja stanica su veoma korelirane sa Zemljinim orijentacijskim parametrima - EOP. U okviru ITRF 2005, EOP i brzine stanica su po prvi put procijenjeni simultano. Da bi se riješio ovaj singularitet i da bi se zadovoljio uvjet “no-net-rotacije” orijentacije, moraju se uvesti prisile za ove

⁷⁸ Jedinicom mm/a izražava se brzina pomjeranja tačke u milimetrima po godini.

komponente kinematičkog datuma brzina. U ITRF2005 oni su realizirani pomoću NNR NUVEL-1A modela.

Međutim, geološko-geofizički modeli ne ispunjavaju uvjet “no-net-rotacije” za aktualno kretanje ploča. Data kretanja ploča predstavljaju prosječno kretanje kroz milione godina. Dalje, taj model ne uključuje aktuelne deformacije zone Zemljine kore. Ako se integriraju sva kretanja čvrstih ploča i deformacija Zemljine kore izvedene iz ITRF2005 u mrežu $1^\circ \times 1^\circ$ nad cijelom Zemljom dobije se zajednička rotacija:

$$\omega_x = -0,04 \text{ mas/a}$$

$$\omega_y = +0,03 \text{ mas/a}$$

$$\omega_z = -0,02 \text{ mas/a.}$$

Ovo odgovara rotaciji oko pola u tački $\varphi = -23^\circ, \lambda = 143^\circ$ s uglovnom brzinom ω , koja iznosi $0,006 \text{ mas/a}^{79}$ ili maksimalnom linearnom brzinom od $1,7 \text{ mm/a}$. Za pravilno tretiranje bi se po mišljenju iznesenom u (Drewes, 2009) morao primijeniti kinematički model izveden iz geodetskih mjerenja, tj. model APKIM (Actual Plate Kinematic Model).

4.2.5 IERS terestrički referentni okviri

Da bi se istražila globalna i regionalna pomjeranja Zemlje, te da bi se otkrili mehanizmi pomjeranja svakog sloja Zemlje, potrebno je imati dobro definiran referentni sistem i njegovu realizaciju u obliku referentnog okvira s visokom tačnošću. Zato se ovdje iznosi kratak pregled razvoja i trenutni status međunarodnog terestričkog referentnog okvira-ITRF. Također se diskutiraju neka neriješena pitanja i ograničenja.

Jedan od ultimativnih ciljeva moderne geodezije je da osigura visoko-stabilni geocentrični referentni datum za naučna istraživanja, kao što su određivanja preciznih orbita, monitoring podizanja nivoa mora, monitoring pomjeranja tektonskih ploča, itd., (Angerman i dr., 2003). Međunarodna geodetska asocijacija-

⁷⁹ Jedinica **mas/a** je skraćena od engl. *mili-arc-second* po godini (fr. ann). Jedinica **mas/a** predstavlja rotaciju u iznosu hiljaditi dio sekunde po godini.

IAG je predložila *Međunarodni terestrički referentni sistem-ITRS* kao terestrički referentni sistem koji povezuje geometrijski doprinos različitih geodetskih tehnika.

ITRF kao fizička materijalizacija ITRS-a ima slučajne pogreške i sistematske utjecaje, ali je i realiziran **po konvenciji**, uz pretpostavku konstantnih brzina za skup globalnih permanentnih stanica. U realnosti, ova pretpostavka nije konzistentna s nelinearnim efektima koje izaziva pomjeranje masa planetarnih fluida (atmosfera, okeani, kopnena hidrologija, itd.) u odnosu na čvrstu Zemlju, čija se kora deformiše zbog kretanja tektonskih ploča.

Od 1988. godine do danas⁸⁰, Međunarodni servis za rotaciju Zemlje i referentne sisteme (International Earth Rotation and Reference Systems-IERS) objavio je trinaest ITRF realizacija. Na web strani IERS-a su dostupni sljedeći referentni okviri-ITRF: 1992, 1993, 1994, 1996, 1997, 2000, 2005, 2008 i 2014. Svaka naredna ITRF realizacija je izračunata s više podataka od prethodne realizacije, a podaci su prikupljeni različitim geodetskim tehnikama. U ove projekte je uloženo mnogo napora jer je kroz brojna istraživanja prikupljeno dosta novih spoznaja, koja su rađena kroz dugi niz godina, a sve u cilju postizanja bolje konzistentnosti i preciznosti svake nove realizacije referentnog okvira.

Obično se smatra da je ITRF2000 najopsežnija realizacija, sa oko 800 stanica koje su postavljene na oko 500 lokacija, s boljom distribucijom stanica nego je to bio slučaj u prethodnim realizacijama. Pored opažanja na stanicama VLBI, LLR, SLR, GPS i DORIS, uključuje i regionalne mreže za prognošćenje, kao što je npr. Evropska referentna mreža EUREF, odnosno njena kičma, tj. Evropska permanentna mreža EPN⁸¹, kao i permanentna državna mreža SAD-a, CORS (Continuously Operating Reference Stations).

U cilju poboljšanja konzistentnosti i stabilnosti datuma razvijen je ITRF2005, po prvi put iz vremenskih serija položaja stanica i parametara Zemljine orijentacije-EOP, prikupljenih različitim tehnikama opažanja. Prednost korištenja vremenskih serija položaja stanica je ta da omogućava monitoring nelinearnog pomjeranja i diskontinuiteta stanica, kao i istraživanje temporalnih ponašanja fizikalnih parametara referentnih okvira, tj. ishodišta i mjerila.

⁸⁰ oktobar 2017. godine

⁸¹ U ITRF2000 je po prvi put uključena permanentna stanica SRJV, kao dio EPN mreže.

IERS predlaže uvođenje novog pojma “polu-dinamičnog datuma”. Ovaj pojam vezan za geodetske datume realizirao bi se tako da se dodijeli *model deformacija* za specifični geodetski datum za regionalne terestričke referentne okvire. Ovaj princip je primijenjen npr. za Novi Zeland. Ova država se nalazi na sastavu dviju veoma aktivnih tektonskih ploča, australijske i pacifičke, te su jaki zemljotresi tamo česta pojava. Zbog velikih deformacija tla, ponekad i po nekoliko metara, veoma je otežano održavanje katastra, a naravno i drugih geodetskih zadataka, te su usvojili novi koncept definiranja poludinamičkog datuma, kao što je izneseno u (Jordan i dr., 2007).

4.2.6 ITRF kao IERS realizacija ITRS

IERS pri određivanju ITRF proizvoda, slijedi proceduru koja primjenjuje dva koraka:

- a) Definiranje TRF u pojedinim analitičkim centrima. Ovdje se osobita pažnja posvećuje upoznavanju posebnih konvencijskih korekcija koje su usvojili pojedini analitički centri.
- b) Definiranje ITRF-a kombiniranjem pojedinih TRF rješenja i fiksiranje datuma. Ovo implicira usvajanje skupa konvencijskih korekcija za ITRF i osigurava konzistentnost kombinacije, tako da se odstrane moguće razlike između korekcija koje su usvojene u pojedinačnim analitičkim centrima.

Međutim, postoje specijalni slučajevi gdje korisnici, iz različitih razloga, trebaju dodati korekcije ITRF koordinatama, da bi se iste mogle koristiti za specifične primjene. Takvi slučajevi su: plimni valovi čvrste Zemlje, relativističko mjerilo i trenutni položaj geocentra.

4.2.6.1 Plimni valovi čvrste Zemlje

Da bi se izračunala pomjeranja stanica koja su nastala zbog utjecaja plimnih valova čvrste Zemlje, svi analitički centri koriste model $\Delta\vec{X}_{tidM}$ koji sadrži dio koji nije ovisan o vremenu. To znači da su dobijeni regularizirani položaji nazvani “konvencijski oslobođeni plimnih valova” (eng. “conventional tide-free”), a sve u skladu s nomenklaturom u IERS Konvencija 2010. Takva hipoteza je preuzimana još od prvog modela plimnih valova čvrste Zemlje koji su određeni standardima ustanovljenim projektom MERIT (Monitor Earth Rotation and Intercompare Techniques).

Zbog naprijed iznesenog, ITRF je usvojio iste opcije i zato je to okvir “oslobođen od plimnih valova po konvenciji”. Da bi se usvojio drugi model, tj. $\Delta\vec{X}_{tid}$, korisnik

bi trebao primijeniti formulu (4.13) za dobivanje koordinata \vec{X} koje bi bile konzistentne s ovim modelom (Petit i Luzum, 2010, str. 39):

$$\vec{X} = \vec{X}_{\text{ITRF}} + (\Delta\vec{X}_{\text{tid}} - \Delta\vec{X}_{\text{tidM}}) \quad (4.13)$$

4.2.6.2 Relativističko mjerilo

Svi analitički centri koriste skalu vremena konzistentnu s dinamičkom skalom vremena - TT (Terrestrial Time⁸²). Na isti je način ITRF također usvojio ovu opciju (izuzev ITRF94, 96 i 97), (Petit i Luzum, 2010). Treba ponovo naglasiti da ITRS skala treba biti po definiciji konzistentna s vremenskom skalom - TCG (Time Coordinated Geocentric)⁸³. Zbog toga, ako su potrebne koordinate \vec{X} konzistentne s TCG vremenom, korisnik treba primijeniti sljedeću formulu (Petit i Luzum, 2010, str. 40):

$$\vec{X} = (1 + L_G)\vec{X}_{\text{ITRF}} \quad (4.14)$$

gdje je, $L_G = 6,969290134 * 10^{-10}$ a definira $1 - d(\text{TT})/d(\text{TCG})$ (Petit i Luzum, 2010, str. 18; str.151) i rezolucijom usvojenoj na XXIV generalnoj sjednici IAU.

4.2.6.3 Položaj geocentra

ITRF ishodište bi trebalo smatrati kao srednji centar mase Zemlje, koji je srednja vrijednost za period SLR opažanja, koja su korištena i modelirana kao sekularna (linearna) funkcija zavisna o vremenu. Ako je potreban trenutni geocentrični položaj \vec{X} , on se treba izračunati prema sljedećoj formuli (Petit i Luzum, 2010, str. 40):

$$\vec{X} = \vec{X}_{\text{ITRF}} - \vec{O}_G \quad (4.15)$$

⁸³Zainteresirani čitalac može vidjeti rezolucije IAU na www.iau.org/administration/resolutions/general_assemblies;

gdje \vec{O}_G predstavlja pomjeranje geocentra u ITRF (vektor iz TRF ishodišta ka trenutnom centru mase). Treba reći da je ova konvencija najčešće korištena u svemirskoj geodeziji ali se ne može univerzalno koristiti tj. ne može se primijeniti u geofizici i sl.

Ako je potrebno izračunati trenutni položaj tačke na Zemljinoj kori onda se treba primijeniti sljedeća formula (Petit i Luzum, 2010):

$$\vec{X} = \vec{X}_0 + \dot{\vec{X}}(t - t_0) + \sum_i \Delta\vec{X}_i(t) \quad (4.16)$$

gdje su:

\vec{X}_0 položaj tačke u referentnoj epohi,

$\dot{\vec{X}}$ linearna brzina tačke,

$\Delta\vec{X}_i(t)$ visokofrekventne varijacije kroz vrijeme, koje su posljedica sljedećeg:

- a) plimni valovi čvrste Zemlje,
- b) plimni valovi polova (tj. varijacije Zemljine rotacije),
- c) opterećenje zbog okeana,
- d) opterećenje zbog atmosfere,
- e) pomjeranje geocentra.

Ostaje dosta prostora za istraživanje i popravljjanja u cilju tačnog računanja zadnjeg člana u formuli (4.16). Nedostaju dovoljno dobri modeli za računanje: atmosferskog opterećenja, za pomjeranje geocentra, plimnih valova koji nastaju zbog okeanskog opterećenja i reakcije Zemlje na plimne valove. Također nedostaju dobri modeli za dnevna/poludnevna plimska opterećenja atmosfere, pomjeranja geocentra zbog plimnih valova okeana, itd.

Pored ITRF realizacija koje određuje i objavljuje Međunarodni servis za Zemljinu rotaciju i referentne sisteme – IERS, GNSS korisnici imaju dostupne realizacije globalnih geocentričnih referentnih sistema koje određuje i publicira Međunarodni GNSS servis – IGS.

4.2.7 Historija razvoja ITRF-a

Historija razvoja Međunarodnog terestričkog referentnog okvira ITRF ide unazad do 1984. godine, kad je prvi put ustanovljen terestrički referentni okvir-TRF (koji se tada zvao BTS84 - Buro d'Heur Terrestrial System), kombinacijom koordinata

koje su izvedene iz opažanja tehnikama: VLBI, LLR, SLR i Doppler/TRANSIT⁸⁴ (Boucher i Altamimi, 1985). BTS84 je realiziran u okviru aktivnosti Međunarodnog biroa za vrijeme-BIH, koji je u to vrijeme bio koordinirajući centar za međunarodni projekt nazvan Monitoring Zemljine rotacije i međusobna usporedba tehnika (Monitoring of Earth Rotation and Intercomparison Techniques-MERIT) (Wilkins, 1989).

Poslije ove, urađene su tri sukcesivne BTS realizacije. Zadnja je bila BTS87, jer je 1988 ustanovljen Međunarodni servis rotacije Zemlje-IERS. Od kako je realizirana prva ITRF88 realizacija, ustanovljeno je (i objavljeno) još dvanaest verzija, i svaka naredna je zamijenila prethodnu. Od tada su napravljena neprekidna poboljšanja u strategiji analize podataka a sve u cilju postizanja optimalne kombinacije za generiranje ITRF-a (Altamini, i dr. 2011).

U vremenu pisanja ovog rukopisa publicirano je 12 verzija, počevši s ITRF88 i završavajući s ITRF2014. Od ITRF88 do ITRF93, definicija ITRF datuma se može sumirati u skladu s IERS konvencijama iz 2010.:

- Ishodište i mjerilo: definirani kao sredina iz izabranih SLR rješenja;
- Orijehtacija: definirana kao sukcesivno poravnanje s BTS87, čija je orijentacija poravnata sa serijama BIH EOP. Treba naglasiti da je orijentacija ITRF93 ponovo poravnata s IERS EOP serijama.
- Evolucija orijentacije kroz vrijeme: nije računano globalno polje brzina za ITRF88, ITRF89, i ITRF90, tako da je primjenjivan za to vrijeme preporučeni model ponašanja tektonskih ploča nazvan AMO-2⁸⁵. Polje brzina se počelo računati počevši s realizacijama ITRF91 i ITRF93. Promjena orijentacije za ITRF91 je poravnata s modelom NNR_NUVEL-1 dok je za ITRF92 poravnata s NNR-NUVEL-1A, (koji je izveden iz NNR-NUVEL-1. Promjena orijentacije za ITRF93 poravnata je sa serijama IERS EOP.

⁸⁴ TRANSIT je bio američki navigacijski sistem koji je prvi implementirani satelitski navigacijski sistem, prethodnica je GPS-a.

⁸⁵ Model pomjeranja tektonskih ploča AMO-2 (Apsolute MOtion model) je stari model koji se zasniva na uvjetu „no global rotation“. AMO-2 model zavisi samo od usvojenih granica tektonskih ploča. (Mueller, 1998 str. 42)

Poslije ITRF94 korištene su potpune varijanc-kovarijancne matrice za individualna rješenja koja su inkorporirana u ITRF kombinaciju. U to vrijeme je ITRF datum određen kao što slijedi:

- Ishodište: definirano kao opća sredina izabranih SLR i GPS rješenja;
- Mjerilo: definirano kao opća sredina rješenja dobijenih tehnikama VLBI, SLR i GPS, koji su korigirani za 0,7 ppb da bi zadovoljile zahtjeve IUGG i IAU.
- Orijehtacija: poravnata s ITRF92;
- Promjena orijentacije kroz vrijeme: polje brzina poravnato s modelom NNR-NUVEL-1A, primjenjujući 7 promjena za 7 parametara transformacije.

ITRF96 je bila poravnata s ITRF94, i ITRF97 sa ITRF96, primjenom 14 parametara transformacije. Okvir ITRF2000 je bio zamišljen da bude standardno rješenje za geo-referenciranje i sve aplikacije geoznanosti. Zato je pored primarnih fundamentalnih stanica opažanih VLBI, LLR, SLR, GPS i DORIS, ITRF2000 progušćen s regionalnim mrežama na Aljasci, Antartiku, Aziji, Evropi, Sjevernoj i Južnoj Americi, kao i na Pacifiku.

Individualna rješenja korištena za ITRF2000 kombinaciju generirana su u različitim IERS analitičkim centrima uz primjenu različitih prisila: kao što su prisile koje se mogu lako otkloniti, labave ili minimalne prisile.

Definicija ITRF 2000 datuma karakterizirana je sljedećim osobinama, (Petit i Luzum, 2010):

- Ishodište: realizirano stavljanjem da su komponente translacije i njihove promjene između ITRF2000 i opće sredine najkonzistentnijih SLR rješenja jednake nuli;
- Mjerilo: realizirano stavljanjem da su parametri mjerilo i promjena mjerila između ITRF2000 i opće sredine VLBI i najkonzistentnijih SLR rješenja jednaki nuli. Za razliku od ITRF97 mjerila koje je kompatibilno s TCG, mjerilo ITRF2000 je kompatibilno sa TT skalom vremena;
- Orijehtacija: poravnata s orijentacijom ITRF97 u epohi 1997,0;
- Promjena orijentacije kroz vrijeme: poravnato, konvencionalno, s modelom NNR-NUVEL-1A.

ITRF mreža je popravljana tokom vremena tako da se povećavao broj stanica i koloakacija, ali se postepeno popravljao njihov međusobni raspored na planeti. Opisat će se samo realizacije objavljene u posljednjem stoljeću.

4.2.7.1 ITRF2000

Poslije 1998. godine su postignuta sukcesivna poboljšanja u analizi podataka u primjeni prisila, dodjeli težina pojedinih rješenja, kao i definiranju datuma. Definiranje datuma je bila kritična tačka, pošto upravo ovo treba da podari okviru puni geodetski i geofizički značaj. Poboljšanje strategije analize, kombiniranja rješenja IERS analitičkih centara kao i njihovom interakcijom omogućeno je ustanovljenje ITRF2000. Ovaj referentni okvir je (bar deklarativno) oslobođen od svih vanjskih prisila. U cilju određivanja geodetskog datuma (ishodište, mjerilo, orijentacija i evolucija kroz vrijeme), primijenjena je minimalna prisila, na geodetski konzistentan način, (Altamimi i dr, 2001).

Po prvi put u historiji određivanja međunarodnih terestričkih referentnih okvira, ITRF 2000 kombinira rješenja različitih svemirskih tehnika bez prisile, a ovo rješenje je dobijeno bez bilo kojeg modela tektonskog pomjeranja. Na ova rješenja je primijenjena minimalna prisila samo da bi se definirao osnovni terestrički referentni okvir. Ishodište ITRF2000 definirano je centrom mase Zemlje, kao što je opažano pomoću SLR tehnike. Mjerilo je određeno pomoću opažanja tehnikama SLR i VLBI. Orijehtacija je poravnata s orijentacijom ITRF97.

ITRF 2000 sačinjen je od, do tad najvećeg broja stanica. Njegova tačnost je bila bolja od ranijih realizacija; kao što je već rečeno uključeno je oko 800 stanica na oko 500 lokacija. Njihova distribucija na planeti je bila bolja u usporedbi s ranijim realizacijama. Međutim, još uvijek je koncentracija stanica bila najveća u Zapadnoj Evropi i Sjevernoj Americi. Za više od 50 % stanica, položaj je određen s boljom tačnošću od 1 cm, i za oko 100 stanica brzine koordinata su određene s boljim nivoom tačnosti od 1 mm/godini.

U cilju određivanja polova relativne rotacije za 6 najvećih tektonskih ploča, (koje su neovisne od promjene orijentacije TRF-a) korišteno je polje brzina za ITRF2000. S historijskog stanovišta, ova činjenica je važna jer je prvi put ustanovljena značajna sistematska razlika geodetski izvedenog polja brzina ITRF2000 i geološkog NUVEL-1A modela. Pokazalo se da model NUVEL-1A nije bio adekvatan da opiše aktualna pomjeranja. Tad se jasno dokazalo da kombinacija metoda svemirske/satelitske tehnike može biti primijenjena za određivanje globalnog modela pomjeranja ploča, ili da značajno doprinese određivanju mješovitog geodetsko-geološkog modela. Progušćeni ITRF2000 referentni okvir dao je polje brzina koji omogućava procjenjivanje detaljnih i lokaliziranih deformacija Zemljine kore u unutrašnjosti ploča kao i uzduž granica ploča.

Usporedba s polovima relativne rotacije NUVEL-1A, pokazuje vektor razlike od $0,03^\circ$ i $0,08^\circ/\text{m.god}$, (ekvivalentno s približno 1-7 mm/god preko površine Zemlje, u geometrijskom težištu svake ploče). Uglovna brzina za ITRF2000 za četiri velike ploče⁸⁶, u odnosu na Pacifičku ploču, indicira brže kretanje nego je predviđao geološko-geofizički model NUVEL-1A. ITRF2000 je pokazao da dvije tektonske ploče, na kojima se nalazi najveći broj opažaćkih referentnih stanica, tj. sjeverno-američka i euroazijska, izvode relativnu rotaciju oko Eulerovog pola od oko $0,056 (\pm -0,005)^\circ/\text{m.godina}$ brže od pola predviđenog modelom NUVEL-1A, a koji je lociran (10°N , 7°E) više ka sjeverozapadu u usporedbi s predviđanjima modela NUVEL-1A.

4.2.7.2 ITRF2005

Sve do rješenja ITRF2000 kao ulazni podaci za realizaciju ITRF-a su se koristila dugoperiodička globalna rješenja (koja su sadržavala položaje stanica i brzine) opažanja prikupljenih pomoću četiri tehnike, VLBI, SLR, GPS i DORIS. Sve ulazne podatke (tj. položaje i brzine) pripremali su različiti analitički centri koji su pri tom koristili različite modele i strategije.

Za računanje ITRF2005 su se po prvi put za ulazne podatke koristili sljedeći parametri: vremenske serije položaja stanica i njihovih brzina kao i orijentacioni parametri Zemlje-EOP. Relevantni IAG servisi su prijavili po jedno rješenje: sedmična rješenja su prijavili servisi satelitskih tehnika i dnevna rješenja za VLBI. Po prvi put u računanju oficijelnog terestričkog referentnog okvira učestvovala su još dva centra: njemački DGFI i kanadski NRCan (Natural Resources Canada).

Generiranje ITRF2005 radilo se u dva koraka, (Petit i Luzum, 2010; Altamimi 2009):

⁸⁶ Sve ploče osim australijske, (tj. euroazijska, sjevernoamerička, južnoamerička i afrička, jer ITRF2000 model je uzeo u razmatranje samo šest najvećih). Radi se o relativnom pomjeranju samo najvećih ploča u odnosu na pacifičku, koja je poznata kao ploča oko koje se proteže “vatreni prsten”-region gdje se historijski i aktuelno javljaju svakodnevno pojave kao što su: zemljotresi (slabijeg ili jačeg intenziteta), vulkani ili topli izvori. U tom pojasu se nalazi oblast gdje se desio jaki zemljotres u Japanu 2013., koji je izazvao razorni cunami, a što je za posljedice imalo katastrofalna pucanja reaktora nuklearnih elektropostrojenja, a posljedice su opasnost za cijelu planetu.

- a) Poređenje individualnih vremenskih serija za procjenu dugoperiodičkih rješenja za različite tehnike, koje sadrže položaje stanica u referentnim epohama i njihove brzine, kao i dnevne EOP parametre.
- b) Kombiniranje rezultirajućih dugoperiodičkih rješenja za sve četiri tehnike zajedno s lokalnim vezama u ko-lociranim stanicama.

Zbog toga su se osim uobičajenih ITRF proizvoda (staničnih položaja i brzina) dobili i drugi važni ITRF2005 rezultati, koji su također dostupni za korisnike:

- a) Potpune ITRF2005 SINEX datoteke, i za pojedine tehnike SINEX datoteke koje sadrže položaje stanica, brzine i EOP parametre s kompletnim varijanc-kovarijancnim matricama.
- b) Vremenske serije popravaka za položaje stanica, koje su se dobile kao rezultat usporedbe individualnih vremenskih serija iz četiri tehnike.
- c) Vremenske serije geocentra iz tehnika SLR i DORIS. Nema korisnih informacija o pomjeranju geocentra koje se mogu dobiti iz GPS/IGS prijavljenih sedmičnih rješenja koje su poravnate s ITRF2000.
- d) Pune vremenske serije za parametre EOP koje su konzistentne s ITRF2005.

Ishodište ITRF2005 je određeno na takav način da su izjednačeni s nulom translacija i promjene translacije u odnosu na centar mase Zemlje, a koje su izračunate kao sredina iz SLR vremenskih serija za period od 13 godina opažanja.

Mjerilo je određeno izjednačavanjem s nulom mjerila i njegove promjene u odnosu na VLBI vremenske serije za period od 26 godina opažanja. (Petit i Luzum, 2010) naglašavaju da je nakon objavljivanja ITRF2005, otkriveno da IVS VLBI rješenja korištena za računanje ITRF2005 nisu uključivala korekciju plimnih valova za pomjeranje polova koja se odnosi na putanju srednjeg pola, kao što su to preporučivale IERS konvencije 2003.

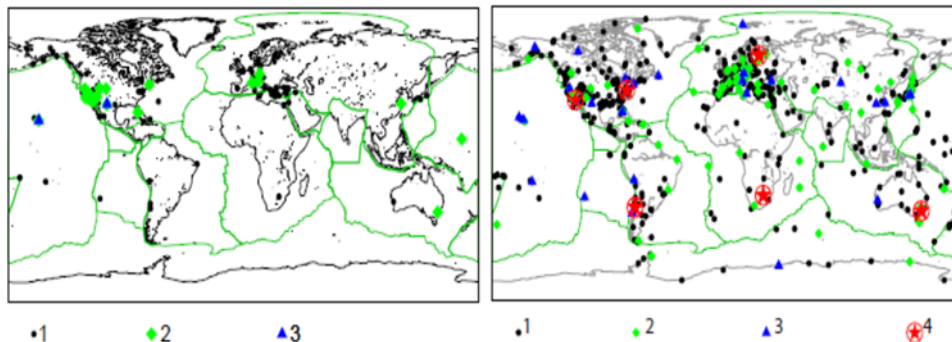
Naknadna analiza IVS rješenja u ITRF2005 kad je primijenjena korekcija plimnih valova na pomjeranje pola (Seitz i Schuh, 2010 str. 191-195), ustanovila je pogrešku mjerila za oko -0,5 ppb u odnosu na rješenje za ITRF2005. ITRF orijentacija (u epohi 2000,0) i njene promjene poravnate su sa ITRF2000 koristeći 70 stanica visoke geodetske kvalitete.

Na kraju se može reći da su i nakon poboljšanja uočene izvjesne slabosti i nekonzistentnosti koje su kasnije razmotrene.

4.2.7.3 ITRF2008

Realizacija ITRF2008 (usvojena u maju 2010. godine) pratila je istu strategiju koja je započeta s ITRF2005. Tako, ITRF2008 predstavlja pročišćenu verziju, koja se zasniva na ponovljenim procesiranim rješenjima četiri geodetske tehnike, VLBI, SLR, GPS i DORIS, koje su prikupljale podatke opažanja kroz period od 29, 26, 12,5 i 16 godina, respektivno, za svaku tehniku. ITRF 2008 okvir čine 934 stanice postavljene na 580 lokacija⁸⁷, (Slika 4-7). Vidi se neujednačen raspored stanica između sjeverne (gdje je postavljeno 463 stanice) i južne hemisfere (gdje ima 117 stanica).

Kao što Slika 4-7 pokazuje ukupan broj ko-lokacija je 105; Između njih, 91 stanica ima lokalne veze, koje su dostupne za kombiniranje u ITRF2008.



Slika 4-7: Raspored stanica i instrumenata ko-lociranih opažачkih tehnika u ITRF88 (lijevo, 20 stanica) i ITRF2008 (desno, 71 stanica), (Petit i Luzum, 2010, str.38).

