

Primena popravke za uticaj izostazije u gravimetriji

Manja Grifatong



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Primena popravke za uticaj izostazije u gravimetriji | Manja Grifatong | | 2023 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007566>

Univerzitet u Beogradu
Rudarsko – geološki fakultet



Primena popravke za uticaj izostazije u gravimetriji

ZAVRŠNI RAD

Osnovne studije

Kandidat:

Grifatong Manja, G3-19

Mentor:

prof. dr Vasiljević Ivana

Beograd, septembar 2023.

Komisija:

1. dr Ivana Vasiljević, vanredni profesor, mentor

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

2. dr Snežana Ignjatović, vanredni profesor

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

3. dr Vesna Cvetkov, redovni profesor

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Datum odbrane: _____

REZIME

Gravimetrijske anomalije imaju važnu ulogu u određivanju raspodele gustine stena u Zemljinoj kori, odnosno daju informacije o geološkoj građi ispitivanog prostora. Cilj ovog rada je da se prikaže uticaj izostatičke popravke na gravimetrijske anomalije. Kao primer je odabrano istražno područje koje obuhvata delove Jadranskog mora, Dinarida, Vardarske zone i Panonskog basena. Na osnovu dostupnih podataka su izrađene i analizirane karte savremenih Bugeovih i izostatičkih anomalija, dubine do Moho diskontinuiteta i izostatičke popravke. Za detaljniju analizu odabrana su tri profila, koji se pružaju upravno na dominantni pravac prostiranja gravimetrijskih anomalija. Pokazano je kako se uvođenjem izostatičke popravke uklanja uticaj promena debljine Zemljine kore, menja intenzitet i oblik gravimetrijskih anomalija i umanjuje efekat inverzne korelacije krivih raspodele anomalija i debljine Zemljine kore.

Ključne reči: *savremena Bugeova anomalija, izostatička anomalija, izostatička popravka, Mohorovičićev diskontinuitet (Moho)*

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
2. MOHOROVIČIĆEV DISKONTINUITET I SEIZMIČKI MODEL ZEMLJINE KORE.....	2
3. GRAVIMETRIJSKO-IZOSTATIČKI MODELI.....	5
3.1. Hipoteze Prata i Erija.....	5
3.2. Prat - Hejford i Eri - Heiskanen izostatički modeli	6
3.3. Vening Mains i Vening Mains - Moritz modeli	8
3.4. Poređenje modela Zemljine kore	8
4. GEOGRAFSKI POLOŽAJ ISTRAŽNOG PODRUČJA	10
5. GEOLOŠKA GRAĐA ISTRAŽNOG PODRUČJA.....	12
6. OBRADA I ANALIZA GRAVIMETRIJSKIH PODATAKA.....	14
6.1. Analiza i revizija podataka.....	15
6.2. Dubina do Moho diskontinuiteta na istražnom području.....	16
6.3. Savremene Bugeove anomalije gravitacionog ubrzanja.....	17
6.4. Popravka za uticaj izostazije i izostatičke anomalije.....	19
6.5. Analiza gravimetrijskih anomalija duž profila	22
7. ZAKLJUČAK.....	26
LITERATURA	27

1. UVOD

Anomalije gravitacionog polja igraju važnu ulogu u geofizici. Uz pomoć gravimetrijskih anomalija dolazi se do zaključaka o varijacijama u gustini stenske mase, a na osnovu toga i o geološkoj građi Zemljine kore. Merene vrednosti gravitacionog ubrzanja zavise od nekoliko različitih faktora, poput geografske širine i nadmorske visine merne tačke, gustine materijala oko merne tačke, vremena merenja. Pri računanju gravimetrijskih anomalija uvode se različite popravke, kojima se uklanjaju uticaji nepoželjnih faktora. Jedna od tih popravki je i popravka za uticaj izostazije (izostatička popravka), koja se primenjuje za uklanjanje uticaja promena debljine Zemljine kore na intenzitet i oblik gravimetrijskih anomalija.

U prvom delu rada prikazane su osnovne teorijske postavke izostazije i načini formiranja geofizičkih modela Zemljine kore. U drugom delu rada analizirani su rezultati dobijeni pre i nakon uvođenja popravke za uticaj izostazije u postupak računanja gravimetrijskih anomalija. Kao primer je odabrano istražno područje, koje obuhvata deo Jadranskog mora i delove teritorija Republike Hrvatske i Bosne i Hercegovine.

Istraživanja su obuhvatila analizu i reviziju podataka, izradu karte dubine do Mohorovičićevog diskontinuiteta, računanje savremenih Bugeovih anomalija, uvođenja izostatičke popravke i računanja izostatičkih anomalija, kao i analizu rezultata duž tri profila, koji su postavljeni upravno na dominantni pravac prostiranja gravimetrijskih anomalija.

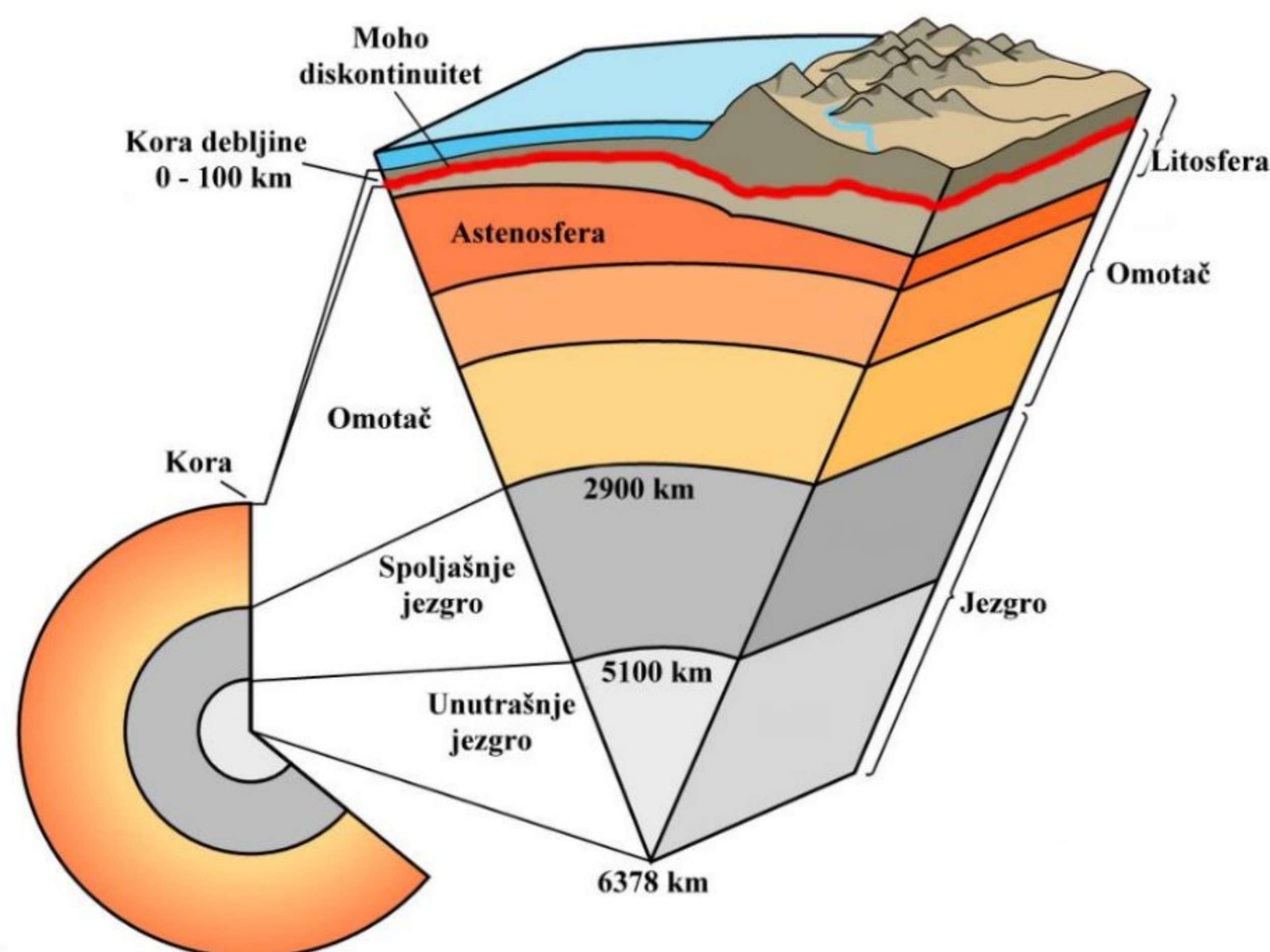
Savremene Bugeove i izostatičke anomalije računane su kako bi se analizirala veza između oblika i intenziteta anomalija, dubine do Mohorovičićevog diskontinuiteta (debljine Zemljine kore) i geologije istražnog područja (rasporeda glavnih geotektonskih jedinica). Prilikom računanja anomalija uvedene su različite neophodne popravke, u cilju dobijanja što preciznijih rezultata. U radu će biti prikazano kako promene debljine Zemljine kore utiču na raspodelu vrednosti savremenih Bugeovih anomalija i izostatičke popravke, kao i kako uvođenje izostatičke popravke omogućava jednostavniju interpretaciju gravimetrijskih anomalija na kompleksnom istražnom prostoru, koji obuhvata delove Jadranskog mora, Dinarida, Vardarske zone i Panonskog basena.

2. MOHOROVIČIĆEV DISKONTINUITET I SEIZMIČKI MODEL ZEMLJINE KORE

Mohorovičićev diskontinuitet, poznat i kao Moho, predstavlja granicu između Zemljine kore i omotača. Andrija Mohorovičić, hrvatski seizmolog, je 1909. godine otkrio prisustvo ove granice uz pomoć analize brzina seizmičkih talasa. On je proučavao seizmograme zemljotresa u dolini Kupe, u Hrvatskoj, zabeležene na stanicama na različitoj udaljenosti od epicentra. Primetio je da samo jedan par longitudinalnih i transverzalnih talasa stiže do stanica na manjoj udaljenosti (do 240 km), a da dva longitudinalna i dva transverzalna talasa stižu do više udaljenih stanica (240-720 km). Na osnovu preciznih hodohrona (krive koje pokazuju zavisnost između udaljenosti od epicentra i vremena putovanja pojedinačnih talasa) koje je napravio, zaključio je da jedan longitudinalni talas stiže do svih stanica na udaljenosti manjoj od 240 km od epicentra, a da drugi longitudinalni talas dostiže samo stanice koje se nalaze na epicentralnim rastojanjima većim od 240 km. Pošto se svi longitudinalni talasi šire kroz istu sredinu (Zemlju) istom brzinom, Andrija Mohorovičić je zaključio da je put kojim su se talasi kretali drugačiji. Ova pretpostavka je moguća samo ako se njihova brzina kontinuirano povećava sa dubinom do određene dubine, gde zatim dolazi do naglog (diskontinuiranog) povećanja brzine talasa (<https://www.geotech.hr/en/discovery-of-mohorovicics-moho-discontinuity/>). Ova specifična dubina, koja se nalazi između Zemljine kore i omotača, na kojoj dolazi do naglog povećanja brzine longitudinalnih i transverzalnih talasa, naziva se Mohorovičićev diskontinuitet.

Mnoge studije, koje su se izvodile tokom narednih 100 godina, potvrdile su postojanje oštrog seizmičkog diskontinuiteta, koji odvaja koru od omotača, širom sveta (Grad i dr., 2009). Na osnovu ovoga, Mohorovičić je došao do zaključka da je povećanje brzine seizmičkih talasa, koje je uočio unutar spoljašnjeg dela omotača jezgra, uzrokovano promenom sastava Zemlje sa dubinom. Povećanje brzine talasa mora biti uzrokovano materijom veće gustine, koja je prisutna na većoj dubini (<https://geology.com/articles/mohorovicic-discontinuity.shtml>). Kontrast brzine longitudinalnih talasa na Moho diskontinuitetu je prilično velik, i iznosi 1-1.5 km/s² (Grad i dr., 2009). Prosečna dubina na kojoj se nalazi Mohorovičićev diskontinuitet, prikazan na slici 1, ispod okeanskog basena iznosi 8 km, a ispod kontinenata oko 32 km. Moho diskontinuitet može se odrediti na osnovu seizmometrijskih i gravimetrijskih podataka.

Seizmički modeli su zasnovani na merenju vremena putovanja seizmičkih talasa. Pored korišćenja seizmoloških podataka prirodnih zemljotresa, prilikom formiranja seizmičkih modela, koriste se i podaci dobijeni veštački izazvanim potresima. Prednost korišćenja veštački izazvanih potresa jeste što su vreme i položaj potresa poznati. Postoje dva ograničenja prilikom primene seizmometrijskih istraživanja za određivanje dubine do Mohoa. Prvo, prikupljanje podataka je skupo, a količina prikupljenih podataka tokom samo jednog istraživanja može biti izrazito velika. Obrada podataka oduzima dosta vremena i zahteva sofisticirani računarski hardver, kao i znatnu stručnost osobe koja obrađuje podatke. Drugo, seizmički modeli uglavnom nemaju globalnu pokrivenost podataka. Iz tog razloga se u praksi često izostatičkim Moho modelima dopunjava seizmički model, posebno u oblastima gde je retka pokrivenost seizmometrijskih podataka (Bagherbandi, 2011).



Slika 1. Građa Zemljine unutrašnjosti sa prikazanim Moho diskontinuitetom (<https://www.iasgyan.in/blogs/discontinuities-inside-the-earth>)

Seizmometrijskim istraživanjima su tokom godina prikupljeni podaci o mnogim tektonski aktivnim regionima, poput srednjeokeanskih grebena i kontinentalnih rovova. Na osnovu ovih podataka kreiran je seizmički model – model CRUST5.1, kao prvi pokušaj da se proceni globalna debljina kore. Ovaj model je kasnije ažuriran na model CRUST2.0 na osnovu podataka seizmometrijske refrakcije objavljenih u periodu između 1984 i 1995. godine (Bagherbandi, 2011). Ažurirani seizmički model kore objavili su Geološki zavod SAD-a i Institut za geofiziku Univerziteta Kalifornije. Model CRUST2.0 predstavlja globalni model kore sa mrežom $2^\circ \times 2^\circ$, koji nudi detaljnu strukturu raspodele gustine u Zemljinoj kori i gornjem delu omotača. On opisuje strukturu kore dajući informacije o debljini i gustini sedam globalnih slojeva (led, okeani, meki i tvrdi sedimenti, gornja, srednja i donja kora). Srednje dubine Moho diskontinuiteta, prema modelu CRUST2.0, u odnosu na nivo mora, su globalno 21.7 km, na kontinentima 38 km i ispod okeanskih basena 12.6 km (Bagherbandi, 2011). Iako je trenutno najčešće u upotrebi, ovaj model ima određene nedostatke. Na primer, gravitaciono polje, izvedeno iz analize sfernih harmonika za model CRUST2.0, daje rezultate koji odstupaju od stvarnog gravitacionog polja. Utvrđeno je, takođe, da odstupanja gravitacionog polja dobijenog preko modela CRUST2.0 iznose i do $55 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ iznad okeana, i preko $100 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ iznad kontinenata (Reguzzoni i dr., 2013).

