

# Analiza kvalitete geodetske mreže za potrebe izgradnje tunela Bakovac - Lika primjenom JAG3D softvera otvorenog koda

---

Brozović, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geodesy / Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:256:775319>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-21**



Repository / Repozitorij:

[repozitorij.geof.unizg.hr/en](https://repozitorij.geof.unizg.hr/en)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEODETSKI FAKULTET**

Marko Brozović

**ANALIZA KVALITETE GEODETSKE MREŽE ZA  
POTREBE IZGRADNJE TUNELA  
BAKOVAC-LIKA PRIMJENOM JAG3D SOFTVERA  
OTVORENOG KODA**

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

**Marko Brozović ♦ DIPLOMSKI RAD ♦ 2024.**



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEODETSKI FAKULTET**

Marko Brozović

**ANALIZA KVALITETE GEODETSKE MREŽE  
ZA POTREBE IZGRADNJE TUNELA  
BAKOVAC-LIKA PRIMJENOM JAG3D  
SOFTVERA OTVORENOG KODA**

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

# SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

## GEODETSKI FAKULTET



Na temelju članka 19. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu i Odluke br. 1\_349\_11 Fakultetskog vijeća Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, od 26.10.2017. godine (klasa: 643-03/16-07/03), uređena je obaveza davanja „Izjave o izvornosti“ diplomskog rada koji se vrednuju na diplomskom studiju geodezije i geoinformatike, a u svrhu potvrđivanja da je rad izvorni rezultat rada studenata te da taj rad ne sadržava druge izvore osim onih koji su u njima navedeni.

### IZJAVLJUJEM

Ja, **Marko Brozović**, (JMBAG: 00070640128), rođen 24.04.1985. u Karlovcu, izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi tog rada nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

U Zagrebu, dana 05. 07. 2024.

  
Potpis studenta / studentice

<b>I. AUTOR</b>	
<b>Ime i prezime:</b>	Marko Brozović
<b>Datum i mjesto rođenja:</b>	24. travnja 1985., Karlovac, Republika Hrvatska
<b>II. DIPLOMSKI RAD</b>	
<b>Naslov:</b>	Analiza kvalitete geodetske mreže za potrebe izgradnje tunela Bakovac-Lika primjenom JAG3D softvera otvorenog koda
<b>Broj stranica:</b>	85
<b>Broj tablica:</b>	45
<b>Broj slika:</b>	40
<b>Broj bibliografskih podataka:</b>	14 + 9 URL
<b>Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen:</b>	Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
<b>Mentor:</b>	izv. prof. dr. sc. Rinaldo Paar
<b>Komentor:</b>	/
<b>Voditelj:</b>	izv. prof. dr. sc. Rinaldo Paar
<b>III. OCJENA I OBRANA</b>	
<b>Datum zadavanja teme:</b>	03.02.2023.
<b>Datum obrane rada:</b>	05.07.2024.
<b>Sastav povjerenstva pred kojim je branjen diplomski rad:</b>	izv. prof. dr. sc. Rinaldo Paar
	izv. prof. dr. sc. Ante Marenić
	izv. prof. dr. sc. Hrvoje Tomić

## **Zahvala**

*Želim izraziti najdublju zahvalnost svom mentoru izv.prof.dr.sc. Rinaldu Paaru za njegovo strpljenje, korisne savjete i vodstvo tijekom pripreme ovog rada. Njegova podrška i stručnost bili su ključni za dovršetak istog.*

*Posebne zahvale upućujem svojoj supruzi Katarini za njezino nevjerojatno strpljenje, žrtve i nepokolebljivu podršku kroz sve dobre i loše trenutke mog studija. Njezina vjera u mene održavala me čak i tijekom najtežih trenutaka. Veliko hvala i našoj djeci, Sari i Davidu, za sve trenutke koje su proveli bez mene. Obćavam da ću vam sve nadoknaditi.*

*Također bih želio iskreno zahvaliti svojim roditeljima i bratu na njihovom stalnom ohrabrenju i podršci kroz sve ove godine. Njihova vjera u moje sposobnosti bila je izvor snage i motivacije.*

*Hvala vam svima što ste bili dio ovog putovanja sa mnom.*

## ***Analiza kvalitete geodetske mreže za potrebe izgradnje tunela Bakovac-Lika primjenom JAG3D softvera otvorenog koda***

### **Sažetak:**

*Rad pod naslovom "Analiza kvalitete geodetske mreže za potrebe izgradnje tunela Bakovac - Lika primjenom JAG3D softvera otvorenog koda" fokusira se na ocjenu kvalitete portalnih mikromreža za izgradnju tunela Bakovac - Lika korištenjem otvorenog koda JAG3D softvera.*

*Rad započinje pregledom povijesti i metodologije izgradnje tunela. Govori se o uspostavi i provedbi geodetskih mreža za posebne namjene, ističući ključne korake planiranja, izvedbe i analize pogrešaka u geodetskim mjerenjima.*

*Praktični dio uključuje terestrička mjerenja unutar mikrotriangulacijskih mreža u Bakovcu i Lipovom Polju. Prikupljeni podaci su obrađeni i analizirani pomoću JAG3D, osiguravajući visoku preciznost potrebnu za geodetsku osnovu tunela.*

*U radu se koristi JAG3D softver, koji je razvio dr. Michael Losler, a koji je namijenjen izjednačenju i analizi 1D, 2D i 3D geodetskih mreža primjenom metode najmanjih kvadrata na temelju Gauss-Markovljevog modela. Mogućnosti softvera uključuju izjednačavanje GNSS baznih linija, analizu podataka i statističko testiranje pomoću Baardovog globalnog testa i metode pretraživanja podataka. Istraživanje pokazuje kako JAG3D podržava optimizaciju mreže i analizu deformacija, što je ključno za identifikaciju pomaka ili deformacija unutar mreže.*

*Zaključno, rad potvrđuje da primjena JAG3D softvera značajno poboljšava točnost i pouzdanost geodetskih mreža u izgradnji tunela, pružajući robustan okvir za buduće geodetske projekte.*

***Ključne riječi:*** analiza, geodetska mreža, JAG3D, tunel.

***Analysis of the quality of the geodetic network for the construction of the Bakovac-Lika Tunnel using the open-source JAG3D software***

***Abstract:***

*The thesis titled "Analysis of the Quality of the Geodetic Network for the Construction of the Bakovac - Lika Tunnel Using JAG3D Open-Source Software" focuses on evaluating the quality of portal micro-networks for the construction of the Bakovac - Lika Tunnel using the open-source JAG3D software.*

*The thesis begins with an overview of the history and methodologies of tunnel construction. It discusses the establishment and implementation of geodetic networks for special purposes, highlighting the key steps of planning, execution, and error analysis in geodetic measurements.*

*The practical part includes terrestrial measurements within microtriangulation networks in Bakovac and Lipovo Polje. The collected data were processed and analyzed using JAG3D, ensuring the high precision required for the geodetic foundation of the tunnel.*

*The thesis uses the JAG3D software, developed by Dr. Michael Losler, which is designed for the adjustment and analysis of 1D, 2D, and 3D geodetic networks using the least squares method based on the Gauss-Markov model. The software's capabilities include the adjustment of GNSS baselines, data analysis, and statistical testing using Baarda's global test and data snooping method. The research demonstrates how JAG3D supports network optimization and deformation analysis, which is crucial for identifying shifts or deformations within the network.*

*In conclusion, the thesis confirms that the application of JAG3D software significantly improves the accuracy and reliability of geodetic networks in tunnel construction, providing a robust framework for future geodetic projects.*

***Keywords:*** analysis, geodetic network, JAG3D, tunnel.



## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TUNELI.....	2
2.1 Povijest tunelogradnje.....	2
2.2 Izgradnja tunela.....	6
2.3 Nova austrijska metoda tunelogradnje – NATM.....	9
3. GEODETSKE MREŽE ZA POSEBNE NAMJENE .....	11
3.1 Uspostava geodetske mreže za posebne namjene.....	13
3.2 Projekt mreže .....	13
3.3 Izvedba geodetske mreže .....	14
4. ANALIZA GEODETSKE MREŽE .....	17
4.1 Analiza točnosti mjerenja – a priori.....	17
4.1.1 Pogreška pri mjerenju horizontalnih kuteva.....	18
4.1.2 Pogreška pri mjerenju zenitnih udaljenosti .....	19
4.1.3 Pogreške pri elektrooptičkom mjerenju duljina .....	19
4.1.4 Pogreške mjerenja u geometrijskom nivelmanu .....	20
4.1.5 Pogreške mjerenja u trigonometrijskom nivelmanu.....	21
4.2 Korekcije i redukcije mjerenih veličina.....	21
4.3 Analiza točnosti <i>a posteriori</i> .....	22
4.3.1 Metoda procjene varijanci iz pravih pogrešaka.....	22
4.3.2 Procjena varijance iz izračunatih popravaka mjerenja .....	23
5. IZJEDNAČENJE GEODETSKE MREŽE ZA POSEBNE NAMJENE.....	24
5.1 Izjednačenje posrednih mjerenja – Gauss-Markovljev model.....	24
5.2 Ocjena točnosti geodetske mreže <i>a posteriori</i> .....	25
5.2.1 Elipse pogrešaka.....	26
5.3 Rang i defekt geodetske mreže .....	27
5.4 Datum geodetske mreže.....	28
5.4.1 Defekt datuma geodetske mreže.....	28
5.5 Definiranje datumskih parametara mreže .....	29
5.5.1 Konvencionalni geodetski datum .....	29
5.5.2 Optimalni geodetski datum .....	31
6. GEODETSKI RADOVI PRI GRADNJI TUNELA .....	32
6.1 Kontrola poprečnih profila.....	34
6.2 Tehničke specifikacije kontrole poprečnih profila .....	35
6.3 Kontrolna mjerenja u tunelima .....	36

6.4 Tehničke specifikacije kontrolnih mjerenja u tunelima.....	37
7. PRAKTIČNI DIO RADA .....	39
8. REZULTATI ANALIZE USPOSTAVLJENJE GEODETSKE OSNOVE ZA POSEBNE NAMJENE .....	44
8.1 Programski paket JAG3D .....	44
8.2 Unos podataka u aplikaciju JAG3D.....	44
8.3 Simulacije portalnih mikromreža Bakovac i Lipovo Polje.....	48
8.3.1 Mikro mreža Bakovac (sa prisilom) – simulacija 1 .....	49
8.3.2 Mikro mreža Bakovac (sa prisilom) – simulacija 2 .....	51
8.3.3 Mikro mreža Bakovac (slobodna mreža) – simulacija 3 .....	53
8.3.4 Mikro mreža Bakovac (slobodna mreža) – simulacija 4.....	55
8.3.5 Mikro mreža Lipovo Polje (sa prisilom) – simulacija 5.....	57
8.3.6 Mikro mreža Lipovo Polje (sa prisilom) – simulacija 6.....	59
8.3.7 Mikro mreža Lipovo Polje (slobodna mreža) – simulacija 7 .....	61
8.3.8 Mikro mreža Lipovo Polje (slobodna mreža) – simulacija 8 .....	63
8.4 Izjednačenje portalnih mikro mreža tunela Bakovac - Lika .....	65
8.5 Prikaz i usporedba rezultata simuliranih i izjednačenih mreža.....	73
9. ZAKLJUČAK.....	77
LITERATURA.....	78
POPIS SLIKA .....	80
POPIS TABLICA.....	82
PRILOZI.....	84
ŽIVOTOPIS .....	85

## 1. UVOD

Primjena geodetske struke, odnosno geodetskih metoda mjerenja u projektiranju i gradnji građevina te u praćenju pomaka i deformacija, ključan je i nezamjenjiv dio građevinskih i projektantskih radova bilo kojeg građevinskog objekta. Najzahtjevniji građevinski radovi zahtijevaju najzahtjevnije i najpreciznije geodetske radove.

Izgradnja tunela složen je i inženjerski najzahtjevniji pothvat, koji zahtijeva pažljivo planiranje, projektiranje, izvedbu i analizu geodetske mreže. Kod takvih kapitalnih geodetskih objekata govorimo o uspostavi geodetskih mreža za posebne namjene.

Geodetska mreža koja se koristi u izgradnji tunela, služi kao prostorni okvir, osiguravajući sustavan raspored referentnih točaka na gradilištu. Te su točke određene preciznim, pouzdanim i točnim metodama izmjere, a kako bi se osigurala preciznost i pouzdanost odnosno njihova točnost, uspostavljaju se kao samostalne geodetske mreže za posebne namjene.

Realizacija geodetskih radova, osim o instrumentariju i stručnosti izvođača, ovisi o samoj kvaliteti uspostavljene geodetske osnove. Pouzdana geodetska osnova je temelj za sva mjerenja koja se s nje odvijaju.

U ovom radu posebna pozornost posvetiti će se geodetskoj osnovi za izgradnju hidrotehničkog tunela Bukovac-Lika, objekta koji zahtijeva najveću preciznost i točnost geodetske izmjere. U teoretskom dijelu rada opisane su sve faze uspostave mreže.

Zadatak rada je provesti analizu kvalitete geodetske osnove nakon izjednačenja. Izjednačenje geodetske osnove je provedeno pomoću računalnog programa JAG3D koji pruža inženjerima napredne alate za procjenu i optimizaciju izvedbe geodetske mreže.

Korištenje JAG3D softvera omogućuje praćenje, vizualizaciju podataka i analizu geodetske mreže. Nakon provedenog izjednačenja iskazuje i kvalitetu ostvarene geodetske mreže. Krajnji rezultat su izjednačene koordinate točaka mreže s pripadajućom kvalitetom preciznosti, točnosti te pouzdanosti mreže.

Proučavanjem kompleksnosti geodetske mreže tunela Bakovac-Lika, sinergija između tradicionalnih geodetskih metoda i inovativnih softverskih rješenja postaje očita. Ovaj sveobuhvatni pristup, ne samo da osigurava točnost izgradnje tunela, već također postavlja mjerilo za besprijekornu integraciju geodetskih mreža i naprednih softverskih alata u velike infrastrukturne projekte.

## 2. TUNELI

Podzemne građevine najčešće u obliku cijevi otvorene na oba kraja. Spajaju dva dijela puta razdvojenih preprekom koju nije moguće svladati. Kroz tunele se provodi prometnica (željeznica, cesta), kanal ili vodni tok. Zajedno s mostovima, spadaju u najkompleksnije građevinske objekte.

Neki od najduljih izgrađenih tunela su željeznički tunel Gothard u Švicarskoj ( $d=57090$  m), željeznički tunel Seikan u Japanu ( $d=53850$  m) te tunel ispod kanala La Manche koji povezuje Veliku Britaniju i Francusku ( $d=50450$  m). Najdulji tuneli u Hrvatskoj su Mala Kapela ( $d=5821$  m), Sv. Rok ( $d=5679$  m) te Učka ( $d=5062$  m) te su svi cestovni tuneli.



Slika 2.1. Prikaz brdskog i podvodnog tunela

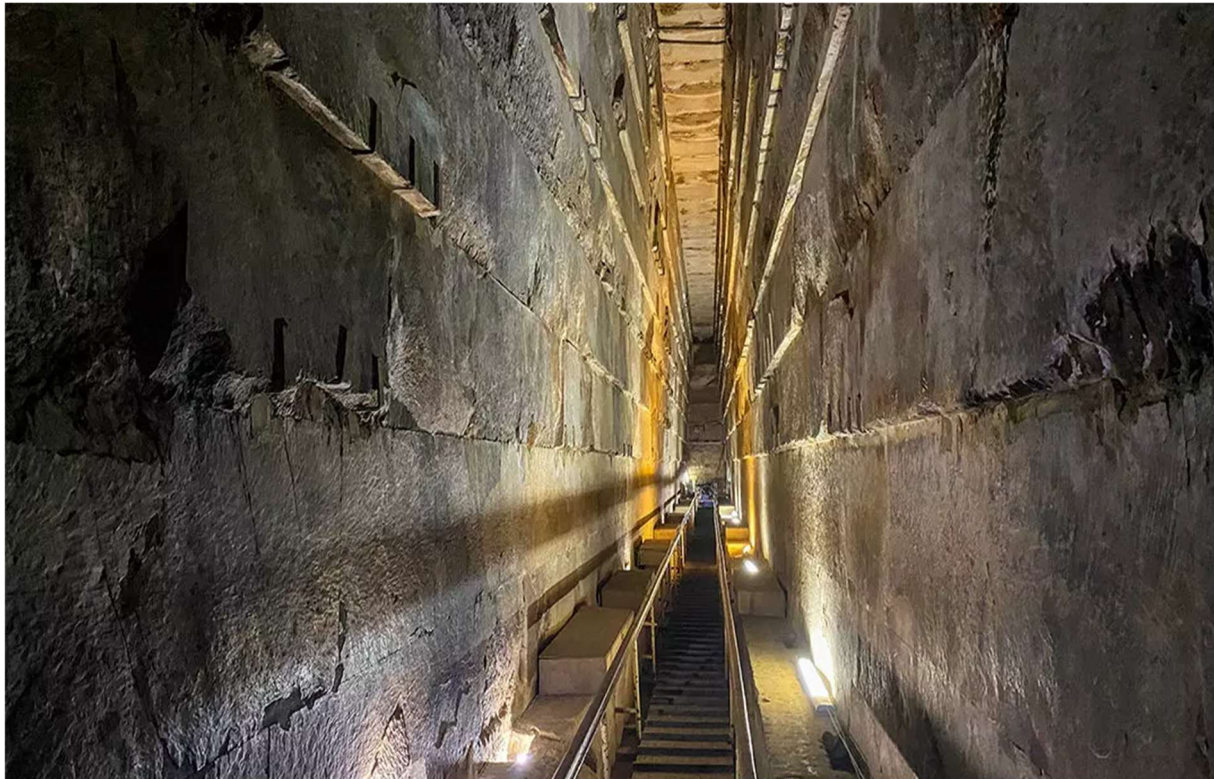
Neke od podjela tunela su:

- Prema namjeni – prometni, hidrotehnički, komunalni, tuneli rudarske industrije.
- Prema položaju – brdski, podvodni, gradski (metro).
- Prema veličini iskopa – tunelski potkopi ( $5-12$  m<sup>2</sup>), mali tunelski profili ( $12-27$  m<sup>2</sup>), srednji tunelski profili ( $27-56$  m<sup>2</sup>), veliki tunelski profili ( $56-75$  m<sup>2</sup>), vrlo veliki tunelski profili preko  $75$  m<sup>2</sup>
- Prema broju vozničkih traka – jednostrani, dvostrani, višestruki.
- Prema dužini tunela – mali tuneli (kraći od  $50$  m), kratki tuneli ( $50-500$  m), srednji tuneli ( $500-2200$  m), dugi tuneli ( $2200-4000$  m), vrlo dugi tuneli duži od  $4000$  m.

### 2.1 Povijest tunelogradnje

U vrijeme drevnih civilizacija, gradnja tunela bila je primitivnija u usporedbi s današnjim standardima, ali su ipak postojali različiti oblici podzemnih prolaza i tunela koji su imali važnu ulogu u tim društvima.

Od drevnih civilizacija najistaknutije su civilizacije drevnog Egipta i Rima. Egipatski tuneli su fascinantni dijelovi drevne arhitekture koji su imali različite svrhe i funkcije. Unutar velikih piramida u Egiptu, poput Velike piramide u Gizi, postojali su razni tuneli i prolazi. Najpoznatiji je vjerojatno Grand Gallery u Velikoj piramidi, koji vodi do grobnice faraona.



Slika 2.2. Grand Gallery tunel u Velikoj piramidi (URL 1)

Ovi tuneli su se koristili kao prolazi za ritualne svrhe tijekom procesa mumificiranja i pokapanja faraona. U Dolini kraljeva, blizu Luksora, nalazi se niz grobnica faraona i plemića. Da bi se pristupilo tim grobnicama, iskopani su tuneli i prolazi koji vode do podzemnih grobnica.

Egipćani su također koristili tunnelske sustave za vodovodne svrhe. Izgrađeni su kanali koji su omogućavali dovoz vode iz Nila do poljoprivrednih područja ili gradova. Ovi kanali su često prolazili kroz tunele ispod tla kako bi zaštitili vodu od isparavanja i onečišćenja. U većim egipatskim gradovima, poput Tebe ili Memfisa, izgrađeni su kanalizacijski sustavi koji su omogućavali odvodnju otpadnih voda iz gradskih naselja. Ovi sustavi uključivali su i podzemne tunele koji su vodili do rijeka ili kanala.

Za razliku od Egipćana, Rimljani su tunnelske sustave usmjerili u ekonomiju. Rimljani su izgradili opsežne sustave akvadukata kako bi opskrbili gradove vodom. Ti akvadukti često su prolazili kroz brda i doline, uključujući i korištenje tunela kroz stijene kako bi se osiguralo nesmetano strujanje vode. Primjer je Aqua Appia, prvi rimski akvadukt izgrađen 312. godine pr. Kr., koji je imao i tunnelske dijelove.



Slika 2.3. Primjer akvadukta „Aqua Claudia“, 38. st. pr. Kr. (URL 2)

Rimljani su bili vješti rudari i koristili su različite tehnike za iskopavanje ruda. U mnogim rimskim provincijama pronađeni su tragovi rudarskih tunela koji su se koristili za eksploataciju zlata, srebra, bakra i drugih metala. Rimski vojni inženjeri često su koristili tunele kao dio svojih fortifikacijskih sustava. To uključuje izgradnju podzemnih tunela ispod zidina gradova ili tvrđava kako bi se omogućilo iznenadne napade ili izvlačenje vojnika iz neprijateljskog teritorija. U rimskim gradovima izgrađeni su složeni kanalizacijski sustavi koji su omogućavali odvodnju otpadnih voda iz naselja. Ovi sustavi uključivali su i podzemne tunele i kanale koji su vodili do rijeka ili otvorenih kanala.

Drevni tuneli bili su impresivan primjer njihove sposobnosti da koriste prirodne resurse i tehnologiju kako bi stvorili kompleksne infrastrukturne sustave koji su podržavali širok spektar društvenih aktivnosti, od opskrbe vodom do rudarstva i obrane.

Tunelogradnja u srednjem vijeku bila je prvenstveno povezana s vojnim inženjeringom i obrambenim potrebama, iako su se tuneli također koristili i u drugim kontekstima.

Tijekom srednjeg vijeka, graditelji su često koristili tunele kao dio svojih fortifikacijskih sustava. Ovi tuneli bili su iskopani ispod zidina gradova ili utvrda i služili su za pristup vanjskim područjima ili za iznenadne napade na neprijatelja. Tuneli su također omogućavali izvlačenje vojnika ili civila iz okruženih gradova tijekom opsada. Osim fortifikacijskih, rudarski tuneli igrali su ključnu ulogu u ekonomiji srednjovjekovnih društava, jer su omogućavali eksploataciju mineralnih resursa poput metala, ugljena i soli. Korišteni su za eksploataciju različitih metala poput zlata, srebra, bakra, željeza i olova. Tuneli su često bili iskopani ručno ili pomoću jednostavnih alata poput čekića, dlijeta i lopata.

Industrijska revolucija donijela je značajan napredak u tehnologiji izgradnje tunela. Razvoj parne energije omogućio je upotrebu parnih strojeva za iskopavanje tunela, što je ubrzalo proces gradnje. Početkom 19. stoljeća, počeli su se graditi prvi veliki željeznički tuneli.

Tunelogradnja u 20. stoljeću doživjela je značajan napredak u metodama gradnje, tehnologiji i opsegu projekata. Tijekom 20. stoljeća izgrađeni su neki od najvećih i najzahtjevnijih tunela u povijesti. Primjerice, gradnja tunela ispod La Manchea (Channel Tunnel, u slengu poznat kao i Chunnel) između Engleske i Francuske predstavljala je tehnološki izazov i rezultirala je najdužim podvodnim tunelom na svijetu. Razvijene su brojne inovativne tehnike gradnje tunela koje su omogućile bržu, sigurniju i učinkovitiju izgradnju. To uključuje upotrebu strojeva za bušenje tunela (engl. Tunnel Boring Machines – TBM), koje su omogućile automatsko bušenje tunela kroz različite vrste tla i stijena.



*Slika 2.4. Proboj prve cijevi Channel Tunnel-a TBM-om (URL 3)*

U 20. stoljeću, tunelogradnja je imala različite namjene, uključujući cestovne, željezničke, vodovodne, kanalizacijske i telekomunikacijske tunele. Tuneli su postali neizostavan dio urbanih infrastrukturnih projekata širom svijeta.

Tunelogradnja u 21. stoljeću nastavila je evoluirati s naglaskom na tehnološke inovacije, održivost i raznolike namjene. U 21. stoljeću, nastavljen je razvoj naprednih tehnika gradnje tunela. Strojevi za bušenje tunela (TBM) postali su još sofisticiraniji, omogućujući bržu, precizniju i ekonomičniju izgradnju tunela kroz različite vrste tla i stijena. Održivost je postala ključni faktor u tunelogradnji 21. stoljeća. Projekti se sve više usredotočuju na smanjenje utjecaja na okoliš, uključujući smanjenje emisija stakleničkih plinova, očuvanje prirodnih resursa i zaštitu okoliša tijekom gradnje i eksploatacije tunela. Tunelogradnja je postala važan element urbanog planiranja u 21. stoljeću, a izgradnja tunela omogućuje povezivanje urbanog prostora, smanjenje gužvi i emisiju štetnih plinova te potiče održivi urbanistički razvoj.

## 2.2 Izgradnja tunela

Tunelogradnja uključuje niz metoda prilagođenih različitim geološkim uvjetima, dubinama tunela, namjeni i specifičnostima lokacije. Svaka metoda ima svoje prednosti, izazove i specifične primjene. Proces tunelogradnje obično počinje detaljnim geološkim ispitivanjima kako bi se razumjeli uvjeti tla i stijena te identificirale potencijalne geološke opasnosti. Provode se temeljita geotehnička istraživanja u svrhu analize tla i stijena kroz koje će tunel prolaziti. To pomaže inženjerima u razumijevanju uvjeta terena i donošenju odluka o optimalnim metodama izgradnje. Na temelju geotehničkih istraživanja inženjeri izrađuju detaljan dizajn tunela, a koje uključuju specifikacije za veličinu, oblik, potrebnu potporu i sigurnosne mjere.

Najčešće korištene metode izgradnje tunela uključuju:

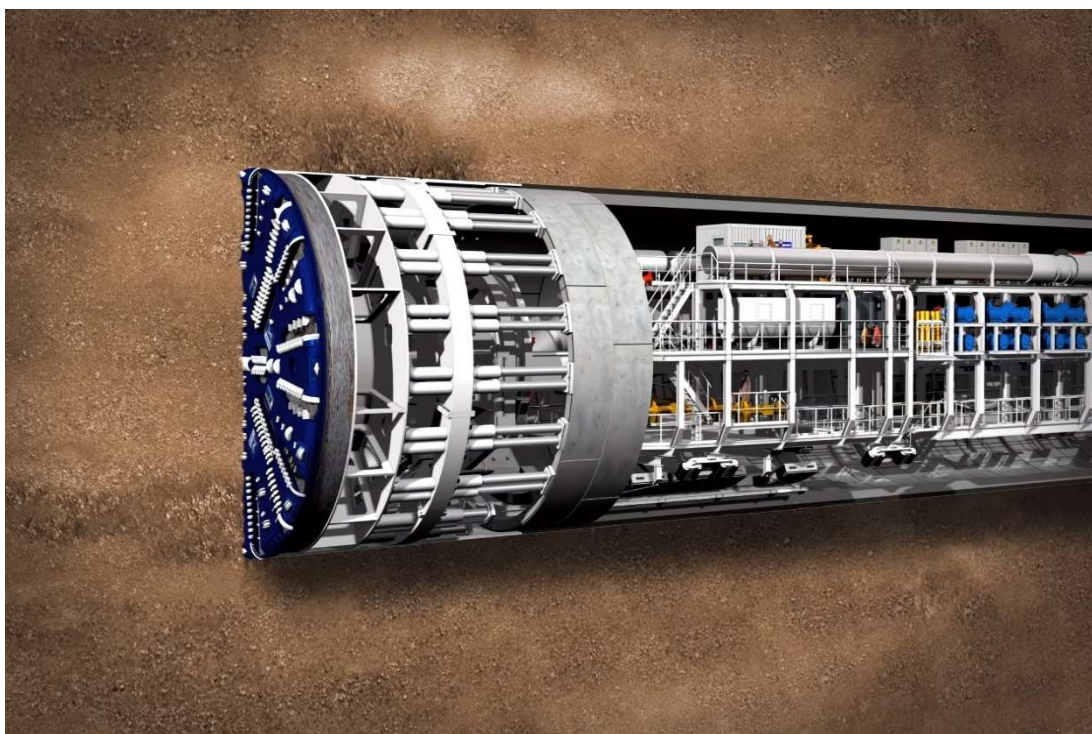
1. Metoda rezanja i prekrivanja
  2. TBM metoda
  3. Bušenje i miniranje
  4. Metoda uronjenih cijevi
  5. Shaft metoda
  6. Box Jacking metoda
- **Ad 1.) Metoda rezanja i prekrivanja** – Metoda rezanja i prekrivanja (cut and cover) često se koristi za izgradnju plitkih tunela. Proces započinje iskopavanjem rova u tlu gdje će se tunel graditi. Nakon što je rov iskopan, izgrađuje se tunelska struktura unutar njega, a zatim se rov ponovno prekriva iskopanim materijalom. Postoje dvije glavne varijante ove metode: „bottom-up“ pristup, gdje se tunel iskopava ispod površine koristeći privremene potpore, i „top-down“ pristup, gdje se prvo izgrade zidovi podrške, postavi krovna ploča, a zatim se izvodi iskopavanje ispod krova. Ova metoda se često koristi za izgradnju podzemnih metro stanica i drugih infrastrukturnih objekata



Slika 2.5. Cut and cover metoda izgradnje tunela, „bottom-up“ pristup (URL 4)



- **Ad 2.) TBM metoda** - Bušenje tunela uz pomoć tunelskih bušača (TBM) je moderna i visoko efikasna metoda. TBM-ovi su veliki strojevi koji buše tunel kroz različite vrste tla i stijena stvarajući tunel dok se kreću naprijed. Oni smanjuju vibracije i buku, što ih čini idealnima za izgradnju dubokih tunela u urbanim sredinama. TBM-ovi dolaze u različitim tipovima prilagođenim specifičnim geološkim uvjetima, uključujući TBM-ove za tvrdi stijenu, mekanu stijenu i mješovite uvjete. Oni su također opremljeni sustavima za postavljanje obloga tunela tijekom bušenja, što povećava sigurnost i stabilnost strukture.