Nažalost, svi ko-locirani instrumenti nisu radili. Npr. od 6 stanica koji su opremljeni sa instrumentima za sve četiri tehnike, samo su četiri bile potpuno operabilne. ITRF2008 je specificiran sa sljedećim parametrima okvira, (Petit i Luzum, 2010):

- a) Ishodište: definiran na način da su translacijski parametri u epohi 2005.0 i promjene translacija jednaki nuli u odnosu na vremenske serije ILRS SLR.

⁸⁷ Na nekim lokacijama su postavljene instrumente različitih svemirskih tehnika i takve stanice se nazivaju ko-locirane stanice. To su obično opservatorije u razvijenim državama ili su zbog popravljivanja globalne distribucije razvijene države investirale opremu u manje razvijene države svijeta.

- b) Mjerilo: definirano je tako da su: faktor mjerila u epohi 2005.0 i promjena faktora mjerila, jednaki nuli, u odnosu na srednje mjerilo i promjene mjerila VLBI i SLR vremenskih serija.
- c) Orijehtacija: definirana tako da su orijentacijski parametri u epohi 2005.0 jednaki nula i da su promjene rotacija jednake nuli između ITRF2008 i ITRF2005. Ova dva uvjeta su primijenjena preko skupa od 179 stanica koje su locirane na 131 lokaciji, uključujući 107 GPS, 27 VLBI, 15 SLR i 12 DORIS stanica.

4.2.7.4 ITRF2014

Zadnja i aktualna realizacija Međunarodnog terestričkog referentnog okvira ITRS, koju je u januaru 2016. godine objavio IERS, zove se ITRF2014. Po čemu se ova realizacija razlikuje od ranije objavljenih?

Ukratko i najvažnije: po prvi put je pri računanju jednog referentnog okvira primijenjeno modeliranje nelinearnog pomjeranja stanica, uključujući:

1. sezonske (godišnje i polugodišnje) trendove položaja stanica,
2. post-seizmičke deformacije za stanice koje su locirane u područjima koja su zadesili jaki zemljotresi.

Odgovarajući međunarodni servisi za sve četiri svemirske tehnike obezbijedili su potpuno iznova obrađene vremenske serije položaja stanica i EOP parametara, iz svih dosad dostupnih opažanja, i to: sedmična rješenja za SLR i DORIS, dnevna za GNSS te 24-satne sesije za VLBI tehniku.

ITRF2014 realizacija bi zbog ovog trebala biti bolja od ranije objavljenih realizacija referentnih sistema, jer precizno modelira aktuelne trajektorije referentnih stanica, što bi trebalo voditi pouzdanijem okviru i brzinama stanica. Dugoperiodički član ishodišta za ITRF2014 koincidira s centrom mase sistema Zemlja, koji je rezultat opažanja pomoću SLR tehnike. Mjerenja su rađena do dva vještačka Zemljina satelita LAGEOS kroz period od 22 godine, preciznije od 1993.0 do 2015.0. (Altamini i dr., 2016).

Tačnost određivanja položaja ishodišta referentnog okvira ITRF2014 procjenjuje se na <3 mm u epohi 2010.0 i $<0,2$ mm/god u vremenskoj evoluciji. Mjerilo ITRF2014 okvira je definirano pomoću aritmetičke sredine implicitnog mjerila određenog iz vremenskih serija za dvije svemirske tehnike: SLR i VLBI. Rezultirajuće mjerilo i razlike promjena mjerila između dvije tehnike jednake su sljedećem: $1,37 (\pm 0,10)$ ppb u epohi 2010.0 i $0,02 (\pm 0,02)$ ppb/god.

Modeli post-seizmičkih deformacija na stanicama su izračunati iz GNSS/GPS podataka. Dobiveni parametrijski modeli na stanicama koje su u kolokaciji sa zabilježenim zemljotresima, primijenjeni su na vremenske serije položaja stanica SLR, DORIS i VLBI. Pokazalo se da postoji visok stepen konzistentnosti, a što daje veću povezanost tehnika koje su kombinirane pri računanju ITRF2014.

Generalno je pri obradi podataka primjenjivana (osim naprijed navedenog) ista procedura kao za realizacije ITRF2005 i ITRF2008. Drugim riječima, ulazni podaci su bili vremenske serije položaja stanica i Zemljini orijentacijski parametri EOP, koje su pripremili Tehnički centri zaduženi za geodetske svemirske tehnike: VLBI, SLR, GNSS i DORIS. IERS tvrdi da je ITRF2014 bolje rješenje od ITRF2008 s obzirom da se temelji na potpuno novim računanjima parametara iz sve četiri svemirske tehnike.

Završne napomene: pri obradi podataka za ITRF2014 uvedene su dvije vrste inovacija:

1. godišnji i polugodišnji članovi za referentne stanice su izračunati iz dovoljno dugih perioda opažanja za sve četiri tehnike.
2. modeli za post-seizmičke deformacije (PSD) su određeni tako da odgovaraju GNSS/GPS podacima na stanicama koje su pretrpjele jake zemljotrese.

Rješenje ITRF2014 osigurava računanje uobičajenih proizvoda: položaje stanica u datoj epohi (2010.0), brzine stanica i Zemljine orijentacijske parametre (EOP). Međutim, PSD modeli su dio ITRF2014 proizvoda i dostupni su za sve četiri svemirske tehnike.

Transformacijski parametri izračunati su za preračunavanje koordinata referentnih mreža iz ITRF2014 u ranije realizacije ITRF, a dostupni su na web strani IERS servisa. Svi parametri su izvedeni iz parametara koje je IERS ranije objavljivao u svojim tehničkim izvještajima. Ovi parametri se koriste po modelu kao što je ranije pokazano formulom (4.3). Slika 4-8 pokazuje raspored stanica koje su se koristile za računanje transformacijskih parametara za prelaz između ITRF2014 i ITRF2008 okvira.

$T_x, T_y, i T_z$ su parametri translacije po osima XYZ , $R_x, R_y, i R_z$ su parametri rotacije oko osi XYZ a mjerilo je označeno kao D . Godišnji prirasti (promjene, eng. rate) parametara translacije, rotacije i mjerila su označeni: $\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z, \dot{R}_x, \dot{R}_y, \dot{R}_z, \dot{D}$.

Standardni model za računanje transformacije, napisan u raširenoj formi, izgleda kao u formuli (4.17) a vrijedi za naznačenu epohu, tj. $t_0 = 2010.0$. (vidjeti http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2014_ITRFs.txt)

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_x & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Tablica 4-1: Transformacijski parametri za prelaz iz ITRF2014 u ranije ITRF realizacije. (izvor: Altamini i dr., 2016)*

RJEŠENJE	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	EPOHA
Jedinice----->	mm	mm	mm	ppb	.001"	.001"	.001"	
Promjene	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	
Jedinice----->	mm/y	mm/y	mm/y	ppb/y	.001"/y	.001"/y	.001"/y	
ITRF2008	1.6	1.9	2.4	-0.02	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.0	0.0	-0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2005	2.6	1.0	-2.3	0.92	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.3	0.0	-0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2000	0.7	1.2	-26.1	2.12	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.1	0.1	-1.9	0.11	0.00	0.00	0.00	
ITRF97	7.4	-0.5	-62.8	3.80	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF96	7.4	-0.5	-62.8	3.80	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF94	7.4	-0.5	-62.8	3.80	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF93	-50.4	3.3	-60.2	4.29	-2.81	-3.38	0.40	2010.0
rates	-2.8	-0.1	-2.5	0.12	-0.11	-0.19	0.07	
ITRF92	15.4	1.5	-70.8	3.09	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF91	27.4	15.5	-76.8	4.49	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF90	25.4	11.5	-92.8	4.79	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF89	30.4	35.5	-130.8	8.19	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF88	25.4	-0.5	-154.8	11.29	0.10	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	

* Svi decimalni brojevi napisani su s tačkom umjesto zareza, kao u originalu. "Rates" znači promjene/prirast naznačenog parametra za godinu, tj. mm/godini (eng. mm/y).

U formuli (4.17), X_S, Y_S, Z_S , predstavljaju koordinate nekog starijeg referentnog okvira u kojem se žele izraziti koordinate tačaka koje su poznate u ITRF2014, a u formuli (4.17) označene su kao X, Y, Z . Ako se želi izračunati vrijednost bilo kojeg od sedam navedenih parametra P , u nekoj epohi t različitoj od $t_0 = 2010.0$, (što je referentna epoha navedena u (Altamini i dr., 2016)) onda se vrijednost tog parametra izračuna po formuli (4.18):

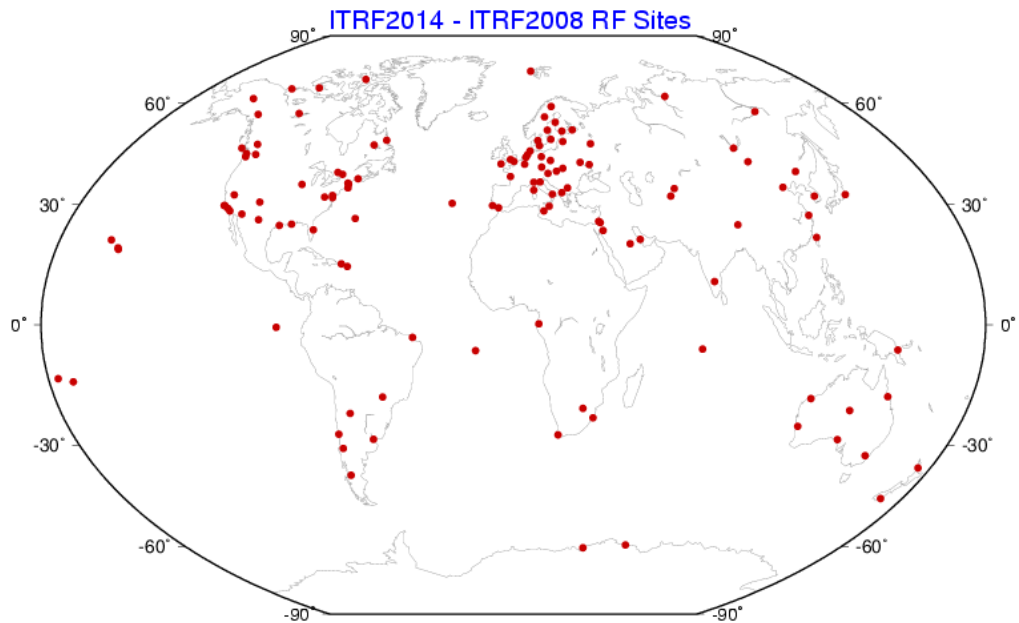
$$P(t) = P(t_0) + \dot{P}(t - t_0) \quad (4.18)$$

U gornjoj formuli važe oznake: $P(t)$ je bilo koji od sedam parametara transformacije čija se vrijednost želi izračunati u nekoj epohi različitoj od naznačene, $P(t_0)$ je vrijednost bilo kojeg od sedam parametara transformacije, \dot{P} predstavlja godišnju promjenu bilo kojeg od sedam parametara, tj.

$\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z, \dot{R}_x, \dot{R}_y, \dot{R}_z, \dot{D}, t_0$ je epoha za koju su izračunati navedeni parametri transformacije, t je epoha u kojoj se žele izraziti parametri transformacije.

Transformacijski parametri općenito imaju male vrijednosti za prelazak između ITRF2014 i ITRF08, kao što pokazuje

Tablica 4-1. Translacije po X i Y su ispod dva milimetra, a po Z iznosi 2,4 mm, koeficijent mjerila je -0,02 ppb, parametri rotacije su jednaki nuli. Ovi parametri su izračunati na osnovu 127 zajedničkih stanica, rasporeda kao što pokazuje Slika 4-8.



Slika 4-8: Glavna mreža ITRF2014 stanica korištenih za računanje transformacijskih parametara između ITRF2014 i ITRF2008 (izvor: Altamini i dr., 2016, str. 6120)

4.2.8 IGS referentni sistemi i servisi

Međunarodni GNSS servis-IGS (International GNSS Service⁸⁸) ustanovila je IAG, 1994. godine, nakon uspješnog pilot projekta koji je trajao više od jedne godine, (Seeber, 2003, str. 308). U skladu s IGS legislativom, njegov primarni zadatak je da „obezbjedi najbolji mogući kvalitet GNSS podataka i proizvoda koji će služiti kao podrška određivanju terestričkog referentnog okvira, Zemljine rotacije, opažanju Zemlje, te istraživanju, pozicioniranju, navigaciji, mjerenju vremena i drugim aplikacijama koje koriste društvu“.

IGS predstavlja globalnu mrežu od preko 500 permanentnih GPS i GLONASS stanica (Slika 4-9) iz preko 80 zemalja. Aktivnosti prikupljanja podataka obavljaju različiti centri za prikupljanje podataka: tri globalna i šest regionalnih. Deset analitičkih centara redovno procesiraju podatke i dostavljaju rezultate koordinirajućem analitičkom centru, koji proizvodi oficijelne IGS konačne proizvode.

Dakle, IGS producira i besplatno nudi korisnicima različite proizvode i servise. Rezultati postignuti tokom više od 24 godine postojanja, zadovoljavali su, i često prevazilazili, očekivanja čak i najoptimističnijih osnivača i najzahtjevnijih korisnika svojih proizvoda. Uspostavom novih satelitskih sistema za navigaciju i pozicioniranje, kao što je npr. evropski Galileo i kineski BeiDou, IGS dobiva nove zadaće, (Gendt, i dr., 2010).

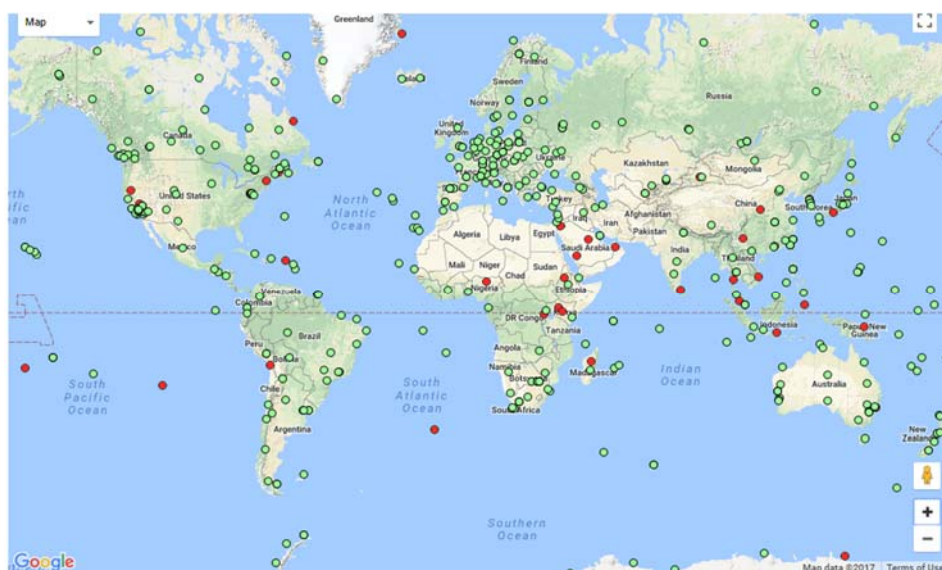
IGS proizvodi koji se objavljuju s različitom latentnošću mogu biti sljedeći:

- a) geocentrične koordinate i njihove brzine za više od 350 IGS stanica, sedmična rješenja u sinex formatu, s tačnošću 3 mm za horizontalni položaj i 6 mm za visine (za brzine: 2 odnosno 3 mm/god za visine),
- b) podaci opažanja na IGS stanicama, u rinex formatu,
- c) precizne efemeride/orbite GNSS satelita, u SP3 formatu, tačnosti 2 cm za finalne orbite,
- d) korekcije sata u GNSS satelitima i prijemnicima, CLK format,
- e) parametri orijentacije/rotacije Zemlje, (polarno kretanje, njegove promjene i dužina dana), ERP,

⁸⁸ Prvobitno ustanovljeni IGS servis imao je akronim koji je u to vrijeme (1. januar 1994. g.) predstavljao skraćenicu za International GPS Service for Geodynamics. Ime je promijenjeno 1999. godine u International GPS Service. Aktuelni naziv servisa „International GNSS service“ dobio je u martu 2005., (Dow, i dr., 2009).

- f) parametri troposferskog zenitnog kašnjenja, TRP,
- g) parametri jonosferskih TEC karata, IONEX.

Pored toga što IGS nudi svoje proizvode bez naknade za sve znanstvene i profesionalne aplikacije, također je ustanovio besplatni servis za precizno pozicioniranje tačka koji je nazvan IGS PPP servis. IGS je odredio striktnu proceduru za održavanje sve neophodne dokumentacije i metoda za analizu i procesiranje podataka, a da se pri tom pridržava usvojenih IERS konvencija i konstanti. Tako korisnici ovog servisa, pa čak i oni koji nisu specijalno poučeni mogu jednostavno i lahko koristiti IGS proizvode s najvećom tačnošću.



Slika 4-9: Globalni raspored stanica u IGS mreži (IGS, 2017)

Svi IGS proizvodi se oslanjaju na usvojeni geodetski referentni okvir i njihova tačnost i pouzdanost ovisi o tačnosti u prvom redu referentnog okvira i tačnosti implicitno sadržanog geodetskog datuma. Također, numeričke vrijednosti mjerenih veličina imaju značaj samo ako se odnose na dobro specificiran okvir, i njihova tačnost je ograničena, jednim dijelom, kvalitetom realizacije referentnog okvira.

Dakle, IGS i korisnici njegovih proizvoda se oslanjaju na hijerarhiju referentnih okvira. ITRF osigurava “apsolutni” dugoperiodični datum, tj. definira realizaciju terestričkog ishodišta, mjerila i orijentacije i njihovih promjena (evolucija) kroz vrijeme. Ovom ITRF okviru se može pridružiti ekvivalentna realizacija okvira koja se zasniva samo na GPS podacima opažanja. Ova nova realizacija se implementira

pomoću Helmertove 14 parametarske transformacije ali samo za izabrane, globalno raspoređene, IGS GPS permanentne stanice najvišeg kvaliteta.

Rezultirajuća IGS realizacija ima veću internu konzistentnost, i zato je pogodnija za IGS proizvode. Za mnoge aplikacije gdje se preferira diskretan a ne sekularan okvir, IGS produkti kao npr. efemeride ili korekcije sata u SP3 formatu osiguravaju jednostavan pristup skoro trenutnoj realizaciji, na bilo kojoj lokaciji. Međutim, i ovaj okvir ima svoje pogreške i karakteristike, koje korisnik treba poznavati, jer će efekti na njegove rezultate ovisiti od specifičnosti pojedinih aplikacija.

ITRF daje nedvojbeno najtačniju realizaciju ishodišta, orijentacije i mjerila kao i njihovih promjena. Ipak, kao što je rečeno, Međunarodni GNSS servis-IGS, ne koristi direktno ITRF realizacije za svoje proizvode, nego računa svoj IGS referentni okvir. Direktno uvođenje ITRF koordinata i brzina stanica za IGS proizvode bi izazvalo uvođenje distorzije i nekonzistentnosti, koje se u suprotnom ne bi mogle jednostavno izolirati i kontrolirati.

ITRF je dobiven kao kombinacija rješenja različitih svemirskih/satelitskih tehnika, dok se IGS proizvodi zasnivaju samo na GPS (GNSS) tehnici. Jedan od potencijalnih problema direktnog uvođenja ITRF-a bio bi taj što bi se tako ometalo razumijevanje i smanjivanje postojećih unutarnjih izvora pogrešaka. Ovo nikako ne znači da je referentni okvir koji se zasniva samo na GPS-u superioran nad ITRF-om, ili drugim tehnikama, nego znači da je IGS referentni okvir više "samo-konzistentan" jer se zasniva na GPS opažanjima. Bilo koji izvor pogrešaka u IGS okviru, koji su potisnuti upotrebom samo GPS rezultata (kao što je mogući defekt mjerila) mora se odvojeno ispitati u rješenjima iz kombinacije različitih geodetskih svemirskih/satelitskih tehnika.

Poslije 2000. godine, IGS je objavio više referentnih okvira koji se zasnivaju samo na IGS stanicama. Prvi u nizu bio je "IGS00", slijedi njegova druga verzija IGB00, koja se dobila primjenom Helmertove transformacije (izjednačenjem 14 parametara) iz ITRF2000. Pri tom su se izabrale samo GPS stanice najvišeg kvaliteta. Važno je naglasiti da je geodetski datum određen za ITRF2000 potpuno preuzet. Nakon objavljivanja referentnog okvira IGS00 (IGB00) isti je korišten kao osnova za ostale IGS proizvode.

Danas je moguće ostvariti IGS "trenutni" referentni okvir, zahvaljujući napretku postignutom u IGS proizvodima i servisima. Obrada GPS podataka je postala moguća za bilo koju pojedinačnu stanicu, uz primjenu IGS publiciranih preciznih orbita i korekcija satova. Postignuti rezultati su centimetarske tačnosti, ali se pri opažanju i procesiranju ne oslanjaju na bilo koju referentnu stanicu. Ovaj metod pozicioniranja predstavlja veliki napredak za geodeziju i njene aplikacije uopće.

Da bi ovaj novi pristup zadovoljio potrebe široke geodetske globalne zajednice, neophodno je da IGS proizvodi budu pouzdani.

Da bi korisnici dobili odgovarajuće tačnosti, moraju se primjenjivati metode konzistentne s IERS standardima, dodatnim konvencijama (tj. trebaju se primjenjivati korekcije za odstupanje faznog centra satelitskih antena od centra mase satelita) i praksom koju je usvojio IGS.

4.2.8.1 IGS00

Prvi IGS referentni okvir usko povezan s ITRF97 objavljen je je 27. februara 2000. god., (GPS sedmica 1051) i od tada se primjenjuje kao osnova za IGS proizvode. Zasnivao se na 51 stanici, koje su bile raspoređene preko cijele planete, a odabrane su samo one stanice koje su bile najboljeg kvaliteta, i nazvane su referentne stanice IGS okvira. Koordinate ovih pedesetak referentnih stanica IGS okvira imale su veću internu konzistentnost nego originalne koordinate istih stanica u ITRF, iako su orijentacija, translacija i mjerilo (uključujući i njihove promjene) potpuno ekvivalentne sa ITRF rješenjem.

Prema tome IGS finalni produkti se mogu smatrati kao da su u nominalnom, odgovarajućem ITRF-u, (Kouba, 2003). Između 2. decembra 2001. godine (GPS sedmica 1143) i 4. novembra 2006. godine (GPS sedmica 1399) koristila se realizacija IGS00⁸⁹ koja je bila blisko povezana s ITRF2000. Početno je izračunata IGS00 realizacija, koja se zasnivala na kumulativnim produktima za 54 referentne IGS stanice tj. koordinatama, brzinama stanica i parametrima Zemljine rotacije-ERP, (Weber, 2001), i primjenjivane su relativne korekcije faznog centra antena satelita i prijemnika, sadržane u datoteci igs_01.atx. Popravljen verzija ovog okvira objavljena je 11. januara 2004. godine (GPS sedmica 1253) pod imenom IGB00, koja se zasnivala na kumulativnim rješenjima za više od 100 referentnih IGS stanica, (Ferland, 2003).

“Apsolutna” tačnost IGS00 okvira uključuje i pogreške datuma ITRF2000. Najveće ograničenje je bila orijentacija ITRF okvira, i nepravilno modeliranih korekcija faznih centara antena prijemnika i satelita. Tačnost ITRF2000 koordinata referentnih stanica iznosila je 2 - 5 mm a njihove promjene su bile tačnosti na nivou 0.5 - 2 mm/godinu. Da bi se ITRF2000 direktno primjenjivao u IGS proizvodima,

⁸⁹ ili kasnije njena popravljena verzija IGB00.

bez degradacije tačnosti, rješenja svih drugih tehnika (kao i veze na ko-lociranim stanicama) bi se trebale slagati s IGS globalnim rješenjem na nivou sub-milimetarske tačnosti.

Ovo nije bio slučaj s IGS00 niti se očekuje u skorijom budućnosti postizanje ove konzistentnosti, što podržava potrebu za računanjem IGS realizacija referentnog okvira. Međutim, GPS podaci su utjecali na pogreške ishodišta zajedno s ITRF datumom. To je najviše bilo izraženo u pogreškama mjerila. Istraživanja su pokazala da je uzrok tome neodređenost modela kalibracije antena satelita i prijemnika, ali i neadekvatan model promjena rotacije, što je ekvivalentno dugoperiodičkim pomacima rotacije Zemlje.

4.2.8.2 IGS05

Referentni okvir IGS05 uveden je 5. novembra 2006. godine (tj. u GPS sedmici 1400). IGS05 je u uskoj vezi s ITRF2005. Ovaj referentni okvir je korišten za ponovno procesiranje starih GPS kampanja, unazad sve do 1994. godine. IGS05 je dobiven po analognim procedurama primijenjenim za IGS00 i IGB00. Međutim, postoje izvjesne razlike u proceduri računanja:

- IGS05 referentni okvira definiran je uz primjenu modela za apsolutnu kalibraciju antena,
- broj referentnih stanica povećao se na 132,
- IGS05 uzima u obzir pune varijanc-kovarijancne matrice,
- uveden je novi model opterećenja zbog okeanskih plimnih valova, tj. FES2004 s odgovarajućim korekcijama za pomjeranje centra masa⁹⁰.

IGS je tokom 2008 i 2009 uradio ponovno procesiranje svih podataka GPS opažanja od 1994. do 2008. godine, a u cilju umanjivanja diskontinuiteta te povećanja preciznosti i konzistentnosti IGS proizvoda. Kad je re-procesiranje završeno i verificirano krajem 2009. godine, rezultati su zamijenili sve IGS produkte od prije 2008. godine.

Na kraju samo naznaka da je pri procesiranju podataka opažanja u IGS05 referentnom okviru bilo neophodno koristiti zajedno datoteke (IGS05+igs05.atx),

⁹⁰ Ovo znači da ubuduće korisnici efemerida SP3 ne trebaju uzimati u obzir korekcije za centar masa Zemlje.

tj. primjenjivati apsolutne korekcije za odstupanja faznog centra antene i varijacija faznog centra antena satelita i prijemnika.

4.2.8.3 IGS08

Međunarodni GNSS servis-IGS je 17. aprila, 2011. godine usvojio novi referentni okvir koji je nazvan IGS08. Novi referentni okvir je poslije ovog datuma bio osnova za IGS produkte. IGS08 referentni okvir je bio usko povezan s ITRF2008 okvirom. Zajedno s IGS08 referentnim okvirom trebalo je primjenjivati novu datoteku za apsolutnu kalibraciju satelitskih antena i antena prijemnika na površini Zemlje, koja je bila nazvana igs08.atx.

Dakle počevši od GPS sedmice 1632 (17. april 2011.god), IGS je pri procesiranjima podataka primjenjivao datoteke (IGS08 + igs08.atx) umjesto datoteka (IGS05 + igs05.atx), koje su se koristile od GPS sedmice 1400 (5. novembar, 2006).

Razlike nove datoteke igs08.atx u odnosu na staru igs05.atx datoteku bile su:

- a) Unaprijeđene su kalibracije skoro svih antena prijemnika na IGS stanicama. Dodate su GNSS korekcije za pojedine tipove antena.
- b) Izračunate su korekcije za antene satelita jer u slučaju GNSS, radijalne (Z) komponente faznog centra antena satelita (PCO-phase center offset) imaju visoku korelaciju s mjerilom terestričkog okvira. Pošto se mjerilo IGS08 realizacije razlikuje za ~ -1 ppb od mjerila okvira IGS05 (zbog datumskog pomaka između ITRF2005 i ITRF2008), radijalna komponenta odstupanja faznog centra svih GPS i GLONASS satelitskih antena je ponovo izračunata u skladu s mjerilom IGS08.

IGS08 je bio definiran tako da su iz skupa definirajućih ITRF2008 stanica, odabrane 232 stabilne IGS stanice koje imaju dobru historiju opažanja. Stabilnost stanica procijenjena je iz rezultata ITRF2008 (tačnosti brzina, tačnosti residuala vremenskih serija, broj diskontinuiteta).

Globalna distribucija IGS08 stanica varirala je s regionalnom gustom IGS stanica, iako to nije poželjno.