Tesauro i dr. (2008) predstavili su novi digitalni seizmički model za koru zapadne i centralne Evrope i okoline – EuCRUST-07. Glavni cilj, prema rečima autora, bio je da se konstruiše nov 3D model visoke rezolucije (Eu-CRUST-07) evropske kore, koji se može koristiti kao polazna tačka u širokom spektru studija litosfere i gornjeg dela omotača. Model je izrađen na osnovu rezultata dobijenih seizmometrijskom refleksijom i refrakcijom, koji su integrisani u model u uniformnoj mreži $15^\circ \times 15^\circ$. Model se sastoji iz tri sloja i ukazuje na velike razlike u dubini

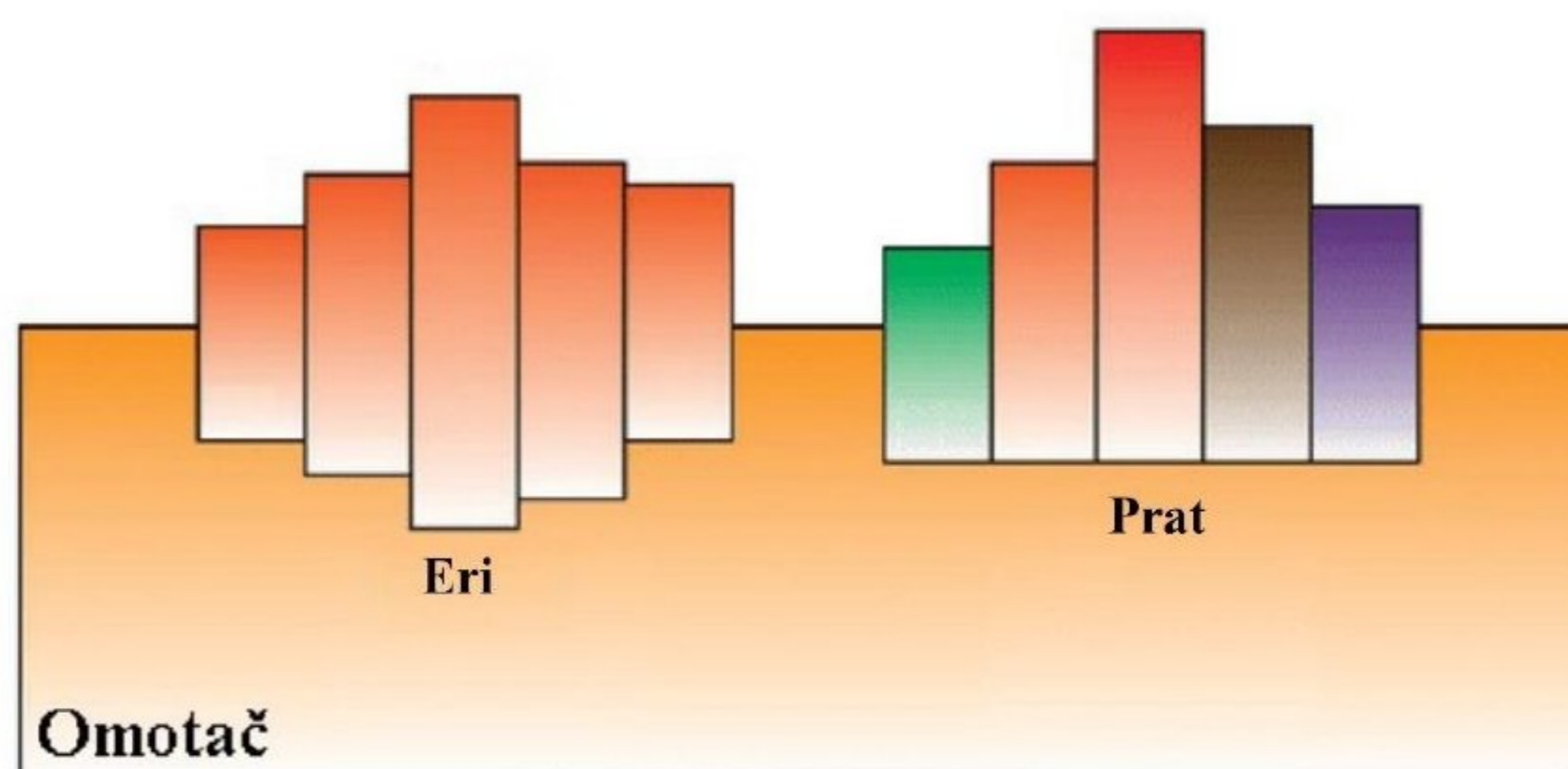
Moho diskontinuiteta, čak i do 10 km u nekim specifičnim oblastima, u poređenju sa prethodnim modelima (CRUST5.1, CRUST2.0 i dr). Ova odstupanja su rezultat niže rezolucije prethodnih modela, u kojima su zanemarene karakteristike na lokalnom nivou, kao i razlike u korišćenim skupovima ulaznih podataka (Tesauro i dr, 2008).

3. GRAVIMETRIJSKO-IZOSTATIČKI MODELI

Izostazija predstavlja stanje gravitacione ravnoteže, kojoj Zemljina kora i omotač teže u odsustvu spoljašnjih sila. Teorija izostazije se zasniva na pretpostavci da Zemljina kora manje gustine „pluta“ na omotaču znatno veće gustine, pri čemu se ravnoteža masa podvrgava hidrostatičkim zakonima. Po principu izostazije, dubina do koje tektonske ploče tonu u žitku masu zavisi od njihove debljine i gustine. Kada određena oblast litosfere dostigne stanje izostazije, kaže se da se ona nalazi u izostatičkoj ravnoteži (Bagherbandi, 2011). Dubina na kojoj preovlađuje stanje izostatičke ravnoteže naziva se dubina kompenzacije (Bagherbandi, 2011). Zemljina kora se, zapravo, vrlo retko nalazi u stanju izostatičke ravnoteže, jer nju narušavaju brojni procesi transporta materije poput sedimentacije, vulkanizma i stvaranja i otapanja masa leda, koji se neprekidno odvijaju na Zemlji.

3.1. Hipoteze Prata i Erija

Prve hipoteze izostazije razvijene su od strane Prata i Erija. Prema Pratovoj hipotezi, blokovi koji sačinjavaju Zemljinu koru prostiru se do izostatičke površi (Slika 2, desno). Na izostatičkoj površi javlja se jednak pritisak blokova različite gustine i visine, što znači da težina svakog bloka mora da bude jednaka. Prema Erijevoj hipotezi (Slika 2, levo), Zemljina kora se sastoji od blokova iste gustine, ali različite visine, koji plutaju u žitkoj masi veće gustine (viskoznoj magmi). Shodno tome, blokovi koji imaju veću visinu iznad nivoa mora su teži i dublje tonu u magmu (Vasiljević, 2022).



Slika 2. Grafički prikaz izostatičkih hipoteza po Pratu i Eriju (<https://prepp.in/news/e-492-theory-of-isostasy-geography-notes>)

Osnovni izostatički modeli, koji se koriste za procenu debljine i gustine Zemljine kore, kao i dubine Mohorovičićevog (Moho) diskontinuiteta, su modeli Eri - Heiskanen, Prat - Hejford, Vening Mains i Vening Mains - Moritz (VMM).

3.2. Prat - Hejford i Eri - Heiskanen izostatički modeli

Eri - Heiskanen i Prat - Hejford izostatički modeli predstavljaju lokalne modele, koji se zasnivaju na podeli Zemljine kore na jedinične prizme, uz pretpostavku da je kompenzacija topografskih masa uniformno raspodeljena u vertikalnom pravcu. Zbog elastičnosti Zemljine kore, ovi lokalni modeli nisu u potpunosti realistični (Bagherbandi, 2011). Prat - Hejford izostatički model, prikazan na slici 3, pretpostavlja da je Zemljina kora sačinjena od blokova različitih visina, koji se prostiru do konstantne dubine kompenzacije, a kompenzacija se zasniva na lateralnim promenama u gustini stena (blokova).

Eri - Heiskanen model, prikazan na slici 4, predstavlja kompromisnu hipotezu između Erijeve i Pratove. Prema ovoj hipotezi Zemljina kora pliva po gornjem omotaču, kao sante leda u okeanima (Bagherbandi, 2011). Po ovom modelu, gustina Zemljine kore je konstantna i iznosi 2.67 g/cm^3 , dok se varijacije u topografskoj visini kompenzuju različitim dubinama kore. Prema ovom modelu postoje laki „koreni“ ispod planina i teški „anti-koreni“ ispod okeana. Prema Bagherbandi (2011), debljina korena (t) je:

$$t = \frac{H}{\Delta\rho} \rho_c, \quad (3.2.1)$$

gde je

H – topografska visina,

$\Delta\rho = \rho_m - \rho_c$ – razlika (kontrast) gustine između omotača i kore,

ρ_m – gustina omotača,

ρ_c – gustina kore.

Debljina „anti-korena“ (t'), za dubinu (d) mora/okeana, data je izrazom (Bagherbandi, 2011):

$$t' = \frac{d(\rho_c - \rho_w)}{\Delta\rho}, \quad (3.2.2)$$

gde je ρ_w – gustina vode.

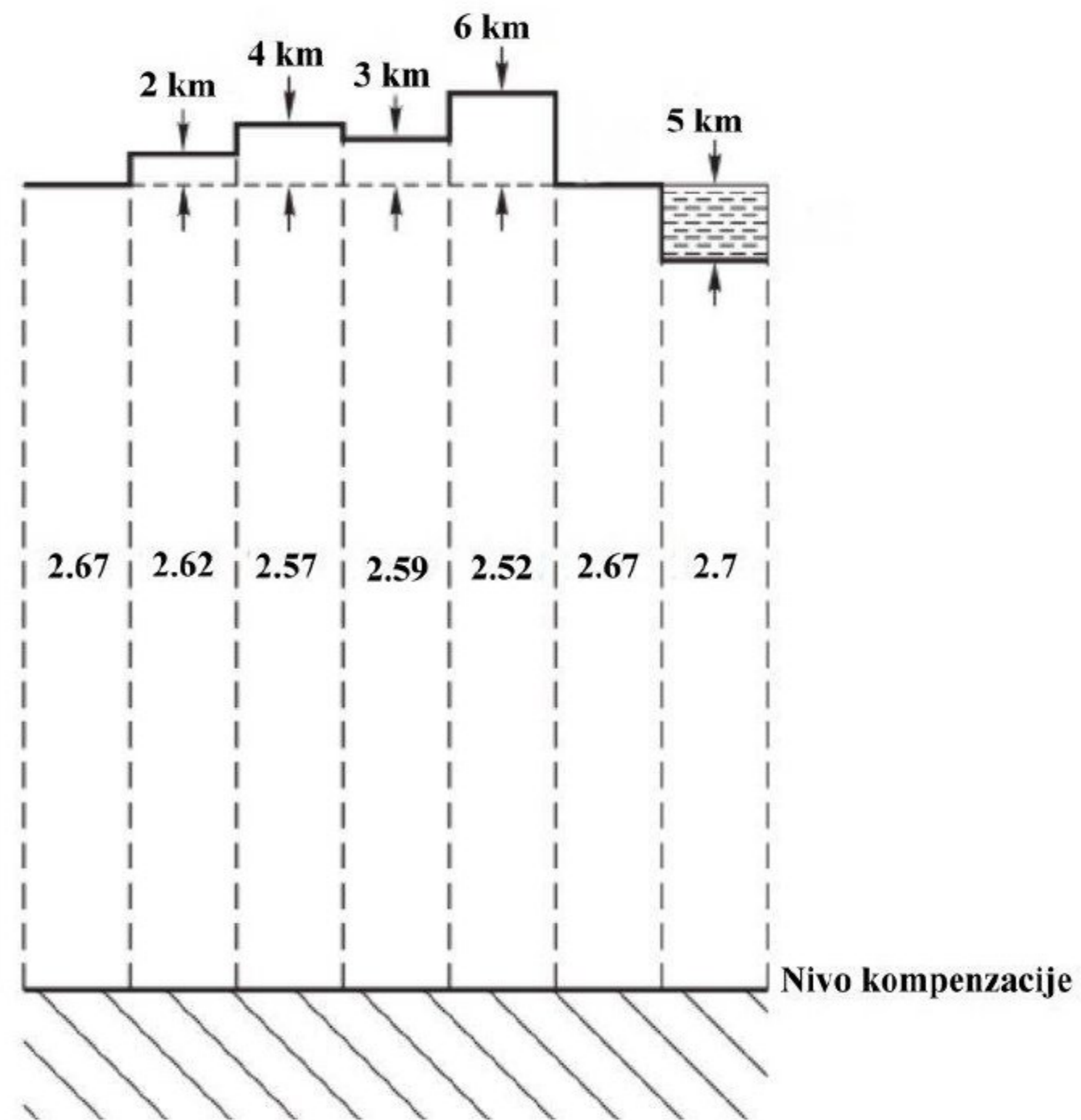
Prema modelu Eri-Heiskanen (Slika 4), debljina Zemljine kore (T) će varirati u zavisnosti od debljine „korena“ i „anti-korena“ (Bagherbandi, 2011):

$$T = \begin{cases} T_0 + t + H & \text{kontinent} \\ T_0 - t' - H' & \text{okean} \end{cases}, \quad (3.2.3)$$

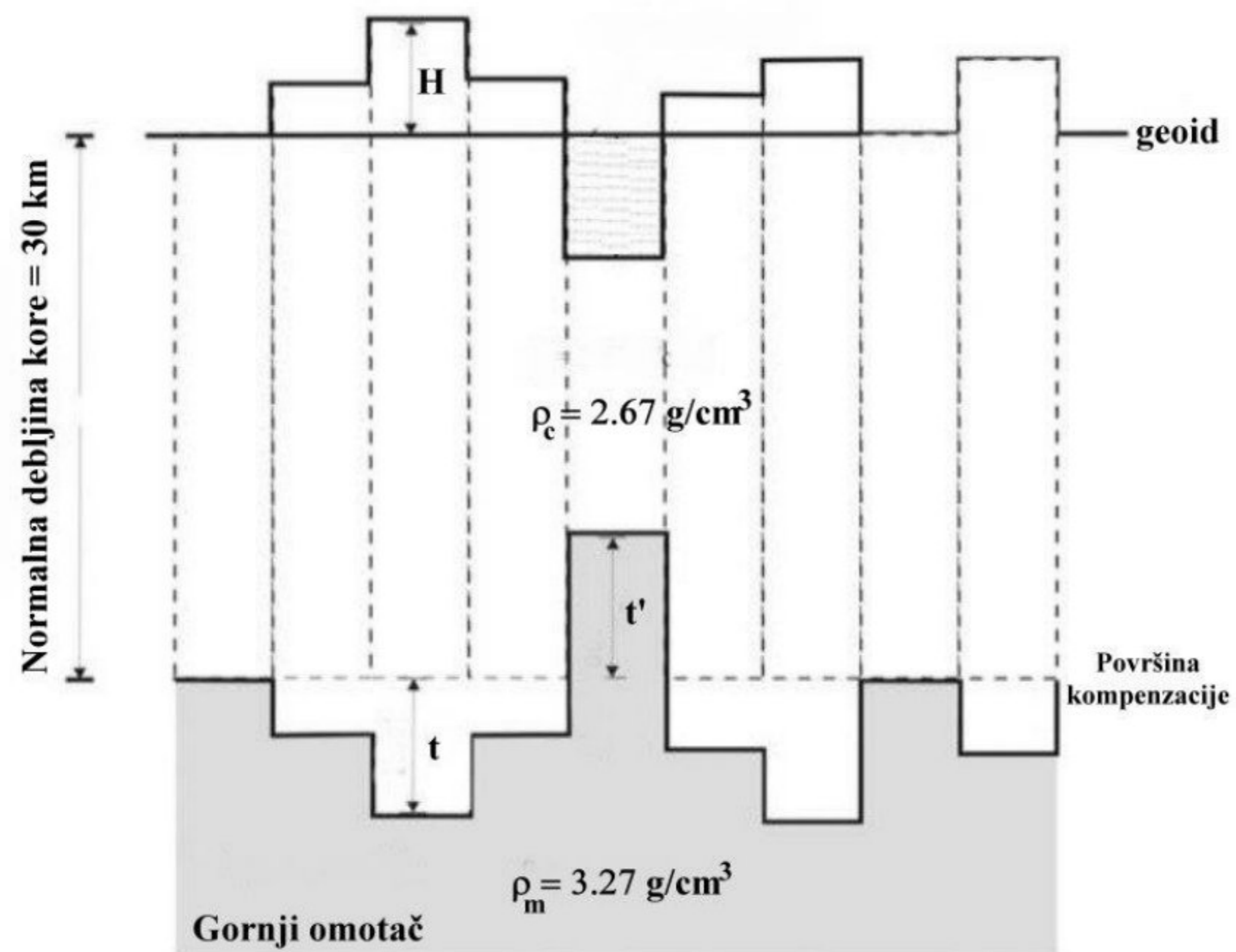
gde je

T_0 – normalna dubina do Moho diskontinuiteta (debljina kore),

H' – dubina okeana.



