
Andrija Avramović

Tektonski sklop područja Rebeljske reke

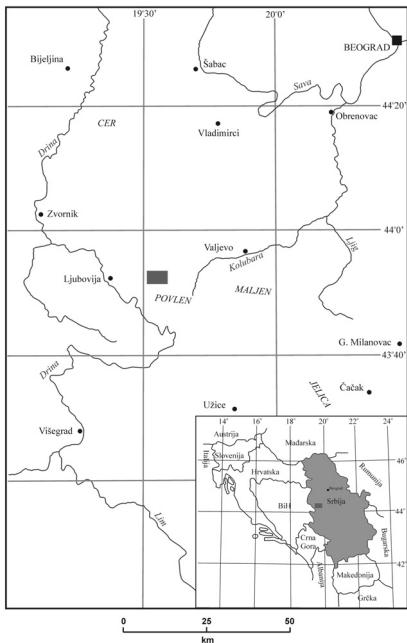
Interpretacijom strukturno-geoloških podataka definisane su karakteristike tektonskog sklopa područja Rebeljske reke kod Valjeva. U istraživanju je korišćena metoda strukturno-tektonske analize terena. Strukturnom analizom slojevitosti utvrđeno je prisustvo nabora regionalnog pružanja, koji je klasifikovan kao normalni kosi nabor. Na osnovu morfoloških elemenata nabora rekonstruisani su sistemi pukotina tektonskog sklopa područja. Prisustvo sistema kliznih pukotina ukazuje da je stres koji je deformisao proučavane strukture bio promenljive prirode, od kompresione do tenzije, što je posledica tektonskih procesa nakon finalnih faza zatvaranja mezozojskog okeana Neotetisa. Nabor i rekonstruisane pukotine nastale su pod uticajem istih ili sličnih tektonskih deformacija. Rezultati struktурне analize raseda ukazuju da je generalno pružanje raseda bilo po pravcu SSZ-JJI. Kretanje po rasedima bilo je normalno levo, sa primetnim smičućim karakterom stresa i uticajem normalne komponente stresa. Ovi rasedi su označeni kao normalni i nastali su u transkurentnom tektonskom režimu, sa dominantnim pravcem kompresije SSI-JJZ i tenzije ISI-ZJZ. Formiranje ovakvog tektonskog režima je uzrokovano neotektonskim tenzionim deformacionim fazama, pravca tenzije S-J do SI-JZ, kao posledica kretanja i rotacije Jadranse mikro-ploče u odnosu na Dinaride.

Uvod

Region Zapadne Srbije predstavlja veoma složeno, a samim tim i interesantno područje za geološka istraživanja. U širem smislu predstavlja zonu kontakta Afričke i Evroazijske ploče, usled čega su ovo područje tokom geološke istorije oblikovali mnogobrojni tektonski procesi i deformacije. Određen broj tektonskih procesa koji su se dešavali u ovom regionu su u izvesnoj meri nejasni, usled čega se u novije vreme primenom savremenih metoda strukturno-geoloških istraživanja teži njihovom potpunijem objašnjavanju. Istraživanje tektonskog sklopa područja Rebeljske reke kod Valjeva ima za cilj razumevanje mehanizama i geneze tektonskih procesa ovog područja, kroz istraživanja na lokalnom nivou.

*Andrija Avramović
(1995), Kraljevo,
Jelene Ćetković 7/16,
učenik 3. razreda
Gimnazije u Kraljevu*

*MENTOR: Ana
Mladenović, master
inž. geologije,
istraživač-saradnik
Departmana za
istorijsku i dinamičku
geologiju
Rudarsko-geološkog
fakulteta Univerziteta
u Beogradu*



Slika 1. Geografski položaj istraživanog područja
(prema Tumaču OGK SFRJ L34-136 Valjevo, modifikovano)

Figure 1. Geographical position of investigated area
(according to Guide Book of OGK /General Geologic Map/ SFRJ L34-136 Valjevo, modified)

