

Petrogeneza vrpčastih amfibolita Moslavačke gore

Ladišić, Andreja

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:075530>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Andreja Ladišić

**PETROGENEZA VRPČASTIH AMFIBOLITA
MOSLAVAČKE GORE**

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOLOŠKI ODSJEK

Andreja Ladišić

**PETROGENEZA VRPČASTIH AMFIBOLITA
MOSLAVAČKE GORE**

Diplomski rad
predložen Geološkom odsjeku
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta
Sveučilišta u Zagrebu
radi stjecanja akademskog stupnja
magistra geologije

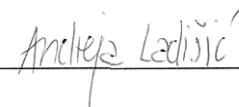
Mentori:
Doc. dr. sc. Zorica Petrinec
Prof. dr. sc. Dražen Balen

Zagreb, 2022.

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja, ANDREJA LADIŠIĆ, studentica Prirodoslovno-matematičkog fakulteta
Sveučilišta u Zagrebu, s prebivalištem na adresi HRASTINSKA CESTA 67,
SAMOBOR, OIB 08341603814, JMBAG 0119037521, ovim putem izjavljujem pod
materijalnom i kaznenom odgovornošću da je moj diplomski rad pod naslovom:
PETROGENEZA VRPČASTIH AMFIBOLITA MOSLAVAČKE GORE,
isključivo moje autorsko djelo, koje je u potpunosti samostalno napisano uz naznaku
izvora drugih autora i dokumenata korištenih u radu.

U Zagrebu, 14.2.2022.



Potpis

Zahvale

doc. dr. sc. Zorici Petrinec, na mentorstvu, na trudu oko pronalaska teme u skladu s mojim interesima, svom utrošenom vremenu, pomoći oko literature, svim savjetima, razumijevanju, susretljivosti, pozitivni i vedrom duhu, na pomoći oko cjelokupne postojeće papirologije vezane uz studentsku razmjenu i još mnogočemu u zadnjih pet godina... izvukli ste 120% iz mene;

prof. dr. sc. Draženu Balenu, na izdvojenom vremenu i pomoći oko izrade „mog drugog pseudopresjeka u životu!“, na brzom i sadržajnom tutorialu Perple_X-a, na realnosti, novim spoznajama i smislu za humor... posebno hvala što me potpuno nesvjesno uvukao u svijet planetarne geologije;

svim ostalim profesorima i djelatnicima Geološkog odsjeka;

obitelji, najdražoj grupi oposuma, mom dragom za vjeru u mene kad je sama nisam imala, najveću podršku i ljubav.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Diplomski rad

PETROGENEZA VRPČASTIH AMFIBOLITA MOSLAVAČKE GORE

Andreja Ladišić

Rad je izrađen na: Mineraloško-petrografskom zavodu, Horvatovac 95, 10 000 Zagreb, u sklopu diplomskog studija Geologije

Sažetak: Vrpčasti amfiboliti Moslavačke gore specifičan su teksturni tip amfibolita, čije je istraživanje obuhvatilo mineralošku, petrografsku i geokemijsku analizu, te izradu petrogenetskog modela. Mikrostrukturnim istraživanjima pretpostavljeni su procesi koji odgovaraju metamorfizmu u uvjetima amfibolitnog facijesa te pojavi taljevine u proučavanim stijenama. Rezultati geokemijskih istraživanja potvrdili su bazičnu prirodu protolita, te odvijanje metamorfnih procesa u geotektonskom okruženju subdukcijske zone. Provedeno geotermobarometrijsko modeliranje u programu Perple_X dalo je vršne vrijednosti P-T uvjeta u rasponu 630 – 700°C i 800 – 950 MPa. Modelom je potvrđeno i odvijanje reakcija parcijalnog taljenja u proučavanom metabazičnom sustavu, a dobivene vrijednosti tlaka i temperatura ukazuju na regionalno-metamorfni događaj koji je morao prethoditi krednoj intruziji granita koja je imala naglašeni LP-HT karakter.

Ključne riječi: Moslavačka gora, vrpčasti amfibolit, geotermobarometrija, parcijalno taljenje, subdukcija

Rad sadrži: 58+VI stranica, 39 slika, 3 tablice, 36 literaturnih navoda

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je pohranjen u: Središnja geološka knjižnica, Geološki odsjek, PMF

Mentor(i): Doc. dr. sc. Zorica Petrinc, PMF, Zagreb

Prof. dr. sc. Dražen Balen, PMF, Zagreb

Ocjenjivači: Doc. dr. sc. Zorica Petrinc, PMF, Zagreb

Prof. dr. sc. Dražen Balen, PMF, Zagreb

Doc. dr. sc. Karmen Fio Firi, PMF, Zagreb

Datum završnog ispita: 21. 2. 2022.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geology

Graduate Thesis

PETROGENESIS OF BANDED AMPHIBOLITES FROM MOSLAVAČKA GORA

Andreja Ladišić

Thesis completed in: Division of Mineralogy and Petrology, Department of Geology, Faculty of Science, Horvatovac 95, 10 000 Zagreb, Croatia

Abstract: Banded amphibolites of Moslavačka Gora are a specific textural type of amphibolites, whose research included mineralogical, petrographic and geochemical analysis as well as the development of a petrogenetic model. Microstructural research gave general idea about processes corresponding to metamorphism in amphibolite facies conditions as well as the appearance of melt in the analysed rock samples. Geochemical research results confirmed the basic nature of protoliths and the onset of metamorphic processes in the subduction zone geotectonic environment. The geothermobarometric modelling done using the *Perple_X* program gave peak P-T condition values in the range of 630 – 700°C and 800 – 950 MPa. The model also confirmed the development of partial melting reactions in the analysed metabasic system. The obtained pressure and temperature values indicate a regional-metamorphic event that must have preceded the Cretaceous intrusion of granite, which had a pronounced LP-HT character.

Keywords: Moslavačka gora, banded amphibolite, geothermobarometry, partial melting, subduction

Thesis contains: 58+VI pages, 39 figures, 3 tables, 36 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Central Library of Geology, Department of Geology, Faculty of Science

Supervisor: Zorica Petrinec, PhD, Assistant Professor, Faculty of Science, Zagreb
Dražen Balen, PhD, Full Professor with tenure, Faculty of Science, Zagreb

Reviewers: Zorica Petrinec, PhD, Assistant Professor, Faculty of Science, Zagreb
Dražen Balen, PhD, Full Professor with tenure, Faculty of Science, Zagreb
Karmen Fio Firi, PhD, Assistant Professor, Faculty of Science, Zagreb

Date of the final exam: 21. 2. 2022.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. GEOLOGIJA MOSLAVAČKE GORE	3
2.1. Kristalin Moslavačke gore.....	3
2.1.1. Magmatske stijene Moslavačke gore	5
2.1.2. Metamorfne stijene Moslavačke gore	6
2.2. Starost stijena Moslavačke gore	8
2.3. Uvjeti metamorfizma.....	9
3. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA.....	11
3.1. Petrografska i mikrostrukturna analiza.....	12
3.2. Spektroskopske metode utemeljene na induktivno spregnutoj plazmi.....	12
3.3. GCDkit i geokemija nemobilnih elemenata	13
3.4. Geotermobarometrijsko modeliranje.....	15
4. REZULTATI.....	17
4.1. Rezultati mikroskopskih istraživanja	17
4.1.1. Amfibolit 142a – Pleterac	17
4.1.2. Amfibolit 140 – Pleterac	20
4.1.3. Amfibolit 141 – Pleterac	22
4.1.4. Amfibolit 150 – Kamenac-potok.....	24
4.1.5. Amfibolit 028 – Kamenjača-Stelovača	27
4.2. Rezultati kemijske analize	30
4.2.1. Obrada geokemijskih podataka: primjena klasifikacijskih dijagrama ...	30
4.2.2. Geotektonski položaj.....	33
4.2.3. Multielementni dijagrami	37
4.2.4. Dvovarijantni varijacijski dijagrami.....	40
4.3. Geotermobarometrijska određivanja pomoću programa Perple_X.....	43
5. RASPRAVA	49
6. ZAKLJUČAK	54
7. LITERATURA.....	56

1. UVOD

Amfiboliti se generalno definiraju kao metamorfne stijene koje se dominantno sastoje od hornblende i plagioklasa. Nastaju u uvjetima amfibolitnog facijesa koji obuhvaća raspon temperatura između 500 i 850°C te tlakova od 500 do 1100 MPa (BUCHER i FREY, 1994). Prelazak iz facijesa zelenog škriljavca u amfibolitni facijes obilježen je nestankom albita, koji prelazi u kiseli plagioklas (oligoklas, 10 – 30 mol. % An) prihvaćajući pritom višak kalcija, te prelaskom aktinolita u hornblendu, koja u strukturu ugrađuje višak alkalija i aluminijskih. Njihov značaj leži upravo u njihovom širokom temperaturnom i tlačnom rasponu stabilnosti. On im omogućuje „pamćenje“ višefaznih i kompleksnih metamorfnih događaja kakvi su zabilježeni na Moslavačkoj gori (BALEN, 1999), ali i procesa unutar same stijene poput parcijalnog taljenja.

Moslavačka gora jedna je od značajnijih pojava izdanjivanja magmatsko-metamornog kompleksa koji čini podlogu rubnog jugozapadnog dijela Panonskog bazena. Geografski se nalazi oko 50 km jugoistočno od Zagreba, a geološki pripada tzv. Savskoj zoni (SCHMID i sur., 2008; USTASZEWSKI i sur., 2010) koja predstavlja suturnu zonu između dva tektonska megabloka – sjevernih Dinarida i Tisija megabloka. Većinski je izgrađena od krednih granitnih i asocijiranih metamorfnih stijena na koje naliježu neogenski sedimenti. Razlomljena metamorfna podloga danas se može pronaći u obliku enklava i blokova unutar ili na rubovima granitnog plutona, a značajno se pojavljuju i migmatiti (PAMIĆ, 1990). Od metamorfnih stijena na Moslavačkoj gori najčešće se nalaze paragnajsevi, tinjčevi i kordijeritni škriljavci i amfiboliti.

Fokus ovog istraživanja su amfiboliti s odabranih lokaliteta Moslavačke gore koji su dio starijeg, intruzijom granita fragmentiranog metamornog kompleksa. Od posebnog je interesa bilo proučavanje karakteristika specifičnog teksturnog tipa, vrpčastih amfibolita, koji već na makroskopskoj razini pokazuju jasnu slojevitost sastava na milimetarskom do centimetarskom mjerilu, s ciljem interpretiranja njihove petrogeneze. Istraživanja su obuhvatila petrografsku i mikrostrukturnu analizu pomoću polarizacijskog mikroskopa. Određen je strukturno-teksturni sklop uzoraka, glavni i sporedni minerali te je ispitana prisutnost alteracija i deformacijskih struktura. Nadalje, pomoću metode induktivno spregnute plazme s masenom i emisijskom spektroskopijom (ICP-MS i -ES) dobiveni su podaci cjelostijenske kemije koji obuhvaćaju glavne elemente te elemente u tragovima,

elemente rijetkih zemalja (REE) i prijelazne metale. Na temelju cjelostijenskih kemijskih podataka, provedena je geokemijska obrada u programskom paketu alata GCDkit s ciljem određivanja karakteristika protolita, geotektonskog smještaja te utjecaja parcijalnog taljenja i kontaminacije na sustav. Na kraju, pomoću programa Perple_X konstruiran je P-T pseudopresjek – fazni dijagram odnosno dijagram stabilnosti različitih mineralnih parageneza u ravnoteži u P-T prostoru, konstruiran za stvarni kemijski sastav analizirane stijene. Pomoću pseudopresjeka i s njime povezanih P-T dijagrama sa izopletama pojedinih minerala te njihovih volumnih udjela, pokušalo se dobiti uvid u P-T evolucijski put odnosno raspon tlaka i temperature te ih usporediti s postojećim literaturnim podacima u svrhu razjašnjavanja petrogeneze proučavanih stijena i njihove uloge u interpretaciji geološkog razvoja Moslavačke gore.

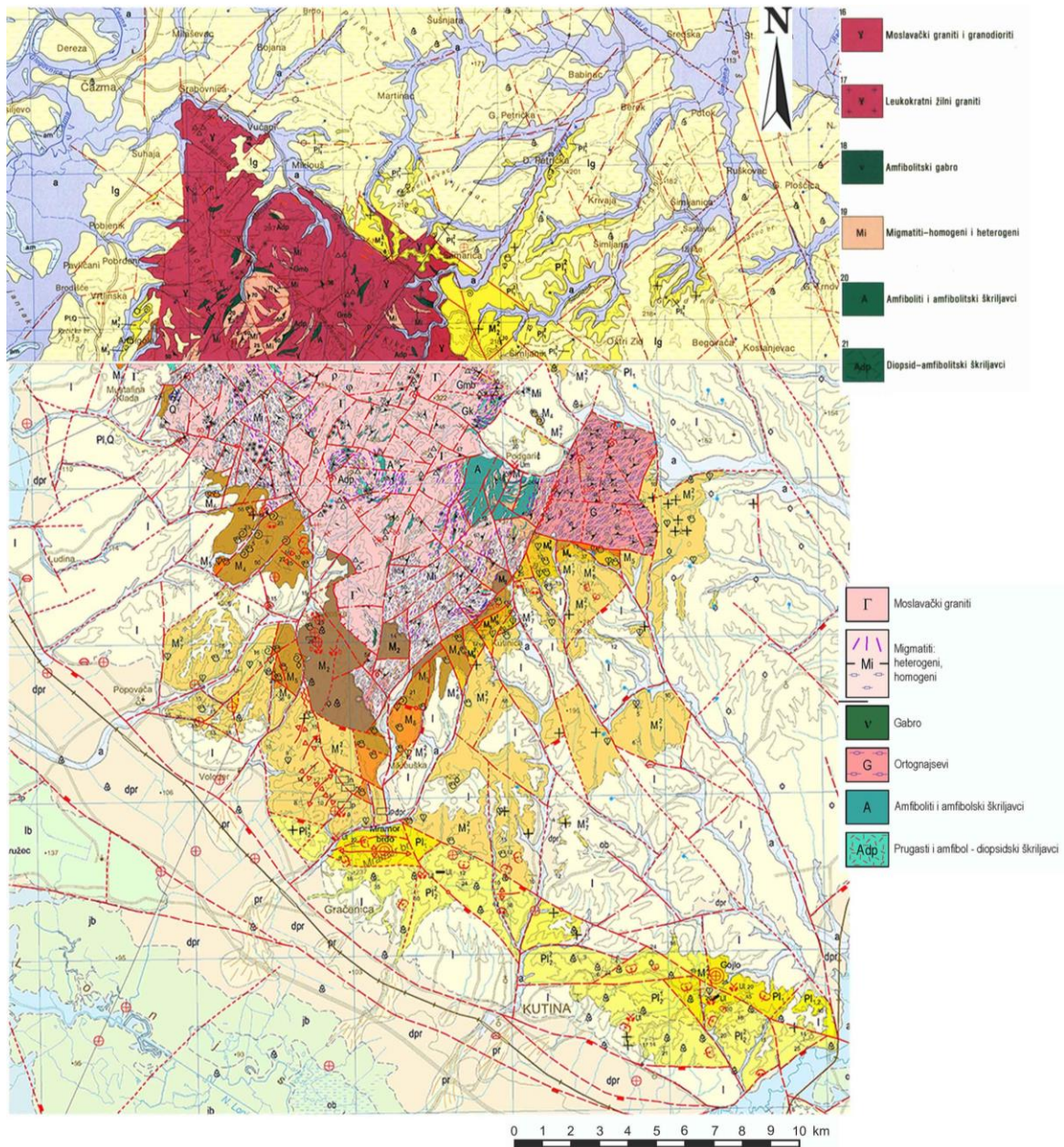
2. GEOLOGIJA MOSLAVAČKE GORE

2.1. Kristalin Moslavačke gore

Moslavačka gora predstavljena je granitno-metamorfnim kompleksom čiji je nastanak vezan uz kolizijske procese afričke i europske tektonske ploče, a njen današnji položaj posljedica je izdizanja panonske podloge duž mladih vertikalnih rasjeda (PAMIĆ, 1990). Prema SCHMID i sur. (2008) i USTASZEWSKI i sur. (2010), Moslavačka gora pripada tzv. Savskoj zoni koja predstavlja gornjokrednu do paleogensku suturnu zonu između sjevernih Dinarida i Tisija megablokova. Savska zona uključuje i tzv. otočne gore sjeverne Bosne (Kozara, Prosara, Motajica) te istočne Hrvatske (Požeška gora).

Moslavačka gora dominantno je građena od granitnog plutona (oko 2/3 površine), a ostatak čine migmatiti, metamorfne stijene srednjeg do visokog stupnja metamorfizma poput gnajseva, metapelita, amfibolita i amfibolskih škriljavaca te ponešto magmatskih stijena (slika 1). Na magmatsko-metamorfni kristalin transgresivno naliježu neogenski sedimenti (KOROLIJA i sur., 1986). Na potezu od Mikleuške do Podgarića na jugoistočnom dijelu Moslavačke gore, sačuvana je granitno-migmatitno-metamorfna sekvenca građena od stijena amfibolitnog facijesa u najnižem dijelu, slijede migmatiti te granit na vrhu (PAMIĆ, 1990). Na ostalim dijelovima Moslavačke gore, metamorfni kristalin pojavljuje se u obliku manjih ili većih enklava (veličine variraju od nekoliko desetaka centimetara do par stotina metara) zarobljenih unutar granitnog tijela. Takva pojava enklava ukazuje da je metamorfni kristalin morao biti dio nekog starijeg metamorfnog kompleksa koji je naknadno fragmentiran intruzijom moslavačkog granita.

U nastavku slijedi sažeti prikaz najčešćih tipova stijena, no posebna pažnja posvećena je amfibolitima, koji su i fokus ovog rada. Opisi stijena, njihovih tekstura i struktura te navedeni najčešći glavni i sporedni minerali preuzeti su iz radova: PAMIĆ (1990), Vodič geološke ekskurzije HGD-a (CRNKO, 1998) te Tumač OGK list Bjelovar (KOROLIJA i sur., 1986). Dio podataka preuzet je i iz neobjavljene doktorske disertacije prof. dr. sc. Dražena Balena (BALEN, 1999).



Slika 1. Isječci Osnovne geološke karte SFRJ 1:100 000. Gornji isječak je dio Lista Bjelovar (KOROLIJA i CRNKO, 1985), a donji dio je isječak Lista Kutina (CRNKO, 1991), koji obuhvaćaju područje Moslavačke gore. Smeđe i žute nijanse predstavljaju neogenske sedimente.



Slika 2. Topografska karta područja Moslavačke gore. Crvene točke označavaju lokalitete prikupljenih uzoraka amfibolita s njihovim brojčanim oznakama. Označeni lokaliteti su kamenolom Pleterac (uzorci 027, 135, 136-1, 137, 139, 140, 141, 142a, 143), Kamenac-potok (150), Kamenjača-Stelovača (028).

2.1.1. Magmatske stijene Moslavačke gore

Magmatske stijene Moslavačke gore u najvećem dijelu (oko 90%) predstavljene su dvotinječastim granitom poznatim pod nazivom „moslavački granit“. Ostatak čine leukokratski žilni graniti te sporadično gabri, bazalti i andeziti.

Moslavački graniti prekrivaju glavninu površine te su uglavnom karakterizirani svjetlosivom do sivom bojom, homogenom teksturom te karakterističnom zrnatom strukturom. Mjestimice, pogotovo na rubnim dijelovima, uočena je folijacija prepoznata po paralelno orijentiranom biotitu (PAMIĆ, 1990; KOROLIJA i sur., 1986). Enklave paragnajseva, migmatitskog gnajsa te amfibolita uklopljene unutar granita, ponegdje imaju oštre, a ponegdje difuzne granice (KOROLIJA i sur., 1986).

Glavni minerali su kvarc, kiseli plagioklas i K-feldspat uz pojavu biotita i muskovita. Značajna je pojava andaluzita i silimanita, a kao akcesorne faze pojavljuju se klorit, sericit, apatit, turmalin, granat te cirkon kao i ponešto opakih minerala.

Žilni graniti nalaze se unutar migmatitskih gnajseva, paragnajseva te granita, a njihov kontakt najčešće je oštar, samo mjestimice difuzan. Izgrađeni su od kvarca, kiselog plagioklasa, mikroklina te ponešto muskovita. Od akcesornih faza nalaze se cirkon, granat, apatit i crni turmalin, a ponegdje i silimanit i andaluzit (CRNKO, 1998).

Ostale magmatske stijene poput, gabra, bazalta, andezita, aplita i pegmatita pojavljuju se uglavnom sekundarno, u obliku žila, leća ili nepravilnih blokova unutar granita i metamorfita.

2.1.2. Metamorfne stijene Moslavačke gore

Metamorfne stijene Moslavačke gore u najvećem dijelu nalaze se u obliku enklava i blokova unutar granitnog tijela, a njihov najveći dio nalazi se u južnim i jugoistočnim dijelovima gore. One predstavljaju stariji dio magmatsko-metamorfno kompleksa koji je pri izdizanju granitnog tijela dijelom ponovno bio metamorfoziran. Od stijena su zabilježeni paragnajsevi, tinjčevi i kordijeritni škriljavci, ponegdje kvarciti i mramori kao predstavnici metasedimentnih stijena, amfiboliti i diopsid-amfibolitski škriljavci, migmatiti te ortognajsevi (KOROLIJA i sur., 1986).

Paragnajsevi najčešće dolaze u obliku uskih zona unutar drugih vrsta škriljavaca ili unutar ortognajseva. Struktura im je najčešće granoblastična do lepidoblastična. Od glavnih minerala sadrže kvarc, plagioklas, biotit i muskovit, a katkad kordijerit. Sporedni minerali su granat, andaluzit i silimanit, a akcesorno se mogu naći apatit, zoisit, rutil i turmalin. Protolit su sedimentne stijene poput pelita, arkoza i grauvaka.

Kordijeritni škriljavci nalaze se kao tanji proslojci, centimetarskih do metarskih dimenzija, uz paragnajseve i amfibolske škriljavce, no dolaze i kao enklave unutar granita. Glavni minerali su kordijerit, andaluzit, biotit, kvarc, spinel i granat. Ponekad sadrže i silimanit, magnetit, muskovit i mikroklin. Prisutne akcesorne faze su apatit, cirkon, kvarc, spinel i pirit. Nastali su metamorfozom glinovitih pelita uz kontaktno metasomatske promjene.

Nastanak migmatita Moslavačke gore prema CRNKO (1998), usko je vezan uz utiskivanje granitnog plutona pri čemu je došlo do parcijalnog taljenja starijeg metamorfno kompleksa. Pojavljuju se kao pojas oko centralnog granita varijabilne

veliĉine (hektometarske do kilometarske), a mogu se podijeliti na homogene i heterogene. Sastav i strukture variraju ovisno o protolitu. Karakteristika migmatita je izmjena tamnih i svijetlih dijelova od kojih tamniji obično pokazuju karakteristike metamorfita, dok svijetli poprimaju magmatske karakteristike. Prema PAMIĆ (1990) smatra se da su protoliti migmatita bili pretežno biotitni paragnajsevi.

Amfiboliti se pojavljuju kao samostalna tijela unutar granita ili u asocijaciji sa škriljavcima i paragnajsevima, a njihova najznačajnija otkrivenost je u okolici Podgarića te u napuštenom kamenolomu Pleterac. Većinski su to škriljavi varijeteti koji često pokazuju paralelno-slojevitú teksturu i granonematoblastičnu do nematogranoblastičnu strukturu. Homogeni amfiboliti Moslavaĉke gore su veoma rijetki (PAMIĆ, 1990). Glavni minerali su zeleni ili smeđi amfibol (hornblenda) i neutralni do baziĉni plagioklas (andezin do bytownit), dok su u nekim varijetetima ĉesti diopsid i nakupine skapolita. Akcesorno dolaze kvarc, zoisit, epidot, apatit, cirkon, ilmenit ĉesto obrubljen titanitom i ponekad pirit. Produkti izmjene su sericit, klorit te zoisit (BALEN, 1999).

Vrpĉasti diopsid-amfibolitski škriljavci uvijek se javljaju u blizini ili na kontaktu s granitom. Karakterizirani su izmjenom tamnih i svijetlih lamina razliĉitog sastava. U tamnim laminama nalazi se hornblenda kao glavni mineral, sporedno dolazi plagioklas, a akcesorno se javljaju magnetit i ilmenit (ĉesto s obrubom titanita – leukoksen). Struktura je granonematoblastična, ponekad poikiloblastična s izraženom škriljavosti. U svijetlim proslojcima glavne faze su diopsid i neutralni do baziĉni plagioklas, a sporedne titanit. Za njih je karakteristiĉna heterogranoblastična, ponekad poikiloblastična struktura (KOROLIJA i sur., 1986).

Amfibolske stijene, uključujući amfibolite koji su fokus ovog rada, u svojoj je doktorskoj disertaciji istraživao BALEN (1999), koji ih je definirao kao stijene koje sadrže zonalne amfibole i odlikuju se vrpĉastim („sendviĉ“) teksturama. Opisao je i tri razliĉite mineralne asocijacije: (1) granatsku asocijaciju u centru stijene (grosular-klinozoisit-klinopiroksen-plagioklas) okruženu (2) klinopiroksenskom asocijacijom (klinopiroksen-plagioklas-titanit) uloženom u (3) amfibolsku asocijaciju (hornblenda-klinopiroksen-plagioklas-ilmenit-kvarc). Promjenu u mineralnoj paragenezi te opaženim varijacijama u kemijskom sastavu i boji amfibola objasnio je promjenom u P-T uvjetima te fugacitetu kisika. Kao moguće protolite amfibolskih stijena sugerira bazalte morskog dna toleitnog sastava.

Amfibolite, u smislu metabazičnih enklava pronađenih unutar moslavačkog granitnog plutona, u doktorskoj je disertaciji kratko opisala i PETRINEC (2013), dok OLIĆ (2018) daje detaljnije opise amfibolita s područja kamenoloma Pleterac s mikrostrukturnog i petrografskog stajališta i opisuje procese koji su doveli do fragmentacije i zarobljavanja blokova amfibolita u granitnu magmu. Kompilacija rezultata tih istraživanja s prijedlogom metamorfnih reakcija opaženih u stijenama kamenoloma Pleterac iznesena je u kongresnom priopćenju OLIĆ i PETRINEC (2019), a korelacija opažanja s lokaliteta Pleterac s ostalim litologijama na Moslavačkoj gori dana je u PETRINEC i sur. (2019).