Slika 3. Grafički prikaz Prat - Heyford izostatičkog modela (https://www.researchgate.net/figure/The-Pratt-Hayford-model-of-isostatic-compensation-Sanso-and-Sideris-2013_fig19_277597636)

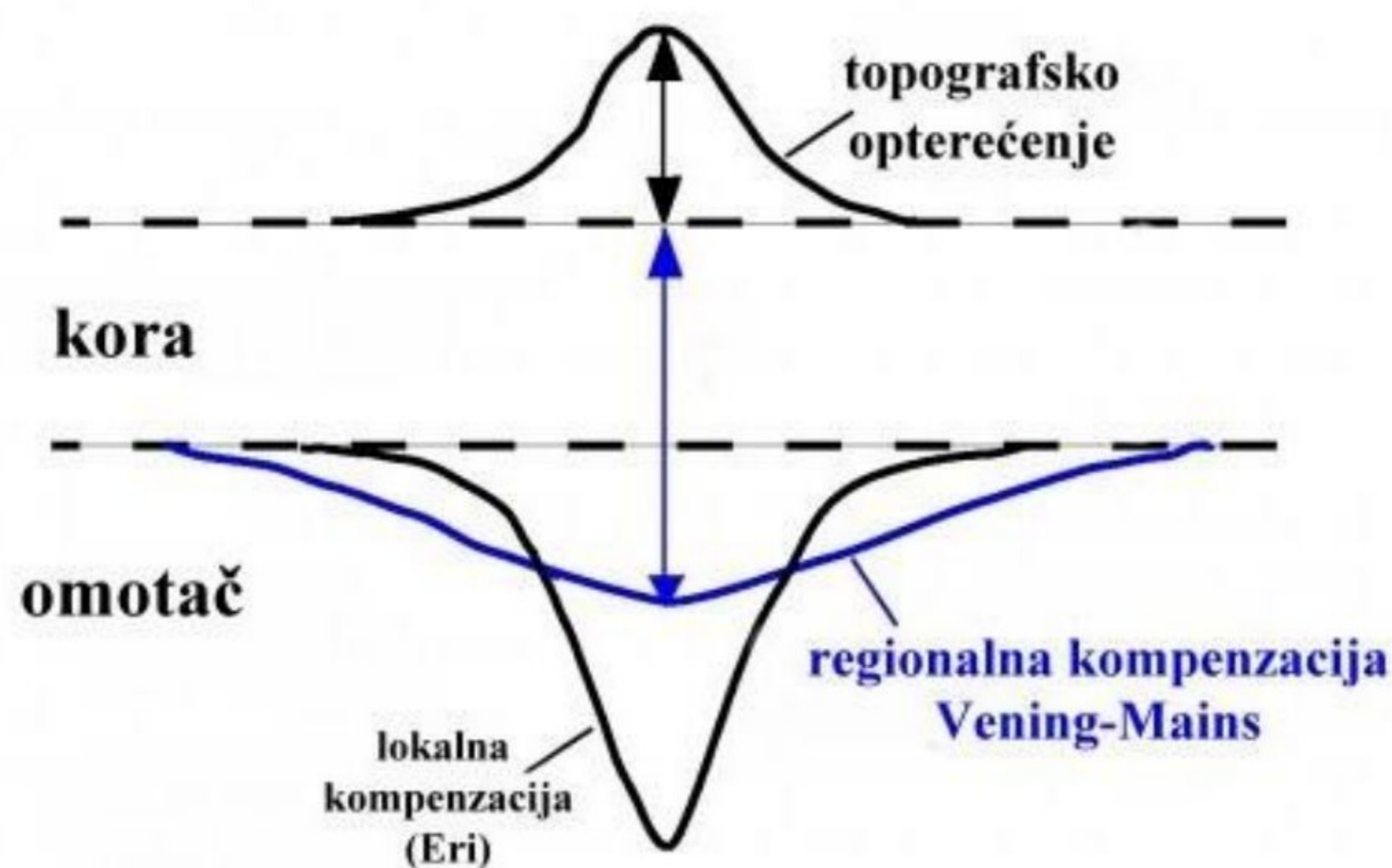


Slika 4. Grafički prikaz Eri - Heiskanen izostatičkog modela (https://www.researchgate.net/figure/The-Airy-Heiskanen-model-of-isostatic-compensationSanso-and-Sideris-2013_fig18_277597636)

3.3. Vening Mains i Vening Mains - Moritz modeli

Vening Mains je modifikovao Eri - Heiskanen izostatički model uvođenjem regionalne izostatičke kompenzacije zasnovane na aproksimaciji ravne površi Zemlje (Bagherbandi, 2011). Seizmološka ispitivanja pokazuju da debljina kore ispod kontinenata i planina iznosi između 30 i 90 km, dok je njena debljina ispod okena od 5 do 15 km. Navedene varijacije dubine Moho diskontinuiteta, kao i činjenica da postoji slaganje između debljine kore procenjene na osnovu seizmometrijske i gravimetrijske metode podržavaju modele Eri - Haiskanen i Vening Mains. Po Vening Mains izostatičkom modelu, koji je prikazan na slici 5, Zemljina kora se ponaša kao elastični sloj i blagim savijanjem kore preko regionalnog područja se vrši kompenzacija uticaja težine same kore. Razlika između Eri - Haiskanen i Vening Mains modela je u mehanizmu kompenzacije topografskih masa.

Moritz je generalizovao Vening Mains model od regionalne do globalne kompenzacije sa sfernom aproksimacijom površi nivoa mora. Ovaj model naziva se Vening Mains - Moritz (VMM) model i kod njega je Zemljina kora podeljena na elemente beskonačno malog poprečnog preseka, čija masa odgovara lokalnoj kompenzaciji tog elementa, ali promene u horizontalnom pravcu odgovaraju deformacijama zakrivljene Zemljine kore (Bagherbandi, 2011).



Slika 5. Grafički prikaz Vening-Mains izostatičkog modela (https://www.e-education.psu.edu/earth520/content/12_p17.html)

3.4. Poređenje modela Zemljine kore

Gravimetrijsko-izostatički modeli formulisani su na osnovu hipoteza izostazije, dok su seizmički modeli Zemljine kore dobijeni na osnovu podataka seizmometrijskih ispitivanja. Prema teoriji izostazije, topografske mase se kompenzuju korišćenjem modela sa varijabilnom dubinom do Moho diskontinuiteta i/ili gustinom kore. Od prethodno navedenih modela, Prat -

Hejford model se zasniva na konstantnoj dubini kompenzacije i različitoj gustini blokova kore. Eri - Heiskanen model pretpostavlja da je kontrast gustine omotača i kore konstantan, dok dubina do Moho diskontinuiteta varira. U stvarnosti, i dubina do Moho diskontinuiteta i kontrast gustine variraju, te je najbolji model onaj kod koga su oba parametra promenljiva. Problem Eri - Heiskanen modela prvenstveno leži u procenjenim debljinama „anti-korena“, koje su u oblasti okeana prevelike. Ovaj nedostatak se obično prevazilazi primenom Eri - Heiskanen modela za kontinentalne oblasti i Prat - Hejford modela za područja okeana (Bagherbandi, 2011). Eri - Heiskanen model, obično, pretpostavlja konstantnu vrednost kontrasta gustine na Moho diskontinuitetu, iako je realnija pretpostavka da je kontrast gustine lateralno promenljiv. Vening Mains - Moritz model je fleksibilan, jer može da se menja u zavisnosti od toga da li se procenjuje kontrast gustine ili proizvod kontrasta gustine i debljine Zemljine kore.

Kada se porede gravimetrijsko-izostatički i seizmički modeli, u nekim oblastima na Zemlji postoje izuzetno velike razlike. Ovo je posledica nedovoljnog broja seizmičkih podataka u tim oblastima. Na primer, u nekim delovima Afrike, Perua, Čilea, Azije i Grenlanda postoje velike kontinentalne oblasti u kojima seizmometrijski podaci nisu dostupni. Kada se ova dva tipa modela uporede, jasno je da znatno veću prednost imaju gravimetrijsko-izostatički modeli, zbog bolje pokrivenosti podacima na globalnom nivou (Bagherbandi, 2011). U tabeli 1 ukratko su prikazane razlike i sličnosti između modela koji se koriste za računanje dubine do Moho diskontinuiteta.

Tabela 1. Poređenje modela za računanje dubine do Moho diskontinuiteta (Δg_B - Bugeove anomalije, modifikovano prema Bagherbandi, 2011)

Model	Oblast kompenzacije	Aproksimacija	Poznata	Nepoznata
Eri - Heiskanen	lokalna	ravna površ Zemlje	$\Delta\rho$	T
Prat - Hejford	lokalna	ravna površ Zemlje	T	$\Delta\rho$
Vening Mains	regionalna	ravna površ Zemlje	$\Delta\rho$	T
Vening Mains - Moritz	globalna	sferična	$\Delta\rho$	T
			T	$\Delta\rho$
			Δg_B i H	$\Delta\rho T$
CRUST2.0	/	/	brzine seizmičkih talasa	T

4. GEOGRAFSKI POLOŽAJ ISTRAŽNOG PODRUČJA

Istražno područje se delom nalazi na teritoriji Republike Hrvatske, a delom na teritoriji Bosne i Hercegovine. Južni i zapadni deo istražnog prostora obuhvata Jadransko more i primorske delove Hrvatske, dok se istočni i severoistočni deo prostire zapadnim i centralnim delom Bosne i Hercegovine. Neki od većih gradova koji se nalaze na istražnom području su Zadar, Split, Šibenik, Banja Luka i Mostar. Pored ovih gradova, istražnom prostoru pripadaju i mnogobrojna ostrva, a neka od njih su Vis, Jabuka i Hvar.

Područje istraživanja se nalazi u graničnoj zoni između Afričke i Evroazijske ploče i ono zahvata Dinaride i mali deo Panonskog basena, time obuhvatajući nekoliko različitih geotektonskih celina (Šumanovac, 2010).

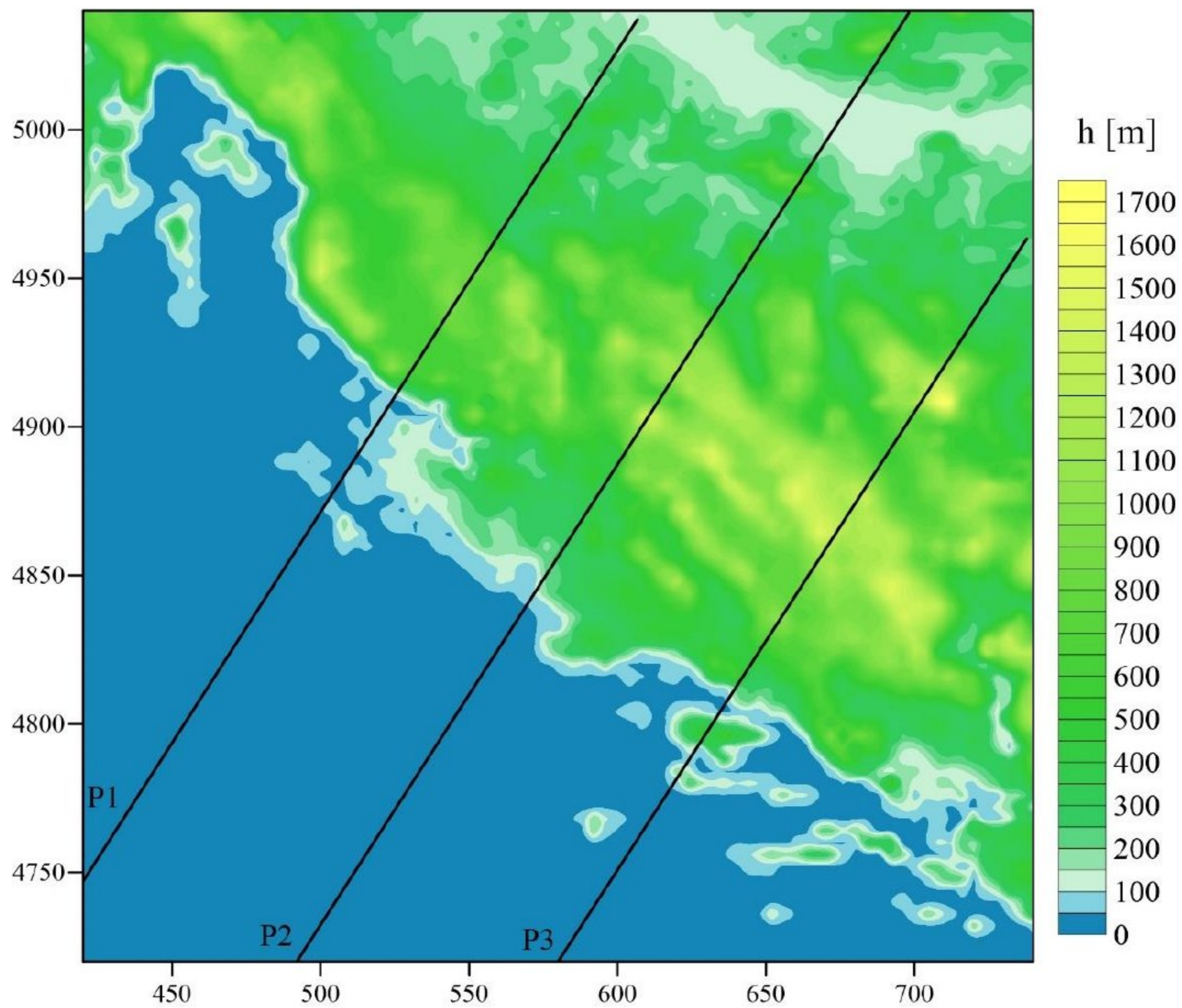
Dinaridi su deo mediteranskog orogenog sistema koji je formiran tokom mezozojsko-kenozojskog perioda kao posledica zatvaranja severnog kraka nekadašnjeg okeana Neotetis (Van Unen i dr., 2019). Ovaj planinski venac se proteže kroz Sloveniju, Hrvatsku, Bosnu i Hercegovinu, Srbiju, Crnu Goru i Albaniju pravcem severozapad-jugoistok, prateći Jadransku obalu. Dinaridi se na severozapadu spajaju sa Julijskim Alpima, a na jugoistoku sa Šarsko-pindskim planinskim vencem. Dužina Dinarskog lanca je 654 km (<https://www.grahovo.org/sr/dinarske-planine/>). Najviši planinski vrh u okviru Dinarida je Maja Jezerce (Jezerški vrh, 2964 m) na Prokletijama, dok se prosečna nadmorska visina Dinarida kreće između 1500 i 2200 m (<https://parksdinarides.org/dinaridi/>).

