

Primljeno / Recived: 03.10.2019.
Prihvaćeno / Accepted: 26.11.2019.

UDK 528.526.6
Stručni rad / Professional article

ŽIROSKOPSKI SISTEMI ZA ORIJENTACIJU TAČAKA PODZEMNE GEODETSKE OSNOVE

GYROSCOPIC SYSTEMS FOR THE ORIENTATION OF THE UNDERGROUND GEODETIC NETWORK POINTS

Seat Yakup Kurtović, Slavica Matić

SAŽETAK

Podzemna geodetska mjerenja se dosta razlikuju od mjerenja na površini zemlje. U tunelima i rudnicima može biti vruće, vlažno, tamno, skućeno, prašnjavo, prljavo i opasno, a obično je u pitanju većina navedenog. Bitan problem kod podzemnih geodetskih mjerenja je orijentisanje prema površinskim mjerenjima, što se često obavlja upotrebom žiroteodolita.

Ključne riječi: žiroskopski sistemi, žiroteodolit, metode opažanja

ABSTRACT

Underground geodetic measurements are quite different from the surface measurements. In tunnels and mines could be hot, humid, dark, cramped, dusty, dirty and dangerous (most of the above is usually present). Important problem with underground surveying is an orientation based on surface measurements, which is often done by using gyrotheodolite.

Keywords: gyroscopic systems, gyrotheodolite, observation methods

1 UVOD

U podzemnom transportnom sistemu, tuneli se koriste za spajanje kosih ili vertikalnih okana (tačke na površini za ulaz u transportni sistem), čiji su relativni položaji određeni površinskim mjerenjima. Zbog toga se podzemna kontrolna mreža mora povezati i orijentisati u istom koordinatnom sistemu kao i površinska mreža. I kod projektovanja, i kod eksploatacije, kao i nakon eksploatacije mineralnih sirovina, dužnost geodeta svodi se na precizno pozicioniranje mnoštva točaka, a ono je moguće samo ako postoji geodetska mreža sa koje se vrši pozicioniranje (Mulahusić i dr., 2019).

Da bi se ovo postiglo, moraju se odrediti koordinate najmanje jedne podzemne tačke, kao i orijentacija (eng. *bearing*) barem jedne strane podzemne mreže u odnosu na nadzemnu mrežu. Ako je ulaz u podzemni tunnelski sistem pomoću kosog okna, onda se površinska mjerenja mogu jednostavno produžiti i nastaviti kroz okno u tunel, obično metodom poligonskog vlaka. Posebna pažnja je potrebna prilikom mjerenja horizontalnih pravaca, zbog strmog nagiba vizure i prilikom temperaturnih korekcija mjerenih udaljenosti zbog pojave geotermalnog gradijenta.

Ako je ulaz pomoću vertikalnog okna, onda se koriste optičke, mehaničke i žiroskopske metode orijentacije (Schofield i Breach, 2007).

2 ŽIROTEODOLIT

Alternativa korištenju klasičnih mehaničkih metoda prijenosa direkcionog ugla s površine pod zemlju je orijentacija podzemne mreže žiroteodolitom. Žiroskop služi za određivanje pravca sjevera i integrisan je sa teodolitom, a upotrebljava se za orijentaciju podzemnih baznih linija u odnosu na stvarni sjever.

Teodolit je instrument kojim se mjere razlike orijentisanih pravaca, tj. uglovi između viziranih tačaka. Iako se mjere uglovi, obično su potrebni direkcioni ugao (u odnosu na x osu referentnog 2D pravouglog koordinatnog sistema) ili azimut (u odnosu na pravi sjever). Obješeni žiroskop je uređaj koji se može priključiti na teodolit s ciljem mjerenja azimuta, kako bi se npr. kontrolisao slijepi poligonski vlak u rudniku ili tunelu.

Žiroskopski azimut je azimut određen žiroteodolitom. Ako je žiroteodolit prethodno kalibrisan na strani s poznatim astronomskim azimutom, onda je žiroskopski azimut efektivno isti kao i astronomski azimut, jer su oba (i astronomski i žiroskopski sjever) definisani u pogledu lokalnog vertikala i trenutne ose rotacije Zemlje (Schofield i Breach, 2007).

