

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Dragana D. Petrović

**PROSTORNI POLOŽAJ OFIOLITA
ISTOČNE VARDARSKE ZONE:
GEOFIZIČKO-GEOLOŠKI MODEL I
NJEGOVE GEODINAMIČKE
IMPLIKACIJE**

doktorska disertacija

Beograd, 2015

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Dragana D. Petrović

**THE SPATIAL POSITION OF THE EAST
VARDAR ZONE OPHIOLITE:
GEOPHYSICAL-GEOLOGICAL MODEL
AND IMPLICATIONS ON ITS
GEODYNAMIC EVOLUTION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

Mentor:

dr Vladica Cvetković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, dopisni član SANU; uža naučna oblast: petrologija

Komisija za ocenu i odbranu teze:

dr Vladica Cvetković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, dopisni član SANU; uža naučna oblast: petrologija

dr Vesna Cvetkov, docent, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet; uža naučna oblast: geofizika

dr Ivana Vasiljević, docent, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet; uža naučna oblast: geofizika

dr Radmila Pavlović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet; uža naučna oblast: dinamička geologija

dr Spomenko Mihajlović, viši naučni saradnik, Republički geodetski zavod; uža naučna oblast: geofizika

Datum odbrane: _____

ZAHVALNOST

- Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru, prof. dr Vladici Cvetkoviću, pre svega na strpljenju. Posebno sam mu zahvalna što me je uveo u svet nauke, dopustio da sprovedem svoje ideje nesebično me usmeravajući i što me je naučio da razmišljam svojom glavom, a da „čitam tuđim očima“!
- Hvala veliko, svim članovima komisije!

Hvala doc. dr Vesni Cvetkov na velikoj pomoći tokom izrade doktorata, pomoći i smernicama u toku mog sazrevanja kao istraživača i učenja! Hvala na brojnim konsultacijama i nesebično pruženom znanju.

Hvala doc. dr Ivani Vasiljević, koja mi je uvek neodložno pomagala u razjašnjavanju brojnih nedoumica, davala mi prave smernice u istraživačkom radu i sa velikim strpljenjem radila sa mnom.

Zadovoljstvo mi je da se zahvalim prof. dr Radmili Pavlović, koja me je uputila u svet nauke, svet geologije, koja je podelila sa mnom svoja znanja i veštine i koja je pratila celokupan moj razvoj kroz osnovne i doktorske studije! Veliko hvala na pruženoj podršci i pruženim prilikama.

Zahvalna sam dr Spomenku Mihajloviću, koji se zainteresovao za moj rad još na samom početku i koji mi je omogućio da svoje ideje sprovedem u delo.

Kao stručnjaci u svojim oblastima, nesebično su pružili svoje znanje i vreme i bili mi oslonac tokom studija i u toku izrade disertacije. Hvala vam i na velikoj podršci!

- Veliku zahvalnost dugujem dr Kristini Šarić i Maši Radivojević prilikom izvođenja terenskog rada, a naročito nakon toga. Njihovi saveti i sugestije su u velikoj meri doprineli kvalitetu ove doktorske disertacije. Na tome sam im neizmerno zahvalna!
- Hvala Vesni Lesić iz geomagnetskog zavoda, koja mi je pružila ogromnu pomoć oko celokupnog laboratorijskog rada, pripremanja uzoraka i merenja.

- Zahvalnost dugujem i prof. dr Blaži Boevu iz Štipa koji mi je omogućio terenski rad u Makedoniji, obezbedivši smeštaj za ceo tim.
- Posebnu zahvalnost dugujem prof. dr Triviću koji je sve vreme pratio moj rad i davao izuzetno korisne sugestije.
- Hvala Ani Mladenović na iskrenom prijateljstvu, posebno na stalnim razgovorima koji su u velikoj meri bili prekretnica u istraživanju!
- Hvala Snežani Ignjatović, koja je prva pročitala prvu verziju ove teze i dala svoje sugestije.
- Ogromnu zahvalnost mom Urošu, na pomoći na terenu, pri prikupljanju i sređivanju uzoraka, pri analizi i merenjima, savetima tokom pisanja disertacije, istraživanja i pre svega, hvala na bezgraničnoj ljubavi i strpljenju!
- Hvala mojoj majci i sestri!!! Vas dve ste tu uvek tu bez obzira na sve! Sa vama je sve lakše i lepše!!! Ljubi vas „crvenče“! Vv
- Hvala mojim prijateljima! Iskreno, nije vam bilo lako sa mnom ☺
- Naravno, bez finansijske podrške ne bi bilo moguće izraditi ovu disertaciju. Zato, moram da pomenem projekat osnovnih istraživanja Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja „Magmatizam i geodinamika Balkanskog poluostrva od mezozoika do danas: značaj za obrazovanje metaličnih i nemetaličnih rudnih ležišta“ i stručno društvo čiji sam dugogodišnji stipendista - SEG (Society of Exploration Geophysicists)!

Beograd,

Dragana Petrović

PROSTORNI POLOŽAJ OFIOLITA ISTOČNE VARDARSKE ZONE: GEOFIZIČKO-GEOLOŠKI
MODEL I NJEGOVE GEODINAMIČKE IMPLIKACIJE

Rezime

Centralni deo Balkanskog poluostrva je geotektonski veoma složen. Tetis je zatvoren tokom gornjeg mezozoika, a ofioliti na zapadu i ofioliti Vardarske zone predstavljaju ostatke nekadašnjih okeanskih prostora. Najistočniji deo Vardarske zone razlikuje se od svih ostalih ofiolita na Balkanskom poluostrvu i karakteriše se najizraženijim supra-subdukcijskim afinitetom. Istočna vardarska zona locirana je u centralom delu Srbije. Na severu se prostire do Apusena u Rumuniji, a na jugu obuhvata centralni deo Makedonije i Peonias zonu u severnoj Grčkoj. Istočna vardarska zona se nalazi istočno od geotektonske jedinice Kopaonik i zapadno od Srpsko-makedonske mase. Mnoga istraživanja sprovedena na prostoru zapadnog i centralnog dela Vardarske zone dovela su do toga da su prostorni položaj i međusobni odnosi ovih ofiolita sa susednim jedinicama prilično dobro utvrđeni, međutim u dosadašnjim istraživanjima postoje brojna neslaganja oko položaja i vergence Istočne vardarske zone. Ova disertacija je imala zadatak da utvrdi prostorni položaj stenskih masa Istočne Vardarske zone, sa krajnjim ciljem da se iz dobijenih rezultata dođe do pouzdanije rekonstrukcije načina primarnog smeštanja ovih ofiolita.

Prostorni položaj ofiolita Istočne vardarske zone utvrđen je na osnovu geofizičkih i geoloških podataka koji su dobijeni istraživanjem pojava ovih ofiolita u Srbiji, Makedoniji i Grčkoj. Primenjena metodologija obuhvatila je daljinsku detekciju i strukturnu analizu, kao i gravimetrijska i geomagnetska istraživanja. Na osnovu dobijenih podataka kreirani su geofizičko-geološki modeli. Nad gravimetrijskim i geomagnetskim podacima sproveden je niz transformacija u cilju utvrđivanja položaja uzročnika anomalija. Budući da na izgled geomagnetske anomalije ne utiče samo položaj tela, već i remanentna magnetizacija, pored određivanja gustine i susceptibilnosti, sprovedena su laboratorijska određivanja intenziteta prirodne remanentne magnetizacije, inklinacije i deklinacije. Modelovanje je vršeno u programskom paketu Oasis Montaj/GM SYS, duž 7 profila postavljenih upravno na pružanje Istočne vardarske zone

i duž tri kontrolna profila, postavljena paralelno pružanju ove geotektonske jedinice. Dužina profila bila je između 20 i 50 km, a modeli su prikazani do dubine od 2 do 4 km.

Na osnovu analize transformisanih geofizičkih karata utvrđeno je da su uzročnici anomalija ispod površine terena izduženi u pravcu SSZ-JJI i da uzročnici anomalija ispod površine terena najverovatnije predstavljaju jedinstveno telo. Zapadna granica ofiolita Istočne vardarske zone je jasno izražena, dok je istočna granica difuzna, ali je uočljivo da se ova, istočna granica sa dubinom pomera prema istoku i da se Istočna vardarska zona stapa sa Srpsko-makedonskom masom. 2D modeli na istraživanom području ukazuju da ofioliti Istočne vardarske zone generalno padaju prema istoku-jugoistoku. Pseudo 3D modeli ukazuju na to da se deo ofiolita Istočne vardarske zone nalazi ispod Srpsko-makedonske mase, kao i da je u plćim delovima kontakt između Istočne vardarske zone i Srpsko-makedonske mase dosta oštar i strm, dok sa povećanjem dubine ovaj kontakt pokazuje blaži pad. Dobijeni rezultati ovog istraživanja ukazuju na to da nisu svi ofioliti ovog dela Evrope smešteni načinom karakterističnim za Tetijski tip ofiolita. Istočna vardarska zona, suprotno od svih ostalih ofiolita na Balkanskom poluostrvu, najverovatnije je smeštena akrecionim mehanizmom, tj. prirastanjem, što je karakteristično za Kordiljerski tip ofiolita. Ovaj zaključak potvrđuju podaci nezavisnih petroloških i geohemijskih studija o ksenolitima i lamproitskim lavama Balkanskog poluostrva, koji ukazuju da su delovi gornjeg omotača ispod glavne šavne zone mezozojskog Tetisa po sastavu slični okeanskom supra-subdukcionom gornjem omotaču.

Ključne reči: Istočna vardarska zona; ofioliti; 2D i pseudo 3D geofizičko-geološki model; geodinamička evolucija

Naučna oblast: Geološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Geofizika

UDK broj:

552.3/.5: 550.34.01(497)(043.3)

552.3/.5:551.2/.3(497)(043.3)

THE SPATIAL POSITION OF THE EAST VARDAR ZONE OPHIOLITE: GEOPHYSICAL-
GEOLOGICAL MODEL AND IMPLICATIONS ON ITS GEODYNAMIC EVOLUTION

Abstract

The central Balkan Peninsula has a very complex geotectonic fabric. The Tethys Ocean was closed during late Mesozoic leaving behind Dinaric (west) and the Vardar Zone (east), as important relicts of the former oceanic lithosphere. The easternmost ophiolite belt, known as the East Vardar Zone, differs from other Balkan ophiolites in displaying the most pronounced supra-subduction geochemical signatures. The East Vardar Zone is placed in central part of Serbia. In the north, it extends to the Apuseni Mts. in Romania, and in the south it continues through central parts of the FYR of Macedonia, and Peonias subzone towards North Greece. The East Vardar Zone is placed eastern of the continental Kopaonik Unit and western of the Serbo-Macedonian Massif. The true tectonic position of the East Vardar Zone ophiolites with respect to adjacent geotectonic units is still a matter of debate and this dissertation was aimed at addressing this problem.

The spatial position of the East Vardar Zone ophiolites in Serbia, Macedonia and Greece was determined based on geophysical and geological data. The applied methodology included remote sensing and field observation data as well as gravity and geomagnetic data. Based on obtained data, 2D modeling of geomagnetic and gravity data was performed. Mathematical transformations were applied on gravity and geomagnetic data in order to determine the position of rocks masses that caused the anomalies. The pattern of geomagnetic anomalies depend not only from dip angle of the source of the anomaly, but of remanent magnetization, as well. Due to this reason laboratory measurements were done along determinations of density, susceptibility and remanent magnetization. Modeling was performed in software Oasis Montaj/GM SYS, along 7 sections that were placed perpendicular to the East Vardar Zone direction, and along three control sections. The sections were between 20 and 50 km long and their depth was between 2 and 4 km.

The obtained results invariably suggest that the East Vardar Zone ophiolites are dipping to the east beneath the Serbo-Macedonian Massif. The inferred buried ophiolite bodies

display steep contacts in shallow levels, but the contacts become much less steep with depth.

Based on the analysis of transformed geophysical data it is concluded that the cause of the anomaly represents a single body elongated in NNW-SSE direction. The western border of the East Vardar Zone ophiolite is sharp and can be clearly determined, while the eastern border is diffuse. It is, however, evident that below the surface this ophiolite dips to the east below the Serbo-Macedonian Massif. 2D models suggest that East Vardar ophiolite dips to the east/southeast. Pseudo 3D models indicate that at least part of the East Vardar ophiolites is settled below the Serbo-Macedonian Massif. The border between these two geotectonic units is very steep near the surface, however, with increasing of depth the dip angle of this contact decreases. Obtained geophysical–geological model implies that the mode of emplacement of the East Vardar Zone ophiolites was related to accretion/underthrusting more related to Cordilleran type and it was strikingly different from the emplacement of the other Balkan ophiolites that were uniformly obducted toward the west. This scenario is supported by the independent evidence provided by mantle xenolith studies and studies of lamproitic lavas, which indicated that at least parts of the mantle underneath the Tethyan Mesozoic suture are compositionally more similar to oceanic supra-subduction mantle.

Keywords: East Vardar Zone; Ophiolite; 2D and pseudo 3D geophysical-geological models; Geodynamic evolution

Scientific field: Geological engineering

Field of academic expertise: Geophysics

UDC number:

552.3/.5: 550.34.01(497)(043.3)

552.3/.5:551.2/.3(497)(043.3)

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
1. 1. Upoznavanje sa tezom i problematikom.....	1
1. 2. Ofioliti.....	4
1. 3. Opis sadržaja teze	6
2. OPŠTI DEO.....	8
2. 1. Geografski položaj	8
2. 2. Prikaz gledišta o položaju IVZ	11
2. 3. Geologija terena	14
2.3.1. Geologija susednih geotektonskih jedinica	20
3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	23
3. 1. Prikupljanje podataka.....	23
3. 1. 1. Daljinska detekcija- analiza, interpretacija i pripremanje podloga	23
3.1.1.1. Obrada snimka, analiza i grafička obrada	24
3.1.1.2. Preprocesiranje snimaka	25
3. 1. 1. 3. Procesiranje snimaka	26
3. 1. 2. Terenski rad.....	33
3. 1. 3. Laboratorijska istraživanja	34
3. 2. Analiza podataka.....	35
3. 2. 1. Kvalitativna analiza.....	35
3. 2. 1. 1. Ekscentričnost geomagnetskih anomalija.....	38
3. 2. 1. 2. Filtriranje	42
3. 2. 1. 3. Analitičko produženje polja naviše	43
3. 2. 1. 4. Vertikalni izvod gravitacionog ubrzanja	44
3. 2. 1. 5. Normalizovana standardna devijacija.....	44
3. 2. 1. 6. Redukcija na pol	45

3. 2. 1. 7. Ugao nagiba (izvod ugla nagiba) i ukupni horizontalni izvod ugla nagiba	46
3. 2. 2. Kvantitativna analiza.....	48
4. REZULTATI	52
4. 1. Rezultati laboratorijske analize	52
4. 2. Rezultati analize geofizičkih podataka	56
4. 2. 1 Interpretacija rupturnog sklopa	64
5. DISKUSIJA.....	66
5. 1. Horizontalno rasprostranjenje uzročnika anomalija	66
5. 1. 1. Srbija	66
5. 1. 2. Makedonija.....	72
5. 1. 3. Grčka	78
5. 2. Vertikalno rasprostranjenje uzročnika anomalija, 2D modeli	80
5.3. Pseudo 3 D modeli	91
5.4. Geodinamičke implikacije	95
6. ZAKLJUČAK	99
7. LITERATURA	101

1. UVOD

Uvod je koncipiran tako da se čitalac upozna sa problematikom kojom se bavi disertacija. Posebna pažnja je posvećena delu o dosadašnjim istraživanjima geodinamičkih uslova smeštanja Istočne vardarske zone i o aktuelnim pretpostavkama. Drugi deo uvoda sadrži osnovne pojmove o ofiolitima, njihovom nastanku, sastavu i podeli prema genezi. Treći deo uvoda opisuje sadržaj teze, uz kratko objašnjenje svakog poglavlja u tezi.

1. 1. Upoznavanje sa tezom i problematikom

Centralni deo Balkanskog poluostrva ima veoma složen geotektonski sklop. Ovaj deo Zemljine kore evropskog kontinenta formiran je od paleozoika do danas, ali je tokom mezozoika najviše tektonski preoblikovan, kada je konačno i zatvoren okean Tetis (Karamata, 2006; Schmid et al., 2008; Robertson et al., 2009). Ovo zatvaranje je ostavilo za sobom nekoliko međusobno paralelnih pojaseva ofiolita – stenskih masa koje najopštije uzev predstavljaju ostatke nekadašnjeg okeanskog dna. Geografski posmatrano, ovi ofioliti, koji se pružaju SSZ-JJI, mogu se podeliti na zapadni pojas – Dinarske ofiolite i istočni pojas – Vardarsku zonu (Dimitrijević, 1997; Karamata, 2006). Vardarska zona, koja je smeštena između dve velike tektonske jedinice - Drina-Ivanjice na zapadu i Srpsko-makedonske mase na istoku, generalno je podeljena (od zapada ka istoku) na: 1) Zapadnu vardarsku zonu, koja prema jugu obuhvata Almopias zonu u Grčkoj, 2) Centralnu vardarsku zonu, koja prema jugu obuhvata Paikon jedinicu i 3) Istočnu vardarsku zonu, koja prema jugu obuhvata Peonias zonu u Grčkoj i Makedoniji (Božović et al., 2013; Robertson et al., 2009; Christofides et al., 1990).

Ovako složena geotektonska slika ofiolita centralnog Balkanskog poluostrva jedan je od glavnih razloga zašto je interpretacija njihovog postanka još uvek predmet neslaganja. Iako se gotovo svi autori slažu da su svi ovi ofiolitski pojasevi nastali u mezozoiku, usled zatvaranja Tetisa, mišljenja mnogih istraživača se razlikuju u pogledu broja okeana koji su postojali na ovom prostoru. Jedna grupa autora (npr. Schmid et al., 2008) smatra da je na celom prostoru postojao jedinstveni okean, koji je zatvoren relativno homogenom obdukcijom na zapad, pri čemu su ofioliti navučeni preko pasivne kontinentalne margine tadašnjeg afričkog kontinenta. Oni takođe smatraju da su

paleozojske jedinice, koje danas prostorno odvajaju ofiolitske pojaseve (Drina-Ivanjica, Jadar i Kopaonik), zapravo delovi oboda Afrike, koji "izviruju" ispod raskinutih ofiolita. Na drugoj strani, drugi autori (npr. Robertson and Karamata, 1994; Karamata, 2006; Robertson et al., 2013) smatraju da ofiolitski pojasevi Balkanskog poluostrva predstavljaju ostatke najmanje tri okeana, a to su: Dinarski, Zapadni vardarski i Istočni vardarski okean. Saglasno tome, isti autori podrazumevaju da paleozojsko-trijaske geotektonske jedinice smeštene između ofiolita predstavljaju individualne kontinentalne blokove - terane.

I pored suštinskih razlika u gledištima, obe grupe autora dele mišljenje da istočni obod Vardarske zone ili Istočna vardarska zona (IVZ), predstavlja zasebnu i specifičnu geotektonsku jedinicu. Ovo mišljenje je zasnovano na činjenici da ofioliti Istočne vardarske zone pokazuju značajne razlike u poređenju sa ofiolitima Dinarida, kao i onih iz zapadnih i centralnih delova Vardarske zone.

Mnoga istraživanja sprovedena na prostoru zapadnog i centralnog dela Vardarske zone dovela su do toga da su prostorni položaj i međusobni odnosi ovih ofiolita sa susednim jedinicama prilično dobro utvrđeni (Karamata et al., 2006, Schmid et al., 2008). Upravo na osnovu tih podataka došlo se i do relevantnih interpretacija o smeštaju (obdukciji) ovih ofiolita. Proučavanje sadašnjeg položaja ofiolita IVZ na području Srbije, Makedonije i Grčke, kao i definisanje njihovog kontakta sa Srpsko-makedonskom masom, međutim, nije dalo dovoljno informacija za konačno rešavanje problema smeštanja IVZ. Zbog toga je pitanje smeštanja ofiolita IVZ sve do danas ostalo jedno od veoma važnih nerazjašnjenih pitanja geološke istorije ovog dela Balkanskog poluostrva.

Sam položaj i vergenca IVZ tumačeni su različito. Schmid et al. (2008) predlažu hipotezu po kojoj je IVZ obdukovana na istok preko Srpsko-makedonske mase. Nasuprot tome, na Osnovnim geološkim kartama SFRJ delovi kontakata IVZ sa Srpsko-makedonskom masom kartirani su i interpretirani kao kontakti navlačenja Srpsko-makedonske mase preko IVZ. Na jugu se IVZ nastavlja kao Peonias zona, koja je smeštena između Paikon zone na zapadu i Srpsko-makedonske mase na istoku. Ova zona uključuje ofiolite Đevđelije. Ofioliti Đevđelije u severnoj Grčkoj obuhvataju zone Evzoni i Skra, a između njih je smešten Fanos granit. Različita istraživanja u različitim

vremenskim periodima, dala su dva tumačenja položaja ovih ofiolita. Marković i dr. (1968), Malešević i dr. (1974) smatrali su da ofioliti tonu prema istoku ispod Srpsko-makedonske mase, dok su Schmid et al. (2008) ukazali da su ofioliti navučeni na zapad na Paikon jedinicu. Robertson et al. (2013) predlažu gledište po kojem je IVZ bila navučena prema istoku, preko Srpsko-makedonske mase, a zatim, u kasnojurskom periodu, ponovo navučena prema zapadu.

Osnovni cilj istraživanja ove doktorske disertacije jeste pouzdanije utvrđivanje prostornog položaja ofiolita Istočne vardarske zone i definisanje najvažnijih geodinamičkih implikacija, koje proističu iz tako utvrđenih geotektonskih odnosa. Prostorni položaj ispitivanih ofiolita IVZ utvrđen je na osnovu geofizičkih i geoloških podataka o pojavama ovih ofiolita u Srbiji, Makedoniji i Grčkoj. Pomoću ovih podataka izrađeni su 2D i pseudo 3D modeli. Informacije dobijene modelovanjem su razjasnile procese, koji su doveli do smeštanja navedenih ofiolita u sadašnji položaj i predstavljaju određeni doprinos trenutnom poznavanju mezozojskih geodinamičkih događaja u području centralnih delova Balkanskog poluostrva. Osnovna polazna hipoteza ove doktorske disertacije jeste da se način smeštanja ofiolita IVZ fundamentalno razlikuje od načina smeštanja ostalih ofiolita Vardarske zone i ofiolita Dinarida, koji su nastali homogenom obdukcijom na zapad. Drugim rečima, pretpostavka je da su ofioliti Istočne vardarske zone smešteni tektonskim prirastanjem (engl. accretion) uz marginu Evrope, koja je u to vreme bila predstavljena Srpsko-makedonskom masom.

Korišćenjem geofizičkih podataka i primenom metodologije koja podrazumeva kombinaciju geofizičkih i geoloških podataka izrađeni su 2D i pseudo 3D modeli duž profila postavljenih, uglavnom, upravno na pružanje ofiolita IVZ. U model su uključene izmerene vrednosti fizičkih svojstava svih stena prisutnih na terenu. Na taj način je određen trenutni strukturni položaj ove zone i definisan njen kontakt sa Srpsko-makedonskom masom. Dobijeni rezultati zatim su iskorišćeni za rekonstrukciju mezozojskih i post-mezozojskih geodinamičkih događaja, što je pomoglo da se testira postavljena hipoteza da ofioliti IVZ nisu nastali procesima obdukcije, već tektonskim prirastanjem uz evropski kontinent.

1. 2. Ofioliti

Termin „ofiolit“ potiče od grčke reči „οφις“ što u prevodu znači „zmija“. Prvi put ovaj termin upotrebio je francuski mineralog Brongniart (1813) da bi opisao serpentinite u melanžu. Kasnije, 1821. godine (Brongniart, 1821), njegova definicija ofiolita uključila je i metamorfne i magmatske stene (ultrabazične stene, gabro, dijabaz i vulkanske stene) koje se pojavljuju na Apeninima. Termin je prošao kroz nekoliko faza evolucije, dok nije dobio svoje krajnje i konačno značenje. Steinmann (1927) je ofiolite objasnio kao asocijacije peridotita, gabrova i dijabaza u asocijaciji sa dubokomorskim sedimentima, koje se javljaju na mediteranskim planinskim vencima. Prema radovima prezentovanim na GSA (*Geological Society of America*) Konferenciji (1972) ofioliti su se odnosili na asemblaž sastavljen od bazičnih do ultrabazičnih stena. Sekvenca kojom su predstavljeni (od dna prema gore) odlikuje se ultrabazičnim kompleksom, kompleksom gabrova, mafičnim intruzivnim kompleksom, pilou lavama i na kraju je sve prekriveno sedimentnim stenama (uglavnom rožnac, ređe i krečnjak), u asocijaciji sa kiselim intruzivnim ili ekstruzivnim magmatitima.

Coleman (1977) je dao detaljno tumačenje i definiciju ofiolita, ali je i postavio pitanje veze procesa sadašnjeg stvaranja okeanske kore i dešavanja u prošlosti. Pitao je: „Da li su širenja koja su dovela do stvaranja jurskih ofiolita u Tetisu ista kao i današnji procesi stvaranja okeanske kore srednjeatlanskog grebena?“. Sa razvojem termina „ofiolit“ u litološkom smislu, razvijao se i značaj ofiolita u geodinamičkom smislu. Pearce et al. (1973; 1984) su nagovestili da je većina ofiolita nastala u supra-subdukcionom režimu (SSZ). SSZ režim karakterističan je po položaju gornje ploče. Ovaj položaj može biti predlučni i izalučni (*eng. fore-arc i back arc*) ili može uključivati i riftovanje samog luka. Iako shvatnje o nastanku ofiolita u SSZ režimu preovlađuje, mnogi autori podržavaju MOR režim za nastanak svih ofiolita (Coleman 1981; Boudier and Nicolas 1985; Nicolas 1989). U svom radu, Boudier and Nicolas (1985) podelili su ofiolite u dve grupe: harzburgitski ofioliti (HOS) i lerzolitiski ofioliti (LOS), prema brzini širenja okeanske litosfere i stepenu parcijalnog stapanja.

Povlačenje ploče koja se subdukuje unazad i magmatizam, kao i ekstenzija gornje litosferske ploče, mogu proizvesti jednu ili više faza razdvajanja lukova i otvaranja

basena i posledično, pojaseve ofiolita sa različitom litostratigrafijom i različitim geohemijskim karakteristikama. Smeštanje suprasubdukcionih ofiolita uključuje podvlačenje i parcijalnu subdukciju kontinentalne margine (obično pasivne kontinentalne margine).

Moore (1982) razlikuje ofiolite Tetijskog ili Kordiljerskog tipa na osnovu prisustva i/ili odsustva kontinentalnog substrata, vulkanskog luka i melanža (*accretionary mélange*) koji se obrazuje u tzv. akrecionoj prizmi. Prema ovoj klasifikaciji, Tetijski tip ofiolita je nastaje ravnomernom i homogenom obdukcijom preko pasivne kontinentalne margine sa kojom se ofioliti nalaze u tektonskom kontaktu i smatra se da su stvarani u sredinama SSZ i srednjookeanskog grebena. Ofioliti Kordiljerskog tipa su prostorno i vremenski povezani sa ostrvskim lukovima i vulkanskim lukovima, vulkanoklastičnim stenama, subdukcijom, prirastanjem i akrecionim melanžom.

Nicolas (1989) koristi drugačiji pristup klasifikaciji ofiolita, koji se bazira na tektonskim uslovima prilikom smeštanja ofiolita: ofioliti, tektonski smešteni na pasivnu kontinentalnu marginu (npr. Semail u Omanu, Papuan u Papua-Novoj Gvineji), kao i oni inkorporirani u aktivnu kontinentalnu marginu Cirkum-Pacifičkog pojasa (eng. *Franciscan Complex*) i ofioliti šavnih zona (eng. *suture zone*), koji se pojavljuju na kontinent-kontinent ili luk-kontinent kolizionim zonama (ofioliti u Alpsko-Himalajskom orogenom sistemu, hercinski i ofioliti Urala). Posmatrajući ofiolite na ovaj način, Nicolas (1989) izdvaja kolizioni tip, koji se može korelisati sa Tetijskim tipom prema klasifikaciji Moore-a (1982), dok ofioliti vezani za aktivnu kontinentalnu marginu tj. Cirkum-Pacifički ofioliti odgovaraju Kordiljerskom tipu prema Moore-ovoj klasifikaciji (1982).

Najzad, Coleman (2000) je izdvojio pet grupa ofiolita različite geneze, stratigrafskih odnosa, petroloških i hemijskih karakteristika, geofizičkih parametara i starosti magmatske aktivnosti.

U ovoj disertaciji je prihvaćena opšta podela na MOR (*mid-ocean ridge*) i SSZ (*supra-subduction zone*) ofiolite. Ofioliti su predstavljeni kao delovi okeanske kore stvoreni u MOR ili SSZ režimu i tektonski su smešteni na kontinentalnu marginu. Smeštanje

ofiolita se dešava tokom zatvaranja okeana ili putem procesa ekshumacije, kada su materijali sa većih dubina transportovani na površinu.

1. 3. Opis sadržaja teze

U okviru disertacije obuhvaćena je analiza svih dostupnih geoloških podataka i podloga, analiza terenskih i laboratorijskih podataka o geološkim strukturama, raspodeli gustina i magnetske susceptibilnosti na terenu i ispod površine terena. Prilikom pisanja doktorske disertacije u velikoj meri (u nekim delovima i potpuno) korišćen je rad Petrović et al. (2015).

Tekst u okviru disertacije je podeljen u nekoliko logičkih celina u skladu sa organizacijom pri pisanju naučnih radova:

Poglavlje 2 sadrži geografski i geotektonski položaj ispitivanog područja. Date su osnovne geološke i litostratigrafske karakteristike IVZ i okolnih tektonskih jedinica.

Poglavlje 3 sadrži detaljan opis primenjenih metodoloških postupaka u radu. Metodologija obuhvata primenu tri metode koje su međusobno povezane i koje se već nalaze u širokoj primeni pri savremenim geološkim istraživanjima, a to su: 1) daljinska detekcija i strukturna analiza, 2) gravimetrijska istraživanja i 3) geomagnetska istraživanja. Metodološki pristup je podeljen u dve celine i opisan je kroz kvalitativnu i kvantitativnu analizu. U okviru ovog poglavlja opisan je i način prikupljanja podataka direktno, kao i obrada dobijenih podataka. Obrada i analiza terestričkih geomagnetskih podataka (Z komponente), ima za cilj definisanje uzročnika geofizičkih anomalija na lokalnom nivou na teritoriji Srbije i definisanja njihovog horizontalnog rasprostranjenja. Obrada i analiza aeromagnetskih podataka (T komponente), usmerena je na definisanje uzročnika anomalija na celom prostoru istraživanja. Analiza gravimetrijskih podataka, ima za cilj potvrđivanje uzročnika anomalija. Metodologija uključuje i postupak kreiranja geofizičko-geoloških modela. Sam postupak modeliranja je kompleksan i zahteva korelaciju svih dostupnih podataka i njihovo međusobno povezivanje i preklapanje. Interdisciplinarni pristup je bio neophodan pri kreiranju modela u cilju davanja geodinamičkog tumačenja.

U **poglavlju 4** dat je pregled dobijenih rezultata primenom opisane metodologije.

Rezultati su podeljeni u tri zasebne celine, gde je u prvoj opisan interpretirani rupturni sklop terena, dobijen na osnovu metoda daljinske detekcije i terenskog rada; u drugoj celini je dat pregled rezultata dobijenih laboratorijskim ispitivanjima; u trećoj celini su prikazani rezultati geofizičkih istraživanja (gravimetrijskih i geomagnetskih).

U **poglavlju 5** diskutovana je problematika prostornog položaja ofiolita Istočne vardarske zone kroz četiri područja (Ždraljica, Kuršumlja, Demir Kapija i Đevđelija). Rešavanjem ove problematike, odnosno kreiranjem modela duž profila postavljenih upravno na pružanje IVZ, kao i definisanjem horizontalnog rasprostranjenja na različitim dubinama, date su i geodinamičke implikacije. Dobijeni rezultati su diskutovani sa ciljem da se bliže utvrde odlike smeštanja ofiolita na ova četiri područja i u širem smislu, na području cele IVZ, a diskutovano je i pitanje zatvaranja Tetijskog okeana na prostoru Balkanskog poluostrva. Diskusija je obrađena kroz četiri podpoglavlja i to:

- Definisanje horizontalnog rasprostranjenja ofiolita IVZ,
- Definisanje vertikalnog rasprostranjenja po profilima,
- Kreiranje pseudo 3D modela,
- Geodinamičke implikacije.

Poglavlje 6 obuhvata sveukupne zaključke dobijene na osnovu primenjene metodologije, dobijenih rezultata istraživanja i diskusije. Poglavlje 6 je koncipirano tako da bude maksimalno koncizno i precizno, u cilju davanja što jednostavnijeg objašnjenja rekonstrukcije najznačajnijih tektonskih pokreta od mezozoika do danas u ovom delu Balkanskog poluostrva.

2. OPŠTI DEO

U ovom poglavlju detaljno su obrađeni opšti podaci o istraživanom području. Ovi podaci obuhvataju definisanje geografskog i geotektonskog položaja. Kroz geotektonski položaj, dat je i prikaz ranijih istraživanja na ovom prostoru, kao i do sada postavljenih hipoteza o geodinamičkim događajima vezanim za poreklo i evoluciju IVZ. Geološke karakteristike su opisane detaljno za sva četiri uža istražna područja i date su glavne geološke karakteristike za celu IVZ, kao i za susedne geotektonske jedinice.

2. 1. Geografski položaj

Istraživano područje obuhvata pojave ofiolita i ofiolitskih stena Istočne vardarske zone na području Srbije, Makedonije i severne Grčke. Ovaj pojas se pruža pravcem SSZ-JJI duž glavne ose Balkanskog poluostrva. Ispitivana područja svedena su na četiri lokaliteta: Ždraljica, Kuršumlja, Demir Kapija i Evzoni i Skra (Đevđelija). Svi lokaliteti se nalaze duž međunarodne saobraćajnice E-75 (Slika 1).

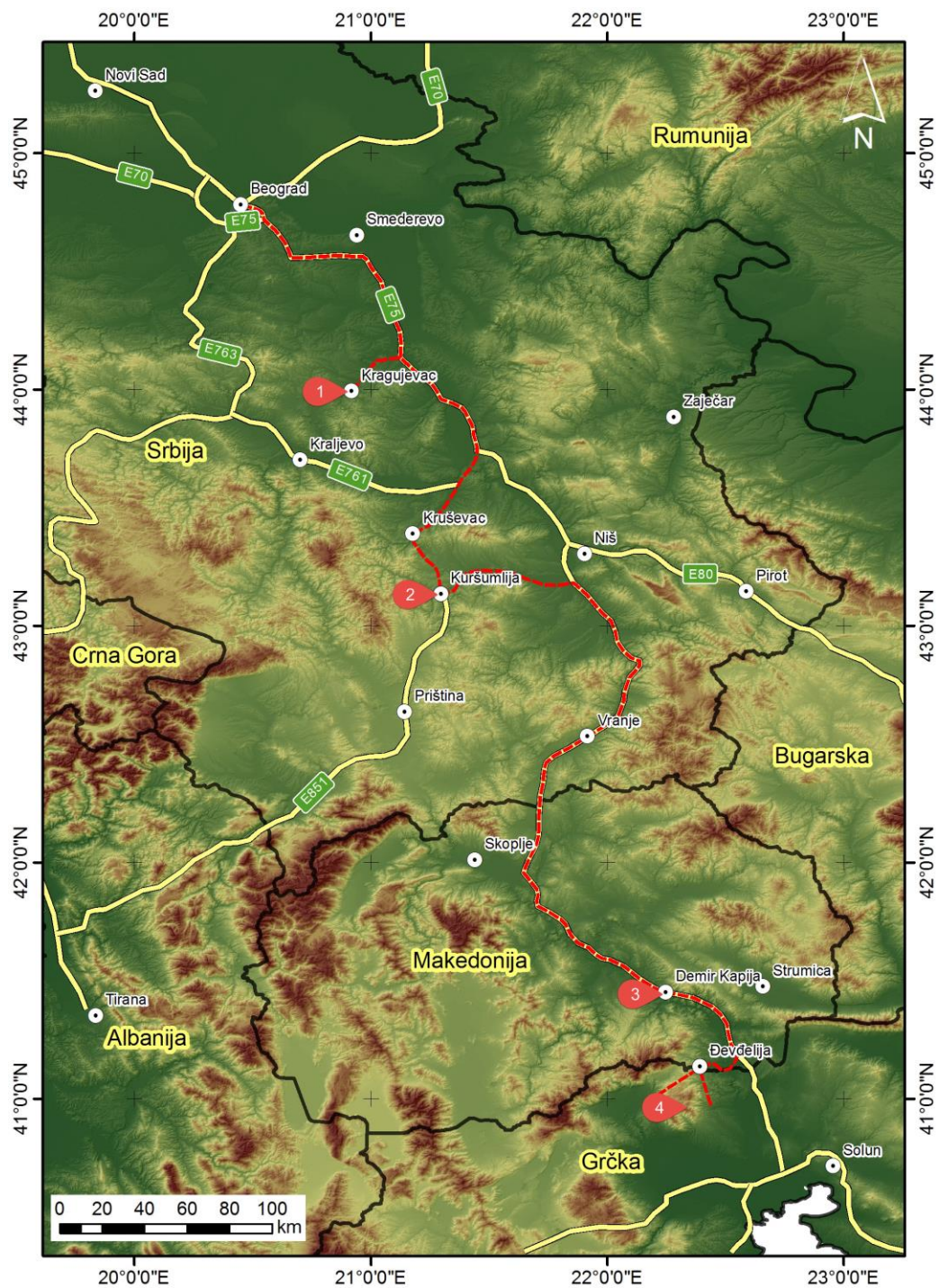
Iako se pojave ofiolita IVZ mogu uočiti već na 20 km južno od Beograda, na istočnim obroncima Avale - kod Bujanj Potoka, kao najveći izdanci na teritoriji Srbije ovi ofioliti se pojavljuju u okolini Kragujevca (Ždraljica) i u okolini Kuršumlje. Ofiolitski kompleks Ždraljica (OKŽ) se nalazi na oko 150 km južno od Beograda, u blizini Kragujevca i geografski pripada Šumadijskom okrugu. Većina izdanaka se može obići kada se isključi sa autoputa kod Batočine, a nakon toga ide putem za Kragujevac, pa lokalnim putem preko Donje i Gornje Sabante, duž doline reke Ždraljice. Drugi način je isključenje sa autoputa kod Malog Požarevca, nakon toga lokalnim putem prema Mladenovcu, preko Topole, do Kragujevca. Teren se odlikuje velikim površinama obradivog zemljišta i šuma.

Ofiolitski kompleks Kuršumlje (OKK) nalazi se na oko 300 km južno od Beograda, tj, na oko 150 km od Kragujevca. OKK geografski pripada Topličkom okrugu i obuhvata širu okolinu Kuršumlje, sve do Prepolca. Do istraživanog terena se može stići na dva načina. Prvi način podrazumeva Beograd kao polaznu stanicu: Autoputem E-75 do Čičevca, gde se isključuje sa autoputa, preko Kruševca, Razbojne, Blaca do Kuršumlje. Drugi način je iz pravca Kragujevca, kada se prati regionalni put Kragujevac-Kruševac,

preko Gornje i Donje Sabante, Rekovca do Kruševca. Iz Kruševca se ide lokalnim putem preko Razbojne i Blaca do Kuršumlje. Kompleks je razvijen na južnim i jugoistočnim delovima Kopaonika. Teren je veoma raščlanjen. Karakterišu ga visoki vrhovi, kao što su Oštro Koplje (1789 m) i Muslinac (1725 m). Na ovom terenu su prisutne reke Toplica, Banjska reka, kao i Mirnička reka, koje pripadaju južnomoravskom slivu. Kao i u slučaju ofiolitskog kompleksa Ždraljice i ovde je teren dosta pokriven obradivim zemljištem i šumama.

Na prostoru BJR Makedonije (u daljem tekstu Makedonija) ofiolitski kompleksi se mogu pratiti od Skoplja, duž doline Vardara do Đevđelije i makedonsko-grčke granice. Ofiolitski kompleks Demir Kapije udaljen je od Beograda 515 km, a od Skoplja oko 100 km. Do njega se može doći međunarodnom saobraćajnicom E-75. Teren je raščlanjen, a prosečna nadmorska visina terena je oko 620 m. Manje reke i njihove pritoke pripadaju slivu reke Vardar. Područje se odlikuje visokim temperaturama tokom leta.

Đevđelija se nalazi na oko 50 km južno od Demir Kapije i do nje se, takođe, stiže međunarodnom saobraćajnicom E-75. Ofiolitski kompleks Đevđelije se nalazi sa obe strane makedonsko-grčke granice. Teren je u ovom delu razvijen na jugoistočnim delovima Paikon planine (1650 m) i izuzetno je raščlanjen. Hidrografska mreža je veoma razvijena i sve reke i pritoke pripadaju vardarskom slivu. Područje je udaljeno oko 700 km južno od Beograda, a od Soluna je udaljena oko 80 km. Teren je delimično pokriven šumama, ali je i dosta ogoljen, što olakšava rad na terenu.