Osnovna karakteristika Dinarida je kraški reljef. Dinarski krš se proteže od Udina u Italiji pa sve do najzapadnijih delova Albanije i predstavlja najveću neprekinutu krašku površinu u Evropi. Jugozapadna primorska zona Dinarida odlikuje se pretežno bezvodnim krečnjačkim planinama sa tipičnim oblicima kraškog reljefa poput kraških polja, uvala, vrtača i škrapa. Na visokim planinama ovog planinskog masiva javljaju se i lednički oblici reljefa. Reke Dinarskog lanca pripadaju slivovima Jadranskog i Crnog mora, a neke od najvećih reka su Neretva, Ibar i Zapadna Morava.

Na slici 6 prikazan je satelitski snimak sa obeleženim istražnim područjem, a na slici 7 prikazana je topografska karta istražnog područja, izrađena na osnovu podataka o visinama gravimetrijskih tačaka iz baze gravimetrijskih podataka bivše SFR Jugoslavije, sa obeleženim položajem profila. Koordinate istražnog prostora su X [420 – 740] km i Y [4720 – 5040] km u UTM sistemu (zona 33).



Slika 6. Satelitski snimak sa obeleženim istražnim područjem – crveni kvadrat
 (<https://earth.google.com/web/@44.06922373,16.46168597,1344.41489128a,468647.78971508d,35y,-0h,0t,0r>)



Slika 7. Topografska karta sa obeleženim položajem profila – crne linije

5. GEOLOŠKA GRAĐA ISTRAŽNOG PODRUČJA

Dinaridski planinski venac predstavlja proizvod alpske orogeneze i sastoji se od guste i jako tektonizovane sedimentne sukcesije sa stratigrafskim rasponom od karbona do kvartara (Matoš i dr., 2017). Ovaj planinski masiv se deli na Spoljašnje i Unutrašnje Dinaride (Slika 8), koji se sa sastoje od nekoliko tektonskih jedinica.

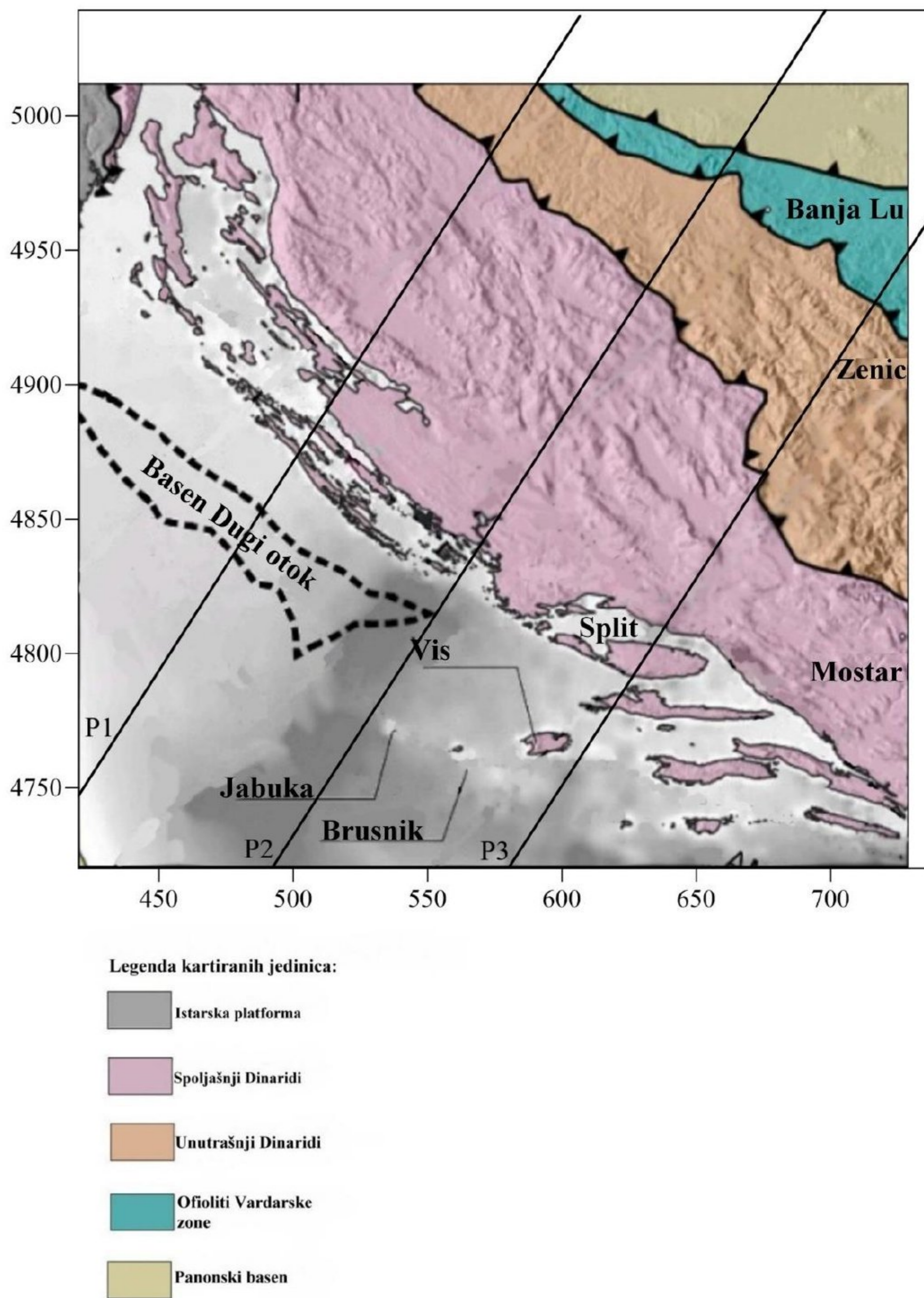
Spoljašnji Dinaridi, poznati i kao kraški Dinaridi, se sastoje od tri jedinice: Dalmatinske zone, Budva-Cukali zone i zone Visokog krša. Oni su pretežno izgrađeni od karbonatnih naslaga stvorenih na Jadranskoj karbonatnoj platformi tokom mezozoika i kenozoika (Belinić, 2020). Spoljašnji Dinaridi, takođe, obuhvataju i dubokovodne sedimente u uskim dubokovodnim koritima, npr. Budva zona (Matoš i dr., 2017). Mezozojske karbonatne naslage spoljašnjih Dinarida imaju izuzetnu debljinu, te na pojedinim mestima ona iznosi i preko 8000 m.

Unutrašnji Dinaridi, koji su locirani između spoljašnjih Dinarida i Panonskog basena, se sastoje od četiri jedinice: Durmitor, Drina-Ivanjica, Jadar-Kopaonik i Zapadni Vardar. Izgrađeni su od karbonata pasivne kontinentalne margine – klastična serija ultramafičnih stena i dubokovodnih sedimenata ofiolitskog kompleksa, jedinica ofiolitskog melanža, flišnih sedimenata, magmatskih i metamorfnih stena (Matoš i dr., 2017).

Tektonska i sedimentna evolucija kraških Dinarida genetski je povezana sa Jadranskom karbonatnom platformom, formiranom na Jadranskoj mikroploči kao prostrano, relativno stabilno plitko morsko područje (Matoš i dr., 2017). Ovu oblast karakteriše kontinuirano taloženje karbonatnih sukcesija i njihova starost se kreće od srednjeg perma pa do eocena. Početak formiranja Jadranske karbonatne platforme okarakterisao je srednjetrijski vulkanizam koji je usled proširenja i formiranja dubokih gravitacionih raseda omogućio raspad Jadranske mikroploče. Tokom mezozoika bilo je dominantno taloženje karbonata u plitkom moru usled postepenog spuštanja Jadranske karbonatne platforme. Završetak taloženja ove karbonatne platforme obeležen je sinsedimentarnim, kompresionim tektonskim deformacijama koje su rezultirale taloženjem eocenskih flišnih naslaga u novoformiranih flišnim basenima. Konačno tektonsko izdizanje Dinarida započeto je u kasnom eocenu do oligocena formiranjem Dinaridske zone i zone Visokog krša, kao i klastično-karbonatnih sedimenata – prominskih laporaca, kalkarenita, konglomerata i velebitske karbonatne breče, koji se mogu naći na području Italije, Slovenije, Bosne i Hercegovine, Crne Gore i Albanije (Matoš i dr., 2017).

Krajnji severoistočni deo istražnog područja čini Panonski basen, tačnije zapadni deo bloka Tise. Panonski basen predstavlja izalučni basen i nastao je tokom subdukcije Karpata. Obodni prostori južnapanonskog basena su takođe pod uticajem Dinarida (Šumanovac, 2010). U ovom delu istražnog prostora preovlađuju neogeni i kvartarni sedimenti. Postoje i depresije koje su ispunjene neogenim naslagama, a koje variraju po svojim dimenzijama i dubinama. Najveće i najdublje depresije u ovom delu Panonskog basena su Savska i Dravska depresija, čije je sedimentne naslage su dobro poznate zbog istraživanja nafte (Šumanovac, 2010).

Na slici 8 prikazana je geološka karta istražnog prostora sa položajem profila i sa legendom kartiranih jedinica. Na geološkoj karti nije prikazano krajnjih 20 km severnog dela istražnog prostora i oko 10 km krajnjeg istočnog dela.



Slika 8. Geološka karta sa obeleženim položajem profila – crne linije, i legendom kartiranih jedinica (modifikovana prema Mancinelli i dr., 2022)

6. OBRADA I ANALIZA GRAVIMETRIJSKIH PODATAKA

Gravimetrijska istraživanja se sastoje od tri osnovne faze: gravimetrijskih merenja, obrade podataka i interpretacije podataka. Pored merenja gravitacionog ubrzanja na terenu, gravimetrijska merenja obuhvataju i merenja za potrebe kalibracije instrumenta kao i laboratorijska merenja gustine na uzorcima stena, i drugih materijala. Obrada i analiza podataka gravimetrijskih merenja se sastoje iz niza postupaka, koji imaju za cilj da omoguće uspešnu interpretaciju rezultata istraživanja. Na terenima sa izraženim reljefom i lateralnim promenama gustine, posebna pažnja mora da se obrati na računanje popravki, pošto je njihova vrednost često istog reda veličine ili čak veća od intenziteta anomalija gravitacionog ubrzanja. Završna faza gravimetrijskih istraživanja jeste interpretacija gravimetrijskih podataka. Cilj interpretacije je da se izdvoje uzročnici gravimetrijskih anomalija i da se što je preciznije moguće odrediti njihov raspored u prostoru (dubina, oblik, dimenzije) i svojstva (gustina), odnosno da se formira model ispitivanog prostora (Vasiljević i Ignjatović, 2019).

Podaci koji su korišćeni prilikom izrade rada, za kopneni deo istražnog prostora i ostrva preuzeti su iz Baze gravimetrijskih podataka bivše SFR Jugoslavije, a podaci za prostor Jadranskog mora su dobijeni digitalizacijom gravimetrijske karte šireg istražnog područja (Mancinelli i dr., 2022). Baza gravimetrijskih podataka, u obliku u kom je formirana, sadrži sledeće podatke: redni broj tačke, koordinate tačke (u Gaus-Kriggerovom koordinatnom sistemu), nadmorsku visinu tačke, merenu vrednost gravitacionog ubrzanja, vrednost popravke za uticaj reljefa (računatu za vrednost gustine od 2 g/cm^3) i normalnu vrednost gravitacionog ubrzanja (po formuli Kasinisa). Naknadno je izvršena transformacija podataka u Univerzalni transferzalni Merkartov (UTM) koordinatni sistem (Brkić, 2022). Izmene baze uključuju transformacije koordinatnih referentnih sistema i datuma (horizontalni i vertikalni - promena sistema visina), promenu gravimetrijskog datuma iz Potsdamskog sistema u međunarodnu gravimetrijsku mrežu IGSN71, preračunavanje vrednosti normalnog polja i popravki. Izvedena transformacija omogućava računanje savremenih gravimetrijskih anomalija i povezivanje podataka sa podacima gravimetrijskih istraživanja na okolnim teritorijama.

Obrada i analiza gravimetrijskih podataka se odvijala kroz nekoliko koraka:

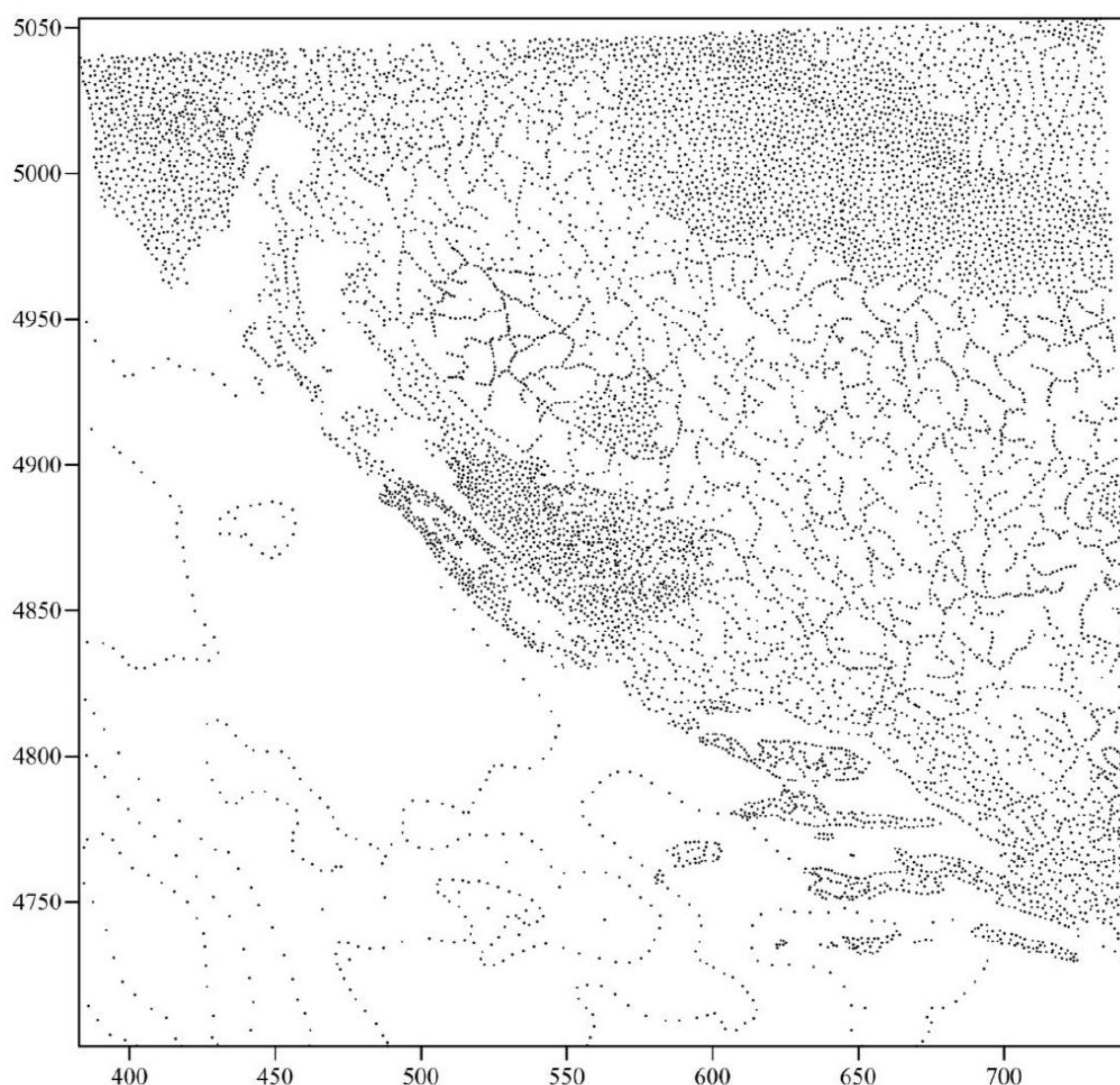
1. pregled i revizija podataka,
2. pregled i analiza podataka dubine do Mohoa,
3. računanje savremenih Bugeovih anomalija,
4. uvođenje izostatičke popravke i računanje izostatičkih anomalija,
5. analiza rezultata duž profila P1, P2 i P3.