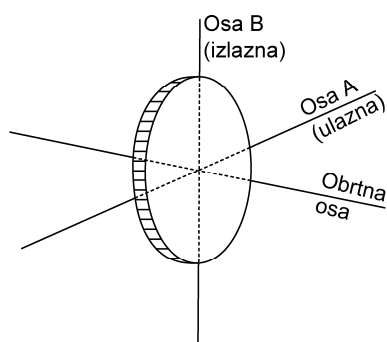
2.1 Žiroskop

Žiroskop je uređaj koji teži održavanju svoje orijentacije u inercijalnom prostoru. Uobičajen oblik žiroskopa je masa koja se vrti, obično točak ili disk, okrećući se oko ose. Osnovna ideja žiroskopa poznata je bilo kome ko se igrao sa dječijom čigrom. Međutim, njegov značaj sa gledišta geodete je u tome što spoljašnje sile, poput Zemljine rotacije, na žiroskop djeluju tako da se on može koristiti kao instrument za traženje sjevera. Za razliku od magnetskih uređaja, žiroskopski uređaji traže pravi sjever umjesto magnetnog. Oni su obično tačniji od kompasa i oslobođeni su uticaja magnetnih anomalija. Žiroskopski uređaji su posebno korisni u rudnicima i tunelima, gdje se mogu koristiti za određivanje azimuta u dubokim oknima i održavanje orijentacije kod dugih podzemnih vlakova. Ovi uređaji su visoko razvijeni za potrebe vojske, posebno za upotrebu u artiljeriji i kod navođenja projektila (Kennie i Petrie, 2010).

2.2 Principi žiroskopskih metoda

Oko 100 godina nakon što je Euler proučavao ponašanje vrtećih rotora, francuski fizičar Foucault je 1850-tih izveo eksperiment u Pariškoj opservatoriji. Otkrio je da bi duga, teška klatna koja se postave da osciliraju u ravni sjever-jug održavala ovu orijentaciju fiksirano u prostoru, iako će posmatraču izgledati da ravan oscilacije rotira u odnosu na Zemlju. Foucault je takođe shvatio da će točak koji se brzo rotira i koji je prikačen na kardanske okvire, takođe održati svoju osu rotacije fiksiranom u prostoru, ali demonstracija ovoga je morala čekati 50 godina, do razvoja elektromotora (Kennie i Petrie, 2010).

Foucaultova ideja je pretočena u stvarnost zahvaljujući Hermann Anschütz-Kaempfeu, koji je predlagao putovanje podmornicom ispod sjeverne polarne ledene kape, gdje magnetski kompas ne bi bili od koristi. Nakon toga su uslijedili drugi uređaji za navigaciju, pri čemu je većina ranih radova provođena u Njemačkoj. Uporedo s time započela su istraživanja o mogućnostima primjene ove tehnologije za geodetske poslove. Ipak, zbog veličine i mase ranih uređaja, oni su bili vrlo malo praktično korišteni od strane geodeta na terenu. Godine 1959, profesor O. Rellensmann, primjenom malih žiromotora razvijenih za upotrebu u inercijalnim navigacijskim sistemima aviona, predložio je upotrebu žiro dodatka koji je bio mali i dovoljno lagan da se montira na standardni teodolit.



Slika 1. Šematski prikaz žiroskopa (prema: Kennie i Petrie, 2010, str. 87)

Mehanički žiroskop ima tri međusobno okomite osi (Slika 1), koje se nazivaju obrtna os, ulazna os i izlazna os. Obrtna os sadrži disk, točak ili sferu koji se okreću pri brzinama od 20 000 – 30 000 obrtaja u minuti oko ove osi.

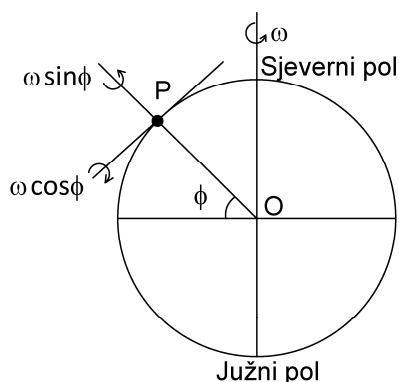
Ako se pokuša nageti obrtna os kada je žiroskop dostigao radnu brzinu, primjenom rotacije oko ulazne osi, osjetit će se otpor i žiro uređaj će reagovati rotacijom ili precesijom oko izlazne osi. Precesija oko izlazne osi će zavisiti od rotacije primijenjene na ulaznu os i brzine obrtanja.