2.2. Starost stijena Moslavačke gore

Prvi pokušaji određivanja starosti Moslavačke gore vršili su se samo spekulativno. Najveći razlozi tomu bili su odsutnost starijih sedimenata (prisutni su samo neogenski sedimenti) pomoću kojih bi se mogla odrediti relativna starost moslavačkog kristalina te odsutnost kvantitativnih podataka. Prema pregledu istraživanja danom u PAMIĆ (1990), prva istraživanja odnosno spekulacije odredile su moslavačke granite i metamorfite kao arhajske. Druga interpretacija bila je da je granit intrudirao tijekom karbona u sklopu hercinske orogeneze, a raspravljalo se i o kaledonsko-hercinskoj starosti. Prve radiometrijske podatke prikazuje DELEON (1969) koji je pomoću Rb/Sr metode na uzorcima granitoida dobio alpsku starost. Alpsku starost dokazuje i PAMIĆ (1990) na uzorcima granita K-Ar metodom, PALINKAŠ i sur. (2000) na muskovitu iz pegmatita s lokaliteta Srednja Rijeka, BALEN i sur. (2001) na temelju temperatura hlađenja hornblende unutar amfibolita (lokaliteti Pleterac i Zorovac) te muskovita unutar pegmatita (Srednja Rijeka), kao i BALEN i sur. (2003) na uzorku olivinskog gabra s lokaliteta Kamenjača.

Jedno od novijih istraživanja napravili su STARIJAŠ i sur. (2010) koji su vršili datiranja na cirkonima i monacitima s tri lokaliteta Moslavačke gore, a sažetak njihovih rezultata slijedi u nastavku.

Cirkoni datirani U-Pb metodom u istraživanju prikupljeni su iz uzoraka tzv. centralnog granita (granita koji čini sam pluton) te metagranita lokaliteta Garić-grad i Jelen-grad. Uzorci Garić- i Jelen-grada dali su rezultate između 460 i 500 milijuna godina

(donji ordovicij). Zanimljivo je da su neki od cirkona centralnog granita zonalne građe. Njihova zonalnost odražava utjecaj više različitih događaja na rast minerala, a time su ostale zapamćene i njihove različite starosti. Jezgra pokazuje starost ranog paleozoika, prvi ovoj pokazuje permsku starost, a vanjski ovoj sačuvao je alpinsku starost od 82 ± 1 milijuna godina.

Monaciti su analizirani u stijinama s istih lokaliteta, a starosti su određene Th-U-Pb metodom. Centralni granit dao je starost od 80 ± 5 milijuna godina što je u skladu s podacima dobivenim na cirkonu. Metagraniti Garić- i Jelen-grad pokazuju kredne starosti (92 ± 11 , 90 ± 35 , 95 ± 15 milijuna godina) za koje se smatra da predstavljaju starost niskotlačno-visokotemperaturnog odnosno LP-HT (*low pressure-high temperature*) metamorfizma. Isto potvrđuju metapeliti, iako su dali raspršenije podatke, no koncentracija podataka je na starosti od 90 do 100 milijuna godina.

U skladu sa starijim podacima (DELEON, 1969; PAMIĆ, 1990; PALINKAŠ i sur., 2000; BALEN i sur., 2001, 2003), može se zaključiti da je granitni pluton utisnut u gornjoj kredi. Monaciti i zonalni cirkoni s lokaliteta Garić- i Jelen-grad zabilježili su LP-HT metamorfni događaj (granulitni facijes) starosti između 90 i 100 milijuna godina (prijelaz iz donje u gornju kredu). Dobivene ordovicijske starosti metagranita (ortognajseva) predstavljaju starosti njihova granitnog protolita odnosno granitne kore, a zabilježena permska starost vjerojatno je rezultat permskog termalnog *overprinta* (STARIJAŠ i sur., 2010).

2.3. Uvjeti metamorfizma

BALEN (1999) u sklopu svoje doktorske disertacije određuje uvjete metamorfizma na temelju metamorfnih reakcija zabilježenih unutar amfibolita. Rezultati pokazuju da su stijene Moslavačke gore prošle dva različita metamorfna događaja u dva različita vremenska okvira, što su pokazali i rezultati datiranja koja su proveli STARIJAŠ i sur. (2010).

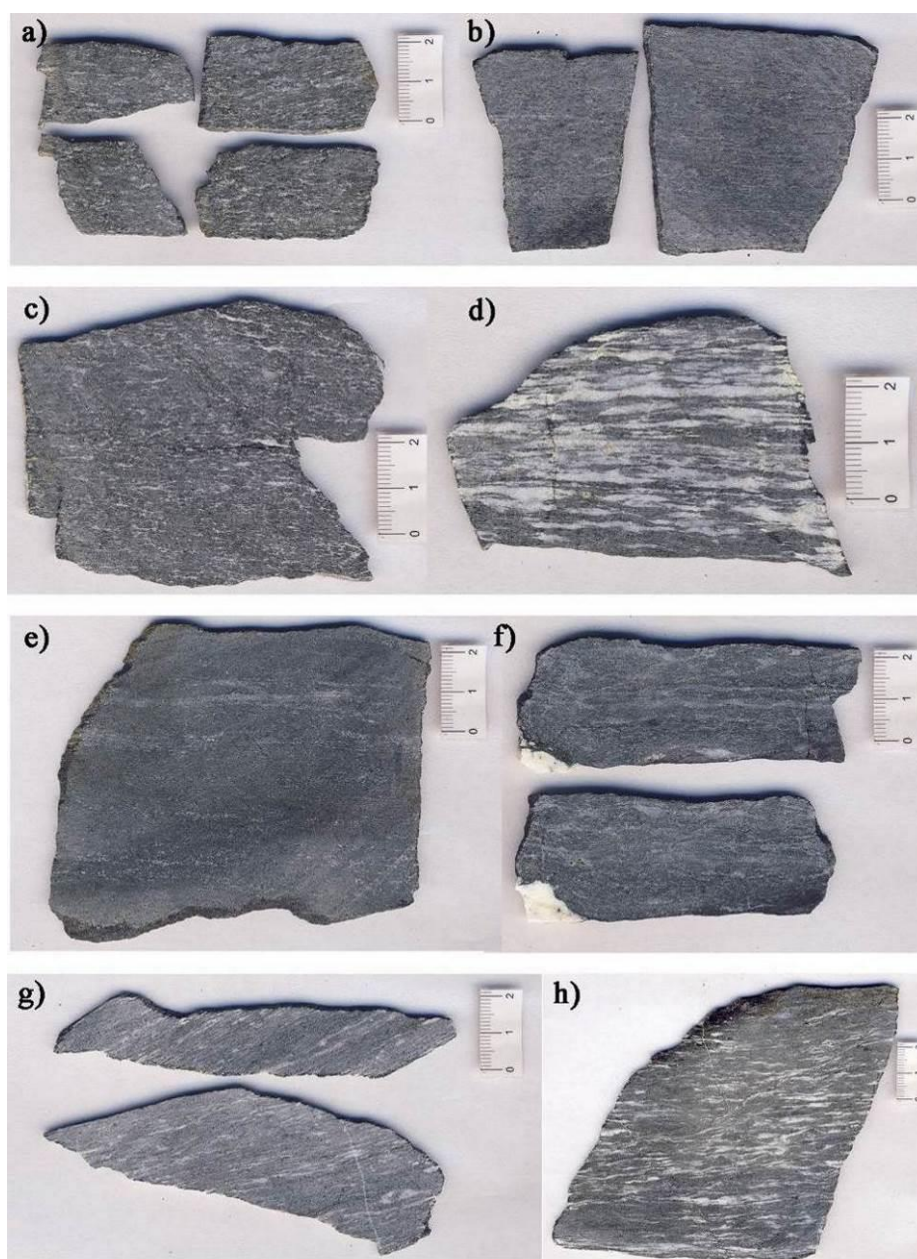
Prva metamorfna faza regionalnog tipa pretpostavljene hercinske starosti obilježena je Barrovijanskim geotermalnim gradijentom ($18 - 28$ (35) $^{\circ}\text{C}/\text{km}$). Temperature prve metamorfne faze kreću se u rasponu od 550 do 820°C , dok su tlakovi u rasponu od 520 do 960 MPa (BALEN, 1999). Takvi P-T uvjeti karakteristični su za amfibolitni do granulitni facijes. Druga metamorfna faza kredne odnosno alpinske starosti predstavljena je niskim

tlakom i visokom temperaturom, ukazujući na njen kontaktni karakter. Temperature su u rasponu od 550 do 650°C, dok su tlakovi između 180 i 250 MPa. Takvi temperaturni uvjeti karakteristični su za amfibolitni facijes, no pri puno nižem tlaku.

Slične rezultate za kredni HT-LP metamorfizam dobili su i STARIJAŠ i sur. (2010) koji su analizu vršili na metapelitima. U tim litologijama nisu sačuvani zapisi viših tlakova kakvi su definirani proučavanjem amfibolita, već su zabilježene vršne temperature u rasponu od 720 do 770 °C te tlakovi 300 – 400 MPa. Retrogradni put zabilježen je pojavom andaluzita koji je karakterističan za tlakove niže od 4 kbar. Nekoliko različitih termo- i barometara dalo je rezultate 520 – 630°C te tlakove 100 – 300 MPa za retrogradnu fazu.

3. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

Za potrebe ovog rada korišteno je 11 uzoraka vrpčastih amfibolita prikupljenih na tri lokaliteta na području Moslavačke gore (slika 3). Devet uzoraka dolazi iz danas napuštenog kamenoloma Pleterac, a po jedan uzorak s lokaliteta Kamenjača-Stelovača te Kamenac-potok.



Slika 3. Pločice uzoraka amfibolita i vrpčastih amfibolita s lokaliteta Pleterac ispiljene okomito na folijaciju na kojima je jasno vidljiva vrpčasta tekstura karakterizirana vrpcama različitog sastava. Uzorci: a) 135; b) 136-1; c) 137; d) 139; e) 140; f) 141; g) 142a; h) 143.

3.1. Petrografska i mikrostrukturalna analiza

Optička istraživanja provedena su na Mineraloško-petrografskom zavodu Geološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu korištenjem polarizacijskog petrografskog mikroskopa Zeiss AxioLab s povećanjima od 25x do 200x. Od 11 makroskopskih uzoraka, za detaljnu petrografsku analizu izabrano je pet uzoraka odnosno pet mikroskopskih preparata koji su također izrađeni na Mineraloško-petrografskom zavodu. Fotodokumentacija je učinjena pomoću digitalne kamere Canon EOS 500D uz pomoć programa kamere EOS Utility koji omogućava izravno podešavanje postavki te fotografiranje putem računala.

Mikroskopska analiza uključivala je određivanje strukturno-teksturnog sklopa uzoraka, njihov mineralni sastav i udio pojedinih mineralnih faza, kao i njihove karakteristike u petrografskom i mikrotektonskom kontekstu. Detaljan opis karakteristika dan je u poglavlju Rezultati, a njihova interpretacija u poglavlju Rasprava.

3.2. Spektroskopske metode utemeljene na induktivno spregnutoj plazmi

Najveći dio ovog istraživanja obuhvaća obradu i interpretaciju cjelostijenskih kemijskih podataka uzoraka vrpčastih amfibolita koji nisu obuhvaćeni u značajnijoj mjeri u ranije spomenutim istraživanjima ostalih autora. Uzorci su analizirani pomoću metode induktivno spregnute plazme (ICP) s emisijskom spektroskopijom (ES) te masenom spektroskopijom (MS) u ACME Analytical Laboratories Ltd., Vancouver, Kanada. Pomoću tih analitičkih metoda dobiveni su podaci glavnih elemenata prikazani u obliku oksida te elemenata u tragovima koji uključuju i elemente rijetkih zemalja (REE) izraženi u dijelovima od milijun (ppm, *parts per million*).

Princip rada ICP spektrometrije temelji se na visokotemperaturnom izvoru induktivno spregnute plazme. Prije svega, potrebno je pripremiti uzorak za analizu. Najprije je potrebno uzorak usitniti u ahatnom mlinu te zatim prosijati kroz sustav sita u kojem zadnje sito ima promjer otvora 0,125 mm. Od dobivenih 30 – 80 g uzorka odvaja se ~12 grama za daljnju kemijsku analizu. Za metode induktivno spregnute plazme (ICP) s emisijskom spektroskopijom (ES) te masenom spektroskopijom (MS) uzima se 0,2 g uzorka. Uzorak se najprije tali s litijevim metaboratom (LiBO_2)/tetraboratom ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), a zatim se otapa u razrijeđenoj dušičnoj kiselini (HNO_3). Potpuno otopljeni uzorak ulazi u

instrument u obliku aerosola. Prije same ionizacije, aerosol mora proći kroz posebnu ćeliju u kojoj se odvajaju prevelike kapljice nepogodne za analizu. U plazmu ulaze kapljice manje od otprilike 10 μm , a takvih je svega 1 do 2% uzorka. Plazma je zapravo ionizirani argon sa slobodnim elektronima kojoj je cilj ionizirati uzorak. Ionizacija se postiže zbog vrlo visokih temperatura plazme (6000 – 10000 K) te jakog elektromagnetskog polja. Time se pobuđuju atomske i ionske spektralne linije karakterističnih valnih duljina koje zatim detektira atomski emisijski spektrometar (AES metoda). Kod metode masene spektroskopije (MS), ionski snop prolazi kroz zaobljenu cijev pod utjecajem veoma jakog elektromagneta koji odvaja ione elemenata na temelju njihove mase i naboja (WILSCHEFSKI i sur., 2019).

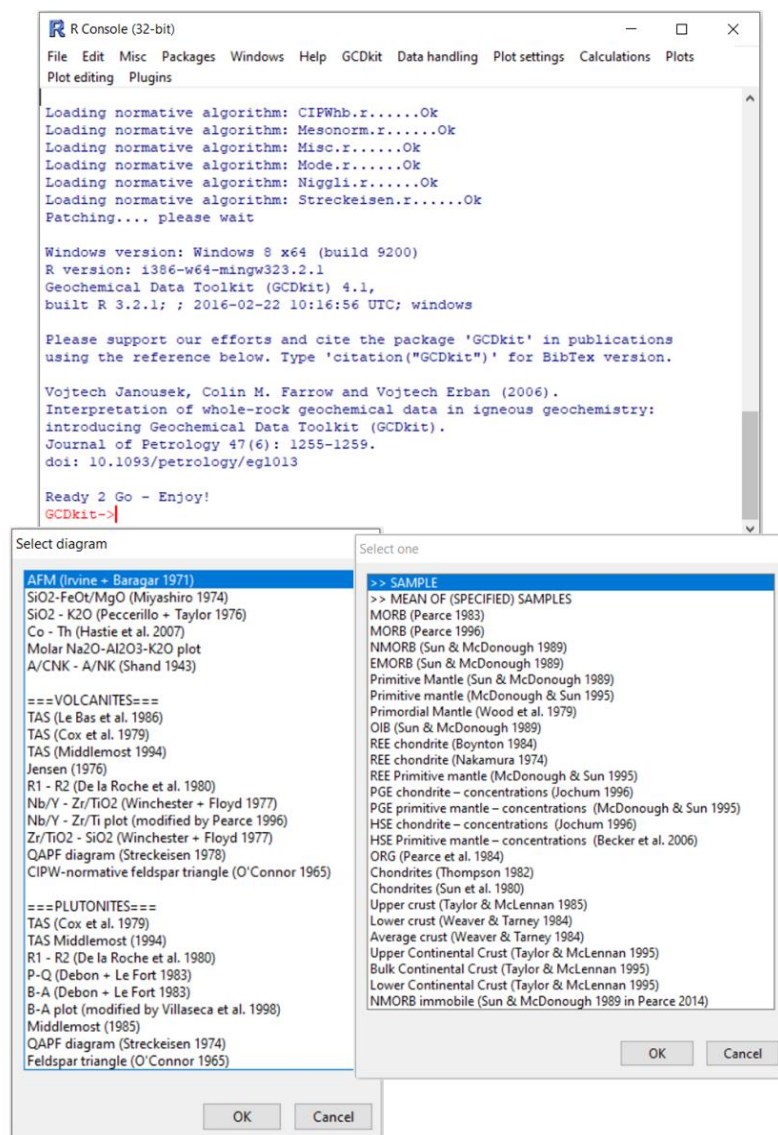
3.3. GCDkit i geokemija nemobilnih elemenata

GCDkit (*Geochemical Data Toolkit*) je skup programskih alata koji uvelike olakšavaju obradu geokemijskih podataka i baratanje s obično vrlo velikim setom podataka (JANOŠEK i sur., 2006). Uključuje velik broj često korištenih klasifikacijskih dijagrama poput TAS, R1-R2, AFM te one utemeljene na uporabi kationa ili omjera elemenata. Također omogućava izradu normaliziranih multielementnih dijagrama nekompatibilnih elemenata odnosno tzv. *spider* dijagrama, zatim dvovarijantnih dijagrama, trovarijantnih dijagrama te dijagrama za određivanje inicijalnog geotektonskog položaja (slika 4). Omogućava i izračun CIPW normativnog sastava, unos novih proizvoljnih varijabli te osnove statističkih izračuna. Da bi to sve bilo moguće, potrebno je podatke prikazati na određen način kako bi ih program mogao pročitati. GCDkit čita obične *.txt* datoteke, no često se koriste i *.xls* datoteke odnosno proračunske tablice napravljene pomoću uobičajenih računalnih tabličnih kalkulatora (npr. MS Excel).

Iako je za samu izradu dijagrama potrebno svega nekoliko sekundi, svakako treba imati na umu zašto se dijagram radi i što možemo očekivati od podataka. Prema ROLLINSON i PEASE (2021), obrada podataka se najčešće vrši na način da se određena pretpostavka testira na procese za koje se misli da su utjecali na genezu uzorka. Također je i od velike važnosti izabrati pogodne svježije uzorke kako bi analiza bila što kvalitetnija.

Autori GCDkit-a nalažu da se analizu metamorfnih stijena treba vršiti s velikim oprezom i razumijevanjem. Uvijek treba imati na umu da se radi o izmijenjenim stijenama te da su česti procesi poput metasomatizma tj. utjecaja fluida ili parcijalnog taljenja. Također, treba jako dobro poznavati ponašanje elemenata prilikom takvih procesa kako ne

bi došlo do pogrešne interpretacije. Srećom, u zadnjih 50-ak godina razvila se nova grana geokemije – geokemija nemobilnih elemenata (PEARCE, 2014). Diskriminacijski dijagrami utemeljeni na nemobilnim elementima i njihovim omjerima vrlo su značajni u analizi alteriranih i metamorfoziranih stijena. Puno je jasnija klasifikacija protolita, ali je i lakše za uočiti utjecaj subdukcije ili kontaminacije na istraživani sustav. Također se može jasnije vidjeti mobilnost elemenata prilikom metamorfizma kada se proučavaju u odnosu na nemobilne elemente. Zbog navedenog, prilikom analize i interpretacije uzoraka amfibolita s Moslavačke gore, korišteni su upravo principi geokemije nemobilnih elemenata.



Slika 4. Sučelje programskog skupa alata GCDkit (gornji isječak) s primjerima mogućih klasifikacijskih dijagrama na lijevoj strani slike te normaliziranih multielementnih (*spider*) dijagrama na desnoj strani slike (JANOŠEK i sur., 2006).

3.4. Geotermobarometrijsko modeliranje

Geotermobarometrija je postupak određivanja uvjeta tlaka i temperature pri kojima je magmatska ili metamorfna stijena postigla ravnotežu. Za metamorfnu stijenu, dobivene vrijednosti tlakova i temperatura najčešće se interpretiraju kao vršni metamorfni uvjeti. Najbolji prikaz P-T uvjeta nekog uzorka su fazni dijagrami, specifično P-T pseudopresjeci (eng. *pseudosection*). Pseudopresjek je dvodimenzionalni dijagram koji se sastoji od polja stabilnosti različitih mineralnih parageneza u ravnoteži pri određenom tlaku i temperaturi. Da bi se pseudopresjek mogao dobiti, potrebno je imati podatke cjelostijenske kemijske analize. Postoje razni računalni programi koji omogućuju izradu pseudopresjeka, a jedan od njih je Perple_X (CONNOLLY i KERRICK, 1987; CONNOLLY i PETRINI, 2002) koji je korišten za potrebe ovog rada.

Perple_X je zapravo skup programa pisanih u programskom jeziku Fortran77, a koristi se za izračun i prikaz faznih dijagrama, fazne ravnoteže te termodinamičkih podataka. Da bi se u konačnici dobio pseudopresjek, najprije je potrebno prilagoditi cjelostijenske kemijske podatke odnosno renormalizirati odabrani set glavnih elemenata na 100,00 tež. %. Set podataka koji se normalizira ovisi o sastavu same stijene koja se modelira. Potprogrami korišteni pri izradi pseudopresjeka su sljedeći:

- 1) BUILD.exe – sadrži podatke poput kemijskog sastava, tlačnog i temperaturnog raspona, termodinamičke podatke i sl. na temelju kojih se pokretanjem programa dobiva inicijalna datoteka (.txt) za daljnje izračune;
- 2) VERTEX.exe – predstavlja termodinamički kalkulator koji na temelju izlazne datoteke BUILD.exe radi daljnje izračune uvjeta odgovarajućih faznih ravnoteža (slika 5);
- 3) PSSECT.exe – konstruira pseudopresjek (.ps datoteka) koji se zatim dalje može obraditi u nekom od grafičkih programa;
- 4) WERAMI.exe – na temelju određenog odabranog minerala, radi izračun za izradu određenog dijagrama (npr. dijagram promjene volumnog udjela ili kemijskog sastava minerala s promjenom P-T uvjeta) (slika 6);
- 5) PSTABLE.exe – koristi izlaznu datoteku WERAMI.exe te generira .ps datoteku odnosno grafički prikaz izopleta za odabrani mineral.

```

C:\Users\korisnik\Desktop\Diplomski\028\pstable.exe
Perple_X version 6.8.9, source updated Feb 21, 2020.
Copyright (C) 1986-2020 James A D Connolly <www.perplex.ethz.ch/copyright.html>.
Warning: the plot option file: perplex_plot_option.dat
was not found, default option values will be used.
Perple_X plot options are currently set as:
Keyword: Value: Permitted values [default]:
axis_label_scale 1.20 [1..2] (rel)
bounding_box : 0 [0] x-min (pts)
0 [0] y-min (pts)
800 [800] x-length (pts)
800 [800] y-length (pts)
field_fill T [T] F
field_label T [T] F
field_label_scale 0.72 [0.72] (rel)
font Helvetica
grid F [F] T
half_ticks T [T] F
line_width 1.00 0-99 [1.] (pts)
picture_transformation :
0.180 [0.18] x-scale (rel)
0.180 [0.18] y-scale (rel)
160. [0.18] x-translation (pts)
220. [0.18] y-translation (pts)
0.00 [0.0] rotation (deg)
plot_aspect_ratio 1.000 [1.0] x_axis_length/y_axis_length
replicate_label 0.025 0->1 [0.025]
splines T [T] F
tenth_ticks F [F] T
text_scale 1.000 [1.] (rel)
To change these options edit or create the plot option file
See: www.perplex.ethz.ch/perplex_plot_options.html

C:\Users\korisnik\Desktop\Diplomski\028\vertex.exe
Perple_X version 6.8.9, source updated Feb 21, 2020.
Copyright (C) 1986-2020 James A D Connolly <www.perplex.ethz.ch/copyright.html>.
Enter the project name (the name assigned in BUILD) [default = my_project]:
028
Reading problem definition from file: 028.dat
Reading thermodynamic data from file: hp62ver.dat
Writing print output to file: 028.plt
Writing plot output to file: 028.plt
Writing phase assemblage data to file: 028.blk
Reading solution models from file: solution_model_DB.dat
Reading Perple_X options from: perplex_option_ex1208.dat
Writing auto refine summary to: 028_auto_refine.txt
Writing seismic data options to: 028_seismic_data.txt
Writing pseudocompound glossary to: 028_pseudocompound_glossary.txt
Writing Perple_X option summary to: not requested
Perple_X computational option settings for VERTEX:
Keyword: Value: Permitted values [default]:
Auto-refine options:
auto_refine aut off manual [auto]
Free energy minimization options:
final_resolution:
exploratory stage 0.1E-1 [1e-2], target value, see actual values below
auto-refine stage 0.1E-2 [1e-3], target value, see actual values below
resolution_factor 2 >= 2 [2]
refinement_points 12 [aut] or 1->12; aut = automatic
refinement_switch F [T] F
solution_tolerance_II aut 0->1 [0..2]
global_reach_increment 0 >= 0 [0]
reach_increment_switch on [on] off all
zero_mode 0.1E-05 0->1 [1e-6]; < 0 => off
2D grid options:
x_nodes 40 / 60 [20/40], >0, <2048; effective x-resolution 40 / 473 nodes
y_nodes 40 / 60 [20/40], >0, <2048; effective y-resolution 40 / 473 nodes
grid_levels 1 / 4 [1/4], >0, <10
linear_model on off [on]
Solution subdivision options:

```

Slika 5. Isječci sučelja Perple_X potprograma vertex.exe (termodinamički kalkulator) i pstable.exe (generira grafički prikaz izlazne datoteke potprograma werami.exe).

```

C:\Users\korisnik\Desktop\Diplomski\028\werami.exe
Select operational mode:
1 - properties at specified conditions
2 - properties on a 2d grid
3 - properties along a 1d path
4 - as in 3, but input from file
0 - EXIT
2
Select a property [enter 0 to finish]:
1 - Specific Enthalpy (J/m3)
2 - Density (kg/m3)
3 - Specific heat capacity (J/K/m3)
4 - Expansivity (1/K, for volume)
5 - Compressibility (1/bar, for volume)
6 - Composition (Mol, Mass, or Wt%) of the system
7 - Mode (Vol, Mol, or Wt proportion) of a phase
8 - Composition (Mol, Mass, or Wt%) of a solution phase
9 - Grueneisen thermal ratio
10 - Adiabatic bulk modulus (bar)
11 - Adiabatic shear modulus (bar)
12 - Sound velocity (km/s)
13 - P-wave velocity (Vp, km/s)
14 - S-wave velocity (Vs, km/s)
15 - Vp/Vs
16 - Specific entropy (J/K/m3)
17 - Entropy (J/K/kg)
18 - Enthalpy (J/kg)
19 - Heat Capacity (J/K/kg)
20 - Specific mass of a phase (kg/m3-system)
21 - Poisson ratio
22 - Molar Volume (J/bar)
23 - Dependent potentials (J/mol, bar, K)
24 - Assemblage Index
25 - Modes of all phases
26 - Sound velocity T derivative (km/s/K)
27 - P-wave velocity T derivative (km/s/K)
28 - S-wave velocity T derivative (km/s/K)
29 - Adiabatic bulk modulus T derivative (bar/K)
30 - Shear modulus T derivative (bar/K)
31 - Sound velocity P derivative (km/s/bar)
32 - P-wave velocity P derivative (km/s/bar)
33 - S-wave velocity P derivative (km/s/bar)
34 - Adiabatic bulk modulus P derivative (unitless)
35 - Shear modulus P derivative (unitless)
36 - All phase &/or system properties
37 - Absolute amount (Vol, Mol, or Wt) of a phase
38 - Multiple property output
39 - Heat capacity ratio (Cp/Cv)
40 - Lagged or back-calculated aqueous solute chemistry

```

Slika 6. Isječak sučelja Perple_X potprograma werami.exe na kojem je prikazano 40 opcija izrade dvodimenzionalnih dijagrama. Pod brojem 7 se nalazi opcija za izradu dijagrama volumnog postotka odabranog minerala, a pod brojem 8 dijagram promjene kemijskog sastava u P-T prostoru, koji su korišteni u ovom radu.