Korigirane su koordinate stanica zbog kalibracija antena prijemnika. To je urađeno jer su koordinate ITRF2008 stanica bile konzistentne s igs05.atx datotekom, koja sadrži informacije o kalibracijama. Referentni okvir IGS08, po definiciji, treba biti konzistentan s igs08.atx datotekom kalibracija. Utjecaj ovog unapređenja kalibracija na koordinate stanica IGS08 bio je procijenjen analizom koja se bazirala na strategiji PPP (Precise Point Positioning).

U nekim slučajevima, utjecaj nije mogao biti zanemaren u pogledu preciznosti ITRF2008. Korišten je prag tolerancije 1,2 mm za komponente istok/sjever (E/N) ili 3 mm u komponenti visine/gore (U). Korekcije koje su se izvele iz PPP analize primijenjene su na ITRF2008 koordinate. To je poslužilo za odabir 65 IGS08 stanica koje su konzistentne s igs08.atx. Koordinate ostalih 167 IGS08 stanica su iste kao u ITRF2008.

Da bi se zadovoljile potrebe regionalnih korisnika IGS08 referentnog okvira, izabrano je dosta referentnih stanica u oblastima gdje je pokrivenost GNSS stanicama dosta gusta, kao što je npr. slučaj u Evropi. Kao posljedica ovoga pojavljuje se heterogenost u IGS08 referentnoj mreži, što je ne čini optimalnom za globalni okvir. Da bi se izbjegla heterogenost mreže izabrane su stanice koje čine dobro distribuiranu globalnu IGS08 mrežu. Ova mreža se nazvala *glavnom IGS08 mrežom* (eng. IGS08 core network).

Glavnu IGS08 referentnu mrežu čini 91 primarna stanica (Slika 4-9). Izabrane su i zamjenske stanice u slučaju da neke od primarnih ne budu dostupne. IGS08 glavna mreža se preporučila za globalne aplikacije i koristila se kao referentna za IGS glavne produkte.



Slika 4-9: Globalni raspored 91 stanice glavne IGS mreže.
(izvor: Rebischung i dr., 2011, str. 12)

U idealnim slučajevima, trebalo je koristiti u obliku minimalne prisile, da bi se dobila orijentacija globalnog okvira (tj. primjenom “no-net-rotation” uvjeta). Za regionalne i druge (lokalne) aplikacije, IGS08 okvir se realizirao lokalno, sa

adekvatnom tačnošću, na način da se birao što je moguće veći broj IGS08 stanica u posmatranoj regiji, sa ili bez a priori prisila.

Međutim, usvojeni IGS08 je uskoro pretrpio posljedice gubitka kontinuiteta referentnih stanica iz dva razloga:

- a) jakih zemljotresa koji su se desili u 2011. godini,
- b) zamjena antena, ali to je bio i ranije kritičan problem IGS-a.

U cilju prevazilaženja kriznih situacija za IGS proizvode, bilo je neophodno provoditi redovno ažuriranje IGS08 referentnog okvira. Međutim, za ovakva ažuriranja je bilo potrebno izračunati IGS08 koordinate koje su odgovarale stvarnoj situaciji na terenu, poslije pojava diskontinuiteta (zemljotresa, promjene antene, i sl.). Reibischung, i dr. u (2011) je najavio prijedlog metode za dobivanje ažurnih koordinata referentnih tačaka, a metoda se zasniva na IGS operativnim kumulativnim rješenjima.

4.2.8.4 Utjecaj uvođenja IGS08 na koordinate stanica

Računanje koordinata stanica uz korištenje datoteka IGS08/igs08.atx, i primjenu IGS proizvoda (npr. preciznih orbita, korekcija sata, atmosferskih korekcija,...) je davalo bolje rezultate iz dva razloga:

- a) Koordinate su trpjele globalni utjecaj zbog promjene datuma ITRF2005 na ITRF2008,
- b) Koordinate stanica koje su opremljene antenama čije su kalibracije unaprijeđene, za efekt koji je zavisao od stanice, zbog unaprijeđene kalibracije.

Razlika mjerila između IGS05 i IGS08⁹¹ prouzrokovala je srednje smanjenje visine stanice za oko 6 mm; Translacija po Z osi je naglasila ovaj efekt u južnoj hemisferi i ublažila u sjevernoj hemisferi.

Translacija po Z osi je također prouzrokovala pozitivan pomak ka sjeveru, posebno za stanice bliže ekvatoru, tj. stanice male geodetske širine.

Na parametar translacije po osi Z je također utjecalo postignuto unapređenje kalibracije antena prijemnika. Unapređenje kalibracije, tj. prelazak s datoteke igs05.atx na datoteku igs08.atx, izazvalo je dodatne promjene koordinata mnogih

⁹¹ zbog pomaka datuma nastalog prelazom iz ITRF2005 u ITRF2008.3

stanica. Ovaj efekat je uglavnom ovisan o tipu antene, ali također ovisi o položaju stanice.

Osim rečenog, naglašava se da "totalnu" transformaciju iz IGS05 u IGS08, treba posmatrati kao sumu globalne Helmertove transformacije zbog promjene datuma pri prelasku iz ITRF2005 u ITRF2008, te korekcija koje su specifične za pojedinačne stanice zbog razlika nastalih zbog primjene različitih podataka kalibracije antena u datotekama igs05.atx i igs08.atx, ažurirane kalibracije antena prijemnika na Zemlji.

4.2.8.5 IGS14

Međunarodni GNSS servis je 29. januara 2017. godine (GPS sedmica 1934) usvojio novi referentni okvir pod nazivom IGS14. Istovremeno je pri obradi podataka GNSS opažanja počeo primjenjivati datoteku IGS14/igs14.atx s unaprijeđenim skupom podataka o kalibracijama antena na GNSS satelitima i prijemnicima. IGS14 referentni okvir od sredine februara 2017. godine predstavlja osnovu za IGS proizvode, a izveden je iz nove verzije Međunarodnog terestričkog referentnog okvira ITRF14.

Nova datoteka o kalibraciji antena sadrži dodatne podatke o robotskoj kalibraciji novih tipova antena prijemnika. Procenat IGS opažачkih stanica s apsolutnom kalibracijom antena tako prelazi 90%. Očekivati je da će ovo rezultirati u povećanoj tačnosti koordinata IGS referentnog okvira a tako i geodetskih mreža koje se oslanjaju na IGS proizvode. Također su uključeni podaci o novim kalibracijama antena na satelitima koji su lansirani poslije septembra 2012. godine, kako američkog GPS, tako i ruskog GLONASS sistema. Ovo bi trebalo dati bolje međusobno slaganje dnevnih rješenja (zbog popravljene razmjere IGS mreže) i očekuje se bolje slaganje s ITRF14 rješenjem.

Glavna IGS14 mreža, dizajnirana je da osigurava dobru globalnu geometriju rasporeda stanica, sadrži 51 stanicu (Rebischung, 2016), a svaka ima određenu zamjensku stanicu. Referentne koordinate pojedinih stanica osnovne mreže IGS14 imaju pridružen model post-seizmičkih deformacija u obliku eksponencijalnih i/ili logaritamskih funkcija.

4.3 OSVRT NA POGLAVLJE

Globalni geodetski referentni sistemi (ITRF ili IGS) će se vjerovatno još puno puta redefinisirati ili dopunjavati, bilo zbog tehnološkog poboljšanja u mjerenju i obradi

podataka ili eventualnih budućih promjena na Zemljinoj površini, tj. pomjeranja referentnih stanica koji su nastali kao posljedica jakih zemljotresa ili drugih prirodnih ili antropoloških dešavanja. Očekivati je da će se svakih nekoliko godina objavljivati nove realizacije referentnih sistema, što je u skladu s ranije napisanim.

Čitalac se upućuje na web portale međunarodnih IAG servisa IERS i IGS gdje se nalaze informacije i podaci o objavljenim referentnim okvirima te odgovarajući parametri za transformaciju, kao i satelitske efemeride različite tačnosti i latentnosti, korekcije sata satelita, podaci kalibracija antena prijemnika i satelita, EOP parametri, itd.

IERS okviri:

http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/index.php;

http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/index.php

IERS transformacijski parametri:

http://itrf.ensg.ign.fr/trans_para.php;

http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2014_ITRFs.txt

IGS proizvodi: <http://www.igs.org/products>

Nepogodnost globalnih geocentričnih referentnih okvira u svakodnevnoj primjeni je ta što se položaji opažanih stanica vremenom mijenjaju. Svaki geodeta koji radi npr. u katastarskom uredu bi svakodnevno morao transformirati koordinate iz jednog referentnog okvira u drugi ili pak prevoditi koordinate tačaka iz jedne epohe opažanja u drugu. Da bi se ovo izbjeglo IAG Komisija za referentne okvire je preporučila da se za praktičnu upotrebu (npr. katastarske i inženjerske aplikacije) usvoje referentni sistemi vezani za čvrsti dio kontinentalnih tektonskih ploča. Za Evropu se tako usvojio Evropski terestrički referentni sistem - ERTS89, što je opisano u sljedećem poglavlju.

Glava 5

5 EVROPSKA REFERENTNA MREŽA

Jedinstveni evropski referentni okvir EUREF (European Reference Frame) je Podkomisija za referentne mreže za Evropu 1.3, koja je integralni dio IAG Komisije 1 za regionalne referentne okvire. Dugoročni cilj EUREF-a je definicija, realizacija i održavanje Evropskog referentnog okvira. EUREF je fokusiran ne samo na geoprostorne⁹² nego i vertikalne komponente (Torres i dr., 2009, str. 1).

Zadatak EUREF-a je da obezbijedi najbolji mogući, jedinstveni, homogeni referentni sistem i njegove realizacije, koji će se primjenjivati širom cijele Evrope za sve praktične i znanstvene aktivnosti vezane za precizno georeferenciranje i navigaciju, istraživanja u geoznanostima i multidisciplinarnim projektima.

Za realizaciju svojih zacrtanih zadataka EUREF koristi sve dostupne, najtačnije, najpouzdanije, terestričke i svemirske tehnike. Za ispunjenje tih ciljeva nastoji da razvija neophodnu znanstvenu infrastrukturu i metodologije za kombiniranje heterogenih mjerenja.

Zato, provedene aktivnosti trebaju da budu produkti i servisi najboljeg kvaliteta kako bi poslužili kao adekvatna podrška ovim ciljevima. EUREF se zato opredijelio da radi neprekidne inovacije, stremi zadovoljenju visokih zahtjeva svojih korisnika, ali i nastoji da održi i proširi mrežu ljudi i organizacija, koji svojim volonterskim radom pomažu ostvarivanju zajedničkog interesa- potrebnih kvalitetnih geoprostornih informacija za Evropski prostor.

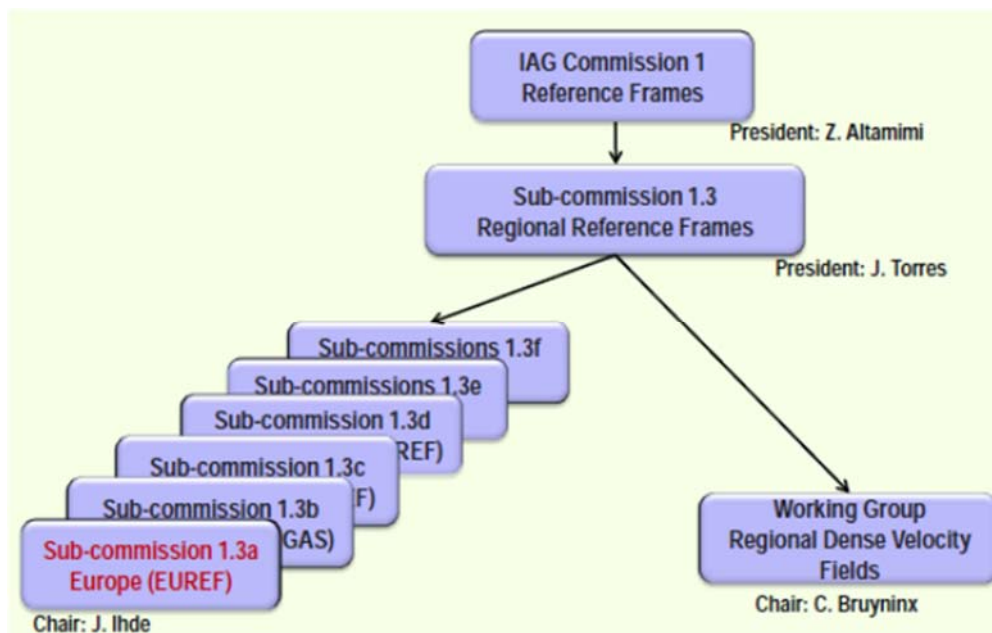
Visoki zahtjevi zajednice korisnika EUREF proizvoda i servisa stalno rastu, te su stremljenja orijentirana na naglašenu potrebu kombiniranja GNSS i informatičke tehnologije. Međutim trenutni status aktivnosti bi mogao biti predstavljen kroz sljedeće:

- a) Pregled i organizacija EUREF-a;

⁹² 3D koordinate

- b) Realizacija ETRS89 (European Terrestrial Reference System) i veze sa realizacijama ITRS-a;
- c) EUREF permanentna mreža-EPN (EUREF Permanent Network), njen doprinos održavanju Evropskog terestričkog okvira–ETRF (European Terrestrial Reference Frame) kao i ITRF-a, i projekata koji su s njima povezani;
- d) Aktivnosti i projekti koji se provode u realnom vremenu, razvoj standarda i operativnih sredstava za dostavu i širenje GNSS podataka preko interneta, u kontekstu stremljenja IAG-a ka distribuiranju podataka u realnom vremenu;
- e) Evropski vertikalni referentni sistem-EVRS (European Vertical Reference System), uključujući status Ujedinjene evropske nivelmanske mreže-UELN (Unified European Leveling Network) i Evropske unificirane vertikalne akcije progušćavanja-EUVN_DA (European Unified Vertical Densification Action);
- f) Status i usvajanje ETRS89 sistema u evropskim državama i organizacijama kao oficijelnog sistema od njegovog usvajanja 1990. godine;
- g) Dalja dostignuća, oglašavanje (web portal), vanjski kontakti i organiziranje simpozijuma; sumiranje i analiziranje postignutih rezultata, izdavanje publikacija.

Slika 5-1 pokazuje organizaciju IAG Komisije 1 za referentne okvire, od *a* do *f*. EUREF predstavlja Podkomisiju 1.3a za Evropu.



Slika 5-1: Organizacija EUREF-a (izvor: Bruyninx, 2011)

5.1 DEFINICIJA I REALIZACIJA ETRS89

ETRS89 je usvojen Rezolucijom br. 1 EUREF simpozijuma održanog 1990. godine u Firenzi. Rezolucija je glasila: “IAG Sub-komisija za EUREF preporučuje da se sistem kojeg usvaja EUREF koincidira s ITRS u epohi 1989.0 i bude fiksiran za stabilni dio Euroazijske ploče, te bude nazvan Evropski terestrički referentni sistem 1989 (ETRS89)”⁹³.

Kao posljedica ove definicije u kojoj je određena i povezanost s ITRS-om, karakter realizacije ETRS-a, određen je transformacijskim formulama između dva sistema. Različite realizacije ETRS89 sistema označavaju se kao ETRF2000, ETRF2005, ETRF2008 ili ETRF2014. Sve su ove realizacije povezane s njihovim odgovarajućim ITRF realizacijama, tj., ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008 i ITRF2014, jer se tektonsko pomjeranje Euroazijske ploče može odrediti u odnosu na ITRS.

Oba sistema, globalni i evropski, su povezana pomakom između ITRF_{gg}⁹⁴ i ETRF_{gg} u odnosu na epohu 1989.0 i rotacijom koja je izračunata za pomjeranje stabilnog dijela Euroazijske ploče od 1989.0. Opći model je 14 parametarska transformacija, (kao što pokazuju jednačine (5.1), do (5.3)), ali je većina parametara jednaka nuli.

Koordinate kojima se izražava položaj tačaka na Euroazijskoj ploči, računaju se po sljedećim formulama (Torres i dr., 2009, str. 49) :

$$\mathbf{XE}(t_c) = \mathbf{XI}_{gg}(t_c) + \mathbf{T}_{gg} + d\mathbf{R}_{gg}\mathbf{XI}_{gg}(t_c)(t_c - 1989.0) \quad (6.1)$$

gdje je:

$\mathbf{XE}(t_c)$ je vektor položaja u ETRS89 za epohu t_c ,

$\mathbf{XI}_{gg}(t_c)$ je vektor položaja u ITRF_{gg} u epohi t_c ,

\mathbf{T}_{gg} je vektor translacije iz ITRF_{gg} u ETRF89,

$d\mathbf{R}_{gg}$ je matrica koja sadrži tri rotacije u ITRF_{gg}, koja se može napisati kao:

⁹⁴ U skraćenim nazivima ITRF_{gg} i ETRF_{gg} indeks gg se odnosi na godinu realizacije.

$$d\mathbf{R}_{gg} = \begin{bmatrix} 0 & -dR3_{gg} & dR2_{gg} \\ dR3_{gg} & 0 & -dR1_{gg} \\ dR2_{gg} & dR1_{gg} & 0 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Brzine pomjermanja opažanih stanica se računaju prema sljedećim formulama:

$$d\mathbf{X}\mathbf{E}_{gg} = d\mathbf{X}\mathbf{I}_{gg} + d\mathbf{R}_{gg}\mathbf{X}\mathbf{I}_{gg} \quad (6.3)$$

gdje je:

$d\mathbf{X}\mathbf{E}_{gg}$ vektor brzine u ETRS89,

$d\mathbf{X}\mathbf{I}_{gg}$ vektor brzine u ITRS.

Na stabilnom dijelu euroazijske ploče horizontalne brzine pomjermanja tačaka su oko 1 mm/god., a u dijelovima skandinavskih država oko 2 mm/godinu. U nestabilnim dijelovima euroazijske ploče (npr. u Grčkoj i Italiji) horizontalne brzine su oko 10 puta veće, tj. iznose oko 10 mm/god. Vertikalne brzine tačaka širom Evrope iste su kao kod ITRF realizacija.

EU države su, prateći preporuke EUREF Tehničke radne grupe usvojile ETRF2000 kao konvencijski okvir ETRS89 sistema. Države Zapadnog Balkana koje još nisu EU članice⁹⁵ također su usvojile preporuku, te se ETRF2000 koristi u ovim državama kao referentni okvir za svakodnevne geodetske zadatke i georeferenciranje, ako se ne zahtijeva bolja tačnost od centimetarske. INSPIRE (Infrastructure for spatial information for Europe) direktiva⁹⁶ koristi međutim ETRS89 a ne neku posebnu realizaciju .

⁹⁵ U Bosni i Hercegovini se ETRF2000 koristi već oko 20 godina, iako zakon o ovom još nije usvojen.

⁹⁶ INSPIRE direktiva je skup pravnih propisa, sadrži 34 geoprostorne teme. Usvojile su je sve EU članice 15. maja 2007. godine. Direktiva treba biti implementirana do 2021. godine. Cilj INSPIRE direktive je da kreira EU prostorne podatke kao infrastrukturu za okolišnu politiku i aktivnosti koje mogu imati utjecaj na okoliš. Ova direktiva omogućuje da se geoprostorni podaci vezani za okoliš dijele između organizacija u javnom sektoru. Ovo omogućuje pristup javnosti geoprostornim informacijama u Evropi, a u cilju pomaganju prekogranične saradnje i kreiranju usaglašenih političkih propisa.

Vremenom se razlika između realizacije ITRF-a i ETRS89-a povećava jer se euroazijska ploča pomjera u pravcu sjever-sjeveroistok za oko 2.5 cm/god. To znači da se razlika do sad nakupila za oko 70 cm.

ETRF2014 je dosad najtačnija realizacija ETRS89 jer se zasniva na ITRF2014 koja je također bolje tačnosti od predhodnih (Altamini, 2016). Uvažavajući ove činjenice, na simpozijumu EUREF 2017 preporučeno je da EUREF razmotri usvajanje ETRF2014, kao novi konvencijski okvir ETRS89 i pripremi neophodne transformacijske parametre (Altamini i dr., 2017), ili da se pređe u potpunosti na kinematički referentni okvir vezan za ITRF realizacije.

5.2 REALIZACIJA ETRS89

Prva realizacija ETRS98 bila je ETRF89, koja je realizirana korištenjem opažanja u evropskim opservatorijama tehnikama SLR i VLBI. Da bi se ova kičma mreže progustila organizirane su GPS kampanje, da bi se dobila geodetska mreža veoma preciznih referentnih stanica. Prva u nizu je bila kampanja EUREF 89, u kojoj su se opažale 92 stanice širom Evrope. Od tada do danas se proveo čitav niz takvih kampanja u cilju proširivanja EUREF mreže na teritorij cijele Evrope, ali i progušćavanje postojećih mreža. Radi procjene tačnosti, stanice su klasificirane na sljedeći način:

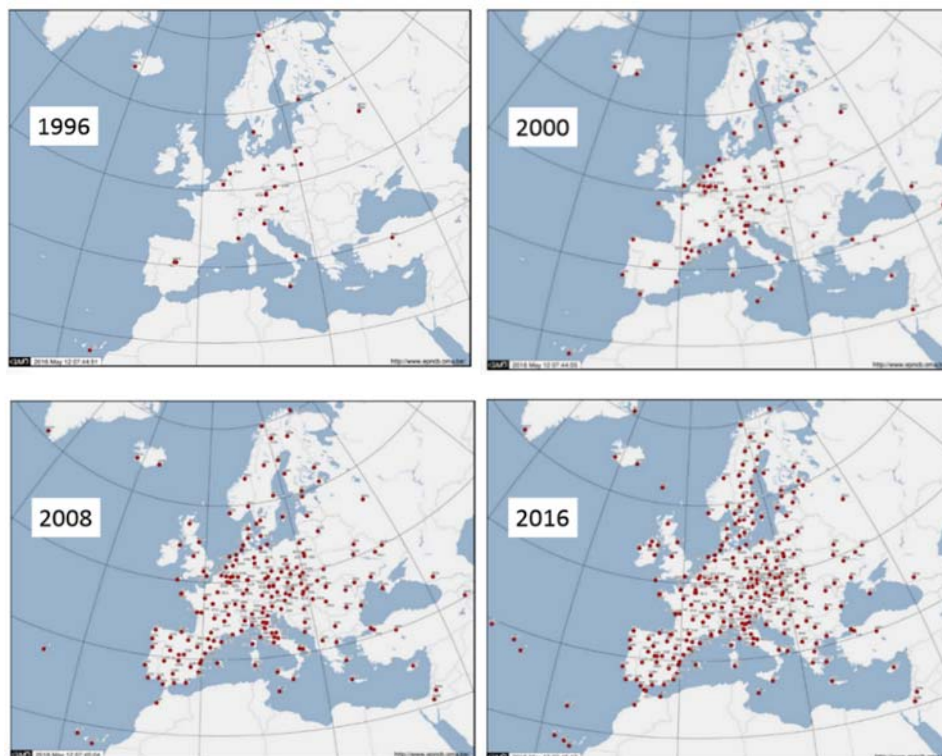
- a) Stanice A klase (tačnost 1 cm nezavisno od epohe). U ovu klasu spadaju permanentna GPS opažanja dobrog kvaliteta.
- b) Stanice B klase (tačnost 1 cm u specifičnoj epohi). U ovu klasu spadaju mreže opažane u GPS kampanjama nakon 1993. godine.
- c) Stanice klase C (tačnost 5 cm ili bolja u specifičnoj epohi).

Računanje GPS kampanja rađeno je u skladu sa specifikacijama koje su opisane u (Boucher i Altamimi, 2008), a ukratko procedura je sljedeća:

- a) Prvo se izračunaju koordinate opažanih stanica u centralnoj epohi opažanja, u koordinatnom sistemu ITRS, i pri tom se koriste zadnja rješenja referentnog okvira ITRFgg.
- b) Potom se rezultirajuće koordinate transformiraju u ETRS89 u centralnoj epohi opažanja, po formulama (5.1), (5.2).
- c) Svi rezultati EUREF kampanja trebaju se prijaviti Tehničkoj radnoj grupi - TWG (Technical Working Group) koja ih treba valorizirati, (Kenyeres, 2008; EUREF, 2009).

5.3 EVROPSKA PERMANENTNA MREŽA

Evropska permanentna mreža EPN (European permanent network) osnovana je 1996. godine, s ciljem da služi kao jezgro EUREF mreže. Raspored i gustinu stanica EPN mreže i njen razvoj kroz dvadeset godina postojanja reflektiraju četiri karte koje su pokazane na Slici 5-2. EPN je ključni instrument za održavanje EUREF mreže i pristup ETRS89. Svoj rad zasniva na postojećim GNSS permanentnim stanicama i dobrovoljnom učešću institucija koje te stanice održavaju, a voljne su da svoje podatke dijele u cilju znanstvenih istraživanja na međunarodnom nivou.

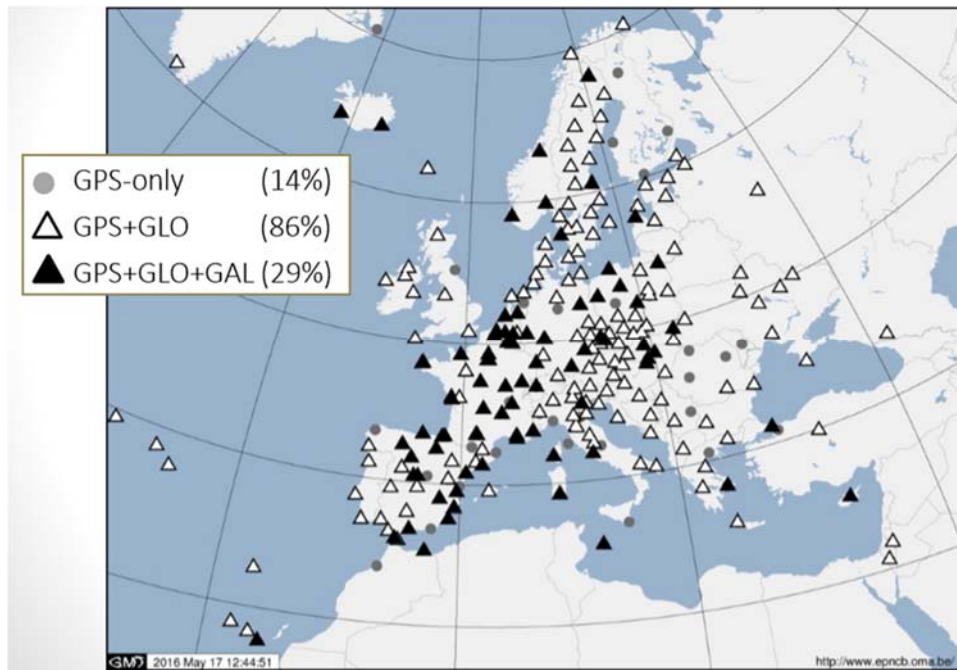


Slika 5-2: Raspored referentnih stanica EPN mreže u godini osnivanja 1996. godine i razvoj tokom 20 sljedećih godina. (izvor: Bruyninx i dr., 2016)

Današnja EPN mreža proteže se preko cijelog evropskog kontinenta. Sačinjavaju je 283 stanice⁹⁷, (Bruyninx i dr., 2016) od kojih preko 200 zadovoljavaju standard

⁹⁷ Status 2016.

klase A. Na svim stanicama operiraju dvofrekventni ili trofrekventni GNSS prijemnici. Slika 5-3 pokazuje sposobnost praćenja multi-GNSS sistema. Mreža radi u skladu s dobro definiranim standardima i uputstvima za operiranje stanica, protok i analizu podataka u analitičkim centrima, što osigurava efikasnost i dugoročni kvalitet EPN proizvoda. EPN baštini volonterski rad i doprinos preko 100 evropskih znanstvenih institucija: univerziteta, istraživačkih instituta, geodetskih i kartografskih državnih agencija i uprava.



Slika 5-3: Evropska permanentna mreža: praćenja GNSS signala: samo GPS, GPS+GLONASS te GPS+GLONASS+Galileo: status maj 2016. (izvor: Bruyninx i dr., 2016)

EPN ustupa svoje podatke IGS-u, i zbog toga se može reći da zadovoljava IGS kriterije. Svih 16 analitičkih EPN centara koriste pri procesiranju podataka IGS orbite i parametre Zemljine rotacije-ERP, kao i iste modele faznog centra satelita

i prijemnika. Sedmična rješenja svih 16 analitičkih centara⁹⁸ se kombiniraju u jedno oficijelno kombinirano EUREF rješenje koordinata i drugih proizvoda. EPN mreža predstavlja regionalno progušćenje IGS mreže u Evropi.