Sve karte koje su prikazane u ovom poglavlju urađene su u programu Surfer, programskog paketa Golden Software, dok su profili izrađeni u programu Grapher, istog programskog paketa. Izabrana je mreža interpolacije karata 4x4 km.

6.1. Analiza i revizija podataka

Prvi korak prilikom vršenja obrade podataka jeste revizija istih. Ovaj korak za cilj ima da se utvrdi da li postoje podaci, čije vrednosti značajno odstupaju od vrednosti okolnih podataka. Ovakve vrednosti predstavljaju visokofrekventne smetnje, čiji uzročnici se razlikuju. Izvor grešaka u podacima može biti ljudski faktor, poput loše unetih koordinata merenja ili merene vrednosti, ili veštački uzročnik u prirodi koji tokom merenja nije primećen (Ignjatović, 2023). Neophodno je ukloniti ove visokofrekventne smetnje pre dalje obrade podataka. Tokom izrade rada, revizijom je utvrđeno da ne treba ukloniti ni jedan podatak (Brkić, 2022).

Na slici 9 prikazan je raspored tačaka na kojima su vršena gravimetrijska merenja i tačaka koje su dobijene digitalizacijom gravimetrijske karte šireg istražnog područja (Mancinelli i dr., 2022). Dimenzije istražnog prostora iznose 320x320 km, a površina iznosi 102400 km². Istražno područje ograničeno je koordinatama X [420 – 740] km i Y [4720 – 5040] km u UTM sistemu (zona 33). Na istražnom prostoru nalazi se ukupno 10193 tačaka, od kojih je 9792 iz Baze gravimetrijskih podataka SFRJ, a 403 tačke su dobijene digitalizacijom. Na slici 9, zapaža se da raspored tačaka nije ravnomeran, i da se znatno manje tačaka nalazi u jugozapadnom delu istražnog područja. Razlog je zato što je ovaj deo karte dobijen digitalizacijom gravimetrijske karte šireg istražnog područja (Mancinelli i dr., 2022).

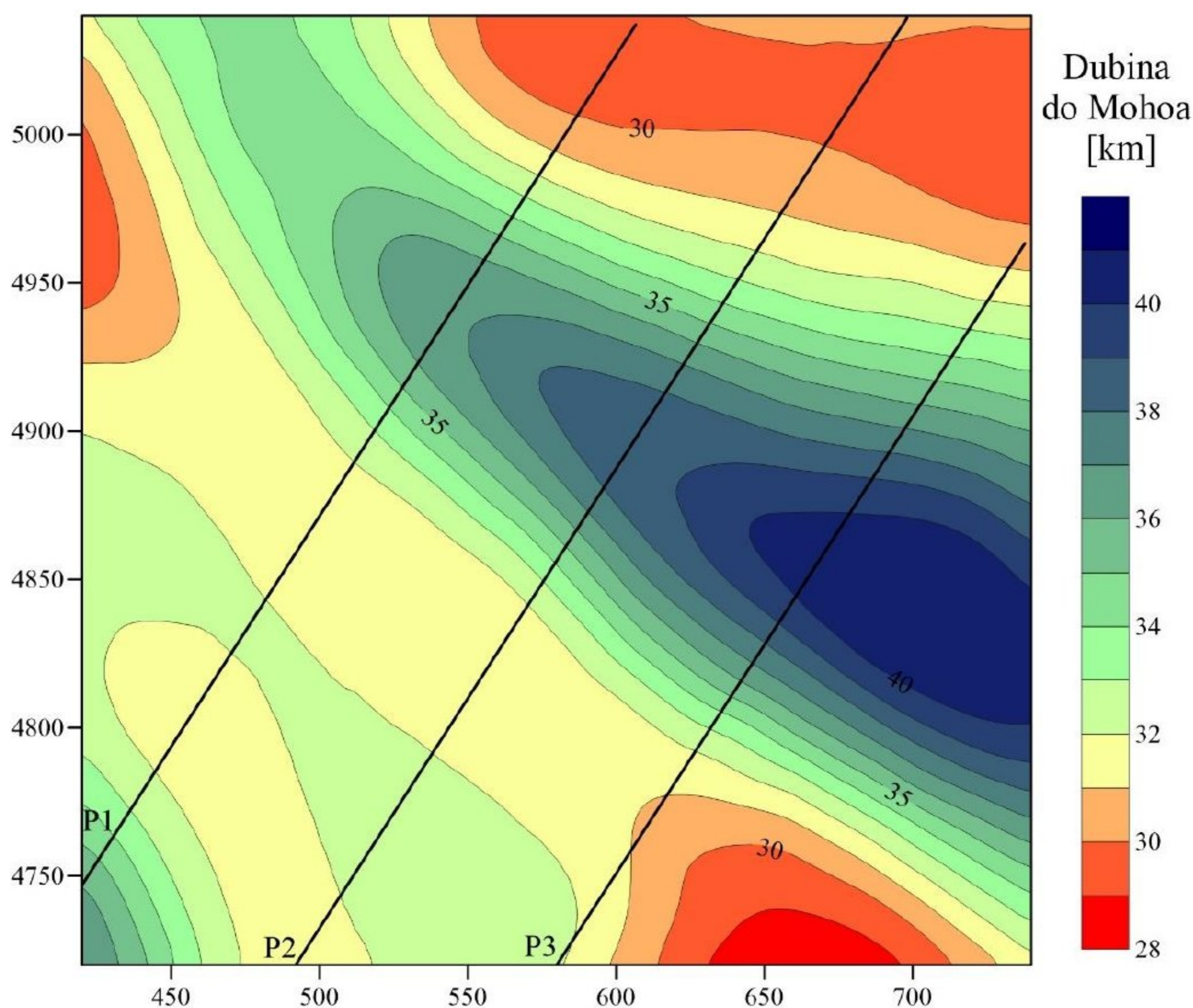


Slika 9. Raspored gravimetrijskih mernih tačaka (baza gravimetrijskih podataka SFRJ) i tačaka dobijenih digitalizacijom gravimetrijske karte šireg istražnog područja (Mancinelli i dr., 2022)

6.2. Dubina do Moho diskontinuiteta na istražnom području

Mohorovičev diskontinuitet (Moho), kao što je ranije navedeno, predstavlja granicu između Zemljine kore i omotača, i njegova dubina varira. Na slici 10 prikazana je karta dubine do Mohoa za istražno područje sa obeleženim profilima. Karta dubine do Mohoa izrađena je na osnovu karte publikovane u doktorskoj disertaciji (Tassis, 2010). U sklopu te publikovane karte nalazi se istražno područje, koje je obrađeno u ovom radu. Digitalizacija karte izrađena je u programu Surfer (programski paket Golden Software). Postoji mala razlika između originalne i digitalizovane karte, ali ona ne utiče značajno na dalju obradu i preciznost podataka.

Dubina do Mohoa na istražnom području varira u opsegu između 28 i 41 km. Najveća dubina do Mohoa zapaža se u centralnom i istočnom delu istražnog prostora, dok se minimalne vrednosti mogu uočiti jugoistočnom, severoistočnom i severozapadnom delu terena. Najmanja dubina do Mohoa nalazi se u krajnjem jugo-istočnom delu i iznosi 28 km. Karta dubine do Mohoa pokazuje da je debljina Zemljine kore najveća na prostoru Dinarida, a maksimalne vrednosti dubine odgovaraju najvišim delovima terena, sa izraženom topografijom (Slika 7). Znatno manja debljina Zemljine kore vezana je za niže delove terena, kao što su prostori Jadranskog mora i Panonskog basena.



Slika 10. Karta dubine do Moho diskontinuiteta sa položajem profila – crne linije (modifikovana prema Tassis, 2010)

6.3. Savremene Bugeove anomalije gravitacionog ubrzanja

Rezultati merenja gravitacionog ubrzanja ne mogu direktno da se porede, zato što se merenja vrše u različito vreme, merne tačke nisu na istoj geografskoj širini i/ili nadmorskoj visini, a gustina materijala u okolini tačke je različita (Vasiljević i Ignjatović, 2019). Svi prethodno navedeni razlozi doveli su do potrebe za uvođenjem redukcija (popravki) i računanjem anomalija gravitacionog ubrzanja. Anomalija gravitacionog ubrzanja (Δg), u tački posmatranja, dobija se oduzimanjem normalne vrednosti (g_0) od merenje vrednosti gravitacionog ubrzanja (g_m), uz uvođenje odgovarajućih popravki (Δ):

$$\Delta g = g_m - (g_0 + \Delta) . \quad (6.2.1)$$

Normalne vrednosti (g_0) predstavljaju raspodelu gravitacionog ubrzanja na nivou rotacionog elipsoida (sferoida), dok se merene vrednosti (g_m) uglavnom odnose na mernu tačku koja nije na površi elipsoida. Uvođenjem popravki (Δ), odnosno redukcijom gravitacionog ubrzanja, ove dve veličine se dovode na isti nivo, bilo računanjem normalne vrednosti gravitacionog ubrzanja za nivo tačke merenja ili preračunavanjem merene vrednosti sa nivoa merenja na površ elipsoida.

Međunarodna unija za geodeziju i geofiziku (IUGG) je, 1980. godinem uvela elipsoid sa novim parametrima (GRS80) i preporučila odgovarajuću Međunarodnu gravimetrijsku formulu (1980):

$$g_0 = 9.780327(1 + 0.0053024\sin^2\varphi - 0.0000058\sin^2 2\varphi) , \quad (6.2.2)$$

gde je φ - geografska širina.

Osnovne vrste anomalija gravitacionog ubrzanja su Bugeove i Fajove anomalije. U gravimetriji se uglavnom primenjuju Bugeove anomalije, dok se Fajove anomalije (anomalije slobodnog vazduha) češće primenjuju u geodeziji. Iz osnovnog oblika Bugeovih anomalija izvedeni su različiti tipovi, koji sadrže specifične popravke, a koriste se rešavanje različitih geoloških problema.

Pri redukciji normalne vrednosti gravitacionog ubrzanja sa nivoa rotacionog elipsoida (sferoida) na nivo tačke posmatranja, popravka za visinu (Fajova popravka) se računa kao normalni gradijent gravitacionog ubrzanja, uz pretpostavku da između ovih nivoa ne postoje bilo kakve mase (Vasiljević, 2022). Za Međunarodni elipsoid iz 1980. godine, kome odgovara Međunarodna gravimetrijska formula iz 1980. godine (6.2.2), Fajova popravka data je izrazom:

$$\Delta g_h = -(0.3087691 - 0.0004398 \sin^2 \varphi)h + 7.2125 \cdot 10^{-8}h^2, \quad (6.2.3)$$

gde je h – visina tačke osmatranja.

Popravka za uticaj atmosfere obuhvata gravitacioni uticaj promena u masi atmosfere, sa promenom visine tačke posmatranja iznad referentnog nivoa (elipsoida ili geoida) i računa se na terenima sa velikim rasponom visine mernih tačaka. Izraz za popravku za uticaj atmosfere je:

$$\Delta g_{\text{atm}} = 0.874 - 9.9 \cdot 10^{-5}h + 3.56 \cdot 10^{-9}h^2. \quad (6.2.4)$$

Kompletna Bugeova popravka obuhvata popravku za sloj (Bulard A), popravku za zakrivljenost sloja (Bulard B) i popravku za uticaj reljefa (Bulard C). Popravka za sloj obuhvata gravitacioni uticaj masa koje se nalaze između referentne površi i površi koja prolazi kroz tačku posmatranja, a paralelna je referentnoj površi (Vasiljević, 2022). Izraz za računanje popravke za sloj je:

$$\Delta g_s = 2\pi K\sigma h = 0.04193\sigma h, \quad (6.2.5)$$

gde je

K – gravitaciona konstanta,

σ – srednja vrednost gustine sloja.

Popravka za zakrivljenost sloja (Bulard B) se uvodi kako bi se sa horizontalnog sloja beskonačnog pružanja, prešlo na isečak sfernog sloja. Debljina isečka sfernog sloja odgovara visini tačke posmatranja, a lučna dužina sfernog sloja, od tačke posmatranja do oboda isečka sfernog sloja, najčešće iznosi 166735 km, što odgovara poluprečniku zone O Hejford-Bouvijevog topografskog sistema (Vasiljević, 2022). Najčešće korišćena aproksimacija za Bulard B popravku je data u obliku:

$$BB = Ah + Bh^2 + Ch^3, \quad (6.2.6)$$

gde je

$$A = 1.464 \cdot 10^{-3},$$

$$B = -3.533 \cdot 10^{-7},$$

$$C = 4.5 \cdot 10^{-14}.$$

Popravka za uticaj reljefa koristi se jer površ na kojoj se vrše gravimetrijska merenja obično nije horizontalna, te na merene vrednosti gravitacionog ubrzanja utiče gravitaciono privlačenje „topografskih masa“. Termin „topografske mase“ označava mase koje se nalaze u prostoru ograničenom realnom površi terena (reljef) i horizontalnom površi koja prolazi kroz tačku posmatranja (gornja površ Bugeovog sloja), (Vasiljević, 2022). Izraz za popravku za reljef je:

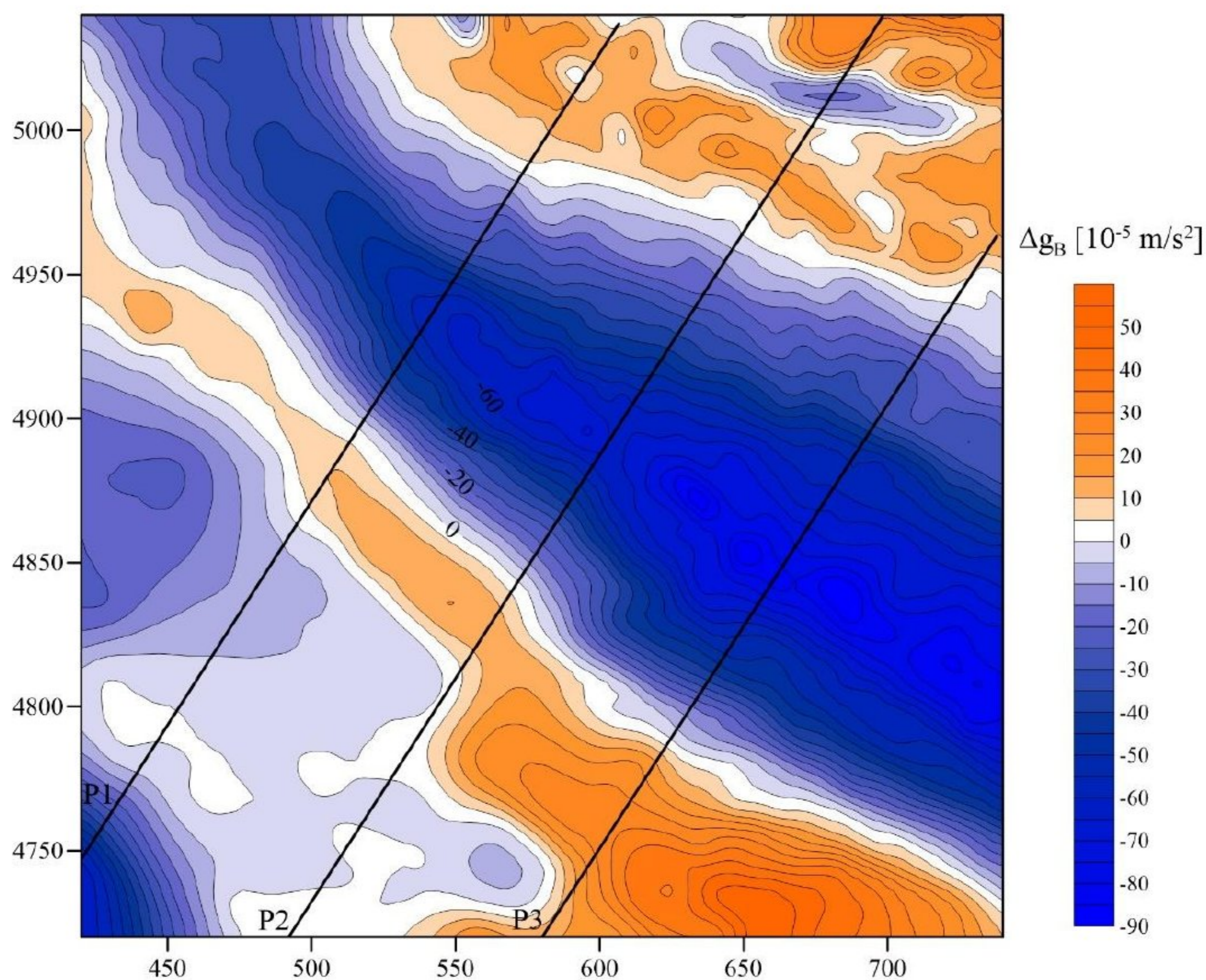
$$\Delta g_t = t \cdot \sigma, \quad (6.2.7)$$

gde je t parametar koji predstavlja popravku za uticaj reljefa pri jediničnoj vrednosti gustine (σ).

Bugeova anomalija, kao najčešće korišćena u gravimetriji, primenjuje se za definisanje nehomogenosti gustine stenskog materijala, jer često daje realnu sliku raspodele gustine unutar Zemljine kore. Vrednost Bugeove anomalije direktno zavisi od gustine stenske mase. Izraz za savremene Bugeove anomalije (Δg_B) definisan je (Vasiljević, 2022):

$$\Delta g_B = g_m - g_0 + \Delta g_h + \Delta g_{\text{atm}} - \Delta g_s - BB + \Delta g_t. \quad (6.2.8)$$

Na osnovu jednačine 6.2.8, određene su vrednosti savremenih Bugeovih anomalija. Za srednju vrednost gustine na istražnom području uzeta je vrednost 2.67 g/cm^3 . Analizom karte Bugeovih anomalija primećene su određene smetnje, odnosno izolovane anomalije malog prostiranja. U cilju uklanjanja smetnji primenjeni su različiti filteri, a najbolji rezultat dao je niskopropusni Gausov filter 5×5 , u jednom prolazu. Filtrirana karta Bugeovih anomalija prikazana je na slici 11. Ekvidistanca iznosi $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Vrednosti Bugeovih anomalija kreću se u opsegu od $-90 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$ do $55 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Karta savremenih Bugeovih anomalija pokazuje da se minimalne vrednosti savremenih Bugeovih anomalija nalaze u središnjem delu terena na prostoru Dinarida, odnosno odgovaraju najvišim delovima terena, sa izraženom topografijom (Slika 7). Maksimalne vrednosti savremenih Bugeovih anomalija prisutne su na nižim delovima terena, odnosno na prostorima Jadranskog mora, Vardarske zone i Panonskog basena. Pružanje savremenih Bugeovih anomalija generalno prati pravac severozapad-jugoistok. Maksimalna vrednost savremenih Bugeovih anomalija nalazi se u južnom delu istražnog prostora.



Slika 11. Karta savremenih Bugeovih anomalija sa položajem profila – crne linije

6.4. Popravka za uticaj izostazije i izostatičke anomalije

Popravka za uticaj izostazije (izostatička popravka) uzima u obzir uticaj kompenzacionih masa. Ukoliko je masa planine kompenzovana deficitom masa koje se nalaze ispod nje, popravkom za uticaj izostazije će se otkloniti uticaj planinske mase iz izračunate vrednosti gravitacionog ubrzanja i dodati uticaj masa koje se nalaze između referentne površi (geoida ili elipsoida) i površi kompenzacije. Kada je izostatička kompenzacija ispravno izračunata, vrednosti anomalije gravitacionog ubrzanja će biti jedna nuli (u slučaju da se radi o homogenom terenu),

jer će se izostatičkom popravkom otkloniti sve anomalije te mase. Osnova za računanje izostatičke popravke je formula za gravitacioni uticaj cilindra u tački osmatranja O, koja je sliča formuli za izračunavanje popravke za uticaj reljefa (Vasiljević, 2022):

$$\Delta g = \sum \sum_n \frac{1}{n} 2\pi K\sigma \left\{ \left[\sqrt{a^2 + (h^2 + t^2)^2} - \sqrt{a^2 + h^2} \right]_{a=r_2} - \left[\sqrt{a^2 + (h^2 + t^2)} - \sqrt{a^2 + h^2} \right]_{a=r_1} \right\}, \quad (6.4.1)$$

gde je:

n – broj sektora,

t – visina cilindra,

a – poluprečnik cilindra (može da odgovara zonama radijusa r_1 i r_2),

h – visina tačke posmatranja iznad cilindra.

Formula za popravku daje privlačenje celog cilindra, podeljenog na broj segmenata. Kada se uvedu smene - $t = T$ (dubina kompenzacije) i $h = H$ (nadmorska visina), ova formula omogućava da se izračuna popravka za uticaj izostazije. Kriterijum za odabir dubine kompenzacije je taj da vrednosti izostatičke anomalije moraju da budu blizu nule, pri čemu se Bugeove i Fajove anomalije razmatraju kao granični slučajevi izostatičke anomalije, sa dubinom kompenzacije sa vrednošću beskonačno i nula, respektivno. To znači da je vrednost izostatičkih anomalija, u tački posmatranja, bliska nuli i leži između Fajove i Bugeove anomalije (Vasiljević, 2022).

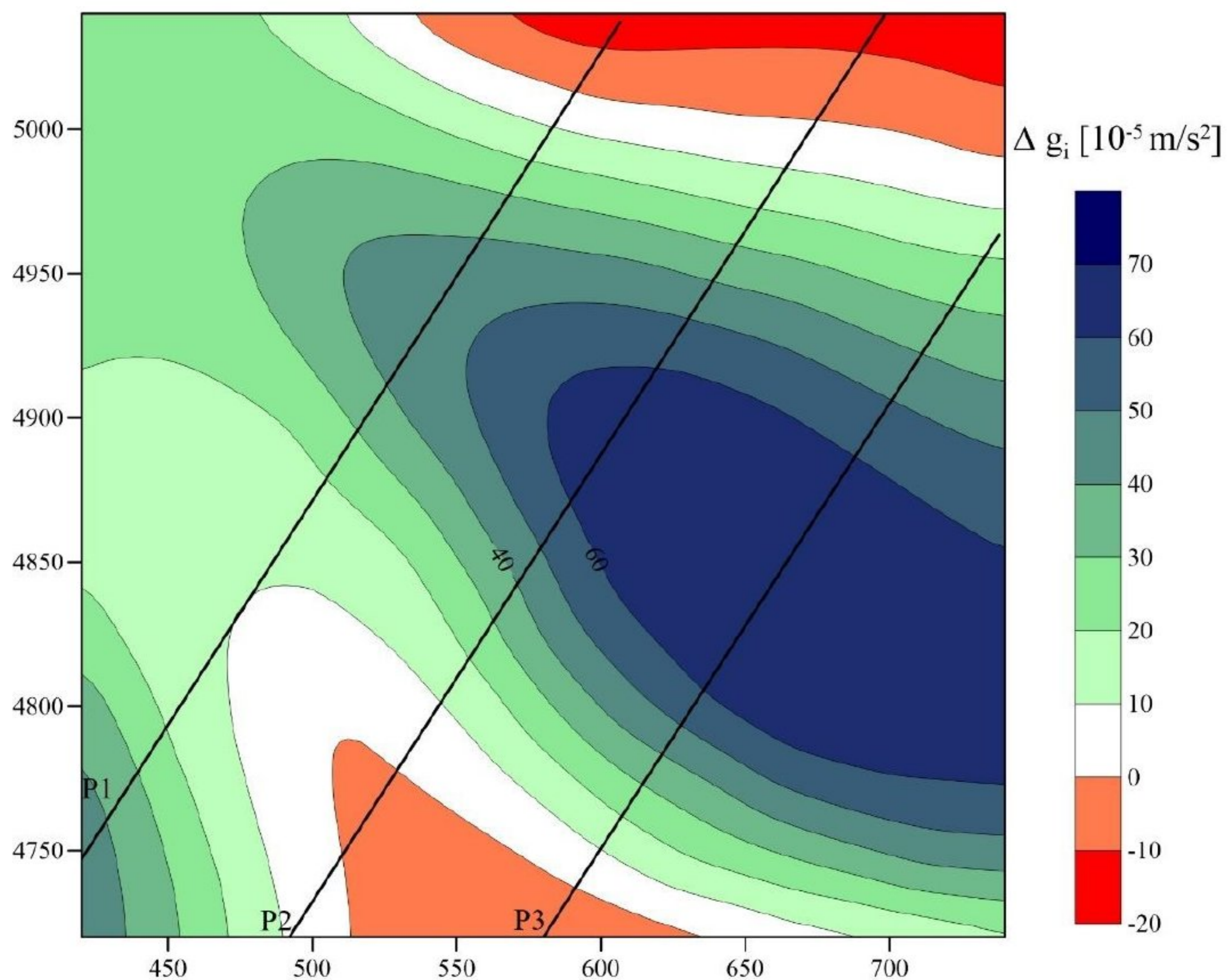
Pokazatelj da postoji uticaj izostazije, odnosno da je potrebno uvesti izostatičku popravku, je postojanje pozitivnih Fajovih i negativnih Bugeovih anomalija u određenoj oblasti. Kada su i Fajove i Bugeove anomalije generalno pozitivne ili generalno negativne u nekoj određenoj oblasti, izostatička kompenzacija ne utiče na anomalije (Vasiljević, 2022).

Anomalije u kojima figuriše izostatička popravka nazivaju se izostatičke anomalije (Δg_{B_i}):

$$\Delta g_{B_i} = g_m - g_0 + \Delta g_h + \Delta g_{atm} - \Delta g_s - BB + \Delta g_t + \Delta g_i = \Delta g_B + \Delta g_i, \quad (6.4.2.)$$

gde je Δg_i – izostatička popravka.

Karta izostatičkih popravki sa položajem profila, prikazana na slici 12, dobijena je digitalizacijom karte izostatičke popravke (Tassis, 2010). Na kartu je primenjen niskopropusni filter Moving Average 5x5, u jednom prolazu, u cilju otklanjanja smetnji. Ekvidistanca iznosi $10 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Vrednost izostatičkih popravki se kreće u opsegu od $-20 \cdot 10^{-5}$ do $70 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Maksimalne vrednosti izostatičke popravke uočavaju se u središnjem i istočnom delu istražnog prostora, dok se negativne vrednosti nalaze u južnom i severoistočnom delu istražnog područja. Karta izostatičkih popravki pokazuje da se maksimalne vrednosti izostatičke popravke nalaze na delovima terena sa izraženom topografijom, odnosno na prostoru gde je prisutna najveća dubina do Mohorovičićevog diskontinuiteta (Slika 10). Minimalne vrednosti izostatičkih popravki vezane su za prostore sa manjim vrednostima dubine do Mohoa, odnosno za niže delove terena, poput Jadranskog mora i Panonskog basena.

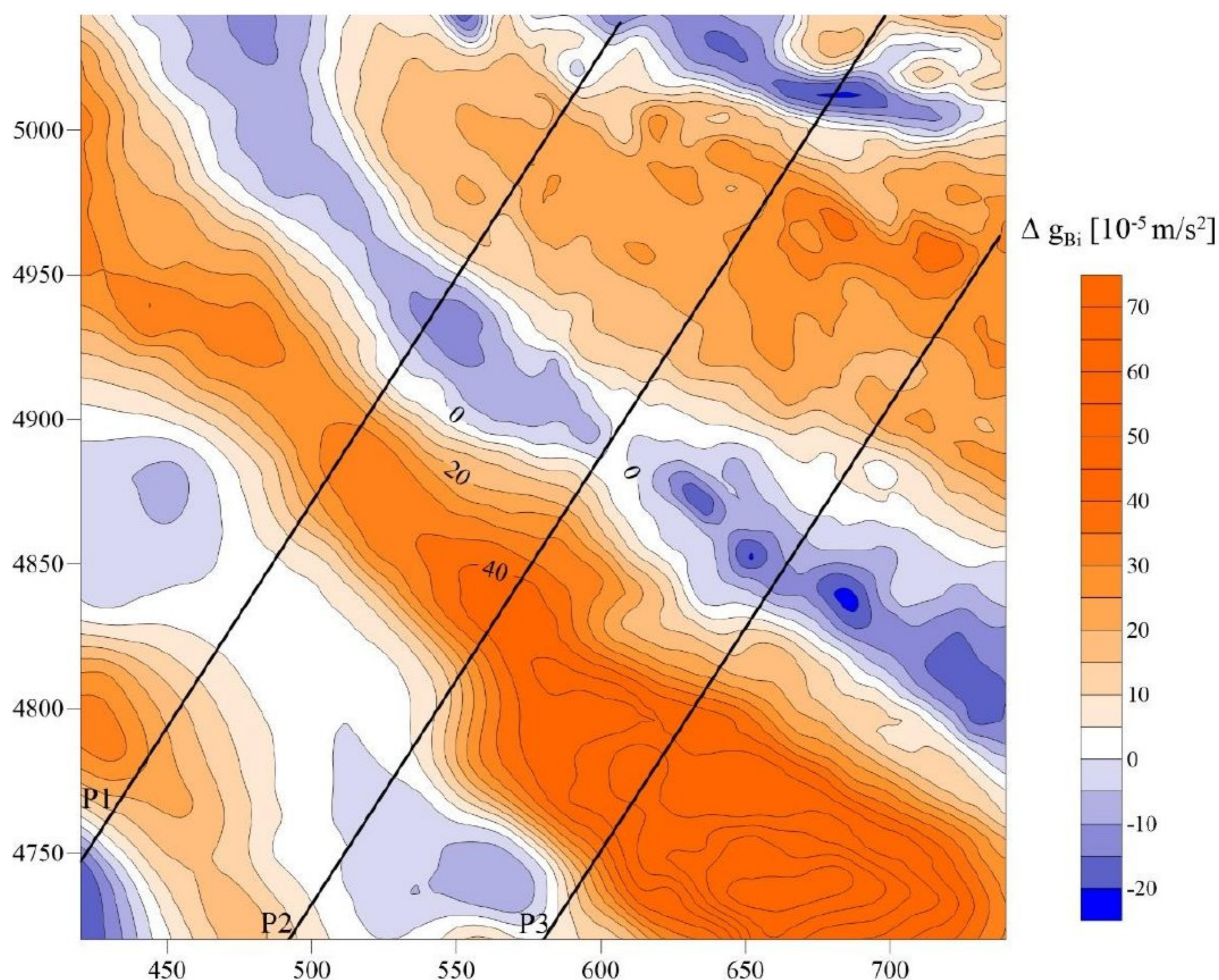


Slika 12. Karta izostatičkih popravki sa položajem profila – crne linije (modifikovana prema Tassis, 2010)

Na slici 13 prikazana je karta izostatičkih anomalija. Grid (mreža podataka), na osnovu kog je izrađena karta izostatičkih anomalija, dobijen je sabiranjem grida filtrirane karte Bugeovih anomalija (Slika 11) i grida digitalizovane karte izostatičkih popravki (Slika 12), u programu Surfer. Nije bilo potrebe za filtriranjem ove karte, pošto je dobijena sabiranjem gridova karata koje su filtrirane. Ekvidistanca iznosi $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Vrednost izostatičkih anomalija kreće se u opsegu od $-20 \cdot 10^{-5}$ do $70 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Maksimalne vrednosti izostatičkih anomalija zapažaju se u krajnjem jugoistočnom delu istražnog područja, dok se minimumi zapažaju u istočnom i severoistočnom delu terena. Pružanje anomalije je, generalno, u pravcu severozapad-jugoistok (dinarski pravac). Ukupan opseg anomalija je znatno manji od opsega savremenih Bugeovih anomalija.