Slika 1. Geografski položaj istraživanog područja sa naznačenom trasom kretanja (crvena linija), glavnim saobraćajnicama (žuta linija) i područjima istraživanja (1- Ždraljica, 2- Kuršumlja, 3- Demir Kapija, 4- Đevđelija)

2. 2. Prikaz gledišta o položaju IVZ

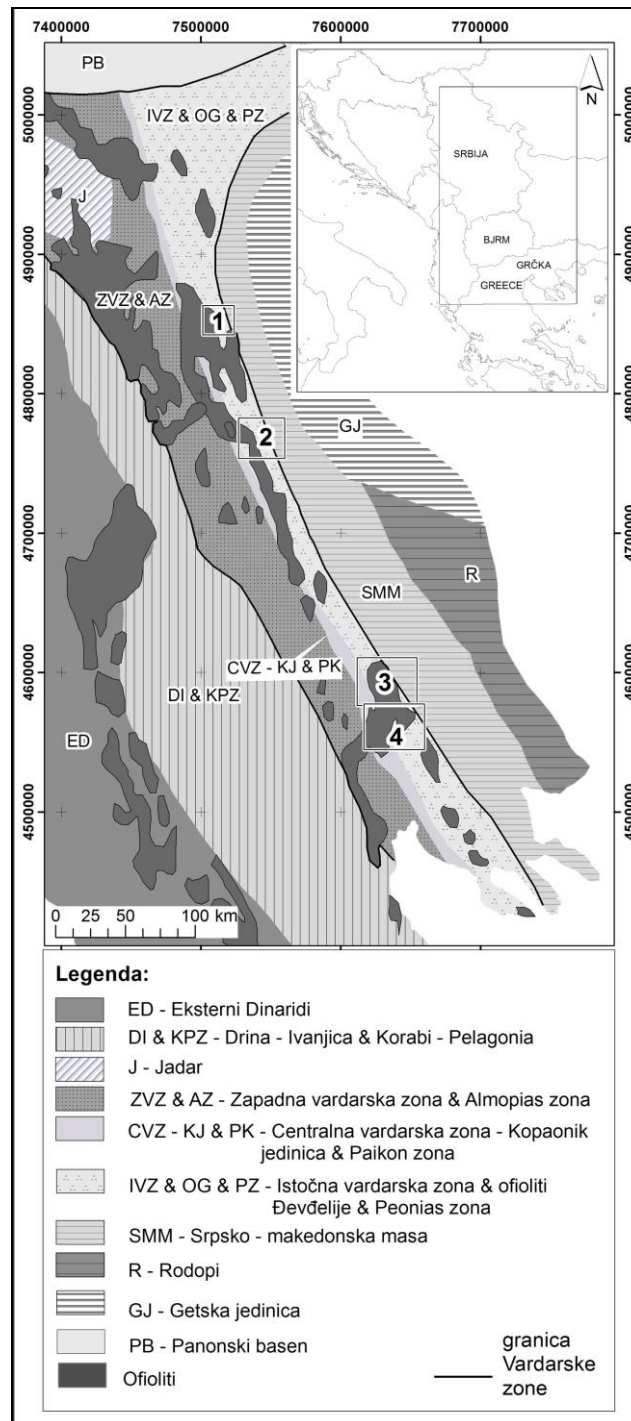
Sadašnji položaj (Slika 2) svih geotektonskih jedinica prisutnih u centralnom delu Balkanskog poluostrva rezultat je mezozojske subdukcije i subsekventne rotacije Jadranske ploče, kao i kompresije Albanida i Helenida (Kissel et al. 1995; Karamata, 2006; Schmid et al., 2008). Vardarska zona (VZ) je, u širem smislu, pojas šava, koji se uglavnom sastoji od ofiolita i različitih stena akrecionog melanža. VZ se nalazi između Drina-Ivanjica jedinice na zapadu i SMM na istoku. Generalno je podeljena na zapadnu, centralnu i istočnu zonu (Robertson et al., 2013). U delu koji pripada severnoj Grčkoj, Zapadna vardarska zona (ZVZ) je pozanata kao Almopias zona (Robertson et al., 2013) i može se povezati sa Sava-Vardar zonom (Pamić, 2002). Centralna vardarska zona se takođe proteže prema jugu i predstavljena je Paikon jedinicom u severnoj Grčkoj (Robertson et al. 2006), dok Istočna vardarska zona, koja je tema ove disertacije, obuhvata uski pojas ofiolita koji je smešten na krajnjem istoku.

IVZ se severno prostire do Apuseni planina u Rumuniji (Bleahu et al., 1981; Nicolae, 1995; Saccani et al., 2011; Bortolotti et al., 2002), gde obuhvata i Transilvanijsku depresiju (Ionescu and Hoeck, 2004). Prema jugu, IVZ se nastavlja u Peonias zonu u Makedoniji i severnoj Grčkoj i uključuje ofiolite Đevdelije i Demir Kapije (Slika 2). Dalje na jug, IVZ se povezuje sa Izmir-Ankara zonom u Turskoj (Anders et al., 2005).

Trenutni tektonski kontakt između IVZ i susednih jedinica uglavnom je predstavljen strmim normalnim rasedima, koji su najverovatnije reaktivirani u miocenu (Brown and Robertson, 2004). S obzirom na ovaj tip kontakta, nije neobično što je vergenca IVZ različito interpretirana u različitim literaturim navodima. Na primer, prema zapažanjima na planinama Apuseni u podnožju Transilvanijske depresije, deo IVZ u Rumuniji je interpretiran tako da je obdukovan na sistema navlaka Biharia¹ tokom gornje krede (Sandulescu, 1984; Bébien et al., 1987; Saccani et al., 2011; Ionescu and Hoeck, 2004; Hoeck and Ionesscu 2006). Schmid et al. (2008) smatraju da sistem Biharia pripada

¹ Apuseni su izolovan masiv Karpatskog luka (Marović, 2010) koji je smešten u njegovoj unutrašnjosti. Sistem navlaka Biharia pripada složenom navlačno-nabornom sistemu Severnih Apusena i sastoji se od tri glavne jedinice: Arieseni navlake, Biharske navlake i Baia de Aries navlake. Navlake su izgrađene od prekambrijumskih i paleozojskih metamorfita, metavulkanita i granitoida. Biharski sistem navlaka navučen je na severu preko severnovergentnog sistema navlaka Codru.

SMM, i da je IVZ verovatno obdukovana na Evropsku marginu, tj. na Srpsko-makedonsku masu (SMM), kao najzapadniji deo Dakija-mega jedinice.

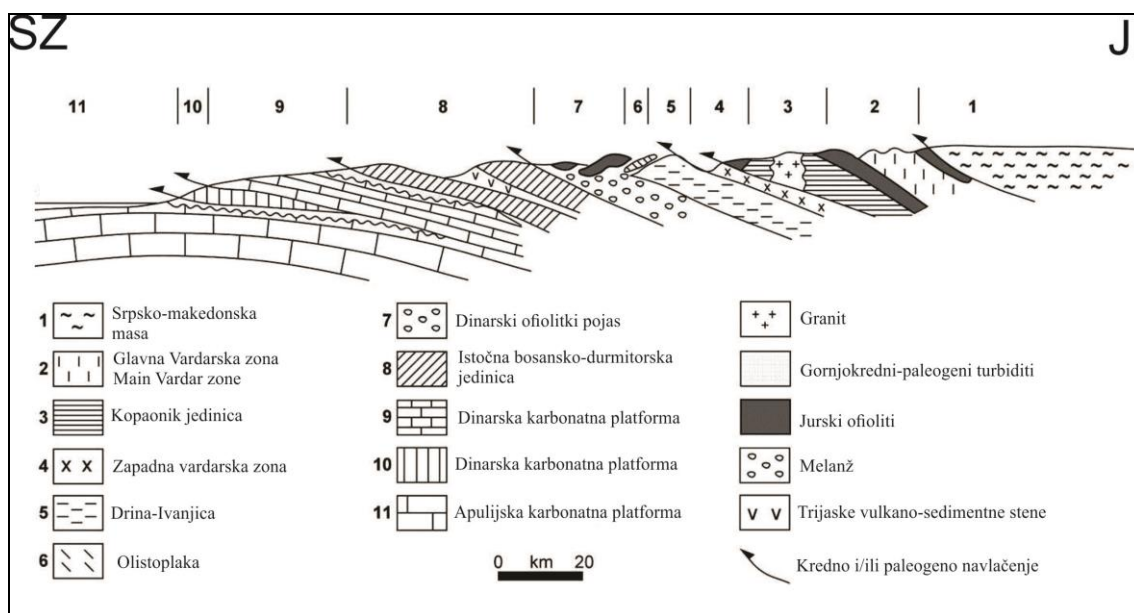


Slika 2. Pojednostavljena tektonska karta dela Balkanskog poluostrva (modifikovano prema Robertson et al., 2009) pravougaonici sa brojevima predstavljaju istraživana područja: 1- Ždraljica, 2- Kuršumlija, 3- Demir Kapija, 4- Đevđelija

Sa druge strane, deo IVZ u Srbiji na OGK je prikazan kao da pada prema istoku ispod SMM (Marković i dr., 1968; Malešević i dr., 1974; Rakić i dr., 1976). Robertson et al. (2009) se slažu sa ovom interpretacijom (Slika 3), dodajući da je SMM navučena preko IVZ i da obe jedinice tektonski leže preko CVZ i Kopaonik jedinice (Marroni et al., 2004; Zelić et al., 2010). U okviru IVZ (odn. Peonias zone), ofioliti Đevđelije-Demir Kapije kartirani su dvojako, kao da su navučeni preko SMM (Mercier, 1966; Lepitkova, 2000) ili kao da je preko njih tektonski smeštena SMM (Rakićević i dr., 1973; Himmerikus et al., 2006). Postoje sugestije da je ofiolitski kompleks Đevđelije formiran otvaranjem izalučnog basena iza Paikon luka (Brown and Robertson, 2003; Božović et al., 2013), i da je kasnije navučen zapadno na njega (Brown and Robertson, 1994). Sa druge strane, Robertson et al. (2013) tvrde da su ovi ofioliti originalno navučeni preko SMM i kasnije, tokom kasne jure, ponovo navučeni prema zapadu.

Na severu Grčke, pojas ofiolita IVZ se sastoji od Oreokastro, Solunskog i Halkidiki masiva. Ofioliti Oraekastro ofiolita smešteni su u izalučnom režimu, dok su ostali smešteni u supra-subdukcijskom režimu (Hinsbergen et al., 2005; Zachariadis, 2006; 2007).

Svi gore navedeni autori imaju slično mišljenje u vezi sa položajem IVZ prema zapadu, smatrajući da IVZ leži preko Kopaonik ili Paikon tektonskih jedinica. Deo IVZ na istoku, odnosno prema SMM, istražen je slabo i nije dovoljno objašnjen. Posebno je nerazjašnjen položaj i uslovi smeštanja IVZ.



Slika 3. Uprošćeni geotektonski profil kroz centralnu Srbiju i Crnu Goru (Robertson et al., 2009)

2. 3. Geologija terena

Ofioliti IVZ sagrađeni su od bazičnih stena koje pokazuju i “*island arc tholeiite*“ i MOR geohemijski odnosno geotektonski afinitet. Bazične stene su presečene brojnim, manjim pojavama intermedijarnih i kiselih kalkoalkalnih intruzivnim stenama (Resimić-Šarić et al., 2005). U Srbiji i Makedoniji, ofioliti i stene melanža su prekrivene overstep² sekvencom titonskih krečnjaka i/ili donjokrednim sedimentnim stenama (Dimitrijević, 1997).

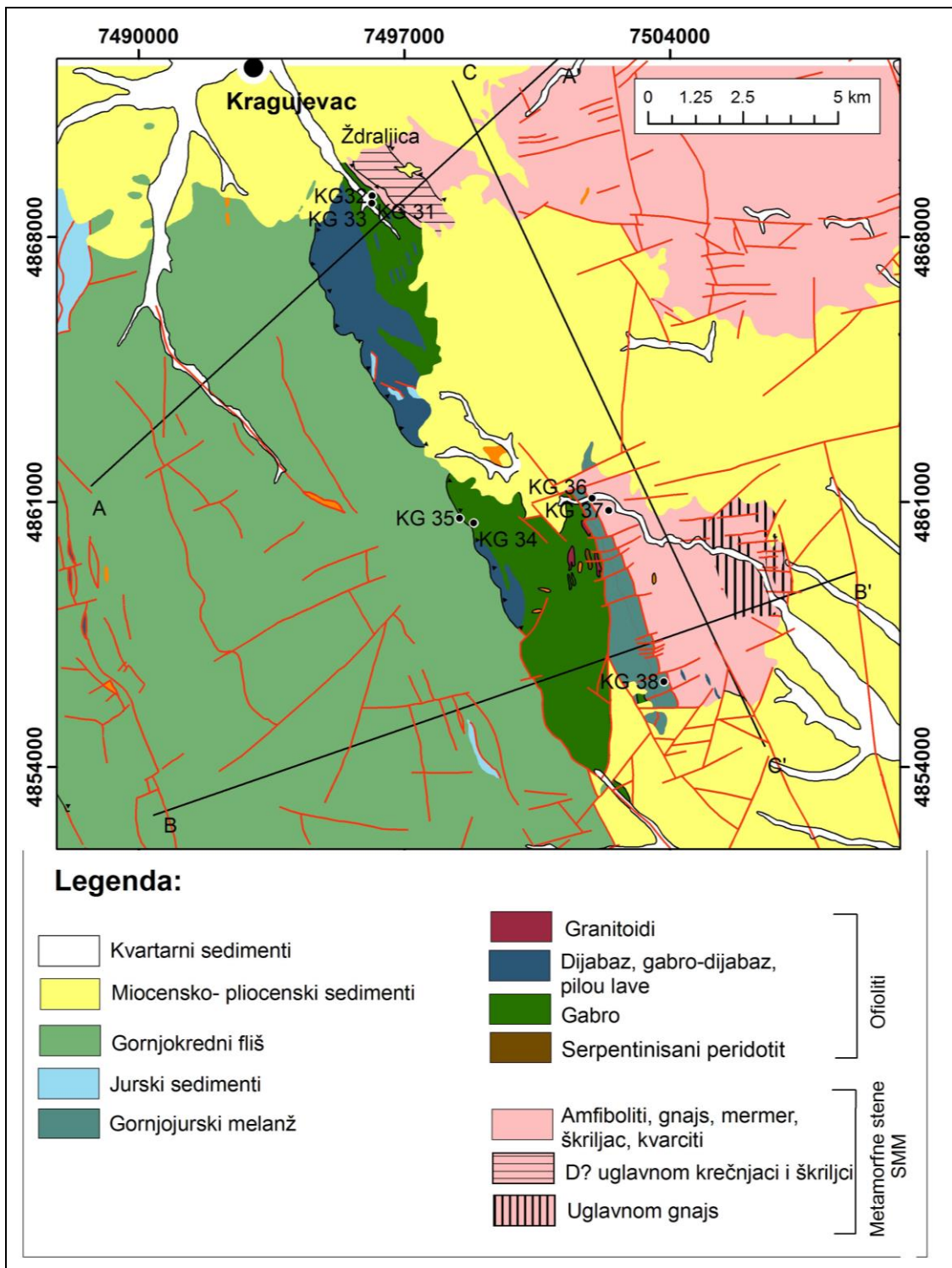
Najveći izdanci ofiolita Istočne vardarske zone na teritoriji Srbije javljaju se kao tela izdužena u pravcu SSZ-JJI, dugačka 20 km i široka nekoliko km. Ovi izdanci su locirani u okolini Kragujevca i u okolini Kuršumlije. Na teritoriji Makedonije izdanci ofiolita predstavljani su telima izduženim u pravcu SZ-JI, dugačkim oko 50 km i oko 25 km širokim, koja čine ofiolitski kompleksi Demir Kapije i Đevđelije. Izdanak ofiolitskog kompleksa se može pratiti van administrativnih granica Makedonije, na prostoru severne Grčke. Na teritoriji severne Grčke izdanak je dugačak preko 20 km i širok je

² Sekvenca koja diskordantno prekriva ofiolite i ukazuje na minimalnu starost obdukcije.

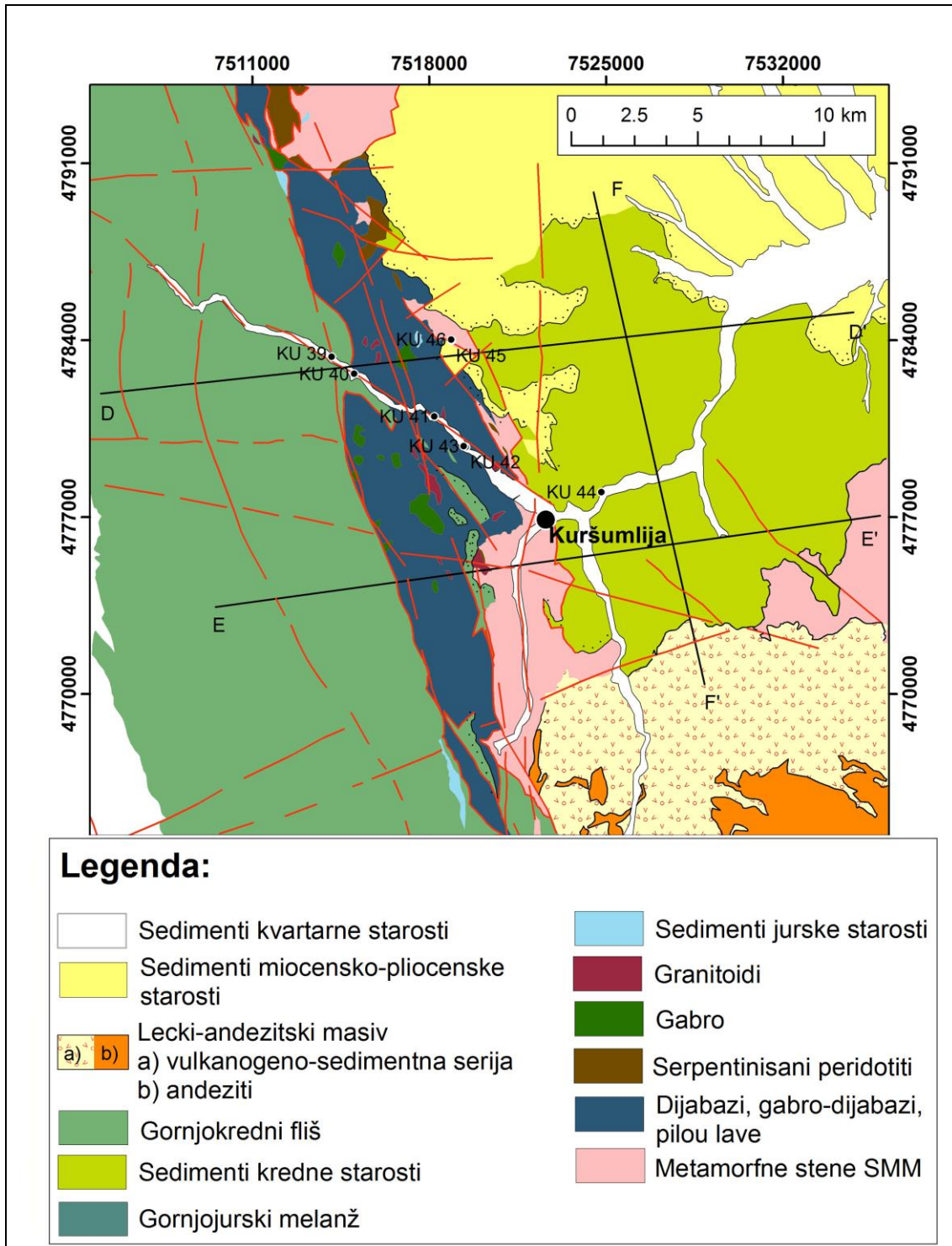
nekoliko km. Ofiolitski kompleks Đevđelije (OKĐ) probijen je granitom Fanos i na taj način podeljen na dva dela: Evzoni, na zapadu i Skra, na istoku (Mavrides, 1982; Mercier, 1993).

Ofiolitski kompleks Ždraljice (OKŽ) (Slika 4) nalazi se u jasnom tektonskom kontaktu sa barem - aptijskim flišem i metamorfisanim gornjojurskim melanžom, poznatim kao “dijabaz-rožna formacija” (Brković i dr., 1978; Malešević i dr., 1978; Dimitrijević, 1997). Na istoku, OKŽ je, takođe u tektonskom kontaktu sa srednjojurskim melanžom predstavljenim niskometamorfisanim stenama (zeleni škriljci, metakrečnjaci, metapeščari i kalkšisti). Ofiolitski kompleks Ždraljice je uglavnom sastavljen od gabrova, dijabaza sa pilou lavama i retkim pojavama kiselih do intermedijarnih intruziva. Gabrovi su kumulativnog karaktera i pojavljuju se kao nepravilna tela presečena individualnim dijabaznim dajkovima ili rojevima dajkova.

Ofiolitski kompleks Kuršumlije (OKK) (Slika 5) prekriven je krednim sedimentima na zapadu. Na istoku, OKK je u tektonskom kontaktu sa metamorfnim stenama SMM. Ofiolitski kompleks Kuršumlije se sastoji od gabrova, dijabaza, dijabaznih dajkova i podređenih granita. Dajkovi dijabaza pokazuju pukotine hlađenja i tanke normalne pukotine plitko utisnutih dajkova. Pilou lave, primarni i resedimentovani hijaloklastiti, retki bazaltni slivovi i ostaci intruzivnog kompleksa su takođe prisutni.



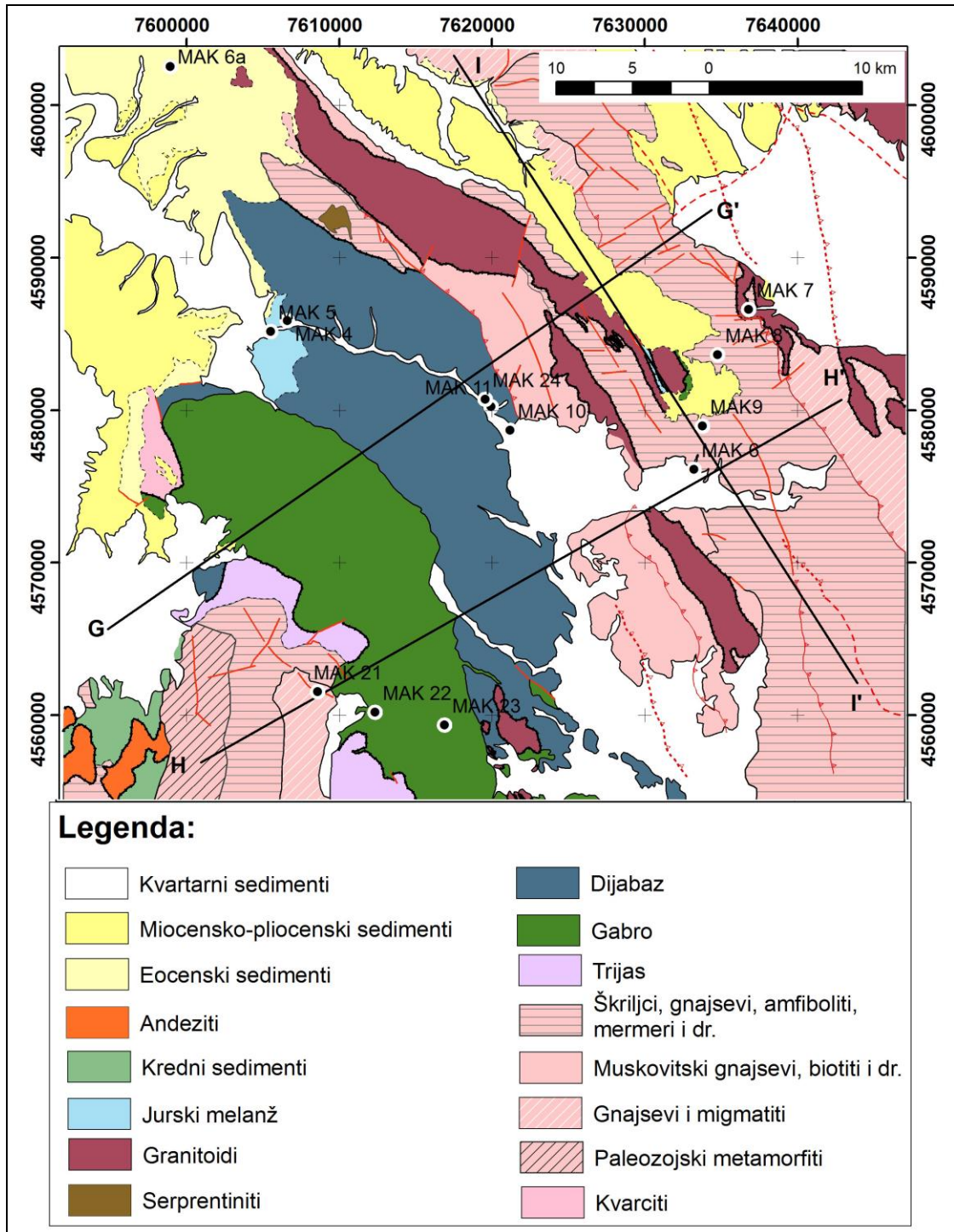
Slika 4. Pojednostavljeni prikaz geološke građe na području Ždraljice sa položajima profila i tačkama uzorkovanja (modifikovano prema: Marković i dr., 1968)



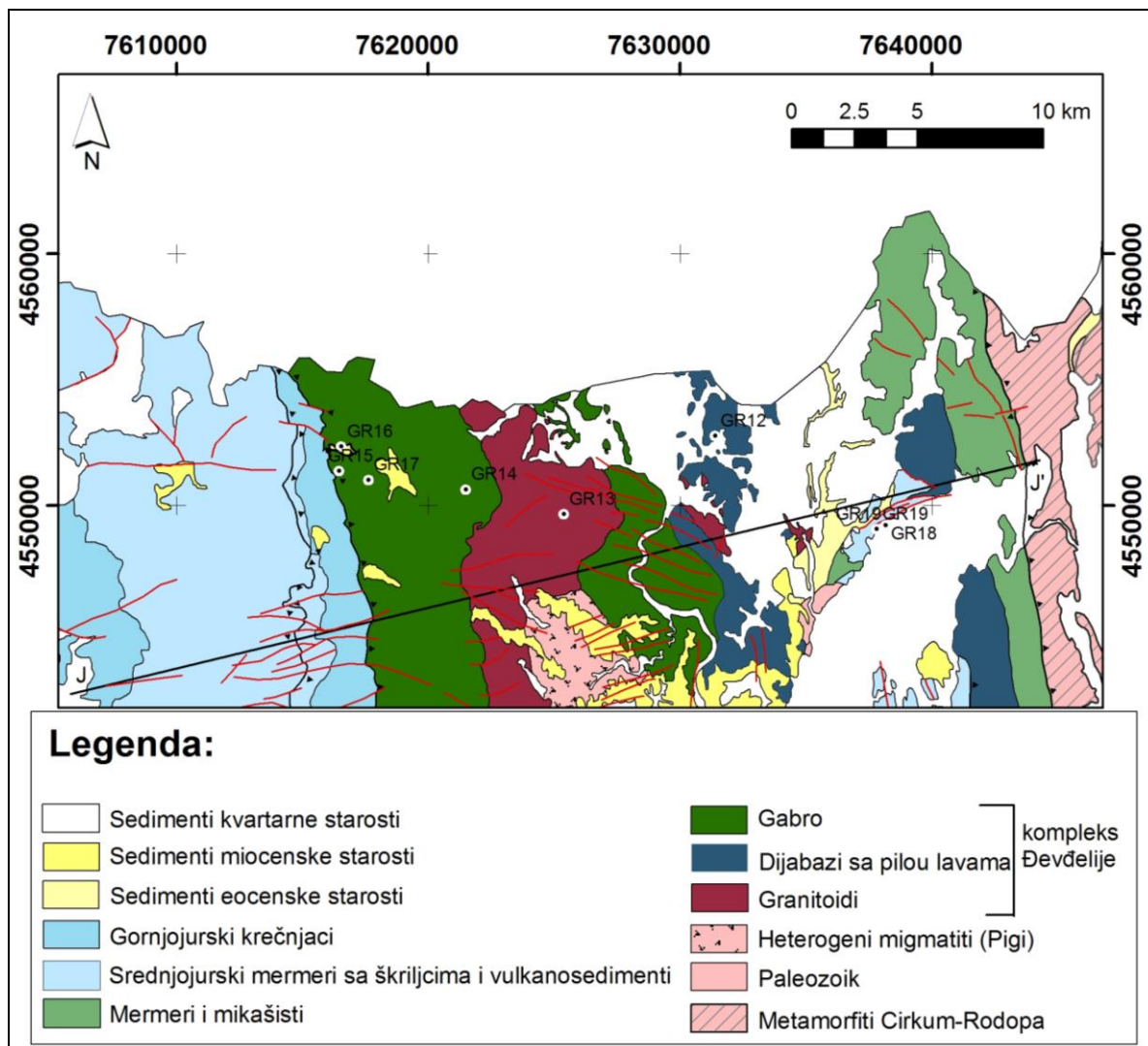
Slika 5. Pojednostavljeni prikaz geološke građe na području Kuršumlije sa položajima profila i tačkama uzorkovanja (modifikovano prema: Malešević i dr., 1980)

Ofiolitski kompleks Demir Kapije (OKDK) obuhvata sekvencu sačinjenu od pilou bazalta, nepravilnih tela dijabaza, dijabaznih dajkova i gabrova (Slika 6). Mala, izolovana tela serpentinisanih peridotita predstavljena su dunitom i podređenim lerzolitom (Lepitkova, 2000). Granitoidi i graniti se prostiru od Štipa, preko Konečke planine uključujući i Plauš-Furka (Fanos). Smatra se da su ovi graniti nastali tokom postkolizije, kratko nakon jurskih kolizionih procesa odgovornih za smeštanje ofiolita (Šarić et al., 2009).

U okviru ofiolitskog kompleksa Đevđelija, ofioliti u području Skra sastoje se od gabrova i ekstruzivnih stena. Bébien (1987) je zabeležio prisustvo ultramafičnih stena. Kumulatne stene su sastvaljene od olivinskih gabrova i gabrova. Ekstruzivi su uglavnom masivne lave i dajkovi, najčešće dijabaznog karaktera. Ofioliti u području Evzoni sastavljeni su od pilou lava, masivnih lava i intruzivnog kompleksa, predstavljenog dajkovima. Kompleks dajkova odlikuje se intruzijom kiselih magmatita koji nose ksenolite susednih mafičnih stena (De Wet, 1989).



Slika 6. Pojednostavljeni prikaz geološke građe na području Demir Kapije sa položajima profila i tačkama uzorkovanja (prema podacima Saveznog geološkog zavoda SFRJ,1970)



Slika 7. Pojednostavljeni prikaz geološke građe na području Đevđelije sa položajima profila i tačkama uzorkovanja (modifikovano prema: Mercier et al., 1993; Mavrides et al., 1982)

2.3.1. Geologija susednih geotektonskih jedinica

Izdanci geotektonske jedinice Kopaonik (Karamata and Krstić, 1996) prostiru se pravcem S-J. Na jugu se ova jedinica povezuje sa Paikon jedinicom u Grčkoj. Glavni litološki članovi ove geotektonske jedinice jesu metapeščari, škriljci, filiti sa kvarcitima, krečnjaci, spiliti i gornjotrijaski karbonati. Oligocenska (miocenska ?) tela granodiorita intrudovana su u kontinentalnu podlogu i njihov mezozojski pokrivač. Na istočnom grebenu šavna zona razdvaja dva ofiolitska kompleksa: Zapadni vardarski i Istočni

vardarski. Trijaski škriljac, laporac i karbonati su prekriveni jurskim ofiolitskim melanžom i obdukovanim ofiolitima ZVZ. Ovi ofioliti su diskordantno prekriveni senonskim flišom, koji se sastoji od velikih olistolita, uključujući i tela ofiolita, koji se smatraju šavnom zonom. Jedinica Kopaonik je na istoku delimično pokrivena nemetamorfisanim dodnjokrednim flišom (parafliš) (Schefer et al., 2007). Tokom krede, na istoku i zapadu jedinice Kopaonik, taloženi su klastični sedimenti (Dimitrijević and Dimitrijević, 1987). Prema Schmid et al. (2008) gornjokredni sedimenti jedinice Kopaonik predstavljaju kredno-paleogenu suturu između Jadranske jedinice (uključujući i Kopaonik) i Evrope (Karpato-balkanidi), koja tone prema istoku (Schefer et al., 2007; Robertson et al., 2009). Zapadna vardarska zona se nalazi između jedinice Kopaonik na istoku i Drina-Ivanjica jedinice na zapadu. Pruža se pravcem SSZ-JJI od severa Grčke (Solunski zaliv) preko Makedonije, obuhvata ultramafitske navlake Stolovi, Čemerno i Troglav kao i Maljen.

Metamorfne stene SMM se pojavljuju istočno od opisanih izdanaka ofiolita IVZ. To su uglavnom najstarije jedinice na istraživanom prostoru prekambrijumske i paleozojske starosti. SMM je predstavljena metamorfitima i pruža se u pravcu SI-JZ. Litološki je SMM veoma složena, pa je ovde prikaz pojednostavljen i sveden na zonu neposrednog kontakta sa IVZ. SMM se pretežno sastoji od srednjemetamorfisanih magmatskih i sedimentnih stena, predstavljenih gnajsevima, mikašistima, amfibolitima, zelenim škriljcima i mermerima. Prisutni su biotit-muskovitski škriljci, lepidoblastične strukture i škriljave tekture, izgrađena od albita, kvarca, biotita, muskovita, hlorita i epidota, kristalasti škriljci predstavljeni sitnozrnim biotitskim i dvoliskunskim gnajsevima, granatski mikašisti, mermeri, mikašisti, leptinoliti, muskovitski gnajsevi, metamorfisani kvarciti, migmatiti. Prekambrijumske stene SMM predstavljene su uglavnom sitnozrnim biotit-muskovitskim škriljcima, dok se amfiboliti i amfibolitski škriljci javljaju sporadično. Delovi kristalina SMM prekambrijumske starosti su u području Ždraljice navučeni preko mlađih devonskih stena.

Na celom području istraživanja prisutni su kenozojski sedimenti i to: klastiti, ugalj, laporac, krečnjak, pesak i šljunak. U geomorfološkom smislu, sedimenti kvartara imaju aluvijalni, deluvijalni, fluvijalni, eolski, glacijalni i limnički karakter. U ovoj tezi svi sedimenti kenozojske starosti su tretirani kao jedna celina, s obzirom na problematiku

kojim se ova teza bavi, kao i na malo prostorno (po dubini) rasprostranjenje ovih sedimenata i njihov uticaj na geofizičke anomalije.

3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Primenjena metodologija obuhvata tri metode, koje su međusobno povezane i koje se već nalaze u širokoj primeni pri savremenim geološkim i geofizičkim istraživanjima, a to su: 1) daljinska detekcija i strukturna analiza, 2) gravimetrijska istraživanja i 3) geomagnetska istraživanja.

Kreiranje geofizičko-geoloških modela je uglavnom kompleksan postupak, koji zahteva korelaciju svih dostupnih podataka i njihovo međusobno povezivanje i preklapanje. Multidisciplinarni pristup je neophodan pri kreiranju modela u cilju davanja geodinamičkog tumačenja. Istraživanja su sprovedena u dve faze:

1. Prikupljanje podataka primenom metoda daljinske detekcije, terenskog rada i laboratorijskih ispitivanja/merenja i
2. Analiza podataka: kvalitativna analiza i kvantitativna analiza.

3. 1. Prikupljanje podataka

Šire istraživano područje, koje obuhvata sva četiri uža područja i prostor između njih, ima površinu od oko 16000 km². Na tom području su sprovedene analiza i interpretacija. Usaglašene su sve geološke osnove, topografske osnove, geofizički podaci i podloge.

3. 1. 1. Daljinska detekcija- analiza, interpretacija i pripremanje podloga

Analiza i interpretacija strukturnog sklopa (lineamentati i kružne strukture) vršene su na satelitskim snimcima Landsat 7 ETM+ satelita. Područje pokriva 13 snimaka. Snimci su preprocesirani i procesirani. Od svih snimaka (rezolucije 15 m) napravljen je kolorkompozit mozaik u kombinaciji kanala 4, 5, 7 i 8. Za lokalnu interpretaciju pojedinih delova, analiza i interpretacija su vršene na aerosnimcima razmere 1:25000. Podaci dobijeni daljinskom detekcijom bili su preliminarnog karaktera i interpretirane rupture su potvrđene prilikom terenskog rada ili na osnovu dostupnih geoloških podloga (najpre na osnovu radnih karata i Osnovne geološke karte).

3. 1. 1. 1. Obrada snimka, analiza i grafička obrada

Obrada snimaka je rađena u “TNTmips” i programskom paketu ArcGIS u Centru za daljinsku detekciju Univerziteta u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet. Snimci koji obuhvataju istraživano područje zauzimaju u WRS (World Reference System) položaje 183-187/28-32, gde je prvi broj, broj orbite, a drugi broj reda. Snimak je dobijen u GeoTIFF formatu, georeferenciran je u WGS (World Geodetic System 1984) elipsoid i datum, UTM zona 34. Snimak je načinjen ETM+ senzorom (“Enhanced Thematic Mapper” – poboljšani multispektralni skener za tematsko kartiranje). Rezolucija multispektralnih kanala je 30 m, a panhromatskog 15 m. Za rad su korišćeni kolor kompozit snimak Landsat 7 satelita. Osnovne karakteristike svakog pojedinačnog kanala ove misije date su u Tabeli 1.

Tabela 1. Kanali Landsat 7 ETM+ satelita, opseg koji pokrivaju i namena kanala

broj kanala	talasne dužine	deo EM spektra	pojedinačna namena kanala
Kanal 1	0.45 – 0.52 μm	plava – zelena	priobalno kartiranje, razlikovanje tla od vegetacije, klasifikacija šuma i indentifikacija antropogenih tvorevina
Kanal 2	0.52 – 0.60 μm	zelena	razlikovanje vegetacije, praćenje razvoja bolesti biljaka, indentifikacija antropogenih tvorevina
Kanal 3	0.63 – 0.69 μm	crvena	indentifikacija vrste biljaka
Kanal 4	0.76 – 0.90 μm	blisko IR	praćenje vlažnosti tla, razvoja vegetacije i razlikovanje vodenih masa
Kanal 5	1.55 – 1.75 μm	srednje IR	praćenje i kontrola vlažnosti tla i vegetacije
Kanal 6	10.40 – 12.50 μm	termalno IR	praćenje vlažnosti i vulkanskih aktivnosti
Kanal 7	2.08 – 2.35 μm	srednje IR	razlikovanje minerala i stena i sadržaja vlage u vegetaciji
Kanal 8	0.45 – 12.50 μm	širok spektar	podizanje rezolucije

Snimci su obrađeni kroz niz matematičkih transformacija: preprocesiranje (geometrijske korekcije, atmosferske korekcije, eliminacija šumova), procesiranje (filtriranje, poboljšanje osvetljenja i kontrasta, podizanje rezolucije, PCA i automatska klasifikacija).

3. 1. 1. 2. Preprocesiranje snimaka

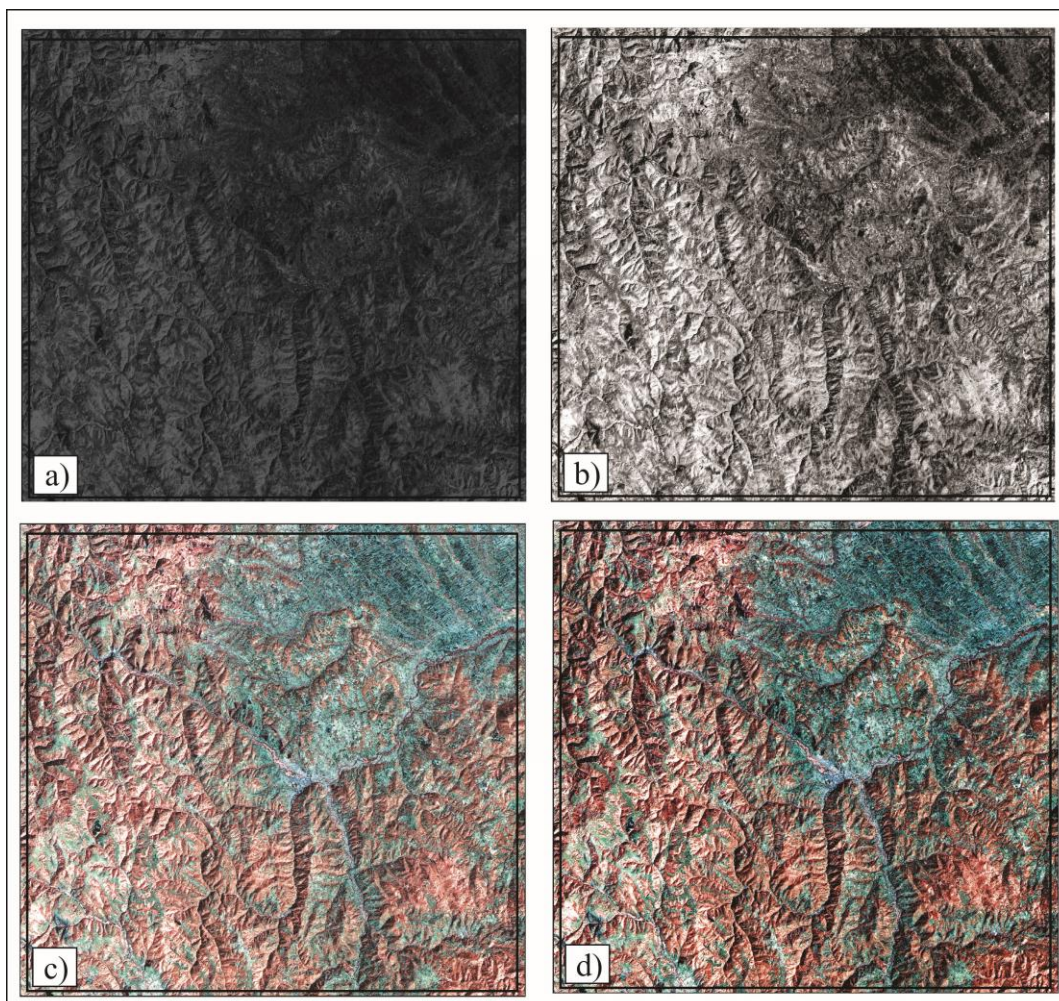
Sirovi podaci su dobijeni direktno sa senzora i sadrže određene greške i smetnje. Preprocesiranjem snimaka otklanjaju se atmosferski uticaji na prenos elektromagnetne energije kroz atmosferu od Zemljine površine do senzora, kao i šumovi koji nastaju zbog pregrevavanja skenera, promene položaja platforme, tačnije zbog naglih skokova i grešaka u prenosu podatka. Postupak preprocesiranja se može opisati kroz tri operacije, koje se izvode nad snimcima: geometrijske korekcije, radiometrijske i atmosferske korekcije.