Slika 2.6. TBM metoda izgradnje tunela (URL 5)

- **Ad 3.) Bušenje i miniranje** - Bušenje i miniranje tradicionalna je metoda koja se koristi u uvjetima tvrdih stijena. Proces uključuje bušenje rupa u stijeni, punjenje tih rupa eksplozivima, aktiviranje eksploziva i uklanjanje razbijene stijene. Nakon miniranja, iskopani materijal se uklanja pomoću transportnih sustava poput pokretnih traka ili kamiona. Ova metoda je prikladna za kratke tunele ili tunele kroz vrlo tvrde stijene gdje TBM možda nije praktičan
- **Ad 4.) Metoda uronjenih cijevi** - Metoda uronjenih cijevi koristi se za izgradnju podvodnih tunela, često ispod rijeka ili u blizini obalnih područja. Proces uključuje izgradnju sekcija tunela na kopnu, koje zatim plutaju pomoću brodova tegljača do predviđene lokacije. Ove sekcije se potom uranjaju i spajaju kako bi formirale cjelinu tunela. Ova metoda omogućuje izgradnju dugih podvodnih prolaza uz minimalan utjecaj na površinske aktivnosti. Primjeri uključuju tunele ispod rijeka ili mora u velikim urbanim područjima kao što su Transbay Tube u San Franciscu, Rotterdam Metro u Nizozemskoj, Tamagawa Tunnel u Tokyu i mnogi drugi.
- **Ad 5.) Shaft metoda** - Tuneli na većim dubinama često koriste okna za pristup. Okna su obično kružnog presjeka i idu ravno dolje do razine gdje će tunel biti izgrađen.

Tunelski bušaći (TBM) se često spuštaju na dno okna kako bi započeli iskopavanje. Okna također mogu služiti kao ventilacijski otvori ili izlazi u slučaju nužde. Ova metoda omogućava višestruke ulazne točke u tunel, što može ubrzati proces izgradnje. Shaft metoda je ključna za projekte gdje je potrebna podrška na velikim dubinama



Slika 2.7. Spuštanje TBM-a u okno tunela (URL 6)

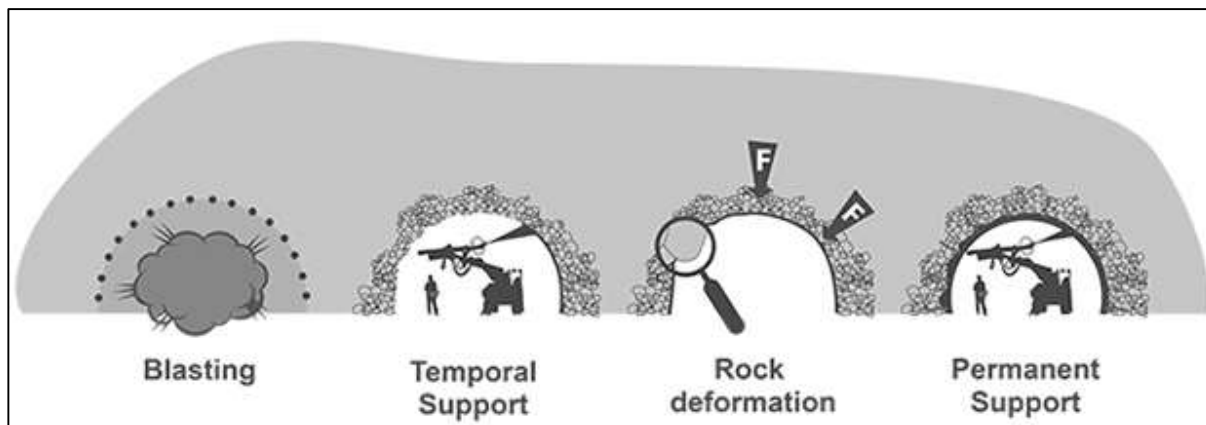
- **Ad 6.) Box Jacking metoda** - Metoda guranja kutija (*Box Jacking*) koristi se za izgradnju velikih tunela, omogućujući gradnju širokih podzemnih prolaza uz minimalne poremećaje na površini. Ova metoda uključuje guranje prethodno izgrađenih kutijastih sekcija kroz tlo pomoću hidrauličnih dizalica. Proces započinje izgradnjom betonskih ili čeličnih kutijastih sekcija na površini, koje su opremljene reznim glavama za iskopavanje tla ispred kutije. Kako se kutija gura naprijed, tlo se uklanja iz unutrašnjosti pomoću bagera ili drugih iskopskih alata. Ova metoda je posebno korisna za izgradnju tunela ispod postojećih struktura poput cesta, željeznica ili zgrada, jer minimizira poremećaje i omogućuje nastavak normalnih aktivnosti na površini.

„Ovisno o načinu građenja tunela, razvijeno je nekoliko metoda nazvanih prema zemljama u kojima su prvi puta našle svoju primjenu, tako se razlikuje: belgijska, austrijska, engleska, njemačka, talijanska metoda itd. (Paar, 2006).“

Nova austrijska metoda tunelogradnje, skraćeno NATM, međunarodni je standard sa širokim rasponom primjene u tunelogradnji.

### 2.3 Nova austrijska metoda tunelogradnje – NATM

New Austrian Tunneling Method (NATM) je moderna tehnika za izgradnju tunela, posebno učinkovita u složenim geološkim uvjetima. Razvijena 1960-ih godina od strane austrijskih inženjera Ladislausa von Rabcewicza, Leopolda Müllera i Franza Pachera, NATM je nastao kao odgovor na izazove bušenja u slabim stjenovitim formacijama gdje su tradicionalne metode bile nedovoljne. Ključna inovacija NATM-a leži u korištenju prirodnih geoloških uvjeta za stabilizaciju tunela, umjesto da se oslanja isključivo na umjetne potpore.



Slika 2.8. Schema NATM metode tunelogradnje (URL 7)

Proces započinje sveobuhvatnim geološkim istraživanjem kako bi se mapirale geološke formacije, identificirale različite vrste stijena, rasjedi i procijenili uvjeti podzemnih voda. In-situ testovi provode se kako bi se razumjela mehanička svojstva stijena, poput njihove čvrstoće, karakteristika deformacije i propusnosti. Analiza podzemnih voda također je ključna jer uvjeti podzemnih voda mogu značajno utjecati na stabilnost tunela.

Iskopavanje se provodi pažljivo i kontrolirano, obično korištenjem kontroliranog miniranja ili tunelskih strojeva poput TBM-ova, ovisno o vrsti stijene. Tunel se iskopava u malim sekcijama ili rundama, obično u rasponu od jednog do dva metra, kako bi se smanjila izloženost nepoduprtoj stijeni. Odmah nakon svake runde iskopa, postavlja se primarna potpora. Ova potpora često uključuje sloj špricanog betona za osiguranje trenutačne stabilnosti, duge čelične vijke za vezivanje stjenovite mase i čelične rešetke ili rešetkaste nosače za održavanje oblika tunela.

Kontinuirano praćenje je temelj NATM-a. Praćenje deformacija, stresa i naprežanja u tunelu i okolnoj stijeni temelj su NATM metode. Podaci iz instrumenata analiziraju se u stvarnom vremenu kako bi se procijenila stabilnost tunela, što omogućuje pravovremene prilagodbe potpornog sustava temeljem praćenih uvjeta.

Nakon stabilizacije tunela primarnom potporom, postavlja se konačna obloga. Ona često uključuje deblji sloj špricanog betona ili lijevanog betona, ponekad s dodatnim ojačanjem poput čelične armature za povećanje čvrstoće. Tunel se zatim dovršava raznim završnim radovima, uključujući instalaciju sustava odvodnje, osiguranje odgovarajuće ventilacije, posebno za tunele namijenjene za vozila ili željeznicu, te instalaciju potrebne infrastrukture poput rasvjete, signalizacijskih sustava i sigurnosnih značajki.



*Slika 2.9. Postavljanje završne obloge tunela špricanim betonom (URL 7)*

NATM metoda je posebno pogodna za složene geološke uvjete, poput slabih stjenovitih formacija, rasjednih zona i područja s visokim tlakom podzemnih voda. Također je učinkovita u urbanim sredinama gdje je ključno minimalizirati poremećaje na površini i slijeganje te za tunele velikog poprečnog presjeka gdje tradicionalne metode bušenja mogu biti nepraktične ili preskupe.

U usporedbi s drugim metodama bušenja tunela, NATM metoda nudi različite prednosti. Više je prilagodljiva promjenjivim geološkim uvjetima nego TBM metoda, koja je vrlo učinkovita u konzistentnim geološkim sredinama. Dok TBM može biti ekonomičniji i brži u pogodnim uvjetima, NATM se pokazuje ekonomičnijom u složenim uvjetima. Prednosti NATM-a su jasne: isplativa je korištenjem prirodne čvrstoće okolne stijene, prilagodljiva promjenjivim geološkim uvjetima te povećava sigurnost kontinuiranim praćenjem i ranom detekcijom potencijalnih problema. Međutim, složenost metode zahtijeva sofisticiranu opremu za praćenje i stručnost u geodetskom inženjerstvu, a postupak iskopavanja u fazama i kontinuirane prilagodbe mogu usporiti proces.

NATM metoda je uspješno korištena u brojnim projektima bušenja tunela širom svijeta. Na primjer, Gotthard Base Tunnel u Švicarskoj, jedan od najdužih i najdubljih željezničkih tunela na svijetu, koristio je NATM metodu u nekoliko sekcija zbog složene geološke strukture švicarskih Alpa. Slično tome, proširenje Jubilee Line, podzemne željeznice u Londonu, koristilo je NATM metodu u nekoliko urbanih sekcija, gdje je sposobnost metode da minimalizira slijeganje površine bila ključna u gusto izgrađenom okruženju središnjeg Londona.

NATM metoda je svestran i učinkovit pristup izgradnji tunela, posebno u izazovnim geološkim uvjetima. Interakcija između tunela i okolne stijene, u kombinaciji s kontinuiranim praćenjem i fleksibilnim potpornim sustavima, čini ju preferiranim izborom za mnoge složene projekte bušenja tunela širom svijeta.

### 3. GEODETSKE MREŽE ZA POSEBNE NAMJENE

„Sa geometrijskog aspekta, geodetska mreža se definira kao konfiguracija (razmještaj) tri ili više točaka na zemlji, koje su povezane ili terestričkim geodetskim mjerenjima (npr. horizontalni pravci, kutovi, azimuti, duljine, visinske razlike) ili astronomskim ili satelitskim mjerenjima (npr. GPS) ili njihovom kombinacijom (Novaković, 2004).“

Geodetske mreže za posebne namjene projektirane su kako bi zadovoljile specifične kriterije koji se razlikuju od konvencionalnih geodetskih osnova. Za razliku od ostalih geodetskih osnova, koje su često pod utjecajem nehomogenosti državnog koordinatnog sustava, geodetske mreže za posebne namjene su pažljivo dizajnirane, izmjerene i obrađene kako bi se osiguralo da takve nehomogenosti ne utječu na njihove koordinate. Ova razlika je ključna u primjenama gdje su preciznost, pouzdanost i osjetljivost od najveće važnosti.

Geodetske mreže za posebne namjene predstavljaju ključne infrastrukturne komponente koje omogućuju precizna mjerenja i analize u različitim specijaliziranim područjima. Njihova važnost je neosporna u disciplinama kao što su građevinarstvo, telekomunikacije, energetika, rudarstvo, zaštita okoliša, pa čak i u poljoprivredi i urbanom planiranju. Ove mreže se postavljaju s ciljem da zadovolje specifične tehničke i znanstvene potrebe koje zahtijevaju visok stupanj preciznosti i pouzdanosti. One omogućuju iskolčenje objekata na terenu, praćenje pomaka i deformacija velikih građevinskih objekata poput mostova, tunela, brana i visokih zgrada za vrijeme i nakon izgradnje.

„Dobar projekt treba osigurati da geodetska osnova bude precizna, pouzdana i osjetljiva, a uz to i ekonomično realizirana. Koji će od ovih ciljeva prevagnuti, ovisi o namjeni za koju se mreža osniva (Paar i dr., 2005).“

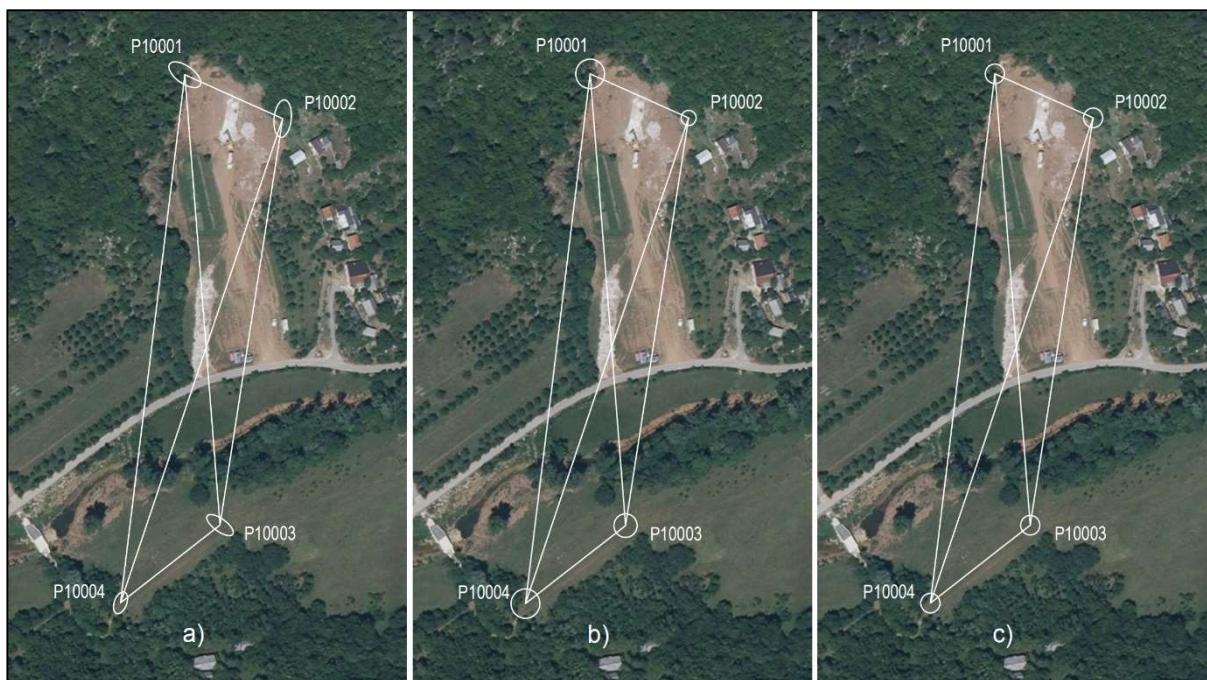
- Preciznost u ovom kontekstu znači postizanje najveće moguće točnosti u koordinatama mreže. Međusobna odstupanja pojedinih mjerenja moraju biti minimalna. Preciznost mreže postiže se korištenjem visoko preciznih instrumenata, odabirom odgovarajuće metode mjerenja, dobro projektiranim rasporedom i distribucijom točaka unutar mreže i sl.
- Pouzdanost je još jedan bitan aspekt geodetskih mreža za posebne namjene. Pouzdanost se odnosi na sposobnost mreže da dosljedno pruža točne rezultate kroz vrijeme. To zahtijeva da mreža bude robusna protiv okolišnih i operativnih promjena koje bi mogle utjecati na mjerenja. Nezavisne kontrole, odn. prekobrojna mjerenja i korištenje izdržljivih, stabilnih geodetskih točaka mogu povećati pouzdanost, osiguravajući da mreža ostane funkcionalna i točna u različitim uvjetima.
- Osjetljivost mreže za posebne namjene definirana je njezinom sposobnošću prepoznavanja i mjerenja tih promjena unutar područja koje mreža pokriva. Može se kvantificirati kao "minimalni detektabilni pomak", kojim se označava osjetljivost mreže u željenom smjeru. Zbog uske povezanosti s kriterijem preciznosti, kriterij osjetljivosti geodetske mreže može se također grafički prikazati usporedbom elipse pogrešaka s vektorom pomaka određene točke.
- Osim ovih tehničkih zahtjeva, ekonomska izvedivost je ključni čimbenik u projektu geodetske mreže za posebne namjene. Projekt mreže mora balansirati potrebu za preciznošću, pouzdanošću i osjetljivošću. To uključuje donošenje ekonomičnih odluka u pogledu odabira instrumentarija, metode rada i operativnih postupaka bez kompromitiranja kvalitete mreže. Ekonomski izvediv projekt osigurava da se

geodetska mreža može implementirati i održavati unutar financijskih ograničenja, čineći je održivom na duži rok.

Osnovne karakteristike geodetskih mreža posebnih namjena su:

- Lokalne mreže (samostalne) – za objekte smještene na manjem području ili gdje se traži velika točnost iskolčenja i praćenja pomaka.
- Priključene na osnovnu mrežu (položajno i visinski) – za objekte smještene na većem području gdje je potrebno međusobno povezivanje niza objekata radi pravilnog geografskog smještaja (hidroenergetski sustavi, regulacije vodotoka, infrastrukturni sustavi).
- Mreže prilagođene veličini izgrađenog objekta ili dijelu Zemljine površine koji se prati.
- Mreže prilagođene po obliku – ovisi o karakteru i razvedenosti objekta, mogućnosti stabilizacije točaka, vrsti predviđenih mjerenja i standardima projektiranja.
- Sve točke mreže su istog reda (homogene).
- Mreža se izjednačava kao cjelina.

Cilj geodetske mreže za posebne namjene bi trebao biti postizanje jednolike položajne "jakosti" u svim smjerovima za sve točke geodetske osnove. Da bi se to postiglo, geodetska osnova mora biti homogena i izotropna. Ako su elipse pogrešaka za sve točke međusobno jednake tada je geodetska osnova homogena. Izotropna geodetska osnova je ako su sve te elipse pogrešaka prelaze u kružnice. Dakle, geodetska osnova je homogena i izotropna kada su elipse pogrešaka svih točaka zapravo kružnice jednakih radijusa (slika 3.1.).



Slika 3.1. Homogena (a), izotropna (b) te homogena i izotropna (c) geodetska osnova

U praksi to znači da bi pogreške mjerenja trebale biti ravnomjerno raspoređene, bez obzira na smjer, i jednake za sve točke u mreži. To osigurava maksimalnu preciznost i pouzdanost geodetske osnove, što je ključno za točna i dosljedna geodetska mjerenja i analize. Takva mreža

omogućava precizno određivanje položaja svih točaka unutar nje, što je od suštinskog značaja za razne primjene u geodeziji, kartografiji, inženjerskim radovima i srodnim područjima.

### 3.1 Uspostava geodetske mreže za posebne namjene

Prilikom uspostave geodetskih mreža za posebne namjene, moraju biti zadovoljeni svi kriteriji kvalitete, kao i kod ostalih geodetskih mreža kod kojih je zahtijevana visoka točnost. Cilj mreže uključuje stvaranje strukturiranog rasporeda referentnih točaka koje su precizno i pouzdano izmjerene kako bi pružile pouzdan okvir za različite primjene. Budući je cilj postići homogenost i izotropnost mreže, projekt geodetske mreže za posebne namjene je puno kompleksniji od ostalih geodetskih mreža. Zbog toga uspostavu geodetske mreže za posebne namjene izvodi u tri faze:

- projekt mreže,
- izvedba mreže,
- analiza mreže.

### 3.2 Projekt mreže

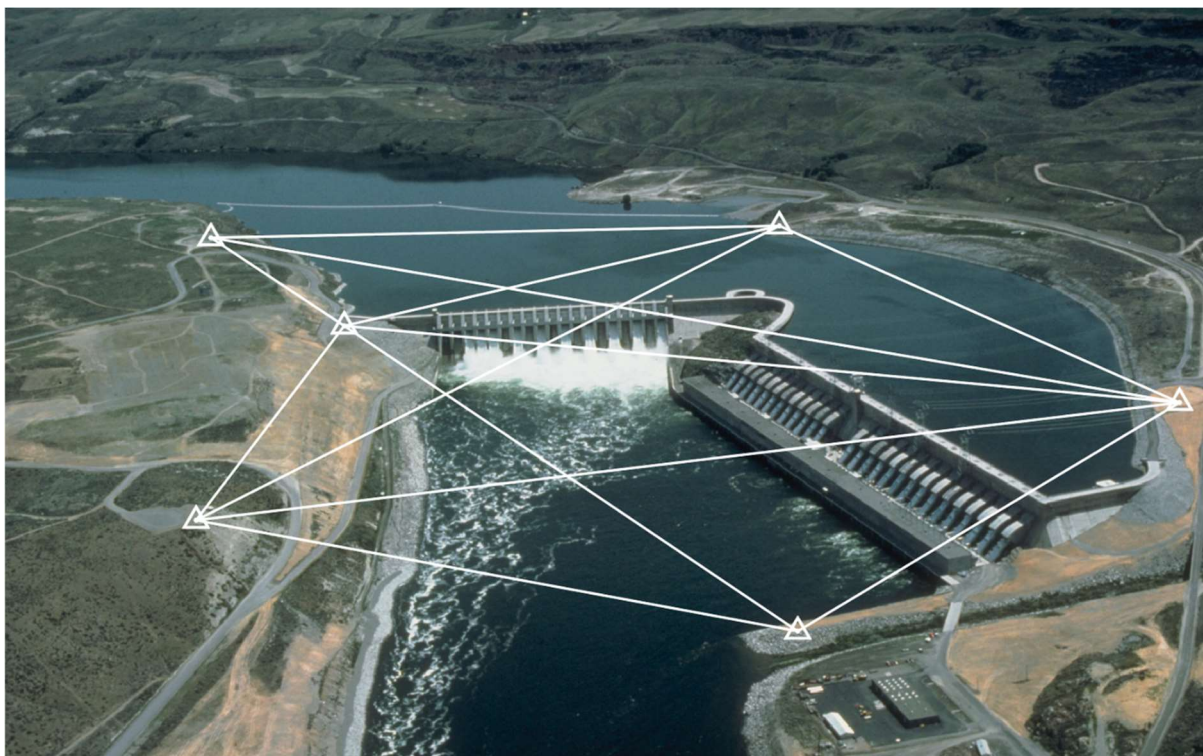
Projekt geodetske mreže za posebne namjene ovisi o vrsti i osobinama građevinskog objekta i terenu na kojem se objekt izvodi. „Projektom je potrebno odrediti položaj točaka, odnosno odrediti konfiguraciju geodetske osnove, te donijeti odluku kakvu vrstu mjerenja koristiti kako bi se postigla zahtijevana točnost (Paar i dr., 2005).“

Projektiranje geodetskih mreža za posebne namjene predstavlja ključnu fazu u uspostavi ovih mreža jer se njome određuju sve osnovne postavke koje će omogućiti kasniju točnost, geodetskih radova. Projektiranje se odvija u nekoliko koraka, svaki sa specifičnim zahtjevima i ciljevima.

Prvi korak u projektiranju mreže je definiranje položaja geodetskih točaka koje će činiti mrežu. Ovaj korak uključuje analizu terena, pomoću HOK-a, DOF-a i sličnih izvora podataka, kako bi se odredile optimalne lokacije za postavljanje geodetskih točaka. Točke moraju biti smještene na način koji omogućuje jasnu vidljivost između njih, čime se osigurava mogućnost preciznih mjerenja. Pri tom se vodi računa o konfiguraciji terena, vegetaciji, mogućnostima pristupa te stabilnosti tla. Idealno, točke se postavljaju na čvrstom tlu ili stijeni kako bi se osigurala dugotrajna stabilnost.

Jedan od ključnih aspekata u ovoj fazi je izbor vrste mjerenja koja će se koristiti. To može uključivati terestričke metode poput triangulacije, trilateracije i nivelmana, kao i GNSS metodu mjerenja. Kombinacija ovih metoda često se koristi kako bi se postigla visoka točnost i pouzdanost podataka. GNSS metode omogućuju precizno određivanje položaja točaka s manjom ovisnošću o obliku i geometriji mreže, dok terestričke metode jačaju položajnu "jakost" točaka u svim smjerovima.

Ekonomski aspekt projektiranja također je vrlo važan. Projekt mora biti izveden na način koji će omogućiti postizanje zahtijevane točnosti uz minimalne troškove. To uključuje optimizaciju broja točaka, vrstu i količinu korištenih materijala za stabilizaciju, kao i vrijeme potrebno za obavljanje mjerenja. Projektiranje mora uzeti u obzir i buduće potrebe za održavanjem mreže kako bi se osigurala dugoročna pouzdanost bez značajnih dodatnih troškova.



Slika 3.2. Protočna hidroelektrana Chief Joseph dam

U konačnici, projektiranje geodetske mreže za posebne namjene završava izradom detaljnog projekta koji uključuje sve tehničke specifikacije, planove mjerenja, metode obrade podataka i procjenu troškova. Samim projektom mreže teži se pronalasku najoptimalnijeg i najekonomičnijeg rješenja koje će zadovoljiti unaprijed postavljene kriterije. Ovaj projekt služi kao osnovni dokument za izvedbu mreže na terenu i osigurava da svi daljnji radovi budu izvedeni prema precizno definiranim kriterijima.

### 3.3 Izvedba geodetske mreže

Izvedba geodetske mreže je ključna faza u procesu uspostave geodetskih osnova, koja obuhvaća praktične aktivnosti na terenu kako bi se realizirala mreža definirana tijekom projektiranja. Ova faza uključuje rekognosciranje terena, stabilizaciju točaka, signalizaciju točaka i samu izmjeru, pri čemu svaki korak zahtijeva pažljivu pripremu i precizno izvođenje kako bi se osigurala potrebna točnost i pouzdanost geodetske mreže.

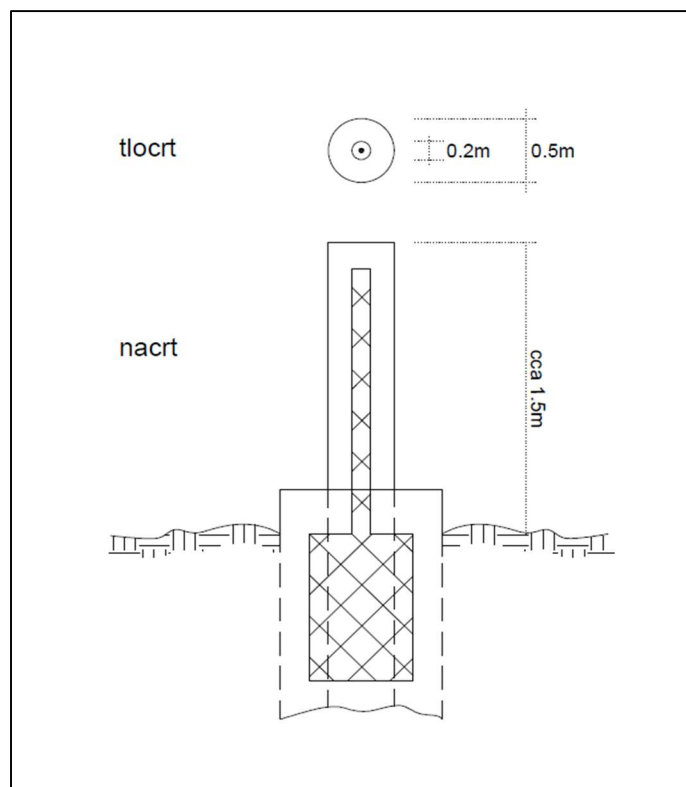
Prvi korak kod izvedbe mreže je rekognosciranje terena. Ovaj postupak uključuje terensku provjeru i pregled područja na kojem će se mreža uspostaviti. Cilj rekognosciranja je odabrati najpogodnije lokacije za postavljanje točaka mreže, uzimajući u obzir karakteristike terena, vidljivost između točaka, stabilnost tla i mogućnost pristupa. Rekognosciranje također omogućava identifikaciju potencijalnih problema koji bi mogli utjecati na stabilizaciju i signalizaciju točaka, poput vegetacije, građevinskih prepreka ili geoloških uvjeta.

Nakon rekognosciranja, slijedi stabilizacija točaka. Stabilizacija podrazumijeva fizičko postavljanje točaka na terenu, što obuhvaća izgradnju temelja za svaku točku kako bi se osigurala njihova dugoročna stabilnost (Slika 3.3.). U slučaju specifičnih geodetskih mreža za



velike infrastrukturne projekte, kao što su mostovi ili tuneli, točke se stabiliziraju na način da se izbjegne njihovo pomicanje tijekom građevinskih radova.

Radi visokih zahtjeva pouzdanosti i preciznosti same mreže potrebno je stabilizirati točke na način da su što manje podložne pomacima tijekom građenja i vanjskim utjecajima (vremenski utjecaji, vibracije i sl.). Pouzdana stabilizacija točaka geodetske mreže omogućava neometano napredovanje gradnje i sigurnost građevine, a ujedno je temelj za sva mjerenja koja se s njih odvijaju.



Slika 3.3. Skica stabilizacije točke

Obzirom na daljnje radove koji će se izvoditi sa geodetske mreže treba se odlučiti na način stabilizacije geodetskih točaka. U ovisnosti o trajanju građenja određuje se materijal, oblik i veličina stabilizacijske oznake. Većina stabiliziranih točaka je u obliku armirano-betonskih stupova visine oko 1,5 m. Najčešće su okruglog oblika i poprečnog presjeka promjera od 20 cm do 60 cm s učvršćenim vijcima za prisilno centriranje, što osigurava preciznost pri ponovljenim mjerenjima. Ponekad su stupovi okruženi zaštitnim vanjskim slojem. U tom slučaju prostor između stupa i zaštitnog sloja treba ispuniti toplinskom izolacijom kako bi se smanjio utjecaj promjena temperature koje prirodno nastaju sunčevim zračenjem. Korištenjem preciznog geodetskog instrumenta i pribora te uvažavanjem svih utjecaja, moguće je u takvoj mreži odrediti pomak kontrolnih točaka na objektu sa sub mm preciznošću.

Nakon završetka stabilizacije geodetske mreže pristupa se izmjeri iste. Metoda izmjere je definirana projektom i često predstavlja kombinaciju GNSS i terestričkih mjerenja.

Terestričke metode se koriste kako bi se postigla veća pouzdanost rezultata. Pri projektiranju mreže važno je shvatiti odnos mjerenih veličina i rezultirajuće položajne nesigurnosti određene točke. „Odnos je slijedeći: mjerenje duljina "jača" položaj točke u smjeru paralelnom sa

mjerenom duljinom, a mjerenje pravaca, kutova i azimuta, "jača" položaj točke u smjeru okomitom na vizurnu liniju (Paar i dr., 2005).“

Pri izmjeri horizontalne geodetske osnove, s obzirom na mjerene veličine, razlikujemo triangulacijske (mjereni su pravci) i trilateracijske (mjerene su dužine) mreže. Kako bi dobili visoko kvalitetne rezultate mjerenja potrebno je imati visoko kvalitetne mjerne stanice i potrebno je izvršiti jako dobro centriranje instrumenta i prizme. Radi što veće redukcije pogreške centriranja koristi se pribor za prisilno centriranje. Mjerenje horizontalnih i vertikalnih pravaca (kuteva) izvodi se u više ponavljanja u oba položaja durbina dok se mjerenje duljina provodi u nekoliko mjernih nizova sa određenim brojem ponavljanja u svakom nizu.

S obzirom na zahtijevanu točnost geodetskih radova, prilikom uspostave geodetskih mreža za posebne namjene koristi se i geometrijski ili trigonometrijski nivelman. Važno je napomenuti da se trigonometrijski nivelman koristi kada ne postoji mogućnost korištenja geometrijskog nivelmana, npr. prijenos visine preko rijeke, strmi teren i sl. Metoda trigonometrijskog nivelmana je manje precizna od geometrijskog nivelmana.

Također, pri izmjeri mreže koristi se i GNSS metoda izmjere. Iako za GNSS izmjeru nije potrebno da se točke geodetske mreže dogledaju, u slučaju za geodetske mreže za posebne namjene to nije slučaj. Najveća prednost GNSS metode kod geodetskih mreža za posebne namjene (Slika 3.4.) je da se može postići visoka točnost određivanja točaka uz relativno mali napor.