4. REZULTATI

4.1. Rezultati mikroskopskih istraživanja

Analizirano je pet mikroskopskih preparata amfibolita, tri uzorka (140, 142a, 141) su iz kamenoloma Pleterac, jedan uzorak (150) je s lokaliteta Kamenac-potok i jedan (028) s lokaliteta Kamenjača-Stelovača. Analizirani preparati pokazuju varijabilnost u strukturi, koja se kreće od nematoblastične do granoblastične, teksturi te u mineralnom sastavu. Glavni minerali uvijek su amfiboli (hornblenda) i plagioklasi, a razlikuju se po prisutnim sporednim i akcesornim mineralima. Svih pet preparata pokazuju folijaciju koja se očituje po izduženju hornblende i/ili agregata plagioklasa, a u pojedinim preparatima vidljivo je i odvajanje mineralnih faza u obliku paralelno vrpčaste teksture. Zbog navedenih strukturno-teksturnih razlika, kao i razlika u mineralnom sastavu, svaki preparat bit će opisan zasebno u nastavku.

4.1.1. Amfibolit 142a – Pleterac

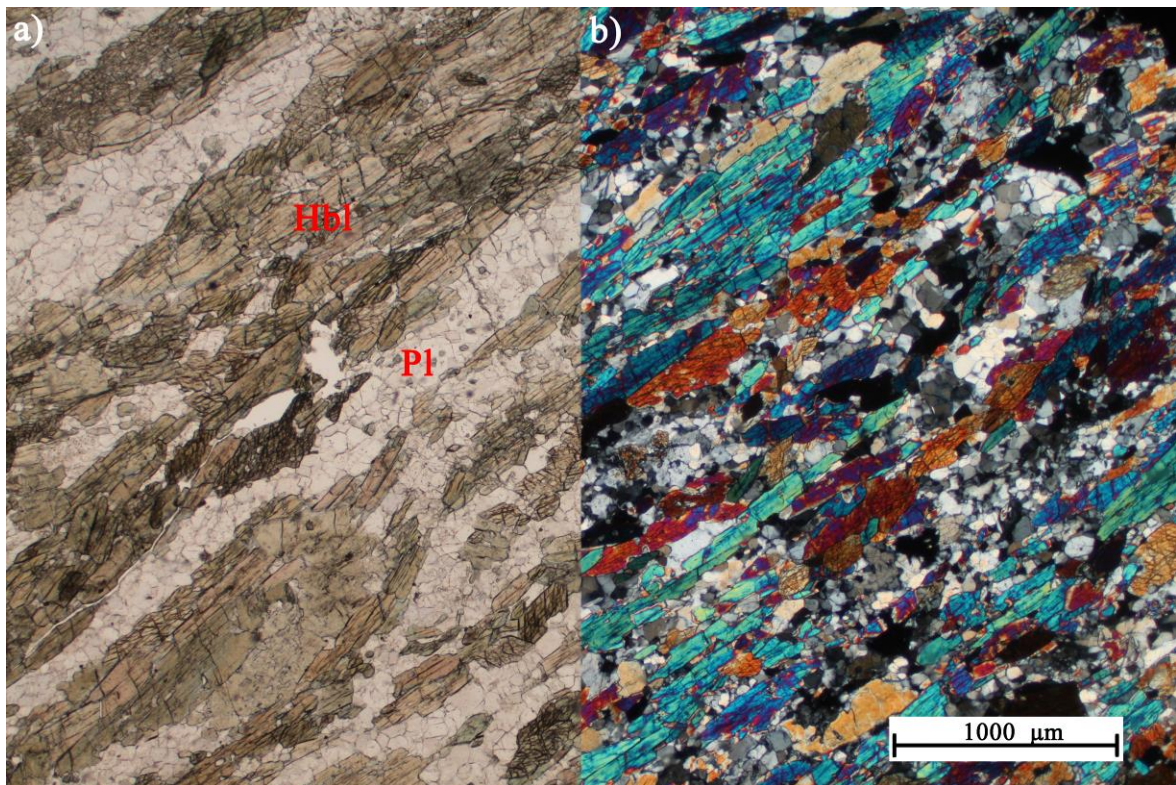
Uzorak ima nematogranoblastičnu strukturu s izraženom folijacijom koja je definirana izduženom osi amfibola te paralelnim vrpčama plagioklasa (slika 7). Od glavnih minerala prisutni su amfiboli (hornblenda) (oko 60 vol. %), plagioklasi (do 25 vol. %) i skapoliti (u nakupinama i do 10 vol. %). Od podređenih faza prisutni su klorit i titanit, a akcesorno dolaze epidot, apatit, cirkon te opaki minerali koji se većinski pojavljuju unutar proslojaka hornblende. Prisutne su i žilice opakog materijala koje diskordantno presijecaju strukturu.

Amfiboli se uglavnom pojavljuju kao izdužena alotriomorfna zrna, a manjim dijelom su zastupljeni i hipidiomorfni presjeci. Veličinom zrna (1 – 2,5 mm po osi izduženja) dominiraju preparatom, no veoma je neujednačena. Na većim zrnima može se opaziti varijacija vlastite boje od svijetlih nijansi smeđe u centru do zelenih rubova, što ukazuje na promjenu u kemijskom sastavu. Samo veća zrna pokazuju hipidiomorfne presjeke. Jasan je pleokroizam koji se očituje u blijedo smečkastoj do smeđe zelenoj boji. Granice među zrnima su nepravilne i oštre. Ponegdje se rubno pojavljuje i klorit kao produkt izmjene.

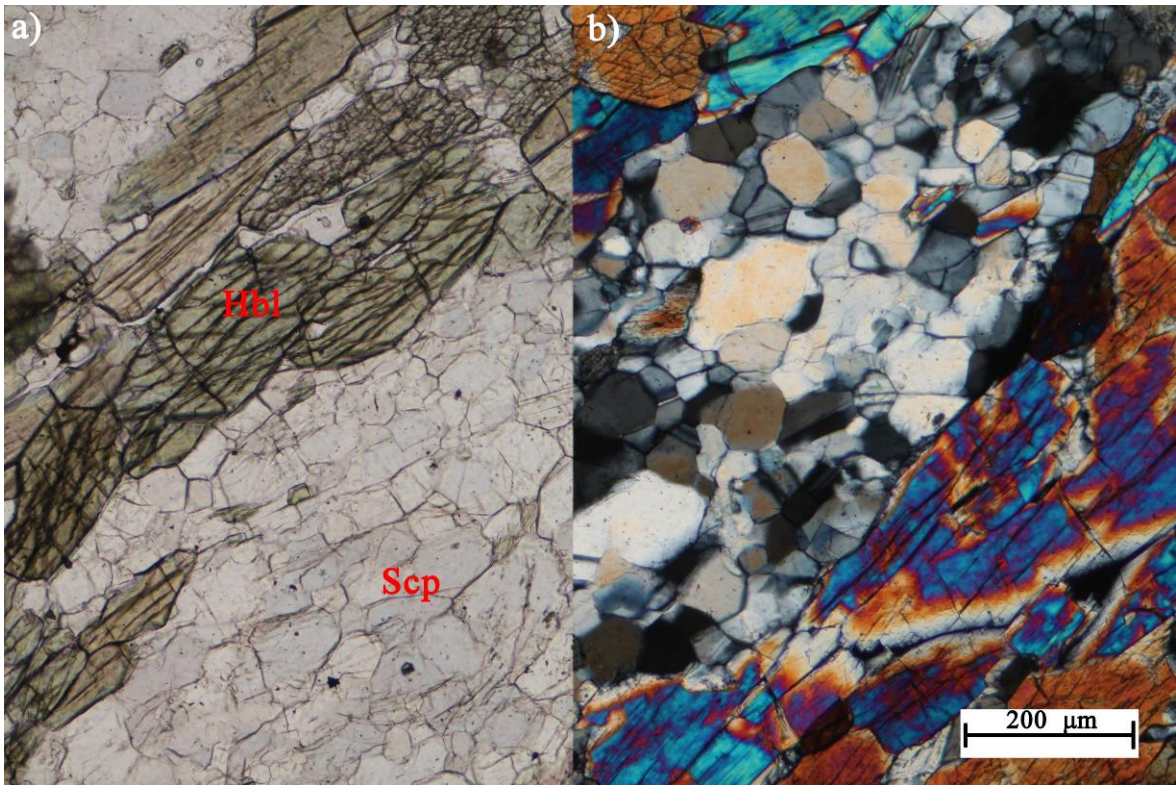
Skapoliti se pojavljuju u lećastim nakupinama unutar preparata (slika 8). Tvore alotriomorfna zrna relativno ujednačenih veličina. I skapoliti pokazuju undulozno potamnjenje kao i poligonalan međusobni kontakt, dok ih u usporedbi s plagioklasom

razlikuje viši reljef te veća zamućenost odnosno alteracija, što se može vidjeti promatrajući uzorak bez uključenog analizatora.

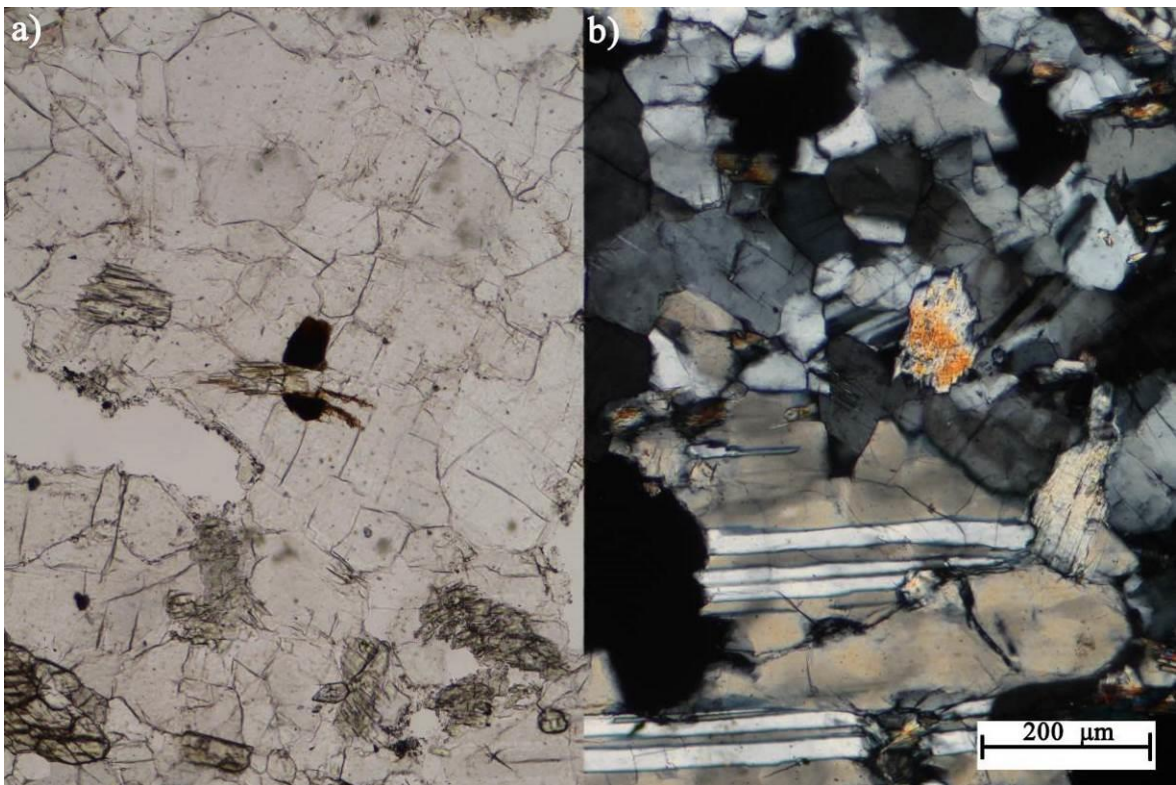
Plagioklasi uglavnom dolaze u proslojcima između amfibola, a zrna su alotriomorfna i različitih veličina. Granice zrna su nepravilne, no ponegdje se može pronaći međusobni poligonalni kontakt. Na pojedinim zrnima mogu se vidjeti polisintetske sraslačke lamele različitih debljina (slika 9). Velik dio zrna pokazuje undulozno potamnjenje te su vidljive granice podzrna. Na manjem broju zrna uočene su i deformacijske lamele.



Slika 7. Mikrofotografija uzorka 142a. Na slici je dijagnosticirano vidljiva folijacija te struktura uzorka koja se očituje kao izmjena proslojaka izduženih amfibola (hornblendna - Hbl) i plagioklasnih (Pl) proslojaka. Lijevi i desni dio slike predstavljaju kontinuitet, pri čemu je pod a) prikaz bez uključenog analizatora (N-), a slika pod b) prikaz s uključenim analizatorom (N+).



Slika 8. Mikrofotografija uzorka 142a koja prikazuje agregat skapolita (Scp) lećastog oblika između dva proslojka hornblende (Hbl). a) N-; b) N+.



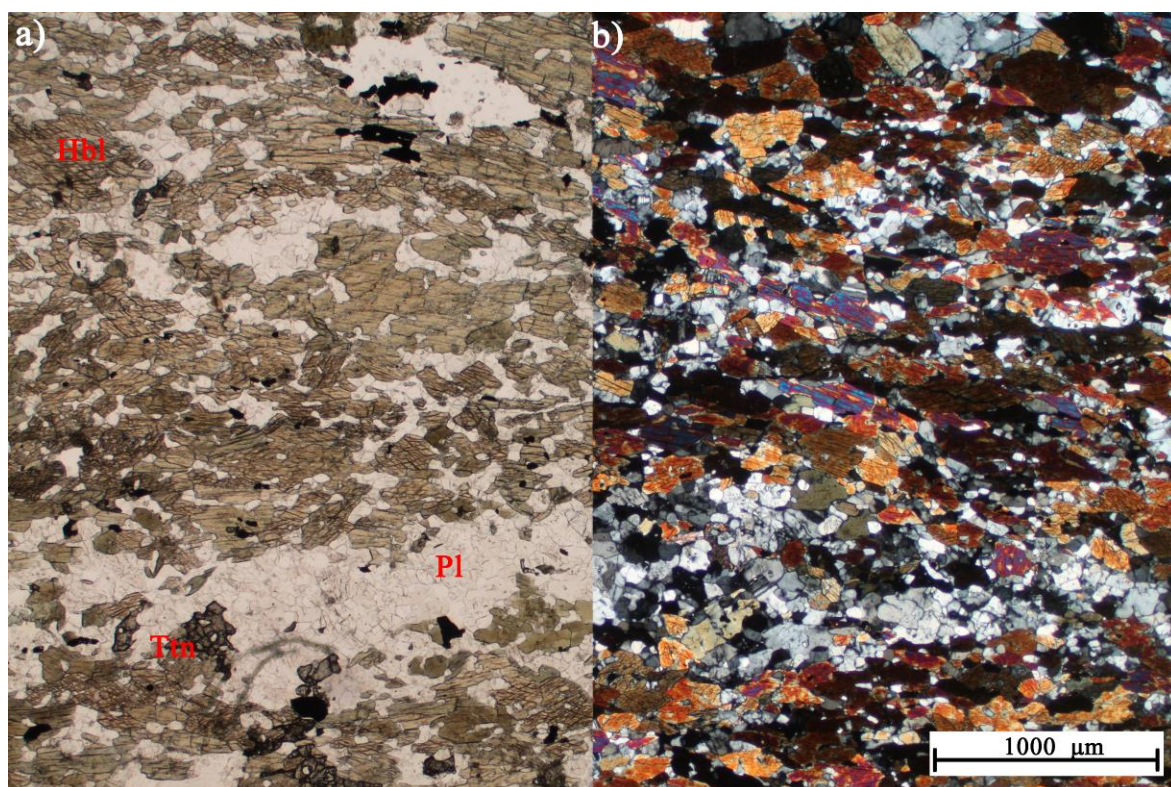
Slika 9. Mikrofotografija uzorka 142a na kojoj se nalazi agregat plagioklasa na kojima su vidljive polisintetske sraslačke lamele kao i undulozno potamnjenje. a) N-; b) N+.

4.1.2. Amfibolit 140 – Pleterac

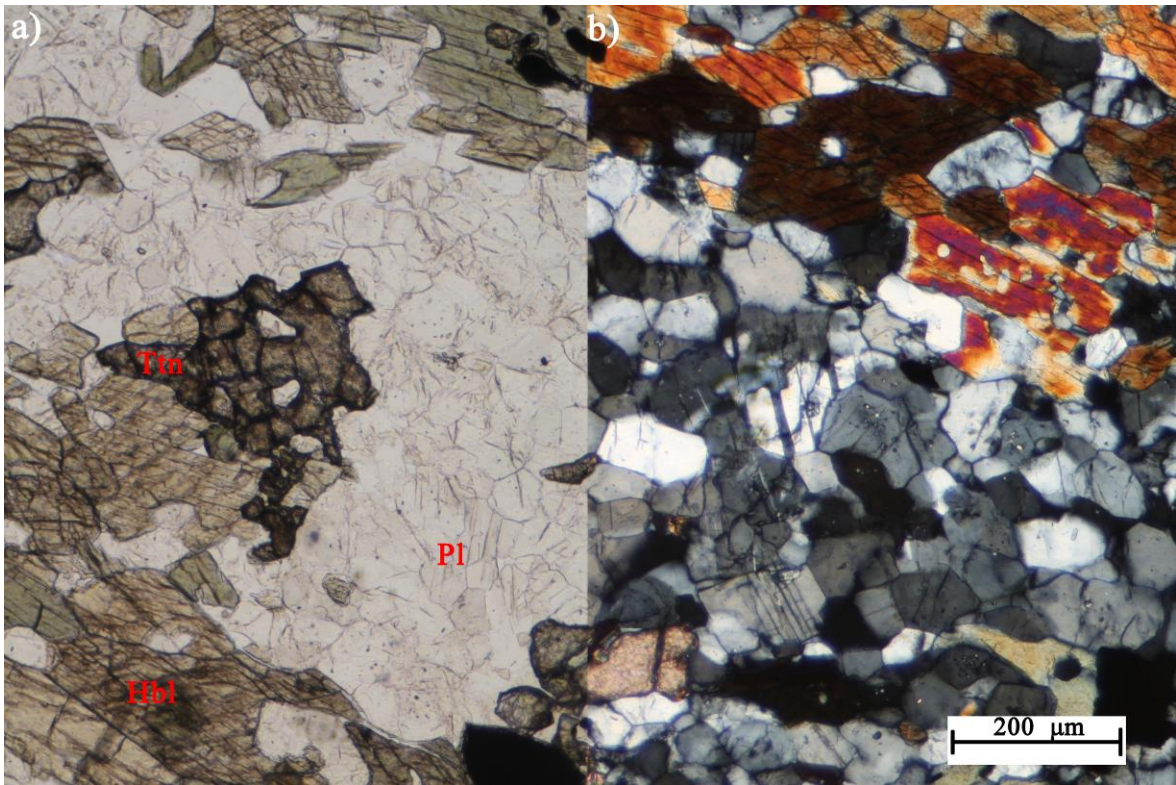
Struktura uzorka 140 je granonematoblastična (slika 10). Folijacija je definirana blagom izduženosti amfibola. Glavni minerali su amfiboli (70 vol. %), plagioklasi (20 vol. %) te skapoliti koji se u nakupinama javljaju i do 10 vol. %. Akcesorno se javljaju klorit, titanit (slika 11) i opaki minerali oko kojih se često pojavljuje reakcijski ovoj (leukoksen).

Amfiboli se pojavljuju kao alotriomorfna zrna ujednačene veličine (u prosjeku oko 0,5 mm). Pokazuju pleokroizam od svjetlosmeđe do zelenkasto smeđe boje. Rubovi zrna često su izmijenjeni u klorit. Lokalno se duž amfibola pojavljuje i crvenkasti materijal nalik na hrđu (vjerojatno se radi o ilmenitu).

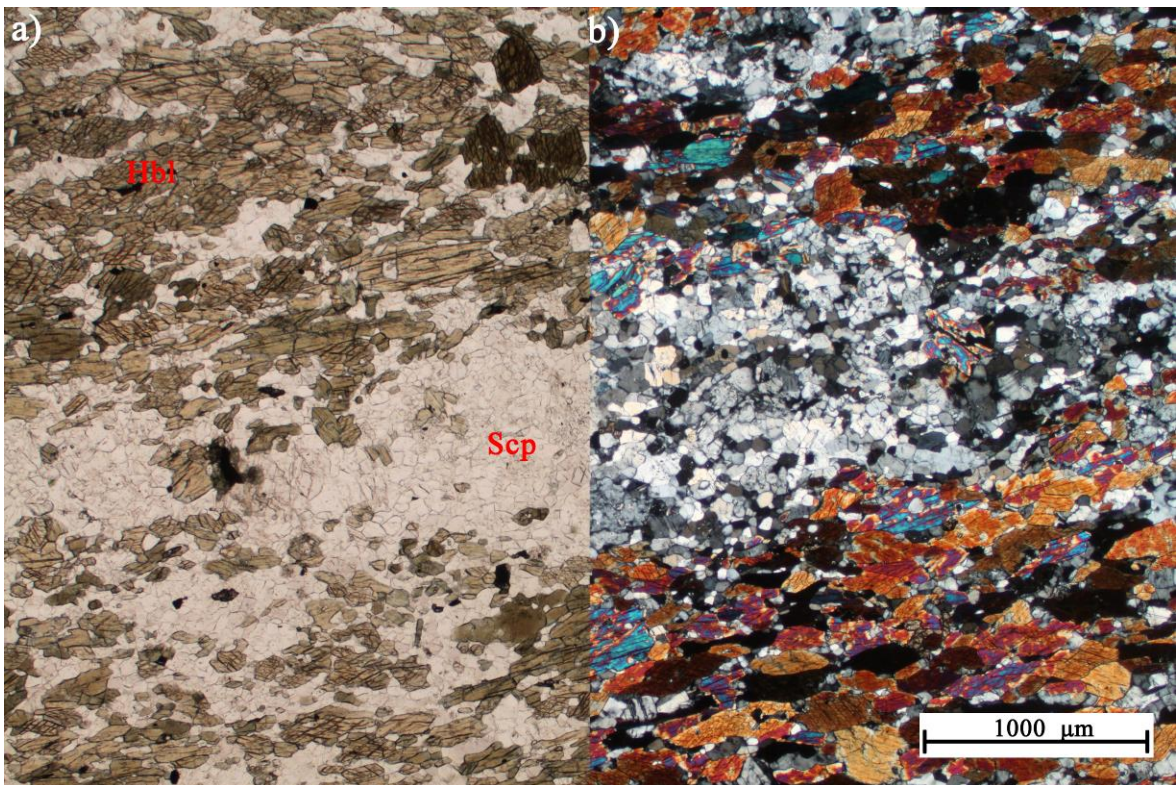
Zrna plagioklasa su alotriomorfna, okruglasta i vrlo sitna, a pojavljuju se kao tanki prosljoci između hornblende. Na nekima je uočeno undulozno potamnjenje, a rjeđe se vide polisintetske sraslačke lamele. Skapoliti se pojavljuju u nakupinama alotriomorfni zrna (slika 12). Prema drugim mineralima tvore oštre granice, a međusobni kontakt im je nepravilan, ponegdje i difuzan. Pokazuju undulozno potamnjenje i mogu se uočiti granice podzrna.



Slika 10. Mikrofotografija uzorka amfibolita 140 na kojoj je vidljiva granonematoblastična struktura. Dominantne mineralne vrste su hornblenda (Hbl) i plagioklasi (Pl), pri dnu slike nalazi se titanit (Ttn). a) N-; b) N+.



Slika 11. Mikrofotografija uzorka 140 na kojoj je agregat plagioklasa (Pl) unutar dva proslojka hornblende (Hbl) u kojem se nalaze dva zrna titanita (Ttn) veličine ~0,2 mm). a) N-; b) N+.



Slika 12. Mikrofotografija uzorka 140 koja prikazuje veći agregat skapolita (Scp) između dva proslojka hornblende (Hbl). a) N-; b) N+.

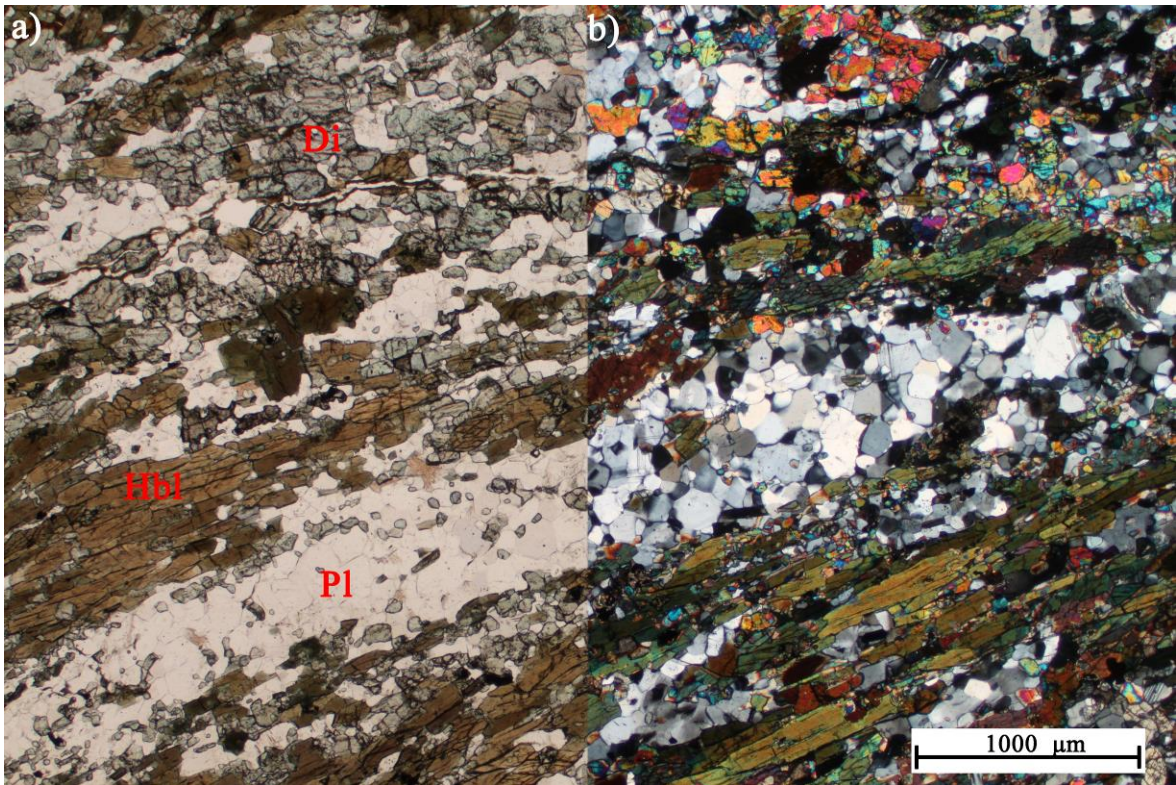
4.1.3. Amfibolit 141 – Pleterac

Razlika uzorka 141 od ostala dva uzorka s lokaliteta Pleterac je pojava piroksena. Glavne mineralne faze uz piroksen (20 vol. %) su amfiboli (60 vol. %) i plagioklasi (20 vol. %). Akcesorno dolaze apatit, zoisit, klorit, titanit te opaki minerali. Tekstura je paralelna vrpčasta koja se očituje kroz pojavu amfibolom bogatih vrpca te plagioklasom i piroksenom bogatih vrpca. Struktura unutar amfibolskih vrpca je nematoblastična, dok je u plagioklasom bogatim vrpcama ona granoblastična (slika 13). Uzorak pokazuje škriljavost i folijaciju koja je definirana izduženjem amfibola.