Uglovna rotacija ili brzina Zemljine rotacije, za bilo koju proizvoljnu tačku može biti riješena sa dvije komponente, jednom oko lokalne vertikale, drugom oko horizontalne sjever/jug linije u tački. Ove komponente su prikazane na Slici 2.

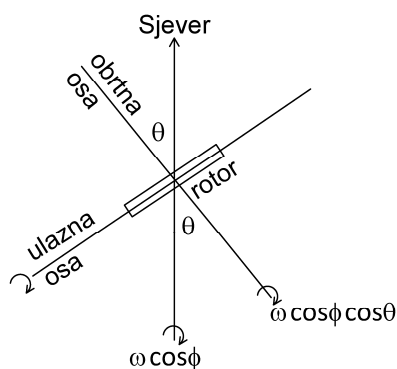
Ako je rotirajući žiroskop obješen tako da je obrtna os horizontalna, ulazna os će preuzeti dio horizontalne komponente Zemljine rotacije. Na Slici 3, obrtna os žiroskopa zatvara ugao θ sa sjeverom. Horizontalna komponenta Zemljine rotacije koja djeluje oko linije sjever-jug (meridijan) može dalje biti rastavljena u dvije komponente: $\omega \cos\phi \cos\theta$ oko obrtne osi, te $\omega \cos\phi \sin\theta$ oko ulazne osi.

Druga komponenta, djelujući na ulaznu os, izazvat će rotaciju oko izlazne osi i ako je žiroskop slobodan da rotira oko vertikalne osi, vršiće precesiju, a par koji izaziva ovu precesiju je proporcionalan sa $H\omega \cos\phi \sin\theta$, gdje je H moment impulsa zvrka.

Komponenta koja izaziva rotaciju će biti jednaka nuli kada je obrtna os u meridijanu i ugao θ je nula. Žiroskop koji se održava horizontalno sa obrtnom osi je zato instrument za traženje sjevera.



Slika 2. Rezolucija Zemljine rotacije u tački P (prema: Kennie i Petrie, 2010, str. 88)



Slika 3. Uticaj Zemljine rotacije na žiroskop (prema: Kennie i Petrie, 2010, str. 88)

Iako će usmjereni par nestati kada je ugao θ nula, moment inercije uređaja uzrokuje da obrtna os preskoči meridijan, te se usmjereni par okreće u suprotnom smjeru. Žiroskop će težiti da oscilira

oko meridijana, a ove oscilacije čine osnovu operativnih procedura. Blizu ekvatora, kada je ugao geografske širine mali i njegov kosinus je blizu jedinice, žiroskop će raditi najefikasnije, ali snaga usmjerenog para se brzo smanjuje na geografskim širinama većim od 70° , gdje prema standardima ne bi trebalo obavljati mjerenja žiroskopom (Kennie i Petrie, 2010).

Moguće je napraviti razliku između žiroteodolita i žiroskopskog dodatka. Žiroteodolit je kompletna jedinica, koja sadrži komponente žiroskopa i teodolita. Žiroskopski dodatak (Slika 4) je dizajniran za montiranje na standardni teodolit samo onda kada je to potrebno, što znači da se bez žiroskopa teodolit upotrebljava na konvencionalni način. Razlikuju se i viseći torzioni žiroskopi, u kojima je žiroskop obješen o tanku metalnu nit i visi pod uticajem gravitacije (primjenjuje se zrak pod pritiskom koji stvara vazdušni jastuk između osovine rotora i ležajeva radi smanjenja trenja), te žiroskopi plutajućeg tipa, kod kojeg je rotor smješten u hermetički zatvorenu kutiju ispunjenu tečnošću, oslobađajući ležajeve njegovog pritiska. Kod geodetskih instrumenata se obično koriste viseći žiroskopi, kod kojih se viseći dio sastoji od žiromotora, postavljenog u kućište s cijevnim nastavkom, koji ima na gornjem dijelu ravno ogledalo. To ogledalo omogućuje registraciju svakog okreta uz pomoć autokolimacionog durbina (Benčić, 1991; Đurković, 2008; Kennie i Petrie, 2010).