*Slika 3.4. GNSS opažanje referente točke geodetske mreže za posebne namjene*

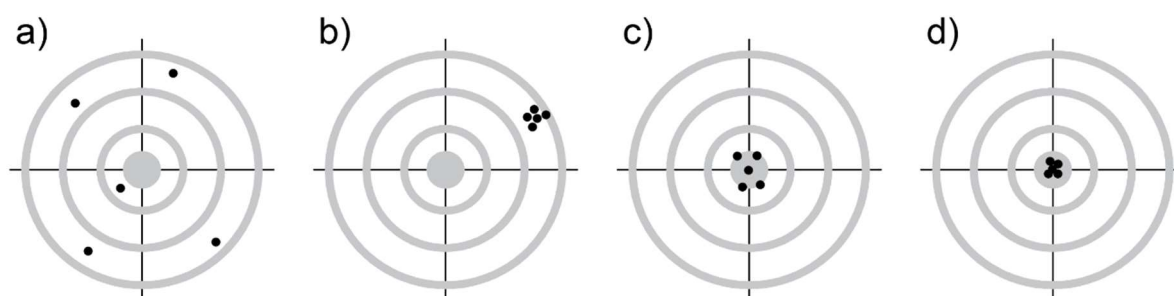
## 4. ANALIZA GEODETSKE MREŽE

U svrhu dobivanja precizne i pouzdane geodetske osnove, potrebno je odraditi kvalitetnu uspostavu mreže kako bi ona mogla poslužiti svim daljnjim inženjerskim radovima. Također, potrebno je poznavati i metode analize mreže. „Analiza geodetske mreže sastoji se od (Paar, 2006):

- analize točnosti mjerenih veličina – *a priori*,
- uvođenja korekcija i redukcija mjerenih veličina,
- otkrivanja i uklanjanja grubih i sustavnih pogrešaka velikog iznosa, testiranje zadovoljenja uvjeta – npr. zatvaranje figura, zatvaranje horizonta i sl.,
- izjednačenje geodetske mreže metodom najmanjih kvadrata,
- analiza kvalitete dobivenih rezultata – analiza točnosti *a posteriori*,
- otkrivanje i uklanjanje grubih pogrešaka malih iznosa.“

### 4.1 Analiza točnosti mjerenja – *a priori*

Tijekom mjerenja dolazi do prisutnosti neizbježnih pogrešaka, pa se prema tome mogu uočiti razlike u mjerenim vrijednostima iste veličine. Ukoliko su razlike u ponovljenim mjerenjima male, tada se smatra da su mjerenja precizna. Međutim, to ne mora značiti da su ona i točna, tj. da predstavljaju najvjerojatniju vrijednost mjerene veličine. „*Preciznost* predstavlja stupanj međusobne bliskosti ponovljenih mjerenja iste veličine, dok *točnost* predstavlja stupanj podudaranja nekog mjerenja prema istinitoj vrijednosti mjerene veličine (Novaković, 2004).“



Slika 4.1. (a) netočno i neprecizno, (b) precizno a netočno, (c) točno a neprecizno, (d) točno i precizno

„Ukoliko su mjerenja i precizna i pouzdana, može se reći da su točna (Pelzer, 1979).“ Za procjenu očekivane točnosti mjerenih veličina potrebno je koristiti podatke proizvođača o preciznosti instrumenta. Procjena točnosti *a priori* sastoji se od slijedećih koraka:

- određivanje vrste mjerenja – što se mjeri (pravci, dužine, visinske razlike ili dr.),
- ustanoviti sve izvore pogrešaka,
- analiza utjecaja svake pogreške na ukupnu točnost mjerene veličine,
- izračunati ukupni učinak svih nesigurnosti pomoću zakona o prirastu varijanci.

Općenito, pogreške se prema izvoru dijele na unutarnje i vanjske. Unutarnje pogreške se odnose na instrumentarij i pogrešku opažača, a vanjske pogreške se odnose na nepredviđene utjecaje okoliša u kojem se izvode mjerenja.

Nesigurnosti mjerenja, odnosno pogreške mjerenja dijele se na slučajne (nepoznati uzroci), grube (nepažnja u radu, nedovoljno iskustvo opažača i sl.) i sustavne čiji se utjecaj može otkloniti dobrom kalibracijom instrumenta, dobrim odabirom instrumentarija, metodama rada.

„*A priori* točnost predviđenih mjerenja uzima u obzir i unutarnje i vanjske pogreške i računa se kao zbroj njihovih kvadrata (Novaković, 2004).“

Pojedini izvori pogrešaka koji se mogu pojaviti pri mjerenju određenih veličina klasičnom metodom su:

- pogreška pri mjerenju horizontalnih kutova,
- pogreške pri mjerenju zenitnih udaljenosti,
- pogreške pri elektrooptičkom mjerenju duljina,
- pogreške mjerenja u geometrijskom nivelmanu,
- pogreške mjerenja u trigonometrijskom nivelmanu.

#### 4.1.1 Pogreška pri mjerenju horizontalnih kuteva

Pogreške pri mjerenju horizontalnih kutova mogu se podijeliti na nekoliko tipova, a njihove ukupne varijance mogu se izračunati koristeći matematički izraz koji uključuje sve bitne izvore pogrešaka. Ključne komponente ovih pogrešaka su

- Pogreške instrumenta i ispitivanja instrument - pogreške koje nastaju zbog nedostatka kalibracije ili zbog unutarnjih nesavršenosti instrumenta.
- Pogreške pri mjerenju - ove pogreške uključuju loše centriranje instrumenta i signala te slučajne i sustavne pogreške viziranja.
- Vanjski uvjeti - Refrakcija, titranje zraka i drugi atmosferski uvjeti koji mogu utjecati na točnost mjerenja.
- Osobne pogreške opažača - fiziološke osobine oka, kao što su preciznost viziranja i očitavanja.

Varijanca srednje vrijednosti horizontalnog kuta  $\sigma_{\beta}^2$ , izračunatog pomoću horizontalnih pravaca izmjerenih u  $n$  ponavljanja, računa se po izrazu:

$$\sigma_{\beta}^2 = \frac{\sigma_v^2 + \sigma_{o\check{c}.}^2}{n} + 2\sigma_{hor.}^2 \cdot ctg^2 z + (\rho'')^2 \frac{4\sigma_c^2}{s^2} \left(1 - \frac{\cos\beta}{2}\right) + 2\left(\frac{s}{2R}\right)^2 \sigma_{kh}^2 \quad (1)$$

gdje je:

- $\sigma_v$  - nesigurnost viziranja,
- $\sigma_{o\check{c}.}$  - nesigurnost očitavanja,
- $\sigma_c$  - nesigurnost centriranja instrumenta i vizurne marke,
- $\sigma_{hor}$  - nesigurnost horizontiranja instrumenta,
- $\sigma_{kh}$  - standardno odstupanje određivanja koeficijenta bočne refrakcije,
- $s$  - duljina vizurne linije
- $z$  - zenitna udaljenost vizurne linije
- $k_h$  - koeficijent bočne refrakcije i
- $R$  - srednji radijus zemlje.

### 4.1.2 Pogreška pri mjerenju zenitnih udaljenosti

Zenitna udaljenost se koristi u mjerenju visina i kutova prilikom određivanja položaja objekata. Određena je kao razlika dvaju direktnih mjerenja između smjera vertikalne osi teodolita i smjera optičke osi durbina usmjerenog prema cilju.

Varijanca srednje vrijednosti zenitne udaljenosti  $\sigma_z^2$  se računa po izrazu:

$$\sigma_z^2 = \frac{\sigma_v^2 + \sigma_{o\check{c}.}^2 + \sigma_i^2}{2n} + \left(\frac{s}{2R}\right)^2 \sigma_{kv}^2 \quad (2)$$

gdje je:

- $\sigma_v$  - nesigurnost viziranja
- $\sigma_{o\check{c}.}$  - nesigurnost očitavanja
- $\sigma_i$  - pogreška indeksa vertikalnog kruga ili kompenzatora
- $\sigma_{kv}$  - nesigurnost određivanja koeficijenta vertikalne refrakcije
- $R$  - srednji radijus zakrivljenosti zemlje
- $s$  - duljina vizure.

### 4.1.3 Pogreške pri elektrooptičkom mjerenju duljina

Elektrooptička mjerenja duljina koriste elektromagnetske valove za precizno određivanje udaljenosti. Međutim, ovakva mjerenja su podložna različitim vrstama pogrešaka koje se mogu klasificirati kao unutarnje i vanjske pogreške. Unutarnje pogreške kod elektrooptičkih daljinomjera su:

- adicijska korekcija (pogreška nule) – nastaje zbog nepreciznosti u početnom postavljanju nule instrumenta
- periodička pogreška – nastaje zbog nesavršenosti u mjernom sustavu, gdje se fazna razlika ne detektira pravilno
- pogreška faznog inhomogeniteta – nastaje zbog varijacije u brzini širenja elektromagnetskih valova kroz različite medije

Vanjske pogreške kod elektrooptičkih daljinomjera uglavnom su uzrokovane atmosferskom refrakcijom, odnosno promjenama u atmosferi koje utječu na brzinu i putanju elektromagnetskih valova.

Varijanca mjerene duljine  $\sigma_s^2$  računa se po izrazu:

$$\sigma_s^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \sigma_{\Delta\Phi}^2 + \sigma_z^2 + \sigma_c^2 + \frac{\sigma_n^2}{n^2} s^2 \quad (3)$$

gdje je:

- $\sigma_{\Delta\Phi}$  – standardno odstupanje određivanja faznog inhomogeniteta  $\Delta\Phi$
- $\sigma_z$  – standardno odstupanje određivanja pogreške  $z_0$
- $\sigma_c$  – standardno odstupanje periodičke pogreške
- $\sigma_n$  – standardno odstupanje određivanja indeksa refrakcije  $n$ .

Ukupna varijanca mjerene duljine može se također izraziti pomoću konstantnog i varijabilnog dijela:

$$\sigma_s^2 = a^2 + b^2 s^2 \quad (4)$$

gdje je:

- $a$  – konstanta koja predstavlja utjecaj pogreške nule, periodičke pogreške i fazne pogreške
- $b$  – faktor koji ovisi o duljini  $s$  i uključuje nesigurnost određivanja indeksa atmosfere refrakcije i kalibracije frekvencije.

Ukupno standardno odstupanje mjerene duljine je:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_m^2 + a^2 + (s \cdot b \text{ ppm})^2} \quad (5)$$

gdje je:

- $\sigma_i$  - standardno odstupanje centriranja instrumenta
- $\sigma_m$  - standardno odstupanje centriranja vizurne marke
- $a$  - koeficijent kojim je prikazan utjecaj pogreške nule, periodičke i fazne pogreške
- $b$  - koeficijent koji predstavlja nesigurnost određivanja indeksa atmosfere refrakcije i kalibracije modulacijske frekvencije.

#### 4.1.4 Pogreške mjerenja u geometrijskom nivelmanu

Geometrijskim nivelmanom visinske razlike između točaka određuju se pomoću horizontalne vizure. Geometrijski nivelman je podložan različitim vrstama pogrešaka koje mogu biti slučajne ili sustavne.

Slučajne pogreške dijelimo na:

- pogreška očitavanja letve – nastaje zbog poteškoća u preciznom očitavanju visine na letvi,
- pogreška horizontiranja instrumenta – pogreške su rezultat nepravilnog horizontiranja instrumenta, što dovodi do netočnih mjerenja,
- pogreška nevertikalnosti letve – pogreške uzrokovane odstupanjem letve od vertikalnog položaja tijekom mjerenja.

Sustavne pogreške su:

- pogreška vizurne osi – nastaje zbog nehorizontalnosti vizurne osi u prostoru. Kao posljedica je pogreška visinske razlike pri nejednakim udaljenostima letve,
- zakrivljenost Zemlje – utječe na točnost visinskih mjerenja pri većim udaljenostima,
- atmosferska refrakcija – promjene u gustoći atmosfere uzrokuju lomljenje svjetlosti što kao posljedicu ima pogrešno očitavanje na letvi
- spuštanje instrumenta i letve

Standardno odstupanje visinske razlike  $\sigma_{\Delta h}$  dobivene geometrijskim nivelmanom računa se po izrazu:

$$\sigma_{\Delta h} = D \sqrt{2N(\sigma_{r/D}^2 + \sigma_{\alpha}^2)} \quad (6)$$

gdje je:

- $\sigma_{r/D}$  - procjena pogreške u očitavanju letve na jedinicu duljine vizure
- $\sigma_{\alpha}$  - procjena pogreške horizontiranja instrumenta
- $D$  - duljina vizure od instrumenta do letve
- $N$  - broj stajališta.

#### 4.1.5 Pogreške mjerenja u trigonometrijskom nivelmanu

Trigonometrijski nivelman je metoda za određivanje visinskih razlika između točaka pomoću mjerenja duljina i vertikalnih kutova. Kod ovog postupka, budući da duljine vizura nisu jednake, važno je da se mjerenja korigiraju za sustavne utjecaje: zakrivljenost Zemlje (C), refrakciju (R) s faktorom  $CR = 0,0675$ , te pogrešku vizurne osi.

Standardno odstupanje visinske razlike  $\sigma_{\Delta h}$  određene trigonometrijskim nivelmanom određena je izrazom:

$$\sigma_{\Delta h} = \left\{ \sigma_{h_i}^2 + \sigma_{h_r}^2 + \left[ \left( \cos z + \frac{CR \cdot s \cdot \sin^2 z}{500} \right) \cdot \sigma_s \right]^2 + \left[ \left( \frac{CR \cdot S \cdot \sin z \cdot \cos z}{500} - S \cdot \sin z \right) \cdot \frac{\sigma_z}{\rho} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

gdje je :

- $\sigma_{h_i}$  – nesigurnost mjerenja visine instrumenta
- $\sigma_{h_r}$  – nesigurnost očitavanja prizme
- $z$  – zenitna udaljenost
- $s$  – kosa duljina između točaka
- $\sigma_s$  – standardno odstupanje mjerene duljine
- $\sigma_z$  – nesigurnost mjerenja zenitne udaljenosti

## 4.2 Korekcije i redukcije mjerenih veličina

Na geodetska mjerenja provedena na terenu, djeluju određeni atmosferski i instrumentalni uvjeti. Iz tog razloga potrebno je izvršiti određene atmosferske i instrumentalne korekcije, kao i redukcije na referentnu plohu u odnosu na koju se računaju koordinate točaka mreže. „Kutevi mjereni u više ponavljanja reduciraju se na njihovu srednju vrijednost (Novaković, 2004).“

Redukcije mjerenih duljina osiguravaju da se podaci prilagode standardnim uvjetima mjerenja i projekcijama. Ovi postupci eliminiraju različite utjecaje koji mogu iskriviti rezultate.

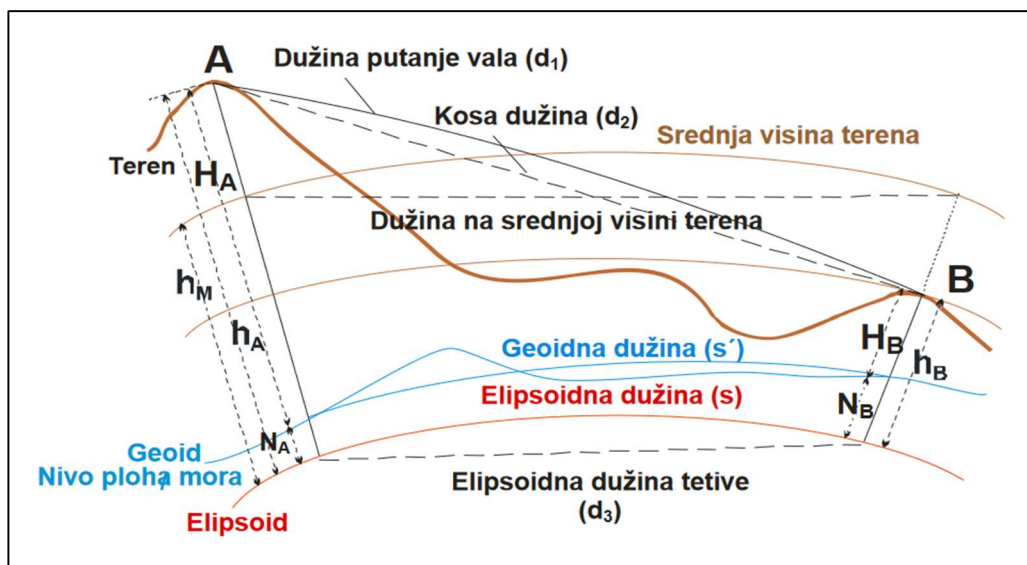
Atmosferski uvjeti poput temperature, tlaka i vlažnosti zraka mogu značajno utjecati na brzinu i putanju zrake. Zbog atmosferskih uvjeta dolazi do atmosferske refrakcije, te zraka pri tome doživljava promjene u brzini i smjeru. Kako bi mogli precizno mjeriti udaljenosti potrebno je izračunati stvarni refrakcijski indeks, a koji ovisi o atmosferskim parametrima: temperatura zraka, tlak zraka i količina vodene pare u zraku. Korekcije koje se primjenjuju na duljine mjerene elektrooptičkim daljinomjerom su:

- prva brzinska korekcija
- druga brzinska korekcija
- korekcija zbog zakrivljenosti refrakcijske krivulje

U praksi se rijetko primjenjuju atmosferske korekcije za kutna mjerenja.

Osim redukcije zbog atmosferskih uvjeta, mjerenja se moraju reducirati na referentni elipsoid i u ravninu projekcije (Slika 4.2.). Koraci pri korekciji i redukciji mjerenih veličina su:

1. Računanje srednje vrijednosti ponovljenih mjerenja duljine.
2. Korekcija opažane prostorne duljine  $d_1$  za prvu i drugu brzinsku korekciju.
3. Redukcija zakrivljene prostorne duljine  $d_1$  između točaka A i B na fizičkoj površini Zemlje, na tetivu  $d_2$
4. Korekcija pogreške nule – adicijska korekcija.
5. Redukcija prostorne tetive putanje vala  $d_2$  na tetivu  $d_3$  između točaka na elipsoidu.
6. Prijelaz sa tetive  $d_3$  na duljinu luka normalnog presjeka između točaka na elipsoidu – elipsoidna duljina  $s$
7. Prijelaz s elipsoidne duljine  $s$  na duljinu geodetske linije  $s'$



Slika 4.2. Korekcije i redukcije mjerene dužine (Lasić 2008.)

### 4.3 Analiza točnosti *a posteriori*

Analiza točnosti *a posteriori* omogućuje procjenu preciznosti i pouzdanosti rezultata nakon provedenih mjerenja i obrade podataka. Temelji se na stvarnim podacima prikupljenim tijekom mjerenja.

Nakon provedene izmjere geodetske mreže i provedenih redukcija i korekcija, pristupa se analizi točnosti dobivenih rezultata mjerenja, kako bi provjerili da li ona odgovara *a priori* procjeni točnosti. Postoji nekoliko metoda za *a posteriori* procjenu točnosti mjerenja, a najčešće se koriste metoda procjene varijanci iz pravih pogrešaka i metoda procjene iz odstupanja ponovljenih mjerenja.

#### 4.3.1 Metoda procjene varijanci iz pravih pogrešaka

Provjerom ispunjenja pojedinih uvjeta moguće je napraviti procjenu točnosti izvedenih mjerenja. Kao primjer može poslužiti procjena varijance kutnih mjerenja u četverokutu. Razlika zboja mjerenih kutova od teorijskih predstavlja pravu pogrešku mjerenog četverokuta:



$$\omega_i = (\beta_{i1} + \beta_{i2} + \beta_{i3} + \beta_{i4}) - 360^\circ \quad (8)$$

Varijanca mjerenog kuta se računa:

$$\sigma_\beta^2 = \sum_{i=1}^n \frac{w_i^2}{4n} \quad (9)$$

gdje je n ukupan broj nezavisno mjerenih četverokuta u mreži.

#### 4.3.2 Procjena varijance iz izračunatih popravaka mjerenja

Kod geodetskih mjerenja u najvećem broju slučajeva prava vrijednost mjerenje veličine  $l$  nije poznata, već izračunamo njenu najvjerojatniju vrijednost. Procjena varijance niza ponovljenih mjerenja iste veličine računa se po izrazu:

$$\sigma_l^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(l_i - \bar{l})^2}{n - 1} \quad (10)$$

gdje je :

- $l_i$  – vrijednost pojedinog mjerenja
- $\bar{l}$  – najbolja procjena vrijednosti mjerene veličine (aritmetička sredina)
- n – ukupan broj mjerenja

„Ako je standardno odstupanje veće od dozvoljenog za tu vrstu mjerenja, tada postoji mogućnost prisutnosti grubih ili sustavnih pogrešaka u mjerenjima (Novaković, 2004).“

## 5. IZJEDNAČENJE GEODETSKE MREŽE ZA POSEBNE NAMJENE

Izjednačenje mreža za posebne namjene je postupak prilagodbe i optimizacije rezultata mjerenja unutar geodetske mreže kako bi se dobile najvjerojatnije vrijednosti koordinata točaka, uzimajući u obzir različite vrste pogrešaka i specifične zahtjeve projekta.

Postupak izjednačenja geodetske mreže započinje prikupljanjem svih relevantnih mjerenja, koja se zatim prilagođavaju primjenom potrebnih korekcija i redukcija kako bi se uklonile sustavne pogreške i pogreške grubih iznosa. Izjednačenjem treba odrediti najvjerojatnije vrijednosti koordinata točaka, odnosno najbolje procjene. Da bi se dobile najtočnije procjene traženih veličina (koordinate točaka geodetske mreže), izmjerene veličine i odgovarajuća ocjena točnosti, izjednačenje se provodi metodom najmanjih kvadrata.

### 5.1 Izjednačenje posrednih mjerenja – Gauss-Markovljev model

Gauss-Markovljev model široko se koristi u geodeziji za izjednačenje mreža. Ovaj model omogućuje precizno određivanje koordinata točaka, optimizaciju mrežnih mjerenja i minimiziranje utjecaja pogrešaka. Kroz primjenu ovog modela osigurava se visoka razina točnosti i pouzdanosti potrebna za razne inženjerske i geodetske zadaće.

Izjednačenje po Gauss-Markovljevom modelu se koristi kada se tražene veličine (nepoznanice) ne mogu neposredno izmjeriti, već se određuju pomoću drugih izmjerenih veličina s kojima su funkcionalno povezane. Izjednačenjem se koristi za dobivanje najboljih procjena nepoznanica  $x_j$  ( $j = 1, 2, \dots, u$ ) sa  $n$  mjerenja  $l_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) koja imaju unaprijed poznate težine  $p_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), a na kraju se daje ocjena točnosti svih mjerenih i traženih veličina. Izjednačenje je moguće samo kada je  $n > u$ .

Ovaj model povezuje stohastička mjerenja  $l_i$  i njihove korelacije (slučajne veličine) s traženim nepoznanicama - koordinatama točaka mreže. Bazira se na matematičkom i statističkom izjednačenju pomoću metode najmanjih kvadrata. To je linearni matematički model koji se sastoji od:

- Funkcionalnog dijela:

$$l + v = A\hat{x} \quad (11)$$

- Stohastičkog dijela:

$$K_{ll} = \sigma_0^2 Q_{ll} = \sigma_0^2 P^{-1} \quad (12)$$

gdje je :

- $A$  – konfiguracijska matrica (matrica koeficijenata jednadžbi popravaka),
- $\hat{x}$  – vektor procijenjenih vrijednosti traženih veličina (nepoznanica),
- $K_{ll}$  – kovarijacijska matrica mjerenja,
- $\sigma_0^2$  – *a priori* faktor varijance,
- $Q_{ll}$  – korelacijska matrica mjerenih veličina.

Funkcionalni model u izjednačenju uključuje matematički odnos između izmjerenih veličina i nepoznatih parametara koje treba odrediti, određivanje minimalnog broja elemenata potrebnih za jednoznačno određivanje modela (broj nužnih mjerenja), te odabir datuma geodetske mreže.

„Stohastički (težinski) dio modela obuhvaća sva saznanja o varijancama, odnosno težinama i korelacijama koje se *a priori* pripisuju mjerenim veličinama, kao i utvrđivanje načina njihove numeričke obrade (Paar, 2006).“

Nije moguće dobiti sve podatke mjerenja s istom preciznošću, stoga je potrebno uvesti težine za izmjerene veličine - stohastički dio Gauss-Markovljevog modela. Težine se određuju na temelju standardnog odstupanja (devijacije) svakog mjerenja, a računaju se kao:

$$p_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (13)$$

gdje je :

- $p_i$  – težina pojedinog mjerenja,
- $\sigma_i^2$  – varijanca mjerenja (kvadratna vrijednost standardnog odstupanja)

Veće standardno odstupanje implicira na nižu preciznost mjerenja, pa se stoga takvom mjerenju pridaje manja težina. Varijance ( $\sigma_i^2$ ) pojedinih mjerenih veličina tvore kovarijacijsku matricu ( $K_{ll}$ ), a inverzijom te matrice dobiva se matrica težina ( $P$ ) čime je definiran stohastički model.

Posredno izjednačenje podrazumijeva da su odnosi između mjerenja i nepoznanica linearni, što često nije slučaj, pa je potrebno provesti linearizaciju funkcija. Linearizacija se obično postiže razvojem funkcija u Taylorov red.

Dakle, funkcionalni model mreže predstavlja linearni sustav jednadžbi, a korištenjem metode najmanjih kvadrata formiraju se normalne jednadžbe, čijim rješenjem se dobivaju najtočnije procjene traženih nepoznanica:

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P L = Q_{\hat{x}\hat{x}} A^T P L \quad (14)$$

gdje je :

- $A$  – matrica koeficijenata jednadžbi popravaka,
- $P$  – matrica težina mjerenja,
- $L$  – vektor prikraćenih mjerenja,
- $Q_{\hat{x}\hat{x}}$  – korelacijska matrica nepoznanica.

## 5.2 Ocjena točnosti geodetske mreže *a posteriori*

Kako bi se procijenila točnost geodetske mreže, potrebno je nakon izjednačenja izračunati kovarijacijske matrice nepoznanica (15), izjednačenih vrijednosti mjerenja (16) i popravaka (17).

$$K_{\hat{x}\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 Q_{\hat{x}\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1} \quad (15)$$

$$K_{ll} = \hat{\sigma}_0^2 Q_{ll} = \hat{\sigma}_0^2 A (A^T P A)^{-1} A^T \quad (16)$$

$$K_{\hat{v}\hat{v}} = \hat{\sigma}_0^2 Q_{\hat{v}\hat{v}} = \hat{\sigma}_0^2 [P^{-1} - A (A^T P A)^{-1} A^T] \quad (17)$$

gdje je :

- $\hat{\sigma}_0^2$  – faktor varijance *a posteriori*,

čija se empirijska vrijednost računa kao:

$$s_0^2 = \frac{v^T P v}{n - u} \quad (18)$$

Faktor varijanci je teorijski koncept koji se ne može izravno primijeniti za ocjenu preciznosti, pa se umjesto njega koristi empirijska vrijednost faktora varijanci ( $s_0^2$ ). Drugi pozitivni korijen faktora varijanci predstavlja standardno odstupanje, čija je teorijska vrijednost označena sa  $\hat{\sigma}_0$ , a empirijska vrijednost sa  $s_0$ .

Standardno odstupanje koordinata točaka u 2D u smjeru osi x i y se računa prema izrazu:

$$s_{x_i} = s_0 \sqrt{q_{\hat{x}\hat{x}_i}} ; s_{y_i} = s_0 \sqrt{q_{\hat{y}\hat{y}_i}} \quad (19)$$

gdje su članovi  $q_{\hat{x}\hat{x}_i}$  i  $q_{\hat{y}\hat{y}_i}$  dijagonalni elementi korelacijske matrice nepoznanica  $Q_{\hat{x}\hat{x}}$ .

Standardno odstupanje izjednačenih mjerenja izračunava se koristeći dijagonalne elemente korelacijske matrice izjednačenih mjerenja  $Q_{\hat{ll}}$  prema sljedećem izrazu:

$$s_{x_i} = s_0 \sqrt{q_{\hat{x}\hat{x}_i}} ; s_{y_i} = s_0 \sqrt{q_{\hat{y}\hat{y}_i}} \quad (20)$$

### 5.2.1 Elipse pogrešaka

Kako bi se mogla odrediti nesigurnost točke u svim smjerovima, potrebno je izračunati elemente elipse pogrešaka. Elipsa pogrešaka pruža točnu informaciju o položajnoj nesigurnosti točke u 2D prostoru, ovisno o definiranom području vjerojatnosti. Apsolutne elipse pogrešaka označavaju područje povjerenja izjednačenih koordinata točaka u odnosu na fiksirane točke (točke prisile). Iako su apsolutne elipse pogrešaka vrlo dobar pokazatelj točnosti, treba biti oprezan jer kod visoke korelacije između točaka ne pokazuju relativni odnos između točaka. Elementi standardne elipse pogrešaka računaju se prema sljedećim izrazima:

$$A^2 = \frac{s_0^2}{2} (q_{\hat{x}\hat{x}_i} + q_{\hat{y}\hat{y}_i} + k) = s_0^2 \lambda_1 \quad (21)$$

$$B^2 = \frac{s_0^2}{2} (q_{\hat{x}\hat{x}_i} + q_{\hat{y}\hat{y}_i} - k) = s_0^2 \lambda_2 \quad (22)$$

$$k = \sqrt{(q_{\hat{x}\hat{x}_i} - q_{\hat{y}\hat{y}_i})^2 + 4q_{\hat{y}\hat{y}_i}^2} \quad (23)$$

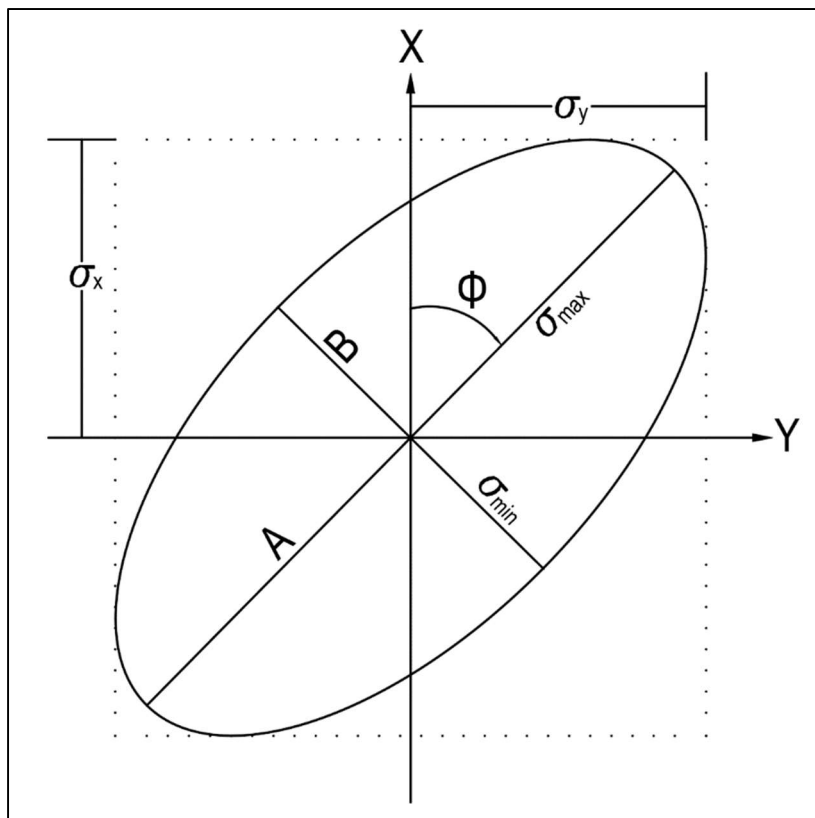
$$\tan 2\Phi = \frac{2q_{\hat{x}\hat{y}_i}}{q_{\hat{x}\hat{x}_i} - q_{\hat{y}\hat{y}_i}} \quad (24)$$

gdje je :

- $A, B$  – velika i mala poluos elipse,
- $\Phi$  – kut nagiba velike poluosi elipse pogrešaka,
- $q_{ii}$  – elementi korelacijske matrice  $Q_{\hat{x}\hat{x}}$
- $\lambda_1, \lambda_2$  – svojstvene vrijednosti korelacijske matrice  $Q_{\hat{x}\hat{x}}$

Velika polu-os elipse smještena je u smjeru maksimalno očekivane pogreške položaja točke. To znači da ovaj smjer predstavlja najveću nesigurnost u koordinatama točke, odnosno područje najveće moguće varijacije u mjerenju. Nasuprot tome, mala polu-os elipse nalazi se u smjeru

minimalne pogreške položaja točke, što označava najmanju nesigurnost u koordinatama i područje najstabilnijeg mjerenja.