Oficijelno kombinirano EUREF rješenje sadrži koordinate svih aktivnih GNSS stanica⁹⁹. To je rješenje povezano s istim ITRFgg kao i IGS orbite. Za povezivanje s ITRFgg primjenjuje se minimalna prisila, (od GPS sedmice 1303, tj. decembar 2004). Počevši od GPS sedmice 1400, IGS orbite su u vezi s IGS05¹⁰⁰, dok je od 17. aprila 2011. godine povezan s IGS08¹⁰¹. EUREF je pratio IGS procedure i prešao na model apsolutnih kalibracija faznog centra antena simultano s IGS-om. Primijenjeni su podaci za kalibracije individualnih antena gdje su iste bile urađene. EPN proizvodi su:

- a) koordinate i brzine stanica,
- b) troposfersko zenitno kašnjenje,
- c) vremenske serije koordinata stanica.

EPN proizvodi namijenjeni su korisnicima koji pri svojim aplikacijama trebaju ostvariti visoku tačnost, a rade u oblastima geodezije, navigacije, geofizike, meteorologije, mjerenja vremena, itd..

EPN stanice su klasificirane prema tipu kalibracije faznog centra na blokove A1, A2, i B, kao što pokazuju Slika 5-4.

Tip A: apsolutni model kalibracije varijacija faznog centra antene, koji je zasnovan na kalibraciji robotskom rukom.

A1: individualna kalibracija,

A2: tipska kalibracija.

⁹⁸ Individualni analitički centri procesiraju permanentne stanice po svom izboru, i broj stanica varira od oko 40 do preko 100.

⁹⁹ Za detalje o posljedicama uključenja samo izabranih EPN stanica u realizaciji ITRF2005, vidjeti (EUREF, 2009).

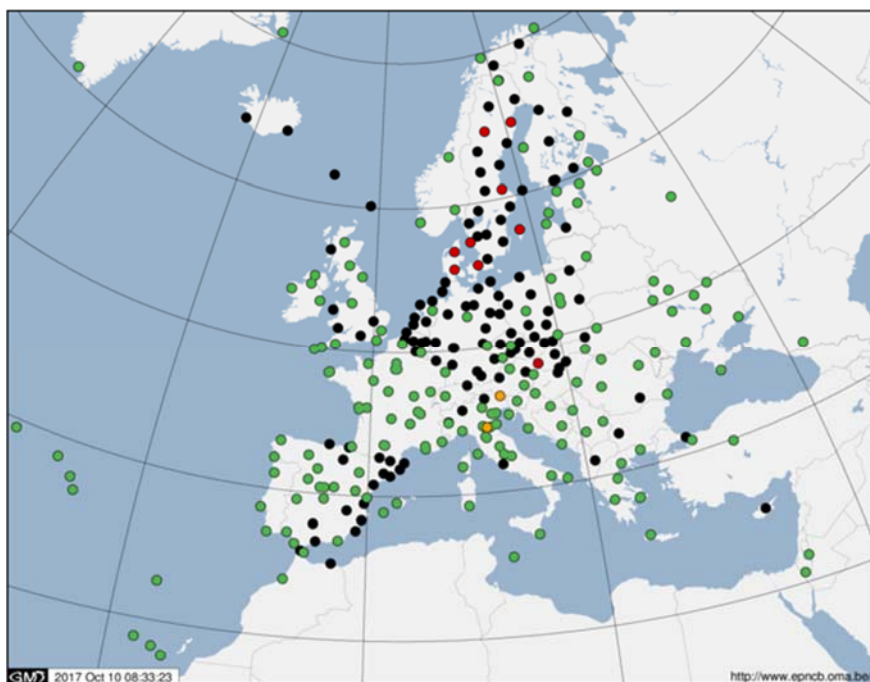
¹⁰⁰ IGS05 je IGS realizacija ITRF2005. U isto vrijeme je IGS zamijenio relativni model kalibracija antena s apsolutnim modelom, tj. umjesto igs01.atx počeo se koristiti igs05.atx;

¹⁰¹ IGS08 je IGS realizacija ITRF2008. U isto vrijeme se počeo primjenjivati unaprijeđeni model apsolutnih kalibracija antena igs08.atx;

Tip **B**: apsolutni model kalibracije varijacija faznog centra antene zasnovan na relativnom modelu.

Slika 5-4 indicira EPN stanice različitih tipova kalibracije antena u oktobru 2017., a tipovi su pokazani različitim bojama:

- u **crnoj** boji predstavljaju individualnu apsolutnu kalibraciju, kojih je bilo 42.06%;
- **zelena** boja pokazuje stanice s pravom apsolutnom ¹⁰² kalibracijom (54.52%);
- **narandžasta** boja indicira stanice s apsolutnom kalibracijom koja je izvedena iz relativnih vrijednosti (0.62%);
- **crvena**-nema kalibracije (2.8%).



Slika 5-4: Klasifikacija po tipu kalibracije, status oktobar 2017 (EPN, 2017 a)

¹⁰² pravom apsolutnom kalibracijom nazvana je apsolutna kalibracija jedne antene koja predstavlja sve antena istog tipa. Rezultirajući parametri kalibracije usvojeni su za sve antene tog tipa.

5.4 EPN PROJEKTI

S ciljem poticaja multidisciplinarnosti upotrebe EPN proizvoda, EUREF je započeo nekoliko projekata koji se zasnivaju na infrastrukturi EPN-a. Ističu se sljedeći projekti:

1. EPN ponovno procesiranje (od 2009.-sad),- (EPN Reprocessing).
2. EPN analiza u realnom vremenu (2008.-sad),-(EPN Real-Time Analysis).
3. Evropska kombinirana geodetska mreža (2003–sad)-(European Combined Geodetic Network –ECGN, EUREF doprinos za GGOS).
4. Projekt EUREF-IP.
5. Projekt monitoring vremenskih serija (TSA_SP).
6. Projekt istraživanja troposphere.

5.4.1 UELN i EUVN

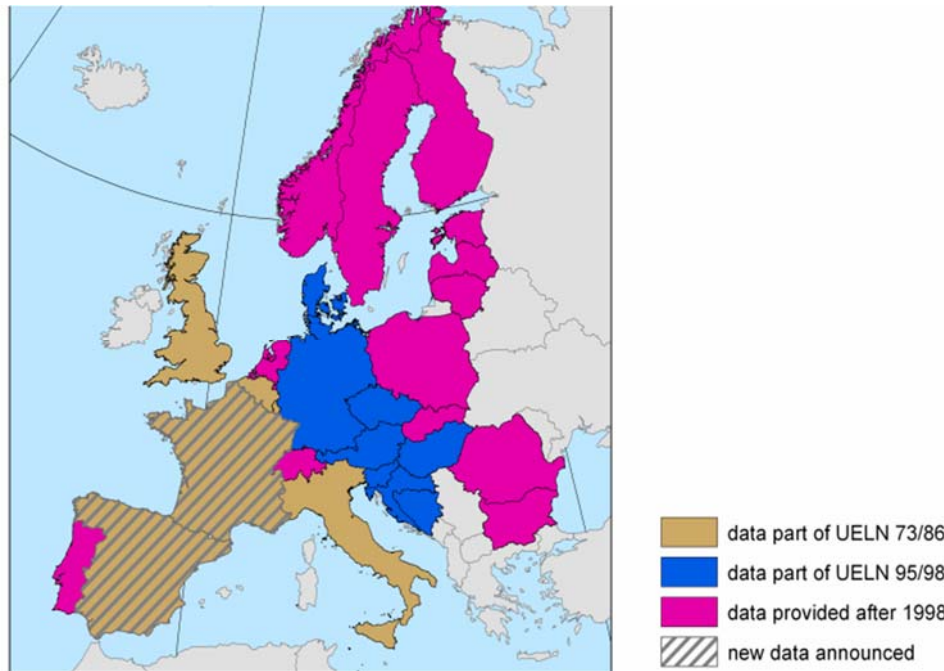
IAG Sub-komisija 1.3.a za Evropu – EUREF započela je u skladu s Rezolucijom broj 3., koja je usvojena na EUREF simpozijumu 1994. godine održanom u Varšavi, cijeli niz aktivnosti u cilju razvijanja i ustanovljavanja unificiranog Evropskog vertikalnog datuma. Cilj je bio da se zajedno s proširenjem ujedinjene evropske nivelmanske mreže - UELN (United European Leveling Network) ustanovi vertikalna mreža tačnosti na nivou bar 1 decimetra.

Vodeći se usvojenim rezolucijama, evropski geodeti iz različitih država su započeli više projekata, u saradnji sa svim evropskim državnim geodetskim upravama i državnim kartografskim agencijama, koje su izrazile spremnost na saradnju, zajedno s EuroGeographics-om i EUREF Tehničkim radnim grupama. Evropske države su na dobrovoljnoj bazi ustupile podatke svojih nivelmanskih mreža, (koje su urađene u različitim epohama i imale su različitu tačnost).

Podaci su objedinjeni i urađeno je zajedničko izjednačenje evropske nivelmanske mreže. Rezultat izjednačenja mreže sa statusom od kraja 1998. godine, usvojen je na simpozijumu u Pragu 1999., pod nazivom UELN95/98 (Sacher i dr., 1999). Nivelmanska mreža prvog reda Bosne i Hercegovine je uključena u to rješenje, zajedno s mrežama iz Slovenije i Hrvatske. Status UELN do 2007. godine pokazan je na Slika 5-5.

BiH mreža je izjednačena (zajedno s mrežama iz Slovenije i Hrvatske) 1998. godine. Po objavljenim podacima na EUREF simpozijumu u Pragu 1999. godine, pokazalo se da su nivelmanske mreže iz ove tri države zauzele treće mjesto po

tačnosti. Poslije su filtriranjem izbačene neke grube pogreške u mrežama nekih država iz EU te je tačnost naših mreža zauzela peto mjesto.



Slika 5-5: Historija proširenja UELN mreže do 2007. godine. (izvor: Ihde, 2008)

Godinu dana poslije, na EUREF simpozijumu 2000 u Tromsu, Norveška, usvojena je prva definicija Evropskog vertikalnog referentnog sistema - EVRS (European Vertical Reference System). Realizacija koja se zasniva na UELN 95/98 rješenju dobila je ime EVRF2000. Objavljena je nakon šest godina prikupljanja i analiziranja podataka. Mreža se sastojala od skoro 200 GPS/nivelmanskih stanica, uključujući i mareografe postavljene na evropskim obalama (Slika 5-6). Mreža je bila visokog kvaliteta ali tačke su rijetko raspoređene. Ova mreža je dizajnirana da:

1. doprinese unificiranju Evropskog datuma za visine i unificira različite sisteme visina koji su korišteni u evropskim državama,
2. poveže repere na mareografima u Evropi u cilju monitoringa apsolutnih varijacija nivoa mora,
3. pomogne u pripremama za Evropsku kinematičku vertikalnu mrežu,
4. ustanovi fundamentalne tačke za Evropski geoid.



- | | |
|----------------------------------|---|
| ▲ EUREF sites | ⊙ GPS permanent stations - nodal points |
| △ GPS permanent stations - EUREF | ◆ Tide gauge sites |
| △ GPS permanent stations | ⊙ GPS permanent stations - tide gauge |
| • UELN & UPLN nodal points | ∨ UELN lines |

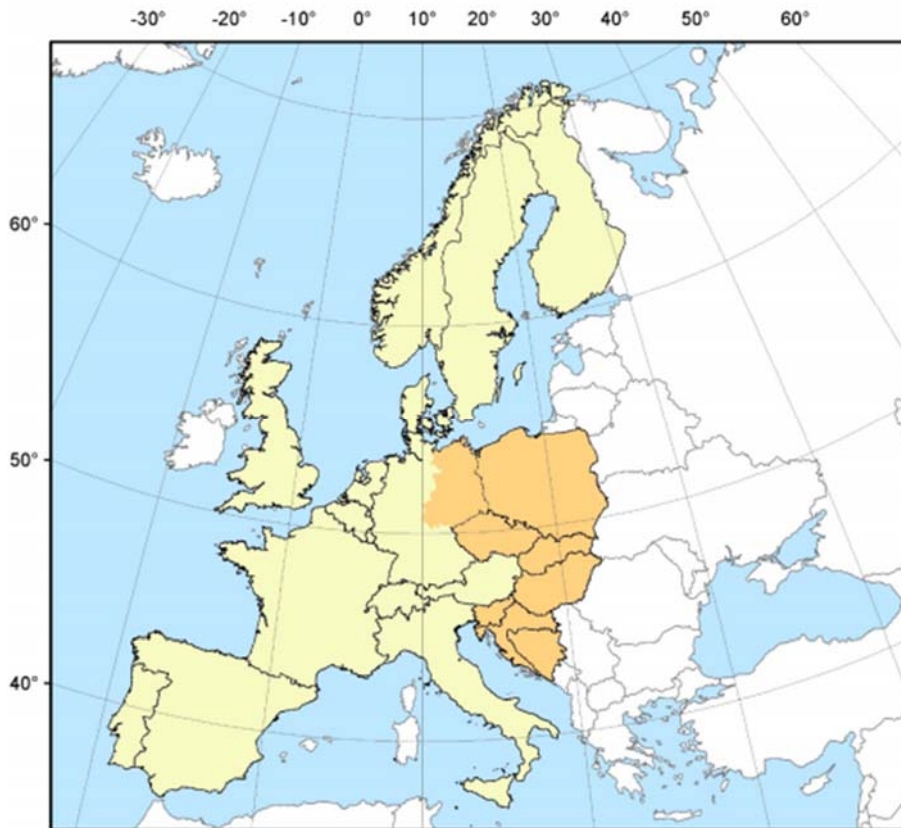
Slika 5-6: UELN mreža: zelene linije su nivelmanski vlaci prvog reda, crni krugovi pokazuju čvorne tačke prvog reda, crni rombovi predstavljaju mareografe, trokutovi su GPS stanice uključene u definiranje evropskog jedinstvenog vertikalnog datuma. (BKG EVRS, 2017)

Koordinate stanica su izražene u ETRF96, epoha 1997.4, a izračunate su iz opažanja prikupljenih tokom GPS kampanje koja je trajala devet dana. GPS stajališta su povezana s najbližim reperima pomoću nivelmana prvog reda. Također su napravljena gravimetrijska mjerenja da bi se izveli geopotencijalni brojevi. Postignuta je tačnost izvedenih elipsoidnih visina kao i visina iz nivelanja bolja od 1 cm. Ova tačnost je rezultat pažljivog planiranja, standardizacije, pažljivog prikupljanja i obrade podataka.

Također je osnovan Informacijski sistem i servis za EVRS, koji daje sve dostupne informacije iz različitih država ukoliko su te države informacije učinile dostupnim.

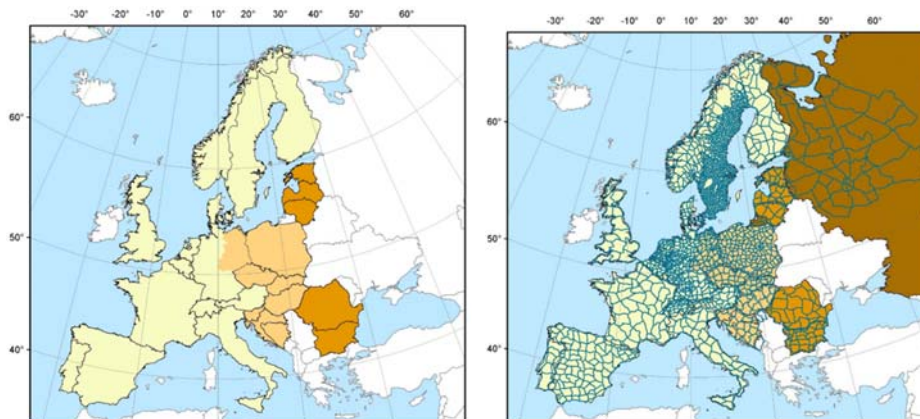
Slika 5-6 pokazuje dizajn originalnih državnih nivelmanskih mreža i oblik i gustinu nivelmanskih vlakova prvog reda, koje su dostupne u bazi podataka EULN, te njihov doprinos izgledu mreže. Karta pokazuje raspored: čvornih repera, mareografa, EUREF tačaka koje su povezane s nivelmanom, EPN permanentnih stanica povezanih s nivelmanskim reperima, GPS stanica povezanih s nivelmanskim reperima prvog reda, GPS stanice povezane s mareografima.

Do 1998. godine u UELN mrežu su bile uključene nivelmanske mreže iz 21 države sa teritorija evropskog kontinenta. Mreža je bila sačinjena od 3 064 čvornih repera i 4 263 nivelmanska vlaka prvog reda, (Slika 5-7).



Slika 5-7: Razvoj UELN mreže, status 1998. godine: uključene su nivelmanske mreže iz 21 države na teritoriji evropskog kontinenta. Mreža ima 3 064 čvorna repera i 4 263 nivelmanska vlaka prvog reda. (izvor: Sacher i Liebsch, 2015)

Do 2007. godine još šest država je podatke svojih nivelmanskih mreža ustupilo EUREF-u te je UELN mreža u godini 2007. godine imala 7 939 čvornih repera i 10 347 nivelmanskih linija prvog reda. Tokom sljedećih pet godina UELN mreža se proširila na teritoriju Rusije, (Slika 5-8).

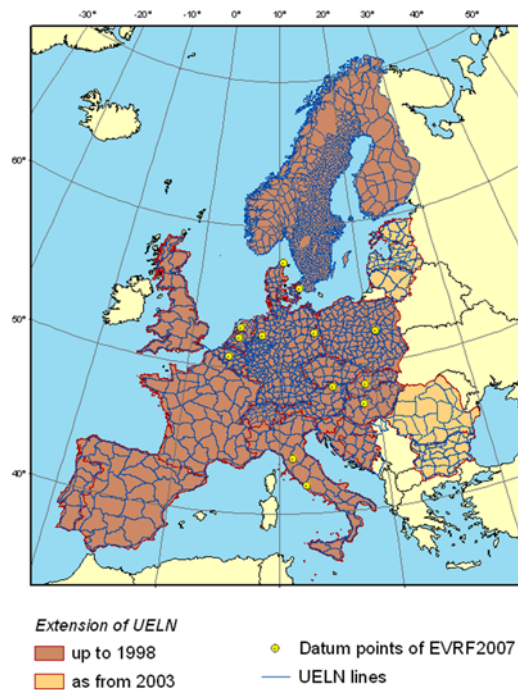


Slika 5-8: Status UELN godine 2007. Uključeno 27 država, mreža imala 7 939 čvornih repera i 10 347 nivelmanskih linija prvog reda. (lijevo). Desno: status UELN iz 2015. godine, nakon što se 2012. godine pridružila Rusija. (izvor: Sacher i Liebsch, 2015)

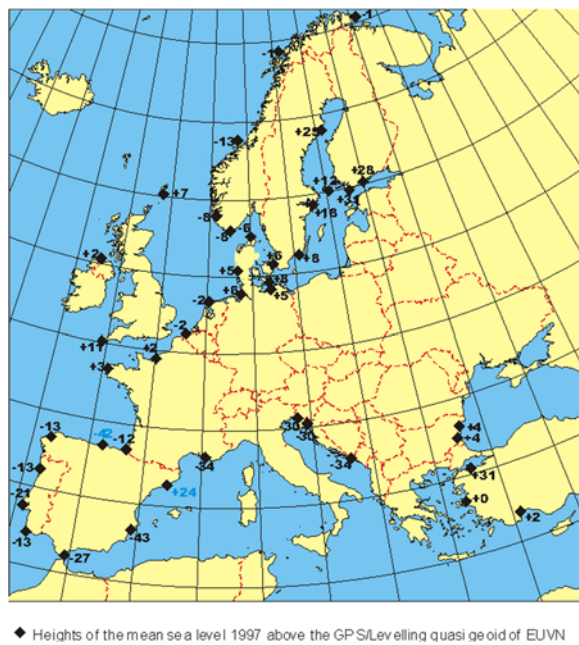
Evropski vertikalni referentni sistem EVRS je povezan sa Zemljinim poljem teže na i iznad njenog čvrstog tijela. EVRS je geopotencijalni referentni sistem koji rotira zajedno sa Zemljom. Tačke u ovom sistemu imaju geopotencijalne vrijednosti u odnosu na referentni potencijal i odgovarajuće koordinate u definiranom terestričkom referentnom sistemu. EVRS je referentni sistem kinematičkih visina.

Izjednačenje nivelmanske mreže UELN za EVRF2007 prilagođeno je rješenju EVRS2000 tako što je izabrano 13 tačaka kao datumske (lociranih na stabilnom dijelu euroazijske ploče) i uvedene su njihove visine iz rješenja UELN95/98 u slobodno izjednačenje mreže. Datumske tačke EVRS pokazuje Slika 5-9.

Slika 5-10 pokazuje visine srednjeg nivoa mora iznad kvazi-geoida koji je određen na osnovu Evropske vertikalne mreže EVRN i metodom GPS/nivelmana.



Slika 5-9: Raspored datumskih tačaka EVRF2007 (Saher i dr., 2008)



Slika 5-10: Visine srednjeg nivoa mora iznad EUVN kvazi-geoida iz GPS/nivelmana za godinu 1997 (BKG EVRS, 2017)

Ujedinjena evropska nivelmanska mreža UELN i povezani vertikalni referentni sistem EVRS2007 su definirani kao sistem normalnih visina. Ove „normalne“ visine odnose se na površinu kvazi-geoida koji nije ekvipotencijalna površ. U ovom vertikalnom okviru, undulacije kvazi-geoida se također nazivaju anomalije visina¹⁰³.



Slika 5-11: EUVN- veze između mareografa i GPS-a (BKG EVRS, 2017)

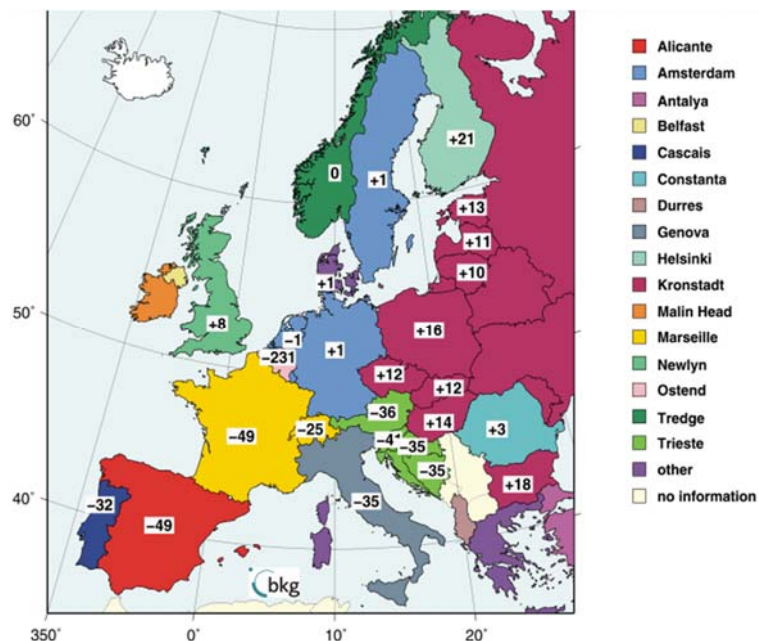
Slika 5-11 pokazuje veze između mareografa i GPS referentnih stanica. Zadnja realizacija je EVRS 2007, a radi se na njenom popravljanju i dopunjavanju. Evropski vertikalni referentni sistem - EVRS je kinematički visinski referentni

¹⁰³ Različiti sistemi visina opisani su u različitim udžbenicima. Zainteresirani čitalac se upućuje na knjigu Physical Geodesy od Helmut Moritz-a ili prevod na srpski jezik pod nazivom Fizička geodezija.

sistem. Njegova definicija zadovoljava i prati četiri konvencije koje vertikalni datum definiraju kao ekvipotencijalnu površ¹⁰⁴.

Dakle, EUVN je korak ka uspostavljanju fundamentalne mreže za geokinematički visinski referentni sistem kao što je Evropski vertikalni sistem, koji je potreban da bi se mogla provesti istraživanja specijalno posvećena razmatranju izdizanja kopna u Skandinaviji ili izdizanja kopna u Karpatsko-Balkanskoj regiji.

Neophodnost unifikacije sistema visina u Evropi ilustrira Slika 5-12 koja pokazuje za koje vrijednosti, izražene u cm, (Ihde, 2008) treba korigirati visine u državnim vertikalnim mrežama da se dobije realizacija EVRS2000. Desno na slici su pokazani reperi povezani s mareografima na koje se oslanjaju nivelmanske mreže u evropskim državama koje su uključene u EULN. Još jednom se naglašava da je EVRS po definiciji oslonjen na Normalni reper u Amsterdamu – NAP (Normaal Amsterdams Peil).



Slika 5-12: Približne vrijednosti korekcija (izražene u cm) koje treba uvesti u državne sisteme visina da se dobiju vrijednosti EVRF2000 (Ihde, 2008).

¹⁰⁴ Detaljno opisivanje EVRS i njegovih definirajućih konvencija prevazilazi cilj ovog udžbenika, jer je za razumijevanje materije potrebno poznavanje teorije iz fizikalne geodezije. Zainteresirani čitalac se upućuje na (CRS, 2014).

5.5 EUREF MREŽA NA TERITORIJU BiH

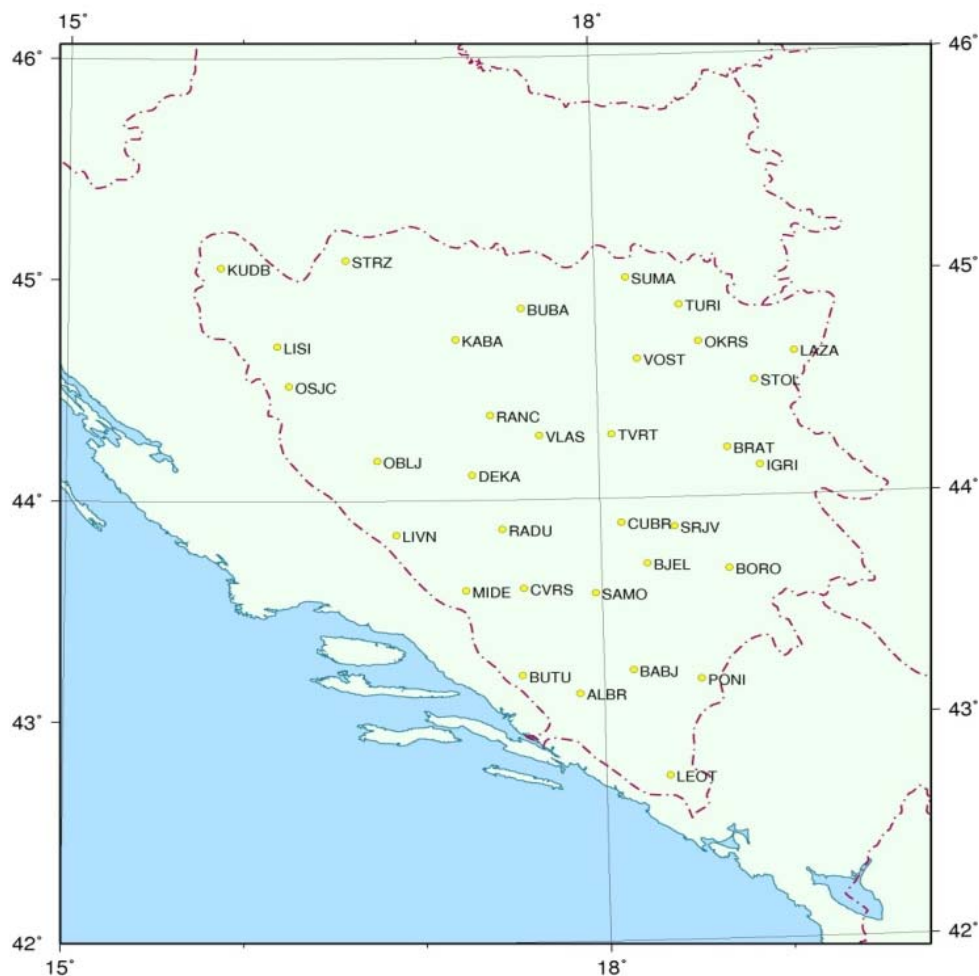
EUREF mreža proširena je na teritorij Bosne i Hercegovine 1998. godine, kad je organizirana GPS kampanja EUREF Balkan98. U okviru ove kampanje opažane su GPS metodom odabrane tačke trigonometrijske mreže u Albaniji, Bosni i Hercegovini i SR Jugoslaviji (današnje države Srbija i Crna Gora). Ovdje se navodi samo nekoliko činjenica vezanih za EUREF Balkan 98 mrežu na teritoriju BiH, i njenom progušćenju BIHREF (BiH Reference Frame) 2000.