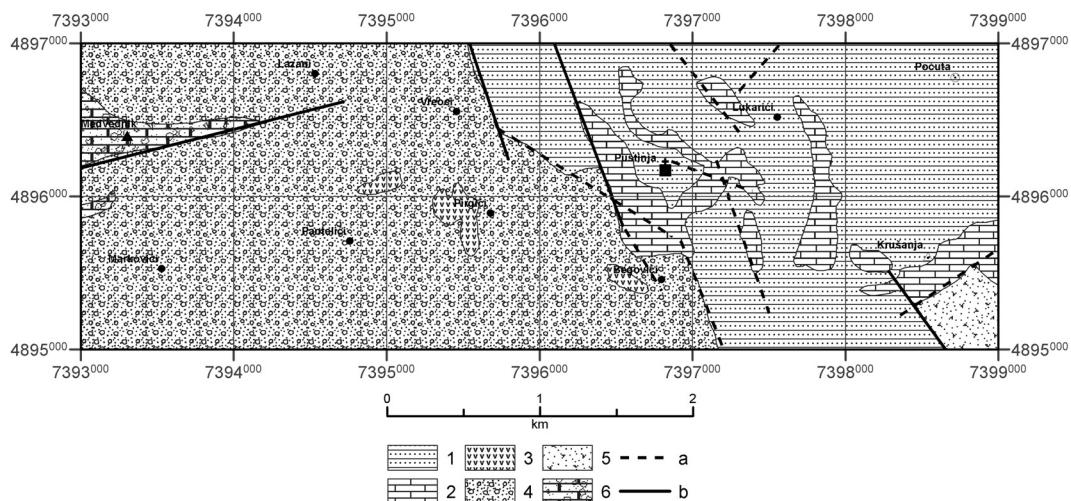
Područje istraživanja se nalazi u Zapadnoj Srbiji, na oko 100 km jugozapadno od Beograda i 25 km jugozapadno od Valjeva. Obuhvata sliv Rebeljske reke, najveće pritoke reke Jablanice. Na slici 1 prikazan je geografski položaj istraživanog područja.

Na području istraživanja zastupljene su stene mezozojske starosti ($T_2^2 - 3K_2^3$). Na slici 2 prikazana je pregledna geološka karta područja istraživanja.

Najstarije tvorevine predstavljene su krečnjacima i krečnjačkim brečama ladinskog kata srednjeg trijasa (T_2^2), rasprostranjenim na istočnim padinama Medvednika (Andđelković 1988). U podini ladinskog kata nalaze se dolomiti i dolomitični krečnjaci aniziskog kata (T_2^1). Porfiriti i piroklastiti trijaske starosti ($\alpha\theta T_2$) zastupljeni su u jugoistočnom delu istraživanog područja, oko vrha Krušanja (749 mnv), i predstavljeni su vulkanskim brečama i tufovima (Mojsilović *et al.* 1975).

U centralnom delu područja istraživanja, na prostoru zaseoka Pirgići, kao manje pojave javljaju se andeziti ($\alpha J_{2,3}$), koji nisu mogli sa sigurnošću biti odvojeni od porfirita, pa im je starost određena kao jurska (Mojsilović *et al.* 1975). Na većem delu istraživanog područja prisutne su tvorevine ofiolitskog melanža ($J_{2,3}$), sa najvećim rasprostranjenjem u centralnom delu, i to u zaseocima Markovići, Pantelići i Lazani. U sastav ovog kompleksa ulaze dijabazi, doleriti, spiliti, melafiri, gabrovi, rožnaci, glinci, peščari, krečnjaci, konglomerati i breče (Mojsilović *et al.* 1975).

Krečnjaci turona gornje krede ($2K_2^2$) zastupljeni su u centralnom delu istraživanog područja, u okolini manastira Pustinja i u zaseoku Lukarići i predstavljeni su uglavnom slojevitim, bankovitim i mestimično masivnim krečnjacima (Mojsilović *et al.* 1975). U nekim delovima ove serije prisutni



Slika 2. Pregledna geološka karta istraživanog područja

(prema OGK SFRJ L34-136 Valjevo)

1 – laporci, peščari i krečnjaci ($^3K_2^3$); 2 – krečnjaci ($^2K_2^2$); 3 – andeziti ($\alpha J_{2,3}$); 4 – ofiolitski melanž ($J_{2,3}$); 5 – porfiriti i piroklastiti ($\alpha\theta T_2$); 6 – krečnjaci i krečnjačke breče (T_2^2); a – sigurno utvrđen rased; b – pretpostavljen rased.

Figure 2. Overview geological map of investigated area

(according to OGK /General Geologic Map/ SFRJ L34-136 Valjevo);

1 – marls, sandstones and limestones (${}^3\text{K}_2$ 3); 2 – limestones (${}^2\text{K}_2$ 2); 3 – andesites ($\alpha\text{J}_{2,3}$); 4 – ophiolitic mélange ($\text{J}_{2,3}$); 5 – porphyries and pyroclastits ($\alpha\theta\text{T}_2$); 6 – limestones and limestone breccia (T_2 2); a – fault, certain; b – fault, approximate.

su laporoviti krečnjaci (Andželković 1988). Laporci, peščari i krečnjaci senona gornje krede ($^3\text{K}_2^3$) zastupljeni su u istočnom delu istraživanog područja, jugozapadno od Poćute (Mojsilović *et al.* 1975).

Prema svom položaju u odnosu na regionalnu geotektonsku građu, istraživano područje pripada Vardarskoj zoni (Dimitrijević 1995; Schmid *et al.* 2008). Prema Petkoviću (1975), na ovom području tokom mezozoika dolazi do većih horizontalnih kretanja, rasedanja i navlačenja. Generalni pravac kretanja je ka zapadu i jugozapadu. Najzastupljeniji tektonski elementi u okviru ove oblasti su rasedi i nabori. Intenzitet ubranosti u velikoj meri zavisi od različitih fizičkih svojstava prisutnih sedimentata. Ose nabora imaju opšti pravac pružanja ZSZ-IJ (Mojsilović *et al.* 1975).