Slika 5.1. Elipsa pogrešaka

Elipsa pogrešaka može se koristiti za izražavanje preciznosti položaja određene točke u odnosu na drugu točku u mreži, što se naziva relativna elipsa pogrešaka. Također, omogućavaju i vizualnu usporedbu relativne preciznosti između bilo koje dvije točke unutar geodetske mreže. Relativne elipse pogrešaka definiraju nesigurnost položaja dviju točaka s izjednačenim koordinatama, P1 ( $Y_1, X_1$ ) i P2 ( $Y_2, X_2$ ). Određuju se na isti način kao i apsolutne elipse pogrešaka. Pri simulaciji različitih varijanti projekta geodetske mreže, oblik, veličina i orijentacija elipsi pogrešaka omogućuje usporedbu različitih varijanti mreže i odabir najpovoljnije. Ovaj aspekt je posebno koristan u fazama planiranja i optimizacije geodetskih mreža, gdje je vizualna usporedba relativne preciznosti ključna za donošenje odluka.

### 5.3 Rang i defekt geodetske mreže

Rang mreže se odnosi na broj linearno nezavisnih mjerenja potrebnih za definiranje mreže. Matematički, rang matrice jednadžbi popravaka, označen kao  $r$ , predstavlja broj nezavisnih parametara. Matematički, rang mreže dan je izrazom:

$$r = u - d \quad (25)$$

gdje je  $u$  broj nepoznanica, a  $d$  ukupni defekt mreže.

Geodetska mjerenja (dužine, pravci, kutovi, visinske razlike) predstavljaju unutarnja mjerenja između točaka mreže i stoga definiraju relativni položaj (tj. relativne koordinate) tih točaka. Apsolutne koordinate točaka su vanjske veličine, odnosno, određene su relativno u odnosu na neki prethodno definiran koordinatni sustav. Za određivanje apsolutnih koordinata točaka u mreži potrebne su dodatne informacije. Zbog prisutnosti defekta funkcionalnog dijela Gauss-Markovljevog modela. Tek uklanjanjem tog defekta moguće je precizno određivanje koordinata. Matematički, bez dodatnih parametara matrica  $A$  je singularna, što dovodi do nemogućnosti izračuna korelacijske matrice standardnim metodama.

Defekt mreže je razlika između dimenzije matrice i njenog ranga. Postoje dva tipa defekta:

- Defekt datuma (vanjski defekt) – nastaje zbog neodređenosti referentnog koordinatnog sustava unutar kojeg se određuju izjednačene vrijednosti koordinata točaka mreže. Izračunava se kao:

$$d_D = u - r_D \quad (26)$$

gdje je  $r_D$  rang matrice po stupcima.

- Defekt konfiguracije (unutarnji defekt) – nastaje zbog nedovoljnog broja mjerenja potrebnih za određivanje svih nepoznanica u mreži. Izračunava se kao:

$$d_K = n - r_K \quad (27)$$

gdje je  $r_K$  rang matrice po stupcima.

Ukupni defekt mreže je:

$$d = d_D + d_K \quad (28)$$

## 5.4 Datum geodetske mreže

Datum geodetske mreže definira se kao najmanji broj parametara potrebnih za precizno određivanje položaja mreže u prostoru ili njenog relativnog položaja u odnosu na prethodno definiran koordinatni sustav.

Definicija datuma povezana je s definiranjem koordinatnog sustava koji je određen prostornim položajem ishodišta, orijentacijom koordinatnih osi i mjerilom. Stoga, datumski parametri su translacija, rotacija i mjerilo.

### 5.4.1 Defekt datuma geodetske mreže

Defekt datuma geodetske mreže odnosi se na neodređenost referentnog koordinatnog sustava unutar kojeg se određuju izjednačene vrijednosti koordinata točaka mreže. Ukupan broj defekta datuma za određenu vrstu mreže jednak je broju parametara datuma. U tablici 5.1 (Novaković 2004.) prikazani su datumski parametri i pripadajući defekt datuma za različite vrste geodetskih mreža:

Tablica 5.1. Datumski parametri i defekt datuma geodetskih mreža

Dimenzije i vrsta mreže		Mjerene veličine	Stupnjevi slobode	Defekt datuma
1D	nivelmanska mreža	visinske razlike	1 translacija	1
2D	trigonometrijska mreža	pravci	2 translacije 1 rotacija 1 mjerilo	4
		pravci i najmanje jedna duljina	2 translacije 1 rotacija	3
	trilateracijska mreža	duljine	2 translacije 1 rotacija	3
3D	prostorna mreža	dx, dy, dz	3 translacije 3 rotacije 1 mjerilo	7

## 5.5 Definiranje datumskih parametara mreže

Datum geodetske mreže može se definirati klasičnim načinom priključivanja mreže na točke s poznatim koordinatama iz državne geodetske mreže. Koordinate državne mreže uzimaju se kao fiksne, pa one definiraju datumске parametre. Međutim, preciznost novo uspostavljene mreže je znatno veća od preciznosti državne geodetske mreže, što može narušiti preciznost nove mreže. Također, uobičajeno je da se nova mreža priključuje na veći broj točaka nego što je minimalno potrebno za definiranje datuma, što može dovesti do "napinjanja" mreže i narušavanja njene geometrije.

„Jedan važan uvjet, pri definiranju datuma samostalne mreže, je taj da se ne smije utjecati na geometriju mreže, tj. relativni položaj točaka mora biti uspostavljen isključivo mjerenjem (Caspary 1987).“ Zbog toga je prilikom odabira datumskih parametara važno znati koje su veličine ovisne, a koje neovisne o izboru datuma. „Veličine koje su neovisne o izboru datuma su sama mjerenja – relativne veličine, dok su nepoznanice i njihova pripadajuća ocjena točnosti, odnosno apsolutne veličine ovisne o izboru datuma (Paar 2006).“

Prema načinu definiranja datuma razlikuje se konvencionalni (klasični) datum i optimalni datum.

### 5.5.1 Konvencionalni geodetski datum

Konvencionalni datum odnosi se na definiranje koordinatnog sustava geodetske mreže uz pomoć vanjskih uvjeta ili prisila. Ovaj pristup uključuje fiksiranje određenih točaka ili parametara kako bi se osigurao stabilan i konzistentan koordinatni sustav za mrežu.

Konvencionalni geodetski datum definira se na dva načina:

#### 1. Priključkom mreže na postojeću geodetsku osnovu tzv. „vanjska prisila“

Najčešći način definiranja konvencionalnog datuma je priključak mreže na postojeću geodetsku osnovu. Koordinate određenih točaka iz postojeće mreže uzimaju se kao fiksne, čime se nova mreža prilagođava postojećem koordinatnom sustavu uz uvjet da se mreža ne deformira. Prilikom definiranja datuma ne treba uzimati više datumskih parametara nego što je potrebno.

Takva definicija datuma naziva se i definicija datuma sa „minimalnom prisilom“. Na taj način se osigurava konzistentnost i preciznost koordinata novih točaka.

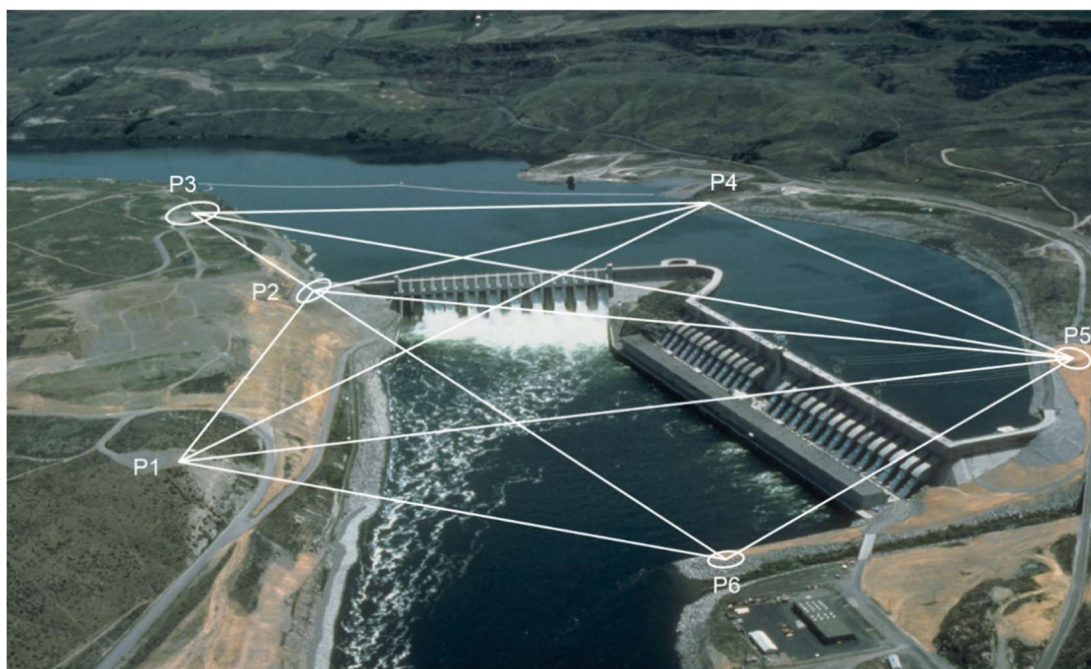
Tablica 5.2. Minimalni broj parametara za određivanje datuma – minimalna prisila

Tip mreže	Minimalni broj datumskih parametara mreže
1D (H)	H od jedne točke fiksna
2D (y, x) sa dužinama	y i x od jedne točke fiksni, azimut prema drugoj točki fiksna
2D (y, x) bez dužina	y i x od dvije točke fiksni
3D (y, x, H) sa dužinama	y, x i H od jedne točke fiksni, azimut i zenitna udaljenost prema drugoj točki fiksni, zenitna udaljenost prema trećoj točki fiksna
3D (y, x, H) bez dužina	y, x i H od tri točke fiksni

Iz tablice 5.2. se može zaključiti – ako se prilikom izmjere mreže mjere elementi koji mogu poslužiti kao datumski parametri, te veličine nije potrebno dodatno mjeriti.

## 2. Fiksiranje koordinata neophodnog broja točaka

Tijekom izjednačenja nove mreže može se fiksirati minimalni broj koordinata točaka koje se smatraju bezpogrešnim (ne podliježu popravkama mjerenja). Te koordinate nazivaju se datumskim parametrima, a točke koje određuju njihov prostorni položaj nazivaju se datumskim točkama (slika 5.2. – točke P1 i P4 definiraju datum). Geodetske mreže s definiranim konvencionalnim datumom nazivaju se neslobodne mreže.



Slika 5.2. Položajna nesigurnost točaka mreže – konvencionalni datum



### 5.5.2 Optimalni geodetski datum

Optimalni datum definira se uvođenjem „unutarnjih uvjeta“ umjesto vanjske prisile, tzv. Izjednačenje slobodne mreže. To znači da se ne fiksiraju koordinate određenih točaka, već se uvode uvjeti koji osiguravaju da se nakon izjednačenja mreže zadrže određeni geometrijski odnosi unutar mreže.

Uvođenjem unutarnjih uvjeta postiže se visoka preciznost mreže jer se izbjegava fiksiranje točaka koje bi mogle narušiti geometriju mreže. Ovaj pristup osigurava stabilnost mreže jer se uvjeti temelje na ukupnim geometrijskim svojstvima mreže, a ne na pojedinačnim točkama koje mogu biti podložne pogreškama.

„Unutarnji uvjeti zahtijevaju da prije i poslije izjednačenja mreže bude zadovoljeno:

- **1D mreže** – Srednja vrijednost visine svih točaka mreže mora ostati nepromijenjena nakon izjednačenja,
- **2D mreže** – Koordinate centra mreže (srednja vrijednost koordinata svih točaka), srednja vrijednost azimuta i srednja udaljenost od centra do pojedine točke moraju ostati nepromijenjeni.
- **3D mreže** – Koordinate centra mreže moraju ostati nepromijenjene, mreža ne smije rotirati u odnosu na centar oko osi x, y i z osi, a srednja udaljenost od centra do svake pojedine točke mreže mora ostati ista (Novaković, 2004).”

Optimalni geodetski datum je pristup koji omogućava postizanje maksimalne preciznosti i stabilnosti mreže uvođenjem unutarnjih uvjeta, čime se izbjegava narušavanje geometrije mreže. Osigurava zadržavanje srednjih vrijednosti geometrijskih veličina mreže, to uključuje zadržavanje srednje vrijednosti visina, koordinata centra mreže, azimuta i udaljenosti od centra do točaka mreže.

## 6. GEODETSKI RADOVI PRI GRADNJI TUNELA

Geodetski radovi pri gradnji tunela obuhvaćaju radove na površini i u samom tunelu. Uvažavajući unaprijed postavljene zahtjeve točnosti proboja tunela i ekonomske zahtjeve, izabire se optimalna varijanta u pogledu oblika mreže i postupka mjerenja.

Geodetski stručnjaci su iznimno važni kod izgradnje tunela te su prisutni u svakoj fazi radova. Za početak je potrebno izraditi idejni, glavni te izvedbeni projekt prije početka same gradnje te se u ovom koraku izrađuju topografske karte, geodetska podloga za projektiranje te parcelacijski elaborati. „Svi nabrojani radovi spadaju u radove koji prethode projektiranju a obuhvaćaju predradnje za idejni i glavni projekt (Grgić i dr., 2008).“

Zatim slijedi faza gdje se postavlja geodetska osnova za posebne namjene te su ovi radovi iznimno bitni za cijeli projekt s obzirom da je kvalitetna geodetska osnova ključna za uspješno odrađen posao u tunelu od strane geodetskog stručnjaka. To se postiže pomoću ispitivanja pojedinih varijanti primjenom računskog modela za optimiranje mreže. I pri najidealnijem biranju položaja pojedinih točaka mreže mora se računati s mogućom promjenom položaja točke u vertikalnom i horizontalnom smislu uslijed slijeganja tla, iskopa, miniranja, transporta teških građevinskih strojeva itd.

Dobro projektirana geodetska osnova ključna je kako bi se osigurala točnost i pouzdanost geodetskih mjerenja tijekom cijelog projekta.

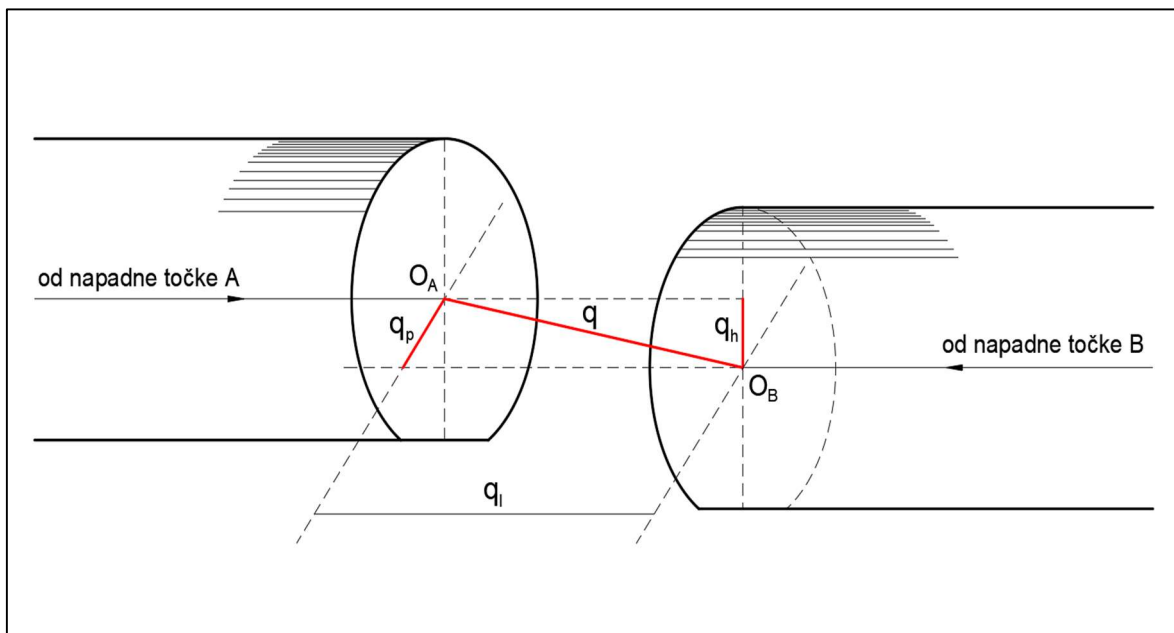
Geodetska osnova za projektiranje i izgradnju tunela posebno se razlikuje od ostalih mreža posebne namjene jer se sastoji od dva dijela, nadzemne i podzemne mreže. Nadzemna geodetska osnova postavlja se uglavnom kombinacijom terestričkih i satelitskih mjerenja, dok se podzemna mreža najčešće izvodi u obliku slijepih poligonskih vlakova te se priključuje na nadzemnu geodetsku osnovu neposredno kroz portale ili kroz vertikalna okna. Osnovna funkcija geodetske osnove je omogućiti precizno vođenje kopanja tunela, iskolčenje objekata i uređaja u tunelu i za izmjeru izvedenog stanja tunela.

Glavni zadatak geodetskog stručnjaka u tunelogradnji je osigurati potrebnu točnost proboja tunela. „Dozvoljeno odstupanje pri proboju tunela temeljno je polazište pri projektiranju i optimiranju geodetske osnove za potrebe izgradnje tunela (Paar, 2021).“ Točnost proboja tunela ovisi o:

- točnosti nadzemne i podzemne geodetske osnove,
- metodama i preciznosti mjerenja,
- načinu prijenosa priključnih elemenata u tunel,
- načinu građenja tunela (puni profil, potkop),
- o pogreškama (nesigurnostima) pri gradnji.

Pogreška proboja tunela rezultat je svih navedenih izvora, a sastoji se od tri komponente prikazane na Slici 6.1.:

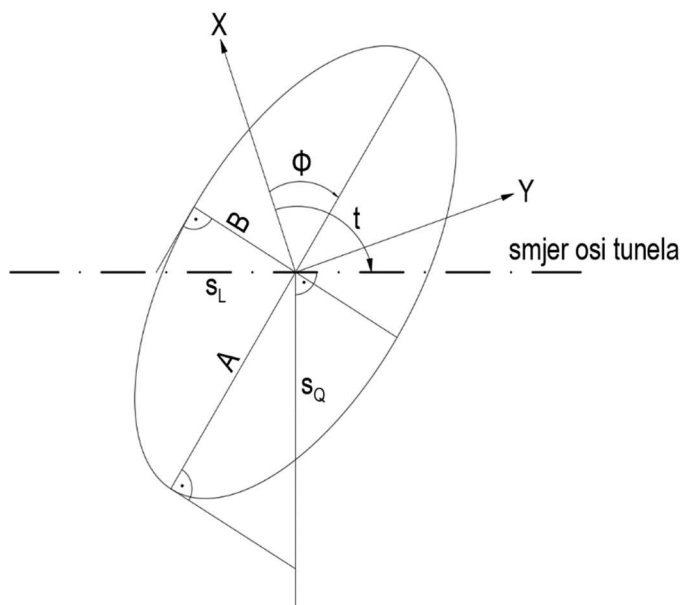
- uzdužna ( $q_l$ ),
- poprečna ( $q_p$ ),
- visinska ( $q_h$ ).



Slika 6.1. Prikaz odstupanja po osima pri proboju tunela (Paar, 2021)

Kod ravnih (uzdužnih) tunela uzdužna pogreška proboja nije previše bitna, jer će unatoč njoj doći do spajanja osi. Veću pozornost treba obratiti na poprečno i visinsko odstupanje. Međutim, za tunele u luku i tunele povezane s drugim podzemnim objektima posljedice ovih odstupanja su vrlo značajne. Uzdužno odstupanje jednako je važno kao i poprečno i visinsko.

Najvažnija mjera preciznosti u gradnji tunela i ostalih velikih inženjerskih objekata je relativna elipsa pogrešaka. Određena je velikom poluosi  $A$ , malom poluosi  $B$  i kutom orijentacije  $\theta$  kao što je prikazano na Slici 6.2.



Slika 6.2. Elipsa pogrešaka (Paar, 2021)

„Elementi elipse pogrešaka računaju se pomoću elemenata korelacijske matrice  $\mathbf{Q}_{xx}$  i dani su izrazom (Novaković, 2004)“:

$$\omega_{1,2} = \frac{1}{2} \left( q_{\Delta x \Delta x} + q_{\Delta y \Delta y} \pm \sqrt{(q_{\Delta x \Delta x} - q_{\Delta y \Delta y})^2 + 4q_{\Delta x \Delta y}^2} \right) \quad (29)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2q_{\Delta x \Delta y}}{q_{\Delta x \Delta x} - q_{\Delta y \Delta y}} \quad (30)$$

$$A = s_0 \sqrt{\omega_1} \quad , \quad B = s_0 \sqrt{\omega_2} \quad (31)$$

Gdje su:

- $\omega_{1,2}$  – svojstvene vrijednosti matrice kofaktora koordinatnih razlika  $\mathbf{Q}_{\Delta x \Delta x}$ ,
- $q_{\Delta x \Delta x}$ ,  $q_{\Delta y \Delta y}$ ,  $q_{\Delta x \Delta y}$  – elementi matrice kofaktora koordinatnih razlika
- $s_0$  – referentno standardno odstupanje

Ovoj mjeri preciznosti pridaje se posebna pažnja jer sadrži informacije o uzdužnom ( $S_L$ ) i poprečnom ( $S_Q$ ) odstupanju točke proboja tunela, a koje je dano izrazima:

$$S_Q^2 = A^2 \sin^2(t - \theta) + B^2 \cos^2(t - \theta) \quad (32)$$

$$S_L^2 = A^2 \cos^2(t - \theta) + B^2 \sin^2(t - \theta) \quad (33)$$

Pri čemu je  $t$  smjerni kut osi tunela.

„Poprečna komponenta ukupne pogreške proboja obično ima puno veću vrijednost od uzdužne, pa se optimizacija projekcije pogreške obično temeljila na pretpostavci maksimalne vrijednosti poprečnog odstupanja  $S_Q$  (Charzanowski, 1981).“

Geodetski radovi u tunelima su jedni od najpreciznijih i da bi se postigla visoka točnost koju zahtijevaju, potrebno je sva mjerenja izvoditi stručno, dobro poznavati tehniku mjerenja kao i izvore pogrešaka koje pri njima nastaju, kako bi se njihov utjecaj sveo na minimum.

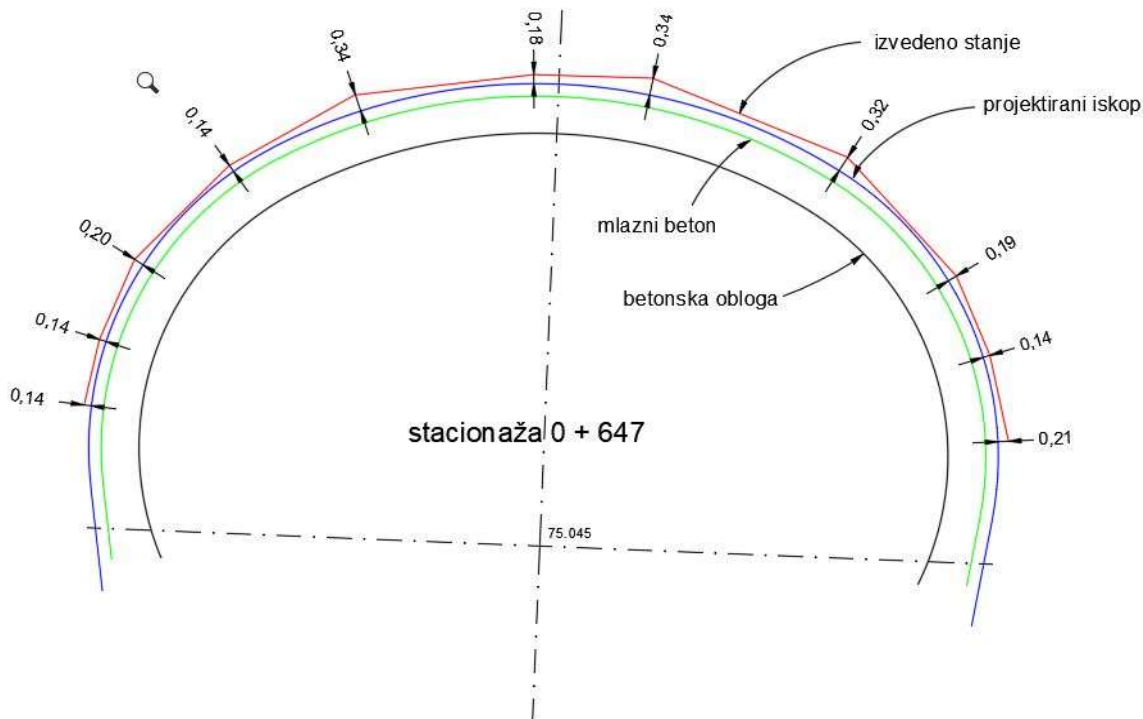
## 6.1 Kontrola poprečnih profila

Kontrola poprečnih profila u tunelima radi se po stacionažama, detaljnom izmjerom svih karakterističnih točaka pojedinog poprečnog profila. Izmjereni poprečni profili uspoređuju se s projektiranim profilima kako bi se moglo pravovremeno reagirati i korigirati raspored novih bušotina za miniranje ili korigirati strojeve za kopanje ukoliko je to potrebno.

Kod izvedenog stanja poprečnih profila može doći do:

- Prekopprofila – prostor koji nastaje kada se stijena odlomi/prokopa više od projektiranog profila.
- Podprofila – dio poprečnog profila kod kojeg je iskopani profil manji od projektiranog profila.
- Kombinacije preko i podprofila – dio poprečnog profila kod kojeg je iskopani profil na dijelovima manji od projektiranog i na dijelovima prokopan više od projektiranog profila

Snimanje kontrolnih profila vrši se totalnom stanicom ili 3D skenerom. Prilikom iskopa tunela snima se izvedeno stanje karakterističnih poprečnih profila izmjerom svih karakterističnih točaka. Na Slici 6.3. prikazan je snimljeni poprečni profil u tunelu Podmurvice. Prikazana su odstupanja izvedenog stanja od projektirane linije.



Slika 6.3. Geodetska kontrola tunelskih profila

Ovisno o načinu iskopa tunela, kao i kategorije zemljišta mogu se posebno obilježavati različiti elementi tunela: gornji svod, upornjaci, donji svod (temelj).

Prije postavljanja sekundarne obloge potrebno je geodetski provjeriti pokretnu oplatu. Nakon montiranja pokretne oplata vrši se snimanje obrisa iste koji se uspoređuje sa projektiranom linijom sekundarne (betonske) obloge.

Razvojem elektronike razvijaju se i odgovarajući softveri za totalne stanice za rad sa tunelima. U softver se ubacuju podaci o osi tunela, niveleti tunela, poprečnim padovima (njihove promjene na stacionažama iz projekta) i kategorizaciji zemljišta. Također u totalnu stanicu mogu se unijeti sve projektirane karakteristične površine: površina iskopa, površina primarne obloge, površina sekundarne obloge itd.

## 6.2 Tehničke specifikacije kontrole poprečnih profila

Postoje određeni uvjeti i smjernice koje se trebaju pratiti kada je riječ o kontroli poprečnih profila. Prema Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama iz 2001. kontrola profila se provodi kontinuirano, pomoću profilne skele koja je opremljena šablonom, ili barem svaka 2 m po stacionaži, korištenjem usavršenih tehnika mjerenja.

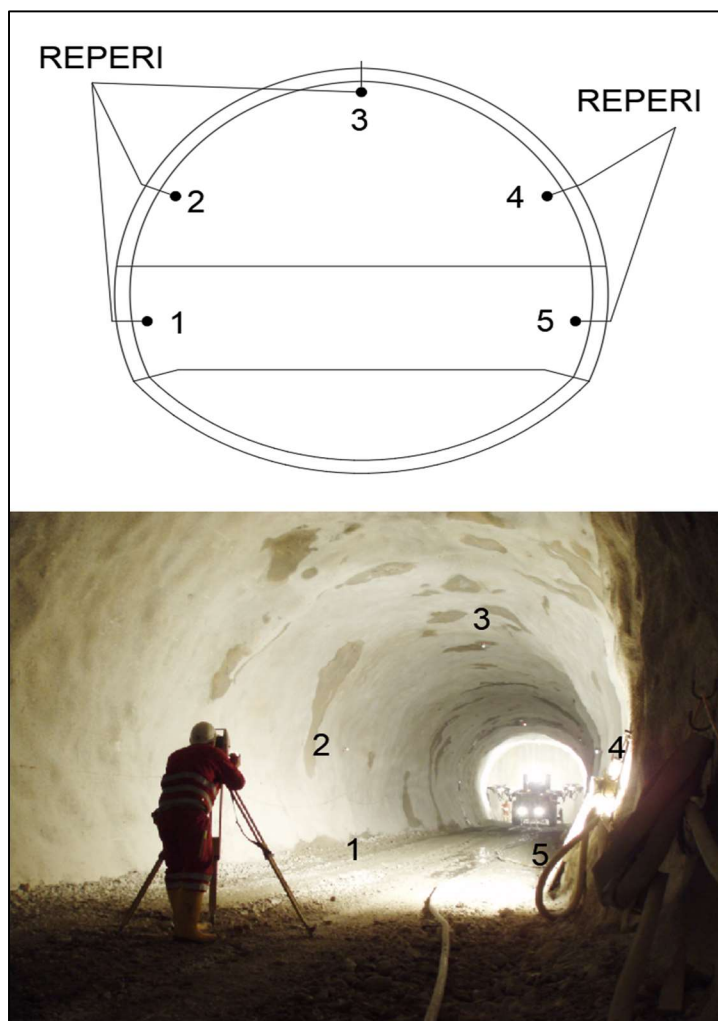
Svako odstupanje od projektiranog profila se popravlja dodavanjem mlaznog betona ili debljim unutrašnjim slojem betona. U slučaju kad dolazi do prevelikog profila, izvođač je dužan obaviti radove bez dodatne naknade. Da bi se odredilo odstupanje od projektiranog profila, izvođač je dužan nabaviti pokretnu profilnu skelu koja će imati sklop šablona po obodu koje pokazuju najmanji traženi profil potreban za nominalnu debljinu završne betonske obloge. Profilna skela se postavlja uzduž tračnica koje se koriste za pomicanje tunelske oplata, a geodet je dužan kontrolirati položaj tračnica, položajno i visinski, prije radova na kontroli profila. Izvođač zatim podnosi nadzornom inženjeru na odobrenje sve pojedinosti izvedbe profilne skele te nadzorni inženjer izdaje upute za sustavnu provjeru geometrije šablona tijekom profiliranja, geodetskim metodama. Izvođač može predložiti korištenje naprednijih tehnika mjerenja i obrade podataka kako bi odredio završni profil te se kontrola tog profila ne obavlja prije nego što geotehnička mjerenja pokažu da je veličina radijalnog pomaka u bilo kojem položaju tunelskog oboda manja od 4 mm mjesečno. Završna provjera profila se radi nakon završetka reprofiliranja uz nazočnost i suglasnost nadzornog inženjera.