Slika 4. Teodolit Wild T2 sa žiroskopskim dodatkom GAK1 (Tuno i Kogoj, 2011)

3 METODE OPAŽANJA

Detaljne radne procedure za žiroskopske uređaje se razlikuju od instrumenta do instrumenta i uvijek su date u priručniku proizvođača (Kennie i Petrie, 2010).

Kad se mjeri, os žiroskopa ne postavlja se u smjer meridijana, već se zbog inercije njiše simetrično s obzirom na taj smjer, što se u autokolimacionom durbinu registruje pomjeranjem marke na skali. S obzirom na to mjeri se: primjenom metode povratnih tačaka (pomjeranjem alhidade teodolita), amplitudnom metodom (uz nepomičnu alhidadu) ili mjerenjem vremena prolaza kroz nultu crtu uz obračun korekture.

Tabela 1

Usporedba metoda povratnih tačaka i mjerenja vremena (Kennie i Petrie, 2010)

Metoda povratnih tačaka	Metoda mjerenja vremena
Potrebno je kontinuirano praćenje pomične marke	Nema kontinuiranog praćenja pomične marke
Metoda je zamorna za operatora	Jednostavnija operativna procedura
Praćenje operatora utiče na žiroskopsku precesiju	Nema poremećaja žiroskopske precesije
Nije potreban tačan vremenski period između prolaza pomične marke kroz sredinu skale	Neophodan je tačan vremenski period između prolaza pomične marke kroz sredinu skale
Eliminisan je zakretni momenat trake	Mora biti poznat zakretni momenat trake
Može biti potreban specijalni produženi vijak za fino pomjeranje alhidade	Dovoljan je obični vijak za fino pomjeranje alhidade

Nakon centrisanja i horizontisanja instrumenta na stajalištu vizira se tačka čiji se azimut određuje i očita se horizontalni limb. Pomoću busole, durbin se približno usmjeri prema magnetnom sjeveru. Vijcima aretacionog uređaja oslobađa se viseći sistem žiroskopa i žiromotor se stavlja u pogon. Kad je postignuta radna brzina rotora, pogon se isključuje, te se aktivira uređaj za kočenje. Tada se posmatra pomična marka smanjujući amplitudu njihanja pomoću uređaja za prisilno prigušivanje, sve dok se reverziona tačke ne nalaze unutar skale. Kad se primjenjuje metoda povratnih tačaka, prati se pomična marka djelovanjem na vijak za pomak alhidade, tako da se indeks održava na nultoj tački skale. Na povratnim tačkama čini se da indeks kratko vrijeme miruje. Tada se očitava horizontalni limb teodolita. Iz najmanje tri opažanja povratnih tačaka može se izračunati smjer meridijana, a time i azimut. To je samo osnovna shema mjerenja bez određivanja nultog položaja, tj. položaja asimetrije njihanja. Kad se primjenjuje amplitudna metoda, alhidada je nepomična, a očitavaju se povratne tačke na amplitudnoj skali. Metoda mjerenja vremena podrazumijeva mjerenje vremena prolaza pomične marke kroz sredinu skale, tj. trenutak koincidencije pomične marke i nulte crte skale, te amplitude, tj. položaj povratnih tačaka. Iz tih vremena računa se korektura približne orijentacije, koja je proporcionalna amplitudi

i razlici vremena prolaza (Benčić, 1991; Pašalić, 1995). Osnovne razlike između metoda povratnih tačaka i mjerenja vremena prikazane su u Tabeli 1.

Modernim žiroskopskim dodacima određuju se azimuti s tačnosti od $\pm 5''$ do $\pm 40''$, koristeći između dvije i sedam povratnih tačaka, u vremenskim rasponima od 15 do 60 minuta. Izborom odgovarajućeg instrumenta, procedure i broja opažanja, moguće je dobiti rezultate pogodne za širok spektar primjena u geodetskim poslovima (Kennie i Petrie, 2010).

U upotrebi je i alternativna metoda koja je razvijena s ciljem moduliranja kosinusne krive, koju žiroskop opisuje oscilirajući u ravni meridijana. Amplituda žiroskopa se vremenom smanjuje. Izračunati tačnu promjenu amplitude, koja se može primijeniti na svaku seriju mjerenja, je nemoguće. Pojedinačna očitavanja u proizvoljnim serijama su daleko od dovoljno tačnih da bi se mogla uspostaviti opšta kriva za promjene amplitude. Iz tog razloga se mora pronaći aproksimacija. Rezultati više serija mjerenja pokazuju da je smanjenje amplitude tokom vremena približno linearno.