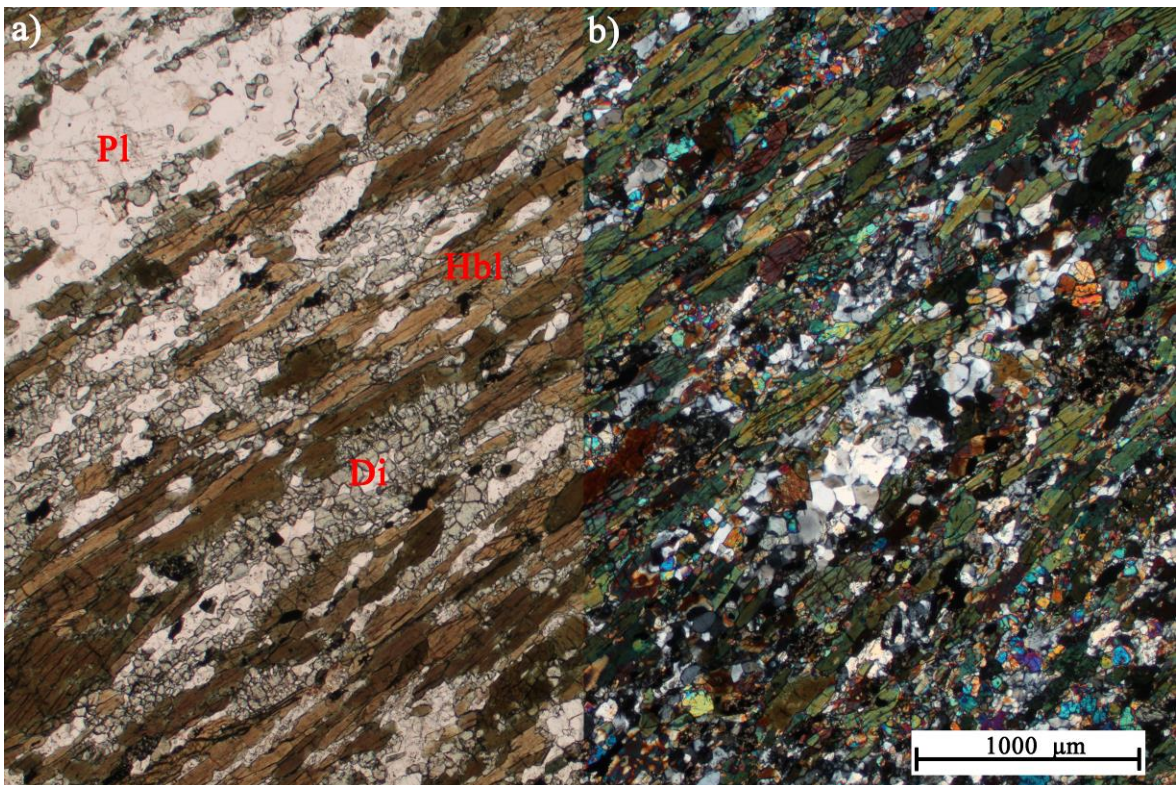
Amfiboli se pojavljuju kao izdužena hipidiomorfna i alotriomorfna zrna neujednačenih veličina (maksimalno 1,5 mm po izduženoj osi), no puno su veća od ostalih mineralnih faza. Pokazuju veoma izražen pleokroizam u svjetlosmeđoj do tamnosmeđoj boji s tamno zelenim rubovima. Rubno se može uočiti i klorit kao produkt izmjene. Unutar amfibolskih vrpca podređeno dolaze plagioklasi i sitna zrna piroksena. Pirokseni se pojavljuju rubno uz amfibole (slika 14). Ponegdje su granice oštre, no uočena je i nepravilna difuzna granica na kontaktima s hornblendom. Granice s većim zrnima plagioklasa su uglavnom ravne, dok su s manjima nepravilne. Akcesorne faze unutar amfibolskih vrpca su opaki minerali koji se nalaze kao točke unutar titanita, ilmenit te zoisit.

Plagioklasi se pojavljuju kao alotriomorfna zrna čineći vlastite vrpce, no također dolaze kao tanke vrpce i između amfibola. Uglavnom su neujednačenih veličina, no unutar vlastitih proslojaka zrna su primjetno veća. Neka zrna pokazuju polisintetske sraslačke lamele, uočeno je i undulozno potamnjenje, kao i zonalnost na pojedinim zrnima. Neka zrna imaju međusobni poligonalni kontakt. Veća zrna su alterirana iako alteracijski produkt nije bilo moguće nedvojbeno definirati optičkim metodama.

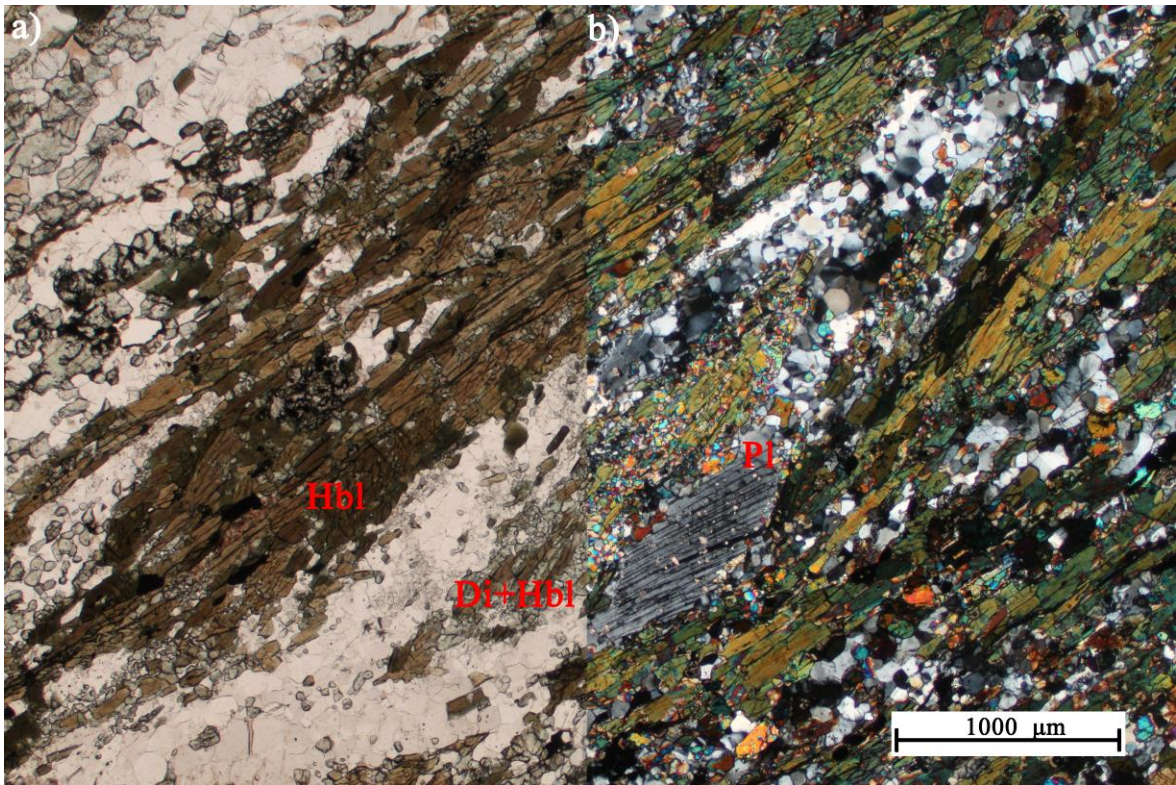
U vrpcama plagioklasa pojavljuju se i bezbojni do blago zelenkasti pirokseni (slika 15). Zrna piroksena su alotriomorfna, a na većim poprečnim presjecima mogu se jasno vidjeti dva sustava kalavosti pod približno 90°. Veličina im varira ovisno u kojem proslojku se nalaze, veća zrna nalaze se u vrpcama plagioklasa. Po izmjerenim kutovima kosog potamnjenja na uzdužnim presjecima (44°, 40°, 42°, 45°), vlastitoj te interferencijskoj boji, piroksen je određen kao diopsid.



Slika 13. Mikrofotografija uzorka amfibolita 141 prikazuje strukturu te glavne mineralne vrste – izdužene amfibole (Hbl), plagioklase (Pl) i piroksene (diopsid - Di). a) N-; b) N+.



Slika 14. Mikrofotografija uzorka amfibolita 141 na kojoj je vidljiva pojava sitnozrnatijeg piroksena (Di) uz rub velikih zrna amfibola (Hbl) uz ponešto plagioklase (Pl). a) N-; b) N+.



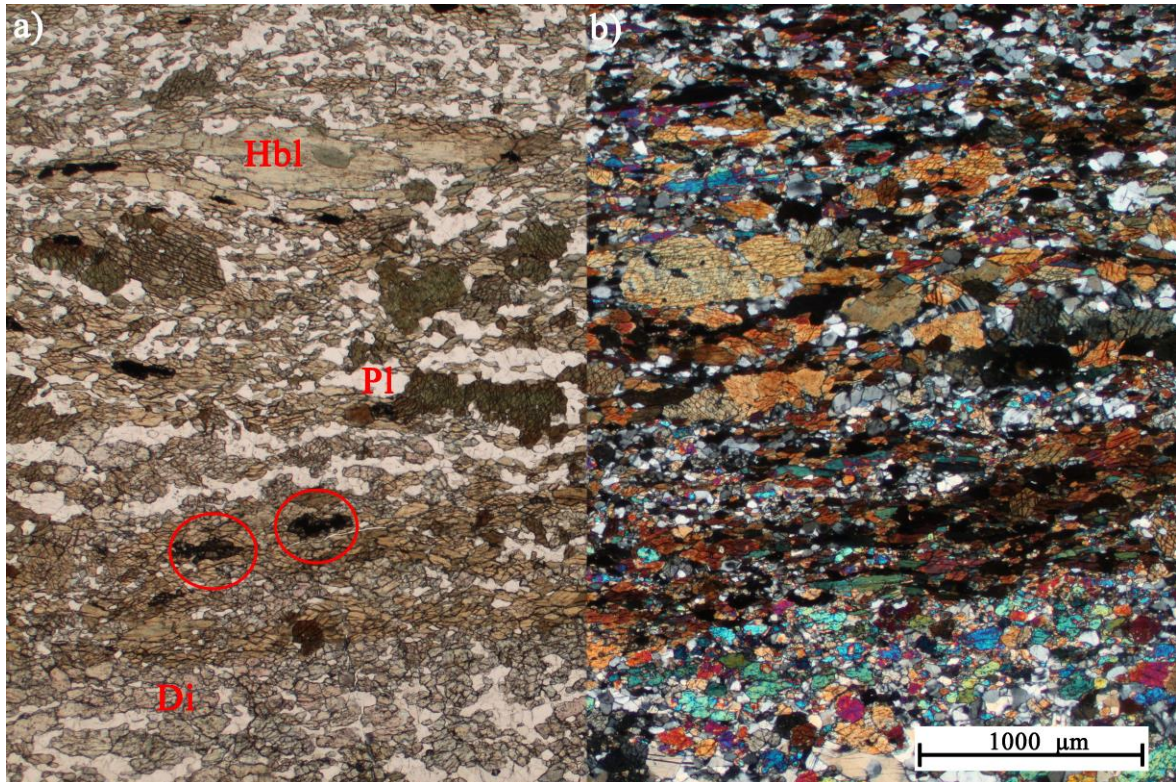
Slika 15. Mikrofotografija uzorka 141 koja prikazuje lećasti agregat piroksena (Di) unutar proslojka plagioklasa (Pl). Na slici a) bez uključenog analizatora, mogu se uočiti ostaci amfibola (Hbl) koji ukazuju da je lećasta nakupina piroksena vjerojatno nastala iz velikog zrna amfibola. a) N-; b) N+.

4.1.4. Amfibolit 150 – Kamenac-potok

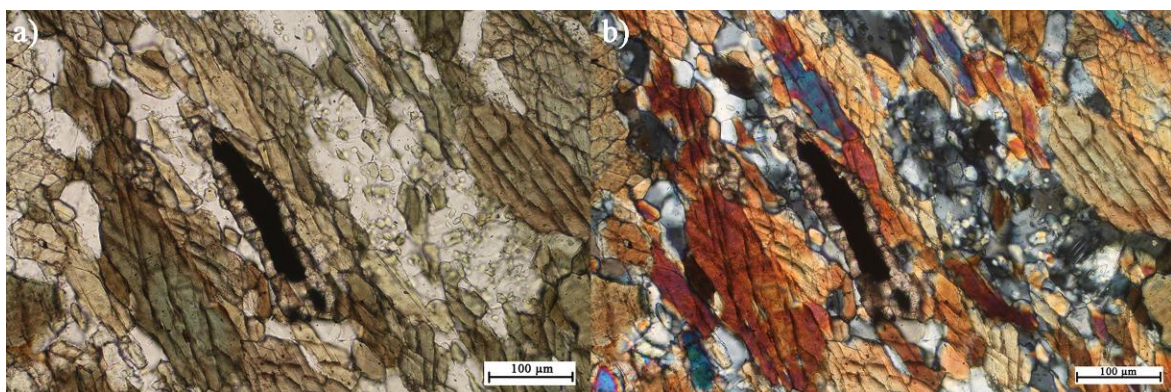
Uzorak 150 pokazuje granonematoblastičnu do nematogranoblastičnu strukturu te jasnu škriljavost (slika 16). Tekstura je paralelna s pravilnom izmjenom amfibolskih vrpca s plagioklasom i piroksenima bogatih vrpca, a folijacija se očituje u orijentaciji izdužene osi amfibola. Glavne mineralne faze su amfiboli (50 vol. %), plagioklasi (15 vol. %), pirokseni (20 vol. %) te granati (do 5 vol. %), što bitno razlikuje ovaj preparat od ostalih. Od akcesornih minerala pojavljuju se klorit, titanit te opaki minerali s reakcijskim ovojem tj. leukoksenom (slika 17).

Mikroskopske karakteristike amfibola u preparatu iste su kao u prethodnim uzorcima. Veličina zrna varira od 0,5 do 2 mm, a boja zrna se kreće od zelene u centru do smeđe boje na rubovima (slika 18). Takva zonalnost u boji ukazuje na promjenu u kemijskom sastavu hornblende. Između amfibolskih vrpca, pojavljuju se vrpce plagioklasa i piroksena, a kroz središte preparata prolazi i vrpca koju grade pirokseni s granatima (slika 19). I u ovom uzorku plagioklas se javlja u obliku veoma sitnih alotriomorfnih zrna, no uočene su i deformacijske lamele na pojedinim zrnima, kao i undulozno potamnjenje (slika 20).

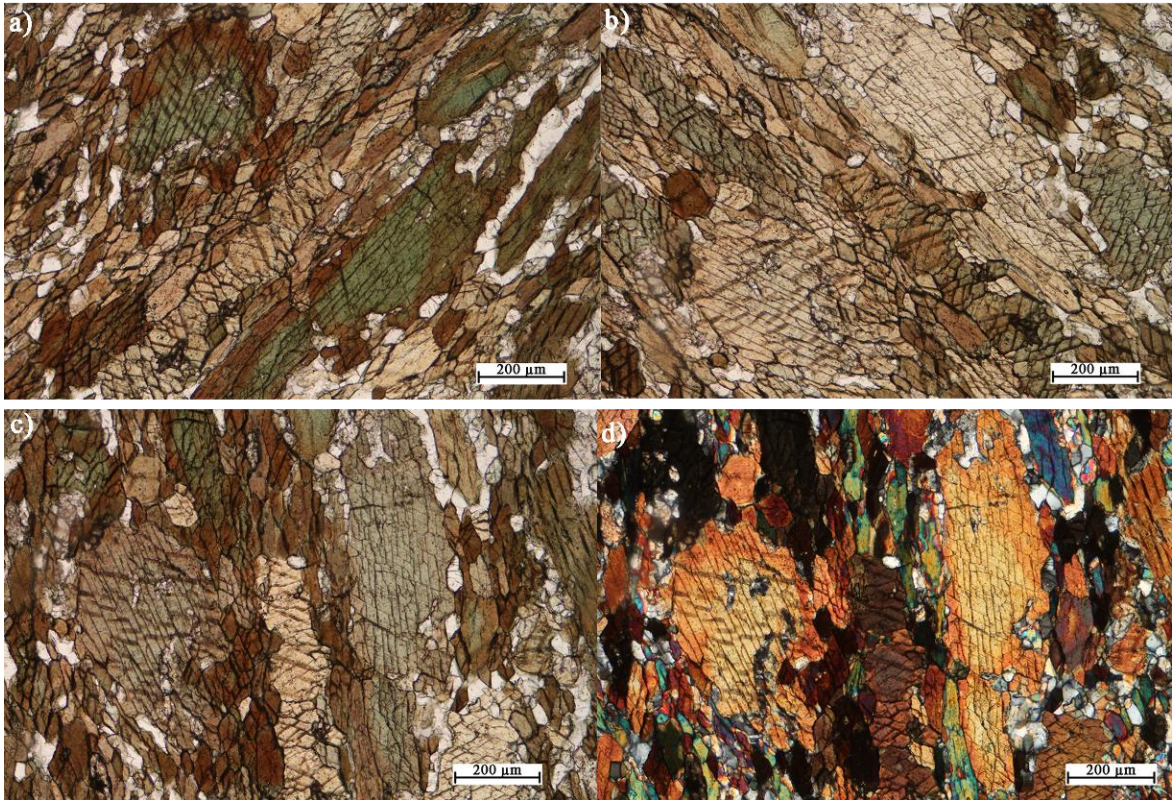
Mikroskopske karakteristike piroksena slične su diopsidima iz preparata 141. Pokazuju vrlo blag pleokroizam od bezbojne do blijedo zelenkaste boje. Zrna su alotriomorfna s jasno izraženom kalavosti na uzdužnim i poprečnim presjecima. Poprečni presjeci potamne simetrijski. Interferencijska boja kreće se od sive do žute prvog reda do živih boja drugog reda.



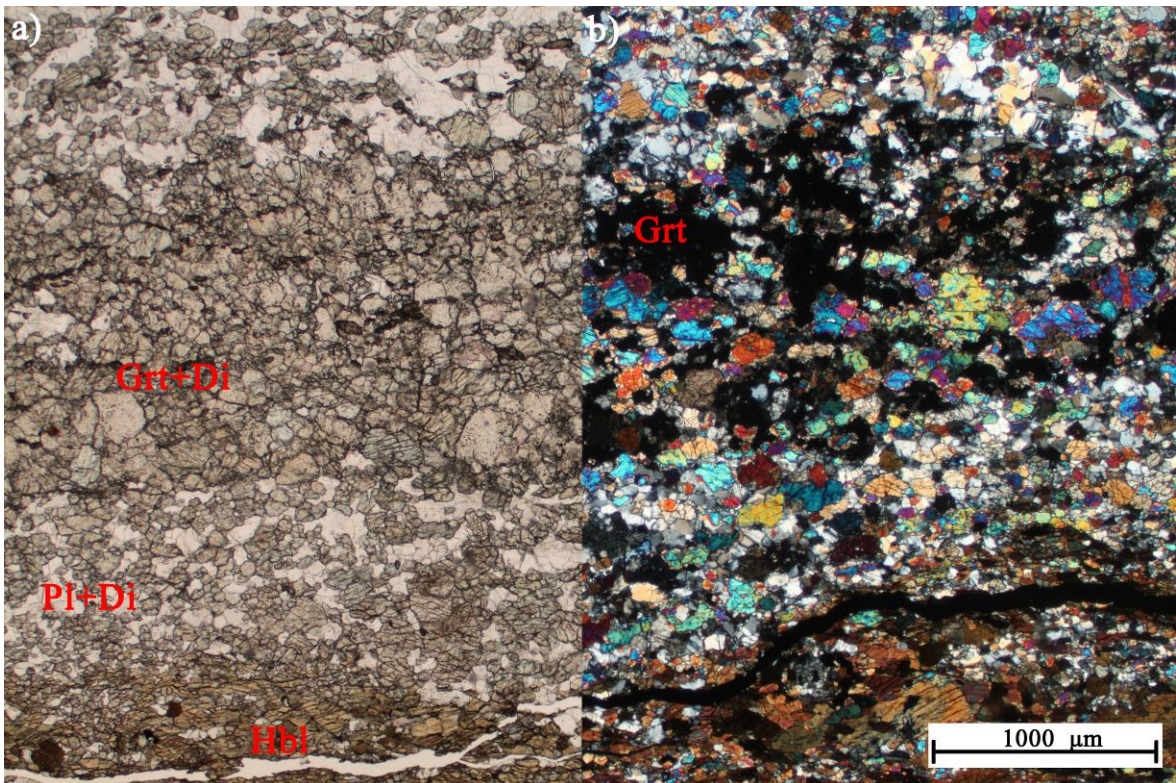
Slika 16. Mikrofotografija uzorka amfibolita 150 prikazuje generalnu strukturu. Vidljiva je izmjena vrpca drugačijeg mineralnog sastava počevši od plagioklasa (Pl) u izmjeni s amfibolom (Hbl) na vrhu slike, preko dva tipa amfibolskih vrpca završno s vrpcom piroksena (Di) na dnu slike. Vidljiv je i ilmenit s titanitskim ovojem (zaokruženo). a) N-; b) N+.



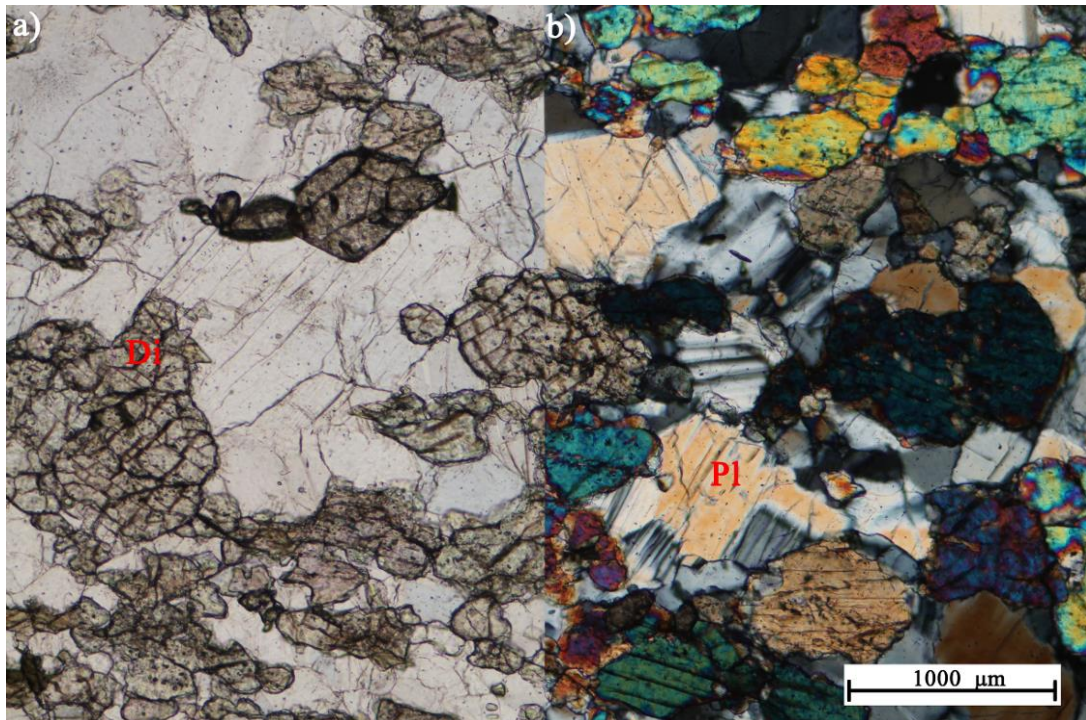
Slika 17. Mikrofotografija uzorka 150 sa zrnom ilmenita s titanitskim ovojem (leukoksen) u središtu vidnog polja. a) N-; b) N+.



Slika 18. Mikrofotografija uzorka 150 koja prikazuje zrna zonalnih amfibola sa zelenom unutrašnjosti i smeđim rubovima. Slike pod a) i b) snimljene su u položajima maksimalnog potamnjena te se može vidjeti izražen pleokrozizam. Slike pod c) i d) snimljene su u položaju maksimalne rasvjete bez i s uključenim analizatorom.



Slika 19. Nastavak strukture uzorka amfibolita 150 na kojoj je vidljiv proslojak bogat granatima (Grt) u izmjeni s piroksenima (Di). Iznad i ispod proslojka granata, nalaze se plagioklasi (Pl) u izmjeni s piroksenima. a) N-; b) N+.



Slika 20. Mikrofotografija odabranog područja plagioklasa (Pl) i piroksena (diopsid - Di) uzorka 150. Na plagioklasima na b) slici mogu se vidjeti deformacijske lamele. a) N-; b) N+.