5.5.1 GPS mreže BIHREF98 i BIHREF2000

IAG Podkomisija za Evropu (EUREF) je na svom simpozijumu održanom u Pragu 1999. godine, Rezolucijom 3, (EUREF, 1999, str. 252), usvojila rezultate kampanje EUREF-BALKAN 98, kao mrežu standardne klase B (tačnosti koordinata oko 1 cm u epohi opažanja). To znači da je bosanskohercegovačka GPS mreža, sačinjena od 13 opažanih stanica stare trigonometrijske mreže prvog reda, (čije su koordinate određene u globalnom geocentričnom terestričkom referentnom okviru ITRF97), usvojena kao oficijelno proširenje EUREF-a (Altiner, i dr., 1999; Muminagić i Mulić, 1999). Koordinate nisu publicirane zbog specifičnih političkih (ne)prilika u regionu, ali su iste dostavljene geodetskim upravama na korištenje.

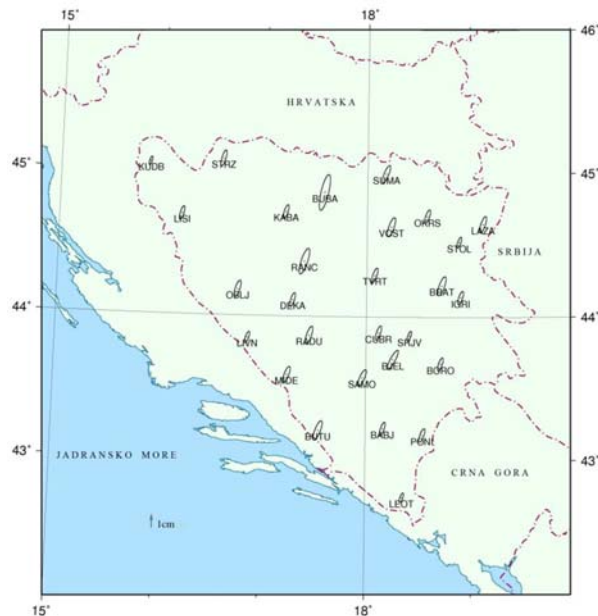
Ova se mreža na teritoriju BiH često naziva BIHREF98. Opažana je 1998. godine, a progušćena je u GPS kampanji organiziranoj u septembru 2000. godine, kad je cilj bio opažati dovoljan broj trigonometrijskih tačaka da prosječno međusobno rastojanje GPS stanica bude oko 50-70 km. Tako su geodetske uprave u BiH odlučile da opažaju još 23 trigonometrijske tačke (prvog ili drugog reda stare trigonometrijske mreže) kao i 4 stanice opažane u 1998. godini: KUDB, STOL, LIVN, LEOT, koje su ravnomjerno raspoređene po cijeloj teritoriji. U mrežu je uključena i sarajevska permanentna stanica SRJV, koja je uspostavljena u junu 1999. godine.

Kampanja je nazvana BIHREF2000. Raspored stanica u mreži pokazuje Slika 5-13. Tačke opažane u kampanjama BIHREF98 i BIHREF2000 definirale su geodetski referentni okvir za Bosnu i Hercegovinu. Opažane stanice u ove dvije kampanje su sve tačke stare trigonometrijske mreže prvog i drugog reda, a trebalo je definirati njihove položaje u ITRF okviru, a potom iste transformirati u jedinstveni referentni sistem za Evropu, ETRS89. Rezultati procesiranja kampanje BIHREF2000 prezentirani su u (Mulić, i dr. 2006a; Mulić, i dr., 2006b; Mulić, 2012).



Slika 5-13: Raspored stanica opažanih u GPS kampanji BIHREF2000
(Mulić, 2012).

Četiri stanice stare trigonometrijske mreže prvog reda, koje su opažane 1998. godine u kampanji Balkan 98 opažane su ponovo, a to su: Kudić brdo (KUDB) kod Velike Kladuše, Stolice (STOL) na Majevidici blizu Tuzle, Leotar (LEOT) iznad Trebinja, Turić (TURI) kod Gradačca i tačka drugog reda kod Livna, preciznije u Livanjskom polju (LIVN). Ove su tačke opažane po pet dana u kampanji proglašavanja, dok su novoopažane stanice opažane po dva dana (24 satne sesije) u dvije zasebne grupe. Rezultate kampanje, tj. postignuta tačnost horizontalnih položaja interpretirana elipsama pogrešaka pokazuje Slika 5-14.



Slika 5-14: Elipse pogrešaka koje ilustriraju tačnost stanica GPS kampanje BIHREF2000 kao rezultat dvije 24 satne sesije opažanja. Stanice koje su opažane po pet dana (KUDB, LEOT, TURI, STOL, kao i SRJV koja je permanentna stanica) imaju manje elipse pogrešaka. Ovo neposredno pokazuje kako se tačnost koordinata povećava povećanjem broja opažanja. (izvor: Mulić, 2012)

5.5.2 Mreža CEGRN

Geodinamički projekt CERGOP 2/Environment¹⁰⁵ (Central European Regional Geodynamical Project), finansiran od strane EU Komisije kroz program FP5, imao je zadatak između ostalog, istraživati geodinamiku u centralnoj i jugoistočnoj Evropi. U tom cilju je ustanovljena GPS mreža, koja je uglavnom sačinjena od EUREF stanica širom 14 evropskih zemalja. Mreža je nazvana CEGRN (Central European GPS Research Network). Aktivnosti istraživanja geodinamike spomenute regije realizirane su implementiranjem niza GPS kampanja, koje su organizirane godišnje ili svake druge godine a trajale su po pet ili sedam dana.

¹⁰⁵ Puni naziv projekta je CERGOP-2/Environment: a Multipurpose and Interdisciplinary Sensor Array for Environmental Research in Central Europe. Finansiran je u FP5 u potprogramu za okoliš i održivi razvoj Europske zajednice. Nastavak je projekta CERGOP finansiranog u FP4.

Kampanje su nazivane CEGRN, a opazale su, kako permanentne GPS stanice, tako i „epoha“ stanice¹⁰⁶.

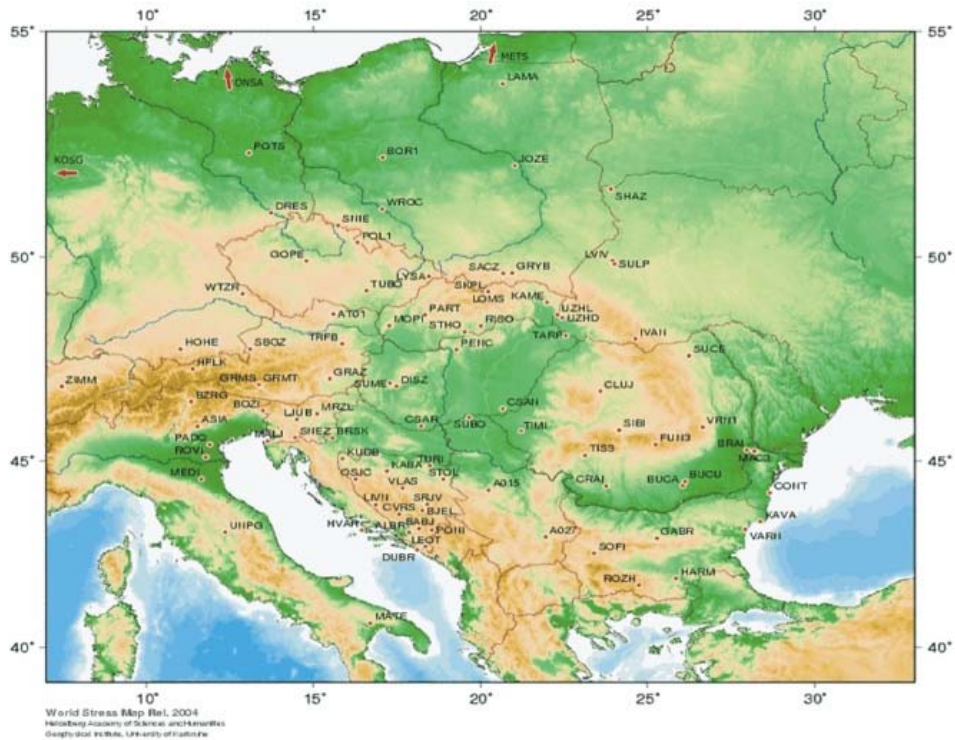
Tako je projekt CERGOP dao posredno i doprinos EUREF-u, jer je kao rezultat obrade svojih kampanja dao progušćenje polja brzina EUREF stanica u centralnoj i jugoistočnoj Evropi. Brzine stanica bile su visoke tačnosti jer su kampanje opažanja i obrade podataka morale zadovoljiti specijalne standarde razvijene u okviru projekta. Zahtjev koje su stanice trebale ispuniti da bi bile uključene u polje brzina bio je da „epoha“ stanice budu opažane najmanje u tri kampanje. Permanentne stanice su trebale biti opažane bar 1,5 godinu. Važan doprinos projekta je baza podataka dostupna za sve korisnike. Također su se posredno kontrolirale koordinate EUREF stanica.

U okviru GPS kampanje CEGRN05 u Bosni i Hercegovini je osim permanentne SRJV opažano 13 „epoha“ stanica, a sve su stanice odabrane po kriteriju da su već ranije opažane u kampanjama BIHREF98 ili BIHREF2000, i da imaju ravnomjeren raspored preko teritorije Bosne i Hercegovine, tako da je bilo moguće izračunati brzine stanica. Raspored stanica u kampanji CEGRN05 pokazuje Slika 5-15.

Prva CEGRN GPS kampanja organizirana je 1994. godine. Bosna i Hercegovina je učestvovala u sljedećim kampanja: 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017. godine, u kojima je uvijek učestvovala permanentna SRJV stanica, kao i neke epoha stanice u kampanjama: 1999, 2005, 2009. Od 2015. godine BIHPOS (BiH Pozicionirajući Servis) stanice također su uključene u CEGRN kampanje, a sve u cilju istraživanja geodinamičkih procesa na Balkanu.

Obradom podataka geodinamičke kampanje CEGRN05 iz 2005. godine u kombinaciji s podacima kampanja iz BIHREF98 i BIHREF2000 omogućeno je računanje koordinata visoke tačnosti.

¹⁰⁶ (engl. *epoch*) stanice znači pasivne GPS stanice. U konkretnom projektu misli se na EUREF stanice koje su opažane samo u EUREF i CEGRN GPS kampanjama. Koordinate „epoha“ stanica određuju se za epohu opažanja.

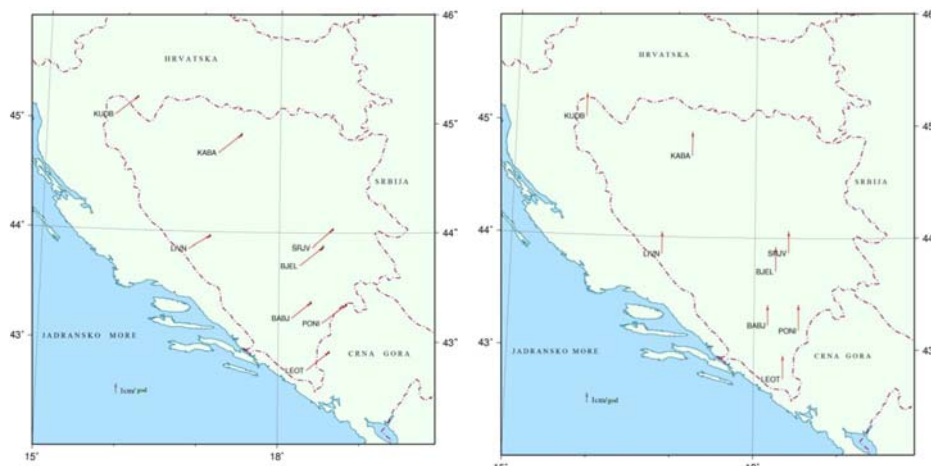


Slika 5-15: Raspored stanica opažanih u GPS kampanji CEGRN05.

(izvor: Mulić, 2012)

Kombinacijom podataka kampanja BIHREF98 i BIHREF2000 s podacima kampanje CEGRN05 po prvi put su izračunate brzine „epoha“ GPS stanica u Bosni i Hercegovini. Brzine su pokazatelji geodinamičkih pomjeranja ukoliko su izračunate direktno iz opažanja. Vektori brzina indiciraju pomjeranje stanica (koje su vezane za tlo) i geolozi ih koriste da bi izveli zaključke o geodinamičkim procesima.

Međutim, brzine su veoma važne i geodetima, jer su potrebne za prevođenje koordinata stanica iz jedne epohe opažanja u drugu. Horizontalne i vertikalne komponente vektora brzina pokazane su na Slika 5-16.



Slika 5-16: Brzine pomjeranja stanica u horizontalnoj (lijevo) i vertikalnoj (desno) ravnini, izračunate kao rezultat kombiniranja kampanja BIHREF2000 i CEGRN05. Podaci su u saglasnosti s podacima koje za SRJV stanicu objavljuje EPN. Sve stanice se pomjeraju u smjeru sjever-sjeveroistok (horizontalno) i imaju trend izdizanja kopna. (Mulić, 2012)

5.5.3 GNSS permanentne mreže i servisi za pozicioniranje

Savremeni trend u Evropi i svijetu je da se kao referentna mreža za geodetske zadatke koriste aktivne GNSS mreže. U Evropi se takve mreže često nazivaju permanentne GNSS mreže, dok se u SAD i američkom kontinentu uopće, takve aktivne mreže često nazivaju kontinuirano operirajućim referentnim stanicama (CORS-Continuously Operating Reference Stations).

U Evropi je primjer Evropska permanentna mreža – EPN. Kao što je ranije navedeno, glavna uloga takve mreže je da kontrolira EUREF mrežu. Ostale EUREF stanice su pasivne ili „epoha“ stanice. Drugim riječima, pasivne stanice se opažaju samo tokom zvaničnih GNSS kampanja ili posebnih geodetskih zadataka, dok su aktivne stanice opremljene GNSS prijemnicima koji kontinuirano opažaju sve dostupne satelite iznad horizonta, a podatke opažanja u realnom vremenu odašilju u specijalizirane centre za obradu podataka, koristeći različite vidove telekomunikacija.

Tokom zadnjih desetljeća mnoge su države uspostavile državne kontinuirano operirajuće referentne stanice, koje služe kao državna geodetska infrastruktura. Takve satelitski podržane geodetske mreže, osim mogućnosti da korisnicima nude mogućnost visokopreciznog relativnog pozicioniranja te jeftino i brzo proglašavanje referentnih mreža, također računaju i distribuiraju korekcije za

pozicioniranje u realnom vremenu za kinematički premjer, sa centimetarskom tačnošću.

Ustanovljavanje aktivnih referentnih mreža su uglavnom završile sve razvijene države. Njihov primjer pratile su manje razvijene države tako da se može reći da su sve države Zapadnog Balkane uspostavile ovakav vid geodetskih referentnih mreža.

Odličan primjer aktivne referentne mreže je Njemačka mreža SAPOS (Satellite Positioning Service of the Official German Surveying and Mapping) koja je pokazana na Slika 5-17.

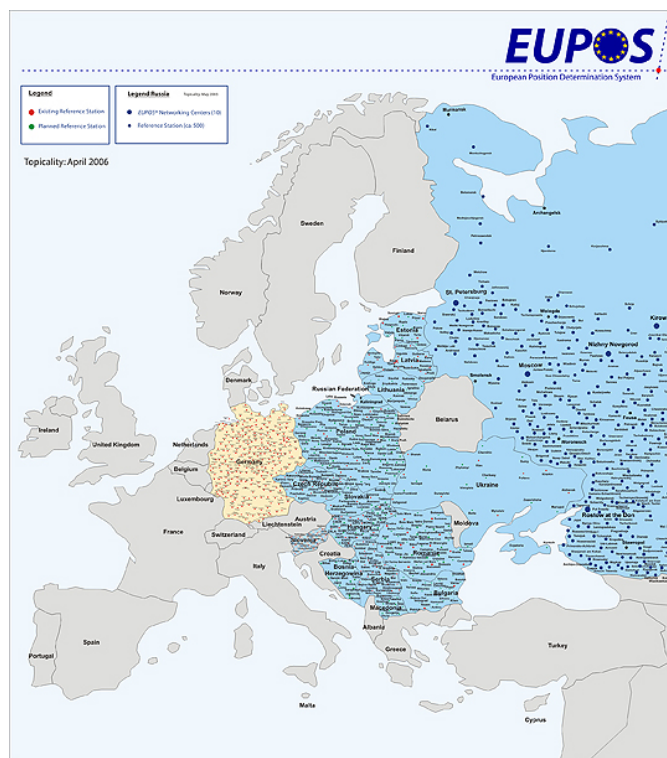


Slika 5-17: Karta referentnih stanica Njemačke aktivne GNSS mreže SAPOS (izvor: Schüler, i dr., 2007)

Mreža je sačinjena od 250 referentnih stanica na prosječnoj udaljenosti od oko 50 km. Mreža omogućuje pozicioniranje u realnom vremenu s horizontalnom tačnošću od 2 cm, dok je vertikalna tačnost oko 3 cm (Bilajbegović i dr., 2009)

Ustanovljavanjem SAPOS servisa Njemačka država je imala cilj da uvede novu tehnologiju u geodetsku profesiju ali i da objedini oko petnaest koordinatnih sistema koji su bili službeno validni u različitim državama na području Njemačke. Dakle, tako se željelo uvesti jedinstven, homogen, terestrički referentni sistem, tj. Evropski terestrički sistem-ETRSS89, što je ustvari bila zakonska obaveza pokrajinskih geodetskih uprava. Pokrajinske geodetske uprave su značajno smanjile svoje troškove na uspostavi i održavanju referentnih sistema. Postojanje državne infrastrukture kao što je SAPOS značajno je smanjilo potrebu za gustom mrežom stalnih geodetskih tačaka. Izgradnja SAPOS sistema je trajala oko devet godina. (Bilajbegović i dr., 2009).

Aktivne GNSS mreže koje omogućuju servise slične kao SAPOS, ustanovljene su u svim državama Evrope. Njemačka je inicirala ujedinjenje i standardizaciju svih evropskih aktivnih mreža, te se takva ujedinjena evropska aktivna mreža zove EUPOS (Slika 5-18).



Slika 5-18: Planirane i postojeće EUPOS stanice (EUPOS, 2017)

Države zapadnog Balkana su pratile primjer Njemačke i drugih razvijenih evropskih država te su ustanovile aktivne mreže. Ovdje se navode samo nazivi takvih mreža, bez detaljnih objašnjenja, a zainteresirani čitatelji će detalje pronaći na internet portalima regionalnih geodetskih uprava.

Tako, državne geodetske uprave u zemljama regije, Slovenija, Hrvatska, Srbija, Crna Gora, Kosovo i Makedonija, imaju sljedeće aktivne mreže:

- SIGNAL (Slovenija Geodezija-Navigacija-Lokacija)
- CROPOS (CROatian POSitioning System)
- AGROS (Aktivna Geodetska Referentna Osnova Srbije)
- MONTEPOS (MONTEnegro POzicionirajući Servis)
- KOPOS (KOsovo POSitioning Servis)
- MAKPOS (MAKedonija POzicionirajući Servis)

Raspored svih stanica u permanentnim mrežama država regiona pokazuje Slika 5-19.



Slika 5-19: GNSS permanentne mreže u regiji Zapadnog Balkana.
(izvor: Stančić i dr. 2011)

Naravno, aktivnu GNSS mrežu razvila je i Bosna i Hercegovina pod nazivom BIHPOS (BiH Positioning Service).

5.5.4 BIHPOS

Permanentna mreža Bosne i Hercegovine – BIHPOS realizirana je 2011. godine, a organizirana je u dvije mreže: FBIHPOS (Slika 5-20), u Federaciji BiH i SRPOS (Slika 5-21), u entitetu Republika Srpska a svaka mreža ima po 17 GNSS stanica. Prosječna gustina stanica je 0.65 stanica na 1000 kvadratnih km (Stančić i dr. 2011). Koordinate BIHPOS mreže određene su u ETRF2000 referentnom okviru. Geodetske uprave deklariraju tačnost položaja stanica u realnom vremenu 1-2 cm.

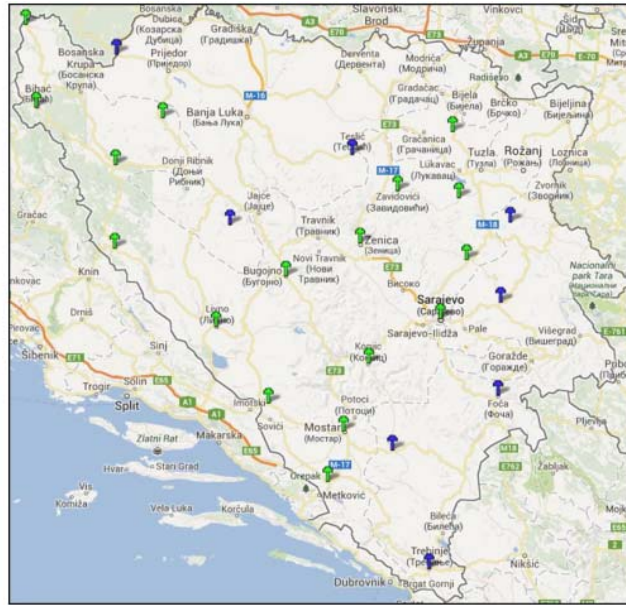
Referentni sistem BIHPOS-a je ETRS89, a podaci se odnose na njegovu realizaciju ETRF2000. BIHPOS se osim za geodetske referentne mreže koristi i za sljedeće aktivnosti i projekte:

- geodetski premjer svih vrsta uključujući katastar,
- geodinamička istraživanja
- fotogrametrija i lasersko skeniranje,
- hidrografija, poljoprivreda i šumarstvo,
- navigacija,
- službe sigurnosti i spašavanja, saobraćaj i telematika,
- upravljanje rizicima i zaštita životne sredine,
- upravljanje svim vrstama saobraćaja na raznim nivoima,
- klimatska istraživanja i vremenske prognoze.

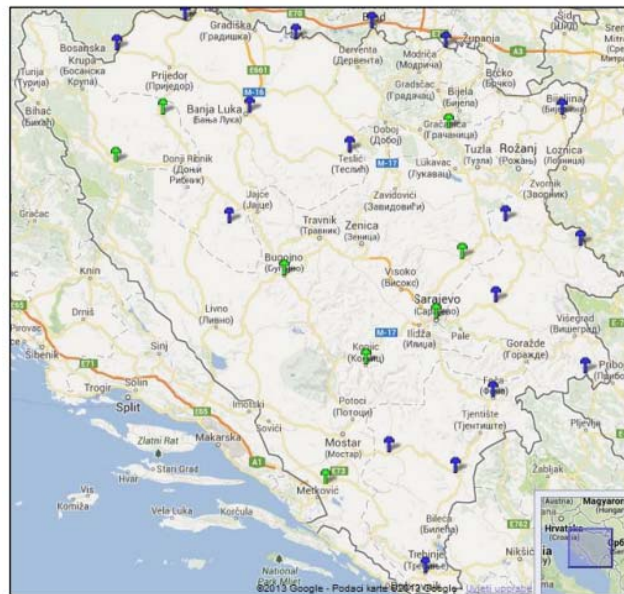
Za stručnjake geodetske struke vjerovatno najkorisniji i najzanimljiviji servis jeste VPSP koji garantira visoku tačnost u realnom vremenu koristeći samo jedan prijemnik – „rover“. Korištenje ovog servisa moguće je ostvariti biranjem jednog od tipova korekcije koje BIHPOS server odašilje autoriziranim korisnicima.

Geodetske uprave oba BiH entiteta garantiraju svojim korisnicima sljedeće servise:

- DSP (DGNSS) – diferencirani servis pozicioniranja u realnom vremenu - tačnost 1-3 m,
- VPSP (PDGNSS) – visoko precizni servis pozicioniranja u realnom vremenu - tačnost 1-2 cm,
- GPSP – geodetski precizni servis za pozicioniranje u bliskom realnom vremenu i postprocesiranju - tačnost 1 cm,
- Servis automatiziranog računanja koordinata (Automatic Coordinates Computation Service).



Slika 5-20: Raspored 17 stanica FBIHPOS mreže, zelene oznake. Plavom bojom su označene stanice iz drugog entiteta koje dijele podatke opažanja s FBIHPOS. (Mulić, 2012a)



Slika 5-21: Raspored stanica SRPOS mreže, plave oznake. Zelenom bojom su označene stanice iz FBIHPOS-a koje dijele podatke opažanja sa SRPOS mrežom. (Mulić, 2012a)

Glava 6

6 SISTEMI VREMENA

Smjena dana i noći predstavlja svakodnevnicu i običan stanovnik planete vjerovatno ne razmišlja da su stari narodi prateći takav slijed prirodnih događaja tj. praćenjem kretanja Zemlje, definirali sisteme za mjerenje vremena, te definirali kalendare koji su im pomagali da se pravovremeno pripreme za sjetvu ili žetvu. Tradicija ovakvih kalendara, gdje početak oficijelne kalendarske godine koincidira s početkom proljeća (ekvinocij), zadržala se do danas u državama koje baštine razvijenu kulturu i znanost svojih starih predaka. Primjer su kalendari Kine i Irana.

Povećanje ljudskih spoznaja kroz historiju kao i razvoj tehnologije, doprinijeli su definiranju preciznijih sistema vremena. Tačnost metoda mjerenja vremena stalno se povećava, uvećavajući korist čovjeku u njegovim svakodnevnim poslovima.

Razvojem i korištenjem servisa koji nam nude GNSS sistemi upotreba tačnog vremena se uzima kao nešto što se podrazumijeva, a prosječan čovjek nije u potpunosti svjestan pogodnosti i olakšica, koje im današnja tehnologija distribucije tačnog vremena osigurava, kako u poslovanju tako i u privatnom životu. Geodeti za svoje svakodnevne poslove određivanja položaja tačaka (ili nekih drugih zadataka pri kojim koriste GNSS tehnologiju) koriste mjerenje vremena putovanja signala od satelita do prijemnika.

Jeftinim, jednofrekventnim GPS prijemnikom, kojim se na stanici poznatog položaja opaža samo jedan satelit u vidnom polju, osigurava se tačnost mjerenja vremena od 30 nanosekundi, uz vjerovatnoću od 95%. Uz primjenu sofisticiranih tehnika GNSS opažanja, moguće je dobiti globalnu sinhronizaciju satova s preciznošću boljom od jedne nanosekunde. (Hofmann-Wellenhof i dr., 2008)

Visoka tačnost sinhronizacije satova neophodna je za istraživačke projekte, kao npr., koordinirani seizmički monitoring ili druga geodinamička mjerenja. Za savremenu privredu je globalna sinhronizacija satova također od neprocjenjive važnosti. Primjeri korisnika visokoprecizne sinhronizacije satova na globalnom nivou su: komunikacijski i telekomunikacijski sistemi, potom elektrane koje trebaju sinhronizaciju proizvodnih procesa, dok elektronsko bankarstvo, e-trgovina, ili rad berze, nije moguće zamisliti bez ovih GNSS servisa.

Geodeti i astronomi su i prije satelitske ere za svoje zadatke trebali precizno mjeriti vrijeme, te su morali definirati sisteme vremena koji su im osiguravali tačnost pozicioniranja u skladu s raspoloživom tehnologijom. Ovo poglavlje ukratko razmatra definicije, osobine i veze između različitih sistema vremena, u skladu s potrebama studenata dodiplomskog studija.