Metod daljinske detekcije je primenjen u dva navrata. Prvi put kao pripremni korak pred odlazak na teren, a drugi put da bi se podaci upotpunili verifikovanim podacima sa terena i da bi se napravila konačna interpretacija rupturnog sklopa, kao i zbog kartiranja svih izdanaka ofiolita na istraživanom području (posebno područja ofiolita prekrivena vegetacijom). Preprocesiranjem snimaka otklonjeni su uticaji atmosferilija kao i zagađenja iz vazduha. Primenjeni su morfološki filteri i urađena je rektifikacija (Slika 8).

Slika 8 pokazuje osnovne razlike između snimka, koji je prošao proces preprocesiranja, u odnosu na snimak bez njih. Na preprocesiranom snimku su istaknuti lineamenti koji mogu predstavljati rasede i rasedne površi. Treba imati na umu da nije svaki lineament na snimku ujedno i rased, već se pomoću poznatih kriterijuma (Krešić, 1995; Marković i dr., 2003; Pavlović i dr., 2004; Mohanty et al., 2004) razdvajaju rasedi i lineamenti koji to nisu. Nad preprocesiranim snimkom sproveden je i postupak podizanja rezolucije (Slika 8d). Na snimku nad kojim je sproveden postupak podizanja rezolucije jasno su uočljivi nežni prelazi i jasno su istaknuti određeni delovi. Rezolucija novodobijenog snimka je 15 metara. Ova rezolucija je zadovoljavajuća, s obzirom na površinu koja je obuhvaćena istraživanjem, kao i na samu tematiku istraživanja. Regionalnim istraživanjima, kao što je ovo, smetali bi dodatni detalji na snimcima, koji bi samo opteretili prikaz i otežali interpretaciju i analizu.

Zamagljenja na snimcima se javljaju usled interakcije Sunčevih zraka sa atmosferom. Ova interakcija se dodatno pojačava sa povećanjem vlažnosti u atmosferi i može se ukloniti ili u velikoj meri umanjiti, direktno podešavanjem senzora ili kasnije pri obradi

podataka. U cilju otklanjanja paralelnih i normalnih "brazda" primenjen je algoritam "Removing haze".



Slika 8. Satelitski snimak Landsat 7 satelita i efekti preprocesiranja, a) 5. kanal - neobrađen, b) 5. kanal koji je prošao proces poboljšanja kontrasta i osvetljenosti, uklanjanja uticaja atmosferilija, c) kombinacija kanala 7, 5, 4 (RGB) nad kojima je primenjen morfološki filter ("erosion"), d) satelitski RGB snimak poboljšane rezolucije

3. 1. 1. 3. Procesiranje snimaka

Prilikom procesiranja snimaka, svaki pojedinačni kanal svakog snimka se dovodi do nivoa koji omogućava što kvalitetniju podlogu za analizu i interpretaciju. Sam postupak procesiranja obuhvata i automatske transformacije u cilju izdvajanja područja od interesa, koja nisu prekrivena vegetacijom. Ovaj deo je veoma koristan pri planiranju maršrute za kartiranje izdanaka i prikupljanje uzoraka. Transformacije satelitskih

snimaka podrazumevaju operacije kojima se menjaju DN (eng. *digital number*) vrednosti. Transformacije uključuju matematičke operacije, koje se sprovode nad više kanala u cilju dobijanja jedinstvenog kanala. Transformacijama se vrši manipulacija nad talasnim dužinama određenih kanala.

Poboljšanje kontrasta i osvetljenosti je primenjeno na sve kanale. Poboljšanje kontrasta se izvodi matematičkom transformacijom, koja dovodi do smanjivanja opsega talasnih dužina na pojedinačnim kanalima. Krajnji rezultat postupka je poboljšani snimak za vizuelnu analizu i interpretaciju.

Filter "*Vegetation index*" je korišćen za analizu vegetacionog pokrivača. Primenom ovog filtera izdvajaju se područja sa vegetacijom i u okviru njih razdvajaju se područja sa zdravom vegetacijom. Filter koristi jednostavnu matematičku operaciju, kojom se od četvrtog kanala oduzimaju vrednosti trećeg kanala: kanal 4 - kanal 3.

Postupak poboljšanja rezolucije podrazumeva povećanje rezolucije ovih kanala sa 30 m na 15 m (Landsatov panhromatski kanal, 8). Povećanje rezolucije satelitskog snimka je obavljeno primenom algoritma, tzv. Brovijske (Brovey) transformacije, koja je sprovedena nad pet kanala Landsatovog snimka. To je postupak koji se zasniva na matematičko-statističkoj manipulaciji DN vrednostima piksela multispektralnih kanala niže rezolucije sa panhromatskim kanalom više rezolucije. Transformacija DN vrednosti u 3 izabrana kanala može se prikazati sledećom formulom:

$$R (\text{red}) = K3 / (K3 + K2 + K1) \times P1,$$

$$G (\text{green}) = K2 / (K3 + K2 + K1) \times P1,$$

$$B (\text{blue}) = K1 / (K3 + K2 + K1) \times P1$$

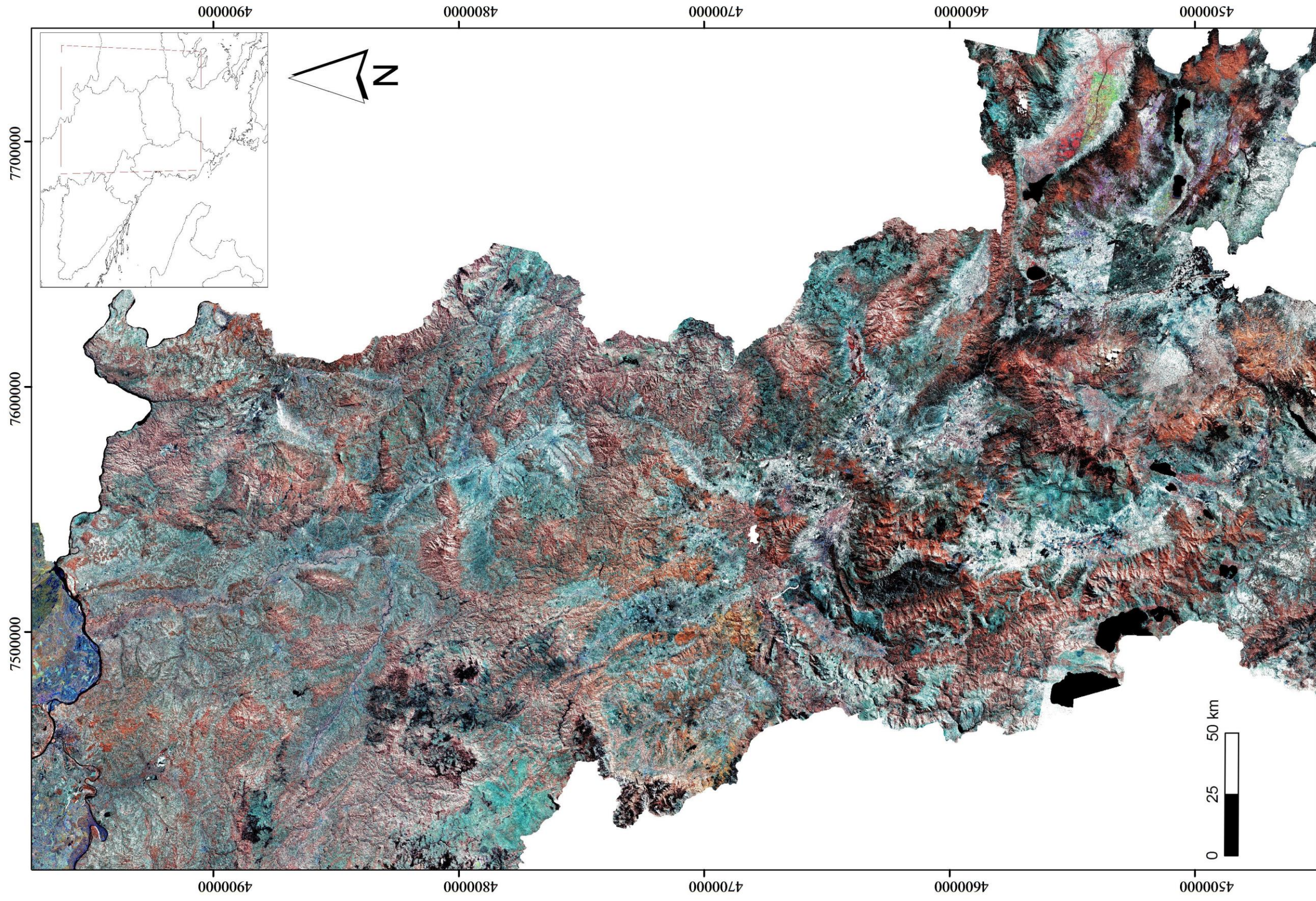
gde su promenljive K1, K2 i K3 vrednosti piksela jednoznačno pozicioniranog u x, y koordinatnom sistemu u sedmom, četvrtom i prvom kanalu, a P1 vrednost istog piksela na panhromatskom snimku više rezolucije. Nakon ovog postupka primenjen je postupak rektifikacije.

Morfološki filter koji je korišće u radu je „erozija“ (erosion). Na ovaj način su istaknute regionalne linearne strukture, čime se kvalitativna analiza rupturnog sklopa ubrzava i podiže njena pouzdanost.

Ovako pripremljeni pojedinačni snimci su uvršteni u mozaik/asemblož, koji se sastoji od 13 snimaka (i to: 187/28, 186/28, 187/29, 186/29, 185/29, 186/30, 185/30, 186/31, 185/31, 184/31, 185/32, 184/32, 183/32). Mozaik je prikazan na Slici 9.

Mozaik je karakterističan po tome što primenjena kombinacija kanala (7, 5, 2, 8) ističe morfološke razlike na snimcima i dozvoljava kvalitetnu interpretaciju.

Daljinskom detekcijom tretirano je područje cele Srbije, Makedonije i severne Grčke, kako bi se ispratile regionalne rupture koje mogu biti značajne za samo istraživano područje, kao i van tog područja ili da se, eventualno, uoče određene rupture koje, ako se ne sagledaju u celini, mogu imati isključivo lokalni značaj i obrnuto.



Slika 9. Satelitski asemblaž (Landsat 7 ETM+, kombinacija kanala: 7, 5, 4)

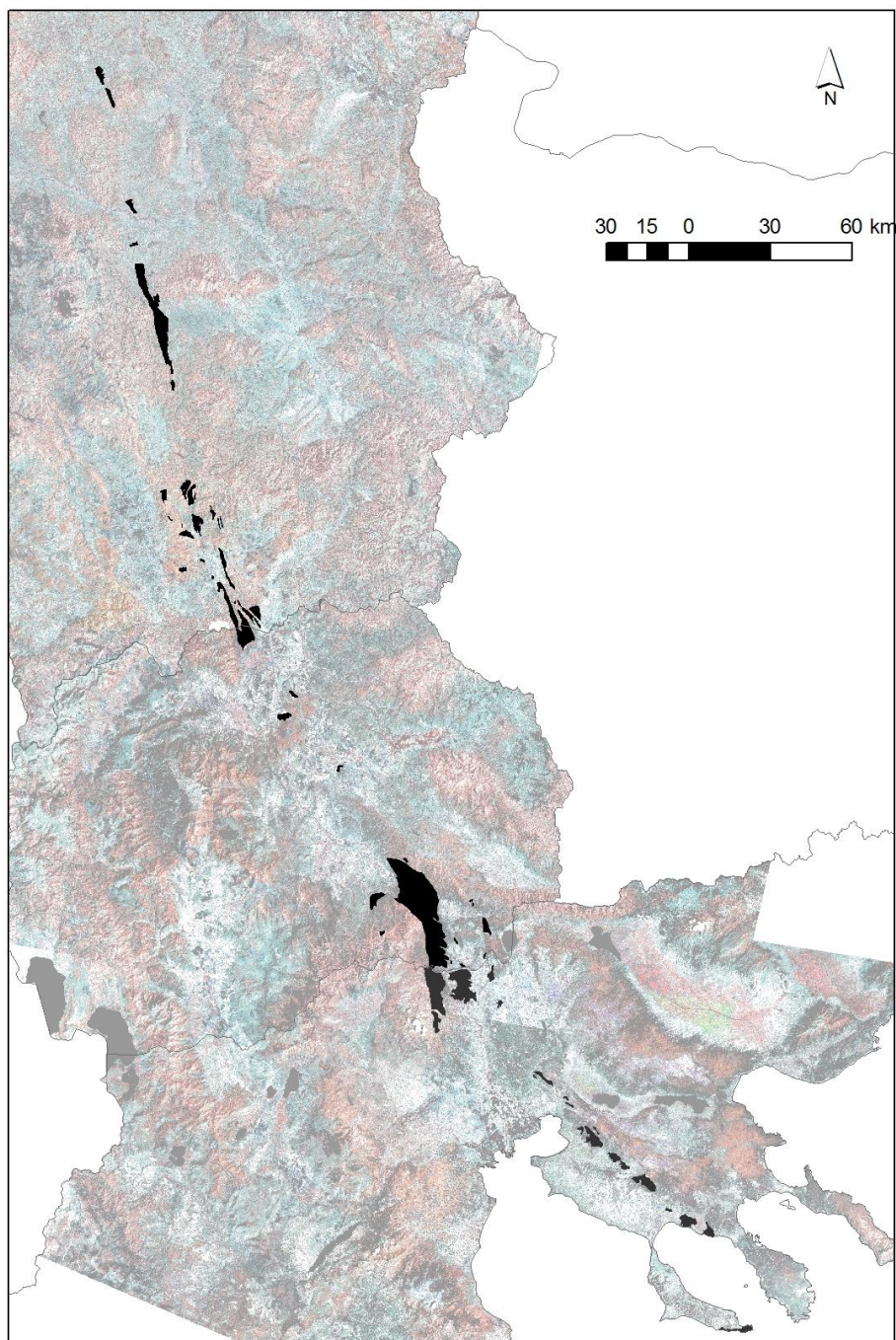
Analiza glavnih komponenti (PCA) predstavlja veoma značajan postupak procesiranja i statističku metodu koja se najviše koristi kod obrade podataka sa više promenljivih. PCA transformiše višekanalni snimak u više pojedinačnih kanala, koji se „sabijaju“ u jedan snimak, koji se može interpretirati. Ona omogućava smanjenje broja kanala potrebnih za kompjutersku obradu multispektralnih snimaka. Analiza glavnih komponenti je tehnika, koja pokušava da objasni odnose između nekoliko promenljivih istovremeno, u smislu pronalaženja jednostavnijih odnosa, koji osiguravaju uvid u prikrivenu strukturu promenljivih. Kombinovanjem podataka PCA sa rezultatima multispektralnih odnosa, dobijaju se informacije od izuzetnog značaja za isticanje specifičnih sadržaja i tematsko kartiranje terena. PCA u procesiranje uvodi spektralne vrednosti svih kanala u isti sistem. Svrha metode je korelacija unutar jednog skupa promenljivih i redukcija dimenzionalnosti prostora, kako bi se što veći broj promenljivih objasnio pomoću što manjeg broja promenljivih. Prvi korak transformacije ogleda se u pomeranju centra n – dimenzionalne distribucije populacije u statistički centar, koji predstavlja središnju vrednost svih kanala glavnih komponenti.

Prvi, PCA1 kanal sadrži najveći procenat izvornih podataka, drugi, PCA2 kanal sadrži drugu najveću količinu izvornih podataka i tako dalje; poslednji PCA kanali sadrže najveći šum. PCA je primenjen na snimcima na kojima je izvršeno prethodno spajanje spektralnih kanala, kako bi se jasnije istakle tonske i spektralne razlike među litološki različitim sredinama na snimku

Proces automatske klasifikacije sproveden je na snimcima, koji su prethodno prošli kroz PCA, u cilju odvajanja nekoliko klasa od interesa. Proces omogućava deljenje celog područja na određeni broj klasa, koje su u saglasnosti sa pojavama geoloških jedinica na površi terena. Sama matrica po kojoj se sprovodi ova klasifikacija zapravo upoređuje vrednosti svakog pojedinačnog piksela i grupiše piksele sa vrednostima određenog opsega u jedinstvenu klasu. Zavisno od toga koliko se klasa zada, toliko će se opseg menjati. Shodno tome, sledi da što je veći broj klasa to je manji opseg vrednosti piksela koji se svrstava u jednu klasu. Automatskom klasifikacijom izdvojena su područja ofiolita IVZ koja su od interesa.

PCA1 kanal je zamenjen kanalom visoke rezolucije (panhromatskim kanalom), koji je podešen tako da odgovara PCA1, kako se ne bi rasipale spektralne informacije. Zatim je izvršena reversna operacija. Multispektralni podaci su automatski resemplirani i pridodata im je najveća rezolucija metodom "*nearest neighbor*". Ofioliti su jasno uočljivi i izdvojeni. Automatska klasifikacija, koja je primenjena nad PCA kanalima, dala je dobre rezultate u ovom vidu kartiranja. Pri podešavanju za automatsku klasifikaciju područja sa jednakim spektralnim vrednostima, kao ulazni podatak dodeljena je vrednost 5. Broj koji predstavlja željeni broj izlaznih područja, različitih po svojim karakteristikama, upravo određuje i broj jedinica koje će biti izdvojene automatskim putem. Broj od 5 jedinica je uzet prethodnom analizom geoloških karata. Kao posebna celina, na ovaj način, izdvojeno je područje pod vodom i prostor sa povećanom vegetacijom (klasa 5). Delovi sedimentnog pokrivača, koji obuhvataju kvartarne tvorevine, sedimente aluviona, deluvijum i eventualne pojave nestabilnosti na terenu, izdvojeni su u klasi 4. Klasa 3 predstavlja ofiolite. Ova klasa je ujedno i najmarkantnija na terenu. Klasa 2 je obuhvatila granitoidne stene, dok su klasom 1 obuhvaćene sve druge stene koje se pojavljuju na istraživanom području.

Nakon razdvajanja po klasama, urađena je ponovna automatska klasifikacija, pri čemu su grupisane sve klase, osim klase broj 3 (ofioliti), kako bi upravo ta klasa bila izdvojena sa najmanjom greškom (Slika 10). Rezultati su u saglasnosti sa OGK, s tim da su granice preciznije locirane.



Slika 10. PCA i automatska klasifikacija; izdvojena klasa ofiolita je prikazana crnim poligonima

Kriterijumi koji su korišćeni za analizu satelitskih snimaka su: geomorfološke karakteristike, vegetacione karakteristike, boja stena i tla (Pavlović i dr., 2004). Kao

razlomne strukture, tj. rasedi, tretirani su svi mehanički diskontinuiteti u stenskoj masi, koji su nastali naprezanjem.

Za utvrđivanje raseda, s obzirom na rezoluciju i razmeru snimaka, korišćeni su sledeći kriterijumi: geomorfološki, tonski i vegetacioni lineamenti, nagla linearna promena morfoloških karakteristika itd.

3. 1. 2. Terenski rad

Uža istraživana područja (Slika 2 - naznačena kvadratima 1/2/3/4) obuhvataju površinu od oko 3500 km². Terenski rad je izveden na užim područjima u cilju kartiranja, prikupljanja strukturnih podataka i uzorkovanja stena za laboratorijsku analizu.

Pri izvođenju terenskih radova, ruta je pažljivo planirana, tako da pokrije sve dostupne izdanke. Pozicije uzorkovanja su prikazane na Slikama 4, 5, 6 i 7.

Za laboratorijsku analizu bili su potrebni pojedinačni uzorci veličine od oko 2.5 cm x 2.5 cm, s tim da je za svaku pojedinačnu stenu bilo neophodno izbušiti tri uzorka, pa je stoga najmanja dimenzija po uzorku bila 2.5 cm x 7.5 cm (Slika 11). Kako nije bilo moguće izvršiti uzorkovanje stena bušenjem na terenu, svi uzorci su orijentisani i prikupljeni tako da im je najmanja stranica oko 15 cm. Ovo je bilo potrebno da bi se u laboratorijskim uslovima od jednog uzorka moglo izbušiti najmanje tri uzorka veličine potrebne za laboratorijsko tretiranje. Uzorci su prikupljeni na mestima koja su bila najmanje tektonski poremećena i što manje izložena spoljnim vremenskih uslovima.



Slika 11. Fotografije uzorka na terenu (levo), orijentisani uzorak (u sredini) i uzorak pripremljen za laboratorijsku analizu (MAK 24 - dijabaz, desno)

Terenski rad je sproveden dva puta i to: prvi put sa ciljem kartiranja, prikupljanja strukturnih podataka i uzoraka za laboratorijsku analizu na području BJR Makedonije i severne Grčke u trajanju od 5 radnih dana, a drugi put na teritoriji Srbije u trajanju od 3 radna dana.

3. 1. 3. Laboratorijska istraživanja

Laboratorijska istraživanja obuhvataju određivanje gustine stena i paleomagnetnu analizu, tj. određivanje magnetske susceptibilnosti i prirodne remanentne magnetizacije.

Na vrednost gustine utiče mnogo faktora, kao što su mineralni sastav, poroznost, stepen kompakcije, dubina, struktura, sklop i stepen metamorfizma (metamorfne stene). Zabeležene su srednje vrednosti gustina određenih stena (Telford et al., 1990), međutim te gustine se ne odnose na konkretne lokacije na terenu. Kako su uzorci uzimani sa površine terena, može se pretpostaviti da gustina stene na površini nije ista kao gustina stene u dubljim delovima i ova činjenica je uzeta u obzir prilikom dalje obrade podataka.

Određivanje gustine vršeno je korišćenjem Arhimedovog zakona za određivanje zapremine nepravilnih uzoraka i merenjem mase uzoraka na preciznoj digitalnoj vagi sa tačnošću od dve decimale. Određena su i magnetska svojstva stena: magnetska susceptibilnost, inklinacija, deklinacija i prirodna remanentna magnetizacija (RM).

Magnetska susceptibilnost je jedan od parametara na osnovu koga se može zaključiti koliko je data stena magnetična. Susceptibilnost se može odrediti u odnosu na jedinicu zapremine (zapreminska susceptibilnost) ili mase (masena susceptibilnost).

Inklinacija je ugao koji se meri u vertikalnoj ravni između horizontalne ravni i pravca vektora totalnog magnetnog polja Zemlje u tački merenja. Ukoliko je ispod horizontale onda je vrednost inklinacije pozitivna, dok ukoliko je iznad horizontale, njena vrednost je negativna.

Deklinacija je ugao između astronomskog pravca severa i magnetnog meridijana u tački merenja. Ugao deklinacije se meri u horizontalnoj ravni.

Na stenu prilikom stvaranja deluje aktuelno magnetno polje Zemlje. Tokom vremena, magnetno polje Zemlje se menja, pa tako stena „pamti“ i novi uticaj aktuelnog magnetnog polja kroz vreme. Prirodna remanentna magnetizacija (eng. *Natural Remanent Magnetization* - RM) je permanetna magnetizacija stena. To je pojam koji podrazumeva „zaostalu“ magnetizaciju, tj. onu koju je stenski materijal „zapamtio“ usled indukujućeg dejstva magnetnog polja Zemlje tokom geološkog vremena. Izučavanje RM je osnova paleomagnetizma i magnetostratigrafije.

Određivanje magnetskih karakteristika uzoraka vršeno je u Paleomagnetskoj laboratoriji Odeljenja za geomagnetizam i aeronomiju u Sektoru za geodetske radove Republičkog geodetskog zavoda, na instrumentima i pratećem softeru češke firme AGICO. Magnetska susceptibilnost merena je na danas najosetljivijem komercijalnom instrumentu multi-frekventnom “Kappabridge MFK1-A“. Tenzor magnetske susceptibilnosti sračunat je pomoću specijalizovanog programa “SAFYR“ koji kombinuje merenja magnetske susceptibilnosti u tri upravne ravni .

Prirodna remanentna magnetizacija je merena na “Spinner JR-5“ magnetometru čiji je rad baziran na Faradej-Nojmanovom zakonu elektromagnetne indukcije. Uređaj automatski meri i računa komponente i intenzitet vektora prirodne remanentne magnetizacije (Jelínek, 1966; 1973).

3. 2. Analiza podataka

Pri analizi dobijenih podataka primenjena su dva metodološka pristupa: kvalitativna analiza i kvantitativna analiza.

3. 2. 1. Kvalitativna analiza

Kvalitativna analiza podrazumeva obradu gravimetrijskih i geomagnetskih podataka (terestričkih i aeromagnetskih), primenu matematičkih transformacija nad ovim podacima u cilju definisanja rupturnog sklopa i položaja tela/uzročnika anomalija u horizontalnoj ravni na različitim dubinama. Pri definisanju rupturnog sklopa terena korišćeni su podaci dobijeni daljinskom detekcijom i podaci o strukturnom sklopu, koji su prikupljeni na terenu.

Kabinetski rad obuhvata statističku obradu svih prikupljenih podataka i analizu dobijenih rezultata laboratorijskih i terenskih istraživanja. Korišćene su standardne geostatističke metode za određivanje prostorne distribucije svojstava stena prisutnih na terenu. Gravimetrijski podaci (Bilibajkić i dr., 1979) obuhvataju podatke regionalnog premera („NIS Gazprom Neft“) na teritoriji Srbije i Makedonije. Gravimetrijski premer na teritoriji Grčke je sproveden u toku 1984. godine, a kasnije (1994-1996) je vršeno pugušćivanje merenja. Merenja je obavio Institut za rudarstvo i geologiju Republike Grčke (*Institute of the Geology and Mining Exploration-IGME*). Gravimetrijski podaci, koji pokrivaju područje severne Grčke, uključuju digitalizovanu kartu Bugeovih anomalija (Savvaidis et al., 2000) i kao takvi su korišćeni pri analizi gravimetrijskih podataka na području severne Grčke. Geomagnetski podaci obuhvataju podatke regionalnog premera Z komponente na teritoriji Srbije i Makedonije koji je sveden na epohu 1960.0. Aeromagnetski podaci obuhvataju podatke regionalnog aeromagnetskog ispitivanja Republike Srbije koja su vršena u više navrata. Prvi premer, fluksnim magnetometrom izvršen je 1967. godine, da bi posle pauze od 4 godine, aeromagnetska merenja bila nastavljena u periodu od 1972-1992 godine protonskim magnetometrom. Merenja su na teritoriji Srbije obuhvatila period od 1972-1980 godine. Detaljna visokoprecizna ispitivanja su vršena na manjim područjima u određenim oblastima (1976-1992). Zbirno, merenja u Srbiji, izvođena su preko 30 godina sa manjim i većim prekidima. Regionalna aeromagnetna ispitivanja su vršena pravcem leta SI-JZ, osim u području Vojvodine (S-J). Rastojanje među maršrutama je bilo 2 km, sa prosečnom visinom letelice od oko 500 m. Merena je totalna komponenta geomagnetnog polja Zemlje. Normalno geomagnetno polje je računato po formuli tadašnjeg Geomagnetskog instituta (Grocka) za epohu 1960.0. Na osnovu ovih ispitivanja urađene su aeromagnetske karte u različitim razmerama sa pratećim tumačima. Podaci sa digitalizovanih, publikovanih karata su korišćeni pri analizi aeromagnetskih podataka na teritoriji Srbije (Vukašinović, 2005). Tokom 1967. godine, ABEM (EM-Elektrisk Malmetning Company, Greece) sproveo je veliki broj aeromagnetskih istraživanja (totalna - T komponenta) u severnoj Grčkoj. Ovi podaci u vidu karata su publikovani u mnogobrojnim radovima (npr. Savvaidis et al., 2000; Stampolidis et al., 2000; Chailas et al., 2010, i drugi). Sveukupna geomagnetska merenja na teritoriji Grčke obuhvataju isključivo aeromagnetski premer, pa područje istraživanja, koje se nalazi u blizini

granice sa Makedonijom, nije pokriveno podacima. Ovo je verovatno posledica zabrane letenja u tom pograničnom području. Stoga su satelitski geomagnetski podaci na teritoriji Grčke korišćeni u cilju praćenja anomalija sa područja Makedonije, dalje na jug, kao i za proveru rezultata dobijenih na osnovu gravimetrijskih podataka, ali ne i prilikom kvalitativne i kvantitativne analize.

Podaci koji se mogu očitati sa geofizičkih karata, odražavaju ukupni uticaj svih geoloških objekata ispod Zemljine površine. Da bi se određeni geološki problemi rešili, potrebno je iz sumarnog polja izdvojiti anomalije, koje se odnose na pojedine geološke objekte koji su predmet proučavanja. Gravitaciono i geomagnetno polje, odnosno njihovi potencijali, definisani su matematički i stoje u odgovarajućem odnosu. Anomalije (bilo gravitacionog, bilo geomagnetnog polja) se podvrgavaju matematičkoj transformaciji, kako bi se dobili tačno određeni odzivi iz ukupnog signala, odnosno da bi se nepoželjni odzivi prigušili. U tom smislu može da se govori o uzročnicima anomalija, koji mogu biti regionalnog i lokalnog karaktera. Nekada zadatak može da zahteva isticanje lokalne strukture i tada se teži da se iz merenog signala otkloni ili maksimalno priguši regionalna komponenta anomalije. Nekada je, međutim, potrebno prigušiti lokalne uticaje, a maksimalno istaći regionalnu komponentu. Izgled anomalije u profilu i u planu ukazuje na dubinu i prostiranje uzročnika anomalije. Plići uzročnici imaju odziv anomalija sa manjim horizontalnim rasprostranjenjem, ali sa izraženim gradijentima, dok uzročnici na većim dubinama imaju anomalije sa širokim rasprostranjenjem i malim gradijentima.

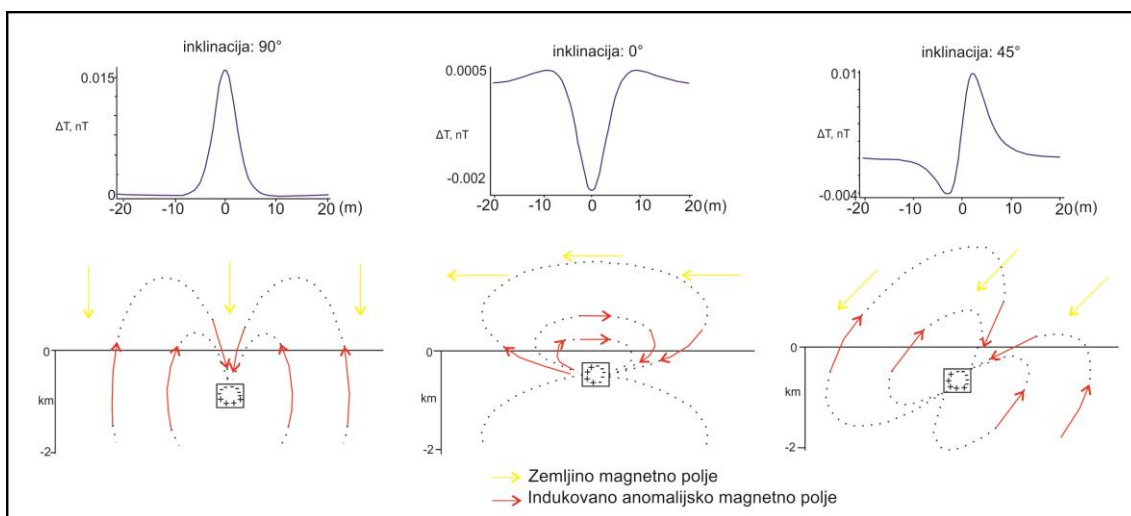
Primenom matematičkih transformacija ne mogu se dobiti nove informacije nego se ističu ili umanjuju pojedine karakteristike potencijalnih polja. Sve transformacije predstavljaju svojevrsno filtriranje sirovih podataka u domenu određenih frekvencija. Odabir transformacije, koja se primenjuje, je proces koji uključuje pre svega potrebu, tj. cilj istraživanja.

Nad gravimetrijskim podacima, odnosno, nad kartom Bugeovih anomalija (prilikom računanja vrednosti Bugeovih anomalija uzeto je srednja vrednost gustine stena na istražnom prostoru od $2,67 \text{ t/m}^3$), primenjene su sledeće matematičke transformacije: filtriranje Haningovim filterom, vertikalni izvod gravitacionog ubrzanja, produženje polja naviše i normalizovana standardna devijacija.

Nad geomagnetskim podacima primenjeni su sledeći postupci matematičkih transformacija: redukcija na pol, analitičko produženje polja naviše, horizontalni izvodi, vertikalni izvodi i ugao nagiba (izvod ugla nagiba).

3. 2. 1. 1. Ekscentričnost geomagnetskih anomalija

Merene vrednosti totalnog polja obuhvataju ambijentalnu, indukovanu i remanentnu magnetizaciju. Indukovana magnetizacija je proporcionalna intenzitetu i uglavnom paralelna sa ambijentalnim poljem. Intenzitet i pravac remanentne magnetizacije zavise od porekla magnetizacije kao i od ambijentalnog polja Zemlje u vreme kada je stvarana stena. Oblik i intenzitet geomagnetske anomalije zavisi od koncentracije prisutnih magnetičnih minerala u uzročniku, njegove geometrije i dubine, orijentacije magnetičnih minerala u odnosu na sever, položaja profila i inklinacije magnetnog polja Zemlje na lokalitetu gde se nalazi uzročnik (Slika 12). S obzirom da magnetno polje ima bipolarnu prirodu, geomagnetske anomalije, koje se nalaze na geografskim širinama različitim od magnetskih polova i ekvatora, ne nalaze se iznad izvora magnetizacije, pod uslovom da je namagnetisanje raspoređeno simetrično (Cooper et al., 2005).



Slika 12. Geomagnetska anomalija duž profila postavljenog u pravcu J-S pri različitim vrednostima inklinacija

Kako bi pojednostavili oblik magnetske anomalije i olakšali interpretaciju razvijeno je niz matematičkih postupaka na merenim podacima, od kojih je najpopularnija redukcija (svođenje) na pol (*eng. reduction to pole – RTP*), koja je i primenjena u ovom radu. Redukcijom na pol posmatrana magnetska anomalija transformiše se u anomaliju koja

bi bila izmerena da su magnetizacija tela i ambijentalno polje vertikalni. Za primenu ovog postupka nepohodno je da se poznaje pravac magnetizacije uzročnika, pri čemu se predpostavlja da je paralelan sa ambijentalnim poljem, što je tačno samo ako je remanentna magnetizacija zanemarljivo mala ili paralelna sa ambijentalnim (Baranov, 1957; Baranov and Naudy.; 1964; Cooper et al., 2005).

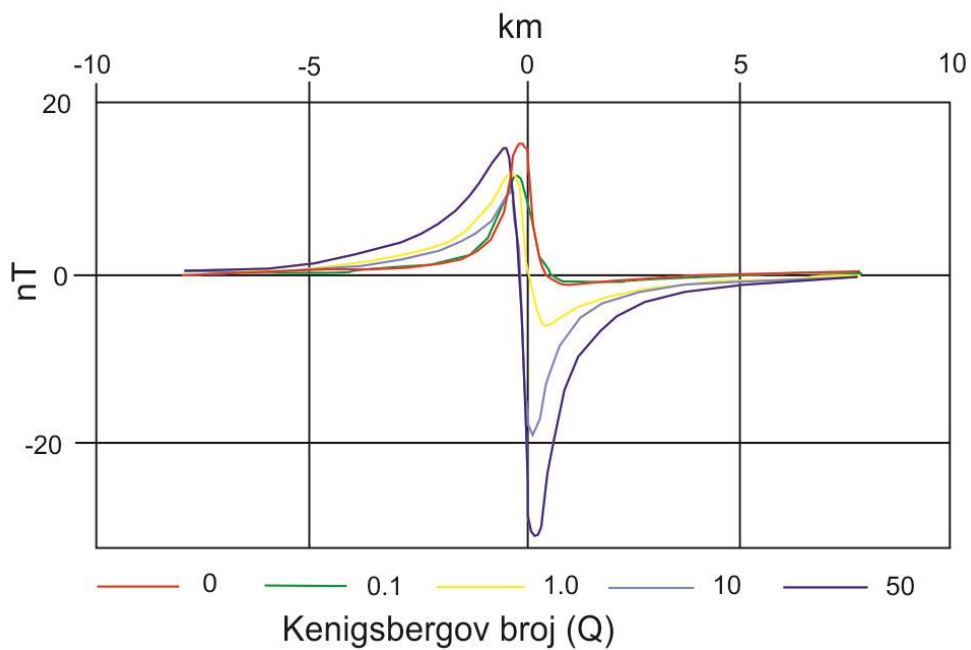
Prilikom magnetskih merenja iznad prostora okeanske kore utvrđeno je dominantno učešće remanentne magnetizacije, odnosno orijentacija magnetizacije uzročnika anomalija razlikuje se od pravca savremenog polja (Harrison, 1976). Takođe, u nekim slučajevima remanentna magnetizacija može imati veći intenzitet od indukovane magnetizacije. Uticaj remanentne (J_r) i indukovane (J_i) magnetizacije na totalnu magnetizaciju se može izraziti Kenigsbergerovim brojem (Q):

$$Q = J_r / J_i = J_r / \kappa \mathbf{H}$$

gde je κ - magnetska susceptibilnost a \mathbf{H} -ambijentalno (indukujuće) polje .

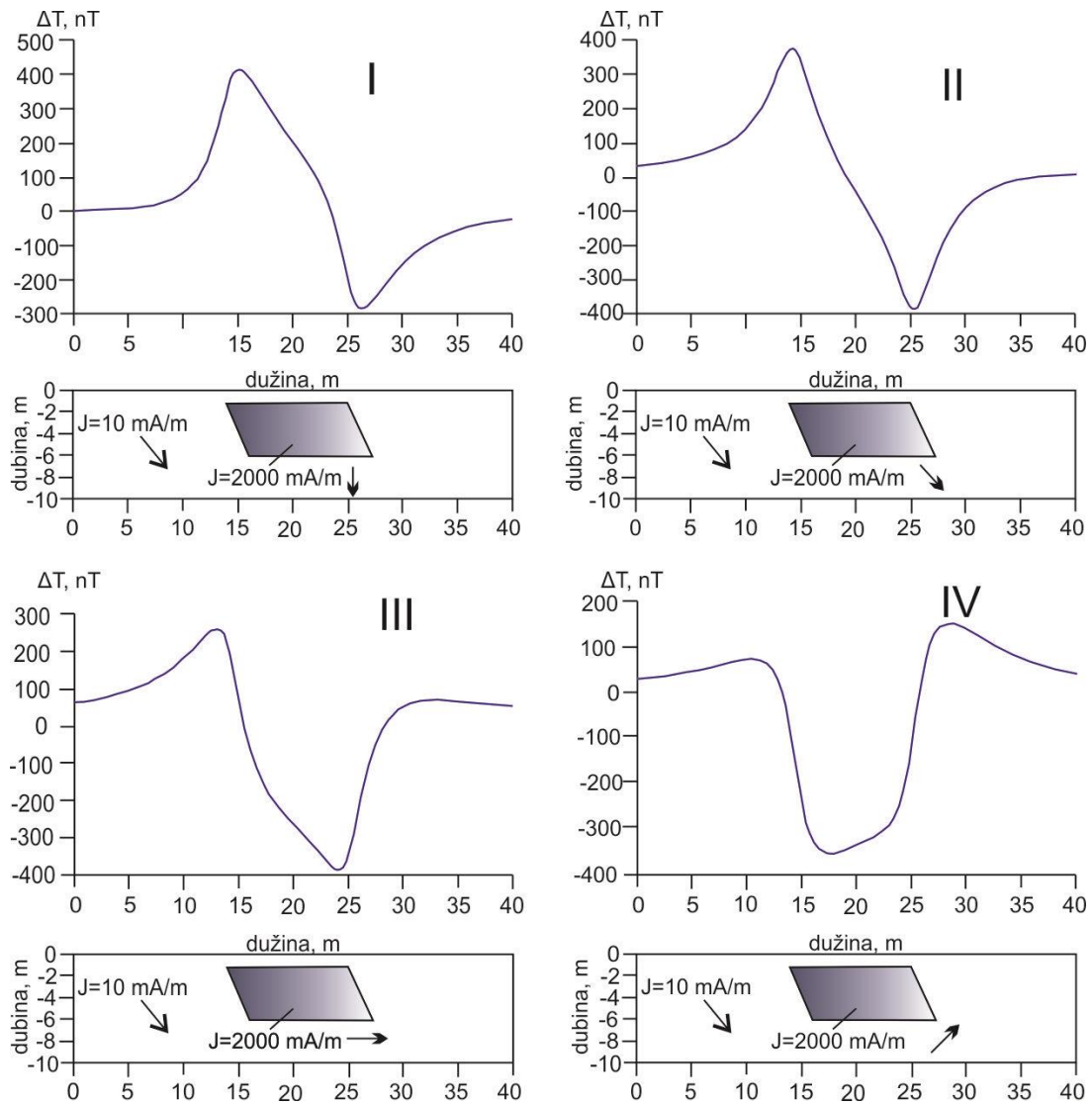
Kenigsbergov broj može imati vrednost veću i od 100 u slučaju stena formiranih na području sredine srednjookenskog grebena, kao i vrednost manju od 0.1 u slučaju sedimentnih stena.