4.1.5. Amfibolit 028 – Kamenjača-Stelovača

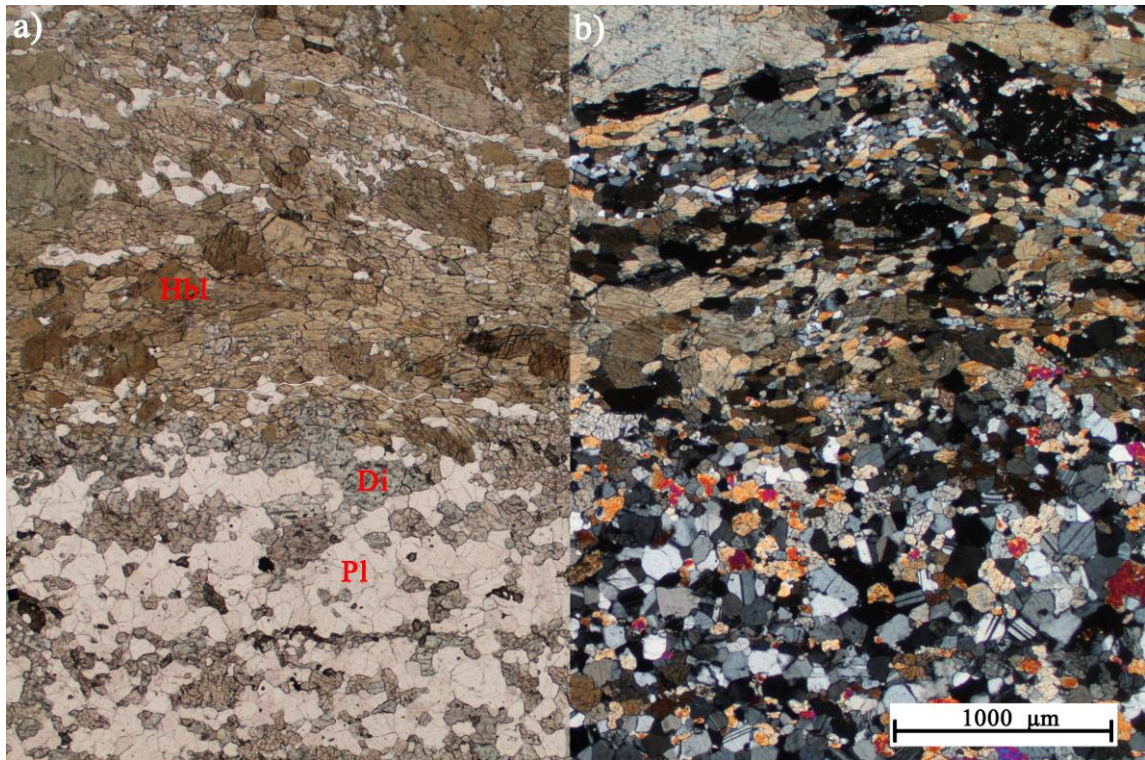
Struktura uzorka je granoblastična do nematoblastična. Od minerala dolaze amfiboli (70 vol. %), plagioklasi (20 vol. %) i pirokseni (10 vol. %), a podređeno titanit te opaki minerali. Tekstura je paralelna vrpčasta koja se očituje u izmjeni proslojaka bogatih amfibolom s više ili manje plagioklasa te proslojaka bogatih plagioklasima i piroksenima (slike 21 i 22). Titanit se pojavljuje većinski u amfibolskim proslojcima, a uočena je i pojava ilmenita s ovojem od titanita (slika 23).

Amfibolska zrna su alotriomorfna, relativno ujednačenih veličina zrna (u prosjeku 0,6 mm), iako se pojavljuju i velika zrna (do 2 mm). Zrna pokazuju pleokroizam od blijedo smeđozelene do tamnije smeđe boje. Unutar amfibolskih proslojaka podređeno dolazi i sitni plagioklas. Granice zrna su oštre i uglavnom ravne, ponegdje nepravilne.

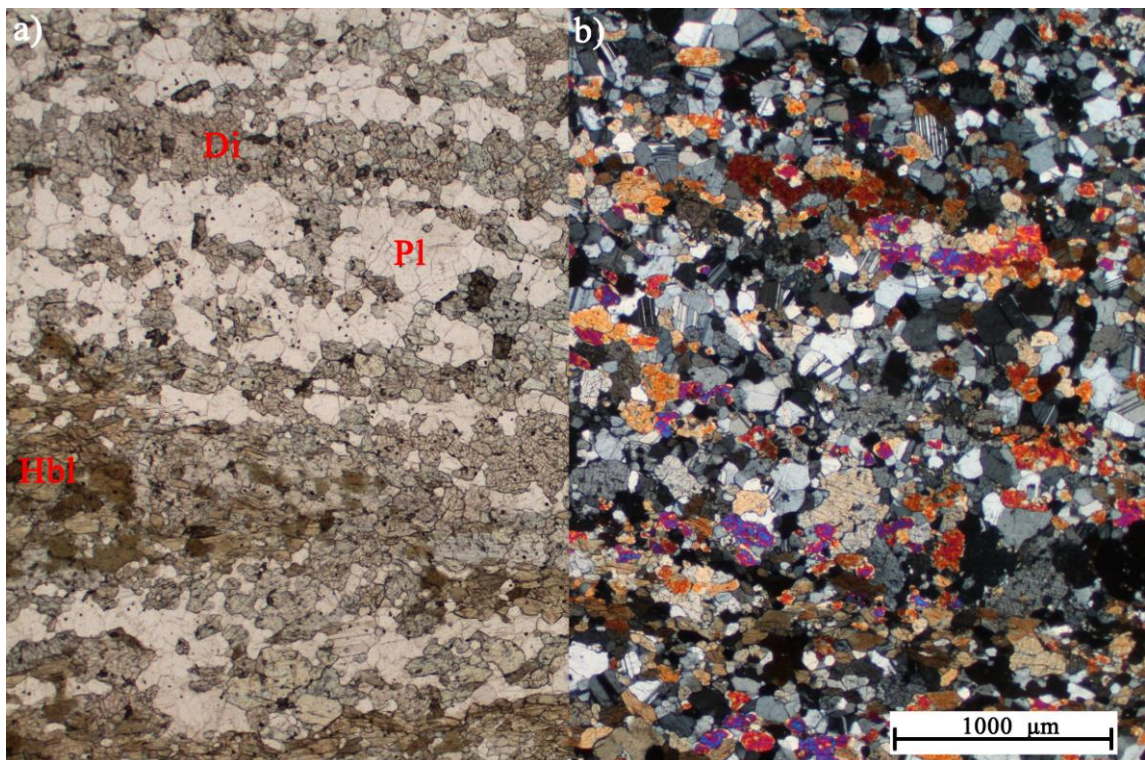
Plagioklasi su alotriomorfni i relativno ujednačenih veličina. Neka zrna pokazuju undulozno potamnjenje, no u primjetno manjoj mjeri u usporedbi s ostalim uzorcima. Izraženije su pojave polisintetskih sraslačkih lamela kao i poligonalnog međusobnog kontakta među zrnima (slika 24). Na manjem broju zrna uočene su i deformacijske lamele.

Zrna piroksena su alotriomorfna. Nekolicina pokazuje veoma slab pleokroizam od bezbojne do blijedo zelenkaste boje. Granice prema ostalim zrnima su oštre. Zrna sa

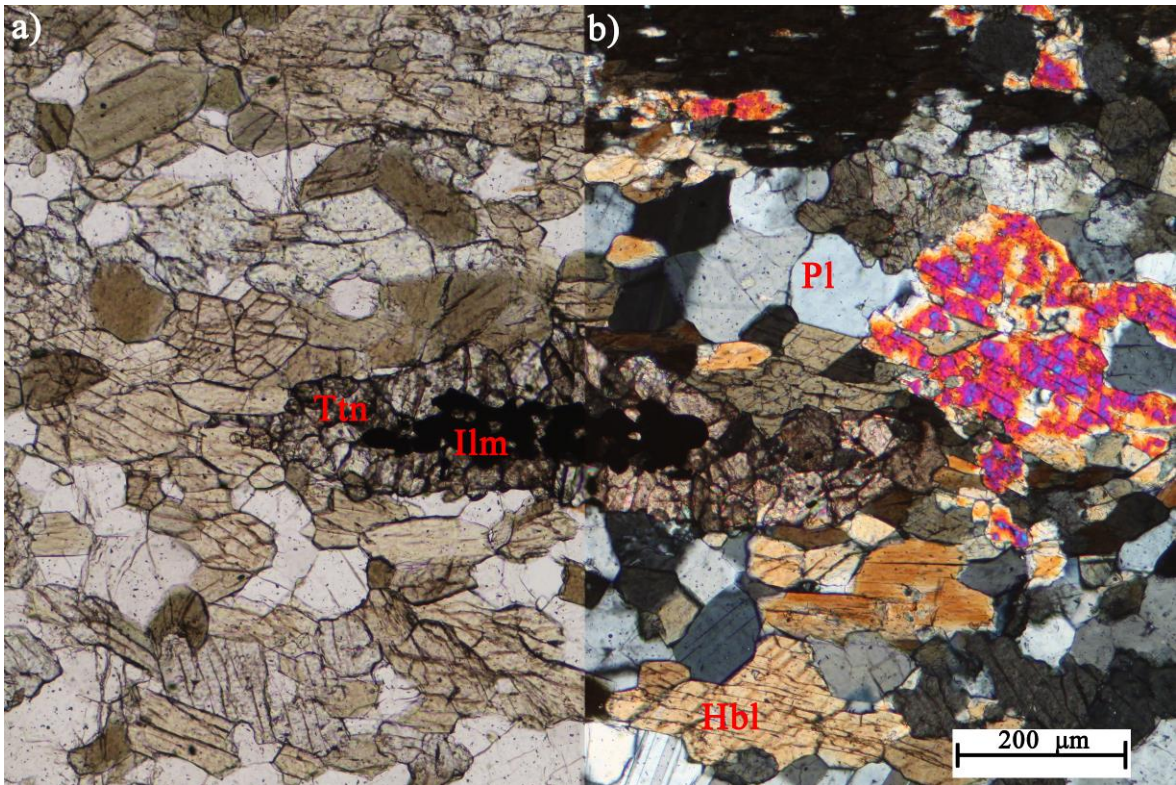
slabim pleokroizmom pokazuju identične mikroskopske karakteristike kao u uzorku 150 i 141 te su određena kao diopsid.



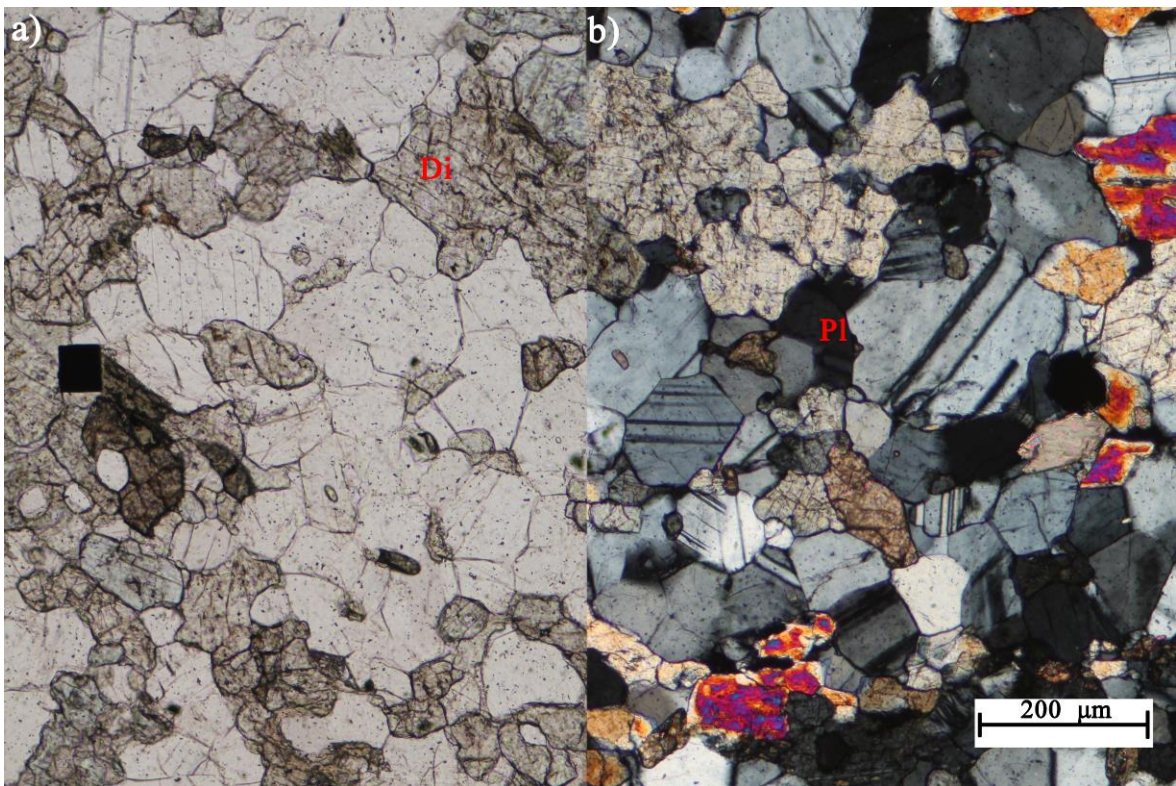
Slika 21. Mikrofotografija strukture uzorka amfibolita 028. Na gornjem dijelu slike dominantan je amfibol (Hbl), dok je na donjem dijelu dominantan plagioklas (Pl) s ponešto piroksena (Di). a) N-; b) N+.



Slika 22. Mikrofotografija granoblastičnog dijela strukture amfibolita 028 na kojem je vidljiva izmjena plagioklasa (Pl) i piroksena (Di) uz manji proslojak hornblende (Hbl). a) N-; b) N+.



Slika 23. Mikrofotografija zrna ilmenita (Ilm) s ovojem od titanita (Ttn) (leukoksen) unutar uzorka 028. Prisutnost titanitskog ovoja ukazuje da je zrno ilmenita starije te ukazuje na promjenu P-T uvjeta. a) N-; b) N+.



Slika 24. Mikrofotografija agregata plagioklasa (Pl) i piroksena (Di) uzorka 028. Vidljiv je poligonalan međusobni kontakt između zrna plagioklasa i polisintetske sraslačke lamelle. a) N-; b) N+.

4.2. Rezultati kemijske analize

Rezultati cjelostijenske kemijske analize 11 uzoraka amfibolita s Moslavačke gore dobiveni pomoću ICP-MS metode prikazani su u tablici 1.

4.2.1. Obrada geokemijskih podataka: primjena klasifikacijskih dijagrama

Prema rezultatima mikroskopskih istraživanja, uzorci Moslavačke gore mogu se klasificirati kao amfiboliti. Uzorci 028, 141 i 150, uz hornblendu i plagioklase kao glavne faze, sadrže i diopsid te se mogu klasificirati i kao diopsidski amfiboliti. Diopsid se dominantno pojavljuje uz plagioklas kao vrpce unutar preparata 028 i 150 (slike 19 i 22). U uzorku 141, dominantna pojava diopsida je uz rubove zrna amfibola (slika 14). U kontekstu metamornih uvjeta, ovi uzorci pripadali bi vršnom dijelu, dok bi ostali pripadali srednjem dijelu amfibolitnog facijesa.

Klasifikacijski dijagrami za metamorne stijene najčešće su odraz njihova protolita iako uvijek treba imati na umu moguće alteracije, utjecaj fluida, parcijalnog taljenja i slično. Kako bi se izbjegao problem izmjene kemijskog sastava prilikom utjecaja takvih čimbenika, pokazalo se pogodnim koristiti klasifikacijske dijagrame koji su bazirani na nemobilnim elementima te njihovim omjerima (PEARCE, 2014). Nemobilni elementi najčešće su oni koji svojom zastupljenošću spadaju u elemente u tragovima. Treba napomenuti da i pri korištenju nemobilnih elemenata treba biti oprezan te dobro poznavati geokemijsko ponašanje pojedinih elemenata radi mogućih odstupanja u ponašanju. Prema ROLLINSON i PEASE (2021), generalno je pravilo da su litofilni elementi velikih ionskih radijusa (LILE: Cs, Sr, K, Rb, Ba) mobilni, a elementi velike snage polja (HFSE: REE, Sc, Y, Th, Zr, Hf, Ti, Nb, Ta, P) nemobilni. Uz to, elementi skupine prijelaznih metala (Mn, Zn i Cu) uglavnom su mobilni, pogotovo pri visokim temperaturama, dok su Co, Ni, V te Cr nemobilni. Ovakva je generalizacija ponašanja uglavnom točna i primjenjiva, no zabilježena su i mnoga odstupanja.

Tablica 1. Cjelostijenske kemijske analize uzoraka amfibolita s lokaliteta Pleterac (027, 135, 136-1, 137, 139, 140, 141, 142a, 143), Kamenjača-Stelovača (028) i Kamenac-potok (150). Uzorak 028 preuzet je iz doktorske disertacije PETRINEC (2013).

oznaka uzorka	027	028	135	136-1	137	139	140	141	142a	143	150
tip stijene	amfibolit Pleterac	amfibolit Kamenjača - Stelovača	prugasti amfibolit - kontakt	prugasti amfibolit - kontakt	prugasti amfibolit - kontakt	prugasti amfibolit - kontakt	amfibolit - kompaktni	Di-amph + leukokratski džepići	amfibolit - kompaktni	prugasti amfibolit	Di-amph Kamenac- potok
SiO ₂	51.66	44.25	47.42	46.73	47.21	50.59	48.44	45.99	48.33	49.55	44.82
Al ₂ O ₃	15.87	14.98	15.51	16.11	15.84	17.57	14.28	13.75	16.06	15.95	16.03
Fe ₂ O ₃ *	6.78	11.09	10.01	9.68	9.41	6.15	13.11	13.52	6.64	7.53	10.58
MgO	8.95	8.78	9.82	10.23	9.79	8.46	7.61	6.83	11	10.04	7.26
CaO	12.13	16.22	11.59	12.04	11.54	12.6	11.05	14.24	13.81	12.34	16.8
Na ₂ O	2.19	1.52	1.86	2.13	2.19	2.61	1.78	2.01	1.36	1.83	1.63
K ₂ O	0.13	0.37	0.09	0.07	0.08	0.06	0.39	0.26	0.07	0.05	0.36
TiO ₂	0.38	1.27	1.59	1.09	1.23	0.48	1.31	1.65	0.37	0.73	1.26
P ₂ O ₅	0.01	0.08	0.13	0.11	0.12	0.02	0.11	0.15	<0,01	0.05	0.08
MnO	0.13	0.17	0.16	0.15	0.15	0.12	0.2	0.2	0.12	0.14	0.16
Cr ₂ O ₃	0.02	0.04	0.045	0.06	0.053	0.028	0.021	0.017	0.061	0.028	0.039
Sc	40	33	37	36	35	36	44	40	38	39	31
LOI**	1.5	1	1.5	1.3	2.1	1.1	1.4	1.1	1.9	1.5	0.7
Suma	99.81	99.78	99.72	99.74	99.72	99.8	99.74	99.7	99.76	99.76	99.76
Ba	30	83	50	10	12	16	55	52	13	24	41
Be	0.5	0.5	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Co	35.4	50.8	50.5	49.4	44.5	33.9	52.7	55.5	43.2	38.8	56.2
Cs	0.4	0.4	0.4	0.3	1.1	0.4	0.3	1.3	0.2	0.4	0.3
Ga	13	17.3	14.2	14.8	14.1	13.2	14.9	16.2	11.9	11.9	14.1
Hf	0.5	2	2.1	1.6	1.9	0.8	1.9	2.6	1.1	1	1.9
Nb	0.3	5.2	2.3	1.2	1.7	0.5	4.1	5.3	0.6	0.5	4.9
Rb	3.7	6.7	1.7	0.7	1.1	0.6	6.8	3.4	0.8	0.4	6.2
Sn	0.5	8	<1	<1	<1	<1	2	<1	<1	<1	3
Sr	204.6	296.2	150.1	152.8	350.6	175.3	204.2	496.6	124.4	153.1	336.4
Ta	0.05	0.4	0.2	<0,1	<0,1	<0,1	0.3	0.4	<0,1	<0,1	0.4
Th	0.1	0.3	0.3	<0,2	<0,2	<0,2	0.3	0.5	<0,2	<0,2	0.3
U	0.05	0.1	0.3	<0,1	<0,1	<0,1	0.7	0.4	<0,1	<0,1	0.1
V	177	238	318	267	269	182	360	375	179	233	230
W	0.25	0.6	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Zr	20.1	78.4	79.7	53.6	71.2	27.5	73	96	40.7	28.9	68.7

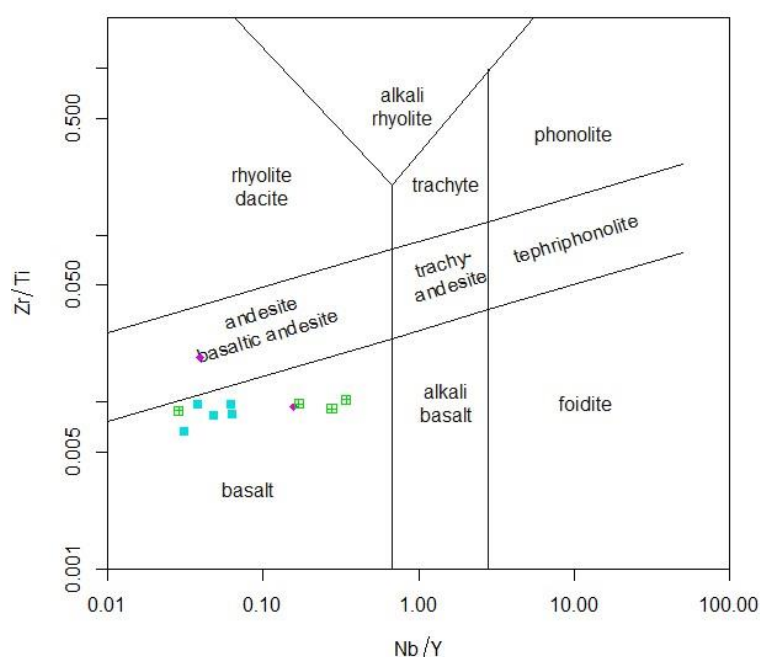
oznaka uzorka	027	028	135	136-1	137	139	140	141	142a	143	150
tip stijene	amfibolit Pleterac	amfibolit Kamenjaca - Stelovaca	prugasti amfibolit - kontakt	prugasti amfibolit - kontakt	prugasti amfibolit - kontakt	prugasti amfibolit - kontakt	amfibolit - kompaktni	Di-amph + leukokratski džepići	amfibolit - kompaktni	prugasti amfibolit	Di-amph Kamenac- potok
Y	10.5	15.3	36	24.7	27.3	13.1	26.1	31.3	15.2	16.1	17.8
La	0.7	4.6	5.8	3.1	4.3	1.9	4.9	6.7	1.6	1.7	6.4
Ce	2.2	11.9	14.8	8.9	12.6	5	11.5	15.4	4.4	4.2	13.2
Pr_x	0.39	1.8	2.36	1.38	1.95	0.75	1.76	2.32	0.65	0.67	1.84
Nd	2.2	9.7	12.1	7.7	9.7	3.5	9	11.6	3.3	3.8	9.3
Sm	0.91	2.55	3.87	2.41	2.82	1.28	2.78	3.53	1.22	1.41	2.58
Eu	0.52	0.91	1.41	0.91	1.09	0.63	1.01	1.26	0.5	0.62	0.97
Gd	1.41	3.13	5.06	3.28	3.78	1.71	3.53	4.27	1.82	2.04	2.85
Tb	0.28	0.53	0.96	0.64	0.7	0.34	0.67	0.81	0.36	0.4	0.51
Dy	1.83	3.15	6.73	4.15	4.61	2.37	4.32	5.16	2.51	2.69	3.12
Ho	0.39	0.64	1.39	0.96	1.01	0.5	1	1.08	0.58	0.61	0.64
Er	1.15	1.6	4.19	2.94	3.11	1.55	2.91	3.35	1.74	1.85	1.79
Tm	0.16	0.24	0.59	0.41	0.43	0.22	0.43	0.47	0.24	0.28	0.25
Yb	1.09	1.54	3.85	2.44	2.77	1.44	2.84	3.03	1.54	1.76	1.6
Lu	0.17	0.22	0.58	0.38	0.42	0.2	0.42	0.46	0.25	0.25	0.24
Mo	0.05	0.1	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Cu	9.6	34.9	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Pb	1.9	2.3	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Zn	5	19	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Ag	0.05	0.1	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Ni	8.6	55.1	146	168	161	84	76	77	159	108	178
As	1	55.4	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Au	0.25	0.25	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Cd	0.05	0.1	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Sb	0.05	0.05	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
B			N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Hg	0.005	0.005	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Tl	0.05	0.05	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Se	0.25	0.25	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Bi	0.05	0.4	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Eu/Eu* ***	1.4	0.98	0.97	0.99	1.02	1.3	0.99	0.99	1.03	1.12	1.09
(La/Yb) _N	0.43	2.01	1.02	0.86	1.05	0.89	1.16	1.49	0.7	0.65	2.7
(La/Sm) _N	0.48	1.13	0.94	0.81	0.96	0.93	1.11	1.19	0.82	0.76	1.56
(Gd/Yb) _N	1.04	1.64	1.06	1.08	1.1	0.96	1	1.14	0.95	0.94	1.44

* Fe₂O₃ = ukupno željezo izraženo u obliku Fe₂O₃

** LOI (*loss on ignition*) = gubitak fluida žarenjem (četiri sata na temperaturi od 1000°C)

*** Eu/Eu* = srednja vrijednost (Eu_N/v(Sm_N*Gd_N))

Jedan od takvih dijagrama utemeljenih na elementima u tragovima je upravo Pearceov dijagram (1996) koji koristi omjere nekompatibilnih nemobilnih elemenata u tragovima – Zr/Ti i Nb/Y (slika 25). Zr/Ti omjer odražava stupanj diferencijacije magme, dok je Nb/Y zamjena za alkalije ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) koje su u metamorfnim uvjetima veoma mobilne pa stoga klasični TAS (ukupne alkalije nasuprot silicija) dijagram nije pogodan. Po kemijskom sastavu, svi uzorci osim jednog padaju u polje bazalta, a jedan u polje nešto kiselijeg bazaltnog andezita. Ovakvo je geokemijsko razmatranje nužno kako bi se provjerila prikladnost ulaznih podataka istraživanih metamorfnih stijena za primjenu diskriminacijskih dijagrama.



Slika 25. Nb/Y – Zr/Ti klasifikacijski dijagram (inačica TAS dijagrama) modificiran prema PEARCE (1996). Uzorci 027, 028, 141 i 150 označeni su zelenim kvadratićima, uzorci 135, 136-1, 137, 139 i 143 označeni su plavim kvadratićima, a uzorci 140 i 142a ljubičastom točkicom. Uzorak 142a pada u polje andezita/bazaltnog andezita, dok ostatak pada u polje bazalta.