6.1 VRIJEME KAO KOORDINATA

Sistem vremena je jednodimenzionalni referentni sistem. Definiranje sistema vremena uključuje definiranje nekih drugih promjenjivih fenomena. Kad bi univerzum u svojoj cjelovitosti bio statičan, onda ne bi postojao pojam „vrijeme“ na način kako ga današnji čovjek razumije. Jedini razlog da mi možemo spoznati vrijeme je, da se stvari oko nas mijenjaju. Relativno jednostavno se može odrediti jedinica vremena, zahvaljujući mogućnosti opažanja brojnih promjena u našem okruženju. Ako fenomeni čije promjene opažamo, variraju uniformno, može se reći da je skala vremena koju taj fenomen definira, uniformna.

Čovjek je kroz historiju svog postojanja, naravno, imao potrebu definirati sistem vremena, a za to je bila potrebna uniformna skala vremena. Međutim, u svijetu u kojem živimo, postoji mnogo dinamičnih sistema koji mogu poslužiti za definiranje skale vremena, ali uistinu postoji malo takvih dinamičnih sistema, koji mogu definirati strogo uniformnu jedinicu vremena.

Čovječanstvo ima ambicije da u ovom stoljeću započne putovanja s ljudskom posadom ka drugim planetama u našem Sunčevom sistemu, kao i pravljenju kolonija na Mjesecu i Marsu. Planira se da se do 2030. naprave prve kolonije na Mjesecu, u cilju eksploatacije prirodnih resursa. Stoga, važno je napomenuti da se dužina dana, godine i godišnjih doba na drugim nebeskim tijelima definira dužinom perioda rotacije i revolucije tih tijela¹⁰⁷. Tako, npr., dužina dana na Marsu je definirana kao period pune rotacije Marsa oko svoje obrtne osi¹⁰⁸, a dužina godine na Marsu je definirana periodom obilaska Marsa oko Sunca.

Dakle, Zemlja je od davnina čovjeku služila kao prirodni sat, a i danas u životu svakog pojedinca predstavlja važan pokazatelj prirodne skale vremena. Međutim, odavno je ustanovljeno da rotacija Zemlje nije uniformna. Uočene su varijacije u

¹⁰⁷ Dužina godišnjih doba ovisi i o nagnutosti rotacijske osi u odnosu na ekliptiku.

¹⁰⁸ Dužina dana na Marsu je 24,6597 sati, a godina je duga oko 686,973 zemaljskih dana.

njenoj rotaciji različitog intenziteta i s različitim periodima. Evidentne su varijacije rotacije koje se mogu svrstati kao: dnevne, dvosedmične, mjesečne, itd., pa sve do usporavanja rotacije u geološkoj skali vremena.

Osim potrebe definiranja jedinica vremena, također je, kao što je naprijed navedeno, potrebno definirati ishodište sistema vremena, tj. nultu tačku, odnosno, neku epohu/trenutak, u kojoj je vrijednost vremena specificirana. Međutim, kako god da je sistem vremena definiran, potrebno ga je realizirati, tj. dati vremenski okvir.

6.2 PRIRODNI PROCESI ZA MJERENJE VREMENA

Očigledno je da postoji veliki broj različitih sistema vremena. Definirani su različitim prirodnim periodičkim pojavama ili procesima i to: Zemljinom rotacijom oko svoje osi, Zemljinom revolucijom oko Sunca te atomskim radijativnim procesima. Podsjećamo čitatelje na razmatranja podpoglavlja 3.5 gdje je navedeno da Zemljina rotacija oko svoje osi definira dva sistema vremena:

- sideričko ili zvjezdano i
- univerzalno vrijeme-UT.

Zemljina revolucija definira niz različitih sistema vremena koji se koriste za istraživačke svrhe ili teorijske primjene. Ukratko su ti sistemi opisani u podpoglavlju 3.5, a ovdje se samo podsjeća da su to sljedeće vrste vremenskih skala:

- efemeridno vrijeme (ET),
- terestričko vrijeme (TT),
- baricentrično dinamičko vrijeme (TDB),
- geocentrično koordinatno vrijeme (TCG),
- baricentrično koordinatno vrijeme (TCB).

Atomski radijativni procesi definiraju sljedeće skale vremena:

- Atomska skala vremena (Time Atomic International - TAI),
- Univerzalno koordinirano vrijeme (Universal Coordinated Time - UTC),
- GPS vrijeme (GPS Time – GPST),
- GLONASS vrijeme (GLONASS Time – GLNT),
- Galileo vrijeme (Galileo System Time – GST),
- BeiDou vrijeme (BeiDou Time – BDT).

Uglavnom, četiri su osnovna tipa sistema vremena koji se koriste u geodetskoj praksi i istraživanju, a to su:

1. sideričko vrijeme, što predstavlja skalu vremena definiranu rotacijom Zemlje u odnosu na nebesku sferu.
2. univerzalno vrijeme – UT, skala vremena definirana Zemljinom rotacijom u odnosu na srednje sunce.
3. dinamičko vrijeme – DT, skale vremena definirane varijablama u jednačinama kretanja koje opisuju dinamiku solarnog sistema.
4. atomsko vrijeme – AT, skala vremena definirana brojem oscilacija u energetskim stanjima atoma cezija-133.

6.2.1 Sideričko vrijeme

Vremenske skale koje su izvedene iz (astronomskih) opažanja Zemljine rotacije, određuju vrijeme iz ugla koji zaklapaju referentni meridijan (lokalni, kroz stanicu opažачa ili po konvenciji odabrani meridijan kroz Greenwich) i meridijana koji sadrži referentni objekat na nebeskoj sferi.

Sideričko ili zvjezdano vrijeme je satni ugao gama tačke ili tačke proljetnog ekvinocija, na nebeskoj sferi, kako je opisano u poglavlju o nebeskim koordinatama. Ono predstavlja rotaciju Zemlje u odnosu na nebesku sferu i reflektira aktuelnu rotaciju Zemlje, plus efekt kojeg prouzrokuju precesija i nutacija na ekvinočij. Zbog utjecaja nutacije uvodi se dva nova pojma:

- a. *prividno sideričko vrijeme* (eng. apparent sidereal time - AST).

Prividno sideričko vrijeme je satni ugao pravog aktualnog proljetnog ekvinocija.

- b. *srednje sideričko vrijeme* (eng. mean sidereal time – MST. Ovo je satni ugao srednjeg proljetnog ekvinocija (također i za aktualno vrijeme).

Osnovna jedinica sideričke skale vremena je srednji siderički dan, koji je jednak intervalu između dva uzastopna prolaza srednjeg proljetnog ekvinocija kroz isti meridijan (kad se uvede korekcija zbog pomjeranja pola). Također se može reći sljedeće:

$$1 \text{ siderički dan} = 24 \text{ siderička sata} = 86\,400 \text{ sideričke sec} \quad (6.4)$$

Prividno sideričko vrijeme ne koristi se kao skala vremena zbog svoje neuniformnosti, ali se koristi kao epoha u astronomskim opažanjima. Veza između srednjeg i prividnog sideričkog vremena izvedena je iz nutacije. Tako se može reći da se prividno sideričko vrijeme računa prema formuli (6.2):

$$AST = MST + \Delta\psi \cos \varepsilon \quad (6.5)$$

Zadnji član formule se naziva „jednačinom ekvinočija“ i predstavlja rektascenziju srednjeg ekvinočija u odnosu na pravi ekvinočij i ekvator. Pošto član s najvećom

amplitudom u nizu notacije u astronomskoj dužini, približno iznosi $\Delta\psi \approx 17,2$ lučnih sekundi (arcsec), veličina jednačine ekvinocija iznosi:

$$17,2 \cos(23,44^\circ) \text{ arcsec} = 1,05 \text{ s, ako se primijeni konverzija } 15^\circ = 1 \text{ hr.}$$

Definicija sideričkog vremena u skladu s astronomskim meridijanom na koji se odnosi (astronomski meridijan opažača) naziva se lokalno sideričko vrijeme (eng. local sidereal time – LST). Kad se opažač nalazi u Greenwichu, onda je lokalni astronomski meridijan Greenwichki meridijan i sideričko vrijeme koje se odnosi na taj meridijan naziva se Greenwichko sideričko vrijeme (Greenwich sidereal time-GST). Treba imati na umu da se razlikuju srednje i prividno lokalno sideričko vrijeme, pa se dakle razlikuju sljedeći pojmovi:

- a) lokalno srednje sideričko vrijeme (eng. local mean sidereal time, LMST)
- b) lokalno prividno sideričko vrijeme (eng. local apparent sidereal time, LAST)
- c) Greenwichko srednje sideričko vrijeme (eng. Greenwich mean sidereal time, GMST)
- d) Greenwichko prividno sideričko vrijeme (eng. Greenwich apparent sidereal time, GAST).

$$\text{GST} = \text{LST} - \Lambda_t \quad (6.6)$$

Dužina Λ_t se odnosi na međunarodni nebeski pol - CIP (Celestial International Pol), a ne na međunarodni referentni pol - IRP (International Reference Pole). Jednačina ekvinocija primjenjuje jednakost GST i LST. Zbog utjecaja precesije (utjecaj na rektascenziju), 24 sata sideričkog vremena ne odgovara u potpunosti jednoj rotaciji Zemlje, u odnosu na inercijalni svemir. Iznos opće precesije u rektascenziji je sljedeći:

$$m = 4612,4362 + 2,79312 * T \text{ [arcsec/st]} \quad (6.7)$$

U formuli (6.7) T je izraženo u Julijanskim stoljećima, dok jedinica arcsec/st predstavlja lučne sekunde po jednom stoljeću.

6.2.2 Univerzalno vrijeme

Univerzalno vrijeme je vremenska skala koja se koristi za izražavanje općeg građanskog vremena. Zasniva se, istina samo približno od 1961. godine, na opažanju dnevnog kretanja sunca. Međutim, sunce, kako ga vidi opažač na Zemlji, ne kreće se po nebeskom ekvatoru, niti po ekliptici (strogo govoreći) niti se uniformno kreće na nebeskoj sferi. Zato satni ugao Sunca ne varira uniformno.

Zbog ovih činjenice, te zbog potrebe za uniformnom skalom vremena, uvodi se pojam fiktivnog sunca, koje se naziva *srednje sunce*, kao i odgovarajućeg vremena, definiranog kretanjem srednjeg sunca, koje je nazvano *srednje sunčano vrijeme*-MT (eng. mean solar time). Osnovna jedinica univerzalnog vremena je *srednji sunčev dan*. Srednji sunčev dan je definiran kao period vremena koji protekne između dva uzastopna prolaza srednjeg sunca kroz meridijan.

Srednji sunčev dan ima 24 *srednja sunčeva sata*, i 86 400 *srednjih sunčanih sekundi*. Univerzalno vrijeme definirano je kao srednje sunčevo vrijeme Greenwichkog meridijana. Ako je t_M satni ugao srednjeg (fiktivnog) sunca u odnosu na lokalni meridijan opažача, onda je srednje sunčano vrijeme, izraženo u nekoj epohi (nekog akumuliranog ugla) definirano pomoću sljedeće formule:

$$MT = t_M + 180^\circ \quad (6.8)$$

Ovdje su jedinice namjerno izražene kao uglovi na nebeskom ekvatoru da bi označavali neku epohu. U formuli je dodan ugao od 180° zbog sljedećeg: kad se srednje sunce nalazi u lokalnom meridijanu, tj. $t_M = 0^\circ$, onda je to lokalno podne. Drugim riječima, po konvenciji, epoha srednjeg sunčevog vremena je 12 sati, ili 180° stepeni. Ako se to izrazi kao ugao, epoha univerzalnog vremena u Greenwichu definirana je po sljedećoj formuli:

$$UT = t_M^G + 180^\circ \quad (6.9)$$

gdje je t_M^G satni ugao srednjeg Sunca u Greenwichu.

Može se uspostaviti veza između univerzalnog i srednjeg sideričkog (zvjezdano) vremena ako je određena rektascenzija srednjeg sunca, α_M . Izraženi kao uglovi (u epohi):

$$GMT = \alpha_M + t_G^M \quad (6.10)$$

$$GMST = \alpha_M + UT - 180^\circ$$

Rektascenzija srednjeg sunca određena je na osnovu empiričkih izraza, tj. zasnovanih na astronomskim opažanjima.

Dakle, ukratko, univerzalno (UT) i zvjezdano vrijeme su povezani s dnevnom rotacijom Zemlje. Univerzalno vrijeme koristi sunce kao referencu. Zvjezdano (sideričko) vrijeme koristi proljetni ekvinocij kao referencu. Posljedica ovog je da za jednu godinu se ove dvije skale vremena razlikuju za 24 sata (srednjeg vremena) te je zvjezdani dan kraći od solarnog dana za 3 min 56,4 sekunde. Prema tome može se napisati da je:

$$1 \text{ srednji zvjezdani dan} = 1 \text{ srednji sunčev dan} - 3 \text{ min } 56,4 \text{ sec} \quad (6.11)$$

Međutim, promjena Zemljine rotacije nije uniformna, i to zbog djelovanja sekularnih varijacija, uglavnom trenja zbog plimnih valova, smjene godišnjih doba, i drugih nepravilnih ili slučajnih procesa koji izazivaju varijacije u rasporedu masa unutar ili izvan Zemlje i momenta inercije. Da bi se mogle pratiti ove pojave, i da se uvedu korekcije univerzalne skali vremena, uvedeni su: UT0, UT1 i UT2.

UT0 je srednje sunčevo vrijeme u Greenwichkom meridijanu i određeno je u specijalnim opservatorijama na osnovu astronomskih opažanja. UT0 se zasniva na trenutnoj rotaciji Zemlje, te na ovu skalu vremena djeluju neujednačenosti u obrtanju i polarno kretanje. UT0 se odnosi na položaj trenutnog Greenwichkog meridijana.

UT1 se dobije kad se UT0 korigira za utjecaj polarnog kretanja na opažачkoj stanici. UT1 skala vremena jednaka je za cijelu planetu, tj. ne ovisi od lokacije opažачa. Ova vremenska skala je osnovna u geodetskoj astronomiji jer definira orijentaciju konvencionalnog terestričkog sistema u svemiru.

UT2 se dobije kad se UT1 korigira za periodične sezonske varijacije. UT2 je relativno uniformna vremenska skala, koja se može ekstrapolirati unaprijed na osnovu tablica koje izdaje IERS, ali nema praktičnu vrijednost.

UT nije u potpunosti uniformna skala vremena, kao ni UT0, UT1, UT2. Da bi se definirala skala vremena koja je više uniformna uvele su se atomske skale vremena TAI i UTC. TAI i UT skale vremena postepeno akumuliraju međusobnu razliku. Zbog toga je definirano univerzalno koordinirano vrijeme – UTC. Ova skala vremena je ustvari atomska skala vremena, koja unutar 0,9 sekundi ostaje UT1 vrijeme. Ovo se održava pomoću sistematskog uvođenja određenog broja sekundi koje se nazivaju prestupnim sekundama (engl. leap seconds). Dakle, razlika između UTC i TAI varira za cijeli broj sekundi. Tako je do danas (oktobar 2017.) uvedeno 37 prestupnih sekundi.

UTC skalu vremena generira i održava Međunarodni biro za težinu i mjere – BIPM, čije je sjedište u Parizu. Međutim, prestupnu sekundu određuje i najavljuje¹⁰⁹ Međunarodni servis za rotaciju Zemlje i referentne sisteme-IERS.

¹⁰⁹ Prestupna sekunda se u UTC skalu vremena uvodi 30. juna ili 31. decembra. Međutim, za decembar 2016. godine IERS nije uveo prestupnu sekundu. Prema tome 1. januara 2017 0h UTC vremena vrijedi sljedeće: UTC-TAI = -37 s i ovo vrijedi do sljedećeg uvođenja.

UTC skala vremena je definirana pomoću mjerenja oko 250 cezijumskih satova i hidrogenskih masera, koji su raspoređeni u oko 65 svjetskih laboratorija. Za određivanje uniformnog vremena primjenjuju se sofisticirani algoritmi. Ovo nije moguće uraditi u realnom vremenu, nego se određuje sa zakašnjenjem od oko dvije sedmice. Postoje specijalni centri koji određuju UTC u realnom vremenu. Tako se razlikuju npr.:

- UTC (USNO), određuje Pomorska opservatorija SAD-a (USNO - United States Naval Observatory)
- UTC (NIST), određuje Državni institut za standarde i tehnologiju SAD-a (NIST - National Institute of Standards and Technology)
- UTC (SU), određuje Rusija.

Informaciju o broju prestupnih sekundi objavljuje IERS.

6.2.3 Vremenske skale GNSS sistema

Kontrolni segmenti GNSS sistema definiraju i distribuiraju atomske skale vremena koje su specifične za pojedini navigacijski sistem. Tako se u najkraćem ovi sistemi vremena mogu opisati kao što slijedi (Subirana i dr., 2013):

GPS vrijeme, ili GPST (GPS Time). Ova skala vremena je definirana kao kontinuirana skala vremena, a održava je kontrolni segment GPS sistema, na osnovu skupa atomskih satova u glavnoj kontrolnoj stanici i u satelitima. Kontinuirana skala znači da kontrolni segment ne uvodi prestupnu sekundu. Započeta je u 0h UTC (tj. u ponoć između 5. i 6. januara 1980. godine, a ta se epoha može obilježiti kao $6d \cdot 0$). U toj epohi je razlika između TAI–UTC bila 19 s, te je prema tome $GPS-UTC = n-19s$. GPST vrijeme je sinhronizirano s UTC(USNO) na nivou 1ms (modulo 1s), ali se drži unutar 25ns.

GLONASS vrijeme, ili GLNT (GLONASS Time). GLONASS vrijeme generirano je pomoću sinhronizatora u glavnom GLONASS centru. Razlika između UTC(SU)¹¹⁰ i GLNT ne bi trebala preći 1ms plus 3h (tj. $GLNT = UTC(SU) + 3h - \tau$, gdje je $|\tau| < 1ms$), ali τ je obično bolje od 1 μ s. Za razliku od GPS, Galileo ili Beidou, GLONASS vremenska skala uvodi prestupnu sekundu kao i UTC.

¹¹⁰ Razlika od tri sata je razlika između vremena u Greenwich-u i Moskvi.

Razlika između GPST (odnosno UTC) i GLNT se emitira u navigacijskoj poruci GLONASS signala.

Galileo vrijeme, skraćeno GST (Galileo System Time). Ovo je kontinuirana skala vremena koju održava Galileo centralni kontrolni segment, a sinhronizirana je s TAI unutar nominalne razlike ispod 50 ns. Startna epoha GST sistema vremena je u 0h UTC vremena u nedjelju, 22. avgusta 1999.godine.

BeiDou vrijeme, ili BDT (Bei Dou Time) je kontinuirana skala vremena koja je započeta u 0h UTC vremena, dana 1. januara 2006. godine, a sinhronizirana je s UTC skalom vremena u okviru 100 ns.

6.3 OSVRT NA POGLAVLJE

Vremenske skale u ovom poglavlju su opisane ukratko a materija se detaljnije razmatra na diplomskom studiju. Međutim, zbog potrebe razumijevanja osnovnih principa geodetskih globalnih referentnih sistema i GNSS pozicioniranja, vremenske skale su predočene u što kraćem obimu, a zainteresirani čitalac se za detaljnije proučavanje vremenskih skala upućuje na knjige (Soffel i Langhans, 2013; Subirana i dr., 2013; Bilajbegović i dr., 1991; Hofmman-Wellenhof, i dr. 1996; Hofmman-Wellenhof i dr., 2008; Leick, 2004; Jekeli, 2016; Smart, 1962 str. 136-159; Green, 1985) ili online publikaciju (Allen, 2017).

POPIS LITERATURE

- Altamimi, Z., (2009): The International Terrestrial Reference Frame (ITRF2005) in Drewes, H. (ed.), geodetic Reference Frames, International association of Geodesy Symposia 134, DOI 10.1007/978-3-642-00860-3_12, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009., p. 81-82.
- Altamimi, Z., (2016): Key results of ITRF2014 and implication to ETRS89 realization. EUREF2016 Symposium, San Sebastian, Spain, May 25-27, 2016.<http://www.euref.eu/symposia/2016SanSebastian/01-02> Altamimi.pdf
- Altamimi, Z., Collilieux, X., Métivier, L., (2011): ITRF2008: An improved solution of the International Terrestrial Reference Frame, Journal Of Geodesy, DOI: 10.1007/s00190-011-0444-4 Open access.
- Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Rouby, H., Collilieux, X., (2017): ITRF2014 Plate Motion Model & ETRS89 realization. EUREF Symposium, Wroclaw, Poland, May 2017. <http://www.euref.eu/symposia/2017Wroclaw/01-02-Altamimi.pdf>
- Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier, and X. Collilieux (2016): ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, J. Geophys. Res. Solid Earth, 121, 6109–6131, doi:10.1002/2016JB013098.
- Altamimi, Z.; Sillard, P., Boucher, C., (2001): Review and Progress of the ITRF Datum Definition: New Results From ITRF2000, American Geophysical Union, Fall Meeting 2001
- Altiner Y., Seeger, H., Schlüter, W., (1999): Results of the Balkan'98 GPS Campaign in Albania, Bosnia and Herzegovina, and Yugos-lavia, Veröffentlichung der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung, Astronomisch-Geodätische Arbeiten, Nr. 60, S. 106 - 113, München, 1999.
- Altiner, Y., (1999): Analytical Surface Deformation Theory for Detection of the Earth's Crust Movements: Berlin, Springer-Verlag, 110 p.
- Angermann, D., Drewes, H., (2003): Status and future of ITRF combination. Geotechnologien Science Report No. 3,12-16, 2003.
- Beutler, G., Pearlman, M., Plag, H.-P., Neilan, R., Rothacher, M., Rummel, R., (2009): Towards GGOS in 2020, p.273-281, in Global Geodetic Observing

- System, Meeting the Requirements of Global Society on a Changing Planet in 2020, eds. by Plag, H.-P., Pearlman, M. Springer Dorrecht Heidelberg London New York, 2009, DOI 10.1007/978-3-642-02687-4-6.
- Bilajbegović, A., Abicht, G., Bilajbegović, D., Ludwig, O., (2009): SAPOS i budući CROPOS servisi, točnost, pouzdanost i ekonomičnost. https://www2.htw-dresden.de/~bilaj/publikation/Bilajbegovic_et_al.pdf
- Bilajbegović, A., Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., (1991): Osnovni geodetski radovi, savremene metode, GPS. Tehnička knjiga Zagreb.
- Bilajbegović, A., Mulić, M., (2014): Selection of the optimal heights system on the example of Bosnia and Herzegovina's future leveling network. Geodetski glasnik/Geodetic Currier, no. 44, vol. 46, pp. 5-33.
- Bilajbegović, A., Vrce, E.,Tuno, N., Mulić, M., Mulahusić, A., Omićević, D., Ključanin, S. (2008): Studija o nivelmanu visoke točnosti (NVT) BiH – Obnova i djelomično ponavljanje drugog nivelmana visoke tačnosti (II NVT iz 1973) s uputama za terenske radove od 2009- 2012. Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo.
- Boucher, C., and Altamimi Z., (1985): Towards an improved realization of the BIH terrestrial frame. The MERIT-COTES Report on Earth Rotation and Reference Frames, Vol.2, edited by I.I. Muller, pp.551-564, Ohio State University, Department of Geol. Sci
- Boucher, C., and Altamimi, Z., (2011): Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, v.8
- Braun, A., (2008): Coordinate Systems. Department of Geomatics Engineering, Schulich School of Engineering, University of Calgary. Lecture note-ENGO 421. pp 96.
- Bruns H (1878): Die Figure der Erde. Publ. Preuss. Geod. Inst, Berlin
- Bruyninx, C., (2011): Maintenance of ETRS89 using EUREF permanent GNSS network. CROPOS 2011 Conference, Zagreb, April, 2011.
- Bruyninx, C., Q. Baire, J. Legrand, E. Pottiaux, F. Roosbeek, (2016): Twenty Years of EPN: Network Challenges Ahead. EUREF symposium, San Sebastian, Spain May 25-27, 2016.
- Chao, B. F., Au, A. Y. Boy, J.-P. and Cox , C. M., (2003): Time-variable gravity signal of an anomalous redistribution of water mass in the extratropic Pacific during 1998–2002, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4(11), 1096, doi:10.1029/2003GC000589.

- Chao, B.F., (2003): Geodesy is Not Just for Static Measurements Anymore, EOS, Transactions American Geophysical Union, Vol. 84, No. 16, P. 145, 2003
Doi:10.1029/2003EO160001.
- Dehant, V. Mathews, P. M., (2015): Precession, Nutation and Wobble of the Earth. ISBN: 978-1107092549. Cambridge University Press
- Dow, J., Neilan, R., Rizos, C., (2009): The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. Journal of Geodesy, V. 83(3–4), pp:191–198. doi:10.1007/s00190-008-0300-3
- Drewes, H., (2009): Reference system, reference frame and geodetic datum, in Observing our Changing Earth, International Association of Geodesy Symposia 133, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009. P.3-9.
- Đonlagić, E. (1988): Meridijanski profil geoida Sarajeva po metodi astronomskog nivelmana. Geodetski glasnik br 27, str. 34-41. Sarajevo
- Đonlagić, E. (1991): Savremene metode geodetske astronomije za određivanje latituda i azimuta, specijalistički rad. Geodetski odsjek Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Beograd.
- Đonlagić, E., (1986): Određivanje astronomskih latituda instrumentom THEO 010 A, Nacionalna konferencija astronoma Jugoslavije, Sarajevo,1986.
- EUREF, (1999): Resolutions of the EUREF Symposium in Prague, June 2-5, 1999. Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Prague, 2-5 june 1999. (Ed): Gubler, E., Torres, JA., Hornik, H., Munchen 1999.
- EUREF, (2009): The EUREF Densification of the ITRF2005, EUREF Technical WorkingGroup.<ftp://epncb.oma.be/pub/station/coord/EPN/EUREFDensificationITRF2005.pdf>
- EVRS, (2007): European Vertical Reference System (EVRS)–EVRS Conventions 2007. IAG Sub-commission 1.3a EUREF
- Fukushima, T., (1997): Reference systems, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, Volume 66, Number 1, 107-114, DOI: 10.1007/BF00048829
- Gendt, G., Altamimi, Z., Dach, R., Söhne, W., Springer, T., (2010): GGSP: Realization and maintenance of the Galileo Terrestrial Reference Frame, Advances in Space Research, Volume 47, Issue 2, p. 174-185. URL 2.58; DOI: 10.1016/j.asr.2010.02.001

- Graham, J., Newman, W., and Stacy, J., (2008): United States Geological Survey, 2008. The geologic time spiral - A path to the past (ver. 1.1): U.S. General Information Product, USGS Numbered Series, no. 58.
- Green, R.M., (1985): Spherical Astronomy. Cambridge University Press. Cambridge/New York/Melburn. Reprinted 1988, 1993. pp. 520
- Gross, R., G. Beutler and H.-P. Plag, (2009): Integrated scientific and societal user requirements and functional specifications for the GGOS, in Plag, H.P., Pearlman, M., (Eds.): Global Geodetic Observing System, Meeting the Requirements of global Society on a Changing Planet in 2020. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009, 209-224, DOI: 10.1007/978-3-642-02687-4_7
- Heiskanen, W.A. and F.A. Vening Meinesz, (1958): The Earth and its Gravity Field. McGraw.Hill
- Helmert, F. R. (1880): "Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie, Vol. I, Minerva, G. M. B. H. Reprint, 1962.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and J. Collins, (1996): GPS - Theory and Practice, 4th Edition, Springer-Verlag Wien, New York
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. (2008): GNSS_Global Navigation Satellite Systems, GPS; GLONASS, Galileo and more. Springer-Wien, New York
- Idhe, J., (2008): Realisation of European Vertical Reference System 2007. Presented at EuroGeographic General Assembly 2008, 5-8 October, Sibiu Rumania.
- IERS, (2009): The second Realisation of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry, (ed. by) : Fey, A.L., Gordon, D., Jacobs, C.S. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie Frankfurt am Main 2009. IERS Technical Note No. 35. p. 204.
- Ilk, K.H., Flury, J., Rummel, R., Schwintzer, P., Bosch, W., Haas, C., Schroter, J., Stammer, D., Zehel, W., Miller, H., Dietrich, R., Huybrechts, P., Schmeling, H., Wolf, D., Gotze, H.J., Rieggere, J., Bardossy, A., Guntner, A., Gruber, Th., (2005): Mass transport and Distribution in the Earth system. Contribution of the new generation of satellite gravity and altimetry missions to Geosciences. Proposal for a German Priority Research Program. GFZ Potsdam.