Značaj Kenigsbergovog broja može se demonstrirati na pojednostavljenom modelu (Morris and Ugalde, 2007). Totalna magnetizacija predstavlja zbir indukovane magnetizacije ($D=0^\circ$, $I=75^\circ$ i $I_n=55000$ nT) i hipotetičke remanentne magnetizacije ($D=90^\circ$, $I=-15^\circ$). Kenigsbergov odnos postepeno se povećava od 0 do 100. Promenom vrednosti Kenigsbergovog odnosa, izgled anomalije se sistematski menja (Slika 13). Kako raste vrednost Kenigsbergovog broja, tako se vektor totalne magnetizacije pomera iz pravca vektora indukovane magnetizacije do pravca vektora remanentne magnetizacije. Vrednosti Kenigsbergovog broja utiču na izgled anomalije, kao i na intenzitet (Slika 13). U slučaju da nedostaju ili ukoliko se zanemare podaci o remanentnoj magnetizaciji, izgled anomalije mogao bi da ukaže na postojanje dajka sa većim padnim uglom iako je taj dajk u prirodi vertikalnog pada.

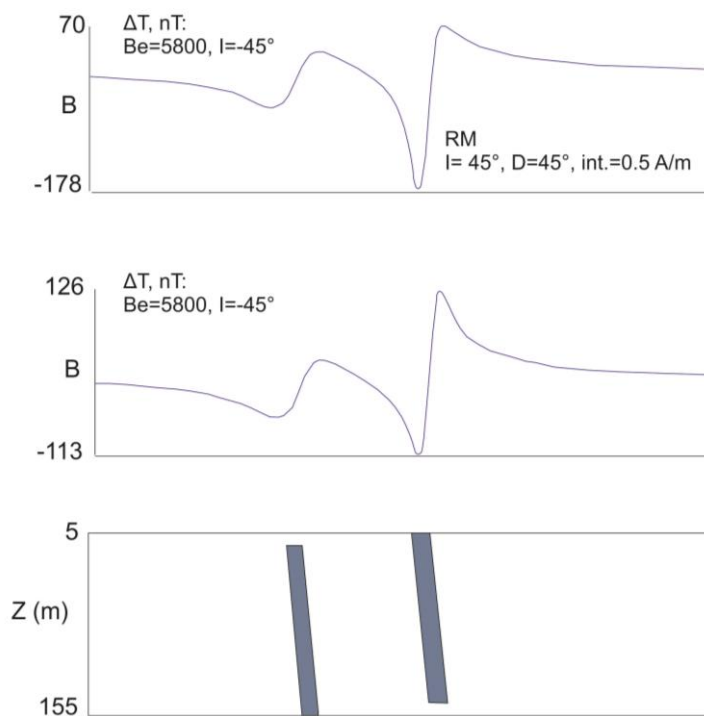


Slika 13. Uticaj različitih vrednosti Kenigsbergovog broja na izgled anomalije (modifikovano prema Morris and Ugalde, 2007)

Inklinacija remanentne magnetizacije ima veliki uticaj na izgled anomalije iznad uzročnika (Slika 14). Uticaj remanentne magnetizacije, odnosno inklinacije RM, kao što je rečeno, ne može se ukloniti postupkom redukcije na pol, pri čemu njena uloga u odzivu i obliku anomalije može biti značajna (Slika 14 i 15).



Slika 14. Izgled anomalije sa promenom vrednosti inklinacije RM: (I) 90° ; (II) 45° ; (III) 0° ; (IV) -45° , azimuth profila je 45° (modifikovano iz Eppelbaum, 2015)



Slika 15. Izgled anomalije iznad dva dajka, sa i bez prisustva remanetne magnetizacije

Morris and Ugalde (2007) smatraju da će vektor totalne magnetizacije zauzeti položaj indukovane magnetizacije, ukoliko je vrednost Kenigsbergovog odnosa manja od 0.1. Ukoliko je ovaj odnos veći od 1, smatra se da postoji uticaj remanetne magnetizacije, ali se može zanemariti, međutim, ukoliko je on veći od 10, može se smatrati da je remanetna magnetizacija dominantna u totalnoj magnetizaciji.

3. 2. 1. 2. Filtriranje

Filtriranje je predstavljeno težinskom funkcijom, odnosno funkcijom težinskih koeficijenata, $t(x,y)$. Na taj način filter $t(x,y)$, pomoću konvolucije uspostavlja odnos između anomalijске vrednosti odgovarajućeg polja $a(x,y)$ i filtriranih vrednosti $f_k(x,y)$:

$$f_k(x,y) = a(x,y) * t(x,y).$$

Postupak filtriranja se sprovodi u cilju otklanjanja smetnji i vrednosti koje „odskaku” (Starčević, 1991). Gravimetrijski podaci su filtrirani korišćenjem Haningovog filtera. Postoje dva tipa ovog filtera: jednodimenzionalni i dvodimenzionalni, zavisno od toga da li se filtriranje vrši duž profila ili po površi. Ovaj filter pripada filterima sa konačnim

impulsnim odzivom, koji koristi određene prozore za propuštanje signala. Prozori na osnovu svoje širine, amplitude i fazne karakteristike obezbeđuju da odziv sistema filtera bude konačan, sa linearnom faznom karakteristikom. Sam Haningov filter je zasnovan na principu konvolucije, tako da je filter definisan kao niz koeficijenata koji konvoluiraju sa nizom koji treba filtrirati. Širina filtera (korak) određuje frekvenciju koja će biti filtrirana. Moguće je menjati opseg filtriranja, tj. menjati korak filtriranja. Ukoliko se odabere uži opseg, on otklanja visoke učestalosti, dok odabirom širokog opsega dolazi do „peglanja/glačanja“ anomalija, tj. otklanjanja uticaja lokalnog karaktera, što dovodi do isticanja regionalnih karakteristika. S obzirom da je ispitivano područje površinski veliko, kao i da su u pitanju velike geotektonske jedinice, pri filtriranju izabran je Haningov filter sa širokim opsegom, kako bi se uklonili površinski uticaji, kao i uticaju manjih tela, koja nisu predmet istraživanja.

3. 2. 1. 3. Analitičko produženje polja naviše

Postupak analitičkog produženja polja zasnovan je na činjenici da se potencijali polja u određenoj ravni mogu odrediti u drugoj ravni. Produženje je moguće sprovesti ukoliko se za svaku tačku u horizontalnoj ravni zna vrednost polja. Kada se povećava rastojanje od uzročnika, njegov uticaj se smanjuje, a ukoliko se približava uzročniku, njegov uticaj se povećava. Na ovom principu je zasnovana primena produženja polja naviše, odnosno naniže. Ukoliko je uzročnik anomalija blizu površi terena ili na samoj površi terena, produženjem polja naviše, njegov uticaj će slabiti, dok produženjem polja naniže, njegov će se uticaj povećavati (Starčević, 1991). Neophodno je napomenuti da je pre postupka produženja polja naniže, neophodno sprovesti postupak produženja polja naviše, kako bi se umanjio uticaj uzročnika regionalnih anomalija. Produženje polja podrazumeva računanje sukcesivnih izvoda vertikalne komponente polja. Promena vrednosti vertikalnog gradijenta na određenoj visini računa se prema formuli:

$$H_z(x, y, \pm h) = \sum_{i=0}^n H_z(r_k) A_k$$

gde je A_k - koeficijent, sračunat za određene vrednosti poluprečnika radijusa - r_k i odgovarajuće vrednosti visina - h ; $H_z(r_k)$ vrednost vertikalne komponente polja na određenim krugovima radijusa r_k .

Kada se vrši produženje polja naviše, neophodno je poznavati realnu raspodelu gustine, odnosno susceptibilnosti i prevesti je u horizontalnu ravan. Produženje polja naviše je definisano formulom (Dean, 1958; Gubbins et al., 2007):

$$F=e - |k| z$$

gde je $|k| = 2\pi/\lambda$ talasni broj, λ talasna dužina, z nivo produženja.

U horizontalnoj ravni, gde je visina 0, stvara se novo polje gde se površinska raspodela uzima u vidu beskonačnog sloja određene debljine. Kao što je već rečeno, analitičkim produženjem polja naviše, udaljava se od uzročnika i eliminišu se uticaji lokalnih uzročnika anomalija, dok do izražaja dolaze regionalni uzročnici anomalija.

U ovom radu primenjeno je analitičko produženje polja naviše za gravimetrijske podatke i geomagnetske podatke za nivoe 500m, 1000m, 2000m, 3000m (Srbija), kao i na 5000 m na području Makedonije i Grčke (samo nad gravimetrijskim podacima).

3. 2. 1. 4. Vertikalni izvod gravitacionog ubrzanja

Izvod gravitacionog ubrzanja naglašava površinske anomalije na račun dubljih anomalija i veoma je dobar filter koji detektuje ivice uzročnika i naglašava površinske nepravilnosti. Rešavanjem problema izvoda bavili su se brojni autori (Butler, 1984). Izvod gravitacionog ubrzanja je računat sa ciljem definisanja zona vertikalnih kontakata između geoloških jedinica. Ovaj tip kontakta je uglavnom kontrolisan rupturama.

3. 2. 1. 5. Normalizovana standardna devijacija

Ova procedura je korišćena u cilju definisanja i vizuelizacije granica uzročnika anomalija (Cooper and Cowan, 2008). Normalizovana standardna devijacija (NSD) se računa po određenim prozorima, s tim što su manji prozori osetljiviji na šum od većih prozora. Sam postupak se bazira na odnosima standardne devijacije izvoda polja. Svako polje po kome se računa, suštinski predstavlja vrednost lokalnih promena. Jednačina po kojoj se vrši računanje normalizovane standardne devijacije je:

$$NSTD= [\sigma (\partial f/\partial z)] / [\sigma (\partial f/\partial x) + \sigma (\partial f/\partial y) + \sigma (\partial f/\partial z)]$$

gde je f intenzitet polja (magnetnog ili gravitacionog), $\partial f/\partial z$, $\partial f/\partial x$, $\partial f/\partial y$, $\partial f/\partial z$ su izvodi duž pravaca, a σ je standardna devijacija.

3. 2. 1. 6. Redukcija na pol

Interpretacija geomagnetskih anomalija je komplikovan proces s obzirom na dipolarnu prirodu magnetnog polja, superpoziciju više magnetskih uzročnika i prisustvo veštačkih (antropogenih) smetnji.

Magnetska anomalija ima asimetričan oblik (bez obzira što je namagnetisanje raspoređeno simetrično) kada se magnetizacija javlja van magnetskog pola i ekvatora, tj. kada je uzročnik anomalije smešten na bilo kom drugom mestu, osim na magnetskom polu i ekvatoru. Iz tog razloga je uvedena redukcija na pol ili ekvator.

Kenigsbergov broj je računat na osnovu podataka merenih vrednosti susceptibilnosti i remanentne magnetizacije. Na prostoru koji je obuhvaćen ovim istraživanjem, opravdano je koristiti postupak redukcije na pol, s obzirom da Q ima maksimalnu vrednost 3, te se može smatrati da je uticaj remanentne magnetizacije na odziv anomalije postoji, ali je jako mali, odnosno zanemarljiv.

Frekventni domen operator je:

$$A'(u,v) = A(u,v) / (\sin I + i \cos I \sin(D+\alpha))^2$$

gde je $A(u, v)$ amplituda na frekveciji (u,v) , I i D su inklinacija i deklinacija, a α je $\tan^{-1}(v/u)$.

Primena ove metode u frekventnom domenu uzrokuje određene probleme. Ne daje dobre rezultate na magnetskim širinama koje su manje od 20° (Li, 2008), kao i u slučaju da telo ima remanentnu magnetizaciju viskog intenziteta. Da bi se primenila ova metoda, implementira se frekventni domen, što je neophodno da bi inklinacija i deklinacija bile fiksne na celom istraživanom području.

Cooper and Cowan (2005) koriste Tejlorove serije sa ciljem da se razmotre varijacije geomagnetskih parametara na istraživanom području primenom ovog filtera. Operator

redukcije na pol u polarnom koordinarnom sistemu može da se izrazi kao (Baranov, 1957; Mendonça and Silva, 1993; Cooper and Cowan, 2005; Li, 2008):

$$L(\theta) = I / [\sin(I) + i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2$$

gde je θ talasni broj, I i D su inklinacija i deklinacija.

U praksi ovaj operator postaje nestabilan, odnosno, približava se beskonačnosti, kada je apsolutna vrednost magnetne inklinacije (I) mala, tj. približava se nuli i kada je $D - \theta$ blizu $\pm \pi/2$. Odavde proizilazi da se imaginarni deo u izrazu približava nuli (Li, 2008).

Ovaj metod je primenljiv u prostornom domenu i uključuje računanje prvih i drugih izvoda standardne redukcije na pol, za inklinacije i deklinacije koje pri višim izvodima imaju smetnje. Sam postupak daje najbolje rezultate kada su širine veće, dok pri manjim širinama daje lošije rezultate.

Lu et al. (2003) su redukovali podatke na pol n i m puta, gde baza podataka sadrži [n m] podataka.

3. 2. 1. 7. Ugao nagiba (izvod ugla nagiba) i ukupni horizontalni izvod ugla nagiba

Ove transformacije su primenjene u cilju vizelizacije granica uzročnika anomalija. Postupak ugao nagiba (Slika 16) omogućava definisanje ivica uzročnika anomalija polja i dobijanje informacija o njihovom horizontalnom pružanju (Miller and Singh, 1994; Verduzko et al., 2004; Salem et al., 2007; 2008).

Magnetizacija stena je vektor koji se sastoji od remanentne i indukovane komponente. Prisustvo remanentne magnetizacije može da utiče na oblik odgovora magnetnog polja i za posledicu može imati lažne izvode ukoliko se pretpostavi da je prisutna samo indukovana komponenta.

Izvod ugla nagiba (TDR) koristi vrednost ukupnog horizontalnog izvoda (THDR), a definisan je kao:

$$TDR = \tan^{-1}[VDI/ THDR]$$

gde su VDR i THDRI prvi vertikalni i ukupni horizontalni izvodi (Miller and Singh, 1994; Verduzko et al., 2004) . VDR može biti pozitivan i negativan, dok je THDR uvek pozitivan.

Po profilima u pravcu x ose

$$TDR = [\partial T / (\partial x)^2]^{1/2}$$

a za celu mrežu

$$TDR = [(\partial T / \partial x)^2 + (\partial T / \partial y)^2]^{1/2}.$$

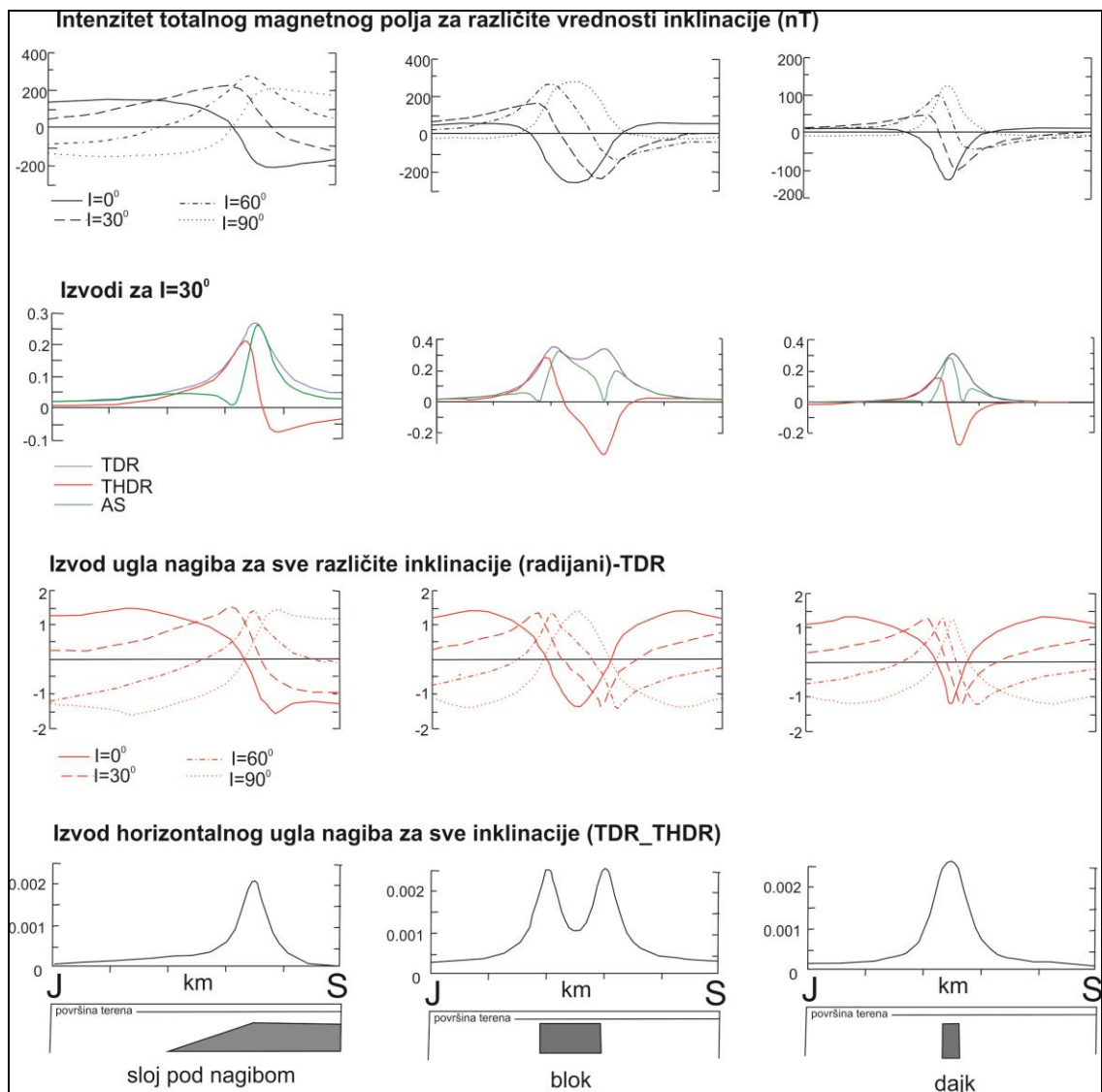
S obzirom na prirodu *arctan* funkcije, sve amplitude su vezane za opseg između $+\pi/2$ i $-\pi/2$ (odnosno $+90^\circ$ i -90°) bez obzira na amplitude TDR i VDR. Ova činjenica omogućava funkciji da ujednači amplitudni odziv totalnog magnetnog polja.

Prostorni položaj ivica uzročnika anomalija u horizontalnoj ravni može da se odredi korišćenjem izolineri sa vrednošću 0, dok se dubina uzročnika određuje kao rastojanje između izolineri $+45^\circ$ i -45° ili njihovih srednjih vrednosti (Salem et al., 2007).

Ugao nagiba i izvod ugla nagiba (Slika 16) imaju pozitivne vrednosti iznad uzročnika (koji izaziva pozitivnu anomaliju), negativne vrednosti van uzročnika, dok nula vrednost imaju iznad ili blizu granice uzročnika, gde je vertikalni izvod jednak nuli, a horizontalni izvod maksimalan (Miller and Singh, 1994; Cooper and Cowan 2006).

Definisanje uzročnika anomalija može da se postigne primenom postupka ukupni horizontalni izvod ugla nagiba (TDR_THDR), koji je za celu mrežu, odnosno, površ, definisan kao:

$$TDR_THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial TDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial TDR}{\partial y}\right)^2}$$



Slika 16. Teorijski odziv magnetskih anomalija iznad profila sa različitim uzročnicima anomalija (modifikovano iz Verduzco et al., 2004)

3. 2. 2. Kvantitativna analiza

Kvantitativna analiza obuhvata 2D modelovanje duž profila postavljenih upravno na pružanje Istočne vardarske zone. Na osnovu 2D modela, kreirani su pseudo 3D modeli. Kvantitativna analiza uključuje i sve rezultate dobijene prethodno sprovedenom kvalitativnom analizom. Specifičnost, odnosno prednost, u ovom modelovanju jeste što

su u njega uključeni podaci dobijeni geofizičkim merenjima na uzorcima stenskog materijala ofiolita IVZ, koji su direktno uzorkovani na terenu.

Bilo je neophodno uključiti sve vrednosti, gustine, susceptibilnosti, inklinacije i deklinacije u model. Na taj način model je zasnovan na konkretnim podacima o stenama, a ne na referentnim vrednostima, čime se dobija znatno pouzdaniji geofizičko-geološki model IVZ i preciznije su definisane granice IVZ sa susednim geotektonskim jedinicama.

Proces modelovanja sproveden je korišćenjem softverskog paketa "Oasis montaj", u okviru kojeg se nalazi program "GM-SYS", koji omogućava modelovanje geofizičkih podataka. Pri modelovanju su dostupne anomalije i na osnovu položaja i izgleda anomalija, pretpostavljaju se položaj i dubina uzročnika anomalija. "GM-SYS" računa odziv geološkog modela heterogenog karaktera. Osim modula za gravimetrijsko i geomagnetsko računanje odziva, program poseduje i modul za seizmički odziv. U ovom radu korišćena su samo prva dva modula, jer seizmički podaci (profili) nisu bili dostupni u toku izrade ove disertacije.

Pre početka modelovanja, neophodno je uneti relevantne parametre za epohu na koju su svedena merenja (inklinacija, deklinacija i intenzitet magnetnog polja). Modelovanje se vrši po blokovima, tako da svaki blok predstavlja određenu geološku celinu (litostratigrafsku, geotektonsku i dr). Svaki od tih blokova sadrži, tj. svakome se zadaje određena vrednost gustine, susceptibilnosti, remanentne magnetizacije, zatim se računa odziv takvih blokova i koliko taj odziv odstupa od merenih vrednosti. Princip je da se greška svede na najmanji mogući nivo (teorijski na nulu).

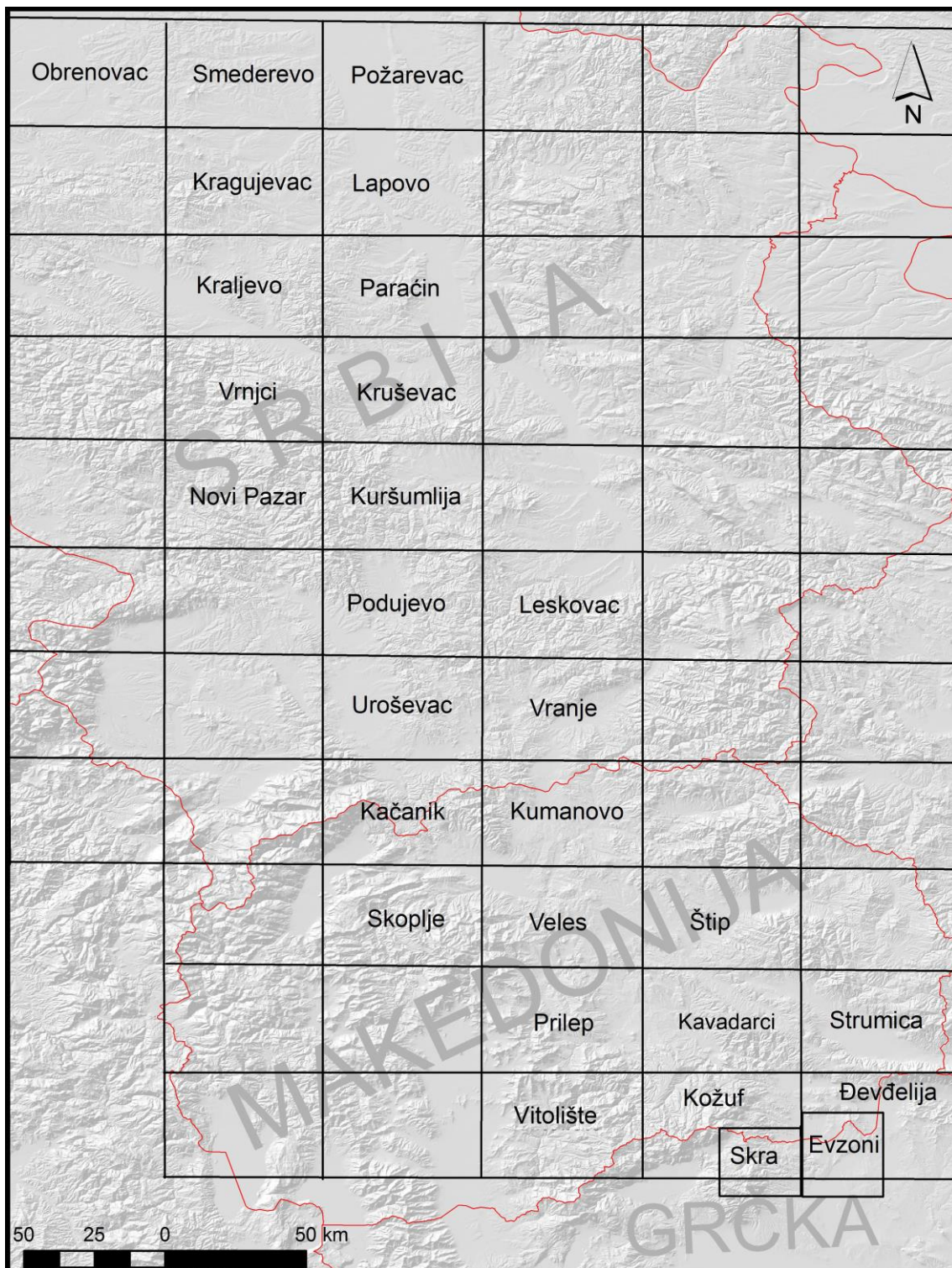
Za potrebe modelovanja, korišćene su karte Bugeovih anomalija i geomagnetske karte redukovane na pol.

2D modelovanje vršeno je duž 7 profila koji su postavljeni upravno na pružanje Istočne vardarske zone, tako da ulaze u SMM. Svaka uža oblast istraživanja je pokrivena sa po 2 ova profila, osim na teritoriji Grčke gde je postavljen jedan profil. Postavljena su i 3 kontrolna profila, na svakom užem području po jedan, tako da presecaju dva upravna.

Kao osnova za površinsko lociranje geoloških jedinica i njihove prostorne distribucije korišćene su Osnovne geološke karte (OGK) za teritoriju Srbije (listovi: Kragujevac, Kraljevo, Kruševac, Paraćin, Kuršumlija, Podujevo) i Makedonije (listovi: Veles, Štip, Prilep, Kavadarci, Vitolište, Kožuf, Gevgelija, Kajmakčalan), kao i radne karte razmere 1:25000, dok su za područje severne Grčke korišćene OGK Grčke u razmeri 1 : 50000 (listovi: Evzoni i Skra). Za utvrđivanje raseda i graničnih površi, korišćeni su rezultati dobijeni daljinskom detekcijom, terenskim osmatranjima i rasedi kartirani na OGK (Slika 17).

Kao što je ranije rečeno, merene i računate vrednosti fizičkih svojstava (gustina, susceptibilnost i dr.) su uključene u model. U delovima gde su nedostajali podaci, kada su u pitanju formacije na većim dubinama, preuzete su srednje referentne vrednosti iz literature (Telford et al., 1990) i označene su sa ** na modelima. Sve geološke jedinice, koje su imale slične vrednosti fizičkih parametara, a ukoliko su pripadale istoj formaciji ili tipu stena, objedinjene su pri modelovanju. Ovo znači da npr. nisu odvajani miocenski pesak, laporci i krečnjaci, već je sve modelovano kao jedinstven blok. Isto se odnosi i na druge jedinice.

Na osnovu dobijenih 2D modela, transformisanih karata u horizontalnoj ravni, putem interpolacije vrednosti na različitim dubinama i povezivanjem granica uzročnika anomalija na različitim dubinama kreiran je pseudo 3D model. Ovo nije pravi 3D model, jer nije vršeno direktno 3D modelovanje, već je rađena 3D interpretacija na osnovu svih dostupnih podataka.



Slika 17. Raspored OGK SFRJ, 1:100000 i OGK Grčke, 1:50000 listova na istraživanom području

4. REZULTATI

4.1. Rezultati laboratorijske analize

Rezultati obuhvataju podatke dobijene laboratorijskim merenjima fizičkim svojstava ofiolita, kao i stenskih jedinica u njihovoj okolini. Merene su vrednosti magnetske susceptibilnosti, intenziteta prirodne remanentne magnetizacije, inklinacije, deklinacije, i izvršene su odredbe gustine stena. Svi rezultati laboratorijske analize su prikazani u Tabeli 2. U tabeli su prikazane oznake svih uzoraka s tim da je iz jedog odlomka izdvojeno više uzoraka i takvi uzorci su označeni oznakom glavnog odlomka/broj uzorka, npr. MAK 12/3 ili MAK12/3a.

Tabela 2. Magnetski i gravimetrijski parametri/svojstva stena (oznaka uzorka, tip stena, koordinate u Gaus-Krigeru - zona 7, NRM - prirodna remanentna magnetizacija, D - deklinacija, I - inklinacija (+/-; pozitivan/negativan polaritet NRM), R-intenzitet NRM, k - magnetska susceptibilnost i σ - gustina prilikom modelovanja: ¹ SMM, ² ofioliti, ³ kredni sed., ⁴ jurski sed., ⁵ granitoidi)

br	oznaka	stena	koordinate		NRM			k	σ
			x	y	D °	I °	R (nT)	SI 10 ⁻⁶	SI (t/m ³)
1	¹ KG-30/1	mikašist	7505602	4889429	342	78	2.020	/	2.66
2	¹ KG-30/2	mikašist	7505602	4889429	70	5	2.150	227	2.763
3	² KG-31	dijabaz	7496139	4869112	252	25	4.670	495	2.956
4	² KG-32a	dijabaz	7496151	4869086	358	-73	49.6	1220	3.008
5	² KG-32b	dijabaz	7496151	4869086	331	-69	54.000	/	3.015
6	² KG-33	dijabaz	7496146	4868887	30	66	6.190	485	2.754
7	² KG-34/1	dijabazni dajk	7498823	4860448	282	50	207.00	1920	3.289
8	² KG-34/2	dijabazni dajk	7498823	4860448	301	59	282.00	3060	2.974
9	³ KG-35/1	fliš	7498457	4860572	72	41	0.434	273	2.61
10	³ KG-35/2	fliš	7498457	4860572	111	62	0.346	277	2.539

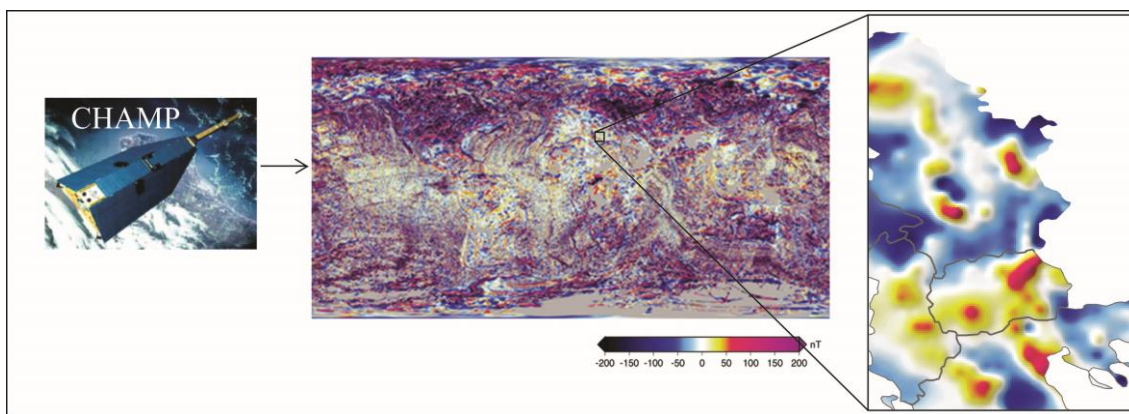
br	oznaka	stena	koordinate		NRM			k	σ
11	¹ KG-36/1	mikašist	7501946	4861100	170	-15	0.807	216	2.90
12	¹ KG-36/2	mikašist	7501946	4861100	242	1	0.356	212	2.793
13	¹ KG-37	gnajs	7502385	4860779	14	60	0.476	281	2.902
14	⁴ KG-38/1a	krečnjak	7503841	4856252	306	40	0.119	-8.9	2.765
15	⁴ KG-38/1b	krečnjak	7503841	4856252	335	56	0.047	-9.1	2.884
16	⁴ KG-38/2a	krečnjak	7503841	4856252	332	3	0.019	-9.7	2.916
17	⁴ KG-38/2b	krečnjak	7503841	4856252	341	52	0.027	-7.2	2.776
18	³ KU-39/1	peščar	7514136	4783345	126	-6	0.424	172	2.757
19	³ KU-39/2	perščar	7514136	4783345	32	65	0.274	171	2.795
20	² KU-40/1	gabro	7515028	4782671	290	25	43.5	944	2.867
21	² KU-40/2	gabro	7515028	4782671	4	29	58.3	662	2.911
22	⁵ KU-41/1	granitoidi	7518208	4780990	256	36	3.140	87	2.617
23	⁵ KU-41/2	granitoidi	7518208	4780990	352	39	0.977	81.8	2.687
24	² KU-42	pilou lave	7519443	4779771	355	-38	3.510	567	2.946
25	² KU-43	dijabaz	7519371	4779812	181	49	79.4	6300	2.948
26	³ KU-44/1a	fliš	7524817	4777990	277	-21	0.683	142	2.733
27	³ KU-44/1b	fliš	7524817	4777990	280	-32	0.729	175	2.706
28	³ KU-44/2a	fliš	7524817	4777990	249	-17	0.474	148	2.701
29	³ KU-44/2b	fliš	7524817	4777990	260	-36	0.207	162	2.71
30	¹ KU-45	peščar	7518881	4783987	/	/	/	31.30	2.669
31	¹ KU-46	peščar	7518868	4784028	87	43	0.241	45.5	2.647

br	oznaka	stena	koordinate		NRM			k	σ
32	³ MAK-1/1A	krečnjak	7557527	4631466	130	36	0.0002	-4.44	2.363
33	³ MAK-1/1B	krečnjak	7557527	4631466	91	43	0.0002	-3.11	2.425
34	² MAK-2/1	peridotit	7557462	4631422	111	36	2.8270	29360.00	2.931
35	² MAK-2/2	peridotit	7557462	4631422	141	30	3.6060	38780.00	2.837
36	² MAK-3/1	gabro	7558875	4627615	243	66	0.0012	596.60	3.035
37	² MAK-3/2	gabro	7558875	4627615	229	72	0.0244	673.20	3.086
38	² MAK-4	pilou plave	7606614	4585861	132	87	0.6590	20720.00	2.796
39	⁴ MAK-5/1	krečnjak	7605512	4585151	348	62	0.0001	-9.44	2.907
40	⁴ MAK-5/2	krečnjak	7605512	4585151	320	44	0.0001	-7.93	2.708
41	⁴ MAK-5/3	krečnjak	7605512	4585151	241	66	0.0000	-9.49	2.848
42	² MAK-6/1	peridotit	7633212	4576118	273	-21	1.4020	74010.00	2.338
43	² MAK-6/2	peridotit	7633212	4576118	163	-68	0.7758	75990.00	2.320
44	⁴ MAK-6A	krečnjak	7598939	4602523	337	32	0.0039	159.90	2.264
45	¹ MAK-7/1a	metariolit	7636788	4586609	354	38	0.0333	162.30	2.352
46	¹ MAK-7/1b	metariolit	7636788	4586609	354	31	0.0341	159.50	2.307
47	¹ MAK-8	škrljac	7634756	4583642	86	12	0.0078	598.40	2.660
48	¹ MAK-9	metapeščar	7633772	4578967	52	50	0.0003	159.60	2.878
49	² MAK-10	pilou lave	7621175	4578687	93	47	0.1925	7648.00	2.794
50	² MAK-11/1a	dijabazni dajk	7619943	4580232	96	68	0.6590	29470.00	2.812
51	² MAK-11/1b	dijabazni dajk	7619943	4580232	109	68	0.5715	29820.00	3.038
52	² MAK-11/2a	dijabazni dajk	7619943	4580232	96	80	0.4527	25110.00	3.023
53	¹ MAK-21	gnajs	7608584	4561564	/	/	/	33.35	2.587

br	oznaka	stena	koordinate		NRM			k	σ
54	² MAK-22/1a	kumulatni gabro	7612348	4560205	51	49	0.0037	376.40	2.753
55	² MAK-22/1b	kumulatni gabro	7612348	4560205	69	51	0.0025	392.30	2.827
56	² MAK-23	dijabaz	7616900	4559367	292	-4	0.3579	1199.00	2.600
57	² MAK-24	dijabaz	7619549	4580728	154	19	0.5270	29750.00	2.464
58	⁵ MAK-25/1	granit	7598552	4621882	358	-55	0.0112	259.80	2.458
59	⁵ MAK-25/2	granit	7598552	4621882	207	-64	0.0088	182.70	2.704
60	² GR-12	dijabaz	7631398	4552760	15	57	0.6574	12770.00	2.722
61	⁵ GR-13	granit	7625390	4549655	/	/	/	8518.00	2.885
62	² GR-14	dijabaz	7621494	4550642	8	79	0.4752	32440.00	2.958
63	⁴ GR-15	keratofir (T?)	7616468	4551375	148	-2	0.0002	74850.00	2.584
64	² GR-16	gabro	7616552	4552339	50	67	0.0027	266.60	2.845
65	² GR-17	gabro	7617630	4551016	112	76	0.0028	1016.00	3.276
66	⁴ GR-18/1	krečnjak T	7638160	4549207	310	4	0.0000	3.18	2.959
67	⁴ GR-18/2a	krečnjak T	7638160	4549207	104	-25	0.0000	0.34	3.111
68	⁴ GR-18/2b	krečnjak T	7638160	4549207	44	53	0.0007	3.13	3.012
69	¹ GR-19/1	gnajs	7637809	4549066	359	43	0.5155	20480.00	2.611
70	¹ GR-19a	gnajs	7637809	4549066	/	/	/	1741.00	2.499
71	¹ GR-20	amfib. gnajs	7667135	4561721	241	55	0.0761	603.10	2.774

4. 2. Rezultati analize geofizičkih podataka

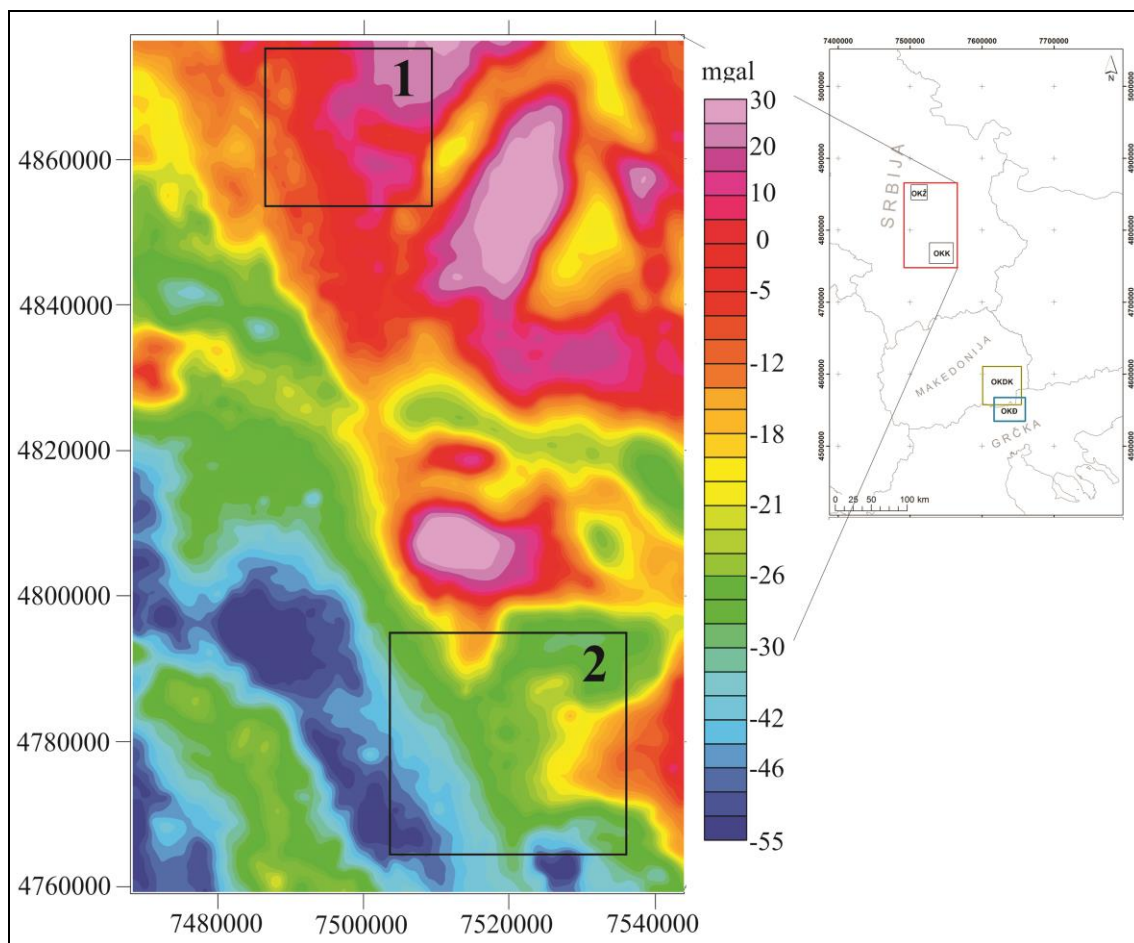
Područja tretirana geofizičkim metodama se zbog razlike u kvalitetu podataka, merenja i dostupnosti, moraju podeliti na tri oblasti po granicama država. Tako da su ovde zasebno prikazana područja Srbije, Makedonije i Grčke. Rezultati analize globalnih podataka sa CHAMP satelita (Slika 18) obuhvataju izdvajanje zona od interesa, tj. izdvajanje dominantnih anomalija na regionalnom nivou. Ovi podaci su poslužili kao osnova za lokalna istraživanja.