Aproksimacija stope promjene žiroskopa sa kratkim intervalima može se opisati eksponencijalnom funkcijom:

$$P = (ae^{-bn\pi}) \cos(n\pi) + c,$$

gdje su:

P – smjer rotiranja žiroskopa,

a – parametar koji opisuje linearno opadanje amplitude,

b – parametar koji opisuje odstupanje od linearnog opadanja,

c – parametar koji opisuje srednji smjer žiroskopa i

n – broj serije mjerenja.

Prednost ove metode je da jedno pogrešno čitanje amplitude ne utiče na druga čitanja, kao što je to slučaj kod drugih metoda. Potrebna su tri čitanja da bi se odredila srednja vrijednost amplitude. Kada se određuje kriva koja najbolje odgovara svim čitanjima, upotrebljavaju se odstupanja pojedinačnih odstupanja od krive. Očiti nedostatak je da ako promjene amplitude žiroskopa ne odgovaraju parametrima gore pomenute kosinusne krive, može se desiti da se isključe opažanja, koja su u stvarnosti dobra. Međutim, i ostale metode su zasnovane na sličnim pretpostavkama i slični problemi se javljaju u slučaju neočekivanih promjena amplitude (Ingemar, 2006).

4 SAVREMENI MJERNI SISTEMI ZA ŽIROSKOPSKU ORIJENTACIJU

Kod savremenih žiroteodolita mjerenje je automatizovano, tj. čitanje ravnotežnog položaja žiromotora je digitalno, tako da se postupak mjerenja svodi na obično opažanje pravca (Pašalić, 1995).

Njemačka firma Deutsche Montan Technologie (DMT) je vodeća u razvoju tehnologije žiroteodolita. Instrumentom GYROMAT pravac sjevera se određuje kontinuiranim automatskim opažanjima u okviru jednog perioda oscilacija pri maloj amplitudi. Nakon iterativne preliminarnе orijentacije, nulta marka pokazuje jedan pomak u odnosu na ravnotežni položaj oscilacija, i jedan orijentacioni pomak u odnosu na geografski sjever. Slobodnu žiroskopsku oscilaciju mjeri optoelektronski instrument. Oriјentacioni pomak je rezultat ravnotežnog stanja obrtnih momenata žiroskopa i trake.

Iznos integrala je nezavisan od vremena početka integracije, pa nema potrebe za prioritnim tačkama krive nastalim usred oscilacije. Vrijeme mjerenja je zbog toga samo jedan period oscilacije, čime se kod automatskih žiroteodolita postiže najkraće moguće vrijeme mjerenja. Vrijeme mjerenja je zavisno samo od geografske širine, npr. za $\varphi = 0^\circ$ potrebno je 150 s, dok je za $\varphi = 55^\circ$ potrebno 170 s. Iznos integrala oscilacije, ne mijenja se uslijed prirodnih oscilacija (npr. vibracije izazvane kretanjem mašina u tunelu).

U prosjeku je za određivanje azimuta potrebno 8 do 9 minuta. Kako Gyromat 2000 ima kratko vrijeme mjerenja, mjerenja se radi povećanja tačnosti i kontrole obično obavljaju barem dva puta. Postupak rada sa ovim instrumentom je vrlo jednostavan. Instrument se postavlja za mjerenje kao standardni elektronski teodolit ili tahimetar, orijentiše se približno ka sjeveru ($\pm 45^\circ$, što je orijentacija dalje od sjevera, duže traje mjerenje), a zatim operator bira odgovarajući program i jednostavno ga pokreće. Žiroskop je povezan sa elektronskim tahimetrom, pa se pravac sjevera pokazuje kao vrijednost na horizontalnom limbu tahimetra .

DMT je razvio i savremenije modele žiroteodolita, Gyromat 3000 i Gyromat 5000 (Savanović, 2017). Pored kraćeg vremena mjerenja ovim instrumentima je povećana i tačnost mjerenja koja dostiže 0.8 mgon. To je omogućeno automatskim elektronskim praćenjem kretanja osovine žiroskopa u većem nizu tačaka (Benčić i Solarić, 2008). Svi instrumenti Gyromat su potpuno kompatibilni s elektronskim tahimetrima proizvođača Leica Geosystems (Tuno, Mulahusić, Marjetič i Kogoj, 2010).