- Jekeli, C., (2012): Geometric Reference Systems in Geodesy. Ohio State University.
- Jekeli, C., (2016): Geometric Reference Systems in Geodesy. Ohio State University.
https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/77986/1/Geom_Ref_Sys_Geodesy_2016.pdf
- Jordan, P.P., Denis & G, Blick, (2007): Implementing localized deformation models into a semi-dinamical datum, in: Tregoning, P., and Rizos, C. (eds), (2007): *Dinamic Planet: monitoring and undestending a dynamic planet with geodetic and oceanographic tools*. International Association of Geodesy Symposia, IAG symposium Carns, Australia, 22-26 August 2005, Vol.130, pp.631-637.
- Jordan, T. H. (1979): *Structural Geology of the Earth's Interior*, Proceedings of the National Academy of Science, 1979, Sept., 76(9): 4192-4200.
- Jovanović, V., Srećkovic-Batočanin, D. (2009): *Osnovi geologije*, Zavod za udžbenike - Beograd.
- Kenyeres, A., (2008): Analysis and validation of the ITRF2005 densification solution created by the EPN Time Series Analysis Project Leick, 2004, pp. 11-52;
- Kouba, J., (2004): Improved relativistic transformations in GPS. *GPS Solutions* (2004) 8:170–180.
- Kovacs, B. and G. Timar, (2009): *The Austro-Hungarian Triangulations in the Balkan Peninsula (1853–1875)*, in: Georg Gartner & Felix Ortog (Eds.): *Proceedings of the First ICA Symposium for Central and Eastern Europe 2009*, Vienna University of Technology, 2009.
- Krakiwski, E.J. and Wells, D.E., (1971): *Coordinates Systems in Geodesy*, Lecture Note 16. University of New Brunswick, Department of Geodesy and Geomatics Engineering. Fredericton, Canada. Latest reprinting January 1998. Dostupno na: <http://www2.unb.ca/gge/Pubs/LN16.pdf>
- Leick, A., (2004): *GPS Satellite Surveying*. 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.
- McCarty, D.D., and Gerard, Petit., (eds.), (2003): *IERS Conventions (2003)*, IERS Technical Note No.32, IERS Convention Center, US Naval Observatory (USNO) and Bureau International des Points at Mesures (BIMPS), Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, Frankfurt am Main 2004.

- Minster, B.J., Campbell, J.W., Dozier, X., Fleming, J. W., Gille, J. C., Hartmann, D. L., Jezek, K., Kidder, S., Ramankutty, N., Anne T., Ustin, S.L., Yoder, J., Mengelt, C., (2008): Earth Observations from Space: The First 50 Years of Scientific Achievements. Committee on Scientific Accomplishments of Earth Observations from Space. US The National Academy of Sciences.
- Moritz, H. (1978): The definition of a geodetic datum. Proceedings of the Second International Symposium on Problems Related to the Redefinition of North American Geodetic Networks, 24-28 April 1978, Arlington, VA, pp.63-75, National Geodetic Survey, NOAA.
- Moritz, H., (2000): Geodetic Reference System 1980, Journal of Geodesy, 74(1), pp. 128–162, doi:10.1007/S001900050278.
- Mueller, I.I., (1998): Reference Coordinate Systems: an update. Report No. 394, Dept. of Geodetic Science and Surveying The Ohio State University Columbus, Ohio 43210-1247. Dostupno na: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19890006836.pdf>
- Mulić, M., Vrce, E., Omićević, Dž., Đonlagić, E., (2015): Geodezija od Mesopotamije do Globalnog Geodetskog Opažaćkog Sistema. Geodetski glasnik, br.46, str.132-168.
- Mulić, M., Đonlagić, E. (2015): Geodetic Reference Frames in B&H. Western Balkan Summer School on Modern Geodetic Concepts, University of Prishtina, 05 June 2015. <http://gidec.abe.kth.se/MPG/summerschool/medzida.pdf>
- Mulić, M., (2012): Istraživanje uticaja ITRF realizacija na koordinate, njihovu tačnost i određivanje vektora brzina GPS tačaka na području BIH, doktorska disertacija. Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu.
- Mulić, M., (2012a): Benefit of reprocessed orbits IGS05(IG1) to the geodetic reference frames of Bosnia and Herzegovina. UN/Latvia Workshop on Application of GNSS, Riga, 14-18 May, Riga, Latvia, presentation.
- Mulić, M., Bašagić, M., Čičić, S., (2006a): Geodynamic investigation in Bosnia and Herzegovina, in Pinter, N., Grenerczy, G., Weber, J., Stein, S., Medak, D., (eds), The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards, NATO Science Series , 2006 Springer Netherlands, pp.195-207.
- Mulić, M., Bilajbegović, A., Altiner, Y., (2006b): Untersuchung der Einflussfaktoren bei der Koordinatenbestimmung nach EURE-Kriterien. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten-AVN, No. 2/2006, p.49-55.

- Müller, J., and Biskupek, L., (2006): Contribution of Lunar Laser Ranging to Realize Geodetic Reference System, p.55-59, in Geodetic Reference Frames, IAG Symposia, Vol. 134, ed. by Drewes, H. Springer Dordrecht Heilderberg London New York.
- Muminagić, A. (1971): Ispitivanje realnog geoida u Jugoslaviji, disertacija. Geokarta, Beograd.
- Muminagić, A. (1981): Viša geodezija I, Građevinski fakultet Sarajevo, Sarajevo.
- Muminagić, A., i Mulić, M., (1999): National Report of Bosnia and Herzegovina, p. 144-145 in (eds): Gubler, E., Torres, J.O. and Hornik, H.: Report on the Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF) held in Prague, 2-5 June 1999. Publication No. 8.
- National Research Council of the National Academies of USA, (2010): Precise Geodetic Infrastructure-National requirement for shared resource, National academies Presss, Washington DC, p.156 (Nacionalno istraživačko vijeće nacionalnih akademija Sjedinjenih Američkih Država).
- NGS (1986): Geodetic Glossary. National Geodetic Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Rockville, MD.
- NIMA Technical Report TR8350.2, (1997): Department of Defense World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships With Local Geodetic Systems, Third Edition, 4 July 1997
- Ogrizović, V., (2007): Geodetska stronomija. Pisana predavanja. Beograd. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~mkuhar/Zalozba/GA_Ogrizovic.pdf
- Pavlis, E. C. , Pearlman, M. R. , Noll, C. E., Combrinck, L., Bianco, G., (2017): International Laser Ranging Service (ILRS), Report of the International Association of Geodesy 2015-2017. dostupno na: https://space-geodesy.nasa.gov/docs/2017/ILRS_IAGTravaux_20170602.pdf
- Petit, G., and Luzum, B., (eds.), (2010): IERS Conventions 2010, IERS Technical Note No. 36, IERS Conventions Centre, International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, Frankfurt am Main.
- Rapp, R.H. (1992): Geometric Geodesy, Part II. Lecture Notes, Department of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University, Columbus, OH. <http://hdl.handle.net/1811/24409>
- Ray, J., (2006): New ocean tide loading routine ready, IGS Electronic Mail, 07 Feb 05:12:15 PST 2006, Message Number 5300.

- Rebischung, P., Garayt, B., Schmid, S., Ray, J., Collilieux, X., (2011): IGS08: Elaboration, consequences and maintenance of the IGS realization of ITRF2008. EGU General Assembly, Vienna, 03-08 April 2011, ppt prezentacija: http://acc.igs.org/trf/igs08_egu11.pdf
- Rebischung, P., (2011): Upcoming switch to IGS08/igs08.atx, [IGSMAIL-6354], Mon Mar 7 01:27:57 PST 2011.
- Rebischung, P., (2016): Upcoming switch to IGS14/igs14.atx, [IGSMAIL-7399] Wed Dec 21 05:39:07 PST 2016.
- Rothrock, A., Coordinating Author, M. Abbott, R. Alley, P. Brewer, O. Brown A. Busalacchi, W. Esaias, S. Esbensen, M. Freilich, J. Frew, D. Glover, J. Godfrey, C. Goyet, M. Holland, T. Matsunaga, N. Maynard, F. Muller-Karger, P. Niiler, J. Parslow, E. Peltzer, B. Schutz, C. Shum, M. Srokosz, R. Stewart, T. Strub, L. Walstad, J. Yoder, and V. Zlotnicki (Contributing Author), (1997): Earth observing system science plan, Oceans Chapter 3, 115-159. 1997.
- Rummel, R., Rothacher, M., Beutler, G., (2003): Global Geodetic Observing System (GGOS), Science Rationale. GGOS Science Rationale.
- Sacher, J., Ihde, J., Ellmann, A. (1999): The first UELN Stage is Achieved. In (eds): Gubler, E., Torres, J.O. and Hornik, H.: Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Prague, 2-5 June 1999, Publication No. 8, pp. 87-94.
- Sacher, M. and Liebsch, G., (2015): Short description of the European vertical reference system and its realizations. EUREF symposium 2015, June 03-05, Leipzig, Germany.
- Sacher, M., Ihde, J., Liebsch, G., Mäkinen, J. (2008): EVRF07 as Realization of the European Vertical Reference System. Presented at the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF) in Brussels, June 18-21, 2008. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, Vol. 68, No. 1, pp. 35-50
- Sahagian, D., Alsdorf, D., Kremer, C., Melack, J., Pearlman, M., Plag, H.-P., Poli, P., Reid, S., Rodell, M., Thomas, R., Woodworth, P.L., (2009): Earth observation: Serving the needs of an increasingly global society, in: Global Geodetic Observing System, Meeting the Requirements of Global Society on a Changing Planet in 2020, eds. by Plag, H.-P., Pearlman, M. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009, p. 153-195
- Schüler, E., Schueler, T. And Eissfeller, B., (2007): Joint GPS/GALILEO precise positioning performance using active reference networks. 20th International

- Seeber, G., (2003): *Satellite Geodesy* (Second edition), Walter de Gruyter Berlin, New York, 2003.
- Seitz, F., and Schuh, H., (2010): Earth Rotation, 186-221, in Xu, G. (ed.): *Science of Geodesy I, Advances and Future Directions*, Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Sills, A.D, (2010): *Ace Eart science the E_Z way*, (2nd ed.), Houpage, New York, p.432
- Shum, C.K., Braun, A. (2003): *Space Geodesy: An Interdisciplinary Science in the 21st Century*. Trondheim, Norway 21–25 June, 2004. Dostupno na: https://geodesy.geology.ohiostate.edu/course/gs873/lectures/space_geodesy.pdf
- Smart, W.M. (1962): *Spherical Astronomy*, 5th edition. Cambridge University Press. Cambridge.
- Soffel, M., and Langhans R., (2013): *Space-Time Reference Systems*, Springer Heidelberg New York Dordrecht London.
- Stančić, B., Roić, M., Kapović, Z., (2011): *GNSS network – Regional Cooperation*. INGENO 2011 – 5th International Conference on Engineering Surveying, Croatia, Briuni, 22-24 Septembar 2011. Dostupno na: http://www.geof.unizg.hr/pluginfile.php/7399/mod_book/chapter/166/TS06_3.pdf
- Subirana, J. S., Zornoza J.M.J., and Hernández-Pajares, M., (2013): *GNSS data processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms*. ESA Communications, AG Noordwijk, the Netherlands. ISBN 978-92-9221-886-7
- Torge, W., (1980): *Geodesy*, Walter deGruyter, Berlin.
- Torge, W., (1991): *Geodesy, Second Edition*. Walter deGruyter, Berlin.
- Torge, W., (2001): *Geodesy, Third ed.*, Walter de Gruyter Berlin New York 2001.
- Torge, W., and Muller, J., (2012): *Geodesy, 4th ed.*, De Gruyter, Berlin/Boston.
- Torge, W., (2005): *The International Association of Geodesy 1862 to 1922: from a regional project to an international organization*. *Journal of Geodesy*, 78: pp. 558–568 DOI 10.1007/s00190-004-0423-0
- Torres, J.A., Altamini, Z., Boucher, C., Brockmann, E., Bruyninx, C., Caporoli, A., Gurtner, W., Habrich, H., Hornik, H., Ihde, J., Kenyeres, A., Makinen,

- J., Marel, H., Seeger, H., Simek, J., Stanle, G., and Weber, G., (2009): Status of European Reference Frame, (EUREF), p. 47-56, in *Observing Our Changing Earth*, (ed.) by Sideris, M.G., International Association of Geodesy Symposia, Vol. 133. Proceedings of the 2007 IAG General Assembly, Perugia, Italy, July 2-13, 2007, Springer-verlag Berlin Heidelberg 2009.
- Vanicek, P., and Krakiwsky, E. J., (1986): *Geodesy: The Concepts*, 2nd ed., North-Holland, Amsterdam
- Wdowinski, S., and Eriksson, S., (2009): *Geodesy in the 21st Century*, Eos, Vol. 90, No. 18, 5 May 2009, pages 153–164. doi:10.1029/2009EO180001
- Wilkins, G. A., (1989): Standards for terrestrial and celestial reference systems. *Reference frames in astronomy and geophysics*, p. 447 – 460.
- Zakatov, P. S. (1953): *A Course in Higher Geodesy*, Translated from Russian by the Israel Program for Scientific Translations for the Office of Technical Services, U.S. Department of Commerce, Washington, DC., 1962.)

URL adrese:

- AGU*. (21. 09. 2017). Preuzeto 17.11.2017 od AGU Geodesy: <https://geodesy.agu.org/about/>
- Altimetry*. (2017). Preuzeto 28.07.2017. od AVISO+: Sateliti završenih misija. <https://www.aviso.altimetry.fr/en/applications/geodesy-and-geophysics/other-geophysical-applications.html>
- Altimetry*. (2017). Preuzeto 02.08.2017. od AVISO+: <https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/images/missions/satellites.jpg>
- Balmino G., R. Sabadini, C.C. Tscherning, and P. Woodworth. (bez datuma). *Tutorial 3*. Preuzeto 30. 07. 2017. iz *Modern concepts, concerns and satellite projects in the determination and use of the Earth's gravity field*: http://cct.gfy.ku.dk/publ_cct/cct1721.htm
- EPN*. (2017, 10. 11.). Preuzeto 01. 10. 2017. od EUREF Permanent GNSS Network: http://www.epncb.oma.be/images/maps/antennacalibrationtypes_small.png

- EUPOS*. (2017). Preuzeto 09. 27. 2017. od RGZ Republički geodetski zavod:
<http://www.rgz.gov.rs/me%C4%91unnarodna-saradnja/%C4%8Dlanstvo-ume%C4%91unarnodnim-organizacijama/eupos/>
- BKG EVRS*. (2017). Preuzeto 09. 25. 2017. od Federal Agency for Cartography and Geodesy. EUVN - European Vertical Reference Network:
<https://evrs.bkg.bund.de/Subsites/EVRS/EN/Projects/EUVN/euvn.html>
- DORIS*. (2017). Preuzeto 29.07.2017. od AVISO+: Antena prijemnika postavljena ispod satelita. <https://www.aviso.altimetry.fr/en/techniques/doris.html>
- DORIS system*. (05. 12. 2016). Preuzeto 29. 07. 2017. od IDS: https://ids-doris.org/images/doris/colocation_IERS_Nov2016.png
- Earth Observation Portal*. (19. 11. 2017a). Preuzeto 19. 11. 2017. od Earth Portal Directory. DORIS predajnik. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/doris>
- Earth Observation Portal*. (19. 11. 2017 b). Preuzeto 19. 11. 2017. od Earth Portal Directory. Gaia. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/gaia-satellite-mission#big-data>
- GST*. (21. 11. 2016). Preuzeto 20. 09. 2017. od Geološka skala vremena Wikipedia®:
https://bs.wikipedia.org/wiki/Geolo%C5%A1ka_vremenska_skala
- GFZ*. (20. 01. 2015b). (GFZ Potsdam) Preuzeto 28. 07. 2017. od GFZ Potsdam: SLR satelit razvijen u GFZ. <http://www.gfz-potsdam.de/en/section/global-geomonitoring-and-gravity-field/topics/development-operation-and-analysis-of-gravity-field-satellite-missions/geo-research-satellite-gfz-1/>
- GGAO*. (2017a). Preuzeto 29. 07. 2017. od NASA *Goddard Geophysical and Astronomical Observatory*:
https://www.nasa.gov/centers/goddard/images/content/191429main_3beamslr.jpg
- GGAO*. (2017b). Preuzeto 29.07.2017. od NASA *GGAO*. Preuzeto 29. 07. 2017. od NASA *Goddard Geophysical and Astronomical Observatory*:
https://www.nasa.gov/centers/goddard/images/content/191435main_Apollo_laser_reflector_lgweb.jpg
- GGOS-D*. (12. 11 2013). (Federal Agency for Cartography and Geodesy) Preuzeto 10. 08. 2017. od GGOS-D <https://www.ggos-d.de/>

- GNSS@ROB.* (04.05.2012). Preuzeto 08.07.2017. od Geodetic Reseach Group - Royal Observatory of Belgium - Coordinate Systems: http://gnss.be/systems_tutorial.php
- GRS.* (2009). Preuzeto 11. 07. 2017. od YouTube: Geodetski referentni sistemi. Usporedba nebeskog i terestričkog geocentričkog sistema: <https://www.youtube.com/watch?v=gEnV9gyjVl0>
- GSI.* (2017). Geospatial Information Authority of Japan. Preuzeto 28. 7. 2017. od Geospatial Information Authority of Japan, Slika VLBI antene: <http://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/vlbi-facility.html>
- History of Satellite Laser Ranging in Potsdam.* (20. 01. 2015 a). Preuzeto 28. 7. 2017. od GFZ Potsdam: <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/global-geomonitoring-and-gravity-field/infrastructure/satellite-laser-ranging-station-potsdam/>
- Hrvatska enciklopedija.* (2017). Preuzeto 17. 11. 2017. od Zvezdani kalendar-Leksikografski zavod Miroslav Krleža: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=67566#poglavlje1648>
- IAG.* (08.08.2012). Preuzeto 14.11.2017. od IUGG. IAG Organization - IAG Commissions. http://www.iag-aig.org/index.php?tpl=cat&id_c=7
- IAG.* (bez datuma). Preuzeto 14.11.2017. od IUGG. IAG Services. http://www.iag-aig.org/index.php?tpl=cat&id_c=11
- IAG_GGOS.* (bez datuma). Preuzeto 1. 08. 2017. od IAG: http://www.iag-ggos.org/about_geodesy/the_three_pillars.php
- IGS Network.* (10. 2017). Preuzeto 5. 10. 2017. od IGS: <http://www.igs.org/network>
- IVS.* (16. 08. 2013). NASA Goddard Space Flight Center, USA. Mreža VLBI opservatorija. Preuzeto 28. 07 2017 <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/stations/ns-map.html#maps>
- Orbite.* (2013). Preuzeto 12. 07. 2017. od YouTube-Elementi Keplerove Orbite: <https://www.youtube.com/watch?v=AReKBoiph6g>
- Plate tectonics measured by DORIS.* (10. 2017.). Preuzeto 30. 10. 2017. od AVISO+: https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/images/news/image_du_mois/2017/201710_ids09.gif

- Polar motion.* (2013). Preuzeto 15.09.2017. od IERS:
<https://www.iers.org/IERS/EN/Science/EarthRotation/PolarMotionPlot.html;jsessionid=7AE69BC65BDB0F0E16E6CAB4C8CAA82B.live1?nn=12932>
- Sagen.* (07.07.2012). Preuzeto 08.07.2017. od Sagen forum. Fotografije mjesta ishodišta austrogugarskog geodetskog referentnog sistema u blizini Beča:
<http://www.sagen.at/fotos/showphoto.php/photo/8758>
- Sir Isaac Newton-Wikimedia Commons.* (22. 02. 2016). Preuzeto 10. 07. 2017. od Wikipedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton#/media/File:Newton_25.jpg
- Tektonics.* (2013 a). Preuzeto 12.07.2017. od Litosfera u pokretu:
https://litosferaenmovimiento.files.wordpress.com/2013/04/placas_tectonicas_es-svg.png
- Tektonics.* (2013 b). Preuzeto 12.07.2017. od Litosfera u pokretu:
https://litosferaenmovimiento.files.wordpress.com/2013/04/global_plate_motion_2008-04-17.jpg
- Wikimedia.* (2017). Preuzeto 10.7.2017. od Wikipedia-slobodna enciklopedija:
https://bs.wikipedia.org/wiki/Aristotel#/media/File:Aristotle_by_Raphael.jpg

POPIS SLIKA

SLIKA 1-1: (A-D): PRIMJENA SATELITSKE (SVEMIRSKE) GEODEZIJE U RAZNIM DISCIPLINAMA GEOZNANOSTI NA GLOBALNOM I KONTINENTALNOM NIVOU. (WDOWSKI I ERIKSON, 2009).....	6
SLIKA 1-2: PRIMJENA SATELITSKE GEODEZIJE I DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA ZA MONITORING GEODINAMIČKIH PROCESA I PROMJENA ZEMLJINE KORE NA LOKALNOM NIVOU.	6
SLIKA 1-3: PRIMJENA SATELITSKE GEODEZIJE I DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA U HIDROLOGIJI NA LOKALNOM NIVOU. (WDOWSKI I ERIKSON, 2009).....	7
SLIKA 1-4: ZEMLJINA ROTACIJA OKO SVOJE OSI	11
SLIKA 1-5: REVOLUCIJA ZEMLJE I SMJENA GODIŠNJIH DOBA.	12
SLIKA 1-6: SLOJEVITA GRAĐA ZEMLJE ISPOD POVRŠINE, POJEDNOSTAVLJEN PRIKAZ: JEZGRO, UNUTRAŠNJE I VANJSKO, OMOTAČ, UNUTRAŠNJI I VANJSKI, KORA.	15
SLIKA 1-7: VIZUALNI PRIKAZ GEOLOŠKE VREMENSKE SKALE I RAZVOJA PLANETE TE ŽIVOTA NA NJOJ. (IZVOR: GRAHAM, I DR. 2008).....	16
SLIKA 1-8: MODEL TEKTONSKIH PLOČA (UKLJUČUJE 15 GLAVNIH PLOČA) S NAZNAČENIM STRELICAMA NJIHOVOG MEĐUSOBNOG POMJERANJA.....	17
SLIKA 1-9: BRZINE GNSS STANICA KOJE PRECIZNO POKAZUJU GEODINAMIČKE POMAKE.	18
SLIKA 1-10: VJEROVATNO JEDNA OD PRVIH FOTOGRAFIJA ZEMLJE NAPRAVLJENA IZ SVEMIRSKE LETJELICE, 1972. GODINE, TOKOM MISIJE APOLO 17 (LIJEVO). SATELITI U ORBITI KOJI SU SINHRONIZIRANI SA SUNČEVIM VREMENOM (DESNO). KAKO JEDAN INSTRUMENT MOŽE „VIDJETI“ CIJELU ZEMLJU ZA SAMO JEDAN DAN, SATELITSKI PODACI SE PONAVALJANO PRIKUPLJAJU TOLIKO ČESTO DA IMAJU UVID U PROMJENJIVOST PLANETE.....	19
SLIKA 1-11: SLIKA PACIFIČKOG OKEANA, POKAZUJE UVJETE TOKOM POJAVE EL NIÑO U 1997. GODINI (LIJEVO). SLIKA JE REZULTAT MJERENJU SA SATELITA TOPEX/POSEIDON. CRVENA I BIJELA BOJA INDICIRAJU VEOMA VISOK (IZNAD UOBIČAJENOG) NIVO POVRŠINE MORA, ŠTO REFLEKTIRA POVEĆANU TEMPERATURU NA POVRŠINI. OVI SU UVJETI REZULTIRALI ZNAČAJNOM SMANJENJU POPULACIJE RIBE U BLIZINI ZAPADNE OBALE JUŽNE AMERIKE. SLIKA DESNO POKAZUJE POPREČNI PRESJEK KROZ URAGAN KATRINA, KAO ŠTO GA JE “VIDIO” SATELIT TRMM. DA BI SE POPRAVILO PREDVIĐANJE PUTANJE I JAČINE URAGANA, METEOROLOZI TREBAJU DOBITI MNOGA OPAŽANJA I ALATE UKLJUČUJUĆI: SATELITSKA OPAŽANJA BRZINE VJETRA, TEMPERATURE POVRŠINE MORA, VISINE NIVOVA POVRŠINE MORA, KOLIČINU VLAŽNOSTI ZRAKA I VODENE PARE, A ZATIM PRIMIJENITI SOFISTICIRANE MODELE OBRADU SATELITSKI	

PRIKUPLJENIH PODATAKA KOJI SE KOMBINIRAJU S OPAŽANJIMA NA POVRŠINI ZEMLJE, (MINSTER I DR., 2008).....	20
SLIKA 1-12: STRUKTURA ZEMLJINE UNUTRAŠNOSTI I DINAMIČKI PROCESI UNUTAR I IZVAN ZEMLJE KOJE PROUČAVA GEODEZIJA.	21
SLIKA 1-13: TRI STUPA GEODEZIJE. PREMA (IAG_GGOS, BEZ DATUMA)	22
SLIKA 1-14: ODNOS EKVATORSKE I EKLIPTIČKE RAVNINE, ROTACIJSKE OSI ZEMLJE TE POLOVA.	24
SLIKA 1-15: PRECESIJA (P) I NUTACIJA (N), ROTACIJSKA OS ZEMLJE (R).....	25
SLIKA 1-16: POLARNO KRETANJE ZABILJEŽENO ZA PERIOD OD 2001 DO 2006. GODINE, POKAZANO CRTKASTOM LINIJOM. SREDNJI POLOŽAJ KRETANJA POLA ZA PERIOD OD 1900. DO 2006. GODINE POKAZAN JE PUNOM LINIJOM. VIDI SE KAKO SREDNJI POLOŽAJ IMA NEPRAVILAN „HOD“ U SMJERU OKO 80° KA ZAPADU, A U NOVIJE VRIJEME LAGANO SKREĆE KA ISTOKU. (IERS, 2013)	26
SLIKA 1-17: GEOFIZIČKI PROCESI SU U VEZI S REDISTRIBUCIJOM MASA I PROMJENA U DINAMICI SISTEMA ZEMLJA, ŠTO UTJEČE NA NJENO GRAVITACIJSKO POLJE, GEOMETRIJU I ROTACIJU. (MODIFICIRANO PREMA: ILK I DR., 2005, STR.4).....	33
SLIKA 1-18: SIMBOLIČNA PREDSTAVA GEODETSKIH SVEMIRSKIH TEHNIKA KOJE SU INTEGRIRANE U GGOS. KVAZARI SU VEOMA UDALJENI, SLR SATELIT JE MALIH DIMENZIJA, LEO SATELIT PREDSTAVLJA VELIKU GRUPU SATELITA S RAZLIČITIM ZADACIMA, UKLJUČUJUĆI GRAVITACIJSKE SATELITSKE MISIJE, KAO I SATELITE KOJI NOSE DORIS PRIJEMNIKE, TE SATELITE ZA ALTIMETRIJU I NA KRAJU SATELITE ZA RAZLIČITE METODE DALJINSKA ISTRAŽIVANJA. MODIFICIRANO PREMA: (GGOS-D, 2013).....	36
SLIKA 1-19: VLBI ANTENA PROMJERA 32 M, KOLOCIRANA S GNSS NA EPN STANICI NOTO U ITALIJI, (EPN, 2017 B) LIJEVO. DESNO JE TSUKUBA VLBI ANTENA RADIJUSA 32 METRA, U JAPANU. (GSI, 2017)	38
SLIKA 1-20: PRINCIP RADA VLBI ZA GEODETSKE PRIMJENE: MJERI SE RAZLIKA U VREMENU DOLASKA RADIO SIGNALA SA UDALJENIH KVAZARA.....	38
SLIKA 1-21: VLBI STANICE SU POSTAVLJENE NA VELIKOJ UDALJENOSTI. OPREMLJENE SU VELIKIM RADIO ANTENAMA, PRIJEMNICIMA RADIO SIGNALA, TE VISOKOTAČNIM SATOVIMA. SATOVI NA UDALJENIM STANICAMA SU MEĐUSOBNO SINHRONIZIRANI. PODACI OPAŽANJA REGISTRIRAJU SE NA DISKOVE I ŠALJU U KORELATOR GDJE SE OBRADUJU.....	39
SLIKA 1-22: MREŽA IVLBI SERVISA (IVS, 2013).....	40
SLIKA 1-23: TEHNIKA LASERSKOG MJERENJA DUŽINA DO SATELITA: OPSERVATORIJA NA ZEMLJI (GFZ, 2015 A) I SFERNI SATELIT GFZ-1 (GFZ, 2015 B)	41
SLIKA 1-24: MEĐUNARODNA SLR MREŽA OPSERVATORIJA, STATUS MAJ 2017.	42
SLIKA 1-25: TEHNIKA LASERSKOG MJERENJA DUŽINA DO MJESECA: GODDARD OPSERVATORIJA POSTAVLJENA JE NA POVRŠINI ZEMLJE (GGAO, 2017 A) A REFLEKTORE NA POVRŠINI MJESECA POSTAVILE SU APOLLO MISIJE 11, 12 I 14, (GGAO, 2017 B)	43