Slika 18. Podaci dobijeni sa satelita CHAMP (levo - satelit CHAMP, u sredini - Vertikalne komponente polja kore - MF6 model, desno područje istraživanja)

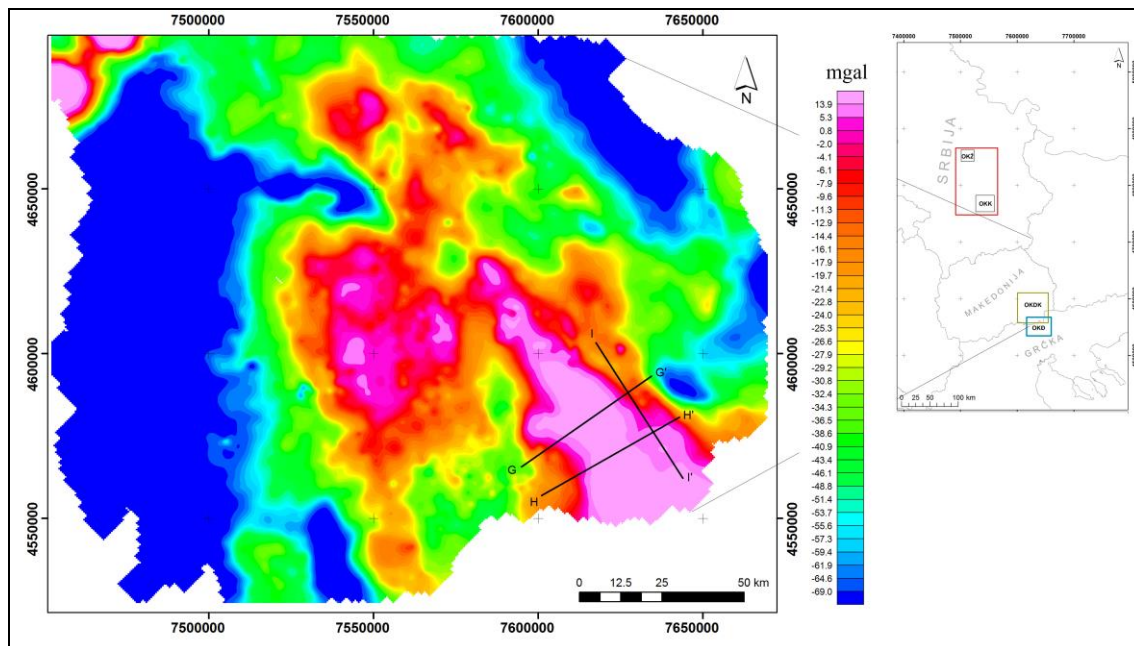
Na području Srbije srednja gustina gravimetrijskih tačaka merenja je 1,4 tačka na km². Karta Bugeovih anomalija je prikazana na Slici 19. Anomalije su računane sa srednjom vrednošću gustine od 2,67 t/m³. Vrednosti Bugeovih anomalija na ovom području se kreću od -55 do 30 mgal (u SI sistemu: 1 mgal= 10⁻⁵ m/s²). Anomalije izdužene u pravcu SSZ-JJI ukazuju na prisustvo velikih linearnih struktura, koje generalno prate pružanje IVZ i ograničavaju je sa obe strane. Nagle promene vrednosti anomalija sugerišu da je kontakt između susednih jedinica vertikalna ili subvertikalna.

Na području Makedonije srednja gustina gravimetrijskih tačaka merenja je 1,7 tačaka na km². Karta Bugeovih anomalija je prikazana na Slici 20. Vrednosti Bugeovih anomalija na ovom području kreću se od -70 do 14 mgal. Anomalije su i na ovom području izdužene u pravcu SSZ-JJI i generalno prate pružanje IVZ i ograničavaju je sa obe strane.



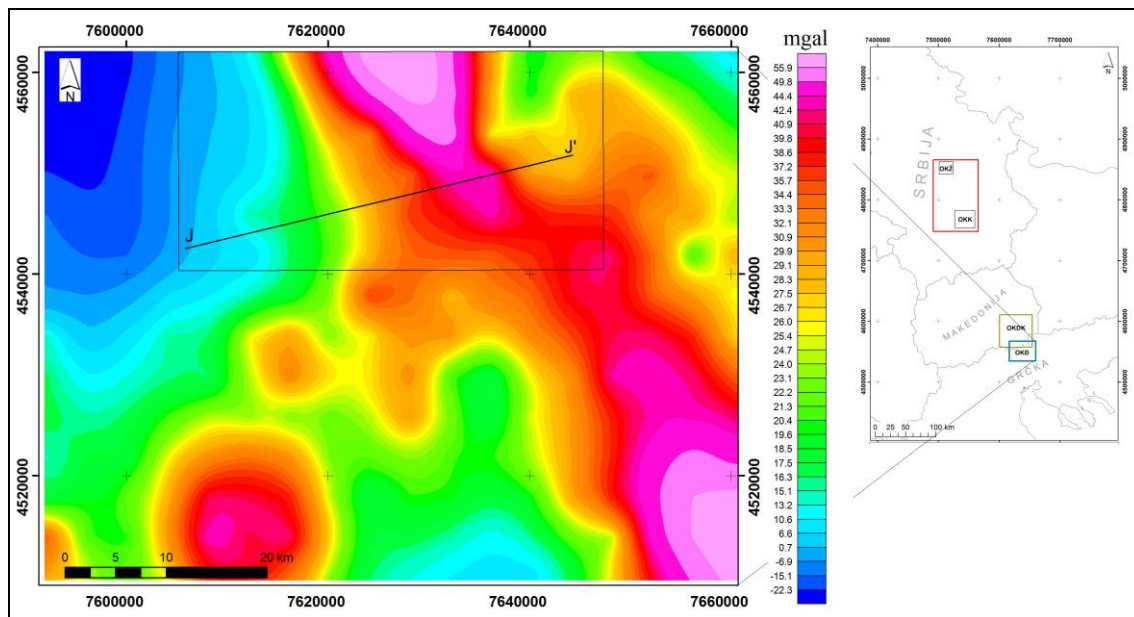
Slika 19. Karta Bugeovih anomalija (pravougaonici pokazuju pozicije istražnih prostora Ždraljice /1/ i Kuršumlije /2/)

Nad kartom Bugeovih anomalija primenjen je Haningov filter u cilju ublažavanja anomalija (Slika 20). Na ovoj karti su do izražaja došle anomalije na području IVZ i bolje je definisana granica IVZ i SMM na istoku, kao i zapadna granica IVZ prema Kopaonik jedinici (KJ). IVZ se karakteriše visokim vrednostima anomalija, dok su susedne geotektonske jedinice jasno odvojene naglim prelazima i niskim vrednostima.



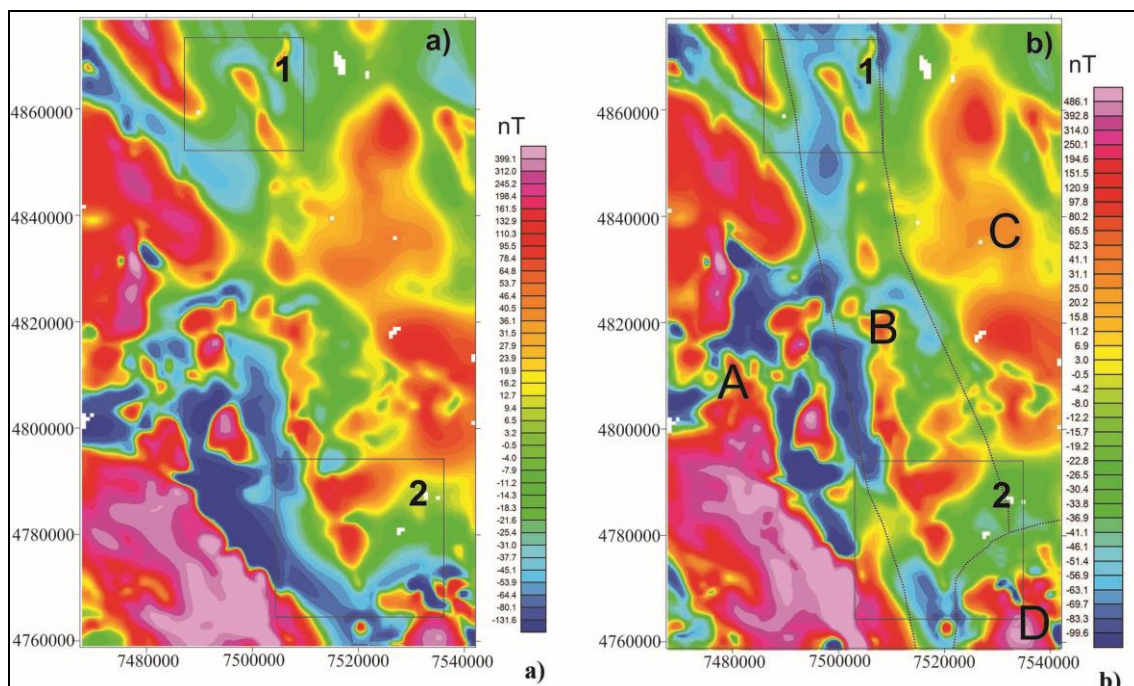
Slika 20. Karta Bugeovih anomalija na prostoru Makedonije; crnim linijama pokazane su pozicije profila (GG', HH' i II')

Na području Grčke korišćena je digitalizovana karta Bugeovih anomalija (Tassis et al., 2013), izrađena sa gridom od 250 m (Slika 21). Ovde ne možemo govoriti o gustini tačaka, jer nisu bili dostupni originalni podaci. Vrednosti Bugeovih anomalija na ovom području iznose od -22 do 55 mgal. Karte nisu spojene zbog različitih datuma (nivo na koji su svedene merene vrednosti). Anomalije koje se uočavaju na karti, izdužene su u pravcu S-J i SSZ-JJI. Izdvajaju se tri karakteristična područja. Zapadni deo koji ima opseg anomalija od -22 do 20 mgal, centralni deo koji može da se prati u pravcu SSZ-JJI i obuhvata jugoistočni deo karte (IVZ, odnosno ofioliti Evzoni i Skra) sa opsegom anomalija od 25 do 55 mgal i severoistočni deo (SMM, odnosno Cirkum-Rodopi) sa opsegom anomalija od 0 do 25 mgal.



Slika 21. Karta Bugeovih anomalija na području Grčke, sa naznačenim profilom (JJ')

Karta totalnog magnetnog polja na području Srbije prikazana je na Slici 22a, dok je karta totalnog magnetnog polja redukovano na pol prikazana na Slici 22b. Postupak redukcije na pol, primenjen je na digitalizovanim aeromagnetskim podacima, čije anomalije imaju opseg od -98 do 500 nT. Na geomagnetskoj karti (Slika 22b) izdvajaju se tri područja izdužena u pravcu SZ-JI sa visokim pozitivnim vrednostima anomalija. Prvo područje (A) je pozicionirano u zapadnom delu karte i može se povezati sa ofiolitima Zapadne vardarske zone. Opseg dominantnih anomalija je od -10 do 450 nT. Drugo područje (B) izdvojeno u centralnom delu karte, sa opsegom anomalija od -30 do 350 nT, odgovara položaju IVZ. Nagle promene vrednosti anomalija mogu da ukažu da su granice IVZ tektonskog karaktera, tj. rasedi. Ovo je posebno uočljivo na području Ždraljice (Slika 22b).

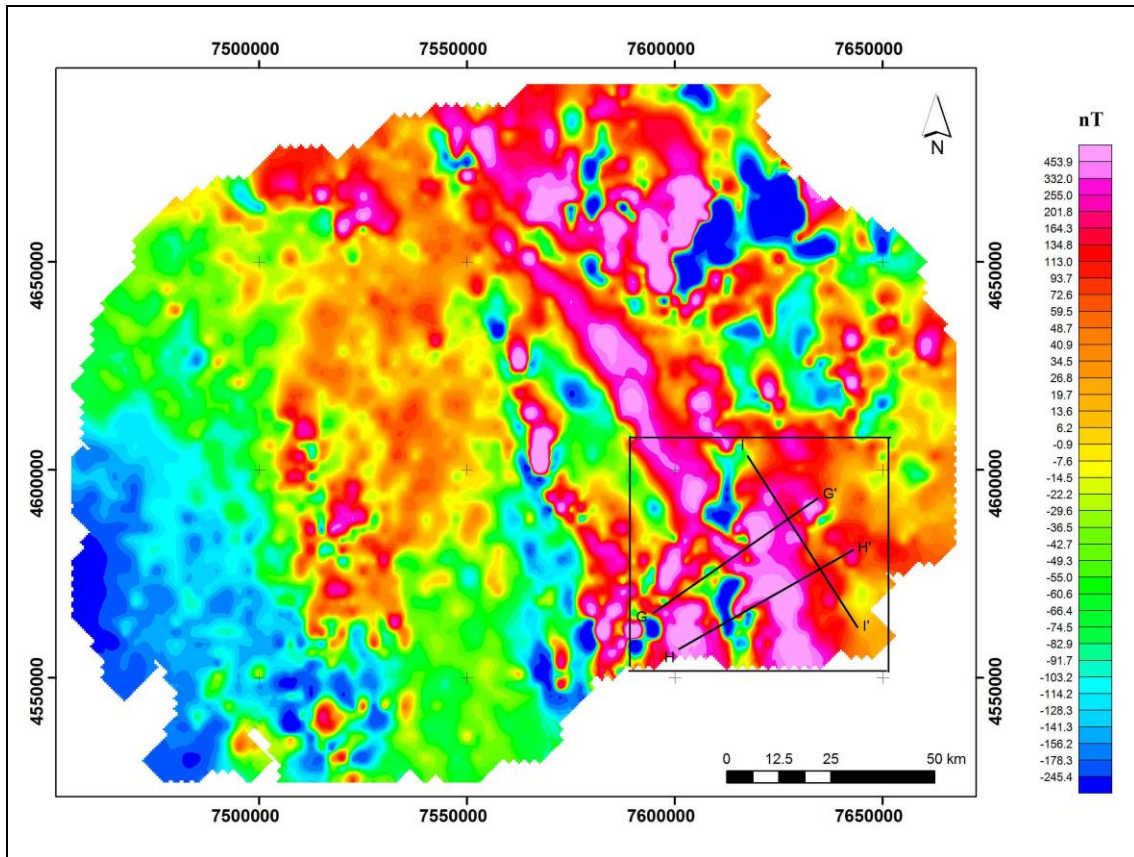


Slika 22. a) Karta totalnog polja na području Srbije, b) Karta totalnog polja redukovanog na pol na području Srbije; (poligoni pokazuju područja Ždraljice /1/ i Kuršumlije /2/); položaj prikazan na Slici 19

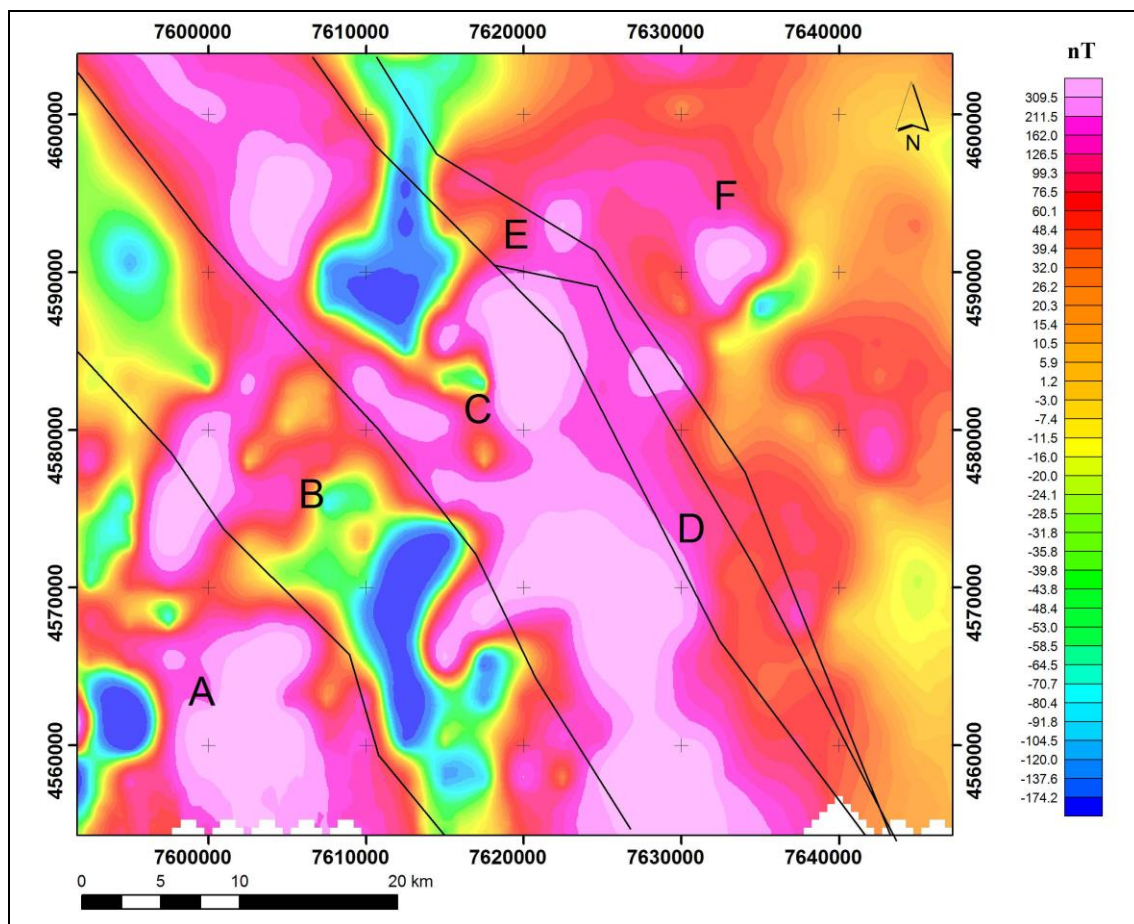
Treća zona (C), sa anomalijama visoke vrednosti, zauzima istočni deo karte i u korelaciji je sa SMM. Na ovom području anomalije imaju vrednosti od -35 do 50 nT. Pozitivna kružna anomalija (D), koja se može uočiti na karti, a nalazi se u donjem istočnom uglu karte, predstavlja uticaj Leckog vulkanogenog kompleksa. Vrednosti anomalija koje karakterišu ovo područje kreću se od 40 do 480 nT. Ovo područje nije predmet disertacije, ali je analizirano zbog uticaja koje može imati na odziv modela pri 2D modelovanju. Oblik anomalije ukazuje na to da se ovaj masiv prostire zapadno i ulazi u područje istraživanja. Ne može se isključiti mogućnost i većeg rasprostranjenja ovog masiva, kao što se može i pretpostaviti da andeziti i ostali vulkaniti mogu biti prisutni u istraživanom području na većim dubinama.

Geomagnetska karta Z komponente na području Makedonije prikazana je na slici 23. Anomalije, prikazane na karti, imaju opseg od -240 do 450 nT. Na geomagnetskoj karti užeg područja izdvaja se šest oblasti (Slika 24) izduženih u pravcu SZ-JI sa visokim

pozitivnim vrednostima anomalija. Prva oblast (A) je pozicionirana u jugozapadnom delu karte i predstavljena je paleozojskim stenama. Ove stene uzrokuju visoke anomalije u rasponu od 100 do 450 nT. Druga, susedna oblast (B), idući prema istoku, zauzima centralni deo karte i odlikuje se relativno niskim anomalijama. Na osnovu OGK (list: Kraljevo, Kruševac, Kuršumlija, Paraćin) i opažanja na terenu može se zaključiti da ih uzrokuje gabra. Ove niske vrednosti anomalija za gabra nisu uobičajene i mogu biti posledica velike razlike magnetskih karakteristika u odnosu na susedne paleozojske i trijaske/jurske jedinice kao i dijabaze istočnije od njega (C). Gabra je veoma ispucao i tektonski poremećen. Oblast C, koja je predstavljena dijabazima, odlikuje se visokim vrednostima anomalija, s tim što se ove anomalije mogu dovesti u vezu i sa granitoidnim probojima na istočnoj granici dijabaza. Oblast D predstavlja metamorfnu podinu, SMM i karakteristična je po umerenim vrednostima anomalija, u odnosu na ceo prostor. Oblast E, sa opsegom anomalija od 100 do 350 nT predstavlja pojavu granitoidnih stena. Krajnje istočna oblast (F) izdvojena na karti, predstavlja SMM i ima isti opseg anomalija kao oblast D. Može se uočiti da su jasno izražene granice među geotektonskim jedinicama, kao i rasprostranjenje granitoidnih intruzija.



Slika 23. Karta Z komponente za područje Makedonije, (crne linije ukazuju na položaj profila na području Demir Kapije, poligonom je naznačeno uže područje istraživanja), položaj prikazan na Slici 20



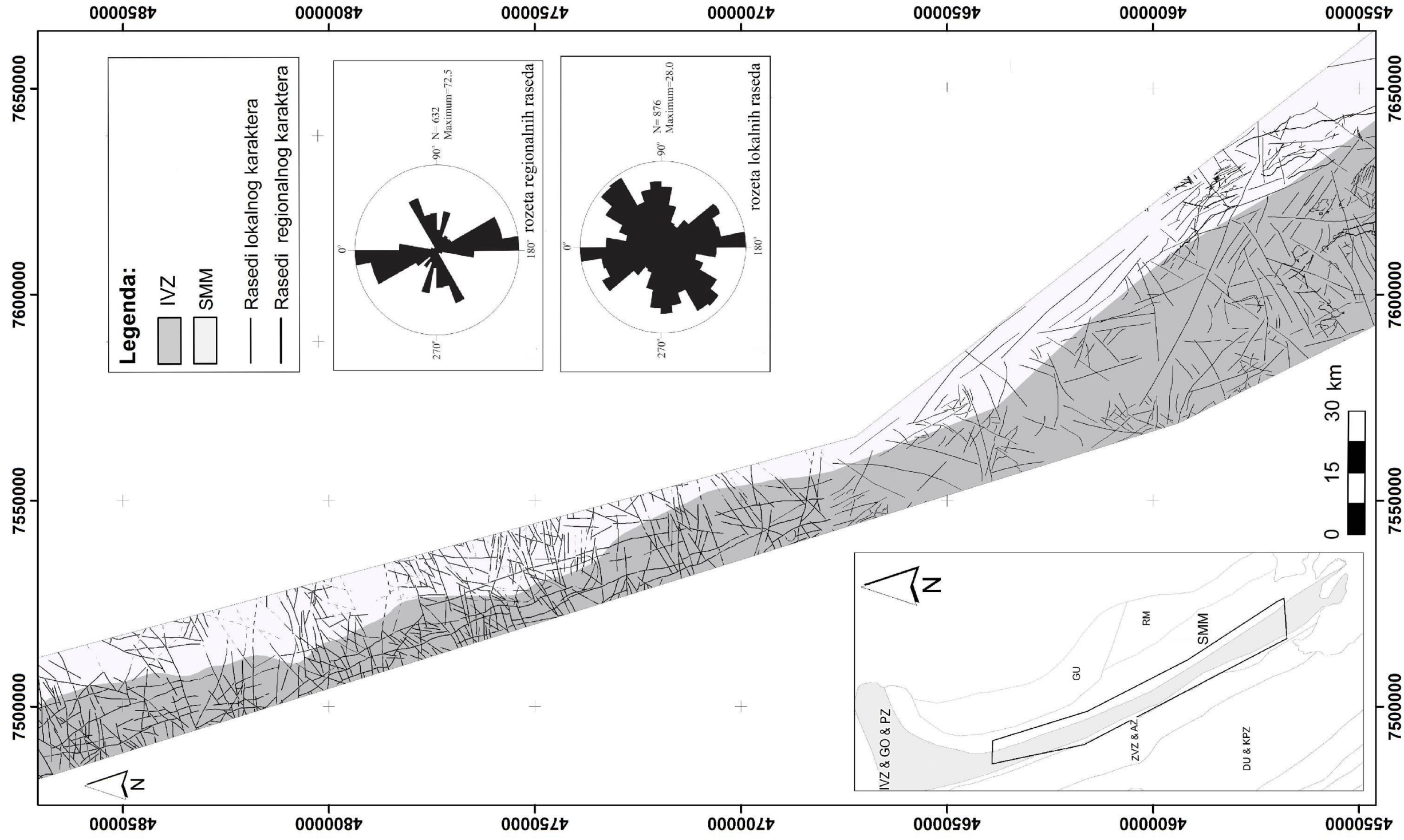
Slika 24. Geomagnetska karta Z komponente užeg područja na prostoru Makedonije sa izdvojenim zonama prema geotektonskoj karti (Robertson et al.,2009); položaj označen na Slici 20/ODKD

Na osnovu analize literaturnih podataka i karata aeromagnetskih podataka na prostoru Grčke može se zaključiti da se visoke anomalije na području Makedonije prostiru u istom trendu (SSZ-JJI) i na području Grčke i da obuhvataju poluostrva Kasandra i Sitonija. Ovaj pojas je veoma izražen i jasno se odvaja od susednih jedinica (Paikon, Almopias, Cirkum-Rodopi i SMM)

4. 2. 1 Interpretacija rupturnog sklopa

Interpretacija rupturnog sklopa je prikazana na pojednostavljenoj tektonskoj skici na Slici 25. Interpretacija je zbirni prikaz podataka dobijenih daljinskom detekcijom, i podataka prikupljenih na terenu i matematičkim transformacijama geofizičkih podataka.

Ukoliko se posmatrju samo uža područja istraživanja (Ždraljica, Kuršumlija, Demir Kapija i Đevdelija), sve izdvojene rupture imaju regionalni karakter, međutim, kada se posmatra cello područje IVZ, moguće je izdvojiti rupture lokalnog i regionalnog značaja (Slika 25). Interpretirani rupturni sklop pokazuje da je celo područje kontrolisano strmim normalnim rasedima pravca pružanja SSZ-JJI do S-J (Karamata, 2006; Robertson et al., 2009). Pored ovih raseda, kvalitativnom analizom geofizičkih podataka i podataka prikupljenih na terenu, izdvojene su još tri grupe ruptura prema pravcu pružanja. Ove rupture interpretirane su kao rupture lokalnog značaja. U okviru lokalnih, najdominantije su rupture pravca pružanja SI-JZ, zatim SZ-JI i rupture orijentisane u pravcu Z-I (Slika 25, dijagram lokalnih ruptura).



Slika 25. Uprošćena interpretacija rupturnog sklopa u širem istraživanom području (između IVZ i SMM), dobijena kombinacijom podataka daljinske detekcije, terenskog osmatranja i gravimetrijskih podataka; rozete za lokalne i regionalne rupture su takođe prikazane

5. DISKUSIJA

Diskusija je podeljena u četiri logički povezane celine. Prvo je obrađeno horizontalno rasprostranjenje uzročnika anomalija. Vertikalno rasprostranjenje uzročnika je prikazano kroz 2D modele, dok su zaključci izvedeni iz prethodna dva poglavlja uključeni u pseudo 3D modele. Na samom kraju je dat pregled geodinamičkih implikacija.

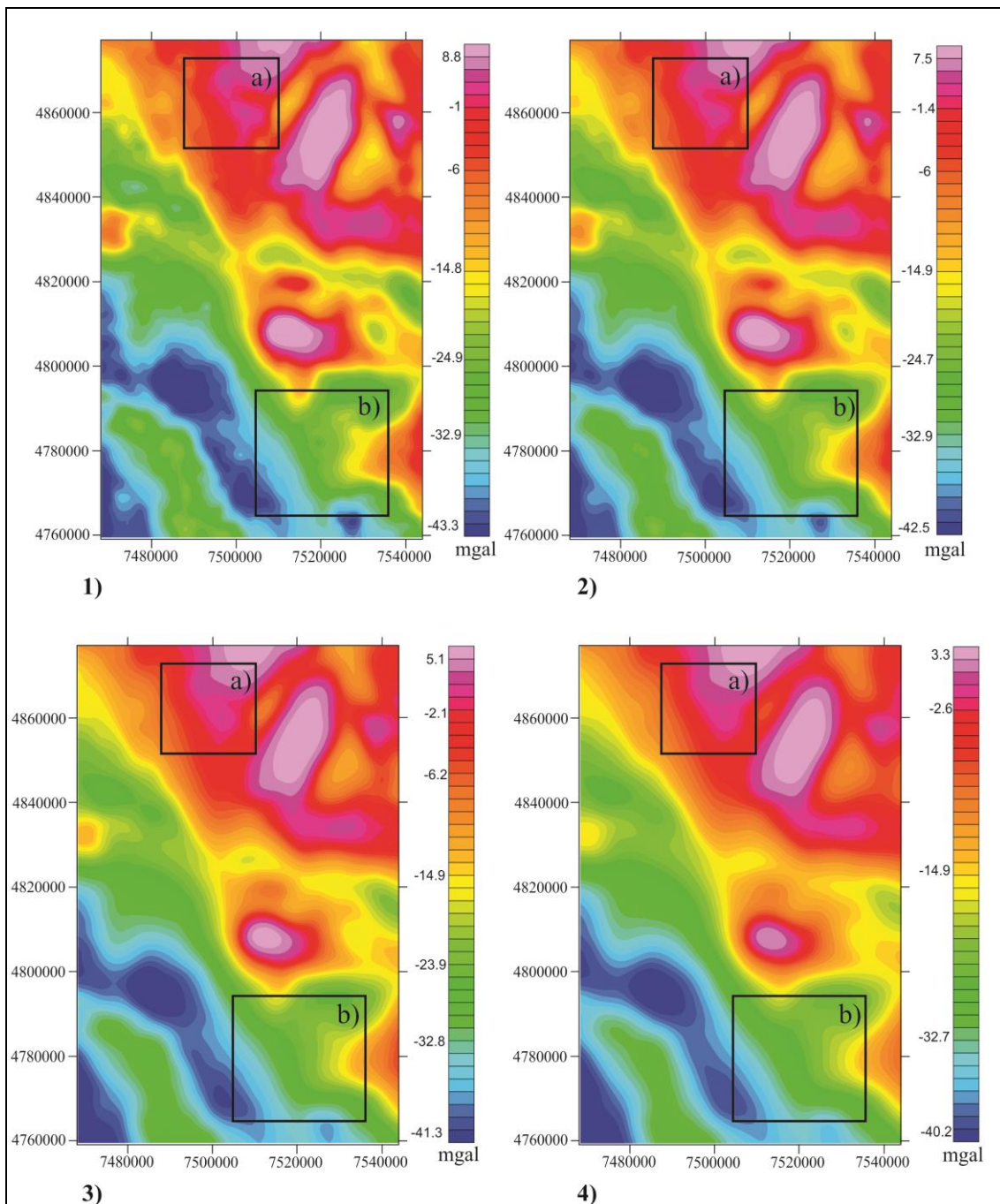
5. 1. Horizontalno rasprostranjenje uzročnika anomalija

Karte koje su prikazane u ovom poglavlju odvojene su po geografskim područjima, odnosno po državnim granicama, kao što je ranije napomenuto.

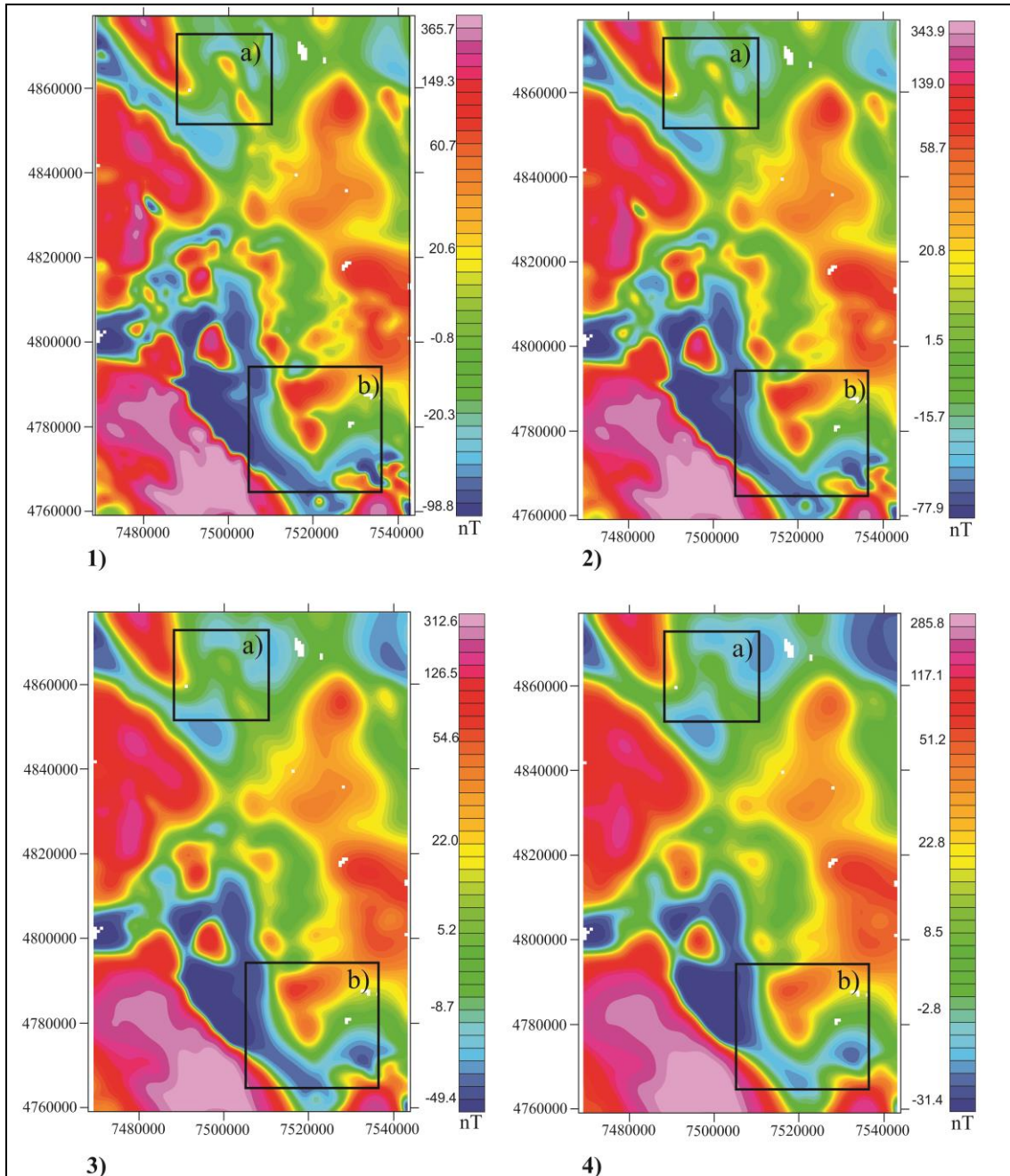
5. 1. 1. Srbija

Uzročnici Bugeovih anomalija su u horizontalnoj ravni izduženi u pravcu SSZ-JJI, što se može videti na slici 19. Na osnovu postupka produženja polja naviše, koji je sproveden nad kartama Bugeovih anomalija (Slika 26), zaključuje se da je rasprostranjenje stena sa većom gustinom saglasno sa pružanjem cele tektonske jedinice IVZ. Na gravimetrijskim i geomagnetskim kartama analitičkog produženja polja naviše (Slike 26 i 27), opseg anomalija ukazuje da najveći uticaj u istočnom delu terena ima SMM. SMM nije homogena sredina već je sastavljena od različitih litoloških članova različitog stepena metamorfizma, pa je shodno tome i uticaj ove geotektonske jedinice na odziv anomalija promenljiv. Na geomagnetskoj karti izvoda ugla nagiba (Slika 28) može se očitati položaj uzročnika anomalija na prostoru IVZ, koji je saglasan sa položajem, koji se može videti na kartama Bugeovih anomalija. Na karti izvoda ugla nagiba evidentno je, takođe, da su granice među susednim jedinicama jasne i oštre. Položaj granica uzročnika anomalija odgovara pružanju izolacija sa vrednošću nula, koje su naglašene crnom bojom na kartama (Cooper and Cowan, 2008). Granice izdvojene na ovaj način interpretirane su kao rasedi između IVZ i susednih jedinica SMM. Karta izvoda ugla nagiba (Slika 28) i karte produženja polja naviše (Slika 26 i 27) za nivoe 500, 1000, 2000 i 3000 m, pokazuju da se uzročnici anomalija prostiru duboko ispod površine terena. Na različitim dubinama, u horizontalnoj ravni, ove anomalije imaju regionalni karakter, a uzročnici anomalija (IVZ) regionalni uticaj. Na

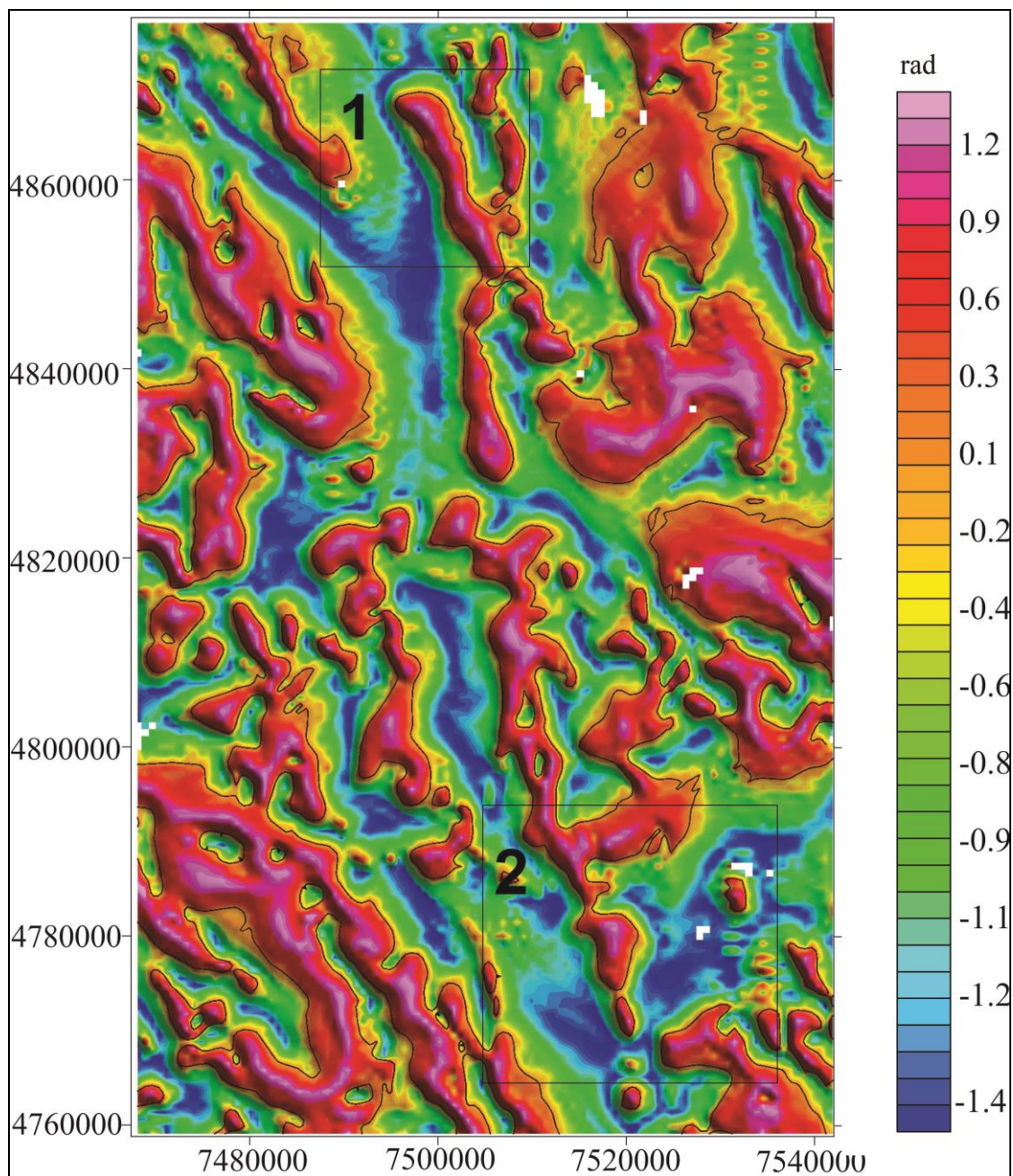
osnovu karata zaključuje se da IVZ ima jasne i oštre granice sa jedinicama na zapadu (prema jedinici Kopaonik i ZVZ) i ova granica je tumačena kao tektonska granica, čije su rasedne površi skoro subvertikalne. Istočna granica IVZ, prema SMM drugačijeg je karaktera. Izvod ugla nagiba je primenjen nad podacima dobijenim produženjem polja naviše (Slika 29). Karakteristične nulte izolacije ukazuju na položaj granica uzročnika anomalija na različitim dubinama. Analizom ovih karata, zaključeno je da se istočna granica uzročnika, odnosno granica IVZ sa SMM, sa povećanjem dubine, pomera ka istoku. Na osnovu geofizičkih anomalija, može se zaključiti da je granica između IVZ i SMM difuzna. Ne može se jasno izdvojiti kao jedinstven lineament niti joj se može odrediti egzaktan položaj u horizontalnoj ravni na svim dubinama. Ovo proističe iz toga, što je ova granica najverovatnije blažeg i promenljivog pada. Na većim dubinama ove dve jedinice stoje jedna u odnosu na drugu skoro horizontalno, pa nije moguće pratiti ovakvo rasprostranjenje na osnovu geofizičkih anomalija, jer većina primenjenih transformacija detektuje lateralne promene, ali ne i promene u rasprostranjenju po dubini, odnosno sa povećanjem dubine.