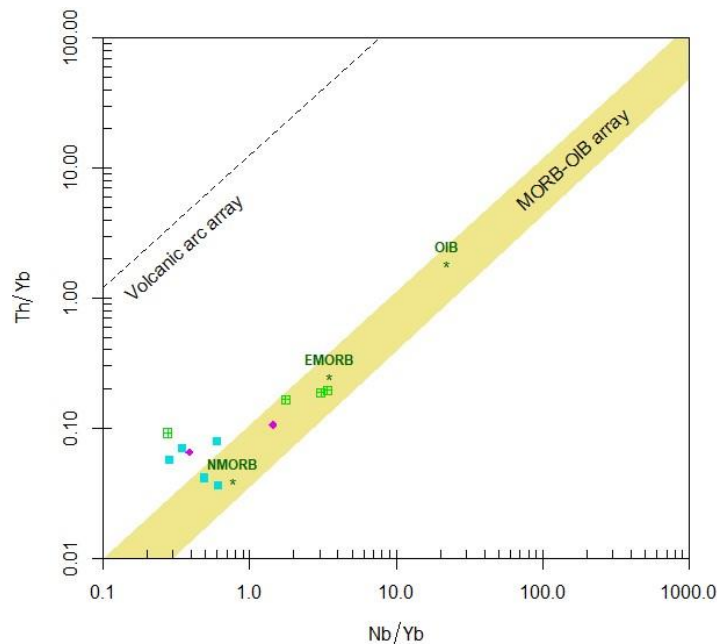
4.2.2. Geotektonski položaj

S obzirom na složenu evoluciju Moslavačke gore, diskriminacijski dijagrami ne uzimaju se striktno kao dokaz, već više kao indikacija geotektonskog položaja protolita (BALEN, 1999). Glavni razlog tomu je njihova uporaba primarno na svježim magmatskim stijenama te već spomenuta mobilnost elemenata prilikom izmjena, metamorfizma i utjecaja fluida. U tu svrhu, korišteni su dijagrami bazirani na nemobilnim elementima iz radova PEARCE (2008) te SHERVAIS (1982) za diskriminaciju bazaltnih stijena.

Pearceovi diskriminacijski dijagrami od elemenata koriste Th, Yb, Nb te TiO_2 . Jedan od dijagrama temelji se na omjerima Th/Yb i Nb/Yb, a drugi na TiO_2/Yb i Nb/Yb.

Th/Nb omjer koristi se kao pokazatelj utjecaja subdukcije odnosno utjecaja kontinentalne kore na promatrani geokemijski sustav. Oba elementa su veoma nekompatibilna i imaju slično geokemijsko ponašanje, no prilikom subdukcije Th postaje mobilan, dok Nb ostaje nemobilan (PEARCE, 2014). Analiza velikog broja uzoraka iz različitih geotektonskih okoliša pokazala je da će velika većina uzoraka oceanskih bazalta (>98%) pasti u dijagonalno polje MORB-OIB (PEARCE, 2008). Dijagonalno MORB-OIB polje s N-MORB, E-MORB i OIB točkama vidljivo je na slici 26. Magme koje su u svoj sastav asimilirale dijelove kontinentalne kore ili nastale u subdukcijskom okolišu, poprimit će više vrijednosti Th/Nb te će se na dijagramu nalaziti iznad dijagonalnog MORB-OIB polja tj. padat će u polje vulkanskih lukova. Iako svaki lokalitet ima svoj geokemijski potpis s obzirom na izvorište i geološku povijest, pokazalo se da je Th/Nb omjer dosta osjetljiv kao indikator kontaminacije te je stoga pogodan za korištenje.

Kako se u ovom radu radi o uzorcima amfibolita Moslavačke gore, ovaj i sljedeći dijagram koriste se za diskriminaciju njihovog pretpostavljenog protolita, a to je bazalt. Pretpostavka proizlazi najprije iz literaturnog pregleda, a u prilog tome ide i klasifikacijski dijagram prema PEARCE (1996) vidljiv na slici 25. Šest uzoraka od ukupno 11 pada u polje karakteristično za MORB-ove, dok ostatak pada malo iznad u polje vulkanskih lukova s nešto višim Th/Yb omjerom. Uzorci unutar dijagonalnog polja također su podijeljeni između vrijednosti za N- i E-MORB. Uzorci koji se nalaze bliže E-MORB-a mogu ukazivati na nešto obogaćenije izvorište. Za uzorke koji se nalaze u polju vulkanskih lukova objašnjenje nije jednoznačno. Indikacija bi mogla biti da se radi o kontaminaciji sustava kontinentalnom korom, no ne smije se isključiti niti niska količina torija izmjerena u uzorku, koja bi mogla biti izvor analitičke pogreške.

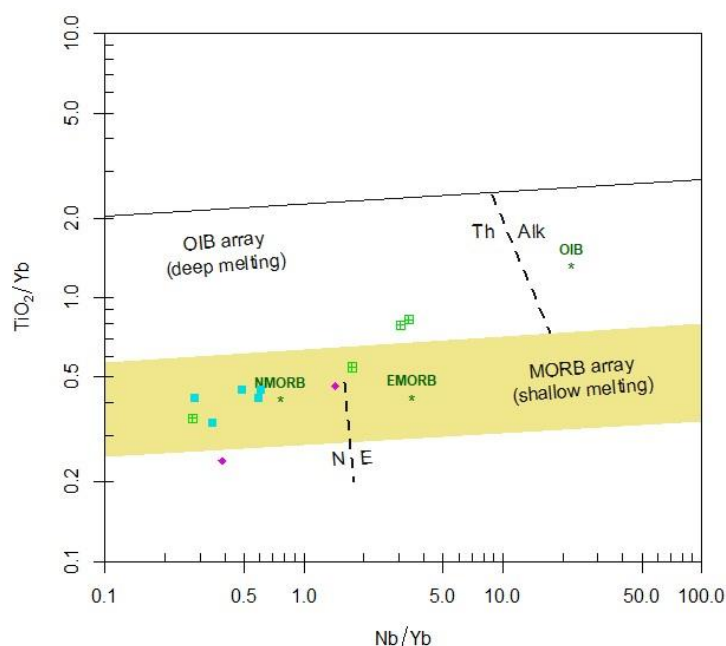


Slika 26. Nb/Yb – Th/Yb diskriminacijski dijagram prema PEARCE (2008). Uzorci 027, 028, 141 i 150 označeni su zelenim kvadratićima, uzorci 135, 136-1, 137, 139 i 143 označeni su plavim kvadratićima, a uzorci 140 i 142a ljubičastom točkicom. Unutar MORB-OIB polja počevši s lijeve strane nalaze se uzorci 136-1, 137, 140, 141, 150 i 028, a izvan su uzorci 143, 139, 027, 142a i 135.

Ti/Yb omjer koristi se kao indikator utjecaja dubokog taljenja na sustav (uključujući temperaturu plašta te debljinu litosfere). Prilikom plitkog taljenja (dominantno spinelski peridotiti) elementi Ti i Yb imaju slično ponašanje odnosno sličan koeficijent distribucije. Prilikom dubokog taljenja peridotita, u uvjetima stabilnosti granata, doći će do njihove frakcionacije jer je Yb sadržan unutar granata te će njihov omjer biti visok (PEARCE, 2008). Ova teorijska podloga bazirana je na razlici između sastava plićih i dubljih dijelova plašta. Naime, u okolišu plitkog plašta, dostupne faze su plagioklas i spinel. Na dubinama od 60 do 90 km, umjesto spinela nastat će granat kao nova stabilna faza. Koeficijenti distribucije većine elemenata u tragovima kod spinela i granata veoma se razlikuju, a to se najbolje uočava na primjeru teških elemenata rijetkih zemalja koje granat rado uklapa u svoju strukturu. Time će i njihovim taljenjem nastati dva potpuno različita izvorišta – plitko osiromašeno i duboko obogaćeno izvorište (WHITE, 2013).

Proizlazi da će u uvjetima gdje je postojao utjecaj dubokog taljenja Ti/Yb omjer biti visok, a time će se i na dijagramu nalaziti iznad skoro horizontalnog polja koje označava karakteristične vrijednosti za MORB odnosno plitko taljenje vršnog dijela plašta. Valja istaknuti da vrijednosti za N-MORB, E-MORB i OIB na ovom dijagramu više nisu kolinearne – vrijednosti standarda za OIB odskaču od N- i E-MORB-a. Njihove više vrijednosti Ti/Yb omjera proizlazi iz teorije da OIB nastaje iz dubokih izvorišta.

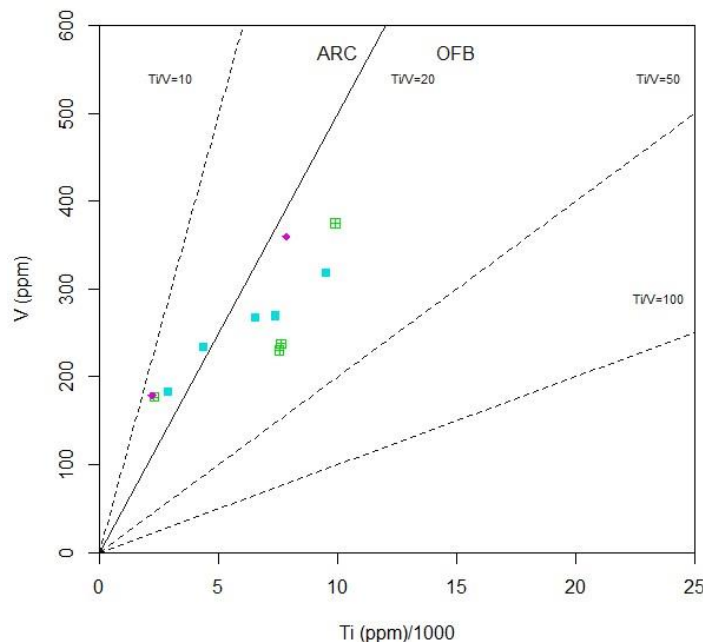
Prema ovom dijagramu, uzorci Moslavačke gore većinski padaju upravo u polje karakteristično za plitko taljenje, odnosno polje MORB-a. Dodatno, nalaze se na lijevoj strani čije vrijednosti omjera ukazuju na N-MORB izvorište. Dva uzorka nalaze se blizu N-MORB/E-MORB granice ($Nb/Yb = 1,45$), a preostala dva uzorka nalaze se blago iznad polja MORB-a odražavajući pritom mogućnost utjecaja dubokog taljenja na sustav, no taj slučaj je malo vjerojatan (slika 27).



Slika 27. Nb/Yb – TiO₂/Yb diskriminacijski dijagram prema PEARCE (2008). Uzorci 027, 028, 141 i 150 označeni su zelenim kvadratićima, uzorci 135, 136-1, 137, 139 i 143 označeni su plavim kvadratićima, a uzorci 140 i 142a ljubičastom točkicom. Uzorci 142a, 028 i 150 nalaze se izvan polja MORB, 140 i 141 padaju blizu granice $Nb/Yb = 1,45$, a ostatak se nalazi na lijevoj, N-MORB strani žućkastog MORB polja.

Na Ti–V dijagramu prema SHERVAIS (1982), na temelju omjera Ti i V moguće je odijeliti toleite otočnih lukova, MORB te alkalijske bazalte (slika 28). Osim što su nemobilni, istraživanja pokazuju da su Ti i V dosta otporni na procese trošenja te ostaju relativno nemobilni u niskim do srednjim uvjetima metamorfizma (SHERVAIS, 1982). Jedan od temelja ovog dijagrama je ovisnost vanadija o fugacitetu kisika, gdje njegov koeficijent distribucije pada s porastom fugaciteta kisika. Slijedi da su V^{4+} i V^{5+} koji spadaju u HFS elemente nekompatibilni, dok je V^{3+} , karakterističan za reduktivne uvjete, kompatibilan. Drugim riječima, u područjima oksidativnih uvjeta (npr. područja subdukcije gdje velik utjecaj ima voda) doći će do povećanja koncentracije nekompatibilnih vanadijevih iona. Također, treba uzeti u obzir da će s povećanjem stupnja parcijalnog taljenja (moguće radi utjecaja vode) pasti koncentracija Ti u nastaloj taljevini. Prvo polje obilježeno je niskim Ti/V omjerom te označava polje boninita. Iduće polje označeno na

dijagramu kao ARC (slika 28), prema nadopuni Pearcea (2014), uključuje toleite otočnih lukova (IAT – *island arc tholeiite*) te bazalte zalučnih (BaBB – *back-arc basin basalt*) i predlučnih (FAB – *forearc basin*) bazena subdukcijske zone koji se nalaze bliže ponirujoj ploči (*slab-proximal*). Treće polje na dijagramu označeno kao OFB (*oceanic floor basalt*), uključuje MORB te BaBB i FAB koji su udaljeni od poniruće ploče (*slab-distal*). BaBB i FAB koji su udaljeni od poniruće ploče geokemijski imaju sličan potpis kao MORB te iz tog razloga pripadaju istom polju na dijagramu (slika 28). Uzorci amfibolita Moslavačke gore 028, 135, 136-1, 137, 140, 141 te 150 padaju u polje OFB, dok uzorci 027, 139, 142a i 143 padaju u polje ARC. Takva raspodjela uzoraka sugerira da su se bazaltni protoliti geotektonski nalazili na području pod utjecajem subdukcijske zone.



Slika 28. Ti-V diskriminacijski dijagram prema SHERVAIS (1982). Granice definirane nagibom pravca (a) omjera Ti/V pojedinih geotektonskih okruženja su sljedeće: (1) boniniti – $a < \text{Ti/V} = 10$; (2) toleiti otočnih lukova (IAT + *slab-proximal* BaBB i FAB), na dijagramu ARC – $\text{Ti/V} = 10 < a < \text{Ti/V} = 20$; (3) MORB (+ *slab-distal* BaBB i FAB), na dijagramu OFB (*oceanic floor basalt*) – $\text{Ti/V} = 20 < a < \text{Ti/V} = 50$; (4) alkalijski bazalti i OIB – $\text{Ti/V} = 50 < a < \text{Ti/V} = 100$. Uzorci 027, 028, 141 i 150 označeni su zelenim kvadratićima, uzorci 135, 136-1, 137, 139 i 143 označeni su plavim kvadratićima, a uzorci 140 i 142a ljubičastom točkicom. Uzorci 143, 139, 142a i 027 padaju u polje ARC, a ostatak u polje OFB.

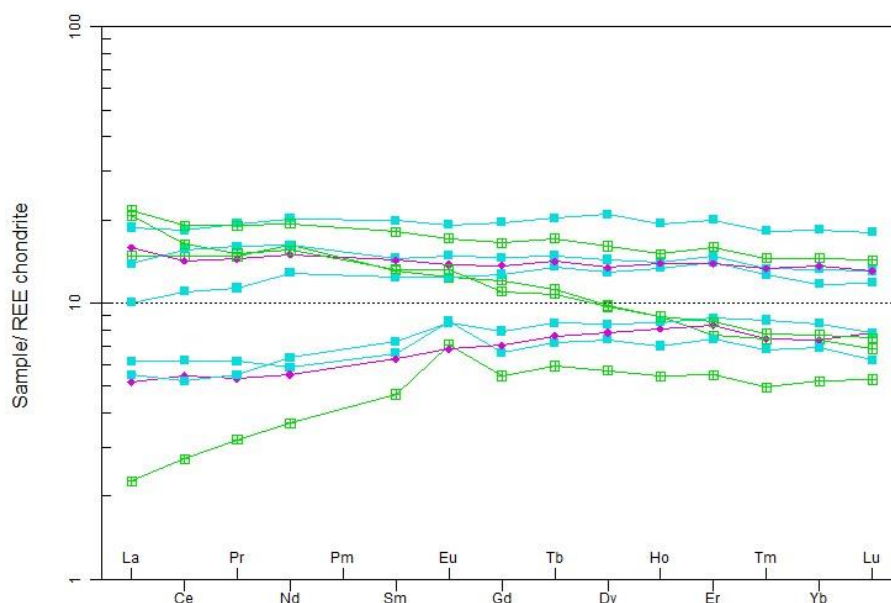
4.2.3. Multielementni dijagrami

Za potrebe rada korištena su dva tipa multielementnih (*spider*) dijagrama – dijagram REE normaliziran na hondrit prema BOYNTON (1984) te dijagram nemobilnih elemenata normaliziranih na N-MORB standard prema SUN i MCDONOUGH (1989) modificiran u PEARCE, (2014).

Velika prednost korištenja elemenata rijetkih zemalja u geokemijskim istraživanjima je u njihovom geokemijskom ponašanju. Pogodni su za analizu svih vrsta stijena zbog svoje netopljivosti i relativne nemobilnosti u uvjetima niskog stupnja metamorfizma, kao i prilikom trošenja ili hidrotermalne alteracije (ROLLINSON i PEASE, 2021). Drugo svojstvo koje čini analizu mogućom (i veoma pogodnom) je tzv. lantanidna kontrakcija. Radi se o malom, ali značajnom padu ionskog radijusa, zbog čega se REE frakcioniraju unutar grupe u različitim geološkim procesima.

Na *spider* dijagramu elemenata rijetkih zemalja normaliziranih na hondrit prema BOYNTON (1984), mogu se ugrubo uočiti dvije grupacije – prva grupa (uzorci 027, 139, 142a, 143) s normaliziranim vrijednostima ispod 10 te druga grupa (uzorci 028, 135, 136-1, 137, 140, 141, 150) s vrijednostima iznad 10 (slika 29). Unutar prve grupe može se uočiti blago osiromašenje lakih elemenata rijetkih zemalja (LREE) u odnosu na teške (HREE). Uzorak 027 vidljivo odskaka s nešto naglašenijim osiromašenjem LREE. Osim toga, uzorci 027 i 139 imaju blagu pozitivnu Eu anomaliju (redom 1,40 te 1,30). Frakcionacijski omjer REE $(La/Yb)_N$ unutar prve grupe je vrlo nizak te iznosi od 0,43 do 0,89. Frakcionacija unutar LREE i HREE također je niska s vrijednostima $(La/Sm)_N$ od 0,48 do 0,93 te $(Gd/Yb)_N$ od 0,94 do 1,04, no potvrđuje blago osiromašenje LREE. Vrijednosti omjera $(La/Sm)_N$ nalaze se unutar intervala vrijednosti za N-MORB koji prema literaturi iznosi 0,4-0,7 (SUN i sur., 1979).

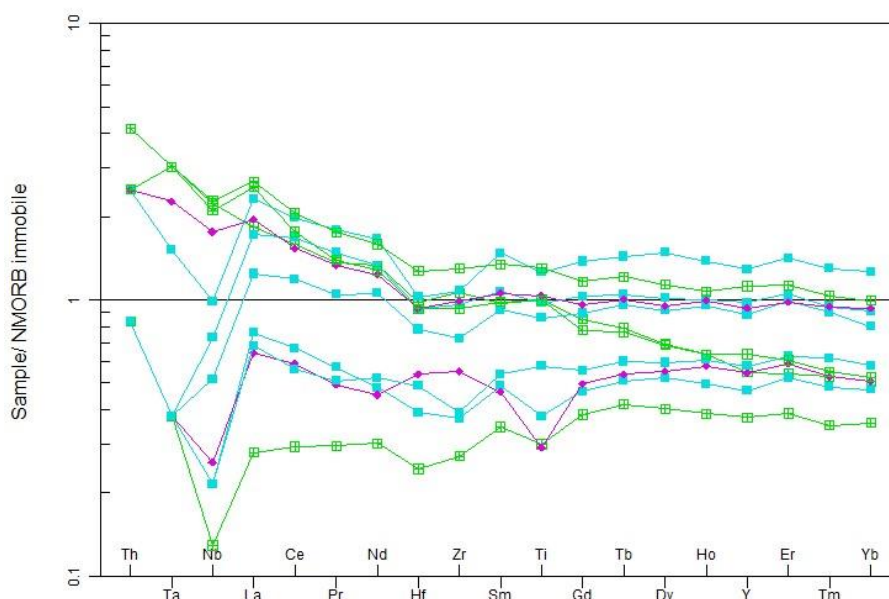
Druga grupa uzoraka pokazuje ujednačenije trendove uz odskakanje uzoraka 028 i 150 koji imaju negativni trend ka HREE. Druga grupa također nema izraženu frakcionaciju elemenata rijetkih zemalja iako je viša od prve grupe (vrijednosti $(La/Yb)_N$ od 0,86 do 2,70). Nešto više vrijednosti imaju i frakcionacijski omjeri unutar LREE i HREE, no vrijednosti su i dalje niske ($(La/Sm)_N$ od 0,81 do 1,56, $(Gd/Yb)_N$ od 1,00 do 1,64). U ovom slučaju vrijednosti omjera $(La/Sm)_N$ više odgovaraju vrijednostima za T-MORB, koji iznose 0,83–1,97 (SUN, 1979). Prosječne vrijednosti kemijskih podataka tranzicijskog T-MORB-a pokazuju vrijednosti između N- i E-MORB-a. Generalno je prihvaćeno mišljenje da nastaje miješanjem oba tipa magmi prilikom izdizanja, no ne smatra se zasebnim tipom izvorišta (WINTER, 2014). Odsutnost europijeve anomalije implicira da frakcionacija plagioklasa nije imala značajnu ulogu u nastanku protolita.



Slika 29. Multielementni *spider* dijagram elemenata rijetkih zemalja normaliziranih na hondrit prema BOYNTON (1984). Uzorci redom odozdo prema gore: 027, 142a, 143, 139, 136-1, 137, 028, 140, 135, 150, 141.

Multielementni *spider* dijagram nemobilnih elemenata normaliziranih na N-MORB prema SUN i MCDONOUGH (1989) modificiran u PEARCE, (2014) također pokazuje raspodjelu uzoraka u dvije grupe (slika 30). Raspodjela uzoraka između grupa identična je već spomenutoj raspodjeli na *spider* dijagramu REE normaliziranih na hondrit. Prva grupa pokazuje blago osiromašenje nemobilnih elemenata u odnosu na N-MORB. Najizraženija karakteristika prve grupe uzoraka je negativna niobijeva anomalija te blaga negativna titanijeva anomalija. Negativne Nb i Ti anomalije ukazuju na potencijalnu kontaminaciju sustava kontinentalnom korom odnosno implicira utjecaj subdukcije na sustav. Uzorci prve grupe općenito i dalje prate trend karakterističan za N-MORB uz blago odstupanje u lijevom dijelu dijagrama s ravnim trendom na desnoj strani.

Druga grupa uzoraka pokazuje obogaćenje elemenata od Th do Nd te se trend zaravnava ka desnoj strani dijagrama. Dva uzorka lagano odskaču s blagim osiromašenjem u odnosu na standard u području projekcije HREE. I ova grupa uzoraka pokazuje negativne Nb anomalije ukazujući na moguću kontaminaciju sustava kontinentalnom korom. Sam izgled trendova druge grupe također je karakterističan za N-MORB.



Slika 30. Multielementni spider dijagram nemobilnih elemenata normaliziranih na N-MORB prema SUN i MCDONOUGH (1989) modificiran u PEARCE, (2014).

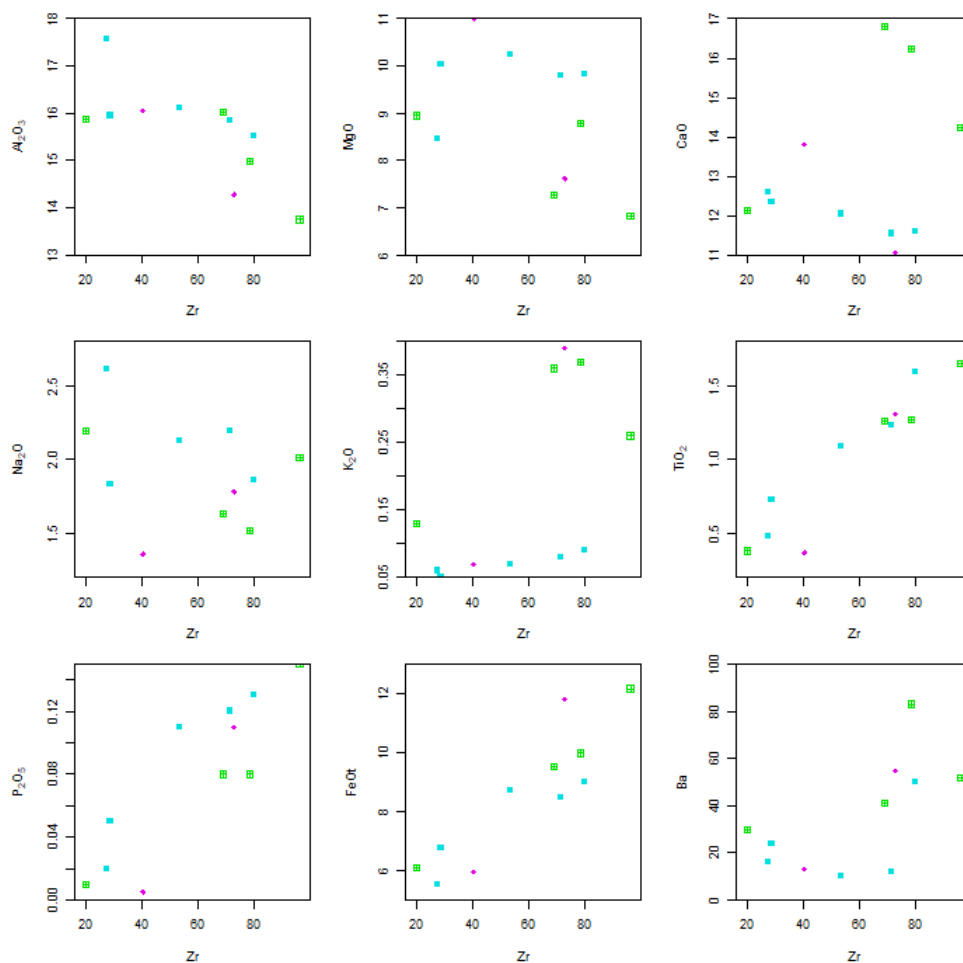
4.2.4. Dvovarijantni varijacijski dijagrami

Jedan od načina kako uočiti povezanost unutar grupe uzoraka su upravo dvovarijantni varijacijski dijagrami koji se temelje na uporabi dvije varijable (element, oksid elementa ili njihov omjer). Ovakav grafički prikaz može uvelike olakšati uočavanje određenih varijacija i trendova u velikom setu podataka. Također je lakše uočiti utjecaj određenih procesa poput frakcijske kristalizacije, parcijalnog taljenja, kontaminacije ili mobilnosti elemenata na izgled dijagrama. Na x-osi najčešće se koristi SiO_2 (takvi se dvovarijantni dijagrami nazivaju i Harkerovi dijagrami), no može se koristiti i magnezijski broj ($\text{Mg}\#$) ili sličan parametar za bazične stijene ili pak Al_2O_3 za glinovite sedimente (ROLLINSON i PEASE, 2021). Osim toga, kada se radi s metamornim ili izmijenjenim stijenama, analizu je moguće vršiti i s cirkonijem (Zr) na x-osi kao pokazateljem stupnja frakcionacije umjesto SiO_2 , kao što je primijenjeno u ovom radu na amfibolitima. Cirkonij je pogodan za korištenje kao jedna od varijabli zbog svoje relativne nemobilnosti u uvjetima srednjeg do visokog stupnja metamorfizma (MONTREUIL i CONSTANTIN, 2010; KUMAR i AHMAD, 2007).