Od ostalih današnjih žiroskopskih mjernih stanica treba spomenuti Sokkia Gyro X (Slika 5), FOIF GTA 1300, GYROMAX AK-2M i BOIF GTS-1.



Slika 5. Žiroskopska mjerna stanica Sokkia Gyro X (GeoWILD, 2013)

5 ZAKLJUČAK

Žiroskopski sistemi su se pokazali kao uspješno rješenje za podzemne geodetske radove, poput rada u rudnicima ili tunelima. Međutim, kao i kod rada sa bilo kojom vrstom instrumenta, tako i kod ovog tipa, uspješnost prije svega zavisi od pravilne upotrebe, izbora odgovarajuće metode rada, te mogućnosti operatora da ispravno protumači dobijene rezultate.

S obzirom da su radovi koji se izvode u podzemlju (npr. probijanje i gradnja tunela) uglavnom skupi, neophodno je obezbijediti kvalitetne i pouzdane podatke.

Sa razvojem tehnologije na svim poljima, došlo je i do značajnog razvoja instrumenata koji koriste žiroskopske sisteme za dobijanje smjera sjevera. Iako je osnovna ideja rada ovakvih sistema u načelu ostala ista, zahvaljujući tehnološkom napretku, u današnje vrijeme se dosta brzo mogu dobiti dosta dobri rezultati.

Među savremenim instrumentima posebno treba izdvojiti Gyromat 5000, kojeg odlikuju najveća tačnost, najveća brzina određivanja azimuta te veoma široko područje primjene (između 80° južne i 80° sjeverne geografske širine).

Zbog svoje praktičnosti i pouzdanosti, te zbog mogućnosti primjene u uslovima u kojima je rad sa drugim vrstama instrumenata ograničen, u budućnosti se može očekivati veća ekspanzija razvoja i upotrebe žiroskopskih sistema u geodeziji.

LITERATURA

- Benčić, D. (1990). *Geodetski instrumenti*. Zagreb: Školska knjiga.
- Benčić, D., Solarić, N. (2008). *Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici*. Zagreb: Školska knjiga.
- GeoWILD Sarajevo (2013). Dostupno na: <http://geowild.ba/sts.html>
- Đurković, V. (2008). Žiroskop – osnovni merni element sistema upravljanja. *Vojnotehnički glasnik* 4/08, 15-37.
- Ingemar, L. (2006). *Use of gyrotheodolite in underground control network* (Master's of Science Thesis). Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH), School of Architecture and the Built Environment.
- Kennie, T., Petrie, G. (2010). *Engineering Surveying Technology*. Oxon: Taylor & Francis.
- Mulahusić, A., Topoljak, J., Tuno, N. (2019). *Inženjerska geodezija u rudarstvu* (skripta). Sarajevo: Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu.
- Pašalić, S. (1995). *Inženjerska geodezija*. Univerzitet u Sarajevu: Sarajevo.
- Savanović, M. (2017). *Prilog razvoju metodologija izrade optimalnih projekata lokalnih geodetskih mreža metroa* (doktorska disertacija). Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu.
- Schofield, W., Breach, M. (2007). *Engineering surveying*. Amsterdam. London: Butterworth-Heinemann.
- Tuno, N., Kogoj, D. (2011). Prvi optički teodoliti. *Geodetski glasnik*, 41, 42-51.
- Tuno, N., Mulahusić, A., Marjetič, A., Kogoj, D. (2010). Pregled razvoja elektronskih tahimetarova Leica Geosystems. *Geodetski vestnik*, 54(4), 643-660. DOI: <http://dx.doi.org/10.1529210.15292/geodetski-vestnik.2010.04.643-66>

Autori:

Seat Yakup Kurtović, Mr. dipl. ing. geod.

GBMGroup Sarajevo
Ramiza Salčina 93, 71000 Sarajevo
Bosna i Hercegovina
E-mail: seat@gbmgroup.ba

Slavica Matić, Mr. dipl. ing. geod.

GBMGroup Sarajevo
Ramiza Salčina 93, 71000 Sarajevo
Bosna i Hercegovina
E-mail: slavica@gbmgroup.ba