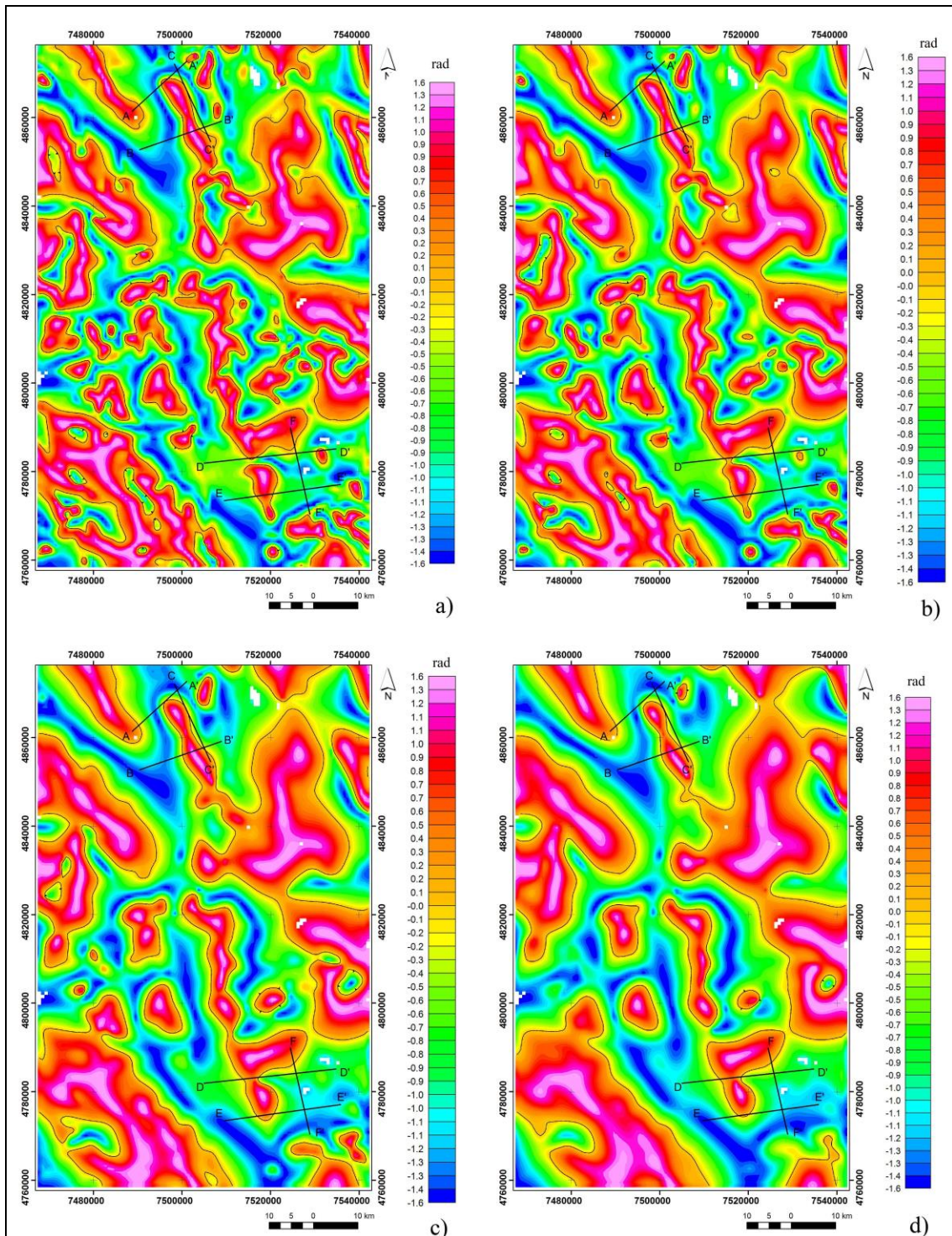
Slika 26. Gravimetrijske karte analitičkog poduženja polja naviše, na teritoriji Srbije; nivo: 1) 500, 2) 1000, 3) 2000 i 4) 3000 m



Slika 27. Geomagnetske karte analitičkog poduženja polja navise, na teritoriji Srbije; nivo: 1) 500, 2) 1000, 3) 2000 i 4) 3000 m



Slika 28. Geomagnetska karta izvoda ugla nagiba na prostoru Srbije (kvadratima su naznačena područja Ždraljice /1/ i Kuršumlije /2/)



Slika 29. Geomagnetska karta anomalija totalnog polja na koju je primenjen postupak produženje polja naviše sa izvodom ugla nagiba; nivo: a) 500, b) 1000, c) 2000 i d) 3000 m sa položajima profila

5. 1. 2. Makedonija

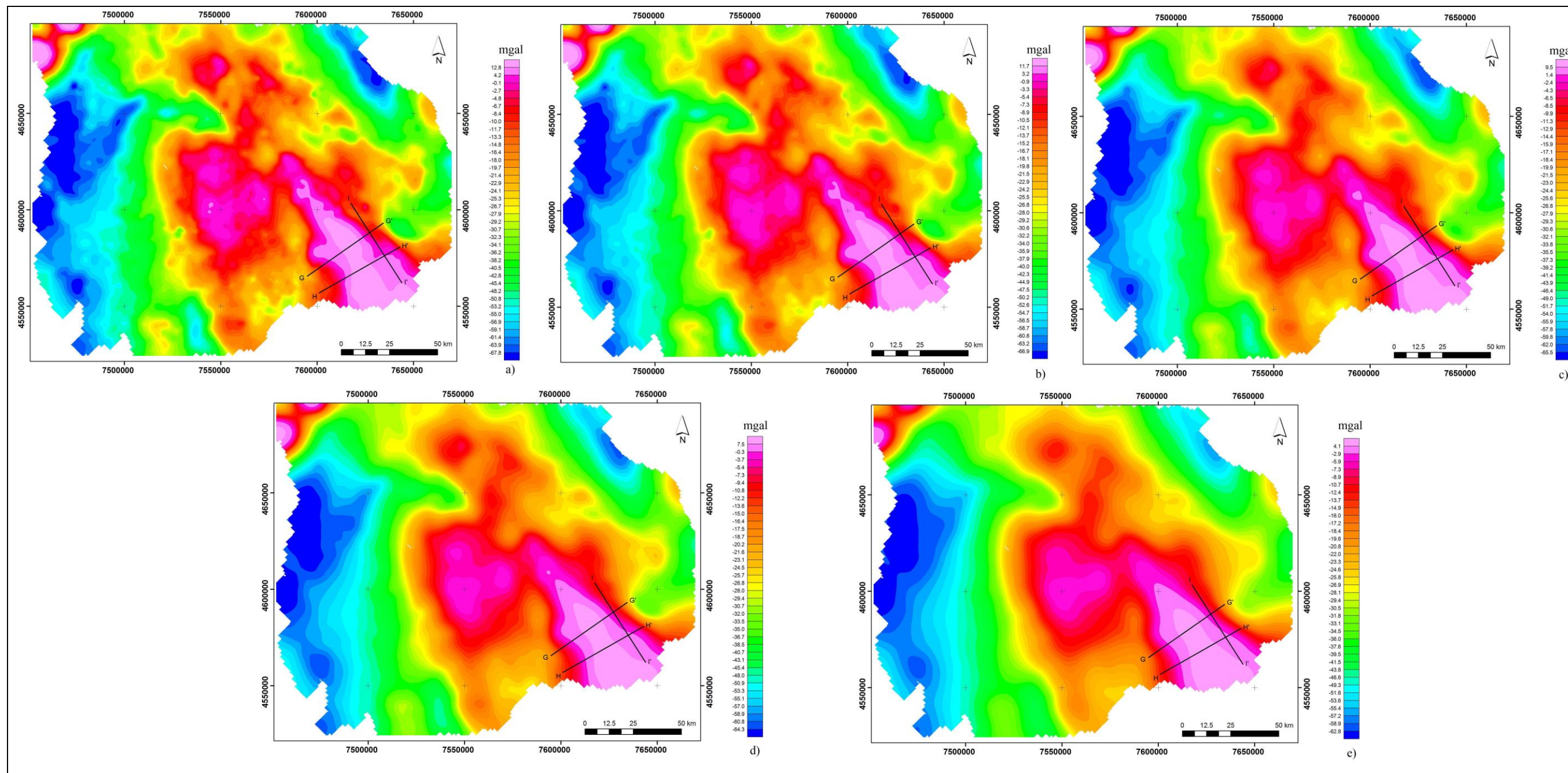
Analizom gravimetrijskih karata analitičkog produženja polja naviše, za nivoe 500, 1000, 2000, 3000 i 5000 m (Slika 30), može se zaključiti da pojave ofiolita na površini terena, koje izgledaju kao da su nepovezane, odnosno da su zasebna tela, imaju drugačiji karakter sa povećanjem dubine. Ovi ofioliti su u dubljim delovima jedinstveno telo, tj. jedinstveni pojas koji nije isprekidan. Njihovo rasprostranjenje ima pravac pružanja SSZ-JJI.

Na osnovu analize geomagnetskih karata analitičkog produženja polja za iste nivoe (Slika 31) može se utvrditi da su na terenu ispod površine najdominantniji ofioliti u odnosu na sve ostale stene na terenu. Njihova zapadna granica je sve vreme jasno izražena, dok je istočna granica difuzna, ali je uočljivo da se IVZ sa dubinom pomera prema istoku i stapa sa SMM.

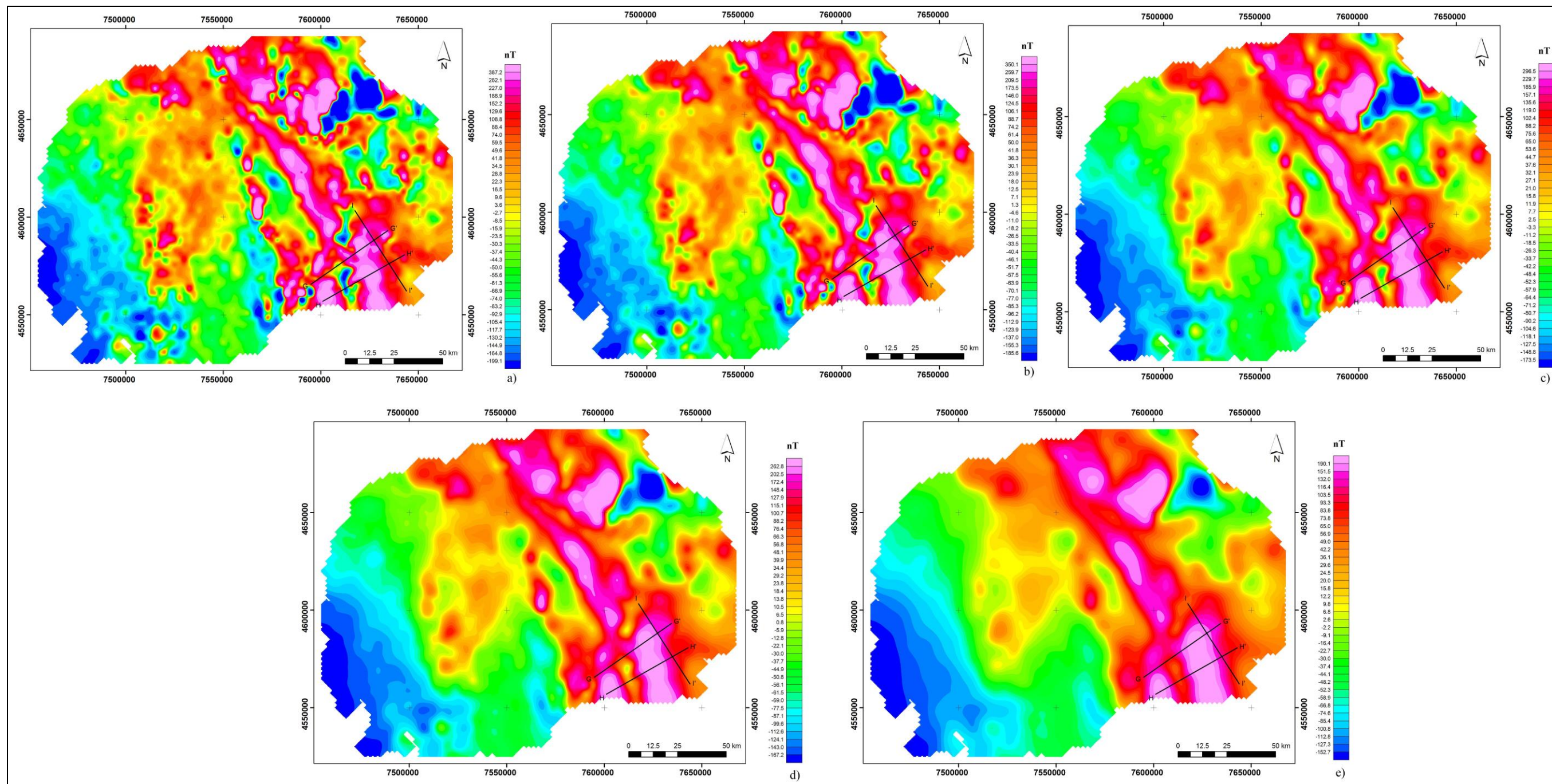
Na karti izvoda ugla nagiba (Slika 32), izdvojene su izolije sa vrednošću nula, koje predstavljaju granice uzročnika anomalija na ovom prostoru. Na karti se jasno izdvajaju granice ofiolita IVZ, koje su u saglasnosti sa granicama kartiranim na OGK, kao i granicama dobijenim automatskom klasifikacijom nad PCA snimcima (Slika 10). Može se uočiti da su ofioliti Đevđelije, odnosno Demir Kapije, jasno izraženi. U skladu sa svojim površinskim pojavama, ovaj kompleks predstavlja deo ispod površine koji ima najveći uticaj na odziv anomalija.

Analizom karata dobijenih primenom izvoda ugla nagiba nad geomagnetskim podacima dobijenim analitičkim produženjem polja (Slika 33), za nivoe 2000, 3000 i 5000 m, utvrđeno je da su granice uzročnika anomalija ispod površine jasno definisane i da se mogu pratiti na celom području. Na osnovu ovih podataka, zaključeno je da se ofioliti u južnom delu terena na većim dubinama prostiru gotovo u pravcu S-J, za razliku od njihovog pružanja na površini, koje ima pravac SSZ-JJI, kao i da je njihova granica sa SMM pomerena prema istoku na tim dubinama. Izgled anomalija na Slici 33c ukazuje da u severnom delu Makedonije postoji prekid u kontinuitetu pružanja ofiolita, za razliku od anomalija u južnom i centralnom delu, koje ukazuju na jedinstveno telo/pojas. Podaci dobijeni ovim transformacijama ukazuju na to da je prostorno rasprostranjenje ofiolita na području Makedonije 2 do 3 puta veće ispod površine nego

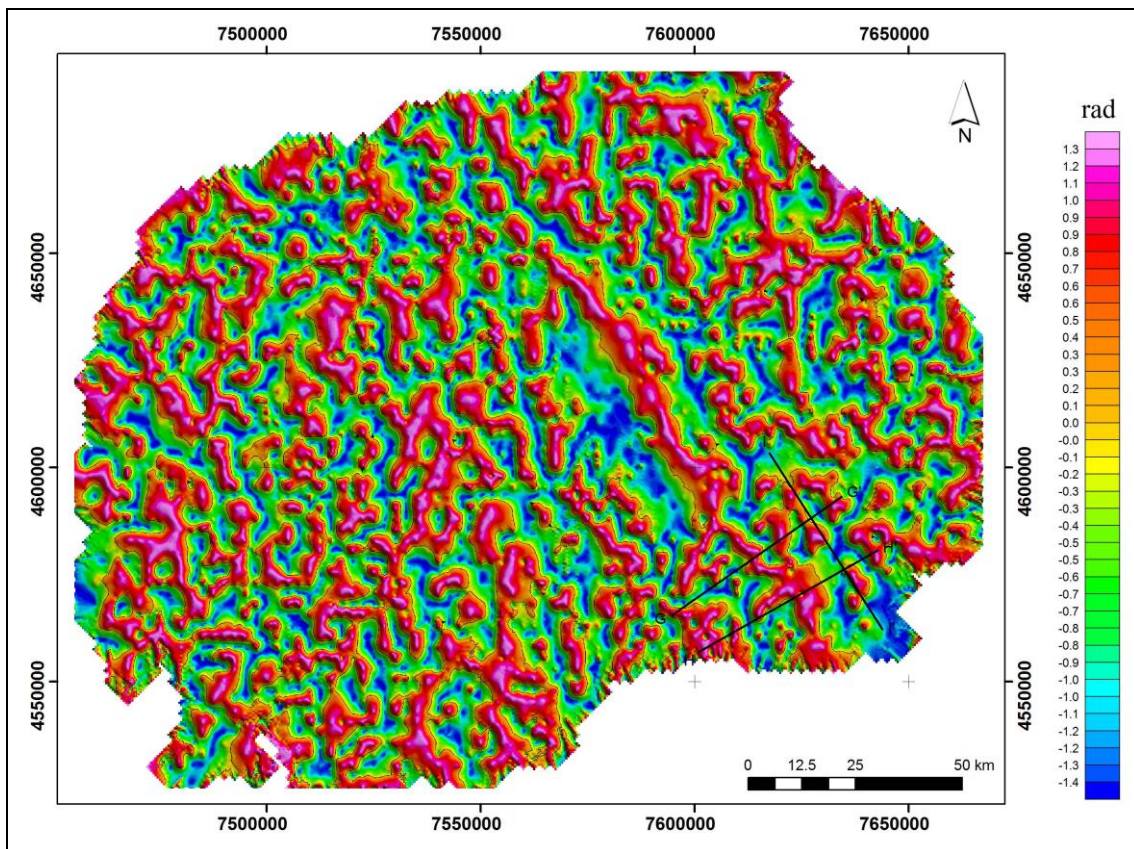
što se može uočiti terenskim osmatranjem površine terena i nego što je kartirano na OGK listovima ili pretpostavljeno na osnovu podataka daljinske detekcije.



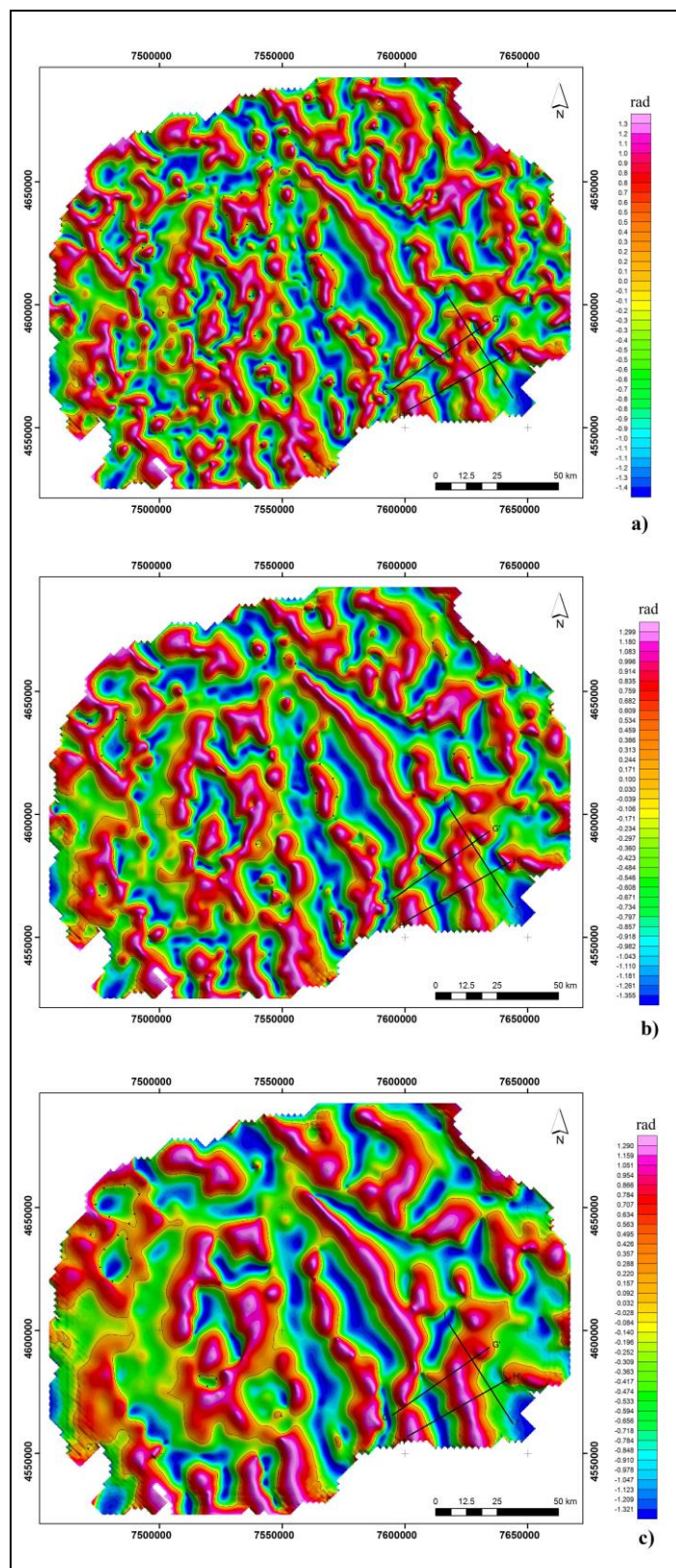
Slika 30. Gravimetrijske karte analitičkog produženja polja za nivoe a) 500, b) 1000, c) 2000, d) 3000, e) 5000 m, sa položajima profila



Slika 31. Geomagnetske karte analitičkog produženja polja za nivoe a) 500, b) 1000, c) 2000, d) 3000, e) 5000 m, sa položajima profila



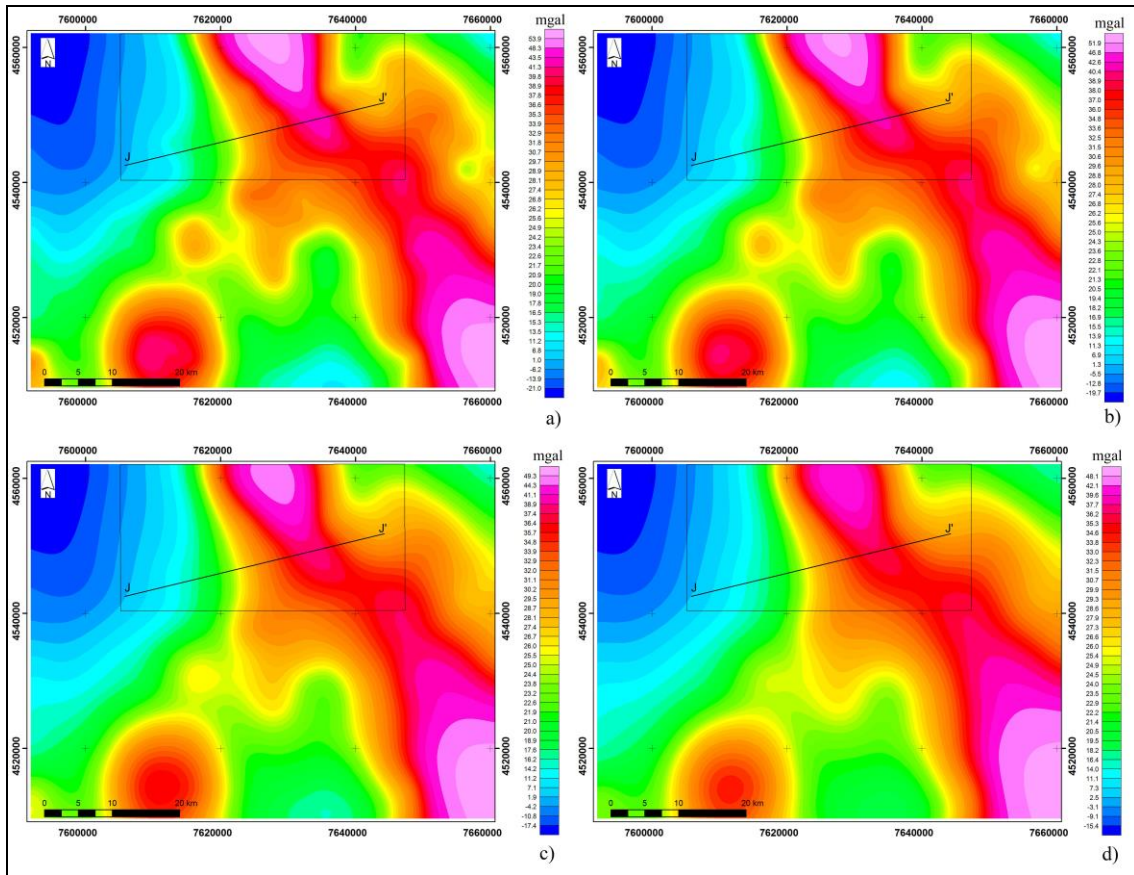
Slika 32. Geomagnetska karta izvoda ugla nagiba na području Makedonije



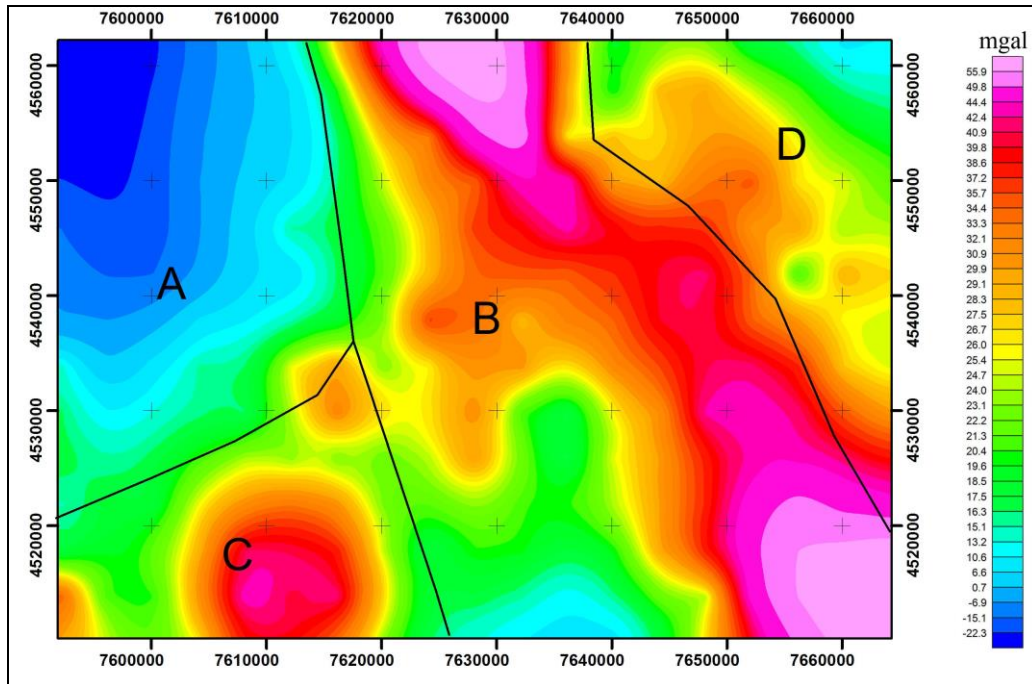
Slika 33. Geomagnetska karta na koju je primenjen postupak produženje polja naviše sa izvodom ugla nagiba; nivo: a) 2000, b) 3000, c) 5000 m

5. 1. 3. Grčka

Na osnovu gravimetrijskih karata produženja polja naviše (Slika 34) zaključeno je da sa povećanjem dubine uzročnik anomalije pokazuje orijentaciju sve bliže pravcu SSZ-JJI. Iako je pravac pružanja ofiolita na području severne Grčke, prikazano na OGK, S-J, na osnovu analize gravimetrijskih karata, odnosno povijanja anomalija prema istoku, zaključeno je da se pravac pružanja uzročnika menja, što je u saglasnosti sa utvrđenim pružanjem ovih uzročnika ispod površine u severnom delu istraživanog područja u Makedoniji. Sa povećanjem dubine, na osnovu karata produženja polja (Slika 34d), pretpostavljeni položaj uzročnika anomalija u horizontalnoj ravni se menja. Na većim dubinama pravac pružanja ofiolita IVZ je SSZ-JJI. Uočeno je i postojanje rasedne zone pravca pružanja SSI-JJZ, za koju je analizom anomalija na ovom prostoru utvrđeno da najverovatnije predstavlja levi transkurentni rased čijom aktivnošću je izvršeno i izdizanje sevenog dela terena. Analizom ovih karata izdvojene su četiri zone (Slika 35). Područje A u severozapadnom delu (Slika 35) karakteriše se niskim vrednostima anomalija, od -20 do 15 mgal i odgovara pojavama jurskih i trijaskih sedimentnih stena na površini terena (Slika 7). Visoke vrednosti anomalija u centralnom delu terena (B), pravca pružanja SSZ-JJI, odgovaraju površinskim pojavama ofiolitskih stena (gabro i dijabaz). U jugozapadnom delu karte uočavaju se visoke vrednosti anomalija kružnog oblika (C). Ove anomalije su najverovatnije posledica postojanja ofiolitskih stena ispod kenozojskog pokrivača. Ovako visoke vrednosti (od oko 30 mgal do oko 60 mgal), ukazuju da je kenozojski pokrivač u ovom delu tanak i da se ispod njega nalaze stene velike gustine. U severoistočnom delu karte (D) pojavljuju se anomalije srednjih vrednosti u odnosu na vrednosti anomalija za celo područje, koje predstavljaju stene pojasa Cirkum-Rodopa i metamorfnog kompleksa SMM.



Slika 34. Gravimetrijske karte analitičkog produženja polja na području Grčke; nivo: 500, 1000, 2000 i 3000 m



Slika 35. Gravimetrijska karta sa izdvojenim područjima dominantnih vrednosti anomalija u skladu sa geološkom kartom (list: Evzoni i Skra)

*

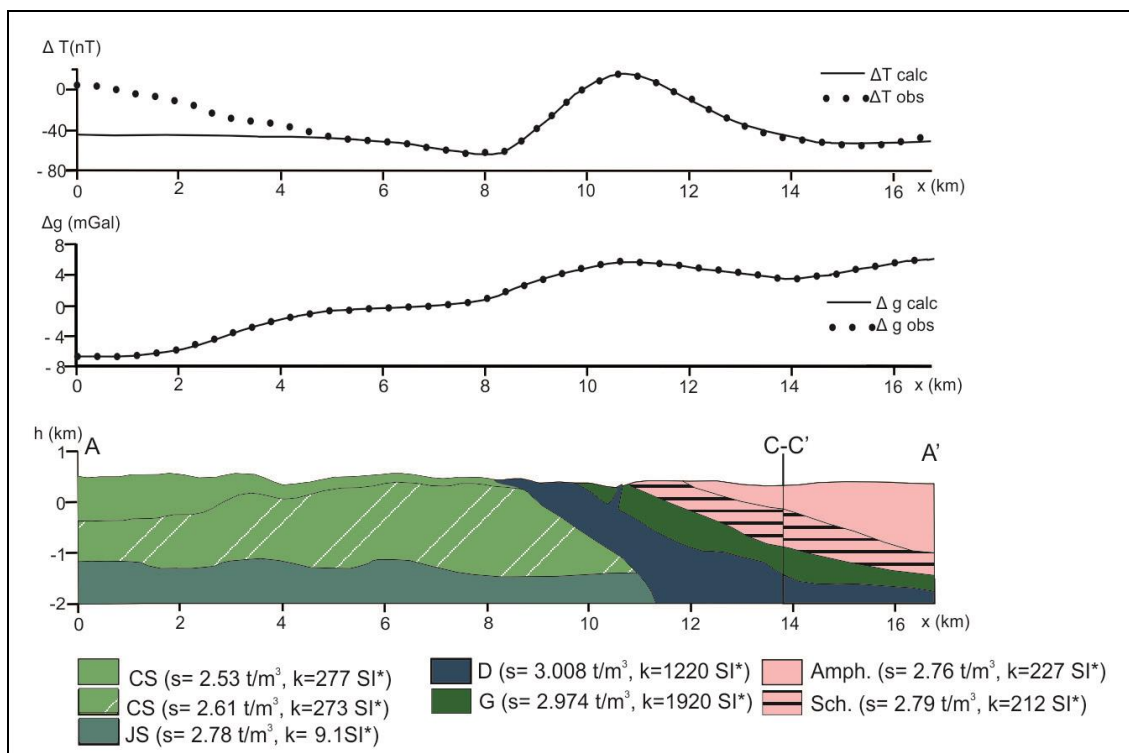
* *

Na osnovu utvrđivanja horizontalnog rasprostranjenja uzročnika gravimetrijskih i gomagnetskih anomalija može se zaključiti da je rasprostranjenje ofiolita IVZ ispod površine znatno veće nego što se može videti na površini terena. Ofioliti IVZ se ispod površine terena prostiru prema istoku. Sveukupno horizontalno rasprostranjenje ofiolita IVZ je veće u južnom (južna Makedonija i Grčka), nego u severnom delu terena (Srbija i severna Makedonija).

5. 2. Vertikalno rasprostranjenje uzročnika anomalija, 2D modeli

Utvrđivanje vertikalnog rasprostranjenja uzročnika anomalija podrazumeva kreiranje 2D modela po profilima. Na slikama 2D modela (Slike 36-45), merene vrednosti su prikazane tačkastom linijom i obeležene sa “obs“, dok je uticaj modela na odziv

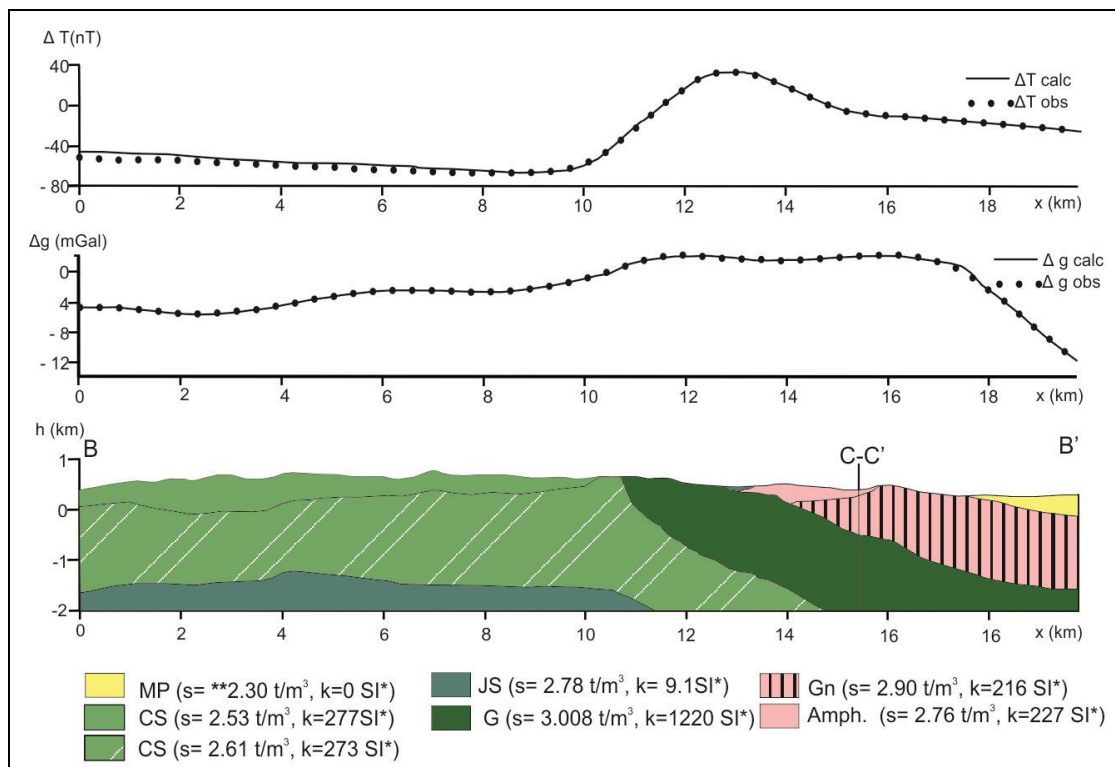
anomalija prikazan punom linijom koja je obeležena sa "calc". Na svim modelima su prikazani položaji preseka sa drugim profilima. Na području Ždraljice, modelovanje je vršeno duž tri profila (AA', BB' i CC'), čija je pozicija prikazana na Slici 4. Na OKG (list Kraljevo i Paraćin) gabrovi i dijabazi su kartirani odvojeno, pa su duž profila AA' (Slika 36), i modelovani zasebno, tj. sa različitim vrednostima susceptibilnosti (Tabela 2) i sličnim vrednostima gustine. U istočnom delu profila nije bilo moguće potpuno uklopiti modelovane i merene vrednosti geomagnetskih anomalija, najverovatnije zbog toga što se vrednosti jurskih stena menjaju i horizontalno i vertikalno. Moguće je, takođe, da u ovom delu terena na većoj dubini postoji još jedna jedinica sa drugačijim vrednostima susceptibilnosti, međutim za takvu tvrdnju ne postoje dokazi. U plićim delovima (do dubine od oko 1 km), kontakt između ofiolita i susednih jedinica je jako strm. Sa povećanjem dubine nagib kontakta postaje blaži i varira od 20 do 45 stepeni.



Slika 36. 2D model po profilu AA'; CS - gornjokredni fliš, JS - jurski sediment (gornjojurski melanž), D - dijabaz, G - gabro, Amph.- uglavnom amfiboliti, gnajs, mermer, škriljci, kvarciti, Sch.- uglavnom škriljci, krečnjaci

Duž profila BB' ofioliti IVZ su modelovani kao jedinstveno telo sa nepromenljivim vrednostima za gustinu i susceptibilnost (Slika 37). Nagib kontakta između IVZ i SMM

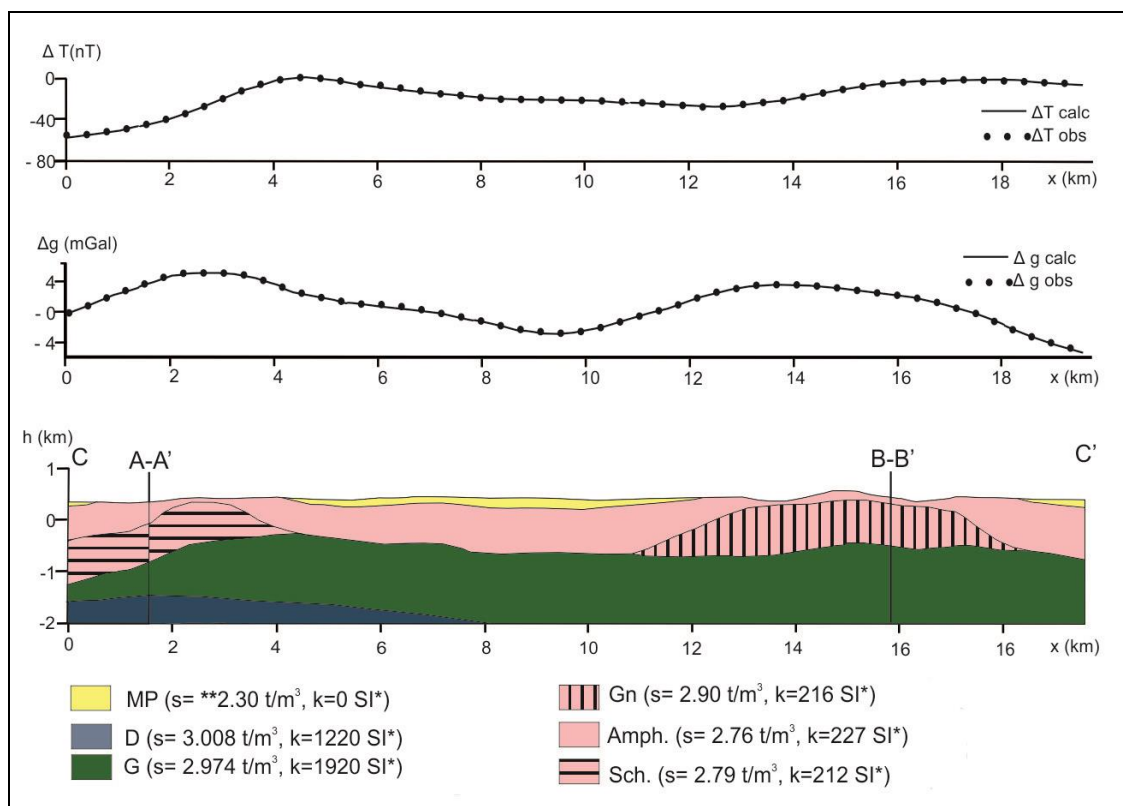
blizu površine (do dubine od oko 1.5 km), varira između 60 i 80°, zavisno od dubine. Ovako strm kontakt može da bude posledica reaktivacije raseda navlačenja. Na većim dubinama padni ugao kontakta ima vrednost od oko 35°.