Minimumi u Spoljašnjim Dinaridima i Panonskom basenu prisutni su i nakon uklanjanja efekta izostazije. Na prostoru Spoljašnjih Dinarida uzročnik negativnih anomalija sa više izdvojenih minimuma jesu karbonatne stene, dok minimum u Panonskom basenu izaziva duboki Savski rov ispunjen neogenim sedimentima. Obe vrste stene imaju manju gustinu od okolnih stena. Maksimumi su prisutni u Vardarskoj zoni i povezani su, verovatno, sa prisustvom ofiolita, koji imaju veću gustinu od okolnih stena. Ofioliti predstavljaju stensku masu okeanske kore koja je većinski izgrađena od bazičnih i ultrabazičnih magmatskih stena, sa manjim udelom dubokomorskih sedimenta. Na istražnom prostoru su smešteni usled obdukcije i javljaju se u vidu planinskih pojaseva. Povišene vrednosti anomalija sa nekoliko izdvojenih maksimuma se, takođe, nalaze na području Jadranskog mora (naročito u oblasti hrvatskog arhipelaga) i povezane su, najverovatnije, sa paleozojskim metamorfizacijama i magmatizacijama koji su prisutni na

ovom području. U krajnjem južnom delu istražnog terena, u oblastima Jabuke i Brusnika (Slika 8), prisutni su gabrovi, koji se odlikuju velikom gustinom (Mancinelli i dr., 2022).



Slika 13. Karta izostatičkih anomalija sa položajem profila – crne linije

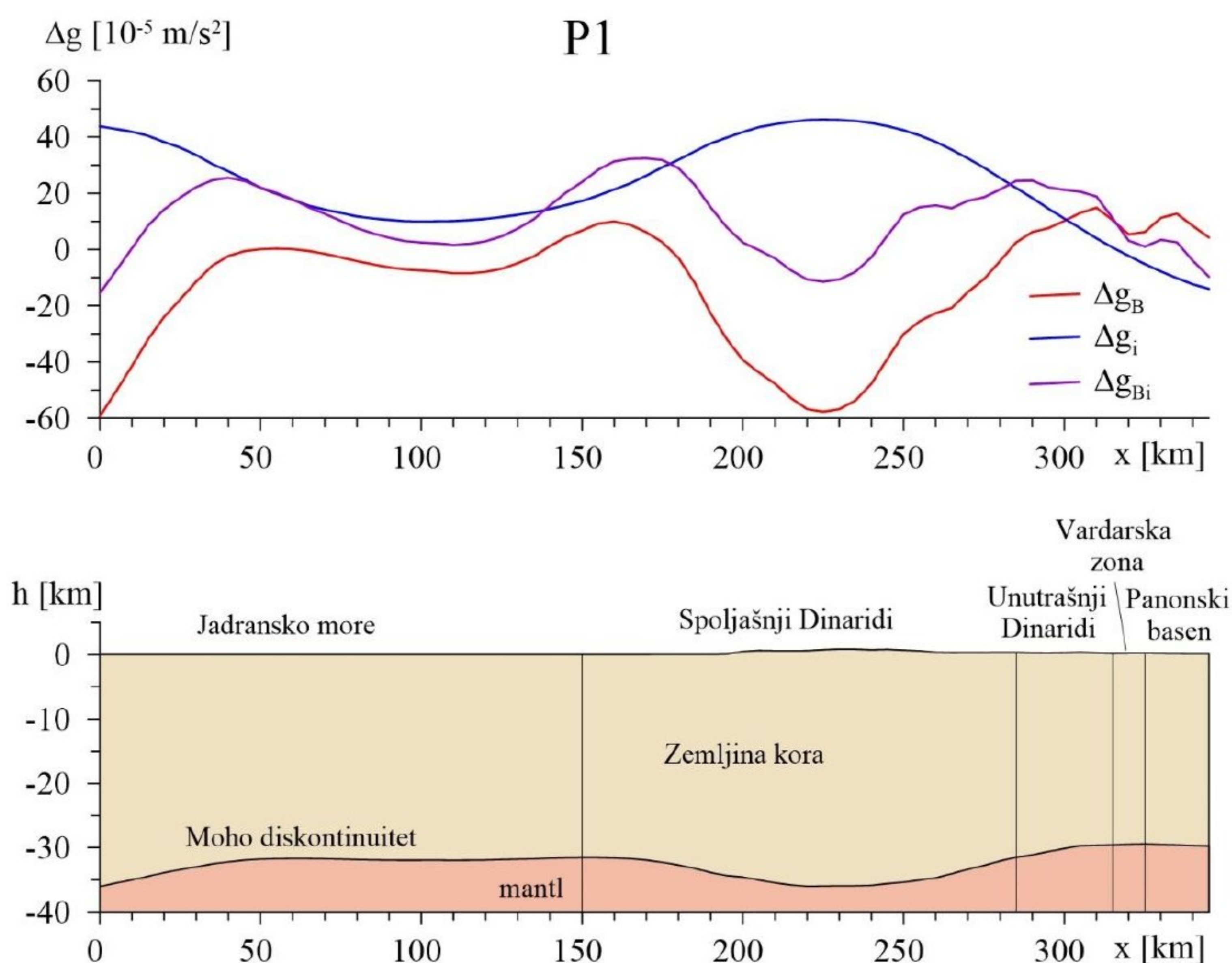
6.5. Analiza gravimetrijskih anomalija duž profila

Profili P1, P2 i P3 (Slike 7, 8 i 10-13) koji se nalaze na istražnom području, postavljeni su upravno na pružanje dominantnih gravimetrijskih anomalija i sa ciljem da se dobije što detaljniji uvid u način na koji debljina Zemljine kore i geologija potpovršine utiču na Bugeove i izostatičke anomalije. Dužine profila se razlikuju.

Na osnovu grafičkih prikaza profila P1, P2 i P3 (Slike 14-16), jasno se može uočiti da su promene vrednosti Bugeovih anomalija u inverznoj korelaciji sa promenama vrednosti debljine Zemljine kore. Savremene Bugeove anomalije imaju generalno negativne vrednosti u sedimentnim basenima (orogeni sistemi, pre svega) i na platformama (veća debljina Zemljine kore), dok se na šelfovima, ostrvskim grebenima i okeanskom dnu (manja debljina Zemljine kore) nalaze generalno pozitivne vrednosti (Vasiljević, 2022). Sa druge strane, jasno je da je u slučaju izostatičke popravke obrnut slučaj, odnosno da se sa porastom debljine Zemljine kore znatno povećava vrednost izostatičke popravke. Pošto se vrednost izostatičkih anomalija dobija sabiranjem Bugeovih anomalija i izostatičke popravke, kao što je navedeno u prethodnom tekstu, jasno je da će oblik krive izostatičkih anomalija pratiti oblik krive Bugeovih anomalija, ali opseg anomalija će biti znatno niži.

Profil P1 ima koordinate X [420, 608.5] i Y [4747, 5040] u UTM koordinatnom sistemu. Na slici 14 nalazi se grafički prikaz profila P1. Savremene Bugeove anomalije se duž profila P1 kreću u opsegu od $-59 \cdot 10^{-5}$ do $14 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Minimumi savremenih Bugeovih anomalija (crvena linija) nalaze se na prostoru Spoljašnjih Dinarida, što odgovara izraženoj topografiji i karbonatnim stenama koje imaju manju gustinu od okolne stenske mase, i na početku profila P1, u Jadranskom moru, gde se nalaze deblje naslage kenozojskih sedimenata. Maksimumi savremenih Bugeovih anomalija se nalaze u zoni ostrva hrvatskog arhipelaga, u graničnom delu između Jadranskog basena i Dinarida i u delu terena koji obuhvata Unutrašnje Dinaride, što se koreliše sa smanjenom debljinom Zemljine kore i prisustvom ofiolita u Vardarskoj zoni.

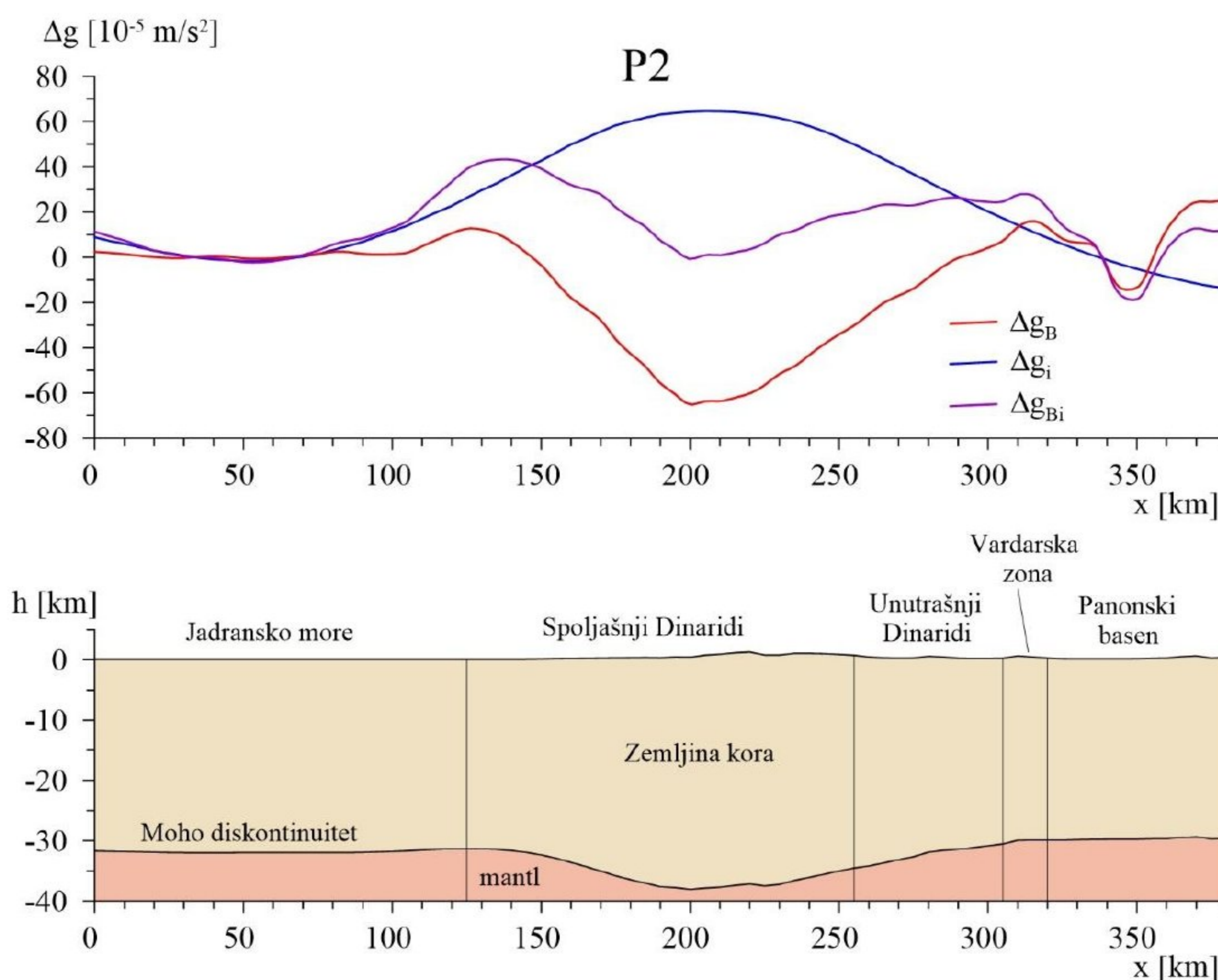
Izostatička popravka (plava linija) ima generalno pozitivnu vrednost duž profila P1. Minimumi izostatičke popravke nalaze se u zoni Jadranskog mora i na samom kraju profila P1 na nižim delovima terena, odnosno u Panonskom basenu, gde je smanjenja vrednost dubine do Mohorovičićevog diskontinuiteta. Vrednosti izostatičkih anomalija (ljubičasta linija) imaju manji opseg od savremenih Bugeovih anomalija, kao što je prethodno navedeno, i pozitivne su duž skoro celog profila P1. One se kreću u opsegu od $-15 \cdot 10^{-5}$ do $32 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Minimumi se zapažaju u Spoljašnjim Dinaridima i na prostoru Panonskog basena, što odgovara činjenici da se na ovim delovima terena nalaze karbonati i neogeni sedimenti, respektivno, koji imaju manju gustinu od okolnih stena. Nakon uklanjanja uticaja izostazije, pored minimuma na početku profila, uočava se i minimum u zoni basena Dugog otoka (Slika 8), ispunjenog kenozojskim sedimentima, dok je maksimum u zoni hrvatskog arhipelaga jasnije izražen.



Slika 14. Model promena debljine Zemljine kore (dole) i krive raspode savremenih Bugeovih anomalija, popravke za uticaj izostazije i izostatičkih anomalija (gore) duž profila P1

Profil P2 ima koordinate X [492, 698.5] i Y [4720, 5040] u UTM koordinatnom sistemu. Grafički prikaz profila P2 nalazi se na slici 15. Vrednosti savremenih Bugeovih anomalija (crvena linija) kreću se u nešto širem opsegu nego na profilu P1, od $-65 \cdot 10^{-5}$ do $26 \cdot 10^{-5}$ m/s². Najizraženiji minimum savremenih Bugeovih anomalija nalazi se na prostoru Spoljašnjih Dinarida, što odgovara izraženoj topografiji i karbonatnim stenama koje imaju manju gustinu od okolne stenske mase, kao i povećanoj debljini Zemljine kore. Drugi uočen minimum prisutan je u Panonskom basenu. Uzročnik je duboki Savski rov ispunjen neogenim sedimentima, koji postoji u ovom delu Panonskog basena.