Niše, udubljenja i slični objekti se trebaju izvesti uz toleranciju od  $\pm 5$  cm u odnosu na projektiranu lokaciju.

### 6.3 Kontrolna mjerenja u tunelima

Izgradnja tunela može rezultirati oštećenjem površinskih ili podzemnih struktura. Prilikom gradnje tunela, vrlo je važno utvrditi deformacije tunela. Deformacije u bušotinama tunela nastaju najčešće zbog pritiska na obod tunela od strane mase iznad tunela. Upravo se zbog tog razloga vrše kontrolna mjerenja (monitoring) u tunelima.

Kontrolna mjerenja provode se mjerenjem pomaka i deformacija po poprečnim profilima. Kontrolni mjerni profil sadrži pet mjernih točaka pozicioniranih na rubu podzemnog iskopa kao što je prikazano na slici 6.4.



Slika 6.4. Prikaz kontrolnog profila u tunelu

Mjerna točka sastoji se od nosača mjerne točke, koji se ugrađuje u beton ili stijensku masu i reflektirajuće prizme. Frekvencija mjerenja kontrolnih profila utvrđuje se u zavisnosti od dobivenih deformacija. U početku se mjerenja vrše svakodnevno, a smirivanjem konstrukcije prorjeđuju se i mjerenja. Prema analizi podataka praćenja, može se predvidjeti konačna vrijednost slijeganja i stanje sigurnosti tunela. S obzirom na tendenciju stabilizacije, određuje se je li potporna konstrukcija na mjerenom mjestu odgovarajuća i adekvatna.

Od samog početka iskopa i gradnje tunela može se zaključiti da je deformacija tunela glavni čimbenik koji pokazuje neuspjeh i isplativost podzemnog iskopa. Praćenje deformacija geodetskim metodama postalo je temeljni uvjet za ocjenu stabilnosti tunela. Osim sigurnosne kontrole, geodetski monitoring osigurava podatke koji opisuju 3-D kinematiku mjerenih točaka i prikaz deformacija kroz vrijeme.

#### 6.4 Tehničke specifikacije kontrolnih mjerenja u tunelima

Kod kontrolnih mjerenja u tunelima, mjerenja se provode totalnom stanicom te potrebna točnost mjerenja udaljenosti tog instrumenta treba biti  $\geq \pm 1$  mm. Mjerenja se obično obavljaju u okviru sustava integriranog praćenja tunela koji uključuje mjerenja slijeganja i provjeru položaja.

Prema Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama iz 2001. kontrolni mjerni profili će se ugrađivati u zonama IV i V kategorije stijenske mase kod tunela u stijenskim masama.

U stijenskoj masi I do III kategorije će se ugraditi po jedan kontrolni mjerni profil na svakih 100 m po duljini tunela dok se kod tunela u tlu kontrolni mjerni profil ugrađuje na svakih 10-15 m ovisno o tehnologiji izvođenja. Mjesta ugradnje profila određuje nadzorni inženjer tijekom izvođenja.

Repere se postavlja što bliže čelu tunela te ih je potrebno obilježiti i zaštititi od uništenja. Profili se označavaju stacionažom i brojem. Prvo mjerenje treba odraditi unutar 24 h nakon iskopa te se ona vrše sve do prestanka pomaka. Pomaci ovise o vremenu te o udaljenosti čela tunela od mjernog profila te je mjerenja potrebno intenzivirati ukoliko se pokažu da deformacije brže rastu. Mjerenja treba izvoditi i nakon svakog težeg građevinskog zahvata koji može izazvati nestabilnost otvora kod mjernog profila te interpretaciju tih mjerenja obavlja nadzorni inženjer odmah na gradilištu.

Ostali geodetski radovi u tunelu uključuju:

- Iskolčenje tunelske trase i objekata pod zemljom
- Navođenje uređaja za bušenje,
- Mjerenje pomaka i deformacija tunela,
- Izmjera i kontrola poprečnih profila tj. kubatura iskopa,
- Kontrola izgradnje,
- Snimanje izvedenog stanja (nakon dovršetka tunela)

Može se zaključiti da se „geodetski radovi vezani za tunelogradnju dijele u dva dijela:

- prvi dio podrazumijeva nadzemne geodetske radove koji prethode projektiranju, a obuhvaćaju pregradnje za idejni i glavni projekt - izmjera zemljišta za potrebe izrade geodetske podloge

drugi dio geodetskih radova obuhvaća nadzemne radove za određivanje geodetske mreže radi izračuna elemenata iskolčenja trase tunela, zatim geodetske radove u tunelu kao što su iskolčenje tunelske trase i objekata pod zemljom tijekom gradnje, te kontrolu izgradnje. Ti geodetski radovi su posebno značajni jer o njima ovisi kvaliteta građenja i jamstvo proboja s zahtijevanom točnosti (Paar, 2006)“.



## 7. PRAKTIČNI DIO RADA

Tunel Bakovac – Lika pripada u hidrotehničke tunele i dio je hidroenergetskog sustava HES Kosinj, a koji je dio jos većeg hidroenergetskog sustava HES Senj.

Za potrebe izgradnje tunela Bakovac – Lika provedeno je rekognosciranje terena i određivanje lokacija za postavljanje i stabilizaciju točaka geodetske osnove posebne namjene. Postavljeno je ukupno 8 točaka geodetske osnove od kojih 4 točke u mjestu Kosinjski Bakovac i 4 točke u mjestu Lipovo Polje.

Lokacije navedenih točaka geodetske osnove odabrane su tako da je ostvarena optička vidljivost svih točaka u obje mikrotriangulacijske mreže, a iste su stabilizirane kao trigonometrijske točke viših redova. Kod provedbe postupka rekognosciranja terena i izgradnje točaka uz sve ostale uvjete posebna pažnja posvećena je odabiru lokacije kako bi stabilizirane točke bile izgrađene na što stabilnijem terenu. Izgradnjom ovakvih točaka geodetske osnove osigurani su uvjeti za provedbu geodetskih mjerenja različitim metodama i instrumentarijem tj. uvaženi su zahtjevi da geodetska osnova bude pogodna za provedbu mjerenja visoke preciznosti i točnosti.

Za potrebe realizacije geodetske osnove za posebne namjene za izgradnju tunela Bakovac – Lika uvažene su sve stručne i znanstvene preporuke kod realizacije mreža posebnih namjena te je odlučeno kako će za potrebe realizacije iste biti provedena statička GNSS mjerenja, terestrička mjerenja u vidu triango-trilateracijskih mjerenja mikro mreža, precizni poligonometrijski vlak za povezivanje mikro mreža na ulaznom i izlaznom portalu tunela i geometrijski nivelman za točnije povezivanje mikro mreža u visinskom smislu.

Shodno navedenom pri provođenju statičkih GNSS opažanja, obratila se pažnja na slijedeće:

- korišteni su trofrekventni GNSS uređaji
- na svim točkama koristi se pribor za prisilno centriranje
- registracijski interval opažanja točaka potrebno je postaviti na 5 sekundi
- elevacijska maska treba biti postavljena na 5°
- granična vrijednost za PDOP treba biti postavljena na 4.5
- trajanje opažanja u jednoj sesiji trebala bi iznositi 120 minuta + 2 min/km za najdulji vektor
- visina antene mjeri se u više ponavljanja

Korišteni GNSS prijemnici su Trimble R8 i Stonex S900A (slika 7.1.), a odabrana metoda mjerenja je fast static koja, prema specifikacijama uređaja postiže točnost mjerenja  $\pm 3$  mm položajno i  $\pm 5$  mm visinski.



Slika 7.1. GNSS prijemnici Trimble R8 i Stonex S900A

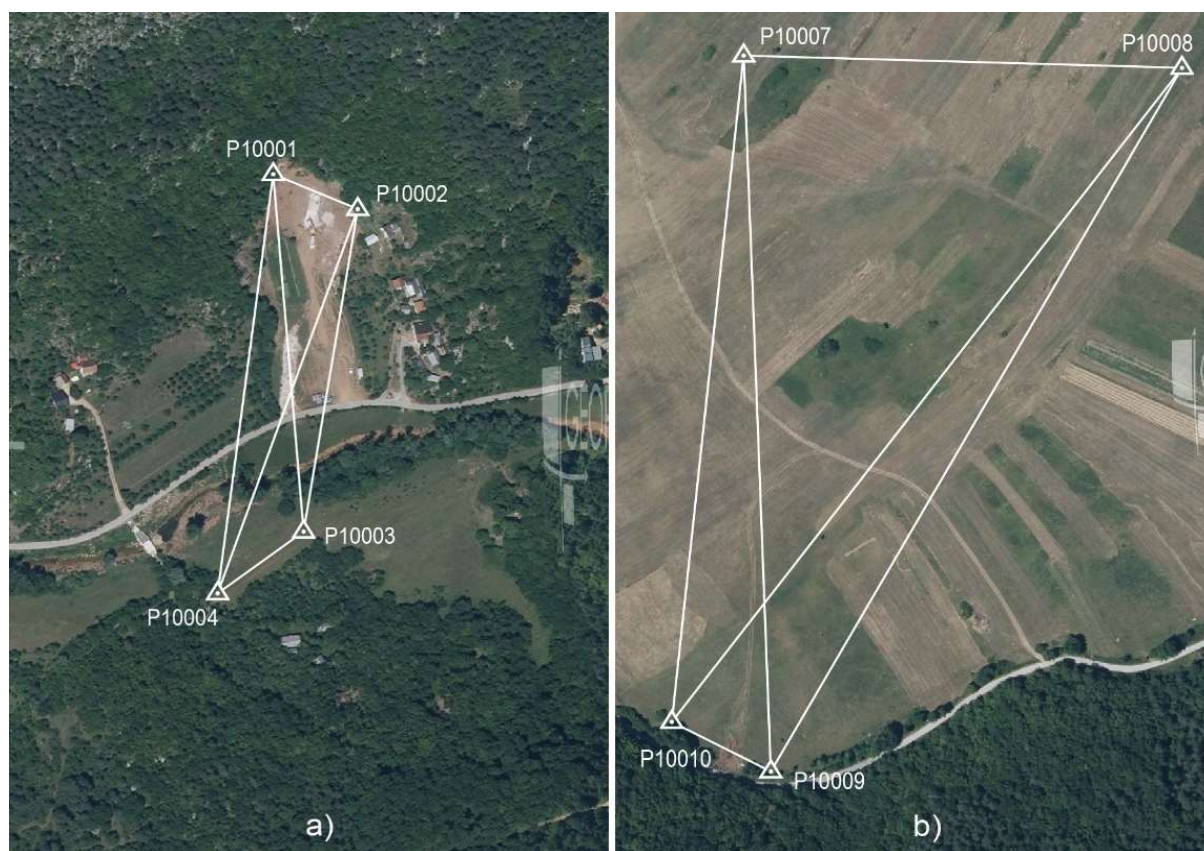
Tehničke specifikacije prijemnika prikazane su u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Tehničke karakteristike korištenih GNSS uređaja

GNSS prijemnik		Trimble R8	Stonex S900A
Simultano praćenje satelitskih signala	GPS	L1C/A, L1C, L2C, L2E, L5	L1C/A, L1C, L2C, L2P, L5
	GLONASS	L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3	L1C/A, L2C, L2P, L3, L5
	Galileo	E1, E5A, E5B	E1, E5A, E5B, E5 AltBOC, E6
	BeiDou	B1, B2	B1, B2, B3
	SBAS	L1C/A, L5	L1, L5
<b>Performanse pozicioniranja</b>			
Kodno diferencijalno GNSS pozicioniranje	Horizontalno	0.25 m + 1 ppm RMS	0.4 m RMS
	Vertikalno	0.50 m + 1 ppm RMS	

Statičko GNSS mjerenje			
Visoko precizno statičko mjerenje	Horizontalno	3 mm + 0.1 ppm RMS	2.5 mm + 0.1 ppm RMS
	Vertikalno	3.5 mm + 0.4 ppm RMS	3.5 mm + 0.4 ppm RMS
Statika i brza statika	Horizontalno	3 mm + 0.5 ppm RMS	3 mm + 0.5 ppm RMS
	Vertikalno	5 mm + 0.5 ppm RMS	5 mm + 0.5 ppm RMS
Postprocesirano kinematičko (PPK) GNSS mjerenje			
	Horizontalno	8 mm + 1 ppm RMS	nema dostupnih podataka u tehničkim specifikacijama proizvođača
	Vertikalno	3.5 mm + 0.4 ppm RMS	
Kinematičko mjerenje u realnom vremenu (< 30 km) – mrežni RTK			
	Horizontalno	8 mm + 0.5 ppm RMS	5 mm + 0.5 ppm RMS
	Vertikalno	15 mm + 0.5 ppm RMS	10 mm + 0.5 ppm RMS

Po provedenim statičkim GNSS mjerenjima provedena su visoko precizna terestrička mjerenja unutar mikrotriangulacijskih mreža u Bakovcu i Lipovom polju. Svaka od spomenutih mreža sastoji se od 4 točke koje tvore tzv. geodetski četverokut (Slika 7.2).



Slika 7.2. Mikrotriangulacijska mreža Bakovac (a) i Lipovo polje (b)



Slika 7.3. Robotizirana mjerna stanica Sokkia NET05 (URL9)

Terestrička mjerenja provedena su robotiziranom totalnom stanicom SOKKIA NET05 (Slika 7.3) s točnošću mjerenja kutova 0.5" i točnošću mjerenja duljina 0.8/0.5 mm + 1 ppm.

Tablica 7.2. Tehničke karakteristike mjerne stanice Sokkia NET05

<b>Kutna mjerenja</b>		
Preciznost		0.5"
Minimalni prikaz kuta na displayu		0.1"
IACS (Independent Angle Calibration System)		dostupan
<b>Mjerenje duljina</b>		
Preciznost	Reflektirajuća markica	$(0.5 + 1 \text{ ppm} \times D) \text{ mm}$
	AP/CP prizma	$(0.8 + 1 \text{ ppm} \times D) \text{ mm}$
	Bez reflektora – laser	$(1 + 1 \text{ ppm} \times D) \text{ mm}$
Minimalni prikaz duljine na displayu		0.01 mm
Raspon mjerenja	Reflektirajuća podloga	1.3 do 200 m
	Jedna AP prizma	1.3 do 3500 m
	CP prizma	1.3 do 800 m
	Bez reflektora – laser	0.3 do 40 m
Vrijeme mjerenja		Fine: 2.4 s ; Rapid: 2.0 s

Prije svakog mjerenja provedena su kalibracijska ispitivanja mjernog uređaja tako što je proveden postupak određivanja tilta i postupak kontrole kolimacije. Kako bi se pogreške zbog utjecaja refrakcije svele na minimum za provedbu opažanja birani su dijelovi dana kada je utjecaj iste sveden na minimum. Na svakom stajalištu provedeno je mjerenje pravaca i duljina u 3 girusa. Po provedenim mjerenjima podaci su uneseni u računalni softver JAG3D u kojem je provedena daljnja obrada prikupljenih podataka u vidu izjednačenja pravaca i duljina. Izjednačene vrijednosti mjernih duljina prethodno su reducirane na horizont, potom na nivo plohu referentnog elipsoida (GRS80) te konačno u ravninu projekcije HTRS96/TM.

Kao fiksne točke u mikro mreži Bakovac odabrane su 10002 i 10004 te su u odnosu na njih provedena izjednačenja i određivanje definitivnih koordinata preostalih točaka u mreži (10001 i 10003).

Kao fiksne točke u mikro mreži Lipovo Polje odabrane su 10007 i 10010 te su u odnosu na njih provedena izjednačenja i određivanje definitivnih koordinata preostalih točaka u mreži (10008 i 10009).

S obzirom na to da su se duljine iz terestričkih mjerenja između točaka 10002 i 10004 te 10007 i 10010 razlikovale u odnosu na one dobivene iz statičkih mjerenja te s obzirom na činjenicu da su duljine terestričkih mjerenja puno točnije određene, odlučeno je kako će se kao relevantne uzeti duljine dobivene izjednačenjem terestričkih mjerenja.

Analizom dobivenih rezultata vidljivo je kako je postignuta visoka relativna točnost, uz elipsu povjerenja 95% i ostvarenu milimetarsku točnost, u određivanju koordinata u obje mikro mreže.

## 8. REZULTATI ANALIZE USPOSTAVLJENJE GEODETSKE OSNOVE ZA POSEBNE NAMJENE

U ovom poglavlju detaljno će biti objašnjene provedene simulacije, koje su temeljene na podacima prikupljenim tijekom projektiranja portalnih mikro mreža za izgradnju tunela Bakovac – Lika. Provedeno je ukupno osam simulacija i četiri izjednačenja navedenih mreža, pri čemu se svaka razlikuje prema tehničkim specifikacijama instrumenata u vezi sa standardnim odstupanjem mjerenja duljina i pravaca te metodom mjerenja u smislu broja ponavljanja.

Simulacije i izjednačenja su provedena pomoću programskog paketa JAG3D u vidu mreža sa prisilom i slobodnih mreža. Poglavlje se završava usporedbom rezultata svih simulacija i izjednačenja.

### 8.1 Programski paket JAG3D

Java Applied Geodesy 3D (JAG3D) je aplikacija za primijenjenu geodeziju razvijena 2007. godine od strane profesora dr. ing. Michaela Loslera. Aplikacija temeljena na Javi distribuira se pod uvjetima GNU Opće javne licence (verzija 3). JAG3D je programiran za izjednačenje 1D, 2D i 3D mreža, ali i kombinirane mreže koristeći metodu najmanjih kvadrata na temelju Gauss-Markovljevog modela. Također, podržano je i izjednačenje baznih linija GNSS-a koje su izvedene tehnikama Globalnog satelitskog navigacijskog sustava (GNSS-a). Za rješavanje kompleksnih sustava jednadžbi koriste se algoritmi visokih performansi koje pružaju algebarski paketi BLAS/LAPACK.

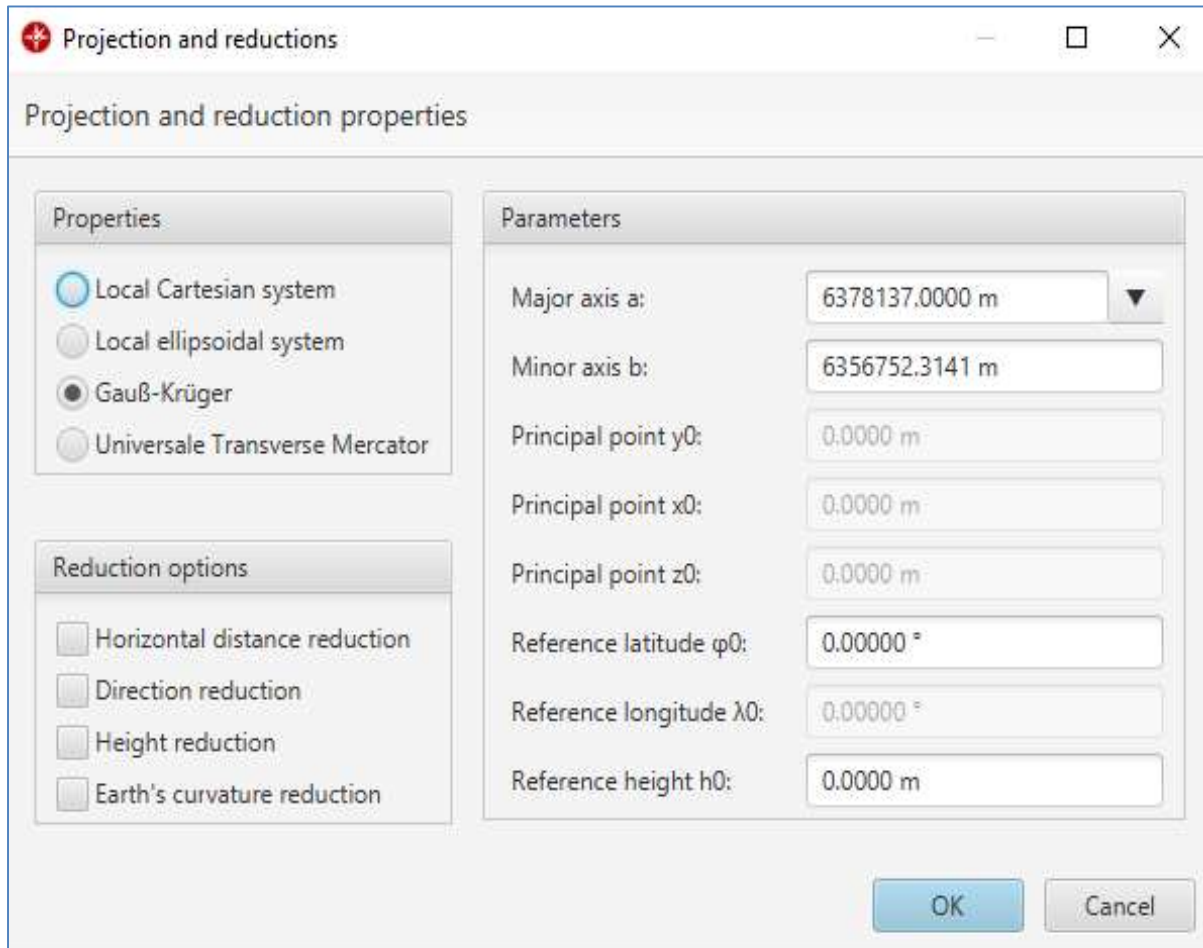
Za analizu podataka JAG3D procjenjuje nekoliko parametara za ocjenu mjerenja i karakteristike mreža. Test statistika se provodi na temelju Baardinog globalnog testa i data snooping-a. Granica odbacivanja se računa uz dani nivo signifikantnosti korištenjem F (Fisherove) razdiobe. U programu su predviđeni posebni uzorci deformacija mreže koji omogućuju identifikaciju pomaka ili deformacija dijela mreže. U okviru mrežne optimizacije JAG3D podržava prethodnu analizu mreže koju namjeravamo koristiti. Aplikacija također raspolaže mogućnošću procjene otklona vertikale ako je referentni okvir instrumenta (koji je u lokalnom sustavu) nagnut u odnosu na globalni prostorni referentni okvir. Ta procjena omogućuje obradu mjerenja gdje kompenzator instrumenta mora biti onemogućen, kao npr. u pokretnim okruženjima kao što su plutajuća pristaništa.

JAG3D pruža jasno i jednostavno grafičko korisničko sučelje. Korisničko sučelje JAG3D-a upravlja cijelim procesom analize. Potpuni projektni podaci i svojstva pohranjeni su u sustavu upravljanja relacijskom bazom podataka - Hyper SQL baza podataka (HSQLDB). JAG3D je napisan u programskom jeziku Javi, neovisnom o platformi i stoga se softver može izvoditi na svakoj platformi i operativnom sustavu koji pruža Oracleovo okruženje za izvršavanje Java-e.

### 8.2 Unos podataka u aplikaciju JAG3D

Prije samog početka korištenja aplikacije poželjno je postaviti postavke projekta kao što su odabir metode izjednačenja, odabir test statistike, odabir projekcije i redukcija, definiranje mjernih jedinica i dimenziju prikaza istih.

Jedna od opcija u postavkama je postavljanje projekcije u kojoj je mreža snimana, kao i odabir redukcija prije samog izjednačenja. Bez obzira što aplikacija nudi više redukcija (Slika 8.1.), nije odabrana niti jedna jer su duljine, koje su uvrštene u izjednačenje, već svedene u ravninu projekcije. Redukcije koje su dostupne u aplikaciji su redukcija duljine na horizont, redukcija pravaca (kutova), visinska redukcija i redukcija za zakrivljenost Zemlje.



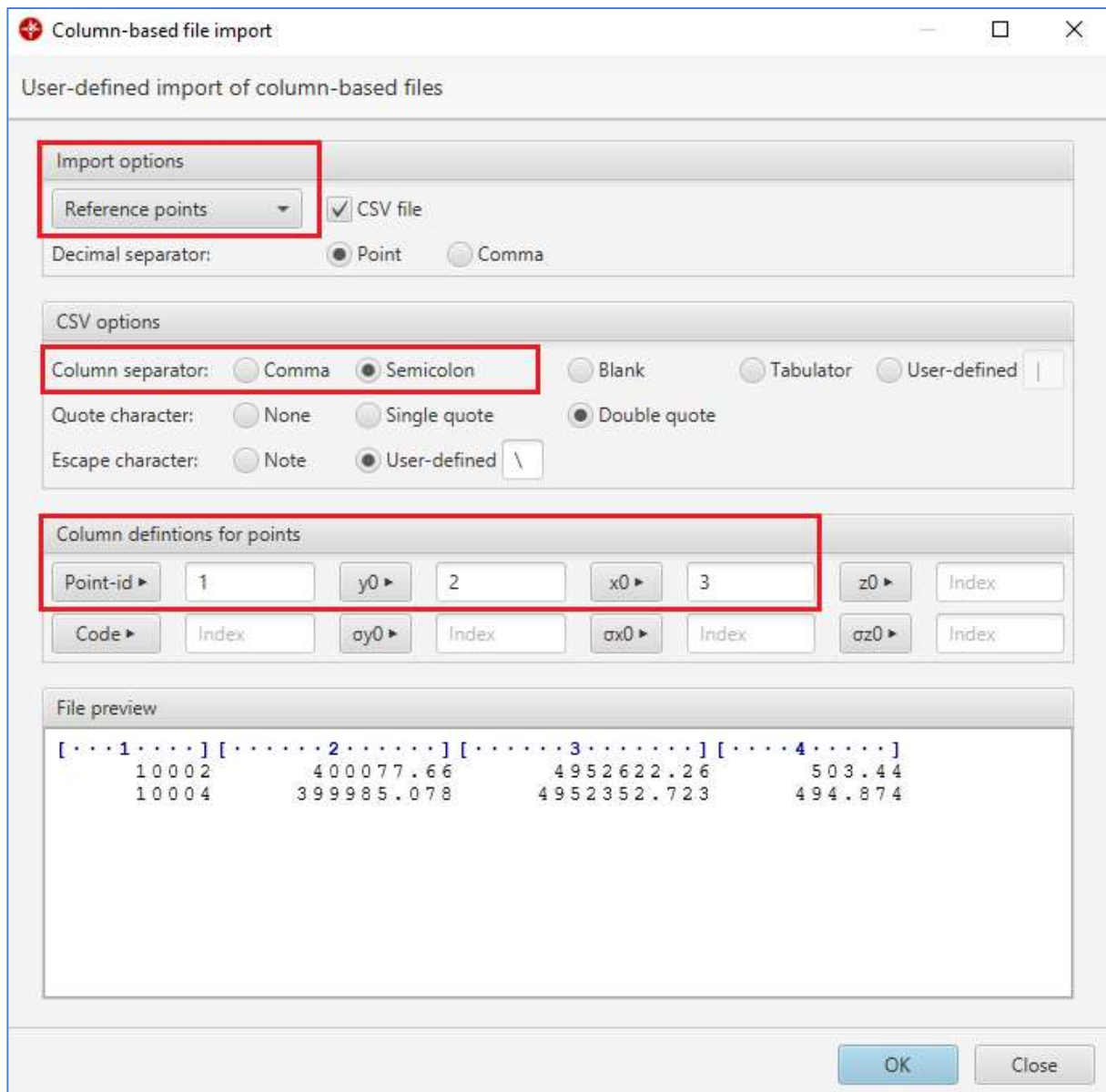
Slika 8.1. Postavljanje projekcije, parametara referentnog elipsoida i odabir redukcija u aplikaciji

Nakon definiranja postavki projekta, pristupa se unosu podataka točaka mreže. S obzirom da je mreža definirana dvjema točkama, te se točke unose kao referentne (fixne) točke, a ostale se točke unose pod „*new points*“.

Točke se još mogu importirati kao stohastičke, koje su također fiksne, ali dobivaju položajnu točnost (koristi se kod umetanja mreže). Također, opcija je ubacivanje datumskih točaka. Datumске točke ulaze sve u izjednačenje, a takva opcija se koristi kod izjednačenja slobodnih mreža.

Import podataka može biti iz txt zapisa u kojem su podaci odvojeni razmakom ili kao CSV zapis. Na Slici 8.2. može se vidjeti import podataka iz CSV datoteke odvojene točkom sa zarezom (semicolon). Prilikom importa, bitno je odabrati koji se podaci unose (referentne točke, nove točke, girusna mjerenja, duljine i sl.). Odabirom podatka koji se unosi, definiraju se i kolone koje se unose. Na Slici 8.2. mogu se vidjeti koje kolone su definirane za unos referentnih

točaka te se u prazno polje unosi broj kolone iz CSV zapisa. Na isti način se unose i ostali tipovi podataka.