Slika 37. 2D model po profilu BB'; MP - miocensko-pliocenski sedimenti, CS - gornjokredni fliš, JS - jurski sediment (gornjojurski melanž), G - gabro, Amph.- uglavnom amfobiliti, gnajs, mermer, škriljci, kvarciti, Gn - uglavnom gnajs, ** - vrednosti gustina preuzete iz Telford et al. (1990)

Model duž profila CC' (Slika 38) predstavlja kontrolni profil, čija je namena pre svega usklađivanje graničnih površi različitih jedinica na istu dubinu, tj. provera ispravnosti modela kreiranih po profilima AA' i BB'. Profil je postavljen upravno na prethodna dva, tako da preseca oba. Bez obzira na to što je ovaj model pre svega kontrolni, na osnovu njega se takođe mogu izvesti određeni zaključci. Model CC' ukazuje da ofioliti IVZ u ovom delu terena tonu ka jugu (posebno dijabazi), dok AA' i BB' ukazuju da oni tonu i ka istoku. Ofioliti se nalaze ispod SMM na dubini od oko 1.5 km. Njihova debljina procenjena je u ovom delu na oko 4 km. Na osnovu modela dobijenih po

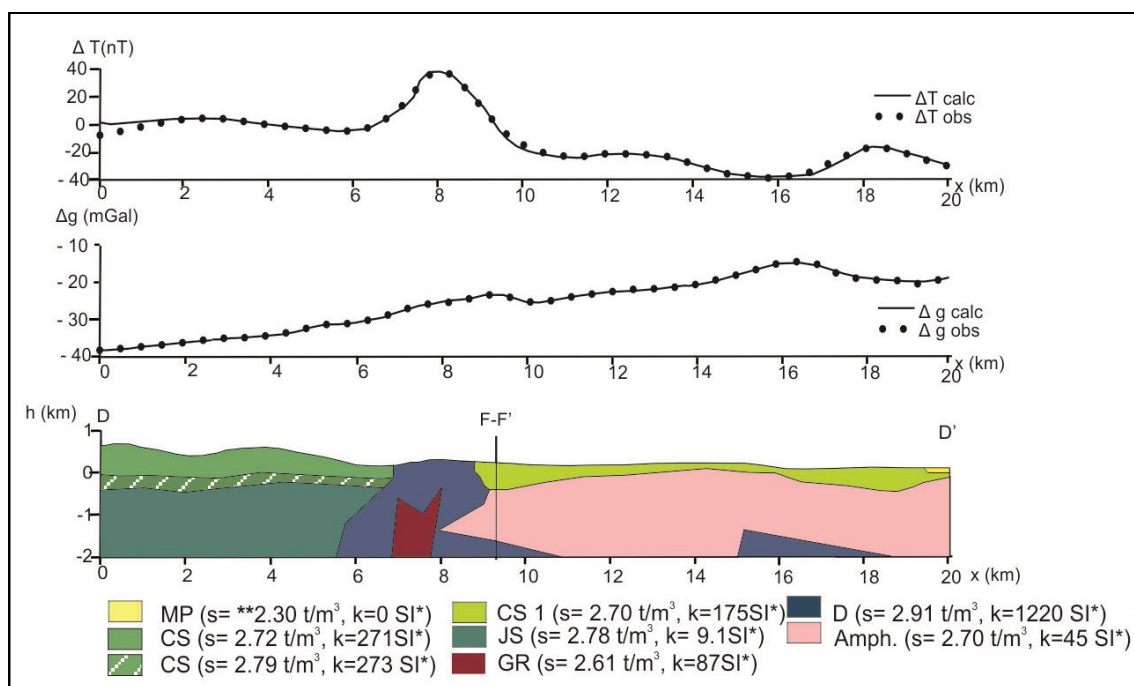
profilima na području Ždraljice može se videti da je generalni pravac tonjenja IVZ istok-jugoistok.



Slika 38. 2D model po profilu CC'; MP - miocensko-pliocenski sedimenti, D - dijabaz, G - gabra, Amph.- uglavnom amfiboliti, gnajs, mermer, škriljci, kvarciti, Gn - uglavnom gnajs, Sch.- uglavnom škriljci, krečnjaci; ** - vrednosti gustina preuzete iz Telford et al. (1990)

Pozicije modelovanih profila na području Kuršumlje (DD', EE' i FF') prikazane su na Slici 5 u poglavlju 2. Duž profila DD' vršeno je modelovanje sa jedinstvenim vrednostima susceptibilnosti i gustine za sve stene ofiolita (Slika 39). Nagib kontakta između IVZ i SMM do dubine od 1.5 km iznosi oko 70° prema istoku. Sa povećanjem dubine, nagib se menja i iznosi 35°- 45° prema zapadu. Ovakva promena u nagibu jeste mogući razlog da su mnogi autori smatrali da su IVZ ofioliti zapadnovergentni (Mercier, 1966; Sandulescu, 1984; Schmid et al., 2008). Na udaljenosti od 15 km severno od linije profila DD', unutar SMM, nalazi se ekstenzioni metamorfni kompleks (eng. *core complex*). Ovaj kompleks je najverovatnije posledica panonske ekstenizije (Marović et al., 2002; Koroneos et al. 2011; Cvetković et al. 2007). Položaj

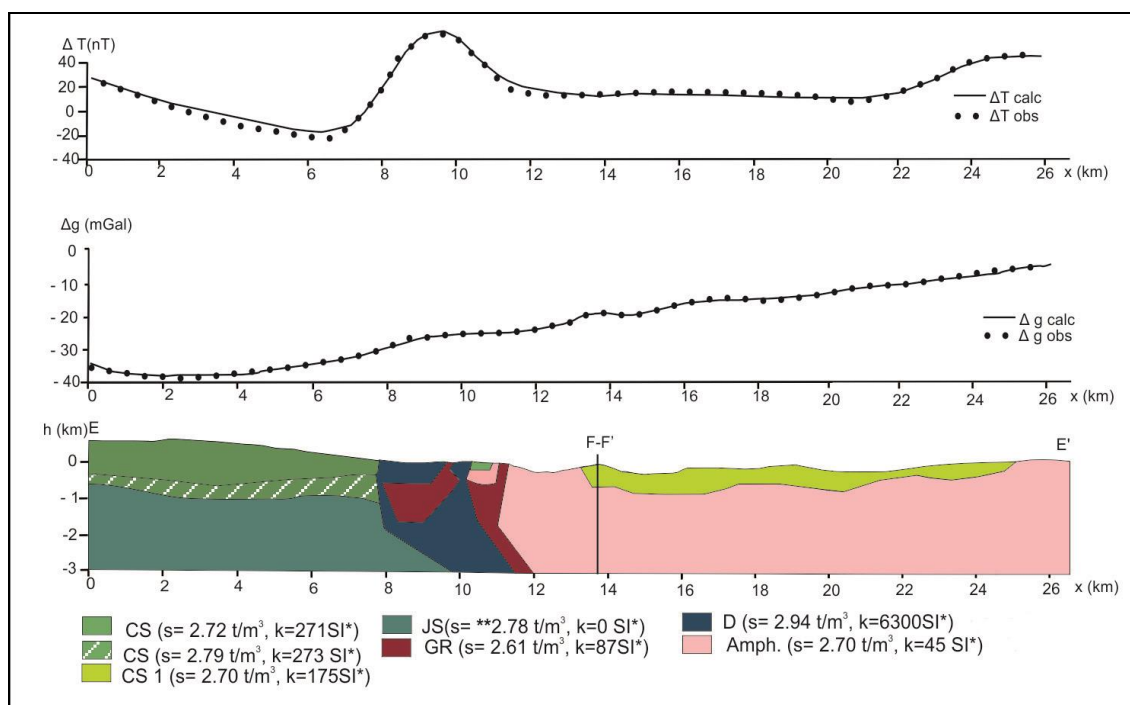
geotektonskih jedinica je u pravcu glavnih rasednih zona pružanja SZ-JI do SSZ-JJI u Dinaridima i SSZ-JJI do S-J u Karpato-balkanidima (Marović et al, 2002). Pristutni su i rasedni sistemi pružanja SI-JZ, S-J i I-Z u Dinaridima i SI-JZ, SZ-JI kao i ZJZ-ISI u Vardarskoj zoni i Karpato-balkanidima. Miocenska ekstenzija, pravca S-J, vezuje se za povlačenje subdukujće Jadranske ploče pod Dinaride, dok se formiranje metamornih kompleksa vezuje za egejsku ekstenziju. Međutim, Marović et al. (2002) ukazuju da je najverovatnije najsevernija granica uticaja egejske ekstenzije vezana za liniju Skadar – Peć i njen nastavak dalje prema istoku. U istočnom delu profila DD' ofioliti su modelovani tako da je prisutno još jedno telo ofiolita. Ovo telo može predstavljati izdignuti deo originalno još dubljeg dela ofiolita IVZ. Izdizanje ofiolita se može povezati sa ekstenzionim metamornim kompleksom. Na dubini od oko 1.8 km kontakt pada prema istoku uz padni ugao koji varira između 45° i 35°.



Slika 39. 2D model po profilu DD'; MP - miocensko-pliocenski sediment, CS1 - sediment kredne starosti, CS - gornjokredni fliš, JS - jurski sedimenti (gornjojurski melanž), GR – granitoidi, D - dijabaz, Amph.- uglavnom amfiboliti, gnajls, mermer, škriljci, kvarciti; *- vrednosti gustina preuzete iz Telford et al. (1990)

Padni ugao zone kontakta između IVZ i SMM ima raspon od 80° do 90°, dok sa povećanjem dubine do oko 2 km ovaj padni ugao iznosi oko 45°.

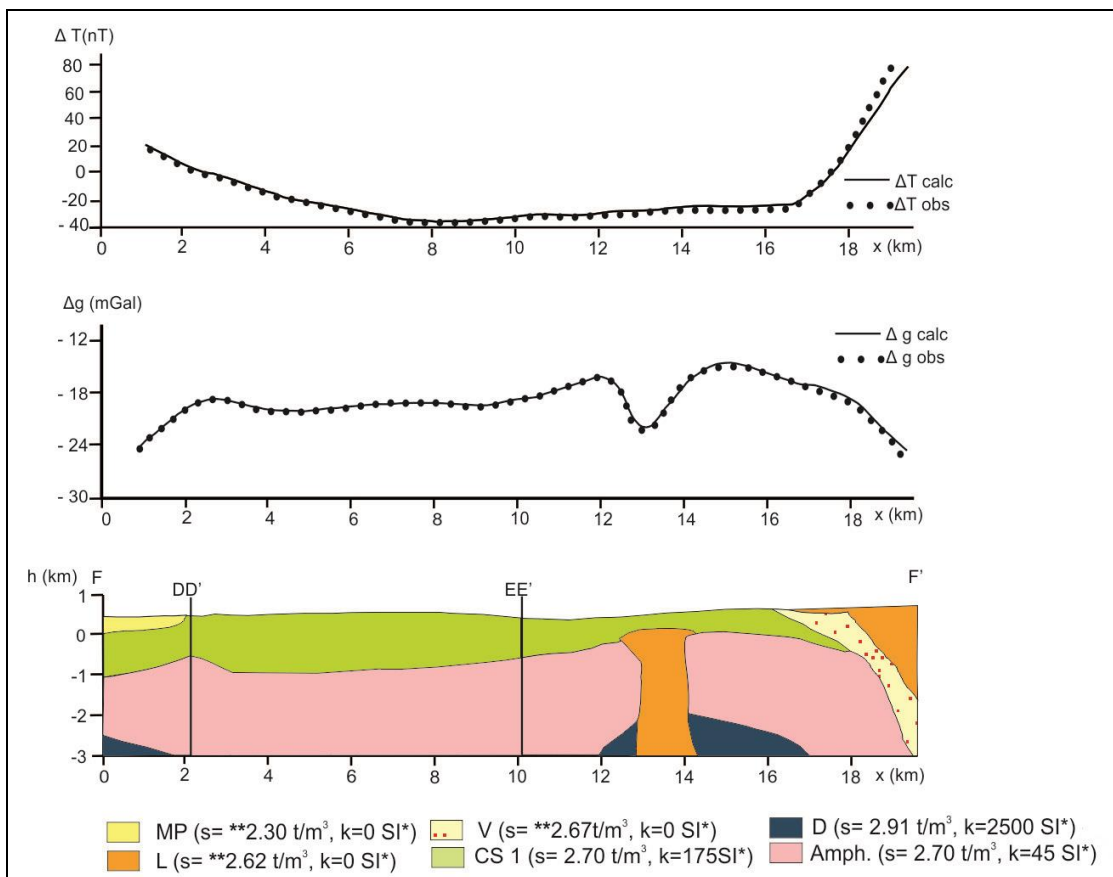
Model EE' ukazuje da je kontakt ofiolita IVZ sa okolnim jedinicama neposredno ispod površine veoma strm, gotovo vertikalalan. Na dubini od oko 2 km, kontakt je blažeg pada prema istoku od oko 40° (Slika 40). U okviru ofiolita na profilu EE' modelovani su intraofiolitski graniti (Šarić et al., 2009). Iako su granitoidi na modelu prikazani kao jedinstveno telo (Slika 40), postoji mogućnost da su ovi granitoidi sačinjeni od više manjih tela u okviru ofiolita, ali ih je bilo nepogodno na taj način geofizički modelovati.



Slika 40. 2D model po profilu EE'; CS1 - sediment kredne starosti, CS - gorenjekredni fliš, JS - jurski sedimenti (gornjojurski melanž), D - dijabaz, GR - granitoidi, Amph.- uglavnom amfobili, gnajs, mermer, škriljci, kvarciti; *- vrednosti gustina preuzete iz Telford et al. (1990)

Na području Kuršumlije postavljen je i kontrolni profil FF', koji je pozicioniran upravno na DD' i EE'. Ovaj model ukazuje na to da ofioliti IVZ padaju prema jugu-jugoistoku. Na modelu FF' (Slika 41) se može videti da je profil zašao i u Lecki vulkanogeni masiv na svom krajnjem jugu. Podaci o susceptibilnosti stena na ovom delu nisu bili dostupni, pa vrednost susceptibilnosti nije ni dodata, odnosno sa geomagnetskog stanovišva, modelovanje je vršeno kao da nisu ni prisutne vulkanske stene. Vrednosti gustine su preuzete iz literature (Telford et al, 1990). U istočnom delu

profila modelovano je još jedno telo, koje bi trebalo da pripada istom masivu i koje je najverovatnije intrudovano u SMM (Slika 41, označeno sa L), ali koje ne izbija na površinu (andezitski sil ?). Na osnovu dobijenog modela izvodi se i zaključak da je sam Lecki vulkanogeni masiv ispod površine terena većeg rasprostranjenja (Slika 41).

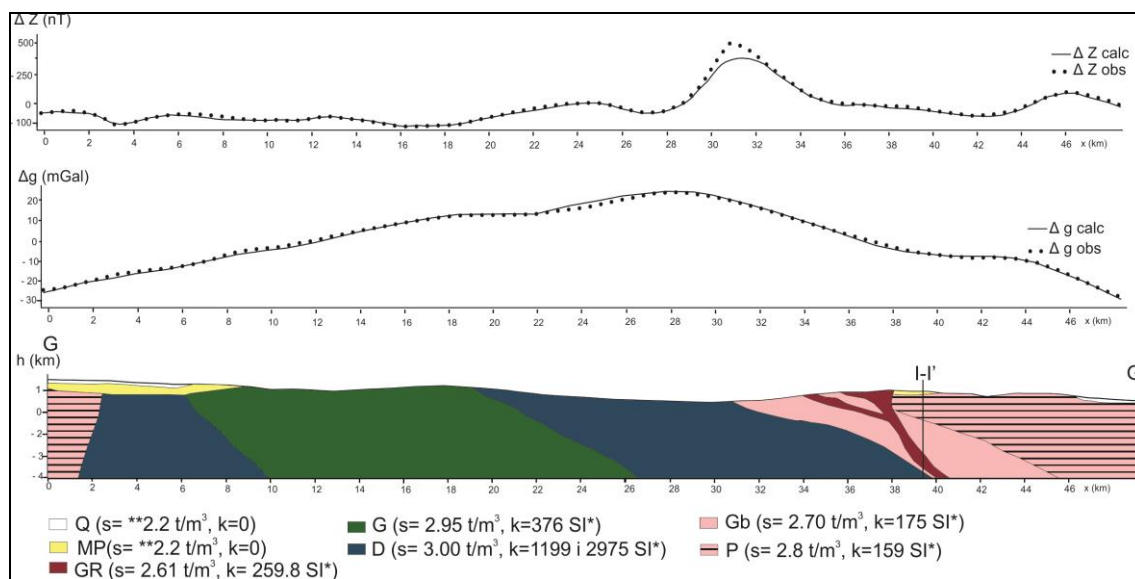


Slika 41. 2D model po profilu FF'; MP - miocensko-pliocenski sedimenti, V - vulkanoklastične stene, L - subvulkanske stene, CS1 - sediment kredne starosti, D - dijabaz, Amph.- uglavnom amfobili, gnajs, mermer, škrljci, kvarciti; *- vrednosti gustina preuzete iz Telford et al. (1990)

Na području Makedonije, odnosno Demir Kapije 2D modeli prikazani su Slikama 42, 43 i 44. Duž profila GG' gabrovi i dijabazi su modelovani sa različitim vrednostima gustine i susceptibilnosti (Slika 42). Najveći uticaj na odziv anomalija ima dijabaz, s obzirom na visoke vrednosti susceptibilnosti i gustine. Razlike u vrednostima gustine za gabrove i dijabaze su male i iznose 0.05 t/m^3 . Dubina modelovanih sedimenata kvartarne i miocensko-pliocenske starosti iznosi oko 500 m i njihov uticaj na model je

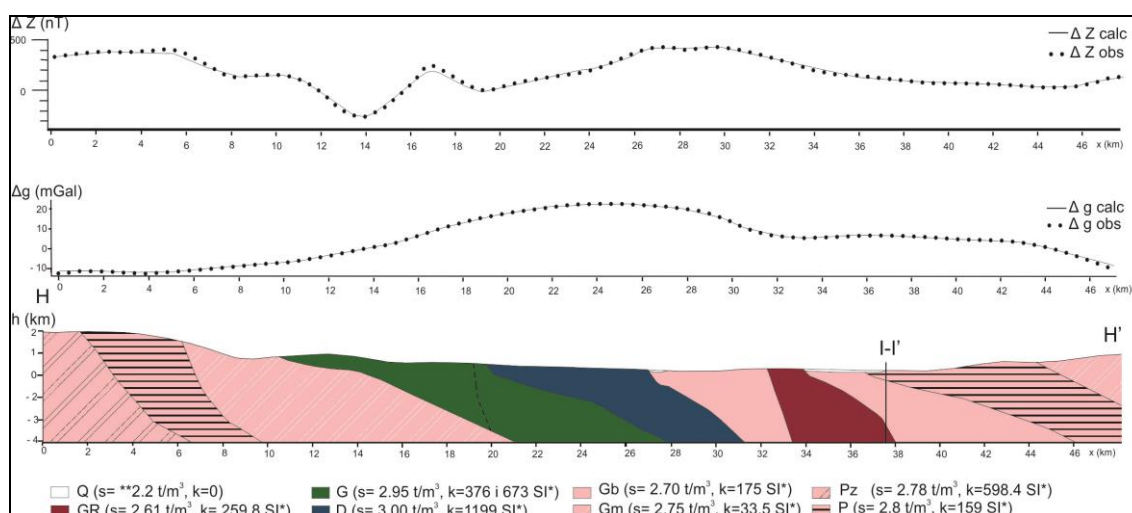
zanemarljiv. Na modelu se može uočiti i sistem navlaka u desnom delu profila. Granična površ ofiolita i SMM definisana je ovim modelom i njen pad iznosi oko 30° na dubini do 2 km, dok u dubljim delovima ovaj kontakt postaje strmiji (oko 60°). Model pokazuje da se ofioliti, odnosno gabrovi, nalaze i ispod miocensko-pliocenskog pokrivača, kao i da SMM leži preko ofiolita IVZ. Granica ofiolita prema zapadu (prema CVZ) ima strmiji pad, koji iznosi između 80° (u najplićim delovima) i 75° (u dubljim delovima). Ovakva promena padnog ugla u odnosu na sva druga modelovana područja može biti posledica naknadne tektonike. Modelovana su i granitoidna tela, koja probijaju i SMM. Ovi granitoidi se mogu povezati sa Štipskim granitom, koji se nalazi severnije od istražnog područja.

Sam model ukazuje na jako veliko rasprostranjanje ofiolita na ovom području. Ofioliti ovde imaju i na površini i ispod nje do 4 puta veće rasprostranjenje nego u severnijim delovima IVZ, što može ukazivati da ovaj pojas tone prema jugu. Sa druge strane, na osnovu modela GG' uočljivo je da ofioliti IVZ tonu prema istoku.



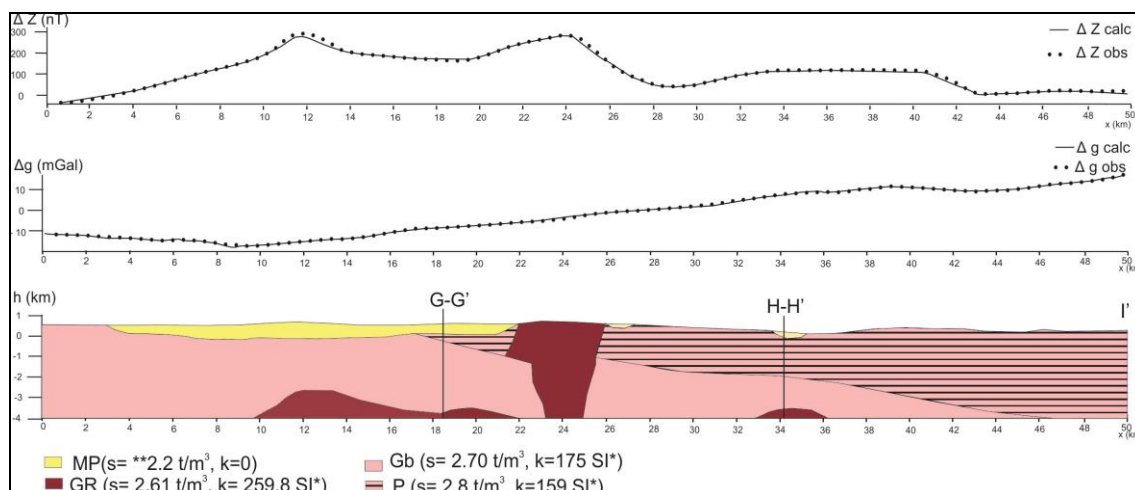
Slika 42. 2D model po profilu GG'; Q- kvartarni sedimenti, MP- miocensko-pliocenski sedimenti, D - dijabaz, G - gabro, GR - granitoidi, Gb - muskovitski gnajsevi, P - škrljci, gnajsevi, amfiboliti, mermeri; *- vrednosti gustina preuzete iz Telford et al. (1990)

Duž profila HH' modelovanje je vršeno kao i u prethodnom slučaju. Metamorfiti SMM su razdvojeni prema dominantnom litološkom članu, s obzirom na velike razlike u vrednostima susceptibilnosti i gustine u okviru metamorfita SMM. Model (Slika 43) ukazuje da je zapadna granica ofiolita ima blaži pad i pada suprotno u odnosu na severeniji deo (profil GG'). Granica IVZ na zapadu ima pad od oko 25° u plićim delovima, do oko 45° na dubinama većim od 1 km. Zapadna granica IVZ ima pad prema istoku. Granica ofiolita IVZ sa SMM je blagog pada od oko 50° i ima nagib prema istoku. Rasprostranjenje granitoidnog tela je nešto veće u odnosu na granitoid koji je modelovan na profilu GG'. Ovaj granitoid se po vrednostima gustine i susceptibilnosti malo razlikuje od okolnih stena, stoga je teško reći da li predstavlja jedinstveno telo ili je sastavljen od više manjih intruziva. Kao i na prethodnom modelu, granitoid i na modelu HH' predstavlja deo Štipskog granita.



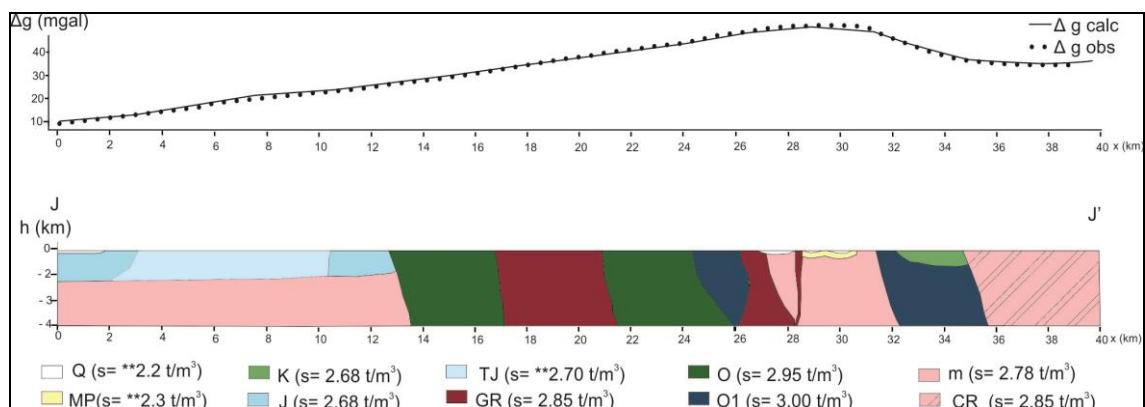
Slika 43. 2D model po profilu HH'; Q - kvartarni sedimenti, D - dijabaz, G - gabro, GR - granitoidi, Gb - muskovitski gnajsevi, Gm - gnjasevi i migmatiti, P - škriljci, gnajsevi, amfiboliti, mermeri, Pz - paleozojski metamorfiti; *- vrednosti gustina preuzete iz Telford et al. (1990)

Model II' (Slika 44) je postavljen kao kontrolni profil, a ne u cilju tumačenja položaja jedinica. On preseca profile GG' i HH' i lociran je van IVZ, a unutar SMM. U podini, na dubinama većim od 4 km, modelovane su stene sa većom gustinom, koja bi odgovarala vrednostima gustina ofiolita. Na osnovu ovog modela jedino se može zaključiti da IVZ ofioliti tonu pod većim uglom na većim dubinama idući prema istoku.



Slika 44. 2D model po profilu II'; MP - miocensko-pliocenski sedimenti, GR - granitoidi, Gb - muskovitski gnajsevi, P - škriljci, gnajsevi, amfiboliti, mermeri; ** - vrednosti gustina preuzete iz Telford et al. (1990)

Na području severne Grčke, odnosno u oblastima Evzoni i Skra, vršeno je modelovanje na osnovu gravimetrijskih podataka, jer kao što je objašnjeno u poglavlju 4, geomagnetski podaci nisu mogli da se iskoriste. Modelovanje je vršeno pod pretpostavkom da nema velikih promena u pružanju ofiolita u Makedoniji i u severnom delu Grčke, s obzirom na malu udaljenost između postavljenih profila. Ofioliti u ovom delu imaju strmiji pad, između 60° i 80° , koji se ne menja sa povećanjem dubine (Slika 45). Obe granice ofiolita, istočna i zapadna, imaju pad prema istoku. Model je u saglasnosti sa prethodnim 2D modelima i pokazuje da ovi ofioliti imaju i veće rasprostranjenje i strmiji pad prema jugu. Fanos (Furka) granit koji probija ofiolite u ovom delu terena je modelovan kao telo jednostavnog oblika, koji je verovatno kompleksniji u prirodi. Na modelu se može videti položaj Cirkum-Rodopa koji ukazuje na navlačenje prema zapadu.



Slika 45. 2D model po profilu JJ'; Q - kvartarni sedimenti, MP - miocensko-pliocensko-eocenski sedimenti, K - mezozojski sedimenti (jursko-kredne starosti), J - jurske vulkano-sedimentne serije, TJ - trijasko-jurski metamorfiti, GR - granitoidi, O - ofiolitski kompleks, uglavnom gabrovi, O1 - ofiolitski kompleks, uglavnom dijabazi, m - metamorfiti i vulkaniti, CR - metamorfiti,; *- vrednosti gustina preuzete iz Telford et al. (1990)

*

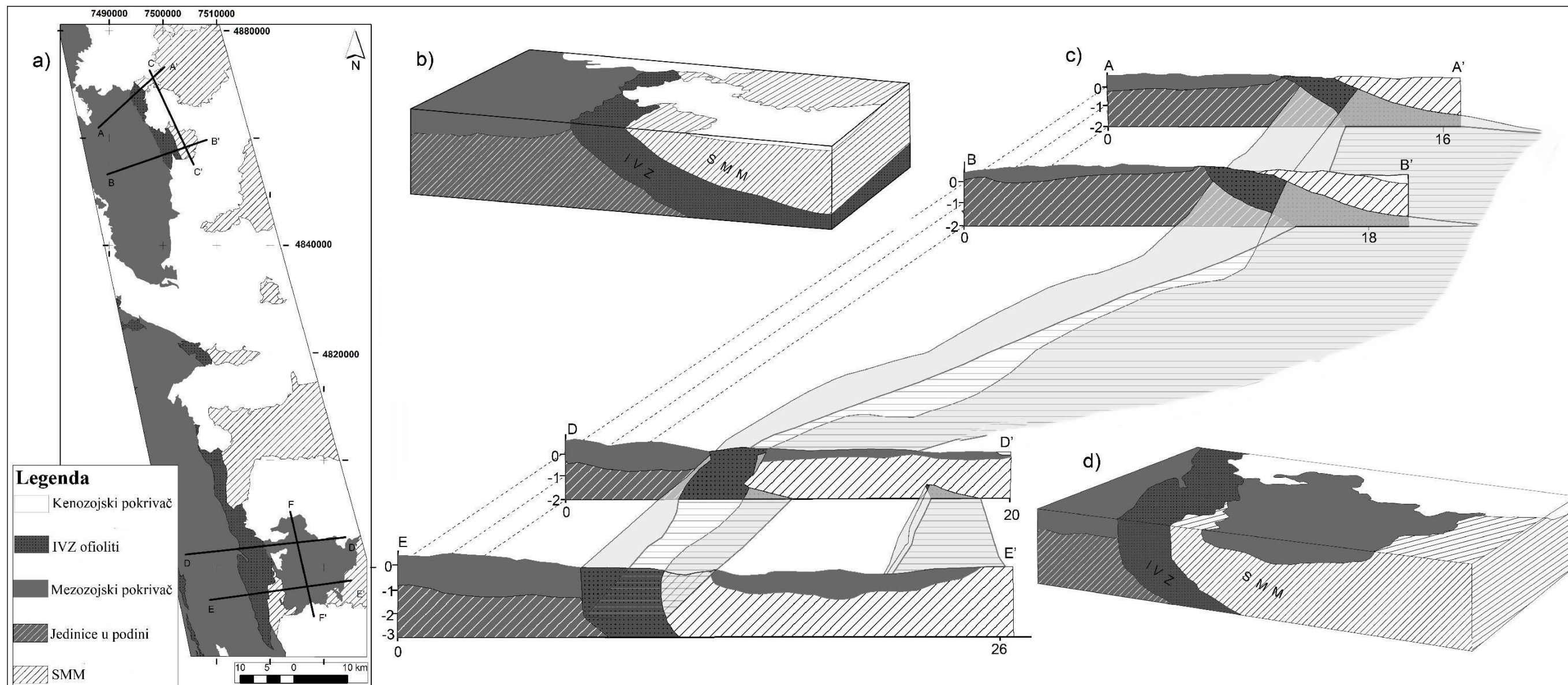
* *

Svi 2D modeli na istraživanom području ukazuju da ofioliti IVZ generalno padaju prema istoku-jugoistoku. Srednja greška između merenih i izračunatih vrednosti gravimetrijskih podataka je oko 0.3 mgal, dok je ova greška kod gemagnetskih podataka manja od 2 nT na teritoriji Srbije i 10 nT na teritoriji Makedonije. Ovako niska greška, uzevši u obzir raspon vrednosti anomalija, ukazuje da je model geofizički pouzdan.

5.3. Pseudo 3 D modeli

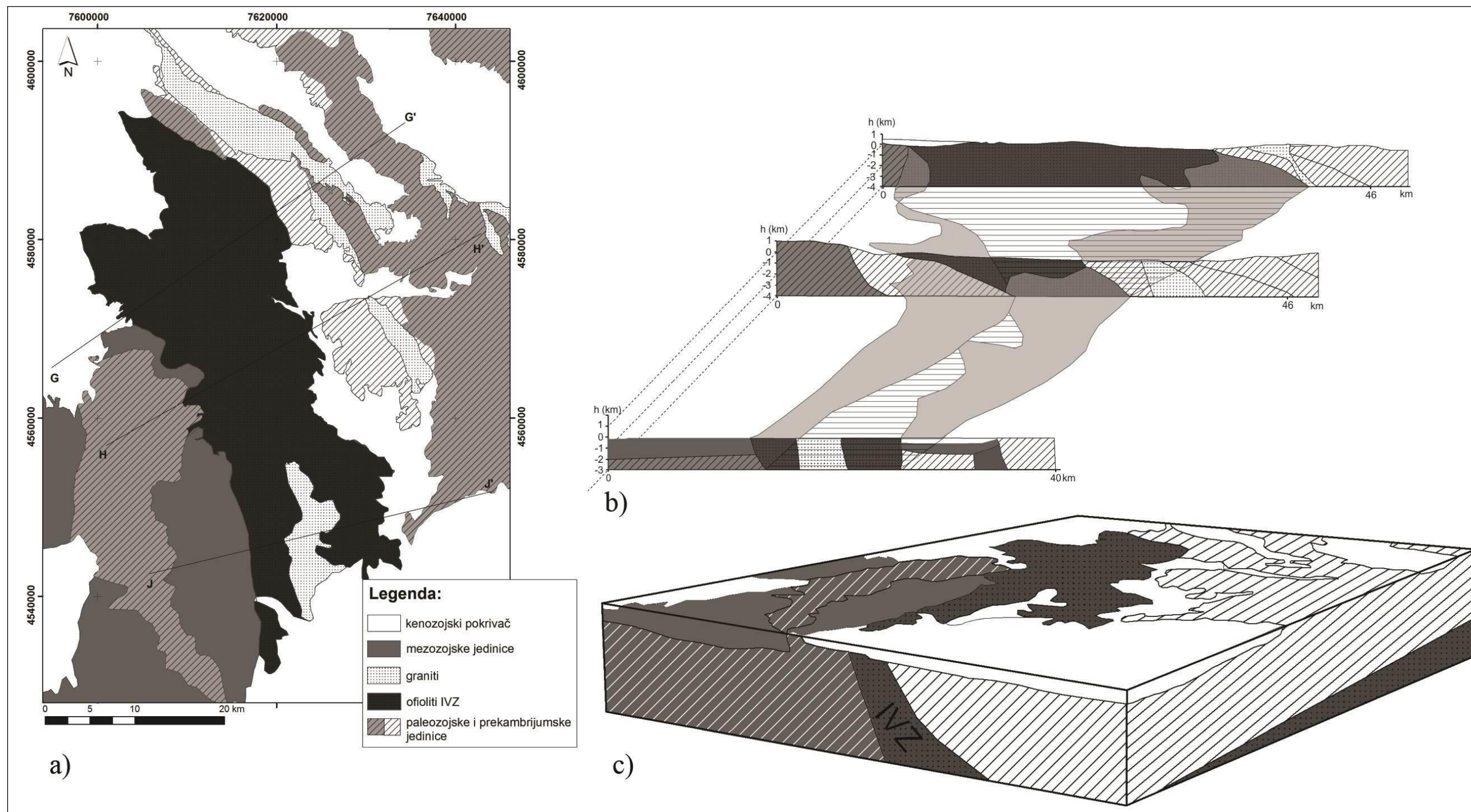
Konačni model je dobijen kombinovanjem svih prethodno opisanih geofizičkih postupaka i postupaka daljinske detekcije, kao i strukturne analize. Model je prikazan na Slici 46 i ukazuje na prisustvo ofiolita koji se ispod površine pružaju u pravcu SSZ-JJI. Ovakav model je u dobroj korelaciji sa pojavama ofiolita IVZ na površini.

Srednji padni ugao ofiolita IVZ u plićim delovima ispod površine iznosi između 70° i 80° . Srednji padni ugao u dubljim delovima je između 30° i 45° . Ovi rezultati ukazuju da je tektonski položaj ofiolita verovatno kontrolisan rasedima navlačenja, koji su ih i smestili na sadašnju poziciju. Rasedi navlačenja su modelovani kao zone kontakta između gablova i karbonata, koji zajedno predstavljaju litološke članove akrecionog melanža. Modeli postavljeni paralelno pružanju IVZ ukazuju na oštre prostorne promene u debljini modelovanih ofiolita ispod površine. Na području Ždraljice debljina ofiolita se kreće od 2.5 km na severu do oko 1 km na jugu. Suprotno tome, u području Kuršumlije ofioliti su deblji na jugu (više od 3.5 km) nego na severu (oko 2 km).



Slika 46. a) Tektionska skica sa položajima profila, b) Pseudo 3D model na području Srbije c) Blok dijagram za područje Ždraljice, d) Blok dijagram za područje Kuršumlje

Na osnovu pseudo 3D modela u području Makedonije i severne Grčke (Slika 47) zaključuje se da, posmatrano od severa prema jugu, ofioliti IVZ imaju kontinuiran pad prema jugu/jugoistoku (Slika 47b), sve do područja Fanos granita, kada pad postaje veoma strm (skoro vertikaln). Uočava se i tonjenje IVZ ofiolita od severa prema jugu. Na području Đevđelijskog masiva u severnoj Grčkoj dolazi do određenih izmena u „ponašanju“ ovog ofiolitskog pojasa. Ofioliti IVZ u ovom delu terena nisu jedinstveno telo kao na područjima lociranim u severnom delu (Srbija i Makedonija), već su sastavljeni od više manjih tela, između kojih se nalaze metamorfiti (Slika 47b). Posebno je izražena promena u padnom uglu ovih tela. U severnoj Grčkoj, a verovatno i sa druge strane granice, u Makedoniji, zasebna tela ofiolita imaju promenljivi pad od zapada prema istoku. Ovo je verovatno posledica ulaska u pojas Cirkum-Rodopa. Sveukupno posmatrano, može se zaključiti da ofioliti na području Demir Kapije pripadaju istom pojasu IVZ ofiolita kojem pripadaju ofioliti Kuršumlije i Ždraljice, dok se za južni deo područja može zaključiti da postoje određena odstupanja u njihovom pružanju i padu, u odnosu na sve druge ofiolite obuhvaćene ovim istraživanjem.



Slika 47. a) Tektionska skica sa položajima profila, b) Pseudo 3D model na području Đevdelije c) Blok dijagram

*

* *

Svi modeli, 2D i pseudo 3D, ukazuju na to da se deo ofiolita IVZ nalazi ispod SMM, kao i da je u plićim delovima kontakt između IVZ i SMM dosta oštar i strm, dok je blažeg pada sa povećanjem dubine. Dužina profila je između 20 i 50 km i modelovanje je vršeno do 12 km dubine, međutim ovakvi modeli su pouzdani do 1/10 dužine profila, pa su zato i prikazani do dubine od 2 - 4 km. U dubljim delovima je moguće utvrditi na kom delu profila se nalaze stene sa većim vrednostima gustine i susceptibilnosti, ali ne i njihovu tačnu poziciju. Zapadna granica IVZ je jasno izražena i precizno je definisana modelom, dok je istočna granica IVZ, odnosno granica IVZ sa SMM, difuzna i nejasna. Ovo implicira da ofioliti IVZ najverovatnije postoje i na dosta većim dubinama, ali se sa povećanjem dubine, smanjuje njihov uticaj na geofizičke anomalije koje uzorkuju.

5.4. Geodinamičke implikacije

Dobijeni model je u saglasnosti sa onim pretpostavkama prema kojima se IVZ pruža odnosno pada ispod metamorfnih stena SMM (Marković et al., 1968; Rakićević i dr., 1973; Malešević i dr., 1974; Rakić i dr., 1969; Ivanovski i dr., 1970; Himmerkus et al., 2006). Sa druge strane, model je u suprotnosti sa drugim viđenjima prostornog položaja IVZ. Kao što je ranije navedeno, Sandulescu (1984) i Schmid et al. (2008) smatraju da je IVZ obdukovana preko SMM, a svoje gledište zasnivaju na rezultatima opservacija strukturno-tektosnih odnosa IVZ i Biharia navlaka.