Na slici 29 se može uočiti rast udjela TiO_2 i Fe_2O_3 koji prati rast udjela cirkonija. Uzorci se kreću od niskih do srednje visokih koncentracija (~6–12 tež. % za Fe_2O_3 i ~0,5–1,5 tež. % za TiO_2). Na dijagramima za CaO i K_2O mogu se izdvojiti dvije grupacije. Jedna grupa koja pokazuje srednje koncentracije CaO i niske koncentracije K_2O (redom ~12 tež.

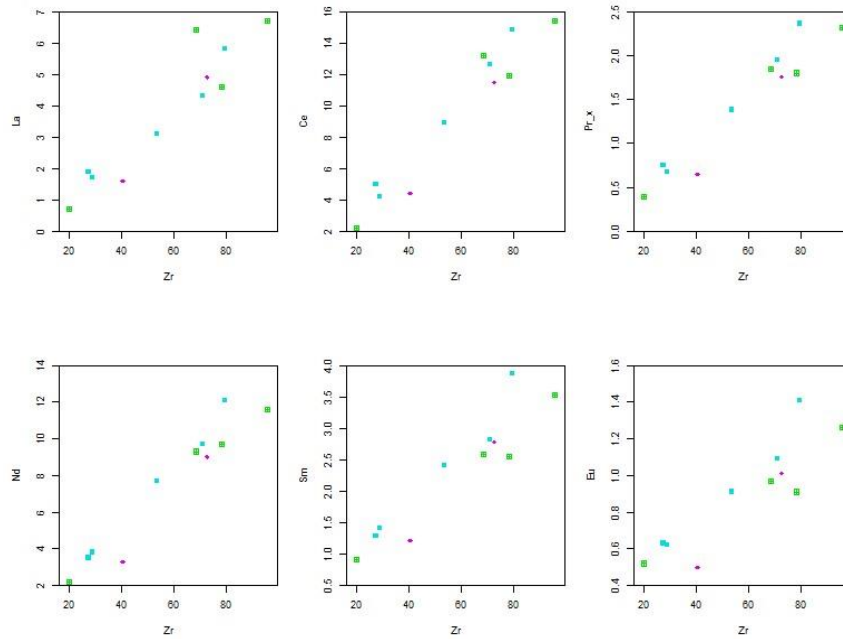
% i ~0,1 tež. %), dok druga grupa pokazuje visoke koncentracije CaO (od 14 do 17 tež. %) te više koncentracije K₂O (~0,35 tež. %). Na₂O pokazuje veliko raspršenje što je najvjerojatnije posljedica mobilnosti alkalija prilikom metamorfizma.

Korišten je i barij (slika 31) koji uz kalij predstavlja skupinu LILE (*large ion lithophile elements*). Barij (Ba²⁺) se generalno može naći unutar kalijevih feldspata, biotita i apatita u kojima dolazi na mjesto kalija (K⁺) uz supstituciju Si⁴⁺ iona s Al³⁺ ionom. Koncentracije barija, u ovom slučaju izražene u ppm, pokazuju slično grupiranje kao CaO i K₂O. Prema podacima SUN i MCDONOUGH (1989), grupa niskih koncentracija Ba (od 10 do 20 ppm) pokazuju povišenje u odnosu na standardne vrijednosti za N-MORB (6 ppm). Druga grupa s koncentracijama između 30 i 50 ppm, uz iznimku jednog uzorka čija je koncentracija oko 80 ppm, pokazuje osiromašenje u odnosu na standardne vrijednosti za E-MORB (57 ppm). Takva odstupanja nisu nimalo neobična s obzirom na to da su LILE u uvjetima metamorfizma u pravilu mobilni.

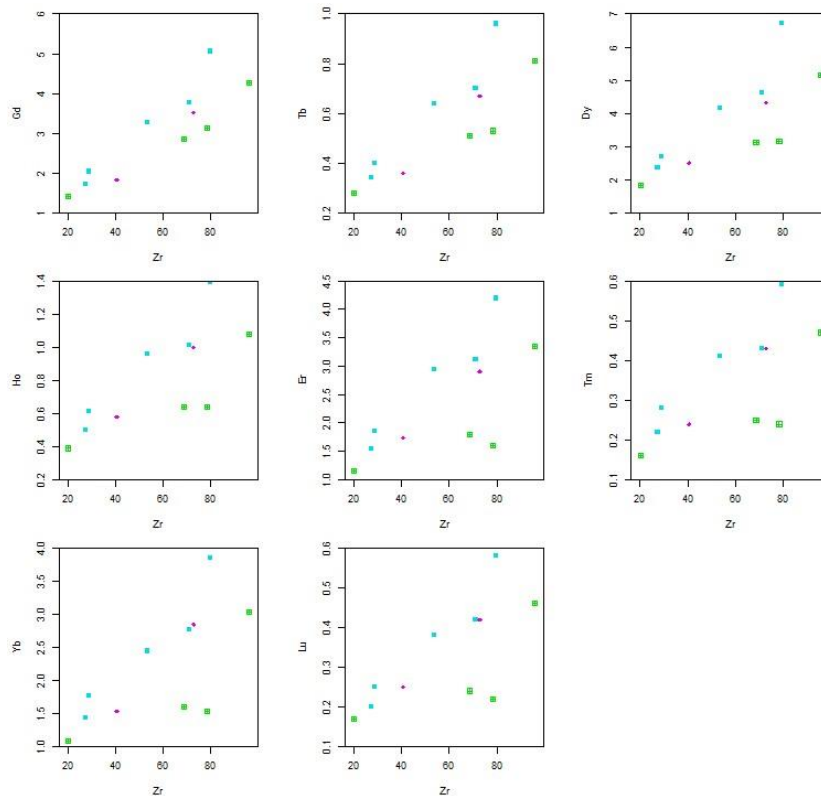


Slika 31. Dvovarijantni varijacijski dijagrami Zr vs oksidi glavnih elemenata (Al₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅, FeO) te Zr vs Ba. Oksidi glavnih elemenata izraženi su u tež. %, dok je barij izražen u dijelovima od milijun (ppm).

Na varijacijskim dijagramima Zr nasuprot LREE (*light* REE) može se uočiti njihova pozitivna korelacija u odnosu na Zr (slika 32). Dijagrami vezani uz HREE (*heavy* REE) pokazuju veće raspršenje u odnosu na LREE, no generalno i dalje postoji pozitivna korelacija (slika 33). Implikacija prikazanih dijagrama je da su elementi rijetkih zemalja, a pogotovo LREE, ostali relativno nemobilni tijekom metamorfizma.



Slika 32. Dvovarijantni varijacijski dijagrami Zr vs LREE.



Slika 33. Dvovarijantni varijacijski dijagrami Zr vs HREE.

4.3. Geotermobarometrijska određivanja pomoću programa Perple_X

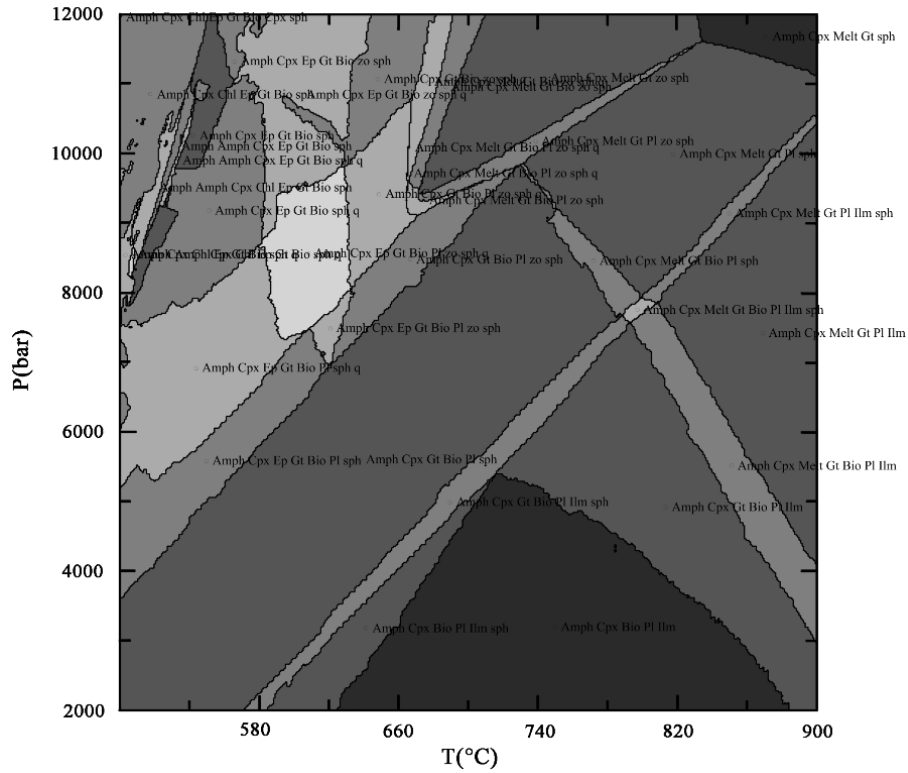
Geotermobarometrijska određivanja provedena su na uzorku 028 s lokaliteta Kamenjača-Stelovača. Na temelju mineralnog sastava uzorka, odabran je kemijski sustav komponenti zasićen vodom koji uključuje niz komponenti MnO – Na₂O – CaO – K₂O – FeO – MgO – Al₂O₃ – SiO₂ – TiO₂ – O₂ (MnNCKFMASHTO) s rasponom tlaka 200 – 1200 MPa i temperatura 500 – 900°C. Renormalizirani kemijski sastav uzorka 028 za potrebe Perple_X izračuna nalazi se u tablici 2.

Tablica 2. Renormalizirani cjelostijenski podaci odabranih komponenti za uzorak 028 izraženi u tež. %.

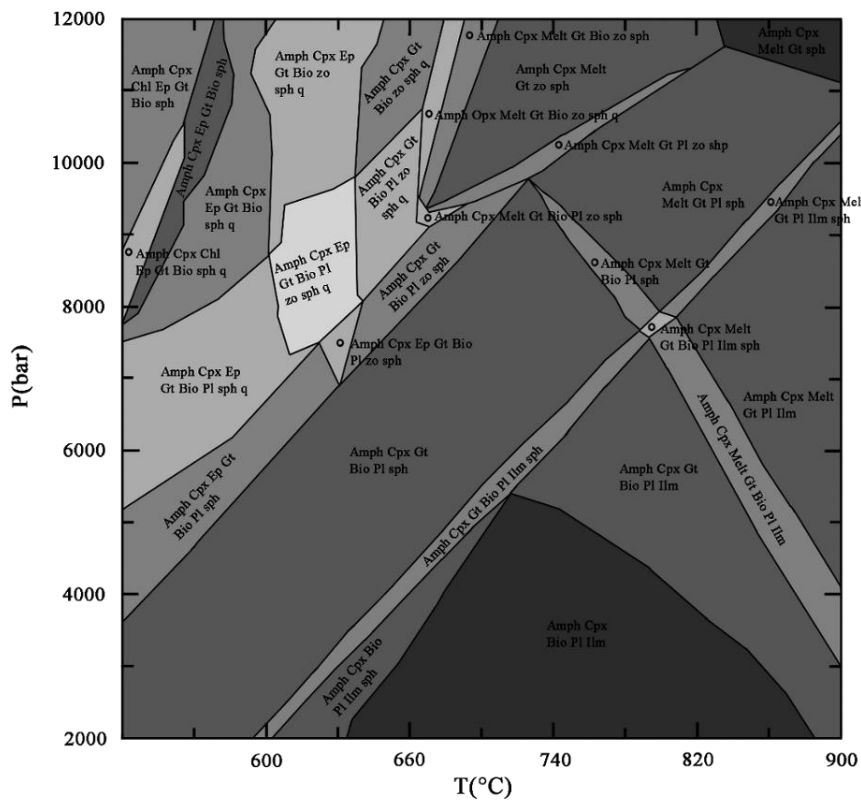
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	O ₂	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Σ
45.363	1.302	15.357	10.233	0.114	0.174	9.001	16.520	1.558	0.379	100.00

U renormalizaciji je odbačen fosfor i odgovarajuća količina kalcija vezana uz fosfor u idealnom apatitu. Pretpostavljeno je i 10% Fe³⁺ i zasićenje sustava vodom u svim uvjetima te je analiza svedena na 100 tež. %. Zasićenje vodom omogućava izračun minerala sa „vodom“ (amfibol, klorit, epidot, biotit, ...) te nastanak taljevine. Korišteni su sljedeći modeli čvrstih otopina (*solid solution*) za minerale: *melt (G)*, *cAmph(G)*, *Augite*, *Omph(GHP)*, *Pl(II,HP)*, *Fsp(CI)*, *Gt(W)*, *Bi(W)*, *Opx(W)*, *Chl(W)*, *Ep(HP11)*, *Ilm(WPH)*, *Mica(W)*, *Sp(WPC)*, *Sa(WP)*.

Prvi pseudopresjek nastao nakon izračuna u Perple_X-u prikazan je na slici 32. Na slici 33 prikazan je isti pseudopresjek nakon grafičke obrade. Svako polje obojano je određenom nijansom sive boje što odražava stupnjeve slobode odnosno broj prisutnih minerala u stabilnoj paragenezi – najtamnija siva odraz je najvećeg broja, dok je najsvjetlija siva odraz najmanjeg broja stupnjeva slobode. Svako polje definirano je određenom mineralnom paragenezom koja je stabilna u određenom P-T rasponu. Granice među poljima odražavaju nestanak ili nastanak određenog minerala.



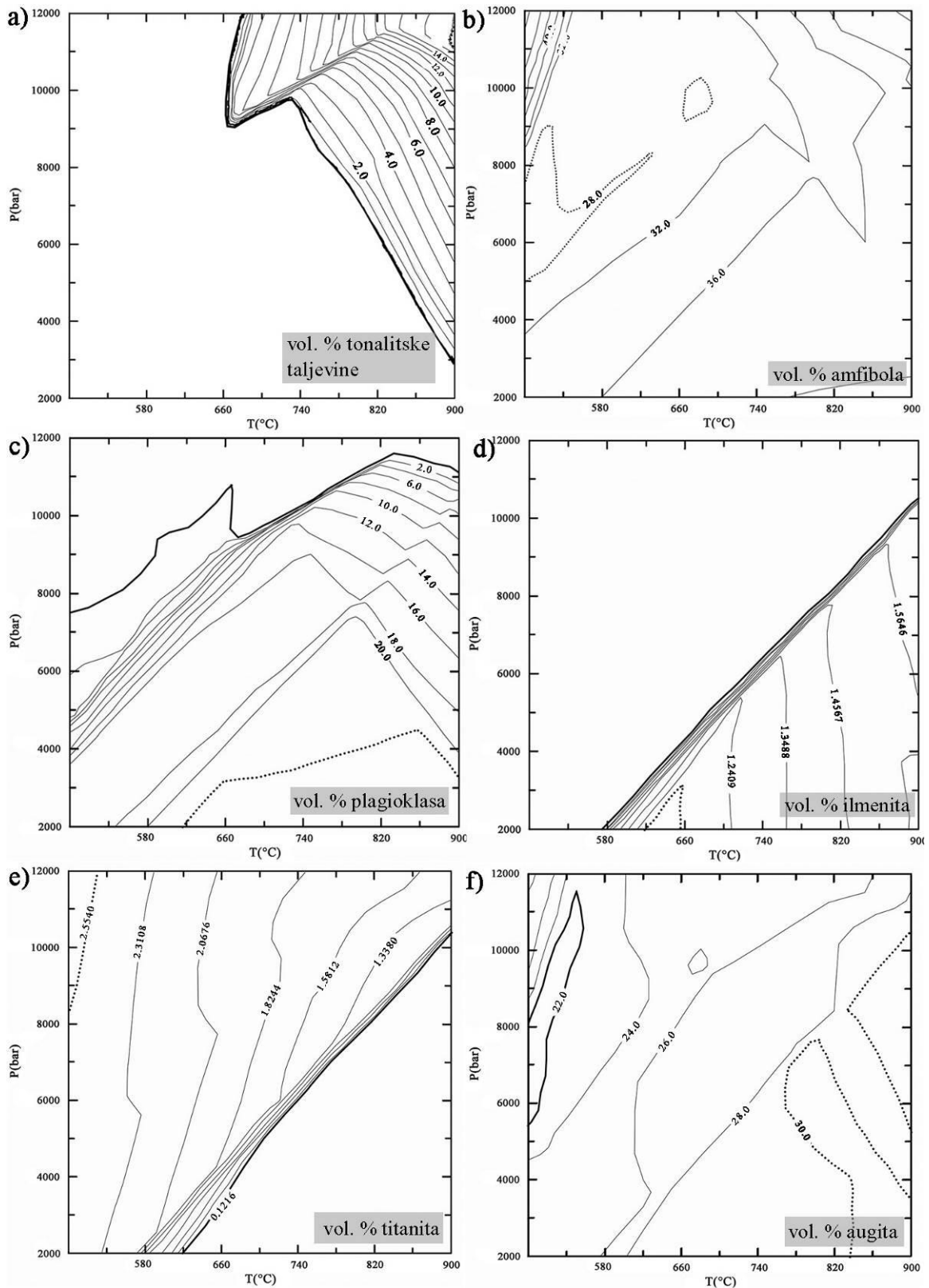
Slika 34. „Neuređeni“ pseudopresjek uzorka 028 dobiven u Perple_X programu na temelju renormaliziranih cjelostijenskih kemijskih podataka prikazanih u Tablici 2.



Slika 35. Uređeni pseudopresjek uzorka 028. Kratice mineralnih faza: Amph – amfibol; Cpx – klinopiroksen; Opx – ortopiroksen; Bio – biotit; Pl – plagioklas; Ilm – ilmenit; Gt – granat; sph – sfen (titanit); zo – zoisit; Ep – epidot; Chl – klorit; q – kvarc; Melt – tonalitska taljevina.

Na temelju podataka dobivenih izradom pseudopresjeka izrađeni su dijagrami izopleta volumnih udjela tonalitske taljevine i pojedinih minerala (slika 36) te dijagrami promjene kemijskog sastava s uvjetima tlaka i temperature. Svi dijagrami nakon izrade grafički su uređeni radi preglednosti. Gustoća izopleta između maksimalne i minimalne vrijednosti volumnih udjela može se odrediti proizvoljno, ovisno o samom rasponu, kako bi interpretacija bila lakša odnosno razumljivija.

Drugi tip dijagrama (ovisnost kemijskog sastava o P-T uvjetima) rađen je na temelju Fe omjera ($\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$) i Na omjera ($2\text{Na}_2\text{O}/(2\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})$) unutar amfibola i promjene anortitne komponente ($\text{CaO}/(2\text{Na}_2\text{O}+2\text{K}_2\text{O}+\text{CaO})$) u plagioklasu koji su temperaturno ovisni (raste s porastom temperature). Također je napravljen dijagram Si u amfibolu čiji udio pada s porastom metamorfnih uvjeta. Dobivene teorijske vrijednosti na dijagramima uspoređivane su s realnim kemijskim podacima amfibola i plagioklasa (tablica 3) zbog provjere točnosti postupka izrade dijagrama te da bi se po završetku postupka odnosno preklapanjem dijagrama dobio smisleni i što precizniji rezultat P-T uvjeta. Rezultat usporedbe podataka i preklapanja dijagrama vidljiv je na slici 37b.

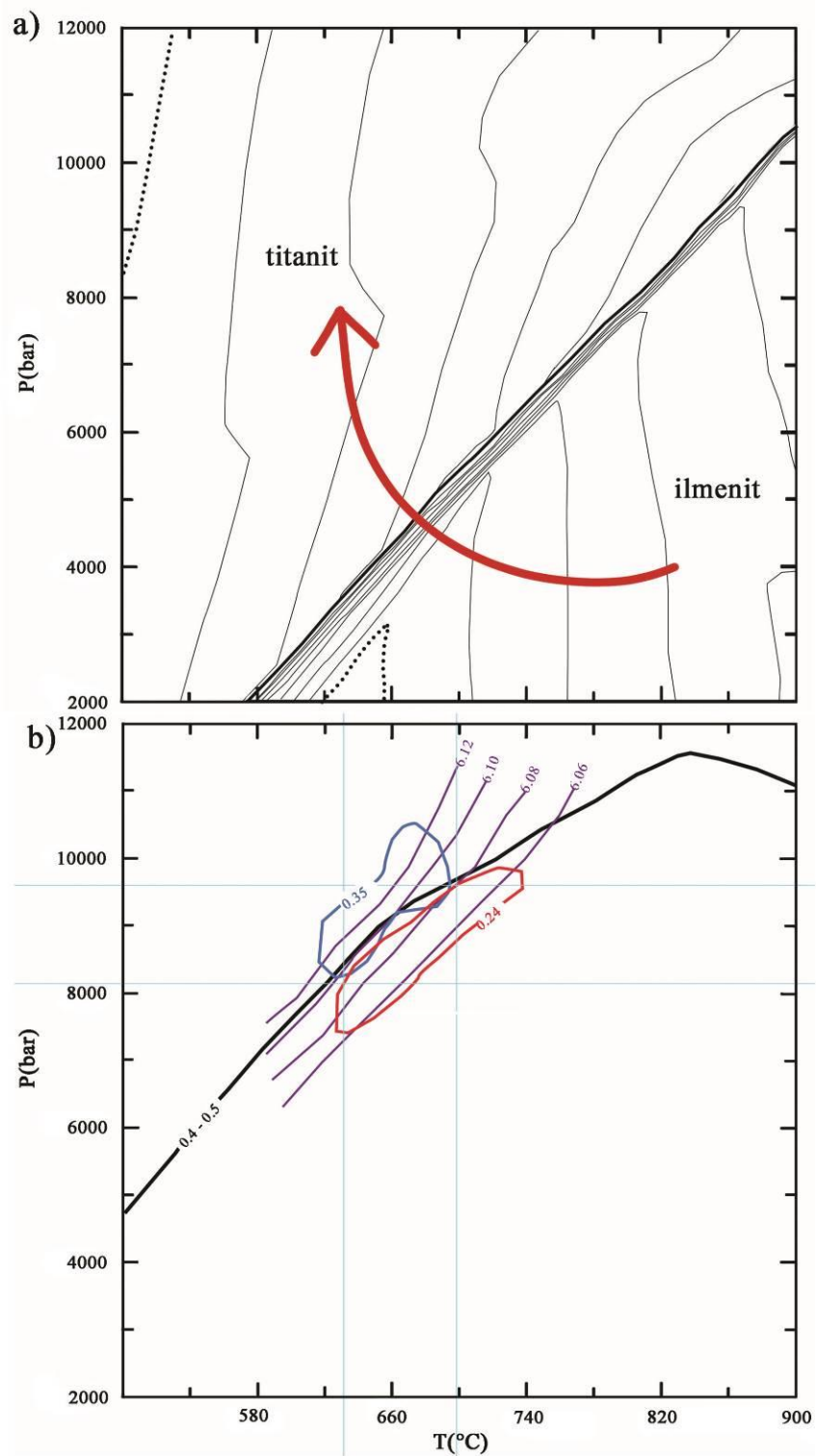


Slika 36. Prikaz izopleta volumnih udjela taljevine i odabranih minerala. Maksimalna vrijednost označena je točkastom linijom, a minimalna punom debljom crtom. a) tonalitska taljevina; b) amfibol; c) plagioklas; d) ilmenit; e) titanit; f) aŕgit.

Tablica 3. Kemijski podaci amfibola i plagioklasa iz uzorka amfibolita 028. Uz udjele glavnih elemenata, za amfibole je izračunat Fe i Na omjer korišten pri izradi dijagrama promjene kemijskog sastava u odnosu na P-T uvjete u programu Perple_X. Uz udjele glavnih elemenata u plagioklasu, prikazani su i udjeli pojedinih komponenata (Or, Al, An) također korišteni u programu Perple_X. Analize preuzete iz PETRINEC (2013).

Redni broj	1	2	3	4	5	6
Oznaka*	Am1	Am1	Am1	Am1	Am1	Am1
SiO ₂	40.89	40.62	40.07	38.86	39.39	38.69
TiO ₂	1.75	1.49	1.61	1.6	1.14	1.47
Al ₂ O ₃	14.06	15.38	15.29	15.78	15.5	15.69
Cr ₂ O ₃	0.09	0.11	0.03	0.03	0.12	0.08
FeO	13.22	13.57	13.57	15.22	15.31	15.27
MnO	0.18	0.17	0.14	0.16	0.18	0.2
MgO	11.11	10.57	10.59	8.85	9.22	9.19
CaO	12.37	12.4	12.4	12.21	12.38	12.26
Na ₂ O	2.15	2.45	2.34	2.43	1.94	2.36
K ₂ O	0.46	0.5	0.5	0.56	0.79	0.54
H ₂ O*	1.99	2.01	2	1.95	1.96	1.95
Suma	98.28	99.25	98.54	97.65	97.91	97.69
Fe/Fe+Mg	0.024	0.047	0.07	0.093	0.113	0.134
Na/Na+Ca	0.013	0.011	0.009	0.01	0.012	0.012

Redni broj	9	10	11	12	13
Oznaka*	Pl1	Pl1	Pl1	Pl1	Pl1
SiO ₂	55.66	55.97	56.98	43.26	44.15
Al ₂ O ₃	27.14	26.59	26.62	34.96	34
FeO	0.24	0.23	0.16	0.1	0.26
CaO	9.54	8.92	8.64	19.02	18.24
Na ₂ O	6.14	6.45	6.66	0.57	1.15
K ₂ O	0.06	0.06	0.08	0	0.02
Suma	98.78	98.23	99.13	97.91	97.82
Or	0.4	0.4	0.4	0	0.1
Ab	53.6	56.5	58	5.2	10.2
An	46	43.1	41.6	94.8	89.6



Slika 37. a) preklopljeni dijagrami volumnih udjela ilmenita i titanita s ucrtanim relativnim P-T metamorfnim putem (*clockwise* put); b) preklopljeni dijagrami udjela anortitne komponente u plagioklasu (podebljana crna linija), Fe omjer u amfibolu (plavo); Na omjer u amfibolu (crveno); udio Si u amfibolu (ljubičaste linije) te dobiveni P-T prostor označen svijetloplavim linijama.

5. RASPRAVA

Na temelju mikroskopskih opažanja prisutnih mineralnih vrsta te njihovih volumnih udjela, može se lako zaključiti da uzorci s Moslavačke gore uistinu jesu amfiboliti. Dvije su karakteristike opažene koje potvrđuju zaključak: (1) prisutnost hornblende i plagioklasa kao glavnih mineralnih vrsta, te (2) njihov ukupan volumni udio veći je od 75%, s time da je volumni udio hornblende u svim uzorcima veći od 50%. Dodatno, uzorci 141, 150 i 028 mogli bi se nazvati i piroksenskim (diopsidskim) amfibolitima zbog značajnog volumnog udjela piroksena (do 20 vol. %).