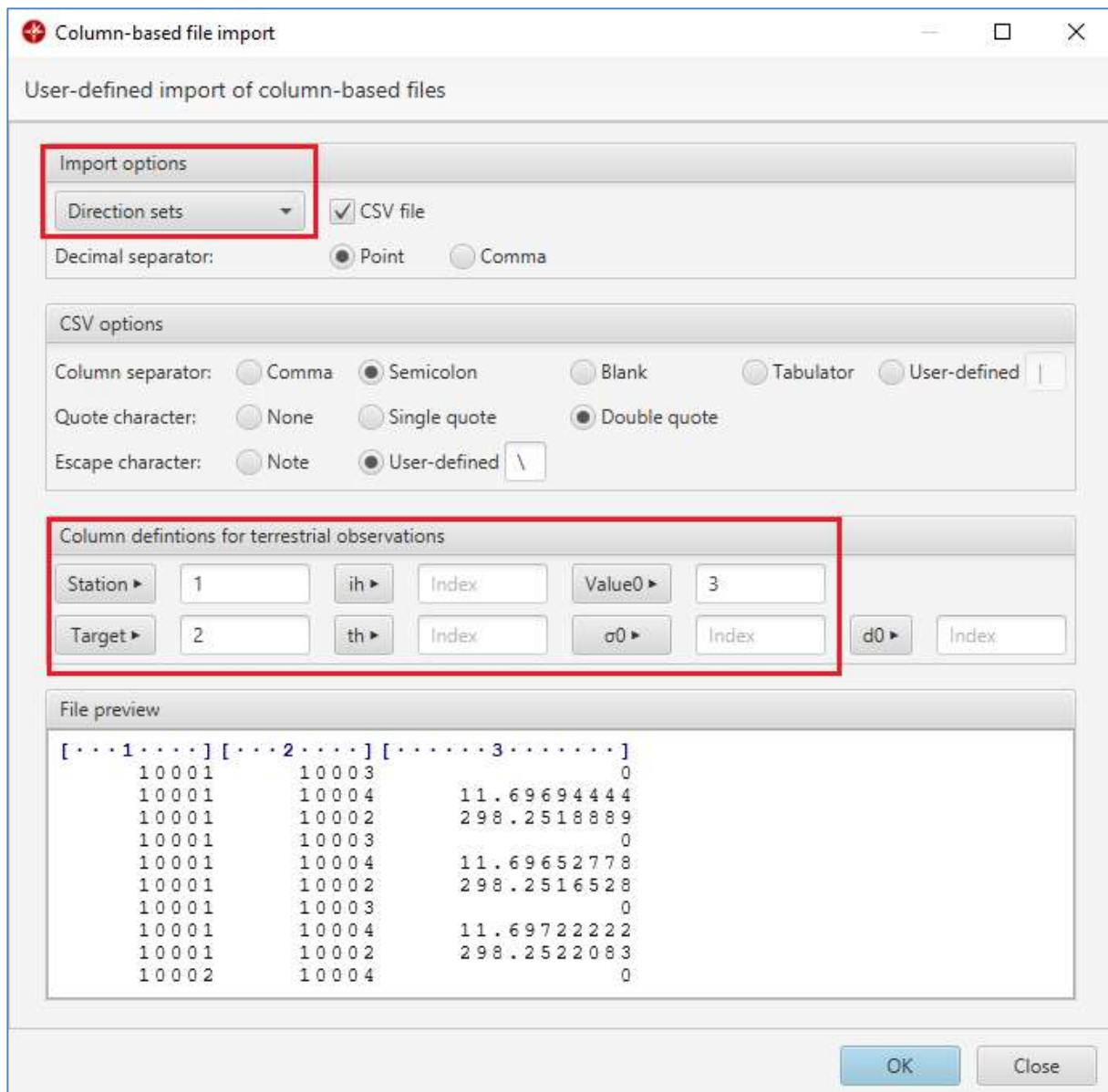


Slika 8.2. Prikaz unosa podataka zapisanih u CSV datoteci

Za horizontalno izjednačenje mreže, potrebno je još importirati podatke girusnih mjerenja i podatke o duljinama. Važno je napomenuti da su mjereni pravci reducirani i zapisani u decimalnom obliku, a duljine su reducirane u ravninu projekcije HTRS96/TM.

Na Slici 8.3. je vidljiv prikaz unosa podataka girusnih mjerenja. Podaci koji se mogu unijeti su broj stajališta i orijentacije (*station*, *target*), visine instrumenta (*ih*) i orijentacije (*th*) vrijednost reduciranog pravca (*Value0*), kao i *a priori* nesigurnost mjerenja pravaca.

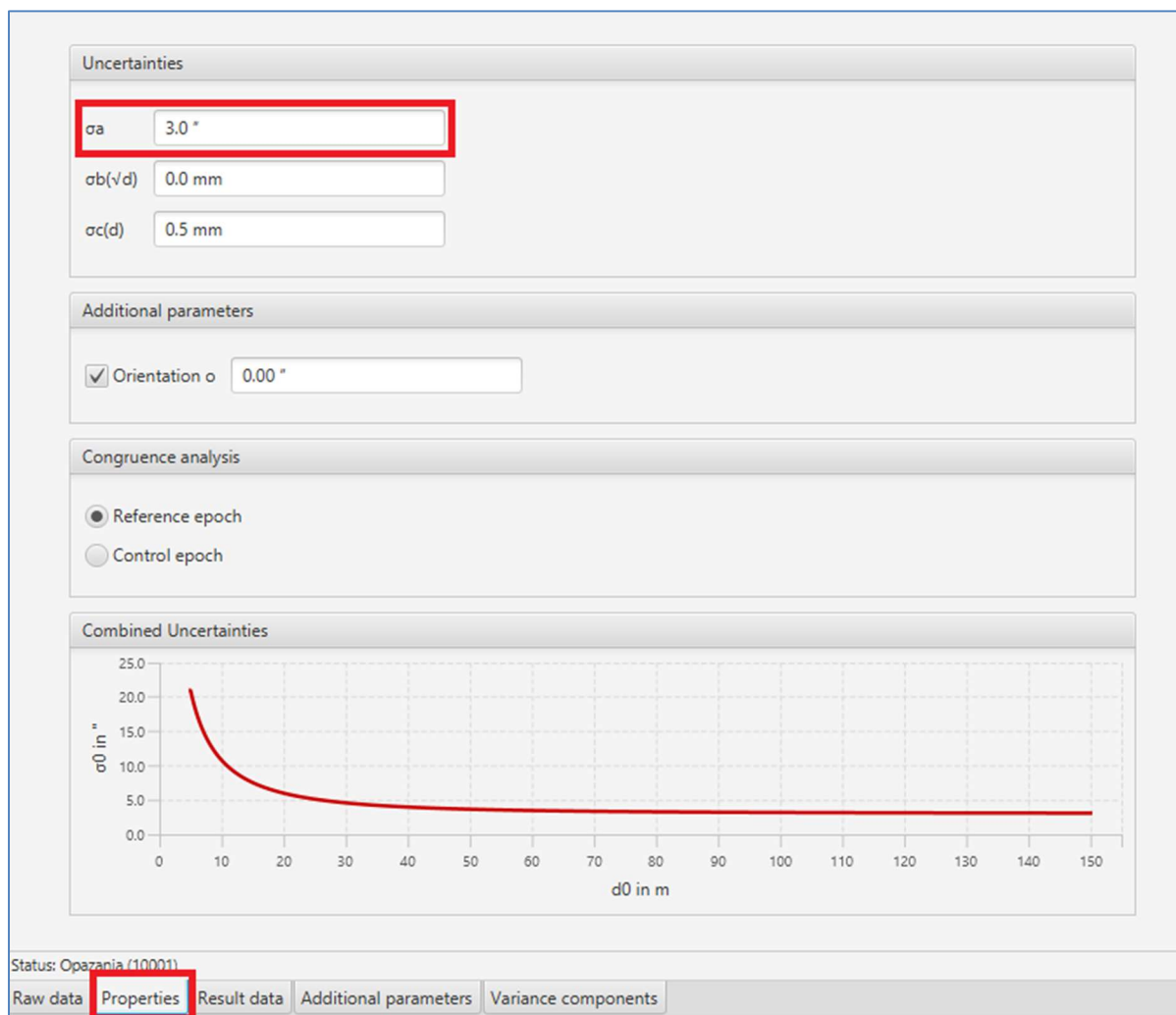




Slika 8.3. Prikaz unosa podataka girusnih mjerenja

U svakoj vrsti mjerenja postoji inherentna mjerna nesigurnost koja ulazi u izjednačenje, a koja se kvantificira standardnim odstupanjem mjerenih vrijednosti. Ova varijabilnost standardnog odstupanja ovisi o tipu i proizvođaču instrumenta, što utječe na a priori kvalitetu mreže.

Moguće je prilagoditi standardna odstupanja u ulaznim podacima kako bi se odredilo koji instrument najbolje odgovara za optimalnu konfiguraciju mreže. Te promjene moguće je izvršiti unutar kartice 'Properties', koja se nalazi na donjem dijelu sučelja prilikom pregleda mjerenja određenog tipa. Na slici 8.4. prikazan je odabir standardnog odstupanja mjerenja pravaca.



Slika 8.4. Prikaz unosa standardnog odstupanja mjerenih veličina

### 8.3 Simulacije portalnih mikromreža Bakovac i Lipovo Polje

U ovom dijelu rada analizirati će se simulacije portalnih mikro mreža pomoću JAG3D aplikacije. Simulacije su provedene temeljem podataka dobivenih pri mjerenju portalnih mreža za izgradnju tunela Bakovac – Lika. Provedeno je ukupno osam simulacija, po četiri za svaku portalnu mrežu. U simulaciji je postavljeno standardno odstupanje mjerenja pravaca na 3", dok se razlikuje metodologiju mjerenja, odnosno broj ponavljanja svakog mjerenja i obuhvat svih mjerenja u simulaciji.

U odrađenim simulacijama prikazana su mjerenja u 1 i 3 girusa označenih kao  $n$ . Simulirano je da su mjerenja odrađena totalnom stanicom sa standardnim odstupanjem mjerenja pravaca  $\sigma_a$  u vrijednosti 3", dok je za standardno odstupanje mjerenja duljina  $\sigma_d$  korišteno 2 mm + 2 ppm.

Nakon odrađenih simulacija prikazani su elementi elipse pogrešaka za svaku točku te koordinate izjednačenih točaka.

### 8.3.1 Mikro mreža Bakovac (sa prisilom) – simulacija 1

U tablici 8.1. prikazani su elementi simulacije temeljem kojih je ista napravljena. Skica mreže sa elipsama pogrešaka u mjerilu 1:1000, u odnosu na grafičko mjerilo skice, prikazana je na slici 8.5. U prvoj simulaciji prikazana je mikro mreža Bakovac. Datumske točke su 10002, 10004, standardno odstupanje mjerenih pravaca  $\sigma_a$  je 3",  $\sigma_d$  iznosi 2mm + 2ppm i mreža je opažana u jednom girusu.

Rezultati simulacije s elementima elipse pogrešaka, poluosima **A** i **B**, kao i standardna odstupanja po osima  $\sigma_y$  i  $\sigma_x$  za svaku točku prikazana su u tablici 8.2. Izjednačene koordinate točaka prikazane su u tablici 8.3.

Na kraju svake simulacije je sastavljen izvještaj iz aplikacije JAG3D koji je priložen kao prilog.

Tablica 8.1. Elementi simulacije 1

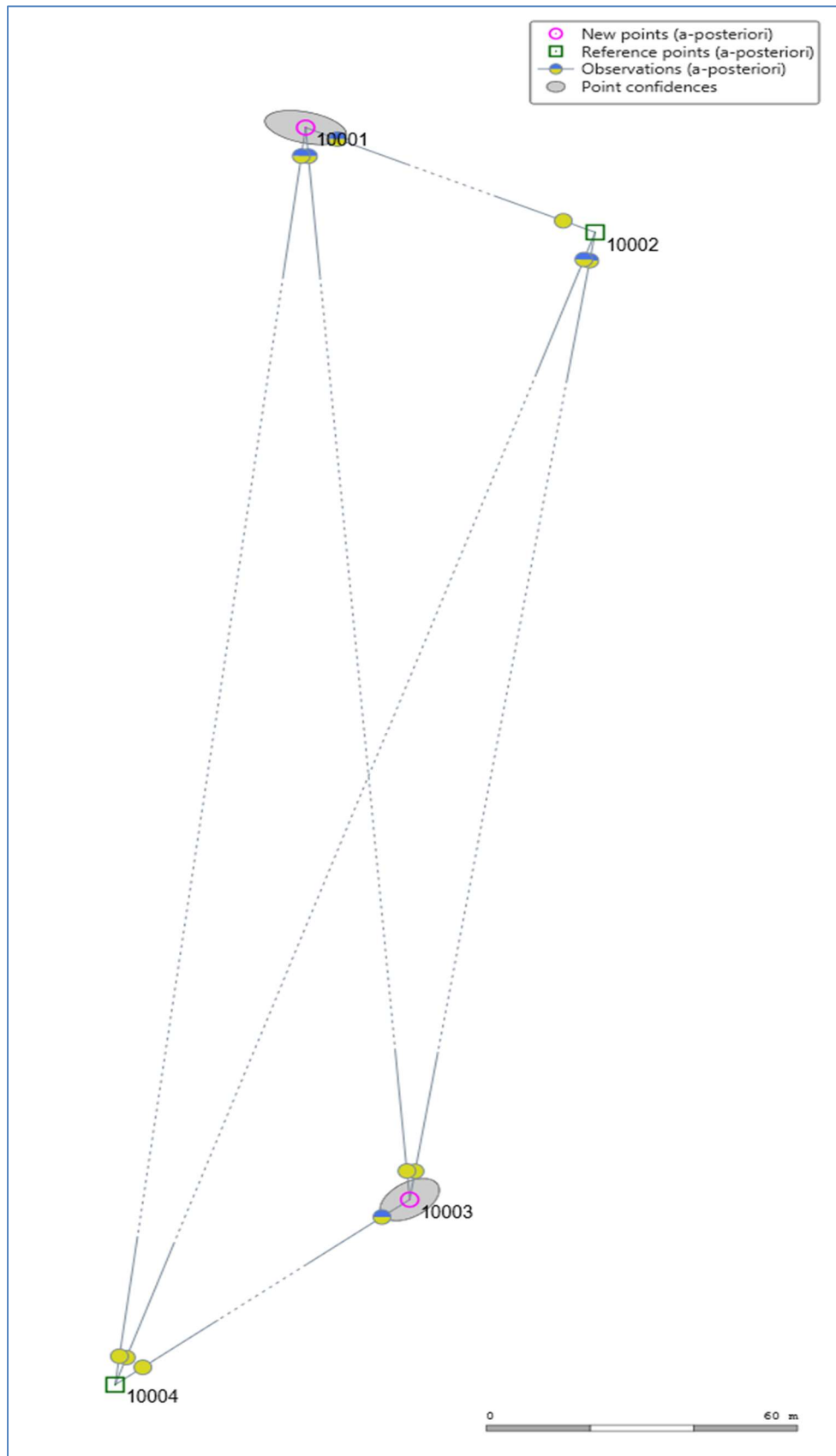
$\sigma_a$	3"
$\sigma_d$	2 mm + 2 ppm
<b>n</b>	1 girus

Tablica 8.2. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 1

broj točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)
<b>10001</b>	1.7	0.8	8.0	3.6
<b>10003</b>	1.2	1.0	6.5	3.9

Tablica 8.3. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 1

broj točke	Y (m)	X (m)
<b>10001</b>	400021.8194	4952646.7464
<b>10003</b>	400041.8816	4952395.9824



Slika 8.5. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:1000 nakon simulacije 1

### 8.3.2 Mikro mreža Bakovac (sa prisilom) – simulacija 2

U tablici 8.4. prikazani su elementi simulacije temeljem kojih je ista napravljena. Skica mreže sa elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000, u odnosu na grafičko mjerilo skice, prikazana je na slici 8.6. U drugoj simulaciji prikazana je mikro mreža Bakovac. Datumske točke su 10002, 10004, standardno odstupanje mjerenih pravaca  $\sigma_a$  je 3",  $\sigma_d$  iznosi 2 mm + 2 ppm i mreža je opažana u tri girusa.

Rezultati simulacije s elementima elipse pogrešaka, poluosima  $A$  i  $B$ , kao i standardna odstupanja po osima  $\sigma_y$  i  $\sigma_x$  za svaku točku prikazana su u tablici 8.5. Izjednačene koordinate točaka prikazane su u tablici 8.6.

Tablica 8.4. Elementi simulacije 2

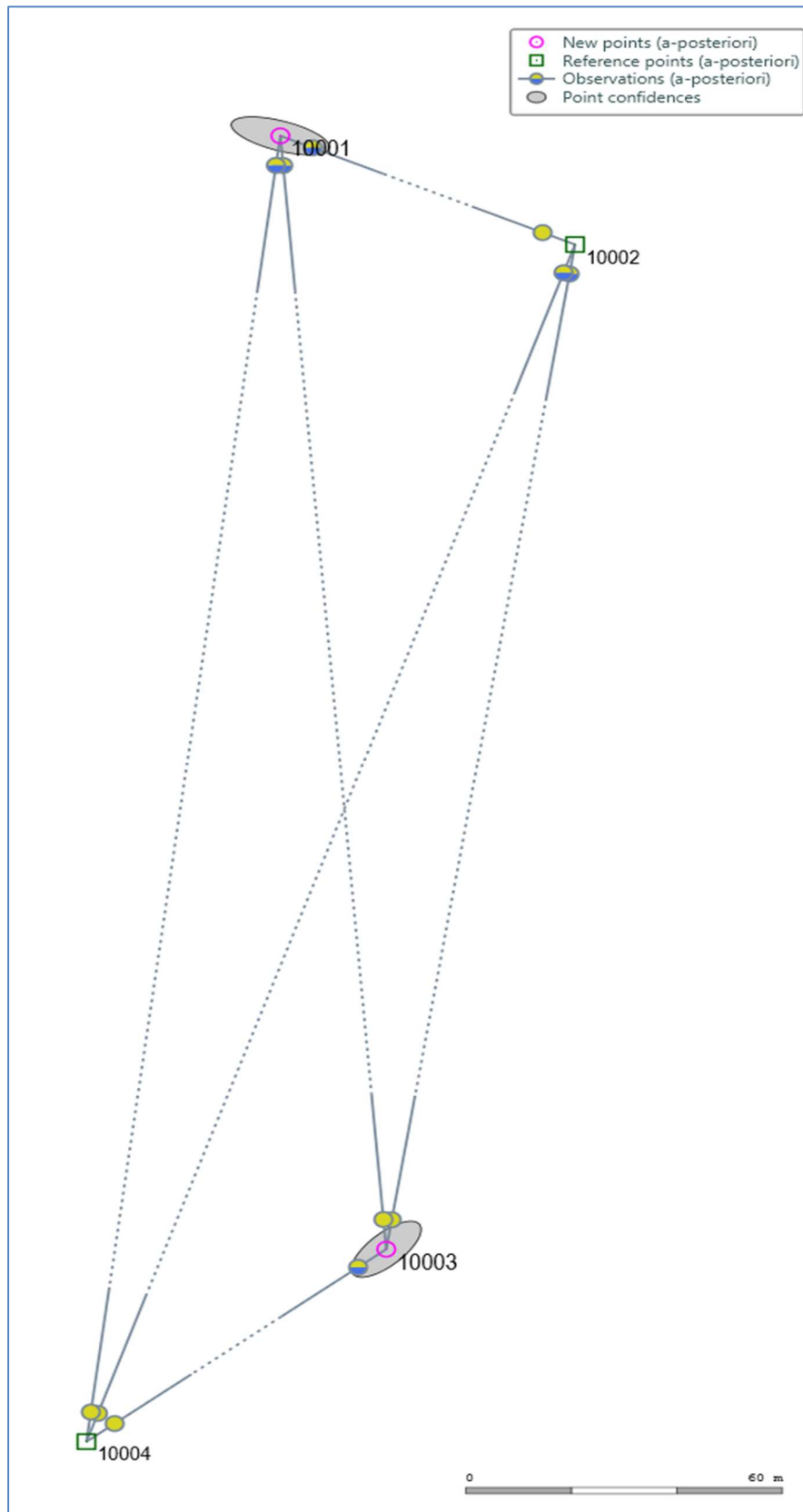
$\sigma_a$	3"
$\sigma_d$	2 mm + 2 ppm
$n$	3 girusa

Tablica 8.5. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 2

broj točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)
10001	0.3	0.1	4.8	1.7
10003	0.2	0.2	4.2	1.7

Tablica 8.6. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 2

broj točke	Y (m)	X (m)
10001	400021.8193	4952646.7464
10003	400041.8816	4952395.9824



Slika 8.6. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 2

### 8.3.3 Mikro mreža Bakovac (slobodna mreža) – simulacija 3

U tablici 8.7. prikazani su elementi simulacije temeljem kojih je ista napravljena. Skica mreže sa elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000, u odnosu na grafičko mjerilo skice, prikazana je na slici 8.7. U trećoj simulaciji slobodne mikro mreže Bakovac standardno odstupanje mjerenih pravaca  $\sigma_a$  je 3",  $\sigma_d$  iznosi 2 mm + 2 ppm i mreža je opažana u jednom girusu.

Rezultati simulacije s elementima elipse pogrešaka, poluosima  $A$  i  $B$ , kao i standardna odstupanja po osima  $\sigma_y$  i  $\sigma_x$  za svaku točku prikazana su u tablici 8.8. Izjednačene koordinate točaka prikazane su u tablici 8.9.

Tablica 8.7. Elementi simulacije 3

$\sigma_a$	3"
$\sigma_d$	2 mm + 2 ppm
$n$	1 girus

Tablica 8.8. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 3

broj točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)
10001	0.1	0.1	4.0	2.9
10002	0.1	0.1	4.1	2.9
10003	0.1	0.1	4.1	2.7
10004	0.1	0.1	4.1	2.4

Tablica 8.9. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 3

broj točke	Y (m)	X (m)
10001	400021.8192	4952646.7466
10002	400077.6598	4952622.2602
10003	400041.8817	4952395.9828
10004	399985.0783	4952352.7235



Slika 8.7. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 3



### 8.3.4 Mikro mreža Bakovac (slobodna mreža) – simulacija 4

U tablici 8.10. prikazani su elementi simulacije temeljem kojih je ista napravljena. Skica mreže sa elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000, u odnosu na grafičko mjerilo skice, prikazana je na slici 8.8. U četvrtoj simulaciji slobodne mikro mreže Bakovac standardno odstupanje mjerenih pravaca  $\sigma_a$  je 3",  $\sigma_d$  iznosi 2 mm + 2 ppm i mreža je opažana u tri girusa.

Rezultati simulacije s elementima elipse pogrešaka, poluosima  $A$  i  $B$ , kao i standardna odstupanja po osima  $\sigma_y$  i  $\sigma_x$  za svaku točku prikazana su u tablici 8.11. Izjednačene koordinate točaka prikazane su u tablici 8.12.

Tablica 8.10. Elementi simulacije 4

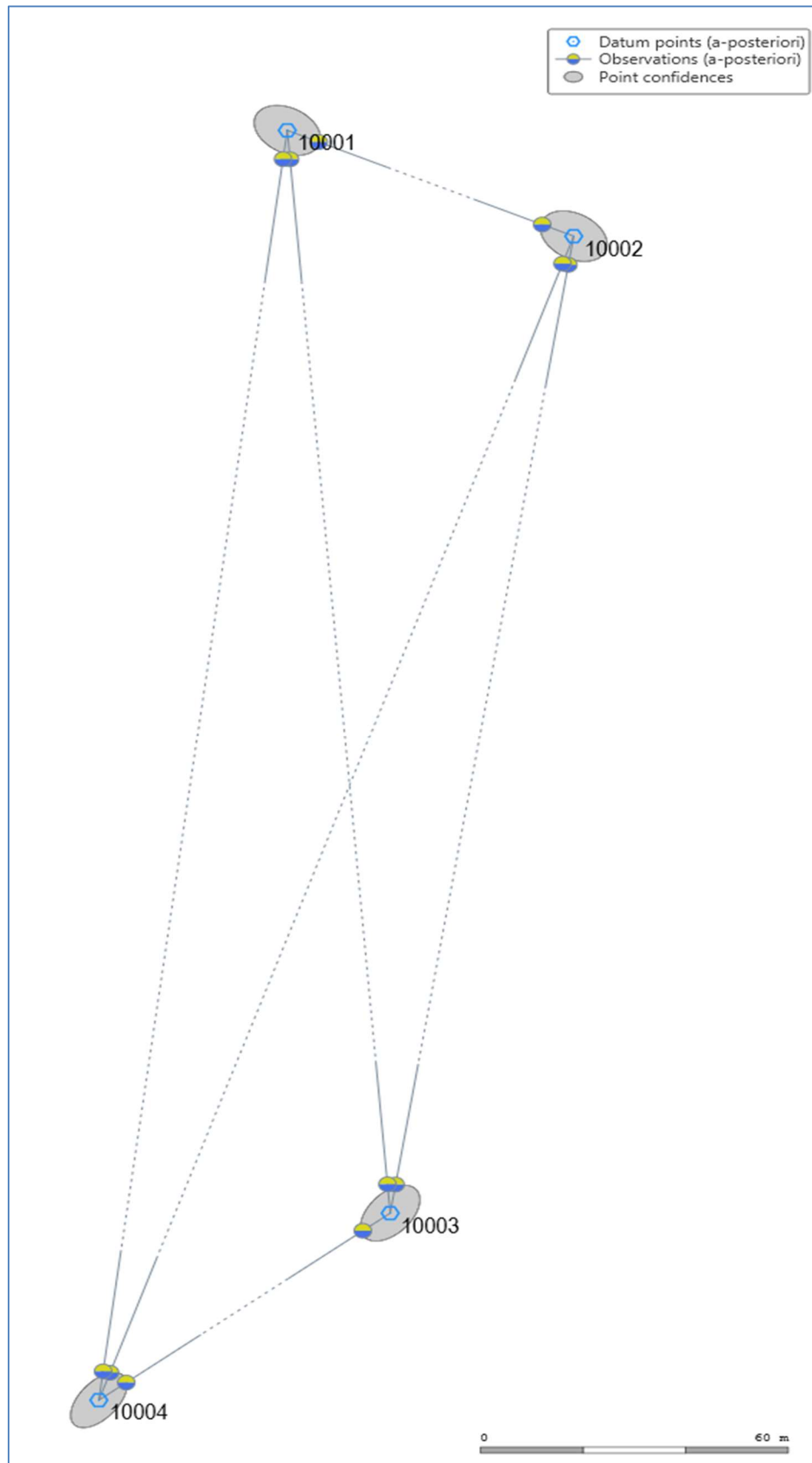
$\sigma_a$	3"
$\sigma_d$	2 mm + 2 ppm
$n$	3 girusa

Tablica 8.11. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 4

broj točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)
10001	0.1	0.1	3.6	2.5
10002	0.1	0.1	3.7	2.0
10003	0.1	0.1	3.5	2.5
10004	0.1	0.1	3.7	2.2

Tablica 8.12. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 4

broj točke	Y (m)	X (m)
10001	400021.8192	4952646.7466
10002	400077.6598	4952622.2602
10003	400041.8817	4952395.9828
10004	399985.0783	4952352.7235



Slika 8.8. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 4

### 8.3.5 Mikro mreža Lipovo Polje (sa prisilom) – simulacija 5

U tablici 8.13. prikazani su elementi simulacije temeljem kojih je ista napravljena. Skica mreže sa elipsama pogrešaka u mjerilu 1:1000, u odnosu na grafičko mjerilo skice, prikazana je na slici 8.9. U petoj simulaciji prikazana je mikro mreža Lipovo Polje. Datumske točke su 10007, 10010, standardno odstupanje mjerenih pravaca  $\sigma_a$  je 3",  $\sigma_d$  iznosi 2 mm + 2 ppm i mreža je opažana u jednom girusu.

Rezultati simulacije s elementima elipse pogrešaka, poluosima  $A$  i  $B$ , kao i standardna odstupanja po osima  $\sigma_y$  i  $\sigma_x$  za svaku točku prikazana su u tablici 8.14. Izjednačene koordinate točaka prikazane su u tablici 8.15.

Tablica 8.13. Elementi simulacije 5

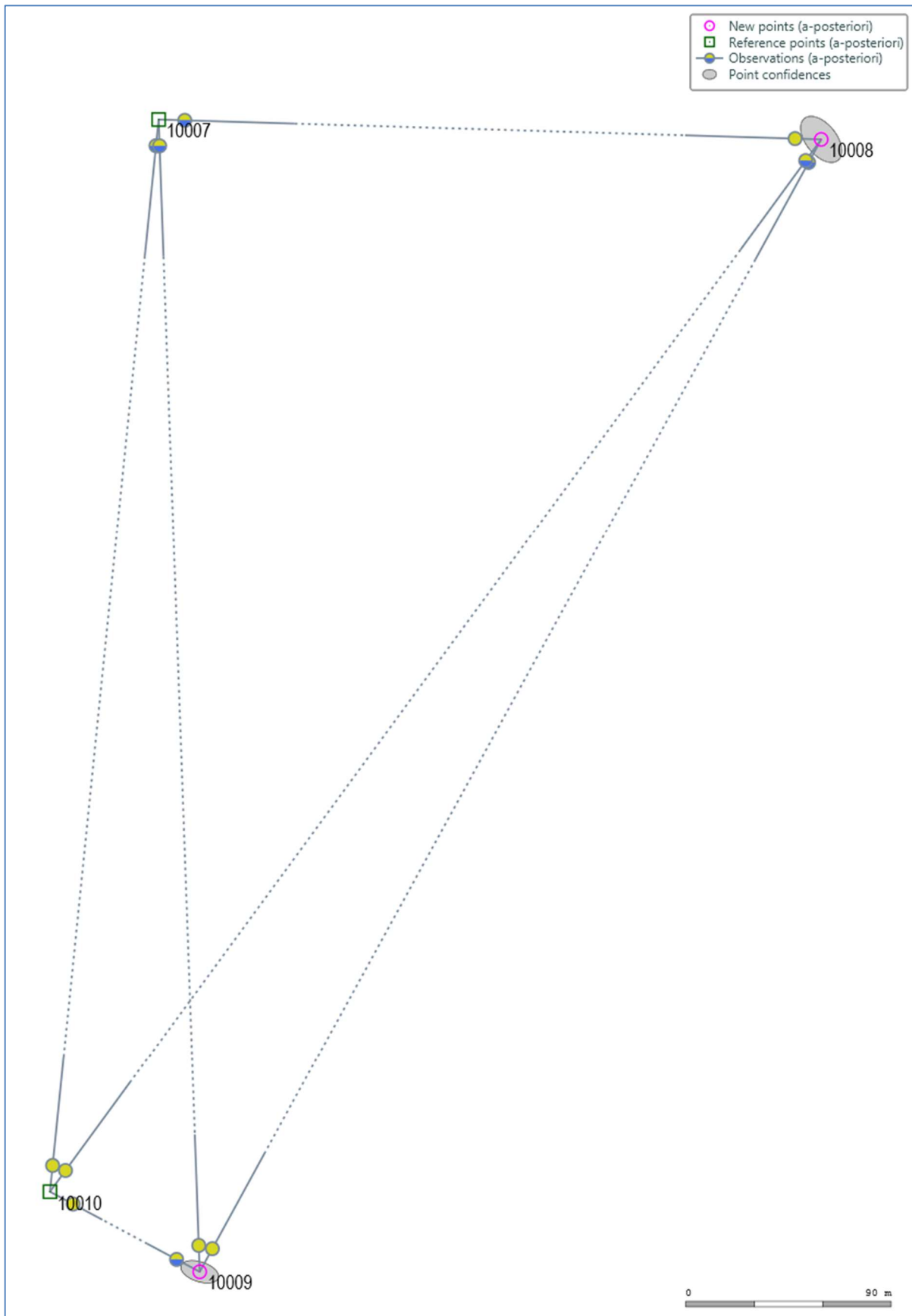
$\sigma_a$	3"
$\sigma_d$	2 mm + 2 ppm
$n$	1 girus

Tablica 8.14. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 5

broj točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)
10008	0.2	0.2	11.7	6.7
10009	0.2	0.1	8.6	4.3

Tablica 8.15. Koordinate točaka mikro mreže Lipovo Polje nakon simulacije 5

broj točke	Y (m)	X (m)
10008	402407.6399	4955550.6006
10009	402135.3711	4955057.3487



Slika 8.9. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:1000 nakon simulacije 5

### 8.3.6 Mikro mreža Lipovo Polje (sa prisilom) – simulacija 6

U tablici 8.16. prikazani su elementi simulacije temeljem kojih je ista napravljena. Skica mreže sa elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000, u odnosu na grafičko mjerilo skice, prikazana je na slici 8.10. U šestoj simulaciji prikazana je mikro mreža Lipovo Polje kod koje su datumske točke 10007, 10010, standardno odstupanje mjerenih pravaca  $\sigma_a$  je 3",  $\sigma_d$  iznosi 2 mm + 2 ppm i mreža je opažana u tri girusa.