Postoji najmanje dva moguća geodinamička scenarija kojima može da se objasni pad IVZ prema istoku. Prvi scenario polazi od toga da je za originalno smeštanje IVZ odgovorna obdukcija prema istoku koja je zatim bila praćena podvlačenjem delova IVZ ispod SMM, koja je mogla da se odigra u nekoliko faza. Drugi scenario podrazumeva da IVZ predstavlja ostatke krajnjeg istočnog dela Tetijske okeanske litosfere, koja je, za razliku od zapadnih delova koji su uniformno obdukovani na zapad, bila uključena u kompleksne procese kolizije i prirastanja za evropski kontinent.

Iako ne možemo isključiti potpuno prvi scenario, on je malo verovatan s obzirom da ne postoje jasni terenski dokazi, kao i to da se to ne slaže s modelom koji je prikazan u ovoj disertaciji. Iako je model prikazan do dubine od 2 do 4 km, na osnovu kvalitativnih analiza moguće je zaključiti da su ofioliti IVZ smešteni ispod SMM i u dubljim nivoima. Takav položaj ofiolita IVZ mogao bi da ukaže da ovaj prostorni odnos predstavlja i originalni strukturni odnos između IVZ i SMM, što je u saglasnosti sa drugim predloženim scenarijom. Ovakva geodinamička interpretacija potkrepljena je i drugim petrološkim karakteristikama koje pokazuju ofioliti Balkana. Mnogi autori su ukazali da postoje zakonomerne promene u hemijskom sastavu, a time i u geohemijskom i geotektonskom afinitetu balkanskih ofiolita (prema Faul et al., 2014). Utvrđeno je da ofioliti IVZ pokazuju najizraženiji supra-subdukcioni afinitet u poređenju sa svim ostalim balkanskim ofiolitima (Šarić et al., 2009; Boev et al., 2006; 2013; Božović et al., 2013). Štaviše, relikti ofiolita na Balkanskom poluostrvu pokazuju sve prelaze, od najmanje osiromašenih odnosno, najverovatnije subkontinentalnih (?) peridotita na krajnjem zapadu (Bazylev et al., 2009; Faul et al., 2014) i MOR ofiolita u srednjem delu (ZVZ), do supra-subdukcionih ofiolita duž istočne margine celog pojasa (IVZ).

Predloženi scenario uključuje potpuno drugačije mehanizme smeštanja zapadnih i istočnih ofiolita u ovom području. Prema ovoj interpretaciji, ofioliti ZVZ smešteni su obdukcijom na zapad, što je najverovatnije uzrokovano intraokeanskim subdukcionim procesima. Ovim procesima formirane su velike mase ofiolita koji se odlikuju blago osiromašenim peridotitima i magmatskim stenama MORB-afiniteta (Lugović et al., 1991; Faul et al., 2014). Na ovaj način su uspostavljeni uslovi za formiranje intraokeanskog luka na istočnom delu mezozojskog Tetisa, čime su se najverovatnije na ovom prostoru razvili predlučni i izalučni (*fore arc and back arc*) regioni. Ovi segmenti su se ponašali zasebno tokom poslednjih faza zatvaranja mezozojskog Tetisa, odnosno procesa konvergencije/kolizije.

Način smeštanja ofiolita, u skladu sa dobijenim modelom, prema kome su ofioliti IVZ smešteni ispod SMM u saglasnosti je sa sledećim opservacijama: 1) postoji veoma izražen supra-subdukcioni afinitet bazičnih stena vezanih za ofiolite IVZ (Resimić-Šarić et al., 2005;2006; Šarić et al., 2009), 2) ofioliti IVZ na istočnim obroncima Kopaonika

sadrže boninite, koji su tipični predstavnici magmatizma ispred vulkanskog luka (Marroni et al., 2004), 3) geohemijski afinitet kalkoalkalnih do adakitskih stena Đevđelijskog kompleksa takođe ukazuje na aktivne subdukcione procese (Božović et al., 2013) i 4) neznatno rasprostranjenje peridotita i metamorfne podloge, u odnosu na ostale ofiolite Balkanskog poluostrva.

Na osnovu interpretacije koja proizilazi iz modela ove studije može se izvesti zaključak da nisu svi ofioliti smešteni načinom karakterističnim za Tetijski tip ofiolita (Moore, 1982; Beccaluva et al., 2004). Umesto toga, model ukazuje na to da je istočni deo ovih ofiolita, odnosno IVZ, smešten akrecionim mehanizmom (prirastanjem), koji je sličniji Kordiljerskom odnosno "Franciscan" tipu smeštanja (Moore, 1982; Nicolas, 1989; Stern and Bloomer, 1992; Dilek and Furnes, 2011).

Vrlo bitan dokaz u korist geofizičko-geološkog modela i geodinamičkih implikacija prikazanih u ovoj doktorskoj disertaciji dolaze iz istraživanja ksenolita gornjeg omotača pronađenih u paleogenim alkalnim bazaltima (Cvetković et al., 2013). Alkalni bazalti koji nose ksenolite nalaze se u istočnoj Srbiji, oko 120 km istočno od Kuršumlije. U radovima, Cvetković et al. (2004; 2007a; 2007b), prikazane su detaljne mineraloške i geohemijske karakteristike ksenolita i zaključeno je da je omotač ispod istočne Srbije daleko više osiromašen bazaltnom komponentom od tipičnog subkontinentalnog omotača ispod evropskog kontinenta. Najvažnija geodinamička implikacija ovih proučavanja bila je da je segment litosferskog omotača ispod istočne Srbije sličniji subokeanskoj nego subkontinentalnoj litosferi. Posebna subgrupa ortopiroksenom-bogatih ksenolita pružila je dodatne, nezavisne dokaze, jer je utvrđeno da su ovi ksenoliti rezultat kristalizacije magme boninitskog sastava (Cvetković et al., 2007b). Ovo ide u prilog interpretaciji da je barem deo omotača ispod istočne Srbije suprasubdukcionog karaktera, a to znači da je po sastavu veoma sličan ofiolitima IVZ.

Dodatna potvrda navedenom gledištu dolazi i iz proučavanja petrogeneze ultrakalijskih stena s lamprofirskim afinitetom, koje se javljaju duž glavne ose Balkanskog poluostrva, s retkim pojavama unutar Karpatko-balkanida istočne Srbije (Prelević et al., 2005). Ove lave su formirane pri postkolizionim procesima, koji su se dešavali najmanje pre 60 miliona godina, a nakon poslednje aktivne subdukcije u ovom regionu.

Najvažnija geohemijska karakteristika lamprofira jeste da oni nastaju kristalizacijom iz magmi formiranih stapanjem omotača koji je obogaćen vodom i nekompatibilnim elementima (npr. Rb, Cs, K i drugi), ali koji je u prethodnim epizodama ekstremno osiromašen bazaltnom komponentom (Foley et al., 2006; Prelević and Foley, 2007).

Dokazi proistekli iz istraživanja ksenolita gornjeg omotača ispod sadašnje istočne Srbije, kao i dokazi dobijeni petrogenetskim proučavanjima lamprofirskih lava u Srbiji, ukazuju da gornji omotač, koji se, grubo uzev, nalazi ispod aksijalnog dela Balkanskog poluostrva, pokazuje sličnosti u sastavu supra-subdukcionom okeanskom gornjem omotaču. Sve ovo navodi na zaključak da su određeni delovi intraokeanskog gornjeg omotača tektonski prirasli pri dnu litosfere tokom poslednjih procesa konvergencije-kolizije.

6. ZAKLJUČAK

Utvrđeni prostorni položaj ofiolita Istočne vardarske zone rezultat je integracije svih podataka dobijenih transformacijama polja u cilju utvrđivanja granica uzročnika anomalija u horizontalnoj ravni na različitim dubinama, modelovanjem u vertikalnoj ravni, kao i terenskim strukturko-geološkim istraživanjima. Prilikom utvrđivanja rasprostranjenja u horizontalnoj ravni korišćene su standardne procedure transformacija polja, dok su prilikom izrade 2D modela korišćene merene vrednosti gustine, susceptibilnosti i remanentne magnetizacije. Rezultat ovog istraživanja je izrada jedinstvenog modela ofiolita Istočne vardarske zone, kroz utvrđivanje prirode neposrednog kontakta ove jedinice sa Srpsko-makedonskom masom.

U severnom delu IVZ, na teritoriji Srbije, ofioliti IVZ nalaze se ispod SMM, pri čemu je kontakt na području Kuršumlje obeležen i normalnim rasedanjem. U centralnom delu istraživanog područja, dobijeni model ukazuje na to da IVZ pojas ofiolita pada prema jugoistoku i da dostiže veće dubine nego u severnom delu. U južnom delu (Makedonija i severna Grčka) istočna granica IVZ naglo menja svoj karakter i postaje strmija.

2D i pseudo 3D modeli ukazuju da ofioliti IVZ tonu prema istoku-jugoistoku uz promenljive vrednosti padnog ugla. Dobijeni 2D modeli su pouzdani do dubine od 3 - 4 km. Rezultati dobijeni kvalitativnom analizom, ukazuju da se ofioliti IVZ najverovatnije prostiru na mnogo većim dubinama.

Navedene informacije su iskorišćene za doprinos postojećim interpretacijama geodinamičkih događaja od mezozoika do danas u ovom delu Balkanskog poluostrva. Predloženim modelom u velikoj meri su rasvetljeni geodinamički i geološki procesi, koji su doveli do formiranja Istočne vardarske zone. Dobijeni geofizičko-geološki modeli ukazuju da je način smeštanja ofiolita IVZ bio najverovatnije vezan za procese prirastanja, što je u suprotnosti sa ostalim ofiolitima Balkanskog poluostrva, koji su po svemu sudeći uniformno obdukovani prema zapadu. Rezultati ovog modelovanja stoje u suprotnosti sa stanovištem da je okean Tetis zatvoren jedinstvenom obdukcijom na zapadu i istoku (Schmid et al., 2008). Ovaj model, međutim, ne isključuje mogućnost da su u nekim područjima delovima IVZ navučeni preko SMM.

Model koji je prikazan u ovoj disertaciji svakako ima i svoja ograničenja. Primenjenom metodologijom nije moguće potpuno utvrditi precizan položaj ofiolita na većim dubinama. Da bi se dobio pouzdaniji podatak o položaju ofiolita na većim dubinama, neophodno je uključiti i seizmička istraživanja na ovom prostoru. Takvi podaci, međutim, do danas, ne postoje. Ovaj deo ostaje neobjašnjen do kraja i može se dalje proučavati uz uključivanje dodatnih istraživanja i metoda.

Scenario po kojem su IVZ ofioliti jednim delom prirasli uz evropsku kontinentalnu ploču podržan je podacima nezavisnih petroloških i geochemijskih studija o ksenolitima i lamproitskim lavama. Ove informacije ukazuju da su neki delovi gornjeg omotača ispod šavne zone mezozojskog Tetisa po sastavu slični okeanskom supra-subdukcionom gornjem omotaču.

Primenjena metodologija istraživanja se pokazala kao veoma korisna. Iako u disertaciji nije korišćen nov metodološki ili do sada nepoznat postupak, kombinacija ovih metoda, kao i ovaj način primene kvalitativne analize pokazali su se pogodnim za rešavanje geotektonskih problema i određivanje, odnosno bližu rekonstrukciju odnosa geotektonskih jedinica.

Rezultati ovog istraživanja trebalo bi daju doprinos razjašnjavanju načina smeštaja ofiolita IVZ, što može da bude od ključne važnosti za rekonstrukciju zatvaranja mezozojskog Tetisa, što je tačka na koju se oslanja razumevanje čitave geološke istorije ovog dela Evrope.

7. LITERATURA

- Anders, B., Reischmann, T., Poller, U., Kostopoulos, D., 2005. *Age and origin of granitic rocks of the eastern Vardar Zone, Greece: new constraints on the evolution of the Internal Hellenides*, Journal of the Geological Society, London 162, 857-870, doi: 10.1144/0016-764904-077.
- Baranov, V., 1957. *A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies*, Geophysics, 22, 359383.
- Baranov, V. and Naudy, H., 1964. *Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole*. Geophysics, 29, 67-79
- Bazylev, B. A., Popević, A., Karamata, S., Kononkova, N., Simakin, S., Olujić, J., Vujnović, L., Memović, E., 2009. *Mantle peridotites from the Dinaridic ophiolite belt and the Vardar zone western belt, central Balkan: a petrological comparison*, Lithos 108, 37-73, doi:10.1016/j.lithos.2008.09.011.
- Bébian, J., Baroz, J., Caperdi, S., Venturelli, G., 1987. *Magmatisme basique associée à l'ouverture d'un bassin marginal dans les Hellenides internes au Jurassique*, Ofioliti 12, 53–70.
- Beccaluva, L., Bianchini, G., Bonadiman, C., Siena, F., Vaccaro, C., 2004. *Coexisting anorogenic and subduction-related metasomatism in mantle xenoliths from the Betic Cordillera (southern Spain)*, Lithos 75, 67-87, doi: 10.1016/j.lithos.2003.12.015.
- Bilibajkić, P., Mladenović, M., Mujagić, S., Rimac, I., 1979. *Tumač za gravimetrijsku kartu SFR Jugoslavije - Bugeova anomalija - 1:500 000*. Savezni geološki institut
- Bleahu, M., Lupu, M., Patrulius, D., Bordea, L., Stefan, A., Panin, S., 1981. *Structures of the Apuseni Mts: Bucharest, Romania*, 12th Congress of Carpatho-Balkan Geological Association. Buchares,80.

- Boev, B., Lepitkova, S., Sijakova-Ivanova, T., 2006. *The age of the Demir Kapija – Gevgelija ophiolite complex*, Mesozoic ophiolite belts of northern part of the Balkan Peninsula. Belgrade-Banja Luka, 15-18.
- Boev, B., Prelević, D., Božović, M., Erić, S., Cvetković, V., 2013. *Olivine websterite veins cutting the Rabrovo serpentinites (South Macedonia): New evidence of the arc setting of the East Vardar ophiolites*, Contributions, Section of Natural, Mathematical and Biotechnical Sciences 34, br. 1-2, 69-81.
- Bortolotti, V., Marroni, M., Nicolae, I., Pandolfi, L., Principi, G., Saccani, E., 2002. *Geodynamic Implications of Jurassic Ophiolites Associated with Island-Arc Volcanics, South Apuseni Mountains, Western Romania*, International Geology Review 44, 10, 938-955.
- Boudier, F., and Nicolas, A., 1985. *Harzburgite and lherzolite subtypes in ophiolitic and oceanic environments*, Earth and Planetary Science Letters 76, 84-92, doi: 10.1016/0012-821X(85)90150-5.
- Božović, M., Prelević, D., Romer, R., Barth, M., Bogaard, P. V. D., Boev, B., 2013. *The Demir Kapija Ophiolite, Macedonia (FYROM): a Snapshot of Subduction Initiation within a Back-arc*, J. Petrology, 54,7, 1427-1453, doi: 10.1093/petrology/egt017.
- Brković T., Radovanović Z., Pavlović Z., Dimitrijević M., 1978. *Tumač za Osnovnu geološku kartu SFRJ, List Kragujevac (K 34-138)*, Beograd, Savezni geološki institut (with English abstract).
- Brongniart A., 1813. *Essai d'une classification mineralogique des roches melanges*, Journal des Mines, Paris, v. 199, p. 5-48
- Brown, S. A. M. and Robertson, A. H. F., 1994. *New structural evidence from the Mesozoic–Early Tertiary Paikon Unit, Northern Greece*. Bulletin of the Geological Society of Greece, XXX (1), 159–170.

- Brown, S. A. M. and Robertson, A. H. F., 2003. *Sedimentary geology as a key to understanding the tectonic evolution of the Mesozoic-Early Tertiary Paikon Massif, Vardar suture zone, N Greece*. *Sedimentary Geology* 160, 179-212.
- Brown, S. A. M. and Robertson, A. H. F., 2004. *Evidence for Neotethys rooted within the Vardar suture zone from the Voras Massif, northernmost Greece*. *Tectonophysics* 381, 143-173.
- Butler, D. K., 1984. *Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities*. *Geophysics*, 49, 1084-96
- Chailas, S., Tzani, A., Kranis, H. and Karmis, P., 2010. *An investigation of the active tectonics in central-eastern mainland Greece with imaging and decomposition of topographic and aeromagnetic data*, *Bull. Geol. Soc. Greece*, 43 (4), 1919-1929.
- Christofides, G., Soldatos, T., Koroneos, A., 1990. *Geochemistry and evolution of the Fanos granite, N. Greece*. *Mineralogy and Petrology*, 43, 49-63, doi: 10.1007/BF01164221.
- Coleman, R., G., 1977. *Ophiolites-Ancient oceanic litosphere?: Minerals and rocks*, Berlin, Springer-Verlag, v. 12, p. 229
- Coleman, R. G., 1981. *Tectonic setting for ophiolite obduction in Oman*, *J. Geophys. Res.* 86, 2497-2508.
- Coleman, R. G., 2000. *Prospecting for ophiolites along the California continental margin*, in Dilek, Y., et al., eds., *Ophiolites and oceanic crust: New insights from field studies and Ocean Drilling Program: Geological Society of America Special Paper 349*, p. 351-364
- Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R. D., 2005. *Differential reduction to the pole*, *Computers & Geosciences* v.31, p.989-999.

- Cooper, G. R. J., Cowan, D. R. D., 2006. *Enhancing potential field data using filters based on the local phase*, Computers & Geosciences, 32, 1585–1591, doi: 10.1016/j.cageo.2006.02.016.
- Cooper, G. R. J., Cowan, D. R. D., 2008. *Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics*. Geophysics 73, 3, H1-H4, <http://dx.doi.org/10.1190/1.2837309> .
- Cvetković, V., Prelević, D., Downes, H., Jovanović, M., Vaselli, O., Pécskay, Z., 2004. *Origin and geodynamic significance of Tertiary postcollisional basaltic magmatism in Serbia (Central Balkan Peninsula)*, Lithos 73, 161-186, doi: 10.1016/j.lithos.2003.12.004.
- Cvetković, V., Downes, H., Prelević, D., Lazarov, M., Resimić-Šarić, K., 2007a. *Geodynamic significance of ultramafic xenoliths from Eastern Serbia: Relics of sub-arc oceanic mantle?*, Journal of Geodynamics (Elsevier) 43, 504-527, doi:10.1016/j.jog.2006.11.003.
- Cvetković, V., Lazarov, M., Downes, H., Prelević, D., 2007b. *Modification of the subcontinental mantle beneath East Serbia: Evidence from orthopyroxene-rich xenoliths*, Lithos 94, 90-110, doi: 10.1016/j.lithos.2005.12.016.
- Cvetković, V., Poli, G., Christofides, G., Koroneos, A., Pecskey, Z., Resimić-Šarić, K., Erić, V., 2007. *The Miocene granitoid rocks of Mt. Bukulja (central Serbia): evidence for Pannonian extension-related granitoid magmatism in the northern Dinarides*, European Journal of Mineralogy 19, 4, 513-532, <http://dx.doi.org/10.1127/0935-1221/2007/0019-1736>.
- Cvetković, V., Šarić, K., Prelević, D., Genser, J., Neubauer, F., Höck, V., Quadt, A., 2013. *An anorogenic pulse in a typical orogenic setting: The geochemical and geochronological record in the East Serbian latest Cretaceous to Palaeocene alkaline rocks*, Lithos (Elsevier) 180, 181-199, doi: 10.1016/j.lithos.2013.08.013.

- De Wet, A. P., 1989. *Geology of part of the Chalkidiki peninsula, northern Greece*. Cambridge: Doctoral thesis, Wolfson College.
- Dilek, Y. and Furnes, H., 2011. *Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere*, Geological Society of America Bulletin 123, 387–411, doi: 10.1130/B30446.1.
- Dimitrijević, M. D. and Dimitrijević, M.N., 1987. *The Paraflysch of the Central Vardar Subzone*. The Turbiditic Basins of Serbia (Serbian Academy of Science and Arts), 79-100.
- Dimitrijević, M. D., 1997. *Geology of Yugoslavia*, Belgrade: Borex, Special Publications.
- Dimitrijević, M. D., 2001. *Dinarides and the Vardar Zone: A short review of the geology*, Acta Vulcanologica, 13 (1-2), 1-8.
- Dolić, D., Kalenić, M., Lončarević, Č., Hadži-Vuković, M., Marković, B., Dimitrijević, M., Radoičić, R., 1978. *Osnovna geološka karta i Tumač za Osnovnu geološku kartu SFRJ, List Paraćin (K 34-7)*, Beograd, Savezni geološki institut (in Serbian with English abstract).
- Eppelbaum, L., 2015. Quantitative Interpretation of Magnetic Anomalies from Thick Bed, Horizontal Plate and Intermediate Models Under Complex Physical-Geological Environments in Archaeological Prospection, Archaeological Prospection, Wiley Online Library, DOI: 10.1002/arp.1511
- Faul, U. H., Garapić, G., Lugović, B., 2014. *Subcontinental rift initiation and ocean-continent transitional setting of the Dinarides and Vardar zone: Evidence from the Krivaja–Konjuh Massif, Bosnia and Herzegovina*, Lithos (Elsevier) 202-203, 283-299, doi : 10.1016/j.lithos.2014.05.026
- Foley, S. F., Andronikov, A.V., Jacob, D. E., Melzer, S., 2006. *Evidence from Antarctic mantle peridotite xenoliths for changes in mineralogy, geochemistry and geothermal gradients beneath a developing rift*, Geochim. Cosmochim. Acta 70, 3096–3120, doi: <http://doi.org/10.1016/j.gca.2006.03.010>.

- Flower, M. F. J., 2003. *Ophiolites, historical contingency, and the Wilson cycle*, in Dilek, Y., and Newcomb, S., eds., *Ophiolite concept and the evolution of geological thought: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 373*
- Harrison, C., 1976. Magnetization of the oceanic crust, *Geoph. J. R. astr. Soc.*, 47, 257-284
- Himmerkus, F., Reischmann, T., and Kostopoulos, D. K., 2006. *Late Proterozoic and Silurian basement units within the Serbo-Macedonian Massif, northern Greece: The significance of terrane accretion in the Hellenides*, in Mountrakis, D., and Robertson, A.H.F., eds., *Tectonic Development of the Eastern Mediterranean Region: Geological Society [London] Special Publications 260*, p. 35–50.
- Hinsbergen, D. J. J., Hafkenscheid, E., Spakman, W., Meulenkamp, J. E., Wortel, M. J. R., 2005. *Nappe stacking resulting from subduction of oceanic and continental lithosphere below Greece*, *Geology* 33, 325–328, doi: 10.1130/G20878.1.
- Hoeck, V. and Ionescu, C., 2006. *Basic and intermediate volcanics in the Eastern Carpathians (Rarău, Romania): are all of them ophiolites?* In: Sudar, M., Ercegovac, M., Grubić, A. (Eds.), *Proceedings of the XVIIIth Congress of the Carpathian–Balkan Geological Association Belgrade 2006*, pp. 219–221.
- Ionescu, C. and Hoeck, V., 2004. *Mesozoic volcanics from Deleni-6042 and other deep wells in the Transylvanian Depression and their relation to those from the South Apuseni Mts. (Romania)*, *Berichte Institut Erdwissenschaft Karl - Franzens - Universität Graz*, 9, 199-201, ISBN 978-973-610-913-3.
- Ivanovski, T., 1970. *Tumač za Osnovnu geološku kartu SFRJ, List Gevgelija, Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000*, Savezni geološki institut, Beograd. (in Macedonian).
- Jelínek, V. 1966. *A high sensitivity spinner magnetometer*, *Stud. Geophys. Geodaet.*, 10, 58-78. Praha.

- Jelínek, V. 1973. *Precision A.C. bridge set for measuring magnetic susceptibility and its anisotropy*, Stud. Geophys. Geodaet., 17, 36-48. Praha
- Karamata, S. and Krstić, B., 1996. *Terranes of Serbia and neighbouring areas*. in: Knežević-Djordjević V. & Krstić B. (Eds.): *Terranes of Serbia. The formation of the geologic framework of Serbia and the adjacent regions*. University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, 25—40.
- Karamata, S., 2006. *The geological development of the Balkan Peninsula related to the approach, collision and compression of Gondwanan and Euroasian units*. in: Eds Robertson, A. H. F. & Mountrakis, D.: *Tectonic Development of the Eastern Mediterranean Region*. Geological Society, London, Special Publication, 260, 155-178.
- Kissel, C., Speranza, F., Islami, I., and Hyseni, A., 1995. *Paleomagnetic evidence for Cenozoic clockwise rotation of External Albanides*, Earth and Planetary Science Letters, 129, 121-134
- Koroneos A., Poli G., Cvetković V., Christofides G., Krstić D., Pécskay Z. 2011. *Petrogenetic and tectonic inferences from the study of the Mt Cer pluton (West Serbia)*. Geol. Mag. 148 (1): 89 – 111, doi:10.1017/S0016756810000476
- Krešić, N., 1995. *Remote Sensing of Tectonic Fabric Controlling Goundwater Flow in Dinaric Karst*. Rem. Sens. Environ., 53(2): 85-90.
- Lepitkova, S., 2000. *Petrološki, geohemijski i izotopski proučavanja na peridotitite od vnatresniot dinarski ofiolitski pojas vo Republika Makedonija*. PhD dissertation, Kiril and Metodij University of Skopje, 333 pp.
- Li, X., 2008. *Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: observations and considerations*. Lead. Edge 27, 990–1002
- Lu, R. S., Mariano, J., Willen, D. E., 2003. *Differential reduction of magnetic anomalies to the pole on a massively parallel computer*. Geophysics, 68 (6): 1945-1951.

- Lugović, B., Altherr, R., Raczek, I., Hoffmann, A., Majer, V., 1991. *Geochemistry of peridotites and mafic igneous rocks from the Central Dinaric ophiolite belt, Yugoslavia*. Contributions to Mineralogy and Petrology 106, 201–216, doi: 10.1007/BF00306434.
- Malešević, M., Vukanović, M., Brković, T., Karajičić, Lj., Obradinović, Z., Stanisavljević, R., Dimitrijević, M., Urošević, M., 1974. *Tumač za Osnovnu geološku kartu SFRJ, List Kuršumilja (K 34-31), Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000*, Savezni geološki institut, Beograd. (in Serbian with English abstract)
- Marković, B., Urošević, M., Pavlović, Z., Terzin, V., Jovanović, Ž., Karović, Ž., Vujsić, T., Antonijević, R., Malešević, M., Rakić, M., 1968. *Tumač za Osnovnu geološku kartu SFRJ, List Kraljevo, Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000*, Savezni geološki institut, Beograd. (in Serbian with English abstract).
- Marković, M., Pavlović, R., Čupković, T. 2003. *Geomorfologija*, Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva
- Marović M., Đoković I., Pešić L., Radovanović S., Toljić M., Gerzina N. 2002. *Neotectonics and seismicity of the southern margin of the Pannonian Basin in Serbia*. EGU Stephan Mueller Special Publication Series 3: 277 – 295
- Marović, M., 2010. *Geologija Jugoslavije*, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu
- Marroni, M., Pandolfi, L., Saccani, E., Zelic, M., 2004. *Boninites from the Kopaonik area (southern Serbia): evidences for supra-subduction ophiolites in the Vardar zone*. *Ofioliti* 29, 251–254.
- Mavrides, A., Matarangas, D., Karfakis, J., 1982. *Geological map of Greece, Skra sheet, 1:50.000*, Institute of Geology and Mineral Exploration.
- Mendonça, C. A., Silva, J. B. C., 1993. *A stable truncated series approximation of the reduction-to-the-pole operator*. *Geophysics* 58, 1084–1090.

- Mercier, J., 1966. *Peleogeographie, orogenese, metamorphisme et magmatisme des zones internes des Hellenides en Macedonie (Grece): vue d'ensemble*. Societ Geologie France Bulletin 7, 1020–1049.
- Mercier, J., Kockel, E., Ioannides, K., Maltzaris, F., 1993. *Geological map of Greece, Evzoni sheet, 1:50.000*, Institute of Geology and Mineral Exploration.
- Miller, G. H. and Singh, V., 1994. *Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources*. Journal of Applied Geophysics 32, 213-217, doi:10.1016/0926-9851(94)90022-1.
- Mohanty, C., Baral, D. J. and Malik, J. N, 2004. *Use of Satellite Data for Tectonic Interpretation, NW Himalaya*, Journal of Indian Society of Remote Sensing, Vol. 32, No. 3, pp 241-247.
- Moores, E. M., 1982. *Origin and emplacement of ophiolites*, Reviews of Geophysics 20, no. 4, 735-760, doi: 10.1029/RG020i004p00735.
- Morris, B. and Ugalde, H., 2007. Magnetic remanence constraints on magnetic inversion models, The Leading Edge
- Nicolae, I., 1995. *Tectonic setting of the ophiolites from the South Apuseni Mountains: Magmatic arc and marginal basin*. Romanian Journal of Tectonics and Regional Geology 76, 27–38.
- Nicolas, A., 1989. *Structures of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere*. Petrology and structural geology (Kluwer Academic Publishers), 367, doi: 10.1007/978-94-009-2374-4.
- Pamić, J. 2002. *The Sava-Vardar Zone of the Dinarides and Hellenides versus the Vardar Ocean*. Eclogae Geol. Helv., 94, 1-15.
- Pavlović, R., Čupković, T., Marković, M., 2004. *Daljinska detekcija*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd

- Pearce, J. A. and Cann, J. R., 1973. *Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses*. Earth Planet. Sci. Lett., 19 (2), 290–300.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. J., 1984. *Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks*. Journal of Petrology, 25, 956-83.
- Petrović, D., Cvetkov, V., Vasiljević, I., Cvetković, V., 2015. *A new geophysical model of the Serbian part of the East Vardar ophiolite: Implications for its geodynamic evolution*, Journal of Geodynamics, v.90, p. 1-13; DOI: 10.1016/j.jog.2015.07.003
- Prelević, D., Foley, S., Romer, R. L., Cvetković, V., Downes, H., 2005. *Tertiary ultrapotassic volcanism in Serbia: constraints on petrogenesis and mantle source characteristics*. Journal of Petrology 46, 7, 1443–1487, doi: <http://doi.org/10.1093/petrology/egi022>.
- Prelević, D. and Foley, S. F., 2007. *Accretion of arc-oceanic lithospheric mantle in the Mediterranean: evidence from extremely high-Mg olivines and Cr-rich spinel inclusions from lamproites*. Earth and Planetary Science Letters 256, 120–135, doi: 10.1016/j.epsl.2007.01.018.
- Rakić, M., Hadži-Vuković, M., Kalenić, M., Marković, V., Milovanović, Lj., 1969. *Tumač za Osnovnu geološku kartu SFRJ, List Kruševac (K 34-19), Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000*, Savezni geološki institut, Beograd. (in Serbian with English abstract).
- Rakićević T., Stojanov R., Arsovski M., 1973. *Geology of Prilep sheet* (in Macedonian with English and Russian summary), Fed. geol. surv., 1-65, Beograd.
- Resimić-Sarić, K., Cvetković, V., Balogh, K., 2005. *Radiometric K/Ar data as evidence of the geodynamic evolution of the Zdraljica Ophiolitic Complex (central Serbia)*. Annales Géologiques de la Péninsule Balkanique 66, 73-79.
- Resimić-Šarić, K., Cvetković, V., Balogh, K., Koroneos, A., 2006. *Main characteristics of ophiolitic complexes within the eastern branch of the Vardar zone composite*

terrane in Serbia. International Symposium "Mesozoic ophiolite belts of northern part of the Balkan Peninsula". Belgrade-Banja Luka, 112-115.

Robertson, A. H. F. and Karamata, S., 1994. *The role of subduction accretion processes in the tectonic evolution of the Mesozoic Tethys in Serbia*, Tectonophysics, 234, 73-94.

Robertson A. H. F. and Mountrakis, D. 2006. *Tectonic development of the Eastern Mediterranean region an introduction*, in: Tectonic development of the Eastern Mediterranean region, London: Geological Society of London, Special Publications, doi: 10.1144/GSL.SP.2006.260.01.01.

Robertson, A.H.F., Karamata, S., Šarić, K., 2009. *Overview of ophiolites and related units in the Late Palaeozoic–Early Cenozoic magmatic and tectonic development of Tethys in the northern part of the Balkan region*. Lithos, ISSN: 0024-4937.

Robertson, A. H. F., Trivić, B., Djerić, N., Bucur, I., 2013. *Tectonic development of the Vardar ocean and its margins: Evidence from the Republic of Macedonia and Greek Macedonia*. Tectonophysics 595, 25-54, doi: 10.1016/j.tecto.2012.07.022.

Saccani, E., Beccaluva, L., Photiades, A., Zeda, O., 2011. *Petrogenesis and tectono-magmatic significance of basalts and mantle peridotites from the Albanian-Greek ophiolites and sub-ophiolite mélanges. New constraints for the Triassic-Jurassic evolution of the Triassic-Jurassic evolution of the Neo-Tethys in Dinaride sector*, Lithos, 227-242, doi: 10.1016/j.lithos.2010.10.009.

Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D., Smith, R., 2007. *Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives*. The Leading Edge, 1502-1505.

Salem, A., Williams, S., Fairhead, D., Smith, R., Ravat, D. 2008. *Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivative*. Geophysics 73, 1, L1-L10, doi: 10.1190/1.2799992.

Sandulescu, M., 1984. *Geotectonics of Romania*. Bucurest: Editura Tehnica.

Savezni geološki zavod SFRJ, 1970. Geološka karta 1:500 000. Vojno-geografski institut Beograd.

Savvaidis, A. S., Tsokas, G. N., Papazachos, C. B., Kondopoulou, D., 2000. *A geophysical study of the ophiolite complex and sedimentary basins in the northwest part of the Chalkidiki Peninsula (N. Greece)*, *Surveys in Geophysics*, 21(5):567-595. DOI: 10.1023/A:1006723025183

Schefer, S., Fügenschuh, B., Schmid, S., Egli, Ustaszewski, K., 2007. *Tectonic evolution of the suture zone between Dinarides and Carpatho-Balkan: Field evidence from the Kopaonik region, southern Serbia*, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9, 03891

Schmid, M.S., Bernoulli, D., Fügenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S., Schuster, R., Tischler, M., Ustaszewski, K., 2008. *The Alps-Carpathians-Dinarides-connection: a correlation of tectonic units*. *Swiss Journal of Geosciences*, doi: 10.1007/s00015-008 1247.

Starčević, M., 1991. *Gravimetrijske metode istraživanja*. Beograd: Nauka

Steinmann, G., 1927. *Die ophiolitische Zonen in der mediterranen Keltengebirgen*, 14th International Geological Congress, Madrid, v. 2, p. 638-667

Stern, R. J., and Bloomer, S. H., 1992. *Subduction zone infancy: Examples from the Eocene Izu-Bonin-Mariana and Jurassic California arcs*. *Geological Society of America Bulletin* 104, 1621–1636, doi: 10.1130/0016-7606(1992)104<1621:SZIEFT>2.3.CO;2.

Stampolidis, A., Tsokas, G. N., Elefteriadis, G., Kondopoulou, D. 2000. *Investigation of potential fields anomalies related with the Philippi basin and granitoid intrusion, NE Greece*, *Journal of the Balkan Geophysical Society*, Vol. 3, No 4, p. 59-66

Šarić, K., Cvetković, V., Romer, R. L., Christofides, G., Koroneos, A., 2009. *Granitoids associated with East Vardar ophiolites (Serbia, F.Y.R. of Macedonia and northern Greece): Origin, evolution and geodynamic significance inferred from*

major and trace element data Sr-Nd-Pb isotopes. Lithos, 131-150, doi: 10.1016/j.lithos.2008.09.007

Tassis, G. A., Grigoriadis, V. N., Tziavos, I. N., Tsokas, G. N., Papazachos, C. B., Vasiljević, I., 2013. *A new Bouguer gravity anomaly field for the Adriatic Sea and its application for the study of the crustal and upper mantle structure*, Journal of Geodynamics, Volume 66, p. 38-52.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., 1990. *Applied geophysics*. Cambridge: New York : Cambridge University Press.

User's Guide MFK1-FA (Kappa Bridge), Brno, Czech Republic

User's Guide Spinner JR5, Geofyzika, Brno, Czech Republic

Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, M.C., MacKenzie, C., 2004. *New insights into magnetic derivatives for structural mapping*. The Leading Edge, 116-119, doi: 10.1190/1.1651454.

Vukašinović, S., 2005. *Anomalijsko magnetno polje i geološke karakteristike Republike Srbije (Anomalous magnetic field and geological setting of the Republic of Serbia)*. Belgrade : Geoinstitut.

Zachariadis, P., Kostopoulos, D., Reischmann, T., Himmerkus, F., Matukov, D., Sergeev, S., 2006. *U-Pb ion-microprobe zircon dating of subduction-related magmatism from northern Greece: the ages of the Guevgueli, Thessaloniki and Chalkidiki igneous complex*. Geophysical Research Abstracts 8.

Zachariadis, P., 2007. *Ophiolites of the eastern Vardar Zone, N. Greece*. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität.

Zelić, M., Agostini, S., Marroni, M., Pandolfi, L., Tonarini, S., 2010. *Geological and geochemical features of the Kopaonik intrusive complex (Vardar zone, Serbia)*. Ofioliti, 35(1), 33-47. doi:10.4454/ofioliti.v35i1.385

Biografija

Dragana Petrović rođena je 08. jula 1985. godine u Kruševcu, gde je završila osnovnu i srednju školu. Nakon završene Gimnazije, 2004. godine, upisala je Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu. U toku studija bila je stipendista Fonda za mlade talente Ministarstva omladine i sporta Republike Srbije i kao stipendista Republičkog seizmološkog zavoda Srbije, bila je uključena u rad na projektu *Harmonization of seismic hazard maps for the Western Balkan countries*, finansiranog od strane NATO-a. Od 2009. godine do danas je angažovana kao volonter-demonstrator u nastavi na Rudarsko-geološkom fakultetu. Diplomске akademske studije završila je 2009. godine, odbranom rada “Modeliranje Žagubičkog basena na osnovu geofizičkih i geoloških podataka” i stekla naziv diplomirani inženjer geologije za geofiziku. Iste godine upisala je doktorske studije na studijskom program Geofizika na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Postaje doktorant-stipendista Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, 2010. godine, po projektu osnovnih istraživanja “Magmatski, metamorfni i sedimentni procesi alpskog orogena u centralnom delu Balkanskog poluostva”. U toku doktorskih studija bila je stipendista stručne organizacije geofizičara Society of Exploration Geophysicists. Pored toga, imala je nekoliko značajnih studijskih boravaka, a pohađala je i jedan broj sertifikovanih seminara i treninga vezanih za područje njenog istraživanja, kao i sertifikovani kurs TRAIN (Training and Research for Academic Newcomers) na Univerzitetu u Beogradu, u toku 2015. godine. Imala je tri pozivna predavanja na skupovima, radionicama i seminarima. Stručni ispit za obavljanje poslova izrade projekata i elaborata i izvođenja geoloških istraživanja iz oblasti geofizike položila je 2014. godine. U toku studija objavila je 18 radova.

Od 2011. godine angažovana je na projektu osnovnih istraživanja Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja “Magmatizam i geodinamika Balkanskog poluostrva od mezozoika do danas: značaj za obrazovanje metaličnih i nemetaličnih rudnih ležišta”, kao istraživač-saradnik.

SPISAK RADOVA PROISTEKLIH IZ DOKTORSKE DISERTACIJE:

Kategorija M22

- **Petrović, D.**, Cvetkov, V., Vasiljević, I., Cvetković, V., 2015: *A new geophysical model of the Serbian part of the East Vardar ophiolite: Implications for its geodynamic evolution*, Journal of Geodynamics, v.90, p. 1-13; DOI: 10.1016/j.jog.2015.07.003

Kategorija M34

- **Petrović D.**, 2014: *Gravity model of Eastern Vardar zone ophiolites in Kuršumlja area*, Proceedings XX Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association, Special Issue, Vol 1/2014, Special Sessions, pg. 43, Tirana, Albania

Kategorija M53

- **Petrovic D.**, Mladenovic A., 2011. "*Application of satellite gravity and magnetic data*", MAEGS, 17th Meeting of the Association of European Geological Societies, Belgrade
- **Petrović D.**, 2014: *Geophysical-geological inferences on the geotectonic position of the East Vardar ophiolites*, Comptes rendus des séances de la Société Serbe de géologie pour l' année 2013, Belgrade: Serbian Geological Society; ISSN 0372-9966

Kategorija M64

- **Petrović D.**, Ignjatović S., Vasiljević I., 2015: *Korišćenje potencijalnih polja u modelovanju geoloških sredina*, I kongres geologa BiH, Tuzla - prihvaćen

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Драгана Петровић

број индекса 802/2009

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Просторни положај офиолита Источне вардарске зоне: геофизичко-геолошки модел и његове геодинамичке импликације

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 20.08.2010.

Драгана Петровић

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора **Драгана Петровић**

Број индекса **802/2009**

Студијски програм **геофизика**

Наслов рада „Просторни положај офиолита Источне вардарске зоне:
геофизичко-геолошки модел и његове геодинамичке импликације“

Ментор **др Владица Цветковић**

Потписани/а **Драгана Петровић**

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

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

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 20.08.2025.

Драгана Петровић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Просторни положај офиолита Источне вардарске зоне: геофизичко-геолошки модел и његове геодинамичке импликације

која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 20.08.2015.

Бранимир Јекић

1. Ауторство - Дозвољавање 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. Дозвољавање 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 прераде. Дозвољавање 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. Дозвољавање 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 прераде. Дозвољавање 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. Дозвољавање 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.