SLIKA 1-26: PRINCIP RADA DORIS SISTEMA: SIGNAL SE EMITIRA SA ZEMLJE, A PRIJEMNICI SIGNALA SU POSTAVLJENI NA LEO SATELITIMA.	44
SLIKA 1-27: ANTENA DORIS SISTEMA, DUGA 42 CM, KOJA SE POSTAVLJA NA LEO SATELITE, SLIKA LIJEVO. (DORIS, 2017); ANTENA PRIMA SIGNALE KOJI EMITIRAJU PREDAJNICI NA ZEMLJI, SLIKA U SREDINI, (EOP, 2017 B); REZULTAT OPAŽANJA, IZMEĐU OSTALOG, MOŽE BITI PRAĆENJE POMJERANJA POLA DORIS TEHNIKOM, (SLIKA DESNO). (ALITIMETRY, 2017 A)	44
SLIKA 1-28: RASPORED DORIS PREDAJNIKA KOLOCIRANIH S DRUGIM TEHNIKAMA.....	45
SLIKA 1-29: HORIZONTALNI POMACI DORIS STANICA, ŠTO REFLEKTIRA POMJERANJE TEKTONSKIH PLOČA (PLATE TECTONICS BY DORIS, 2017)	46
SLIKA 1-30: RASPORED STANICA IGS SERVISIA (IGS, 2017).....	48
SLIKA 1-31: GOCE SATELIT U KOMBINACIJI SA SATELITSKOM ALTIMETRIJOM ZA ODREĐIVANJE NIVOA MORA I GLOBALNOG GEOIDA.....	49
SLIKA 1-32: ALTIMETRIJSKE MISIJE KOJE SU ZAVRŠILE RAD (ALTYMETRY, 2017 B).....	50
SLIKA 2-1: ARISTOTEL (384-322. P.N.E.), ISJEČAK. (WIKIMEDIA, 2017)	52
SLIKA 2-2: ERATOSTENOVA GRADUSNA MJERENJA. (PREMA: JEKELI, 2012 STR. 1-7).....	53
SLIKA 2-3: PORTRET SIR ISAACA NEWTONA U POZNYM GODINAMA ŽIVOTA, NASLIKAN 1972. GOD. (WIKI, 2016).....	54
SLIKA 2-4: PRESJEK KROZ ELIPSOID PREDSTAVLJEN MERIDIJANSKOM ELIPSONOM KOJA SE DOBIJE KAD SE ELIPSOID PRESIJEČE RAVNINOM POSTAVLJENOM KROZ MALU (POLARNU) OS.	57
SLIKA 2-5: DVOOSNI (a, b) ELLIPSOID JE USVOJEN KAO NAJOPTIMALNIJI GEOMETRIJSKI OBLIK DA SLUŽI KAO REFERENTNI ZA RAČUNANJA GEODETSKIH MREŽA. SATELITSKI PODACI SU POKAZALI DA TROOSNI ELIPSOID (EKVATOR JE U OBLIKU ELIPSE) BOLJE APROKSIMIRA STVARNOM OBLIKU GLOBALNOG GEOIDA, ALI BI RAČUNANJA BILA PUNO KOMPLEKSNIJA.	59
SLIKA 2-6: ODNOS GLOBALNOG GEOIDA I REFERENTNOG APSOLUTNOG ELIPSOIDA.	65
SLIKA 2-7: DETALJ ODNOSA GEOIDA, REFERENTNOG ELIPSOIDA I TOPOGRAFSKE POVRŠINE.	65
SLIKA 3-1: SFERNE POLARNE KOORDINATE	72
SLIKA 3-2: SFERNI TROKUT ABC NA NEBESKOJ SFERI.....	73
SLIKA 3-3: ROTACIJE OKO KOORDINATNIH OSI.....	74
SLIKA 3-4: GEOCENTRIČNA ŠIRINA (PREMA JEKELI, 2012, STR. 2-8).....	80
SLIKA 3-5: REDUCIRANA ŠIRINA (PREMA JEKELI, 2012, STR. 2-9).....	81
SLIKA 3-6: GEODETSKA ŠIRINA (PREMA JEKELI, 2012, STR. 2-9).....	82
SLIKA 3-7: NAGNUTOST ELIPSOIDA.	83
SLIKA 3-8: NORMALNI PRESJEK NA ELIPSOIDU KROZ TAČKU GEODETSKE ŠIRINE ϕ . POKAZAN JE PRVI VERTIKAL. (MODIFICIRANO PREMA: JEKELI, 2016, STR. 2-19)....	86
SLIKA 3-9: ZAKRIVLJENOST KRIVE LINIJE U RAVNINI (PREMA JEKELI, 2016, STR. 2-15)....	86
SLIKA 3-10: RADIJUS ZAKRIVLJENOSTI MERIDIJANSKE ELIPSE.....	88

SLIKA 3-11: GEODETSKA ŠIRINA: POGLED SA SJEVERNOG POLA NA EKVATORSKU RAVNINU (LIJEVO) I VEZA S KARTEZIJEVIM KOORDINATAMA (DESNO).....	89
SLIKA 3-12: ODREĐIVANJE ELIPSOIDNE VISINE h TAČKE P IZ KARTEZIJEVIH KOORDINATA (x, y, z) I GEODETSKE ŠIRINE ϕ . (PREMA JEKELI, 2016, STR. 2-45).....	92
SLIKA 3-13: RAVNINA ASTRONOMSKOG MERIDIJANA KOJU DEFINIRAJU PARALELA SA Z OSOM I TANGENTA NA TEŽIŠNICU (PREMA JEKELI, 2016, STR. 2-48).....	94
SLIKA 3-14: LOKALNI ASTRONOMSKI KOORDINATNI SISTEM	96
SLIKA 3-15: LOKALNE ASTRONOMSKE KOORDINATE I MJERENE VELIČINE.	97
SLIKA 3-16: VEZA IZMEĐU LOKALNIH SISTEMA (u, v, w) I $(\ x, \ y, \ z)$	98
SLIKA 3-17: LOKALNI GEODETSKI KOORDINATNI SISTEM	101
SLIKA 3-18: ASTRONOMSKI I GEODETSKI AZIMUT	103
SLIKA 3-19: SREDNJA EKLIPTIČKA RAVNINA I TAČKA PROLJETNOG EKVINOCIJA Υ	114
SLIKA 3-20: NEBESKI EKVATORSKI SISTEM S REKTASCENZIJOM. KOORDINATE NEBESKIH TIJELA IZRAŽAVAJU SE U OVOM SISTEMU, KOORDINATAMA (A, Δ)	116
SLIKA 3-21: MJESNI NEBESKI EKVATORSKI KOORDINATNI SISTEM (SA SATNIM UGLOM). KOORDINATE ZVIJEZDE IZRAŽENE U OVOM SISTEMU SU (Δ, T)	118
SLIKA 3-22: ASTRONOMSKI TROUGAO NA NEBESKOJ SFERI.....	119
SLIKA 4-1: DANAŠNJI IZGLED MJESTA KOJE JE BILO ISHODIŠTE AUSTROUGARSKOG GEODETSKOG DATUMA HERMANNSKOGEL, NA BRDU KOD BEČA. SAMO TABLA S NATPISOM (SLIKA DESNO) PODSJEĆA NA VAŽNOST MJESTA. (SAGEN, 2012).....	130
SLIKA 4-2: ISHODIŠTE GEODETSKOG SISTEMA, KAKO JE TO DEFINIRANO METODAMA KLASIČNE TERESTRIČKE GEODEZIJE: ODABIRANA JE POGODNA TAČKA NA POVRŠINI ZEMLJE KOJOJ SU ODREĐENE KOORDINATE: ASTRONOMSKA ŠIRINA I ASTRONOMSKA DUŽINA.	132
SLIKA 4-3: RELATIVNO (LOKALNO) I APSOLUTNO (GLOBALNO) ORIJENTIRAN ELIPSOID.	133
SLIKA 4-4: GEOCENTRIČNI TERESTRIČKI REFERENTNI SISTEM-GTRS.....	140
SLIKA 4-5: KARTA TEKTONSKIH OBLIKA MEDITERANSKE OBLASTI, (DILEK, 2006, STR. 3)	142
SLIKA 4-6: KRETANJE PLOČA ČVRSTE LITOSFERE IZ GEOLOŠKO-GEOFIZIČKIH MODELA PB2002 ZA GLAVNE PLOČE IDENTIČNE SA NNR NUVEL-1A KAO I GEODETSKOG MODELA APKIM 2005. OČIGLEDNA SU SISTEMATSKA ODSUPANJA KAO I OPĆI TREND KA SJEVERU.	143
SLIKA 4-7: RASPORED STANICA I INSTRUMENTATA KO-LOCIRANIH OPAŽAČKIH TEHNIKA U ITRF88 (LIJEVO, 20 STANICA) I ITRF2008 (DESNO, 71 STANICA),.....	154
SLIKA 4-8: GLAVNA MREŽA ITRF2014 STANICA KORIŠTENIH ZA RAČUNANJE TRANSFORMACIJSKIH PARAMETARA IZMEĐU ITRF2014 I ITRF2008 (IZVOR: ALTAMINI I DR., 2016, STR. 6120)	158
SLIKA 4-9: GLOBALNI RASPORED STANICA U IGS MREŽI (IGS, 2017)	160
SLIKA 5-1: ORGANIZACIJA EUREF-A (IZVOR: BRUYNINX, 2011)	170

SLIKA 5-2: RASPORED REFERENTNIH STANICA EPN MREŽE U GODINI OSNIVANJA 1996. GODINE I RAZVOJ TOKOM 20 SLJEDEĆIH GODINA. (IZVOR: BRUYNINX I DR., 2016)	174
SLIKA 5-3: EVROPSKA PERMANENTNA MREŽA: PRAĆENJA GNSS SIGNALA: SAMO GPS, GPS+GLONASS TE GPS+GLONASS+GALILEO: STATUS MAJ 2016.	175
SLIKA 5-4: KLASIFIKACIJA PO TIPU KALIBRACIJE, STATUS OKTOBAR 2017 (EPN, 2017 A)	177
SLIKA 5-5: HISTORIJA PROŠIRENJA UELN MREŽE DO 2007. GODINE. (IZVOR: IHDE, 2008)	179
SLIKA 5-6: UELN MREŽA: ZELENE LINIJE SU NIVELMANSKI VLACI PRVOG REDA, CRNI KRUGOVI POKAZUJU ČVORNE TAČKE PRVOG REDA, CRNI ROMBOVI PREDSTAVLJAJU MAREOGRAFE, TROKUTOVI SU GPS STANICE UKLJUČENE U DEFINIRANJE EVROPSKOG JEDINSTVENOG VERTIKALNOG DATUMA. (BKG EVRS, 2017)	180
SLIKA 5-7: RAZVOJ UELN MREŽE, STATUS 1998. GODINE: UKLJUČENE SU NIVELMANSKE MREŽE IZ 21 DRŽAVE NA TERITORIJI EVROPSKOG KONTINENTA. MREŽA IMA 3 064 ČVORNA REPERA I 4 263 NIVELMANSKA VLAKA PRVOG REDA. (IZVOR: SACHER I LIEBSCH, 2015)	181
SLIKA 5-8: STATUS UELN GODINE 2007. UKLJUČENO 27 DRŽAVA, MREŽA IMALA 7 939 ČVORNIH REPERA I 10 347 NIVELMANSKIH LINIJA PRVOG REDA. (LIJEVO). DESNO: STATUS UELN IZ 2015. GODINE, NAKON ŠTO SE 2012. GODINE PRIDRUŽILA RUSIJA.	182
SLIKA 5-9: RASPORED DATUMSKIH TAČAKA EVRF2007 (SAHER I DR., 2008)	183
SLIKA 5-10: VISINE SREDNJEG NIVOVA MORA IZNAD EUVN KVAZI-GEOIDA IZ GPS/NIVELMANA ZA GODINU 1997 (BKG EVRS, 2017)	183
SLIKA 5-11: EUVN- VEZE IZMEĐU MAREOGRAFA I GPS-A (BKG EVRS, 2017)	184
SLIKA 5-12: PRIBLIŽNE VRIJEDNOSTI KOREKCIJA (IZRAŽENE U CM) KOJE TREBA UVESTI U DRŽAVNE SISTEME VISINA DA SE DOBIJU VRIJEDNOSTI EVRF2000 (IHDE, 2008).	185
SLIKA 5-13: RASPORED STANICA OPAŽANIH U GPS KAMPANJI BIHREF2000	187
SLIKA 5-14: ELIPSE POGREŠAKA KOJE ILUSTRIRAJU TAČNOST STANICA GPS KAMPANJE BIHREF2000 KAO REZULTAT DVIJE 24 SATNE SESIJE OPAŽANJA. STANICE KOJE SU OPAŽANE PO PET DANA (KUDB, LEOT, TURI, STOL, KAO I SRJV KOJA JE PERMANENTNA STANICA) IMAJU MANJE ELIPSE POGREŠAKA. OVO NEPOSREDNO POKAZUJE KAKO SE TAČNOST KOORDINATA POVEĆAVA POVEĆANJEM BROJA OPAŽANJA. (IZVOR: MULIĆ, 2012)	188
SLIKA 5-15: RASPORED STANICA OPAŽANIH U GPS KAMPANJI CEGRN05	190
SLIKA 5-16: BRZINE POMJERANJA STANICA U HORIZONTALNOJ (LIJEVO) I VERTIKALNOJ (DESNO) RAVNINI, IZRAČUNATE KAO REZULTAT KOMBINIRANJA KAMPANJA BIHREF2000 I CEGRN05. PODACI SU U SAGLASNOSTI S PODACIMA KOJE ZA SRJV STANICU OBJAVLJUJE EPN. SVE STANICE SE POMJERAJU U SMJERU SJEVER-	

SJEVEROISTOK (HORIZONTALNO) I IMAJU TREND IZDIZANJA KOPNA. (MULIĆ, 2012).....	191
SLIKA 5-17: KARTA REFERENTNIH STANICA NJEMAČKE AKTIVNE GNSS MREŽE SAPOS.192	
SLIKA 5-18: PLANIRANE I POSTOJEĆE EUPOS STANICE (EUPOS, 2017)	193
SLIKA 5-19: GNSS PERMANENTNE MREŽE U REGIJI ZAPADNOG BALKANA.....	194
SLIKA 5-20: RASPORED 17 STANICA FBIHPOS MREŽE, ZELENE OZNAKE. PLAVOM BOJOM SU OZNAČENE STANICE IZ DRUGOG ENTITETA KOJE DIJELE PODATKE OPAŽANJA S FBIHPOS. (MULIĆ, 2012A)	196
SLIKA 5-21: RASPORED STANICA SRPOS MREŽE, PLAVE OZNAKE. ZELENOM BOJOM SU OZNAČENE STANICE IZ FBIHPOS-A KOJE DIJELE PODATKE OPAŽANJA SA SRPOS MREŽOM. (MULIĆ, 2012A)	196

POPIS TABLICA

TABLICA 1-1: KORISTI ZA ŠIRU DRUŠTVENU ZAJEDNICU KOJE PREPOZNAJE I PODRŽAVA INTEGRIRANI GLOBALNI SISTEM ZA OPAŽANJE ZEMLJE, (SAHAGIAN, I DR. 2009, STR. 155).....	34
TABLICA 2-1: PREGLED RAZLIČITIH REFERENTNIH ELIPSOIDA KOJI SU ODREĐIVANI I PRIMJENJIVANI U SVIJETU.(IZVOR: NIMA TR8350.2; IERS, 2003, POGLAVLJE 1, STR.12).....	60
TABLICA 3-1: PREGLED NEBESKIH KOORDINATNIH SISTEMA (OGRIZOVIĆ, 2007)	121
TABLICA 4-1:TRANSFORMACIJSKI PARAMETRI ZA PRELAZ IZ ITRF2014 U RANIJE ITRF REALIZACIJE. (IZVOR: ALTAMINI I DR., 2016)*	157

INDEX POJMOVA

altimetrija	51	dinamičko vrijeme	204
apsolutni referentni elipsoid	135	DORIS	140
astronomska dužina	100, 127	DORIS tehnika	47
astronomska širina	100, 126	dugobazisna interferometrija	39
astronomske koordinate	71, 108, 114, 126	dvoosni rotacijski elipsoid	59
astronomski azimut	100, 114, 117, 126, 128	efemerno vrijeme	80, 203
astronomski horizont	110	ekliptička dužina	121
astronomski meridijan	99	ekliptička širina	121
astronomski trougao	123	ekliptički nebeski koordinatni sistem	116
astronomski zenit	110	ekvator	90
astronomski zenitni ugao	100	ekvatorski nebeski koordinatni sistem	115
atmosferska refrakcija	127	elipsoid	58, 67, 107, 137
atomska skala vremena	80	elipsoidne visine	182
atomsko vrijeme	204	Eratosten	55
azimut normalnog presjeka	108, 112	Evropski referentni okvir	172
baricentrično koordinirano vrijeme	81	Evropski vertikalni referentni sistem	182
baricentrično dinamičko vrijeme	203	fizikalni parametri elipsoida	65
baricentrično dinamičko vrijeme	81	fokalne tačke elipse	59
baricentrično koordinirano vrijeme	203	Galileo	49, 130
BeiDou	49, 130	Galileo vrijeme	209
BeiDou vrijeme	209	geocentrična širina	84
Besselov elipsoid	64	geocentrične koordinate	162
brzine stanica	145, 157, 178	geocentrično koordinirano vrijeme	203
Dekartove koordinate	89	geocentrično koordinirano vrijeme	81
deklinacija	120, 122, 126	geodetska astronomija	114
dijagonalna jedinična matrica	104	geodetska dužina	84
		geodetska dužina	84

geodetska širina 86, 96

geodetske koordinate 71, 109

geodetski azimut 108

geodetski datum 131, 133, 148

geodetski datum 73, 132

geodetski referentni sistem 66

geodetski zenit 110

geodezija

 definicija 2, 4

geografske koordinate 71

geoid 67, 136

geokinematički visinski referentni sistem 186

geometrijski parametri elipsoida 65

geometrija i kinematika Zemlje 25

geopotencijal 105

globalni geodetski referentni sistem 138

GLONASS 49, 130

GLONASS vrijeme 208

GNSS 49, 50, 130, 139, 140

GPS 130

GPS vrijeme 208

građa Zemlje 15

gravitacija 25

gravitacijski potencijal 30

horizont opažača 127

horizontalni uglovi 98

horizontski nebeski sistem 115, 123

inercijski sistem 115

IRNSS 49

jednačina elipse 60

kalendar 82

Kartezijeve koordinate 76, 95, 103, 139

Konvencijski terestrički referentni sistem 98

Konvencionalni međunarodni pol 99

konverzija geodetskih koordinata 91

koodinatne razlike 105

koordinate 69

koordinate u ravnini meridijanske elipse 94

koordinatni sistem 73

koordinatni sistemi 71

krivolinijske koordinate 69

krivolinijske koordinate u ravnini 70

Laplaceov azimut 113

Laplaceov uvjet 112

Laplaceove tačke 114

lijevi koordinatni sistem 104, 116

LLR tehnika 45, 140

lokalne astronomske koordinate 102

lokalni astronomski sistem 101

lokalni elipsoidi 61

lokalni geodetski sistem 101, 106

lokalno vrijeme 124

lokalni astronomski meridijan 122

Međunarodni GNSS servis 32

Međunarodni terestrički referentni sistem 140, 147

meridijan 90

mjesni astronomski meridijan 116

mjesni meridijan vidjeti lokalni meridijan

model APKIM 146

model deformacija	148	precesija, nutacija i pomjeranje polova	
nebeska sfera	74, 109	25, 28	
nebeske koordinate	71	precizne efemeride	162
nebeski koordinatni sistemi	129	premjer država	137
nebeski sjeverni pol	123	prirodne koordinate	100
nivelmanska mreža	105, 181	prividno sideričko vrijeme	204
normala na elipsoid	86	prvi vertikal	90, 128
normalni presjek	90	QZSS	49
opći Zemljin elipsoid	64	radijus zakrivljenosti	91, 94
opterećenje zbog atmosfere	161	ravnina astronomskog meridijana	116
opterećenje zbog okeana	161	ravnina meridijana	84
orijentacija i rotacija Zemlje	25,	reducirana širina	85
orijentacija koordinatnih osi	133, 139	referentni okvir	73, 132
otklon težišnice	110	referentni sistem	73, 132, 135
paralele	90	regionalni dvoosni elipsoidi	61
permanentna mreža	173, 176, 194, 199	rektascenzija	120, 127
plimni valovi čvrste Zemlje	159, 161	relativni elipsoid	136
plimni valovi polova	161	rotacijske matrice	78
polarno kretanje	27, 28	rotacijski elipsoid	57
pomjeranje geocentra	161	satelitske efemeride	143
pomjeranje pola	153	satni krug objekta	120
post-seizmičke deformacije	155	satni ugao	122, 128
pravac sile teže	98, 116	sedam parametara transformacije	139
pravac Zemljine obrtne osi	118	siderički dan	83
pravca sjevernog ekliptičkog pola	118	sideričko vrijeme	80, 124, 203
pravi Sunčev dan	83	sinusni poučak	111
pravila sferne trigonometrije	123	sistem vremena	202
pravolinijske koordinate	70	Sistem Zemlja	10, 20, 21, 29, 35
koordinate u ravnini meridijanske ellipse	86	sistemi visina	182
		skale vremena	vidjeti sistemi vremena
		SLR tehnika	44, 140

spljoštenost	60	varijanc-kovarijancne matrice	149
srednje sideričko vrijeme	204	vertikalni referentni sistem	173
svjetsko sunčevo vrijeme	80, 83	vertikalni krug	116
teorija tektonskih ploča	143	viša geodezija	2
terestričke koordinate	71	vremenske serije	152, 155
terestrički referentni sistem	135, 139	vremenske skale	209
terestričko dinamičko vrijeme	203	vrijeme	79, 128, 202
terestričko dinamičko vrijeme	81	zakrivljenost meridijanskog luka	92
terestričko vrijeme	203	Zemljin omotač	16
totalna stanica	101	Zemljina kora	17
transformacijska matrica	105	Zemljina revolucija	13, 81
trenutne koordinate	117	Zemljina rotacija	11, 81
trenutne koordinate zvijezda	122	Zemljino jezgro	15
troposfersko zenitno kašnjenje	178	zenit	123
uglovne koordinate	70	zenitna daljina	117
univerzalno vrijeme	203	zvjezdano vrijeme	206
univerzalno vrijeme	205		

TABLE OF CONTENT

CONTENT (in Bosnian)	i
PREFACE	v
ABBREVIATIONS AND ACRONIMS	ix
Chapter 1	1
1 INTRODUCTION	1
1.1 DEFINITION AND TASK OF GEODESY	2
1.2 EARTH MOTION IN SPACE AND TIME	10
1.3 EARTH STRUCTURE.....	13
1.4 SYSTEM EARTH.....	19
1.5 TREE PILARS OF GEODESY.....	22
1.6 PRECESSION AND NUTATION	24
1.7 INTERDISCIPLINERY OF GEODESY	28
1.8 INTERNATIONAL GEODETIC ORGANISATIONS	28
1.8.1 International Union of Geodesy and Geophysics	29
1.8.2 International Association of Geodesy	30
1.8.3 GGOS as vital infrastructure of geosciences.....	32
1.8.4 Geodetic techniques combining in the GGOS.....	35
1.9 END VIEW TO THE CHAPTER.....	50
Chapter 2	51
2 SHAPE OF THE EARTH	51

2.1	APROXIMATION OF THE EARTH BY A SPHERE.....	51
2.2	APROXIMATION OF THE EARTH BY A ELIPSOIDE	53
2.2.1	Rotating ellipsoid.....	54
2.2.2	Bessel ellipsoid	61
2.2.3	Geodetic reference system 1980	62
2.3	END VIEW TO THE CHAPTER.....	64
Chapter 3		66
3 COORDINATES and COORDINATE SYSTEMS		66
3.1	SYSTEMATIZATION OF THE COORDINATES	66
3.2	SISTEMATIZATION OF COORDINATE SYSTEMS	68
3.3	GEODETIC REFERENCE SYSTEMS-basics terms	70
3.4	PRELIMINARY MATEMATICS CONSIDERATION	71
3.4.1	Selestial sphere.....	71
3.4.2	Rotating matrix	73
3.5	TIME IN GEODESY.....	75
3.5.1	Natural processes and Time scales.....	76
3.6	GEODETIC COORDINATES.....	80
3.6.1	Main lines on the ellipsoid and radius of curvatures	85
3.6.2	Relations between Geodetic and Cartesian coordinates	88
3.7	NATURAL COORDINATES	92
3.8	LOCAL TERRESTRIAL COORDINATES.....	95
3.8.1	Local astronomic coordinate system	96
3.8.2	Local geodetic coordinate system	100
3.9	Differences between geodetic and astronomical quantites ..	103
3.10	CELESTIAL COORDINATES	107
3.10.1	Catalog of stars.....	108

3.10.2	Astronomical coordinates in geodesy.....	110
3.10.3	Horizont celestial system.....	112
3.10.4	Ekvatorial celestial system.....	114
3.11	TRANSFORMATION OF THE COORDINATES.....	119
3.12	ASTRONOMICAL COORDINATES	121
Chapter 4		126
4 TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEMS		126
4.1	DEFINITION OF BASIC TERMS	127
4.2	BASIC CONCEPT OF TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEM	130
4.2.1	Terrestrial reference system in satellite geodesy.....	136
4.2.2	Terrestrial reference frame connected with the Earth	138
4.2.3	International Terrestrial Reference System.....	139
4.2.4	Deformations of Earth	141
4.2.5	IERS Terrestrial Reference Frames	144
4.2.6	ITRF as IERS realisation of ITRS	146
4.2.7	History of ITRF	148
4.2.8	IGS reference systems and services	158
4.3	END VIEW TO THE CHAPTER.....	167
Chapter 5		169
5 EUROPEAN REFERENCE NETWORK.....		169
5.1	DEFINITION OF ETRS89	171
5.2	REALIZATION OF ETRS89	173
5.3	EUROPEAN PERMMANENT NETWORK.....	174
5.4	EPN PROJECTS.....	178
5.4.1	UENL i EUVN	178

5.5	EUREF NETWORK IN B&H.....	186
5.5.1	GPS networks BIHREF98 i BIHREF2000	186
5.5.2	Network CEGRN	188
5.5.3	GNSS permanent networks and positioning services	191
5.5.4	BIHPOS.....	195
Chapter 6		197
6 TIME SYSTEMS		197
6.1	TIME AS THE COORDINATE.....	198
6.2	NATURAL PROCESSES FOR MESUREMENT OF TIME.....	199
6.2.1	Siderial time	200
6.2.2	Universal time.....	201
6.2.3	GNSS time systems.....	204
6.3	END VIEW TO THE CHAPTER.....	205
LITERATURE		206
LIST OF FIGURES		219
LIST OF TABELS.....		224
INDEX		225
TABLE OF CONTENT (in English)		229