Rezultati simulacije s elementima elipse pogrešaka, poluosima  $A$  i  $B$ , kao i standardna odstupanja po osima  $\sigma_y$  i  $\sigma_x$  za svaku točku prikazana su u tablici 8.17. Izjednačene koordinate točaka prikazane su u tablici 8.18.

Tablica 8.16. Elementi simulacije 6

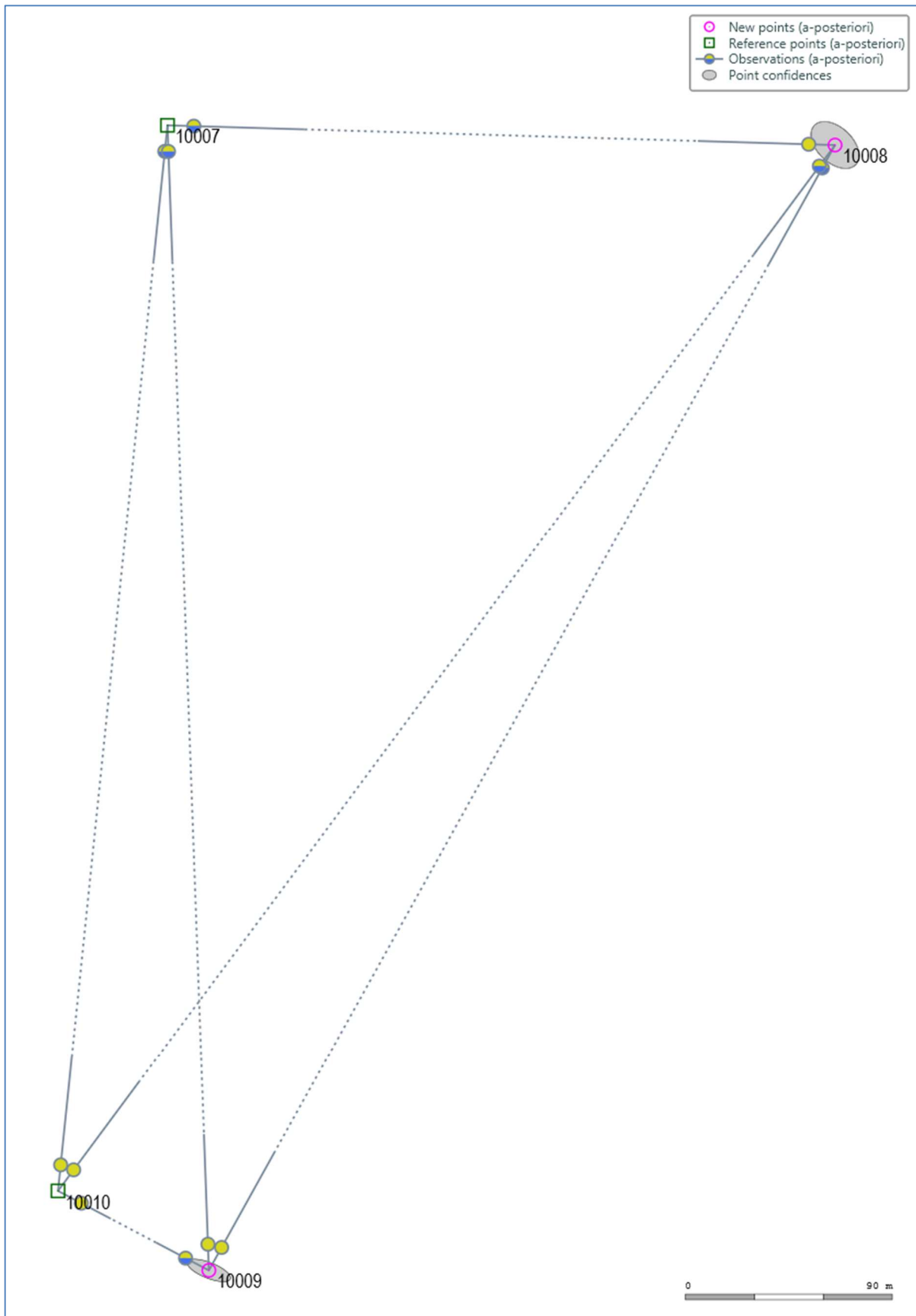
$\sigma_a$	3"
$\sigma_d$	2 mm + 2 ppm
$n$	3 girusa

Tablica 8.17. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 6

broj točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)
10008	0.3	0.3	10.2	6.0
10009	0.3	0.2	7.7	3.4

Tablica 8.18. Koordinate točaka mikro mreže Lipovo Polje nakon simulacije 6

broj točke	Y (m)	X (m)
10008	402407.6399	4955550.6006
10009	402135.3711	4955057.3487



Slika 8.10. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 6

### 8.3.7 Mikro mreža Lipovo Polje (slobodna mreža) – simulacija 7

U tablici 8.19. prikazani su elementi simulacije temeljem kojih je ista napravljena. Skica mreže sa elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000, u odnosu na grafičko mjerilo skice, prikazana je na slici 8.11. U sedmoj simulaciji slobodne mikro mreže Lipovo Polje standardno odstupanje mjerenih pravaca  $\sigma_a$  je 3",  $\sigma_d$  iznosi 2 mm + 2 ppm i mreža je opažana u jednom girusu.

Rezultati simulacije s elementima elipse pogrešaka, poluosima *A* i *B*, kao i standardna odstupanja po osima  $\sigma_y$  i  $\sigma_x$  za svaku točku prikazana su u tablici 8.20. Izjednačene koordinate točaka prikazane su u tablici 8.21.

Tablica 8.19. Elementi simulacije 7

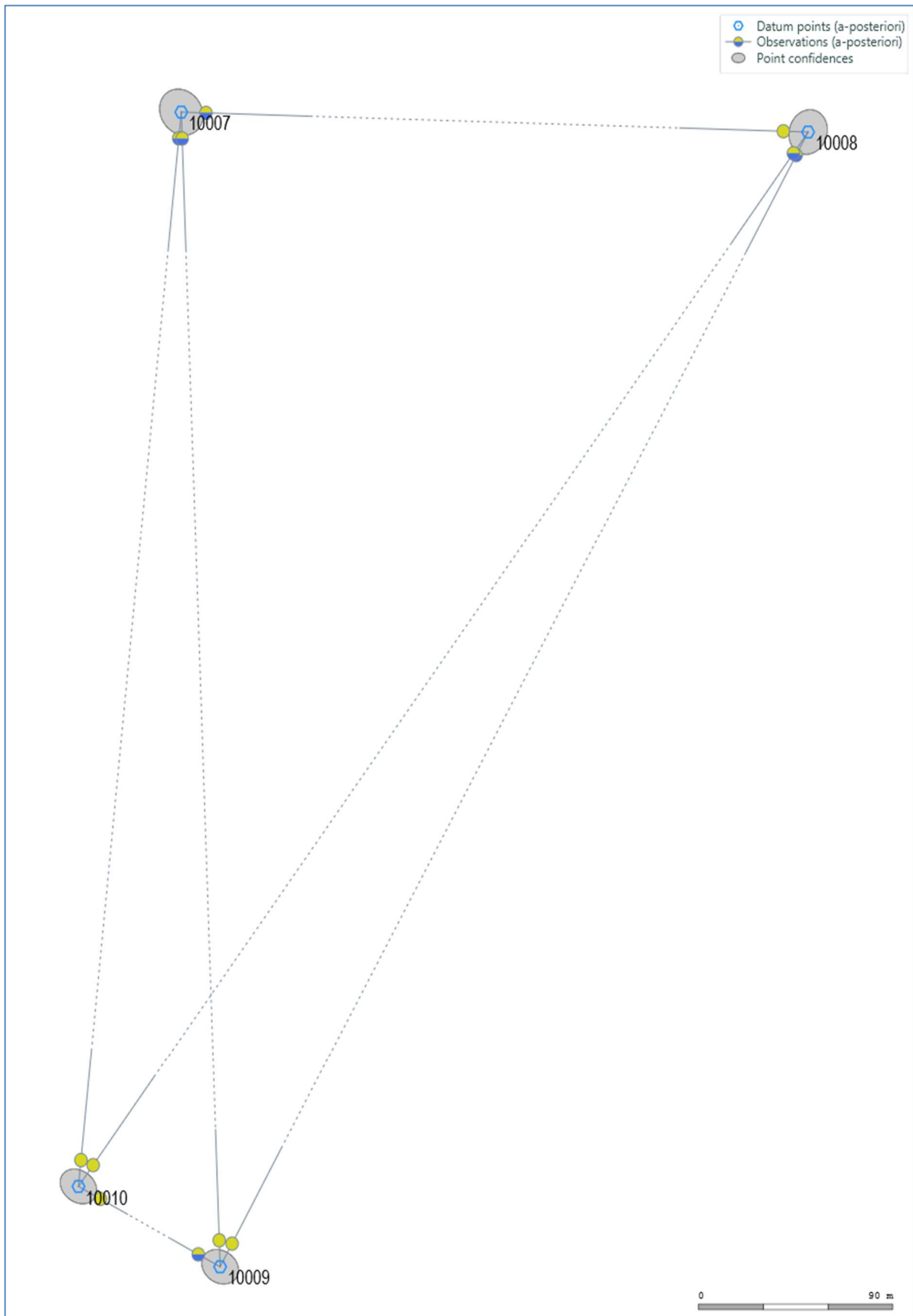
$\sigma_a$	3"
$\sigma_d$	2 mm + 2 ppm
<b>n</b>	1 girus

Tablica 8.20. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 7

broj točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)
<b>10007</b>	0.1	0.1	5.4	4.6
<b>10008</b>	0.1	0.1	5.0	4.3
<b>10009</b>	0.1	0.1	4.5	3.5
<b>10010</b>	0.1	0.1	4.5	3.4

Tablica 8.21. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 7

broj točke	Y (m)	X (m)
<b>10007</b>	402117.3785	4955559.2383
<b>10008</b>	402407.6399	4955550.6006
<b>10009</b>	402135.3710	4955057.3487
<b>10010</b>	402069.7740	4955092.1169



Slika 8.11. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 7



### 8.3.8 Mikro mreža Lipovo Polje (slobodna mreža) – simulacija 8

U tablici 8.22. prikazani su elementi simulacije temeljem kojih je ista napravljena. Skica mreže sa elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000, u odnosu na grafičko mjerilo skice, prikazana je na slici 8.12. U sedmoj simulaciji slobodne mikro mreže Lipovo Polje standardno odstupanje mjerenih pravaca  $\sigma_a$  je 3",  $\sigma_d$  iznosi 2 mm + 2 ppm i mreža je opažana u tri girusa.

Rezultati simulacije s elementima elipse pogrešaka, poluosima  $A$  i  $B$ , kao i standardna odstupanja po osima  $\sigma_y$  i  $\sigma_x$  za svaku točku prikazana su u tablici 8.23. Izjednačene koordinate točaka prikazane su u tablici 8.24.

Tablica 8.22. Elementi simulacije 8

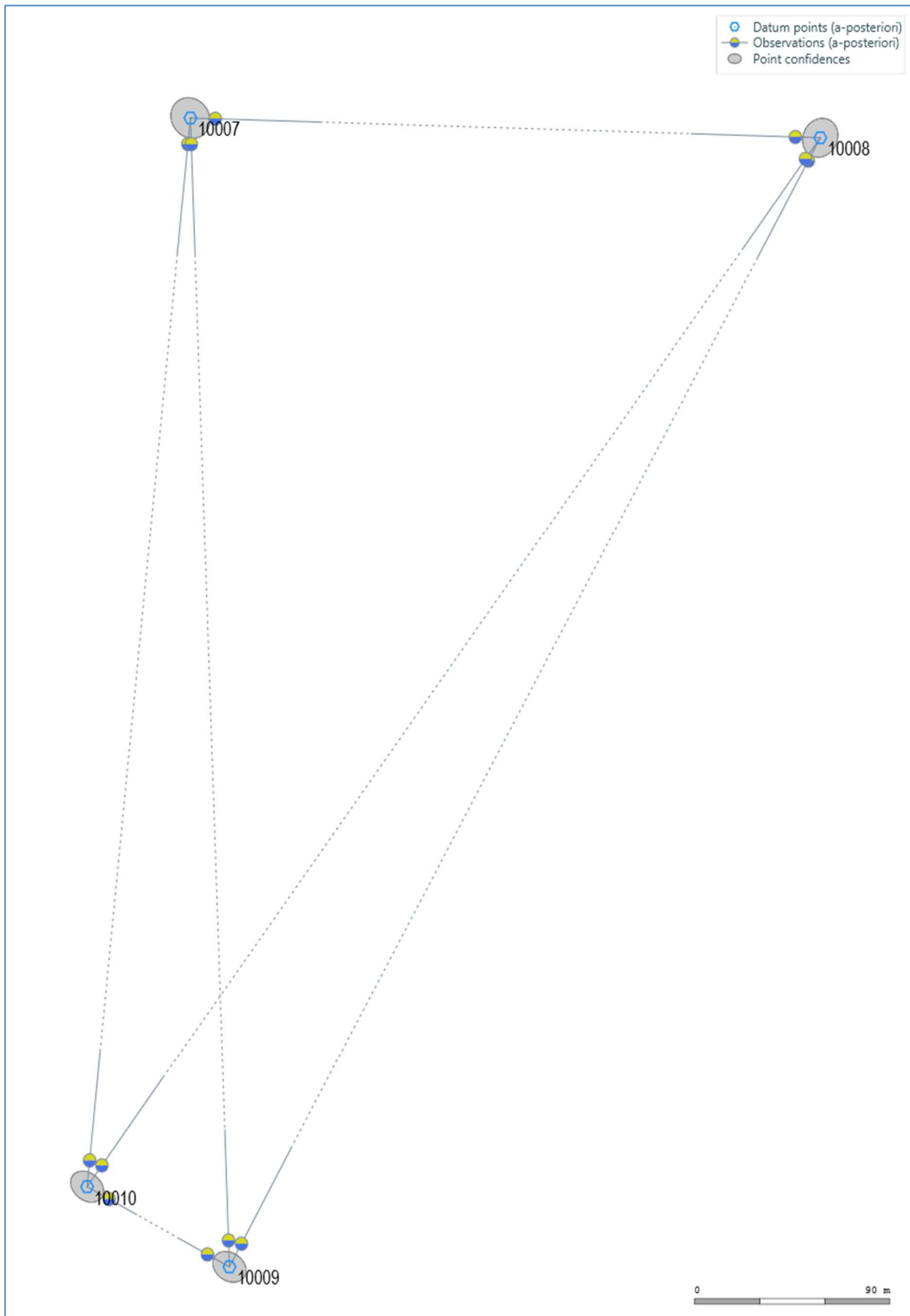
$\sigma_a$	3"
$\sigma_d$	2 mm + 2 ppm
$n$	3 girusa

Tablica 8.23. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 8

broj točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)
10007	0.1	0.1	4.7	4.2
10008	0.1	0.1	4.4	3.9
10009	0.1	0.1	4.1	3.1
10010	0.1	0.1	4.1	3.0

Tablica 8.24. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 8

broj točke	Y (m)	X (m)
10007	402117.3785	4955559.2383
10008	402407.6399	4955550.6006
10009	402135.3710	4955057.3487
10010	402069.7740	4955092.1169



Slika 8.12. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 8

#### 8.4 Izjednačenje portalnih mikro mreža tunela Bakovac - Lika

Kao što je prethodno navedeno, koordinate točaka prije izjednačenja mikro mreža Bakovac i Lipovo Polje određene su statičkim GNSS mjerenjima sa trofrekventnim GNSS uređajem (tablica 8.25.).

Tablica 8.25. Koordinate točaka mikro mreža Bakovac i Lipovo Polje prije izjednačenja

Mreža Bakovac			Mreža Lipovo Polje		
br. točke	Y [m]	X[m]	br. točke	Y [m]	X[m]
<b>10001</b>	400021.8190	4952646.7470	10007	402117.3785	4955559.2383
<b>10002</b>	400077.6600	4952622.2600	10008	402407.6399	4955550.6005
<b>10003</b>	400041.8820	4952395.9830	10009	402135.3711	4955057.3487
<b>10004</b>	399985.0780	4952352.7230	10010	402069.7740	4955092.1170

Točke 10002 i 10004 u mikro mreži Bakovac i točke 10007 i 10010 u mikro mreži Lipovo Polje definirane su kao datumske točke mreže. Mreže su mjerene robotiziranom totalnom stanicom SOKKIA SET05 sa svakog stajališta u tri girusa.

Tablica 8.26. Reducirani Hz pravci mikro mreže Bakovac

Stajalište	Orijentacija	I girus	II girus	III girus
<b>10001</b>	10003	0°00'00"00	0°00'00"00	0°00'00"00
	10004	11°41'49"00	11°41'47"50	11°41'50"00
	10002	298°15'06"80	298°15'05"95	298°15'07"95
<b>10002</b>	10004	0°00'00"00	0°00'00"00	0°00'00"00
	10001	94°43'15"10	94°43'16"25	94°43'14"00
	10003	350°01'41"70	350°01'42"25	350°01'40"60
<b>10003</b>	10002	0°00'00"00	0°00'00"00	0°00'00"00
	10004	223°43'23"85	223°43'24"60	223°43'24"15
	10001	346°26'27"05	346°26'25"85	346°26'26"75
<b>10004</b>	10002	0°00'00"00	0°00'00"00	0°00'00"00
	10003	33°45'06"15	33°45'07"10	33°45'05"60
	10001	348°09'56"80	348°09'57"60	348°09'56"85

Tablica 8.27. Reducirani Hz pravci mikro mreže Lipovo Polje

Stajalište	Orijentacija	I girus	II girus	III girus
<b>10007</b>	10010	0°00'00"00	0°00'00"00	0°00'00"00
	10008	265°53'07"45	265°53'08"65	265°53'09"10
	10009	352°07'40"10	352°07'40"00	352°07'40"75
<b>10008</b>	10009	0°00'00"00	0°00'00"00	0°00'00"00
	10010	7°29'18"95	7°29'21"00	7°29'20"35
	10007	62°48'22"20	62°48'22"50	62°48'23"40
<b>10009</b>	10008	0°00'00"00	0°00'00"00	0°00'00"00
	10010	269°01'36"70	269°01'36"10	269°01'36"30
	10007	329°02'56"55	329°02'55"55	329°02'54"80
<b>10010</b>	10008	0°00'00"00	0°00'00"00	0°00'00"00
	10009	81°32'15"45	81°32'14"30	81°32'16"05
	10007	329°25'53"70	329°25'55"65	329°25'54"30

Model koji je primijenjen u izjednačenju mreže je Gauss-Markovljevi model koji se temelji na matematičkom i statističkom izjednačenju prema metodi najmanjih kvadrata.

Standardno odstupanje mjerenih pravaca  $\sigma_a$  je 0.5",  $\sigma_d$  iznosi 0.8 mm + 1 ppm i mreža je opažana u tri girusa. Rezultat izjednačenja su tražene nepoznanice, što u ovom slučaju predstavljaju koordinate točaka 10001, 10003, 10008 i 10009.

Također, prikazati će se rješenja izjednačenja mikro mreža kao slobodnih mreža, kod kojih u izjednačenje ulaze sve točke mreže.

Polazni podaci za obje mikro mreže prikazani su u tablici 8.28 kao i elementi izjednačenja (tablica 8.29). Izjednačene vrijednosti nepoznanica prikazane su u tablici 8.30. i 8.31.

Tablica 8.28. Polazni podaci za statističke provjere

<b>Nivo vjerojatnosti</b>	0.10 %
<b>Snaga provjere (1-<math>\beta</math>)</b>	80.0 %
<b>Elipsa povjerenja</b>	95 %

Tablica 8.29. Elementi izjednačenja mikro mreža Bakovac i Lipovo Polje

$\sigma_a$	0.5"
$\sigma_d$	0.8 mm + 1 ppm
<b>n</b>	3 girusa

Tablica 8.30. Koordinate točaka mreža Bakovac i Lipovo Polje nakon izjednačenja sa prisilom

Mreža Bakovac			Mreža Lipovo Polje		
br. točke	Y [m]	X[m]	br. točke	Y [m]	X[m]
10001	400021.8192	4952646.7464	10007	402117.3785	4955559.2382
10002	400077.6600	4952622.2600	10008	402407.6397	4955550.6005
10003	400041.8816	4952395.9824	10009	402135.3710	4955057.3488
10004	399985.0780	4952352.7230	10010	402069.7740	4955092.1170

Tablica 8.31. Koordinate točaka mreža Bakovac i Lipovo Polje nakon izjednačenja slobodne mreže

Mreža Bakovac			Mreža Lipovo Polje		
br. točke	Y [m]	X[m]	br. točke	Y [m]	X[m]
10001	400021.8191	4952646.7466	10007	402117.3786	4955559.2384
10002	400077.6599	4952622.2601	10008	402407.6398	4955550.6006
10003	400041.8817	4952395.9828	10009	402135.3710	4955057.3487
10004	399985.0783	4952352.7235	10010	402069.7741	4955092.1168

Nesigurnost položaja točke zbog pogrešaka mjerenja pravaca i duljina moguće je prikazati pomoću elipse pogrešaka. Velika poluos elipse „leži“ u smjeru maksimalno očekivane pogreške, a mala poluos u smjeru minimalno očekivane pogreške. U tablicama 8.32. i 8.33. prikazani su elementi elipse pogrešaka i standardno odstupanje po osima za mikro mrežu Bakovac i Lipovo Polje.

Tablica 8.32. Standardno odstupanje po osima i elementi elipse pogrešaka mikro mreža Bakovac i Lipovo Polje nakon izjednačenja sa prisilom

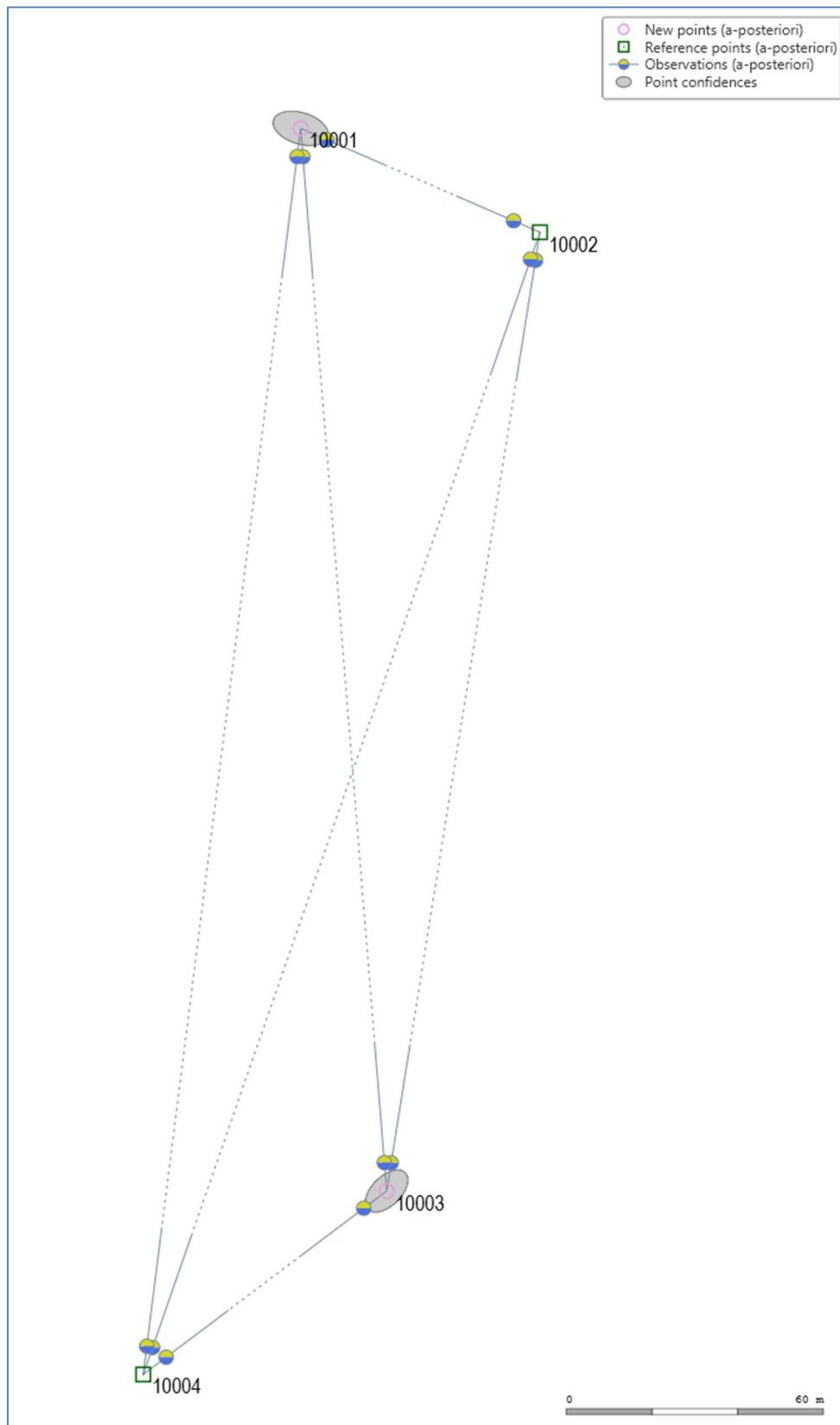
Mreža Bakovac					Mreža Lipovo Polje				
br. točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)	br. točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)
10001	0.2	0.2	2.2	1.2	10008	0.4	0.4	3.0	2.1
10003	0.2	0.2	2.0	1.1	10009	0.4	0.2	2.7	1.3

Tablica 8.33. Standardno odstupanje po osima i elementi elipse pogrešaka mikro mreža Bakovac i Lipovo Polje nakon izjednačenja slobodne mreže

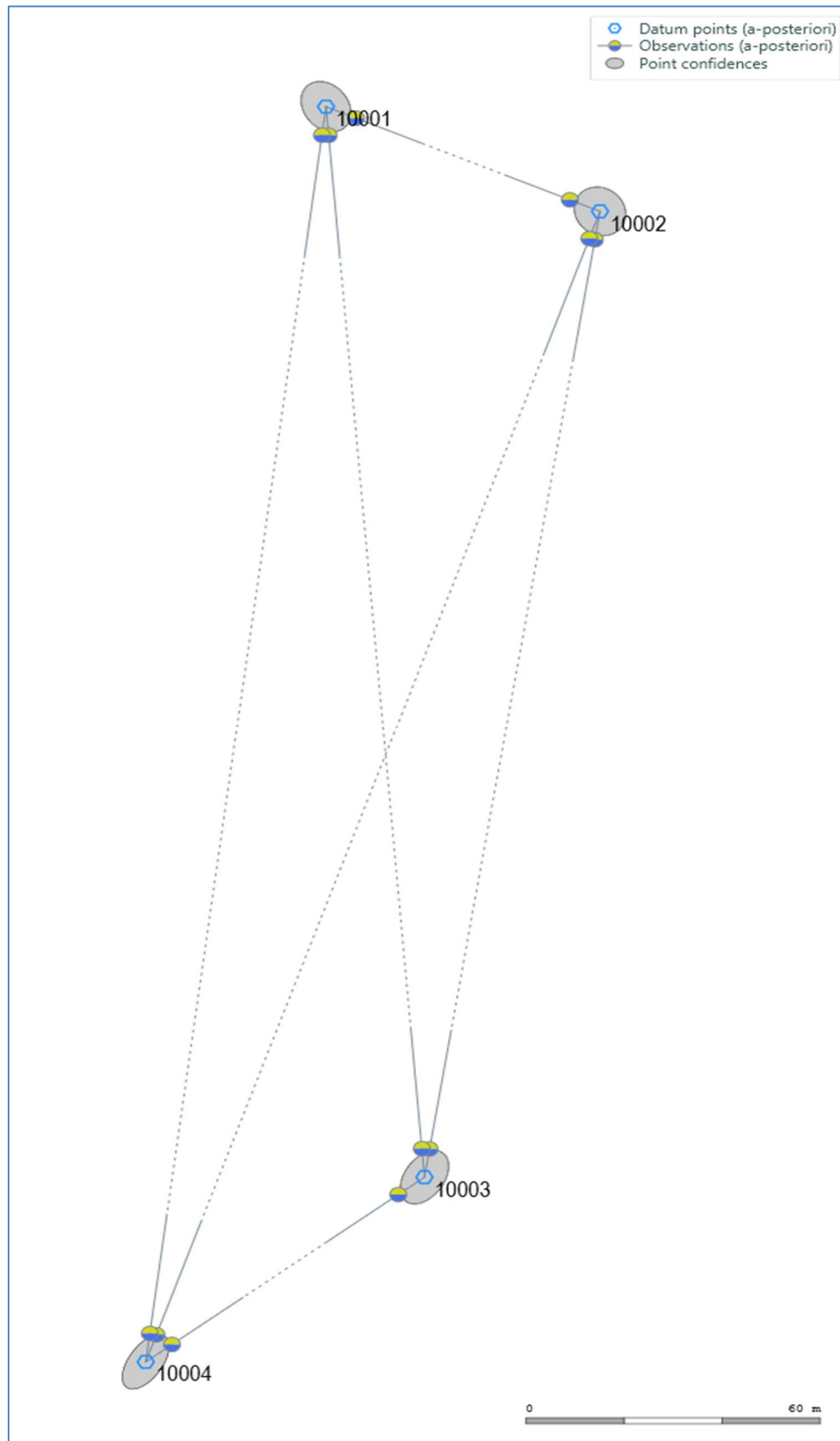
Mreža Bakovac					Mreža Lipovo Polje				
br. točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)	br. točke	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	A (mm)	B (mm)
10001	0.1	0.1	1.2	0.9	10007	0.2	0.2	1.5	1.4
10002	0.1	0.1	1.2	1.0	10008	0.2	0.2	1.6	1.2
10003	0.1	0.1	1.4	0.8	10009	0.2	0.2	1.4	1.2
10004	0.1	0.1	1.4	0.7	10010	0.2	0.2	1.4	1.2

Skice mreža Bakovac i Lipovo Polje sa elipsama pogrešaka nakon izjednačenja prikazana je na sljedećim slikama:

- Slika 8.13. – mreža Bakovac nakon izjednačenja mreže sa prisilom
- Slika 8.14. – mreža Bakovac nakon izjednačenja kao slobodna mreža
- Slika 8.15. – mreža Lipovo Polje nakon izjednačenja mreže sa prisilom
- Slika 8.16. – Mreža Lipovo Polje nakon izjednačenja kao slobodna mreža.