Na makroskopskoj skali, neki od uzoraka pokazuju jasno izdvajanje vrpce različitog sastava. Na slici 3 može se vidjeti da širina vrpce varira od uzorka do uzorka. S druge strane, na mikroskopskoj skali svi proučavani uzorci (141, 142a, 140, 150, 028) pokazuju paralelnu vrpčastu teksturu. Ona se očituje kao pravilna izmjena vrpce bogatih amfibolom, uz kojeg podređeno dolazi plagioklas, a često ilmenit i titanit, te vrpce bogatih plagioklasom. Unutar vrpce plagioklasa dolazi i spomenuti diopsid u uzorcima 141, 150 i 028 koji često tvori vlastite vrpce (slike 16 i 22), a ponegdje je raspršen unutar agregata plagioklasa. Zbog teksture na makro, a posebice na mikro skali, amfiboliti se mogu opisati i kao vrpčasti amfiboliti odnosno vrpčasti diopsidski amfiboliti.

Mikroskopska opažanja dala su prvi uvid u P-T uvjete metamorfizma uzoraka. Glavne značajke uzete u obzir su odsutnost ili prisutnost određenih minerala te mikrostrukturne karakteristike plagioklasa. Od značajnijih struktura koje bi mogle indicirati temperaturne uvjete, na plagioklasima su uočene strukture ispupčenja (*bulging*), undulozno potamnjenje, vidljive su granice podzrna, deformacijske i sraslačke lamele, a nekolicina zrna ima poligonalan međusobni kontakt. Prema PASSCHIER i TROUW (2005), na temperaturama 400 – 500°C, feldspati se i dalje dominantno ponašaju krto, a oko 600°C počinju procesi rekristalizacije. Navedene karakteristike uočene na zrnima plagioklasa karakteristične su za dinamičku rekristalizaciju. Stoga se može zaključiti da su temperaturni uvjeti odvijanja metamorfnih procesa u proučavanim uzorcima definitivno premašivali 600°C. Bitno je napomenuti da se plagioklasima s povećanjem temperature, odnosno povećanjem metamorfnih uvjeta povećava i udio anortitne komponente (albit → oligoklas → andezin) (također vidljivo u tablici 3), a time postaju i rezistentniji (BUCHER i FREY, 1994).

Nadalje, prema BUCHER i FREY (1994), odsutnost klorita i epidota koji se javljaju u facijesu zelenih škrljavaca također ukazuje na temperature više od 600°C (klorit nestaje na ~550°C, a epidot na ~600°C). Prisutnost klinopiroksena (diopsida) u uzorcima 141, 150 i 028 ukazuje na još više temperature pošto se klinopiroksen javlja na temperaturama od otprilike 650°C. Njihova je pojava značajna jer obilježava prelazak u uvjete višeg amfibolitnog facijesa gdje počinje raspad amfibola (što rezultira nastankom klinopiroksena).

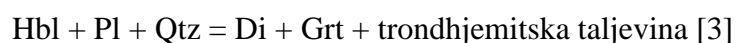
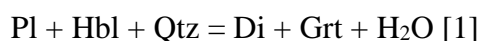
Izrada i razmatranje diskriminacijskih dijagrama izrađenih u GCDkit-u pokazala je sljedeće. U skladu s literaturnim podacima (PAMIĆ, 1990; BALEN, 1999), potvrđeno je da su amfiboliti potekli od bazičnog protolita (najvjerojatnije bazalta oceanskog dna). Tome u prilog ide Nb/Y – Zr/Ti klasifikacijski dijagram modificiran u PEARCE (1996) na kojem svi uzorci osim jednog padaju u polje bazalta (slika 25). To podupiru i Pearceovi diskriminacijski dijagrami utemeljeni na omjerima Th/Yb – Nb/Yb te TiO₂/Yb – Nb/Yb. Koriste se za širi geotektonski kontekst, a najčešće se rade u kombinaciji. Pomoću Th/Yb dijagrama testira se pitanje jesu li bazaltne stijene (u ovom slučaju protoliti) uistinu oceanske, a TiO₂/Yb dijagram daje indicaciju u kojem su oceanskom okolišu bazalti mogli nastati (slike 26 i 27). Velika većina uzoraka pada u polja karakteristična za N-MORB uz mala odstupanja. Nastavno na to, na osiromašeno N-MORB izvorište ukazuju i multielementni varijacijski dijagrami elemenata rijetkih zemalja normaliziranih na hondrit (BOYNTON, 1984) te nemobilni elementi normalizirani na N-MORB (SUN i MCDONOUGH (1989) modificiran u PEARCE, (2014)) (slike 29 i 30). Iako trendovi na *spider* dijagramima prate standardne trendove N-MORB-ova, zabilježena je negativna Nb anomalija te blaga negativna Ti anomalija, koje ukazuju na potencijalni utjecaj kontinentalne kore odnosno subdukcije na sustav. Uzevši u obzir rezultate geokemijske analize i postojeće literaturne podatke vezane za nastanak Moslavačke gore, vjerojatan slijed događaja nastanka amfibolita kreće od bazaltne oceanske kore koja je potom, uslijed kolizijske tektonike, metamorfozirana do amfibolitnog facijesa u subdukcijskoj zoni.

Geotermobarometrijskim modeliranjem u Perple_X programu dobiven je relativni P-T evolucijski put uzorka 028 na temelju preklopljenih dijagrama volumnih udjela ilmenita i titanita (slika 37a). Na temelju mikroskopske analize utvrđeno je postojanje leukoksenskog ovoja oko zrna ilmenita (slike 17 i 23). Drugim riječima, zaključeno je da zrno ilmenita mora biti starije te da je titanitski ovoj nastao kasnije s promjenom P-T uvjeta. Iz slike 37a vidljivo je da se radi o *clockwise* modelu karakterističnom za regionalni

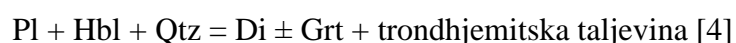
metamorfizam odnosno metamorfizam u subdukcijskoj zoni. Tome u prilog ide i multielementni varijacijski dijagram nemobilnih elemenata normaliziranih na N-MORB (SUN i MCDONOUGH, (1989) modificiran u PEARCE, (2014)) sa zabilježenim negativnim anomalijama niobija i titanija, što ukazuje na utjecaj subdukcijskog okoliša. Na slici 37b, preklopljeni dijagrami udjela anortitne komponente u plagioklasu, Fe i Na omjera u amfibolu te udjela Si u amfibolu rezultirali su vrijednostima vršnih metamorfničkih uvjeta 630 – 700°C i 800 – 950 MPa.

Nadalje, na slici 38, crvenom bojom su označena polja stabilnosti mineralnih parageneza u kojima se, po dobivenim rezultatima preklapanja dijagrama kemijskih podataka (slika 37b), nalazi uzorak amfibolita 028. Tri su moguće mineralne parageneze: (1) Amph–Cpx–Gt–Bio–Pl–Zo–Sph–Q; (2) Amph–Cpx–Gt–Bio–Pl–Zo–Sph; (3) Amph–Cpx–Melt–Gt–Bio–Pl–Zo–Sph. Pojava tonalitske taljevine u polju pod brojem (3) поближе je prikazana na slici 39, koja sadrži izoplete volumnog udjela taljevine preklopljene na pseudopresjek. Crna izopleta označava 0 vol. % taljevine tj. njenu odsutnost, a svaka iduća crvena linija označava povećanje volumnog udjela za 4 vol. %. Imajući to u vidu, može se zaključiti da polje pod brojem (3) u svojoj paragenezi sadrži oko 4 vol. % taljevine. Prisutnost tonalitske taljevine potvrđuju i makroskopska i mikroskopska opažanja uzoraka, što se vidi po paralelnoj teksturi koju grade vrpce različitog sastava – vrpce bogate hornblendom i vrpce bogate plagioklasom (leukosom), pri čemu mikrostrukturne karakteristike idu u prilog postojanja lokaliziranih džepova ili vrpce taljevine. Takvo izdvajanje leukosoma tipičan je pokazatelj parcijalnog taljenja u uvjetima usmjerenog tlaka. Dodatni argument koji govori u prilog parcijalnom taljenju je i prisutnost diopsida u pojedinim uzorcima (141, 150 i 028) unutar vrpca plagioklasa, odnosno leukosoma.

Nastanak diopsida, pa i samih leukokratskih proslajaka unutar uzoraka amfibolita s Moslavačke gore, može se objasniti prema reakcijama [1, 2 i 3] koje su opisali HARTEL i PATTISON (1996). Autori opisuju proces nastanka diopsida i granata procesom dehidratacijskog taljenja. U suštini, radi se o reakciji minerala koji u strukturi sadrže vodu u obliku OH⁻ skupine, poput amfibola, od kojih nastaju bezvodni minerali, kao što su pirokseni i granati. U reakciji uz hornblendu sudjeluju plagioklas i kvarc. Uz nastali diopsid i granat, otpustit će se i voda [1] koja u daljnjoj reakciji s plagioklasom i kvarcom daje trondhjemitnu taljevinu [2]. Cjelokupni proces prikazan je reakcijom [3].



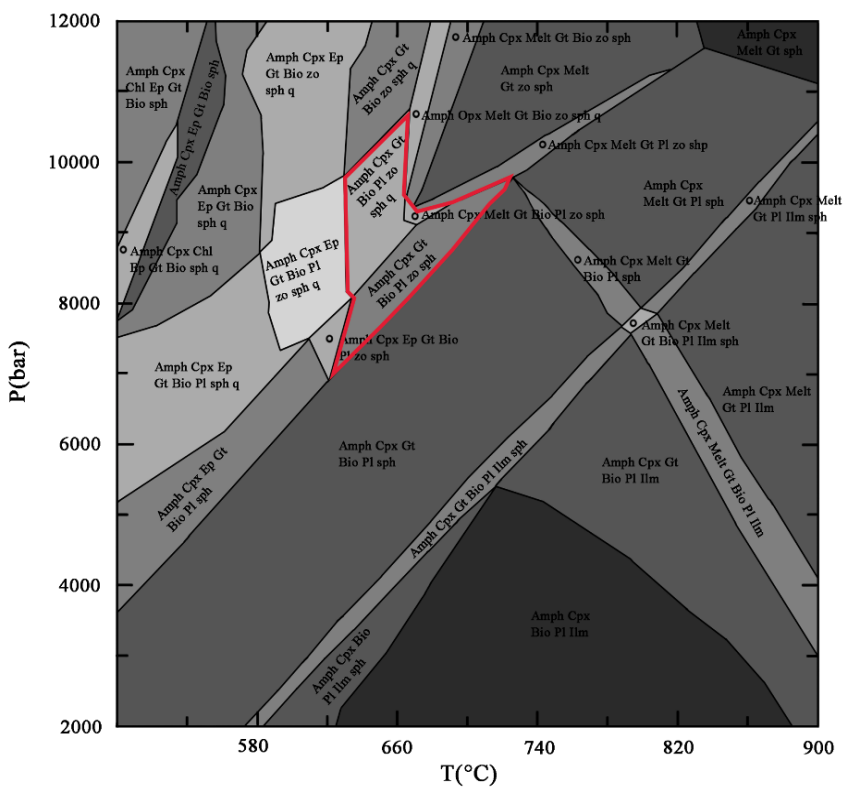
Do sličnih reakcija migmatizacije [4 i 5] dovela su i istraživanja metabazičnih ksenolita (amfibolita) PETRINEC i sur. (2019) te OLIĆ i PETRINEC (2019) na lokalitetu Pleterac. Navedene kemijske reakcije dodatno potvrđuje geotermobarometrijski model načinjen u sklopu ovog rada, koji je utvrdio prisutnost tonalitske taljevine i mineralne parageneze potrebne za njen nastanak.



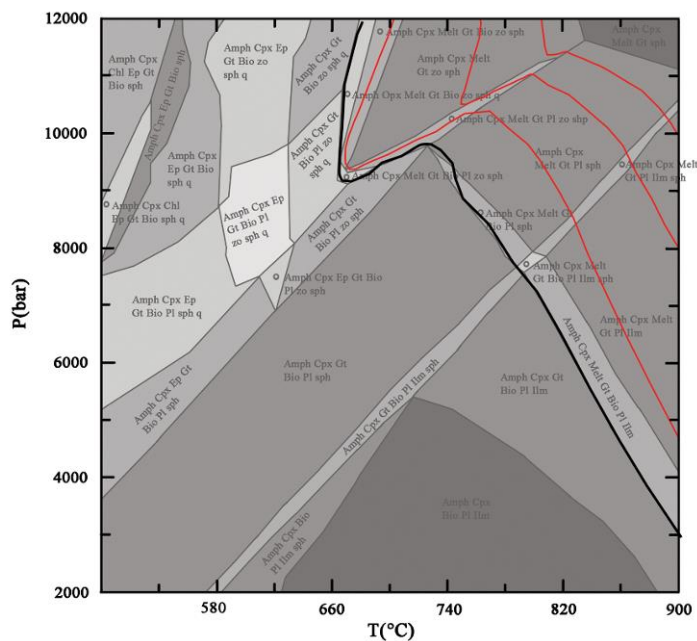
Navedena makroskopska i mikroskopska opažanja, rezultati geotermobarometrijske analize (630 – 700°C i 800 – 950 MPa) na uzorku 028, koji su u skladu s postojećim literaturnim podacima o regionalnom metamorfizmu na području Moslavačke gore (npr. BALEN, 1999), prisutnost tonalitske taljevine u sustavu te navedene reakcije nastanka diopsida, granata te spomenute taljevine, ukazuju na značajan utjecaj parcijalnog taljenja u uzorcima vrpčastih amfibolita Moslavačke gore. Starija mišljenja (npr. CRNKO, 1998) govore o uskoj poveznici migmatizacije stijena i utiskivanja granitnog plutona za vrijeme gornje krede. No, prema literaturnim podacima (BALEN i BROSKA, 2011), izračunati P-T uvjeti završne faze granitne evolucije pokazuju temperature ~720°C te tlakove 70 – 270 MPa koji su vladali u vrijeme smještanja granitnog plutona i takvi uvjeti odgovaraju već opisanom HT-LP kontaktnom metamorfizmu. Uzimajući u obzir sve navedeno, usporedba literaturnih podataka i dobivenih rezultata ovog istraživanja pokazuje da je do migmatizacije proučavanih stijena moralo doći za vrijeme regionalno-metamornog događaja koji je morao prethoditi samoj granitnoj intruziji. Starost tog metamornog događaja do danas još nije jednoznačno određena.

Iako prikazani rezultati ukazuju na raznovremenost metamornog događaja koji je odgovoran za procese parcijalnog taljenja u vrpčastim amfibolitima i granitne intruzije, ne može se u potpunosti isključiti uloga same intruzije i njenog termalnog utjecaja, barem u smislu naglašavanja prethodno formiranih strukturno-teksturnih karakteristika (npr. dodatno mikrostrukturno uravnoteženje unutar leukokratskih proslojaka itd.). Kompleksna

pitanja poput ovog trebala bi se dalje istraživati na mikrostrukturnoj razini na većem setu uzoraka, primjerice, korištenjem naprednih metoda *in situ* analize.



Slika 38. Pseudopresjek uzorka amfibolita 028. Crveni okvir ocrta polja u kojima se preklapaju izoplete Fe i Na omjera u amfibolu, udio anortitne komponente u plagioklasu te udio Si u amfibolu (Slika 37b). Mineralna parageneza sva tri polja obuhvaća Amph – Cpx – Gt – Bio – Pl – zo – sph – q – Melt.



Slika 39. Dijagram volumnog udjela tonalitske taljevine preklapljen na pseudopresjek. Crna linija označava odsutnost taljevine (0 vol. %), a svaka iduća crvena izopleta povećava udio taljevine za 4 vol. %.

6. ZAKLJUČAK

Na uzorcima amfibolita s Moslavačke gore s lokaliteta Pleterac, Kamenac-potok i Kamenjača-Stelovača provedena je petrografska, mikrostrukturna i geokemijska analiza, kao i geotermobarometrijsko modeliranje u Perple_X programu s ciljem dobivanja relativnih P-T uvjeta razvoja opaženih makroskopskih i mikroskopskih karakteristika istraživanih stijena.

Petrografskom i mikrostrukturnom analizom potvrđeno je da se uzorci mogu klasificirati kao amfiboliti, a uzorci 141, 150 i 028 preciznije su određeni kao piroksenski (diopsidski) amfiboliti. Dodatno, prema teksturnom sklopu uzoraka na makroskopskoj, a posebice na mikroskopskoj razini, amfiboliti se mogu klasificirati kao vrpčasti amfiboliti, odnosno vrpčasti diopsidski amfiboliti. Geokemijska analiza uzoraka potvrdila je pretpostavljeni bazaltni protolit uzoraka, stoga se proučavane stijene može okarakterizirati kao metabazične stijene. Varijacijski dijagrami utemeljeni na nemobilnim elementima pokazali su da je bazaltni protolit bio N-MORB karaktera, što je potvrđeno i multielementnim varijacijskim dijagramima. Istovremeno, opažene specifičnosti (npr. negativna niobijeva i titanijeva anomalija), ukazuju na utjecaj materijala kontinentalne kore na inicijalno bazični sustav odnosno evoluciju promatranih metabazičnih uzoraka unutar geotektonskog okoliša subdukcijske zone.

Okvirni temperaturni podaci dobiveni su već mikroskopskom analizom: odsutnost klorita i epidota kao karakterističnih minerala vezanih uz facijes zelenih škriljavaca ukazivala je na temperature više od 500°C, dok se u uzorcima 141, 150 i 028 pojavio i diopsid koji je čest u uvjetima višeg amfibolitnog facijesa. Mikrostrukture plagioklasa također ukazuju na procese rekristalizacije u plastičnom režimu, čiji utjecaj postaje dominantan na temperaturama od otprilike 600°C.

Geotermobarometrijsko modeliranje provedeno u programu Perple_X na uzorku 028 s lokaliteta Kamenjača-Stelovača, potvrdilo je mikrostrukturne pretpostavke te je ukazalo na *clockwise* smjer metamorfne evolucije s postizanjem vršnih uvjeta metamorfizma u rasponu 630 – 700°C te 800 – 950 MPa.

Na temelju preklapanja dobivenih vrijednosti P-T uvjeta metamorfizma sa samim pseudopresjekom, dobivene su moguće mineralne parageneze uzorka 028, pri čemu je

potvrđena i prisutnost tonalitske taljevine u promatranom sustavu, prethodno pretpostavljena na temelju teksturnih karakteristika. Sve mineraloške i mikrostrukturne karakteristike te izvedeni model P-T evolucije uzoraka pripisani su procesima dehidrationskog parcijalnog taljenja hornblende u prisutnosti plagioklasa. Usporedba rezultata postignutih vršnih metamorfnih uvjeta dobivenih ovim istraživanjem i postojećih literaturnih podataka vezanih uz utiskivanje granitnog plutona u vrijeme gornje krede te pratećeg kontaktnog metamorfizma, rezultirala je zaključkom da je do parcijalnog taljenja, odnosno migmatizacije proučavanih metabazičnih stijena moralo doći za vrijeme starijeg, regionalnog metamorfnog događaja.

Osim što se definiranje petrogeneze vrpčastih amfibolita pokazalo veoma značajnim za rekonstrukciju kompleksnih događaja na Moslavačkoj gori prije same intruzije granita, na njihovom primjeru zorno se može vidjeti napredak i sve veća moć računalnih programa poput *Perple_X*-a, koji omogućuju izradu modela i samu rekonstrukciju često kompleksnih i višefaznih metamorfnih događaja nekog područja. Naravno, u obzir treba uzeti da se u ovom istraživanju radilo s jako malim setom podataka i da je potreban puno veći set uzoraka različitih litologija kako bi se slijed događaja na Moslavačkoj gori sa sigurnošću mogao odrediti.

7. LITERATURA

- BALEN, D. (1999): Metamorfne reakcije u amfibolskim stijenama Moslavačke gore. Doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 264 str.
- BALEN, D., BROSKA, I. (2011): Tourmaline nodules: products of devolatilization within the final evolutionary stage of granitic melt? Geological Society, London, Special Publications, 350, 53–68.
- BALEN, D., SCHUSTER, R., GARAŠIĆ, V. (2001): A new contribution to the geochronology of Mt. Moslavačka gora (Croatia). PANCARDI 2001, Sopron, Hungary.
- BALEN, D., SCHUSTER, R., GARAŠIĆ, V., MAJER, V. (2003): The Kamenjača olivine gabbro from Moslavačka gora (South Tisia, Croatia). Rad Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti, knj. 486, 57–76.
- BUCHER, K., FREY, M. (1994): Petrogenesis of Metamorphic Rocks (6th ed.). Springer, 319 str.
- CONNOLLY, J.A.D., KERRICK, D.M. (1987): An algorithm and computer program for calculating composition phase diagrams. CALPHAD, 11, 1–55.
- CONNOLLY, J.A.D., PETRINI, K. (2002): An automated strategy for calculation of phase diagram sections and retrieval of rock properties as a function of physical conditions. Journal of Metamorphic Petrology, 20, 697–708.
- CRNKO, J. (1991): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. List Kutina L33-94. Fond stručne dokumentacije Instituta za geološka istraživanja; OOUR za geologiju, Zagreb.
- CRNKO, J. (1998): Vodič geološke ekskurzije na Moslavačku goru. Hrvatsko geološko društvo, Zagreb, 58 + 27 str.
- DELEON, G. (1969): Pregled rezultata određivanja apsolutne geološke starosti granitoidnih stijena u Jugoslaviji. Radovi Instituta za geološko-rudarska istraživanja i ispitivanja nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, 6, 165–182.
- HARTEL, T.H.D., PATTISON, D.R.M. (1996): Genesis of the Kapuskasing (Ontario) migmatitic mafic granulites by dehydration melting of amphibolite: the importance of quartz to reaction progress. J. metamorphic Geol., 14, 591–611.
- JANOŠEK, V., FARROW, C.M., ERBAN, V. (2006): Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Dana Toolkit (GCDkit). Journal of Petrology, 47, 1255–1259.
- KOROLIJA, B., CRNKO, J. (1985): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. List Bjelovar L33-82. Geološki zavod Zagreb (1975-1985), Savezni geološki zavod Beograd, Beograd.

KOROLIJA, B., VRAGOVIĆ, M., CRNKO, J., MAMUŽIĆ, P. (1986): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. Tumač za list Bjelovar L33-82. Geološki zavod Zagreb (1985), Savezni geološki zavod Beograd, Beograd, 45 str.

KUMAR, A., AHMAD, T. (2007): Geochemistry of mafic dykes in part of Chotanagpur gneissic complex: Petrogenetic and tectonic implications. *Geochemical Journal*, 41, 173–186.

MONTREUIL, J.-F., CONSTANTIN, M. (2010): The geochemistry of mafic gneisses from the Renzy terrane, western Grenville Province, Quebec: Implications for the geodynamic setting of the early Mesoproterozoic Laurentian margin. *Precambrian Research* 181, 150–166.

OLIĆ, I. (2018): Intruzija krednog granita u stijene starijeg metamorfnog sklopa: procesi fragmentacije, smještavanja i lokalne interakcije na području kristalina Moslavačke gore, rad predložen za Rektorovu nagradu u akad. god. 2017/18. Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 58 str.

OLIĆ, I., PETRINEC, Z. (2019): On granite emplacement mechanisms at Moslavačka gora (Croatia): the role of the xenolith studies. In: Horvat, M., Matoš, B., Wacha, L. (eds.): Abstracts Book – 6th Croatian Geological Congress with international participation. Hrvatski geološki institut, Zagreb, 150–151.

PALINKAŠ, A.L., BALOGH, K., STRMIĆ, S., PAMIĆ, J., BERMANEC, V. (2000): Ar/Ar dating and fluid inclusion study of muscovite, from the pegmatite of Srednja Rijeka, within granitoids of Moslavačka gora Mt., North Croatia. In: Tomljenović, D., Balen, D., Saftić, B. (eds.): PANCARDI 2000 Special Issue, Abstracts. Dubrovnik, *Vijesti*, 37(3), 95–96.

PAMIĆ, J. (1990): Alpski granitoidi, migmatite i metamorfiti Moslavačke gore i okolne podloge Panonskog bazena (sjeverna Hrvatska, Jugoslavija). *Rad JAZU*. 10, 7–121.

PASSCHIER, C.W., TROUW, R.A.J. (2005): *Microtectonics* (2nd ed.). Springer, 366 str.

PEARCE, J.A. (1996): A User's Guide to Basalt Discrimination Diagrams. In *Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration* (Ed. Wyman, D.A.) Geol. Assoc. Canada, Short Course Notes, 12, 79–113.

PEARCE, J.A. (2008): Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos* 100, 14–48.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>

PEARCE, J.A. (2014): Immobile Element Fingerprinting of Ophiolites. *Elements*, 10 (2), 101–108. DOI: 10.2113/gselements.10.2.101

PETRINEC, Z. (2013): Strane i kognatne enklave u krednim granitoidima Moslavačke gore: mikrostrukturni i geokemijski uvid u kompleksnu evoluciju moslavačkog kristalina. Doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 264 str.

- PETRINEC, Z., OLIĆ, I., BALEN, D. (2019): From magmatic stoping to hybridization: snapshots of granite emplacement processes and interactions in a shallow crustal magma chamber. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 21, EGU2019, Beč, Austrija.
- ROLLINSON, H., PEASE, V. (2021): *Using Geochemical Data To Understand Geological Processes* (2nd ed.). Cambridge University Press, Cambridge, 346 str.
doi:10.1017/9781108777834
- SCHMID, S.M., BERNOULLI, D., FÜGENSCHUH, B., MATENCO, L., SCHEFER, S., SCHUSTER, R., TISCHLER, M., USTASZEWSKI, K. (2008): The Alpine-Carpatian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss Journal of Geosciences*, 101, 139–183. <https://doi.org/10.1007/s00015-008-1247-3>
- SHERVAIS, J.W. (1982): Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59, 101–118.
- STARIJAJŠ, B., GERDES, A., BALEN, D., TIBLJAŠ, D., FINGER, F. (2010): The Moslavačka Gora crystalline massif in Croatia: a Cretaceous heat dome within remnant Ordovician granitoid crust. *Swiss Journal of Geosciences*, 103, 61-82.
- SUN, S., MCDONOUGH, W.F. (1989): Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42, 313–345.
- SUN, S., NESBITT, R.W. (1979): Geochemical characteristics of mid-ocean ridge basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 44, 119–138.
- USTASZEWSKI, K., KOUNOV, A., SCHMID, S.M., SCHALTEGGER, U., KRENN, E., FRANK, W., FÜGENSCHUH, B. (2010): Evolution of the Adria-Europe plate boundary in the northern Dinarides: From continent-continent collision to back-arc extension. *Tectonics*, 29. <https://doi.org/10.1029/2010TC002668>
- WILSCHEFSKI, S.C., BAXTER, M.R. (2019): Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Introduction to Analytical Aspects. *Clinical Biochemist Reviews*, 40, 115–133. 10.33176/AACB-19-00024
- WHITE, M.W. (2013): *Geochemistry*. Wiley-Blackwell, Chichester, UK, 660 str.
- WINTER, J.D. (2010): *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* (2nd ed.), Pearson, Harlow, UK, 738 str.