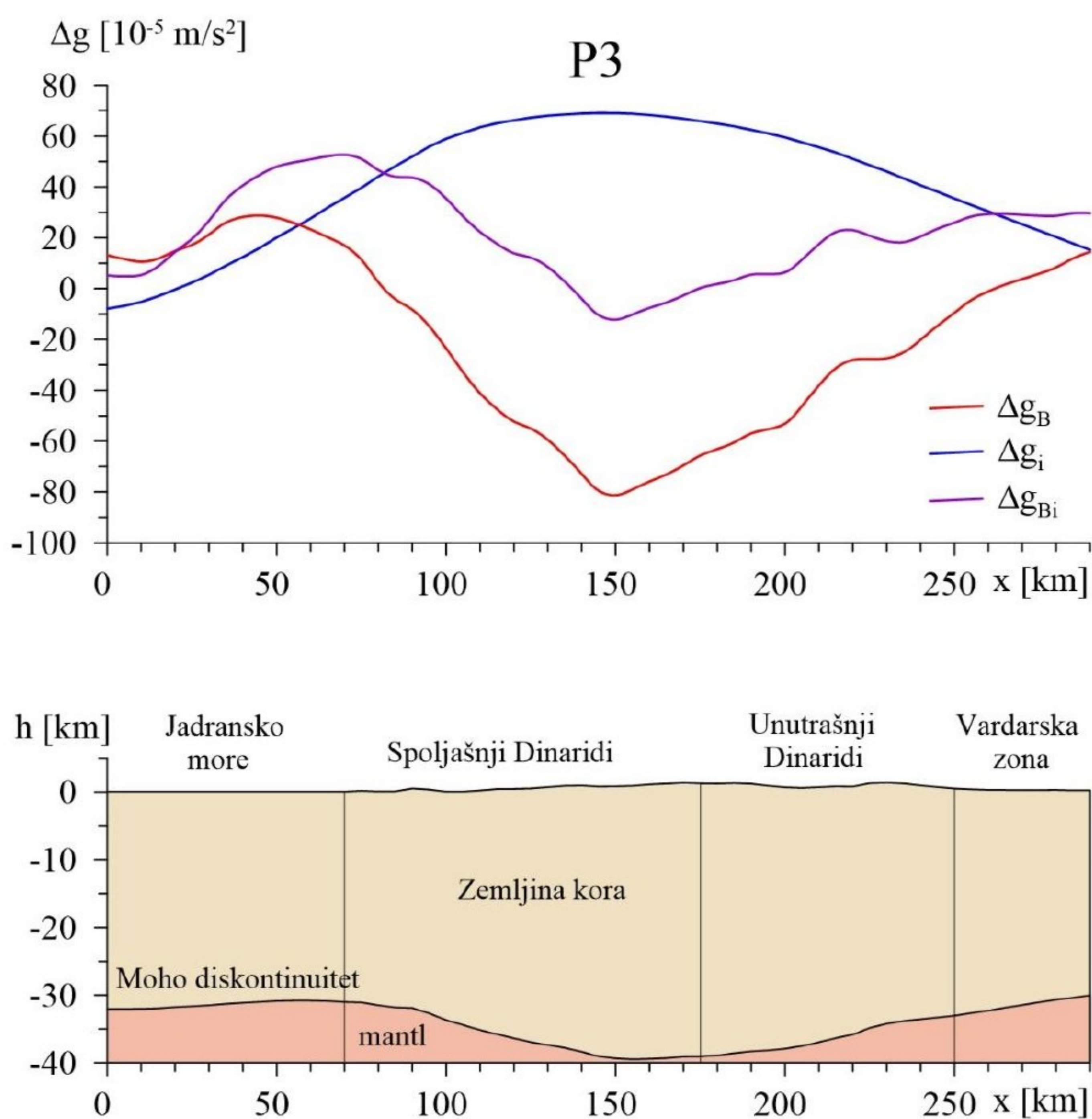
Maksimum izostatičke popravke (plava linija) nalazi se u zoni Spoljašnjih Dinarida, gde je izražena topografija i najveća debljina Zemljine kore. Minimumi izostatičke popravke nalaze se u zoni Jadranskog mora i na samom kraju profila P2, na nižim delovima terena, gde je smanjena vrednost dubine do Mohorovičićevog diskontinuiteta. Vrednosti izostatičkih anomalija (ljubičasta linija) kreću se u opsegu od $-18 \cdot 10^{-5}$ do $43 \cdot 10^{-5}$ m/s² duž profila P2. Nakon uklanjanja uticaja izostazije, minimum na prostoru Panonskog basena, čije postojanje se vezuje za Savski rov, još je jasnije izražen, posebno u odnosu na maksimum izostatičkih anomalija, koji se nalazi u Vardarskoj zoni i povezan je sa ofiolitima. S druge strane, minimum koji izazivaju karbonati Unutrašnjih Dinarida je znatno manje izražen, dok je maksimum u zoni hrvatskog arhipelaga jasnije izražen i duž profila P2.



Slika 15. Model promena debljine Zemljine kore (dole) i krive raspode savremenih Bugeovih anomalija, popravke za uticaj izostazije i izostatičkih anomalija (gore) duž profila P2

Profil P3 ima koordinate X [580, 740] i Y [4720, 4966.7] u UTM koordinatnom sistemu. Na slici 16 nalazi se grafički prikaz profila P3. Vrednosti savremenih Bugeovih anomalija nalaze se u veoma širokom opsegu od $-81 \cdot 10^{-5}$ do $29 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Maksimumi savremenih Bugeovih anomalija (crvena linija) nalaze se na prostoru Jadranskog mora (u blizini ostrva Vis, slika 8) i u Vardarskoj zoni, slično kao i kod prethodna dva profila. Minimum savremenih Bugeovih anomalija nalazi se na prostoru Spoljašnjih Dinarida, što odgovara izraženoj topografiji i povećanoj debljini Zemljine kore, kao i karbonatnim stenama koje su prisutne na ovom delu terena.

Vrednosti izostatičke popravke (plava linija) su generalno pozitivne duž profila P3. Maksimum izostatičke popravke (plava linija) nalazi se na području Spoljašnjih i Unutrašnjih Dinarida, gde je izražena topografija i najveća debljina Zemljine kore. Minimum izostatičke popravke nalazi se na samom početku profila P3 na nižim delovima terena, odnosno u Jadranskom moru, gde je smanjena vrednost dubine do Mohorovičićevog diskontinuiteta. Vrednosti izostatičkih anomalija (ljubičasta linija) su generalno pozitivne duž celog profila P3 i kreću se u opsegu od $-12 \cdot 10^{-5}$ do $53 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Duž profila P3 je minimum, koji se javlja na prostoru Spoljašnjih Dinarida, i on je slabije izražen nakon uvođenja popravke za uticaj izostazije.



Slika 16. Model promena debljine Zemljine kore (dole) i krive raspode savremenih Bugeovih anomalija, popravke za uticaj izostazije i izostatičkih anomalija (gore) duž profila P3

7. ZAKLJUČAK

Cilj rada je bio da se prikaže značaj uvođenja popravke za uticaj izostazije pri računanju gravimetrijskih anomalija.

Na osnovu dostupnih podataka izrađene su topografska karta, karta dubine do Moho diskontinuiteta, karta savremenih Bugeovih anomalija, karta izostatičkih popravki i karta izostatičkih anomalija. Izdvojeni su podaci duž tri profila (P1, P2 i P3), koji su postavljeni upravno na pruženje geotektonskih jedinica i dominantnih gravimetrijskih anomalija.

Analizom istražnog prostora duž profila P1, P2 i P3 došlo se do sledećih zaključaka. Vrednosti savremenih Bugeovih anomalija su u inverznoj korelaciji sa promenama vrednosti debljine Zemljine kore, odnosno sa porastom debljine Zemljine kore dolazi do smanjenja vrednosti savremenih Bugeovih anomalija. U skladu sa načinom na koji se računa, raspodela izostatičke popravke je u direktnoj korelaciji sa debljinom Zemljine kore (znatno se smanjuje ukoliko dolazi do smanjenja debljine kore). Pošto je vrednost izostatičkih anomalija dobijena sabiranjem Bugeovih anomalija i izostatičkih popravki, jasno je da je opseg izostatičkih anomalija znatno niži od opsega savremenih Bugeovih anomalija.

Posmatrajući različite geotektonske jedinice prisutne na istražnom području, vrednosti savremenih Bugeovih i izostatičkih anomalija, kao i izostatičkih popravki u njima variraju u različitim opsezima. Minimumi savremenih Bugeovih anomalija generalno se zapažaju u oblasti Spoljašnjih Dinarida, dok su maksimumi prisutni u Vardarskoj zoni, Panonskom basenu i u Jadranskom moru. Minimumi su vezani za karbonatne stene i povećanu debljinu Zemljine kore, kao i izraženu topografiju prisutnu u Spoljašnjim Dinaridima, dok su maksimumi povezani sa terenima male nadmorske visine i prisustvom stena veće gustine (ofioliti Vardarske zone, metamorfne i magmatske stene Jadrana). Izostatička popravka generalno ima najveću vrednost upravo na području Dinarida, zbog povećane debljine Zemljine kore, dok se minimumi zapažaju u Panonskom basenu i na prostoru Jadranskog mora, koji predstavljaju oblasti smanjene debljine kore.

Nakon uklanjanja uticaja izostazije, opseg vrednosti izostatičkih anomalija je smanjen u odnosu na savremene Bugeove anomalije. Maksimumi izostatičkih anomalija u zoni hrvatskog arhipelaga i Vardarske zone jasnije su izraženi na karti i duž profila, dok je minimum uočeni u oblasti Dinarida slabije izražen. Uvođenjem izostatičke popravke uklanja se uticaj promena debljine Zemljine kore na intenzitet i oblik gravimetrijskih anomalija, pri čemu se, prevashodno, koriguje regionalni deo anomalija, ali postupak često dovodi i do jasnijeg definisanja lokalnih anomalija. U ovom slučaju, na primer, nakon uvođenja izostatičke popravke se na profilu P1 uočava minimum u zoni basena Dugog otoka, dok je minimum izazvan savskim rovom na prostoru Panonskog basena jasnije izražen na profilu P2.

LITERATURA

1. Bagherbandi, M., 2011. An Isostatic Earth Crustal Model, Doctoral Dissertation in Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm Sweden.
2. Belinić, T., 2020. Struktura litosfere i astenosfere ispod Dinarida na temelju seizmograma dalekih potresa, Doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
3. Brkić, D., 2022. Određivanje gravimetrijskih anomalija pri promeni referentnog koordinatnog sistema, Završni rad, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
4. Dinaridske planine - <https://www.grahovo.org/sr/dinarske-planine/>
5. Dinaridi - <https://parksdinarides.org/dinaridi/>
6. DISCONTINUITIES INSIDE THE EARTH - <https://www.iasgyan.in/blogs/discontinuities-inside-the-earth>
7. Discovery of Mohorovičić's (Moho) Discontinuity - <https://www.geotech.hr/en/discovery-of-mohorovicics-moho-discontinuity/>
8. Felix Andries Vening Meinesz - https://www.eeducation.psu.edu/earth520/content/12_p17.html
9. Google Earth - <https://earth.google.com/web/@44.06922373,16.46168597,1344.41489128a,468647.78971508d,35y,-0h,0t,0r>
10. Grad, M., Tiira, T., ESC Working Group, 2009. The Moho depth map of the European Plate, Geophys. J. Int. 176, 279-292.
11. Ignjatović, I., 2023. Transformacije potencijalnih polja, prezentacije, Rudarsko – geološki fakultet, Beograd.
12. Mancinelli, P., Scisciani, V., Pauselli, C., M. Stampfli, G., Speranza, F., Vasiljević, I., 2022. Back-arc underplating provided crustal accretion affecting topography and sedimentation in the Adria microplate, Marine and Petroleum Geology, 136, 105470.
13. Matoš, B., Rukavina, D., Sečanj, M., Barudžija U., 2017. Sedimentary and tectonic evolution of Karst Dinarides, EUGEN 2017, Excursion guidebook, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb, 1-9.
14. Mohorovičić Discontinuity - The Moho - <https://geology.com/articles/mohorovicic-discontinuity.shtml>
15. Reguzzoni, M., Sampietro, D., Sanso, F., 2013. Global Moho from the combination of the CRUST2.0 model and GOCE data, Geophys. J. Int, 195, 222-327.
16. Šumanovac, F., 2010. Lithosphere structure at the contact of the Adriatic microplate and the Pannonian segment based on the gravity modelling, Tectonophysics, 405, 94-106.

17. Tassis, G. A., 2010. Study of the Geophysical and Geological Structures of the Adriatic with Gravity Measures. PhD Thesis. Aristotle University of Thessaloniki, Geology Department, Laboratory of Applied Geophysics, Thessaloniki, Greece (in Greek).
18. Tesauro, M., Kaban, M., K., Cloetingh, S., A., P., L., EuCRUST-07: A new reference model for the European crust, *Geophysical Research Letters*, 35, L05313.
19. The Airy-Heiskanen model of isostatic compensation - https://www.researchgate.net/figure/The-Airy-Heiskanen-model-of-isostatic-compensationSanso-and-Sideris-2013_fig18_277597636
20. The Pratt-Hayford model of isostatic compensation - https://www.researchgate.net/figure/The-Pratt-Hayford-model-of-isostatic-compensation-Sanso-and-Sideris-2013_fig19_277597636
21. Theory of Isostasy - Geography Notes - <https://prepp.in/news/e-492-theory-of-isostasy-geography-notes>
22. Van Unen, M., Matenco, L., Nader, F. H., Darnault, R., Mandić, O., Demir, V., 2019. Kinematics of Foreland - Vergent Crustal Accretion: Inferences from the Dinarides Evolution, *Tectonics*, 38, 49-76.
23. Vasiljević, I., 2022. Gravimetrija, prezentacije, Rudarsko – geološki fakultet, Beograd.
24. Vasiljević, I., Ignjatović, S., 2019. Osnovi gravimetrije – praktikum, Rudarsko – geološki fakultet, Beograd, 42-49.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента ___Мања (Роберт) Грифатонг_____

Број индекса ___Г3/19_____

И з ј а в љ у ј е м

да је завршни рад под насловом

_____Примена поправке за утицај изостазије у гравиметрији_____

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, _____09.2023._____

Потпис студента

ИЗЈАВА
О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ЗАВРШНОГ РАДА

Име (име родитеља) и презиме студента ___Мања (Роберт) Грифатонг_____

Број индекса _____Г3/19_____

Студијски програм _____Геофизика_____

Наслов рада _____Примена поправке за утицај изостазије у гравиметрији _____

Ментор _____др. Ивана Васиљевић, ван. проф._____

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, _____09.2023._____

Потпис студента

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

Примена поправке за утицај изостазије у гравиметрији

који је моје ауторско дело.

Завршни рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је (*заокружити једну од две опције*):

I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;

II. јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се уз сагласност ментора одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)

У Београду, _____ 09.2023. _____

Потпис ментора

Потпис студента

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
 2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
 3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
 4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
 5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
 6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.
-

Библиотека Рударско-геолошког факултета

ПОТВРДА

О ПРЕДАЈИ ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ЗАВРШНОГ РАДА

Потврђује се да је студент _____ Мања (Роберт) Грифатонг _____,
(име (име родитеља) презиме)

бр. индекса ГЗ/19___ предао/ла електронску верзију завршног рада на
основним/мастер академским студијама под насловом:

_____ Примена поправке за утицај изостазије у гравиметрији _____

који је урађен под менторством __др. Иване Васиљевић, ван. проф. _____
(име, презиме и звање)

за Дигитални репозиторијум завршних радова РГФ-а.

Потврда се издаје за потребе Одељења за студентска и наставна питања и не може се
користити у друге сврхе.

У Београду, _____ 09.2023. _____

Библиотекар