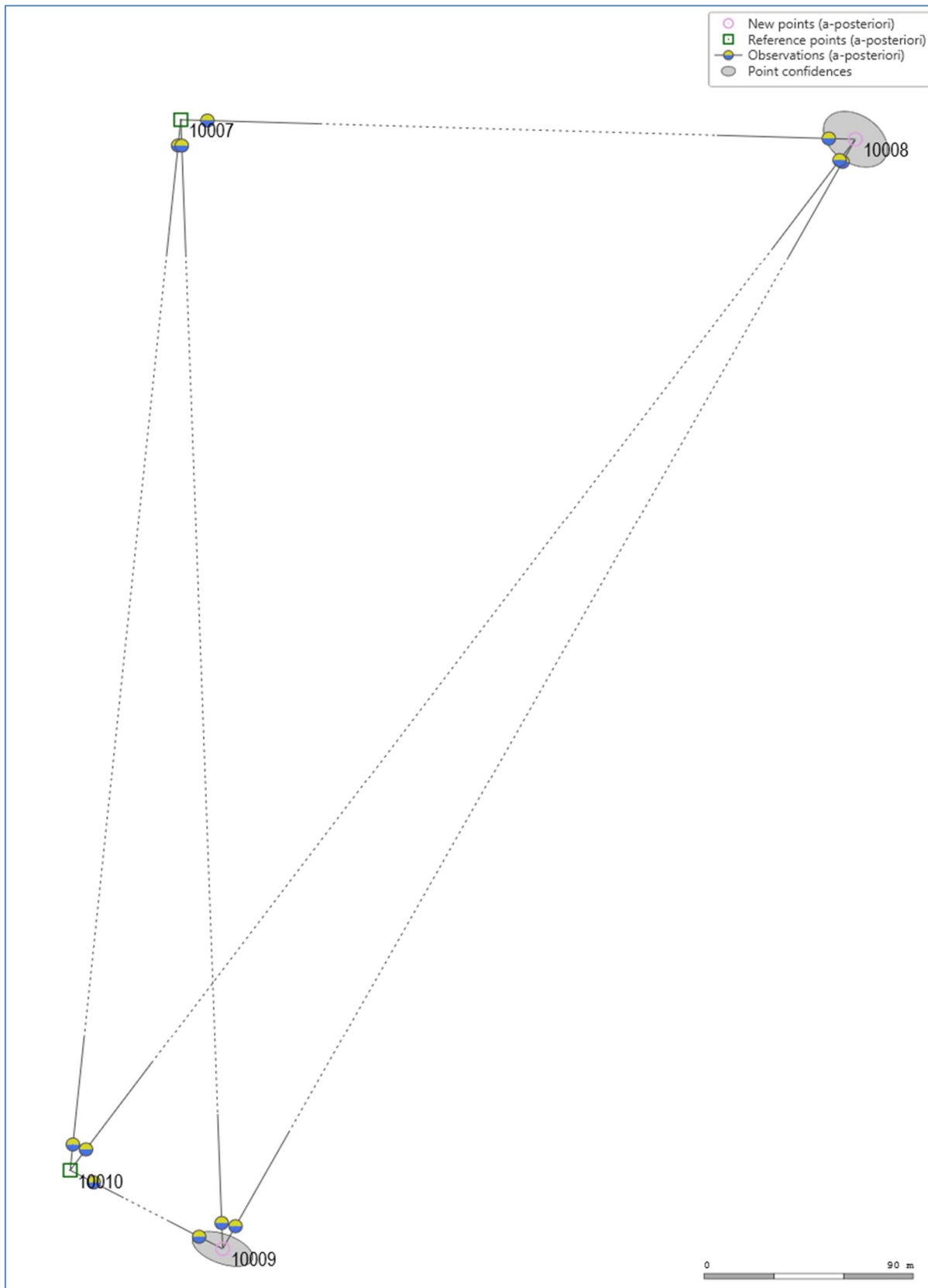


Slika 8.13. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:3000 nakon izjednačenja mreže s prisilom

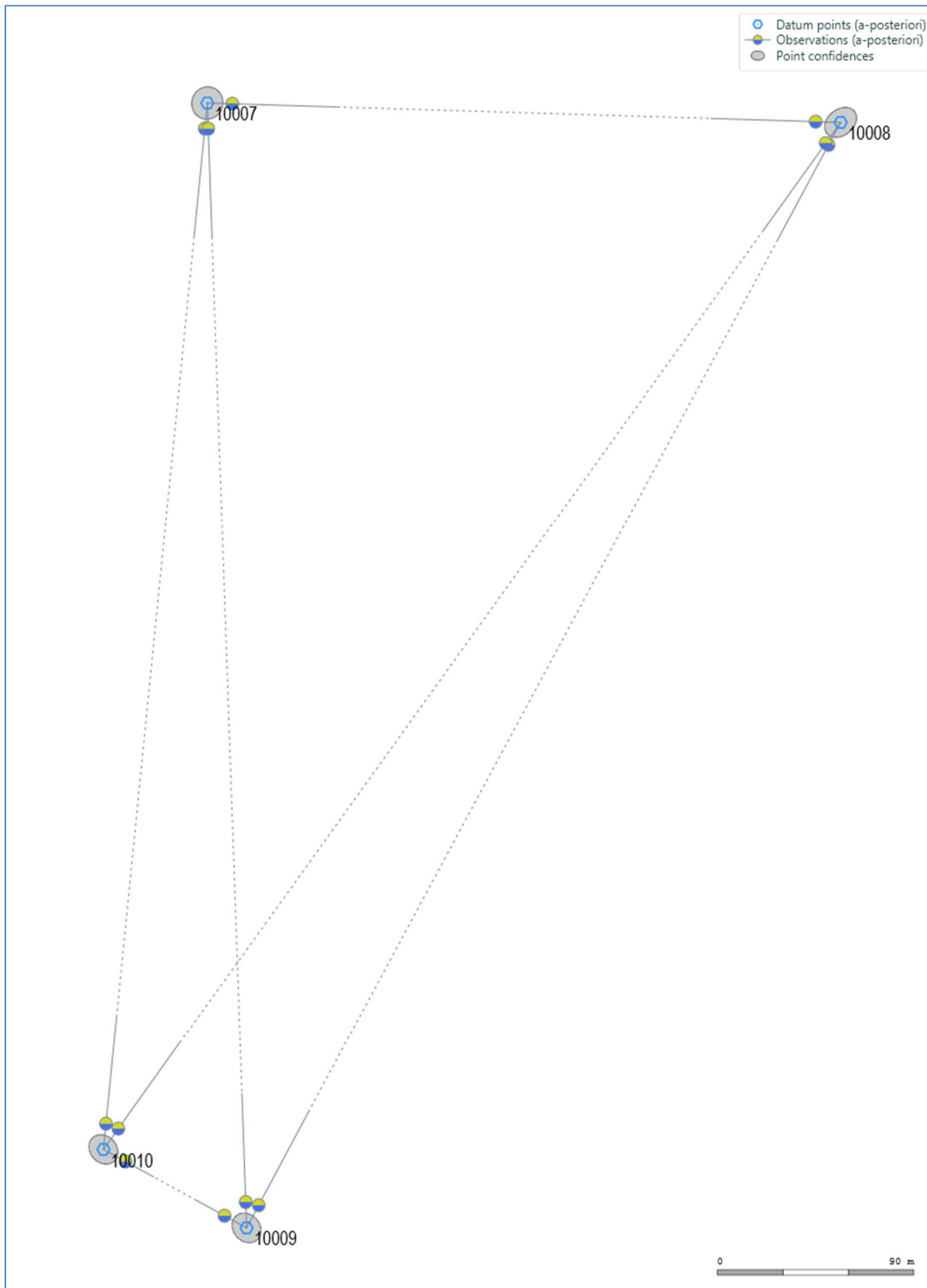


Slika 8.14. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:3000 nakon izjednačenja kao slobodna mreža





Slika 8.15. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:5000 nakon izjednačenja mreže s prisilom



Slika 8.16. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:5000 nakon izjednačenja kao slobodna mreža

## 8.5 Prikaz i usporedba rezultata simuliranih i izjednačenih mreža

Nakon provedenih simulacija i izjednačenja mreže potrebno je usporediti dobivene podatke. U sljedećim tablicama prikazane su usporedbe elemenata elipse pogrešaka, standardna odstupanja mjerenja po osima i izjednačenih vrijednosti nepoznanica (koordinata točaka) za obje mreže.

Tablica 8.34. Usporedba podataka točke **10001** nakon provedenih simulacija i izjednačenja

	Sim 1	Sim 2	Sim 3	Sim 4	Izjednačenje (sa prisilom)	Izjednačenje (slobodno)
$\sigma_y$ (mm)	1.7	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1
$\sigma_x$ (mm)	0.8	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
A (mm)	8.0	4.8	4.0	3.6	2.2	1.2
B (mm)	3.6	1.7	2.9	2.5	1.2	0.9
Y (m)	400021.8194	400021.8193	400021.8192	400021.8192	400021.8194	400021.8191
X (m)	4952646.7464	4952646.7464	4952646.7466	4952646.7466	4952646.7464	4952646.7466

Tablica 8.35. Usporedba podataka točke **10002** nakon provedenih simulacija i izjednačenja

	Sim 1	Sim 2	Sim 3	Sim 4	Izjednačenje (sa prisilom)	Izjednačenje (slobodno)
$\sigma_y$ (mm)	fiksna točka	fiksna točka	0.1	0.1	fiksna točka	0.1
$\sigma_x$ (mm)			0.1	0.1		0.1
A (mm)			4.1	3.7		1.2
B (mm)			2.9	2.0		1.0
Y (m)	400077.6600	400077.6600	400077.6598	400077.6598	400077.6600	400077.6599
X (m)	4952622.2600	4952622.2600	4952622.2602	4952622.2602	4952622.2600	4952622.2601

Tablica 8.36. Usporedba podataka točke **10003** nakon provedenih simulacija i izjednačenja

	Sim 1	Sim 2	Sim 3	Sim 4	Izjednačenje (sa prisilom)	Izjednačenje (slobodno)
$\sigma_y$ (mm)	1.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
$\sigma_x$ (mm)	1.0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
A (mm)	6.5	4.2	4.1	3.5	2.0	1.4
B (mm)	3.9	1.7	2.7	2.5	1.1	0.8
Y (m)	400041.8816	400041.8816	400041.8817	400041.8817	400041.8816	400041.8817
X (m)	4952395.9824	4952395.9824	4952395.9828	4952395.9828	4952395.9824	4952395.9828

Tablica 8.37. Usporedba podataka točke **10004** nakon provedenih simulacija i izjednačenja

	Sim 1	Sim 2	Sim 3	Sim 4	Izjednačenje (sa prisilom)	Izjednačenje (slobodno)
$\sigma_y$ (mm)	fiksna točka	fiksna točka	0.1	0.1	fiksna točka	0.1
$\sigma_x$ (mm)			0.1	0.1		0.1
A (mm)			4.1	3.7		1.4
B (mm)			2.4	2.2		0.7
Y (m)	399985.0780	399985.0780	399985.0783	399985.0783	399985.0780	399985.0783
X (m)	4952352.7230	4952352.7230	4952352.7235	4952352.7235	4952352.7230	4952352.7235

Tablica 8.38. Usporedba podataka točke **10007** nakon provedenih simulacija i izjednačenja

	Sim 5	Sim 6	Sim 7	Sim 8	Izjednačenje (sa prisilom)	Izjednačenje (slobodno)
$\sigma_y$ (mm)	fiksna točka	fiksna točka	0.1	0.1	fiksna točka	0.2
$\sigma_x$ (mm)			0.1	0.1		0.2
A (mm)			5.4	4.7		1.5
B (mm)			4.6	4.2		1.4
Y (m)	402117.3785	402117.3785	402117.3785	402117.3785	402117.3785	402117.3786
X (m)	4955559.2383	4955559.2383	4955559.2383	4955559.2383	4955559.2383	4955559.2384

Tablica 8.39. Usporedba podataka točke **10008** nakon provedenih simulacija i izjednačenja

	Sim 5	Sim 6	Sim 7	Sim 8	Izjednačenje (sa prisilom)	Izjednačenje (slobodno)
$\sigma_y$ (mm)	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4	0.2
$\sigma_x$ (mm)	0.2	0.3	0.1	0.1	0.4	0.2
A (mm)	11.7	10.2	5.0	4.4	3.0	1.6
B (mm)	6.7	6.0	4.3	3.9	2.1	1.2
Y (m)	402407.6399	402407.6399	402407.6399	402407.6399	402407.6397	402407.6398
X (m)	4955550.6006	4955550.6006	4955550.6006	4955550.6006	4955550.6005	4955550.6006

Tablica 8.40. Usporedba podataka točke **10009** nakon provedenih simulacija i izjednačenja

	Sim 5	Sim 6	Sim 7	Sim 8	Izjednačenje (sa prisilom)	Izjednačenje (slobodno)
$\sigma_y$ (mm)	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4	0.2
$\sigma_x$ (mm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
A (mm)	8.6	7.7	4.5	4.1	2.7	1.4
B (mm)	4.3	3.4	3.5	3.1	1.3	1.2
Y (m)	402135.3711	402135.3711	402135.3710	402135.3710	402135.3710	402135.3710
X (m)	4955057.3487	4955057.3487	4955057.3487	4955057.3487	4955057.3488	4955057.3487

Tablica 8.41. Usporedba podataka točke **10010** nakon provedenih simulacija i izjednačenja

	Sim 5	Sim 6	Sim 7	Sim 8	Izjednačenje (sa prisilom)	Izjednačenje (slobodno)
$\sigma_y$ (mm)	fiksna točka	fiksna točka	0.1	0.1	fiksna točka	0.2
$\sigma_x$ (mm)			0.1	0.1		0.2
A (mm)			4.5	4.1		1.4
B (mm)			3.4	3.0		1.2
Y (m)	402069.7740	402069.7740	402069.7740	402069.7740	402069.7740	402069.7741
X (m)	4955092.1170	4955092.1170	4955092.1169	4955092.1169	4955092.1170	4955092.1168

## 9. ZAKLJUČAK

Geodetske mreže tvore osnovu za mnoge geodetske i građevinsko-tehničke zadatke. Obično je svaka mreža definirana putem redundantnih mjerenja, što znači da je provedeno više mjerenja nego što je potrebno za jednostavnu definiciju mreže. Ta redundantna mjerenja su ključna za izjednačavanje mreže jer poboljšavaju njenu točnost i pouzdanost.

Geodetske mreže za posebne namjene se projektiraju, mjere, obrađuju i izjednačavaju kao zasebne mreže, tako da nehomogenost državne mreže odnosno državnog koordinatnog sustava ili neke druge mreže ne utječe na njihove koordinate i točnost. Svrha takvih mreža je očuvati relativne odnose između točaka, tj. postići homogenost i izotropnost. Projektom mreže nastoji se pronaći optimalno rješenje koje će zadovoljiti sve postavljene zahtjeve preciznosti i točnosti. Vrlo važan aspekt je i ekonomičnost mreže, stoga mjerenja treba izvoditi onoliko precizno koliko je to potrebno. Sukladno tome biraju se mjerne metode čija primjena osigurava unaprijed postavljene zahtjeve točnosti.

U okviru ovog rada nastojalo se teorijski pokazati suvremene načine obrade i izjednačenja 2D geodetskih mreža i to isto praktično pokazati na primjeru Tunela Bakovac – Lika. Za prikaz praktične primjene korišten je programski paket JAG3D za izjednačenje geodetskih mreža.

Primjena JAG3D softvera omogućila je detaljnu analizu kvalitete geodetske mreže. Kroz niz simulacija i izjednačenja mreže na temelju konkretnih mjerenja, dokazano je da mreža postaje pouzdanija, tj. „jača“ kada se koriste precizniji instrumenti i veći broj mjerenja. Dobiveni podaci su pokazali visoku točnost i pouzdanost mreže što je osigurano korištenjem vrhunskog instrumentarija i povećanjem broja mjerenja.

Također, iz prikazanih rezultata vidljivo je da definiranje mreže bez uvođenja bespogrešnih koordinata točaka, tj. bez prisile pouzdanija i točnija. Izjednačenje mreže sa prisilom provodimo kako bi provjerili kvalitetu mjerenih podataka i prisutnost grubih pogrešaka, a ne provjerava se potencijalna pogreška vezana uz netočnost koordinata fiksnih točaka. U slobodnoj geodetskoj mreži datum mreže je definiran „unutarnjim prisilama“ čime se sačuva geometrija mreže i sve točke ulaze u izjednačenje. Time sve točke doprinose definiciji datuma.

Daljnja istraživanja mogla bi se usmjeriti na testiranja za još precizniju analizu geodetskih mreža, kao i na primjenu sličnih metoda u drugim područjima inženjerske geodezije. Ovim radom potvrđena je sinergija između tradicionalnih geodetskih metoda i suvremenih softverskih rješenja, što otvara nove mogućnosti za unapređenje kvalitete i efikasnosti geodetskih radova u složenim infrastrukturnim projektima .

## LITERATURA

1. Benčić, D. (1990): Geodetski instrumenti, Školska knjiga – Zagreb.
2. Charzanowski, A. (1981): Optimization of the Breakthrough Accuracy in Tunneling Surveys, *The Canadian Surveyor* 35, 1, 5-16.
3. Grgić, I., Rezo, M. i Šabić Grgić, N. (2013): Specifičnosti geodetske osnove i mjenjenih metoda u graditeljstvu, // Neiskorišteni potencijali geodezije, Napuštena i nova područja djelovanja. str. 105-112.
4. Grgić, I. i dr. (2008): Varijacije mikromreže u svrhu uspostave geodetske osnove za potrebe tunelogradnje, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
5. Grgić, I., Kapović, Z. i Šabić Grgić, N. (2007): Primjena GPS-a na uspostavi geodetske osnove za potrebe tunelogradnje, *Geodetski list*, 61 (84) (2), 113-127.
6. Ilijaš, L. (2018): Nova austrijska tunelska metoda, diplomski rad, Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
7. Lasić, Z. (2008): Praktični rad s geodetskim instrumentima – skripta, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
8. Maksimović, J. i dr. (2018): High precision geodetic works in the tunnel breakthrough process, Fakultet tehničkih znanosti, Sveučilište Novi Sad, Srbija.
9. Novaković, G. (2004): Geodetske mreže posebnih namjena-interna skripta, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
10. Novaković, G., Marendić, A. i Orešković, V. (2014): Quality Control of the Reference Network of the Tunnel Mala Kapela using the Standards for Expressing Geospatial Positional Accuracy, // *Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Surveying - INGEO 2014*
11. Paar R., (2021): Inženjerska geodezija u graditeljstvu-interna skripta, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
12. Paar, R. (2006): Uspostava geodetske osnove za posebne namjene, magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
13. Paar, R., Kapović, Z. i Marendić, A. (2005): Geodetske osnove za posebne namjene // Treći Hrvatski kongres o katastru. Zbornik radova / Medak, D., Pribičević, B. i Nikolić, P. (ur.). Zagreb: Hrvatsko geodetsko društvo, 297-304.
14. Zrinjski, M., Džapo, M. i Redovniković, L. (2006): Underground geodetic basis of the tunnel „Mala Kapela“ // *Proceedings of the XXIII International FIG Congress / Gollwitzer, Th., Hillinger, K. i Villikka, M. (ur.). München: Bavarian State Office for Surveying and Geo Information, 1-17.*



## POPIS URL-ova

- URL 1. <https://4traveler.me/en/travel/cairo/pyramids-giza-walkthrough-area> (14.3.2024.)
- URL 2. <https://www.wantedinrome.com/news/romes-ancient-aqueducts.html> (14.3.2024.)
- URL 3. <https://answers.khi.co.jp/en/archive/tunnel-boring-machines/> (16.3.2024.)
- URL 4. <https://www.ulmaconstruction.com/en-us/construction-projects/infrastructure-civil-works/tunnels/tunnel-extension-terrassa-spain> (16.03.2024.)
- URL 5. <https://www.crossrail.co.uk/project/tunnelling/meet-our-giant-tunnelling-machines/> (17.3.2024.)
- URL 6. <https://trenchlesstechnology.com/experience-key-pennsylvania-intake-project/> (17.3.2024.)
- URL 7. <https://bestsupportunderground.com/natm-shotcrete/> (17.3.2024.)
- URL 8. <https://software.applied-geodesy.org/en/> (19.12.2023.)
- URL 9. <https://www.capitalsurveyingsupplies.com/sokkia-net05ax-net1ax-3d-stations/> (12.06.2024.)

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Prikaz brdskog i podvodnog tunela.....	2
Slika 2.2. Grand Gallery tunel u Velikoj piramidi (URL 1) .....	3
Slika 2.3. Primjer akvadukta „Aqua Claudia“, 38. st. pr. Kr. (URL 2).....	4
Slika 2.4. Proboj prve cijevi Channel Tunnel-a TBM-om (URL 3) .....	5
Slika 2.5. Cut and cover metoda izgradnje tunela, „bottom-up“ pristup (URL 4).....	6
Slika 2.6. TBM metoda izgradnje tunela (URL 5).....	7
Slika 2.7. Spuštanje TBM-a u okno tunela (URL 6).....	8
Slika 2.8. Schema NATM metode tunelogradnje (URL 7).....	9
Slika 2.9. Postavljanje završne obloge tunela špricanim betonom (URL 7).....	10
Slika 3.1. Homogena (a), izotropna (b) te homogena i izotropna (c) geodetska osnova .....	12
Slika 3.2. Protočna hidroelektrana Chief Joseph dam.....	14
Slika 3.3. Skica stabilizacije točke .....	15
Slika 3.4. GNSS opažanje referente točke geodetske mreže za posebne namjene .....	16
Slika 4.1. (a) netočno i neprecizno, (b)precizno a netočno, (c) točno a neprecizno, (d) točno i precizno .....	17
Slika 4.2. Korekcije i redukcije mjerene dužine (Lasić 2008.).....	22
Slika 5.1. Elipsa pogrešaka .....	27
Slika 5.2. Položajna nesigurnost točaka mreže – konvencionalni datum .....	30
Slika 6.1. Prikaz odstupanja po osima pri proboju tunela (Paar, 2021).....	33
Slika 6.2. Elipsa pogrešaka (Paar, 2021).....	33
Slika 6.3. Geodetska kontrola tunelskih profila .....	35
Slika 6.4. Prikaz kontrolnog profila u tunelu .....	37
Slika 7.1. GNSS prijemnici Trimble R8 i Stonex S900A .....	40
Slika 7.2. Mikrotriangulacijska mreža Bakovac (a) i Lipovo polje (b).....	41
Slika 7.3. Robotizirana mjerna stanica Sokkia NET05 (URL9) .....	42
Slika 8.1. Postavljanje projekcije, parametara referentnog elipsoida i odabir redukcija u aplikaciji.....	45
Slika 8.2. Prikaz unosa podataka zapisanih u CSV datoteci .....	46
Slika 8.3. Prikaz unosa podataka girusnih mjerenja.....	47
Slika 8.4. Prikaz unosa standardnog odstupanja mjerenih veličina .....	48
Slika 8.5. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:1000 nakon simulacije 1	50
Slika 8.6. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 2	52

Slika 8.7. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 3	54
Slika 8.8. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 4	56
Slika 8.9. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:1000 nakon simulacije 5	58
Slika 8.10. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 6	60
Slika 8.11. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 7	62
Slika 8.12. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:2000 nakon simulacije 8	64
Slika 8.13. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:3000 nakon izjednačenja mreže s prisilom	69
Slika 8.14. Prikaz mreže Bakovac s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:3000 nakon izjednačenja kao slobodna mreža	70
Slika 8.15. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:5000 nakon izjednačenja mreže s prisilom	71
Slika 8.16. Prikaz mreže Lipovo Polje s elipsama pogrešaka u mjerilu 1:5000 nakon izjednačenja kao slobodna mreža	72

**POPIS TABLICA**

<i>Tablica 5.1. Datumski parametri i defekt datuma geodetskih mreža</i> .....	29
<i>Tablica 5.2. Minimalni broj parametara za određivanje datuma – minimalna prisila</i> .....	30
<i>Tablica 7.1. Tehničke karakteristike korištenih GNSS uređaja</i> .....	40
<i>Tablica 7.2. Tehničke karakteristike mjerne stanice Sokkia NET05</i> .....	42
<i>Tablica 8.1. Elementi simulacije 1</i> .....	49
<i>Tablica 8.2. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 1</i> .....	49
<i>Tablica 8.3. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 1</i> .....	49
<i>Tablica 8.4. Elementi simulacije 2</i> .....	51
<i>Tablica 8.5. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 2</i> .....	51
<i>Tablica 8.6. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 2</i> .....	51
<i>Tablica 8.7. Elementi simulacije 3</i> .....	53
<i>Tablica 8.8. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 3</i> .....	53
<i>Tablica 8.9. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 3</i> .....	53
<i>Tablica 8.10. Elementi simulacije 4</i> .....	55
<i>Tablica 8.11. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 4</i> .....	55
<i>Tablica 8.12. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 4</i> .....	55
<i>Tablica 8.13. Elementi simulacije 5</i> .....	57
<i>Tablica 8.14. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 5</i> .....	57
<i>Tablica 8.15. Koordinate točaka mikro mreže Lipovo Polje nakon simulacije 5</i> .....	57
<i>Tablica 8.16. Elementi simulacije 6</i> .....	59
<i>Tablica 8.17. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 6</i> .....	59
<i>Tablica 8.18. Koordinate točaka mikro mreže Lipovo Polje nakon simulacije 6</i> .....	59
<i>Tablica 8.19. Elementi simulacije 7</i> .....	61
<i>Tablica 8.20. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 7</i> .....	61
<i>Tablica 8.21. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 7</i> .....	61
<i>Tablica 8.22. Elementi simulacije 8</i> .....	63

<i>Tablica 8.23. Standardna odstupanja po osima i elementi elipse pogrešaka nakon simulacije 8</i>	63
<i>Tablica 8.24. Koordinate točaka mikro mreže Bakovac nakon simulacije 8</i>	63
<i>Tablica 8.25. Koordinate točaka mikro mreža Bakovac i Lipovo Polje prije izjednačenja</i>	65
<i>Tablica 8.26. Reducirani Hz pravci mikro mreže Bakovac</i>	65
<i>Tablica 8.27. Reducirani Hz pravci mikro mreže Lipovo Polje</i>	66
<i>Tablica 8.28. Polazni podaci za statističke provjere</i>	66
<i>Tablica 8.29. Elementi izjednačenja mikro mreža Bakovac i Lipovo Polje</i>	67
<i>Tablica 8.30. Koordinate točaka mreža Bakovac i Lipovo Polje nakon izjednačenja sa prisilom</i>	67
<i>Tablica 8.31. Koordinate točaka mreža Bakovac i Lipovo Polje nakon izjednačenja slobodne mreže</i>	67
<i>Tablica 8.32. Standardno odstupanje po osima i elementi elipse pogrešaka mikro mreža Bakovac i Lipovo Polje nakon izjednačenja sa prisilom</i>	68
<i>Tablica 8.33. Standardno odstupanje po osima i elementi elipse pogrešaka mikro mreža Bakovac i Lipovo Polje nakon izjednačenja slobodne mreže</i>	68
<i>Tablica 8.34. Usporedba podataka točke 10001 nakon provedenih simulacija i izjednačenja</i>	73
<i>Tablica 8.35. Usporedba podataka točke 10002 nakon provedenih simulacija i izjednačenja</i>	73
<i>Tablica 8.36. Usporedba podataka točke 10003 nakon provedenih simulacija i izjednačenja</i>	74
<i>Tablica 8.37. Usporedba podataka točke 10004 nakon provedenih simulacija i izjednačenja</i>	74
<i>Tablica 8.38. Usporedba podataka točke 10007 nakon provedenih simulacija i izjednačenja</i>	75
<i>Tablica 8.39. Usporedba podataka točke 10008 nakon provedenih simulacija i izjednačenja</i>	75
<i>Tablica 8.40. Usporedba podataka točke 10009 nakon provedenih simulacija i izjednačenja</i>	76
<i>Tablica 8.41. Usporedba podataka točke 10010 nakon provedenih simulacija i izjednačenja</i>	76

## PRILOZI

- Prilog 1 – Mikro mreža Bakovac (sa prisilom) – simulacija 1
  - Prilog 2 – Mikro mreža Bakovac (sa prisilom) – simulacija 2
  - Prilog 3 – Mikro mreža Bakovac (slobodna mreža) – simulacija 3
  - Prilog 4 – Mikro mreža Bakovac (slobodna mreža) – simulacija 4
  - Prilog 5 – Mikro mreža Lipovo Polje (sa prisilom) – simulacija 5
  - Prilog 6 – Mikro Mreža Lipovo Polje (sa prisilom) – simulacija 6
  - Prilog 7 – Mikro mreža Lipovo Polje (slobodna mreža) – simulacija 7
  - Prilog 8 – Mikro mreža Lipovo Polje (slobodna mreža) – simulacija 8
  - Prilog 9 – Izjednačenje mikro mreže Bakovac (sa prisilom)
  - Prilog 10 – Izjednačenje mikro mreže Bakovac (slobodna mreža)
  - Prilog 11 – Izjednačenje mikro mreže Lipovo Polje (sa prisilom)
  - Prilog 12 – Izjednačenje mikro mreže Lipovo Polje (slobodna mreža)
- \* Svi prilozi su dani na slijedećem linku:

[Diplomski rad, 2024](#)

## ŽIVOTOPIS



## Marko Brozović

Datum rođenja: 24 tra 1985

Državljanstvo: hrvatsko

### KONTAKT

Bencetići 2A, Draganić,  
47000 Karlovac, Hrvatska  
(Kućna)

brozovic.m@gmail.com

(+385) 998199577



### RADNO ISKUSTVO

**1 VELJ 2015 – TRENUTAČNO** Karlovac, Hrvatska

**Geodetski tehničar** Ured ovlaštenog inženjera geodezije Damir Movre

- radovi vezani uz katastar zemljišta, katastar infrastrukture i katastar nekretnina
- radovi vezani uz inženjersku geodeziju
- izrada geodetskih elaborata

### OBRAZOVANJE I OSPOSOBLJAVANJE

**RUJ 2021 – SRP 2024** Zagreb, Hrvatska

**mag.ing.geod et geoinf.** Geodetski fakultet

Internetske stranice <https://www.geof.unizg.hr/>

**RUJ 2018 – SRP 2021** Zagreb, Hrvatska

**univ.bacc.ing.geod. et geoinf.** Geodetski fakultet

Internetske stranice <https://www.geof.unizg.hr/>

**RUJ 1999 – LIP 2003** Duga Resa, Hrvatska

**Opća gimnazija** Opća gimnazija Duga Resa

Internetske stranice <http://ss-duga-resa.skole.hr/>

### JEZIČNE VJEŠTINE

**MATERINSKI JEZIK/JEZICI:** hrvatski

Drugi jezici:

engleski

Slušanje B2

Čitanje B2

Pisanje B1

Govorna produkcija B1

Govorna interakcija B1

njemački

Slušanje A2

Čitanje A2

Pisanje A2

Govorna produkcija A2

Govorna interakcija A2

Razine: A1 i A2: temeljni korisnik; B1 i B2: samostalni korisnik; C1 i C2: iskusni korisnik

### DIGITALNE VJEŠTINE

Autocad | MS Office (Word Excel PowerPoint) | Komunikacijski programi (Skype Zoom TeamViewer) | Timski rad | Prilagodljivost | S lakocom prihvacam i rjesavam nove izazove kroz koje napredujem

### VOZAČKA DOZVOLA

Vozačka dozvola: AM

Vozačka dozvola: B

Vozačka dozvola: BE