Najranija istraživanja na ovom području izveli su Jovan Žujović 1889. i Jovan Cvijić 1924. godine. Oni opisuju osnovnu problematiku geološke građe terena. Kasnija istraživanja obuhvataju rade Simeća (1932-1939), koji je obavio detaljnu interpretaciju tektonskog sklopa. Pejović je odredila stratigrafske karakteristike sedimentata okoline Poćute. Pri tome je izdvojila turon i senon na osnovu fosilne faune. Andđelković je proučavao jurske tvorevine zapadno od Poćute i determinisao karakterističnu fosilnu faunu. (Mojsilović *et al.* 1975)

Jurašinović (1966-1968) i Terzić (1974) istraživali su rudna tela okoline Rebelja i definisali sekundarne oreole rasejavanja rudnih minerala tog područja (Mojsilović *et al.* 1975). Ćirović, Kostić i Madžarević (2005) istraživali su metalogenetske karakteristike rudnih tela Rebelja i utvrdili prisustvo rudnih i pratećih minerala. Vlajnić i Vujinović (2011) su istraživali pojavu rudnih tela sliva Zavojšnice, Jablanice i Rebeljske reke. Odredili su oreole rasejavanja magmatske i hidrotermalne mineralizacije.

Cilj ovog istraživanja je da se strukturno-tektonskom analizom, koja obuhvata proučavanje struktura nastalih kao proizvod tektonskih deformacija stenskih masa, njihove morfologije i kinematike postanka, interpretiraju tektonske karakteristike terena područja u sливу Rebeljske reke kod Valjeva. U tom cilju izvršena su terenska merenja, statistička analiza i interpretacija tektonskih karakteristika dve glavne vrste strukturnih elemenata uočenih na istraživanom području – slojevitosti i raseda.

Materijal i metode

Istraživanje je izvedeno tokom jula i avgusta 2013. godine, primenom metode strukturno-tektonske analize terena (Dimitrijević 1964). Sam metod strukturne analize podrazumevao je proučavanje i određivanje karakteristika individualnih strukturnih oblika uočenih na terenu, kao i njihovu statističku analizu i interpretaciju (Dimitrijević 1978; Dimitrijević 1964). Tako prikazani rezultati iskorišćeni su za objašnjenje sklopa terena, u cilju određivanja tektonskih karakteristika i geodinamičkog razvoja tog područja.

Metodološki postupak strukturne analize, primjenjen u ovom radu, sastojao se iz dva dela: (1) strukturne analize slojevitosti i (2) strukturne analize raseda. Izvršeno je merenje elemenata pada uočenih slojnih površi u sedimentnim stenama terena istraživanog područja, kao i elemenata pada rasednih površi i odgovarajućih tragova kretanja na njima.

Teorijska postavka i metodologija strukturne analize slojevitosti

Strukturno-geološkim ispitivanjima se pokušava preko analize današnjih strukturnih oblika utvrditi način postanka i mehanizam tektonskih deformacija. U tom cilju ispituju se podaci prikupljeni sa pojedinačnih izdanaka stenskih masa, a zatim se vrši njihova analiza i sinteza (Antić 2010; Dimitrijević 1978). Za strukturno-tektonsko proučavanje nekog terena jedan od najvažnijih pokazatelja vrste, geometrije i kinematike deformacija koje su ga oblikovale predstavljaju slojne površi u sedimentnim stenama tog područja.

Pod pojmom slojevitosti (slojne površi, ss-površi) se u strukturno-geološkoj terminologiji podrazumeva elementarni oblik razdvajanja sedimentnih stena u prostoru, koji je predstavljen mehaničkim diskontinuitetima nastalim u toku sedimentacije, za vreme taloženja istovetnog materijala pod nepromjenjenim uslovima okolne sredine (Grubić i Obradović 1975). Struk-

turna analiza slojevitosti može se grubo podeliti na tri faze: (1) terensko prikupljanje podataka o orientaciji slojnih površi na terenu, (2) statističku analizu prikupljenih podataka o slojnim površima i utvrđivanje nabornih struktura standardnim metodama strukturne analize i (3) interpretaciju pukotinskog sklopa područja.

Terensko proučavanje slojevitosti

Klasičnim metodama geološkog kartiranja iz oblasti struktурно-geoloških istraživanja (Dimitrijević 1978; 1964) izvršeno je merenje geološkim kompasom elemenata pada (azimut i padni ugao) slojnih površi u sedimentnim stenama uočenim na terenu sliva Rebeljske reke. Merenje je izvršeno na uočenim slojnim površima na 44 izdanaka i na taj način je prikupljeno ukupno 111 podataka o elementima pada slojnih površi. Ti podaci su iskorišćeni za dalju analizu.

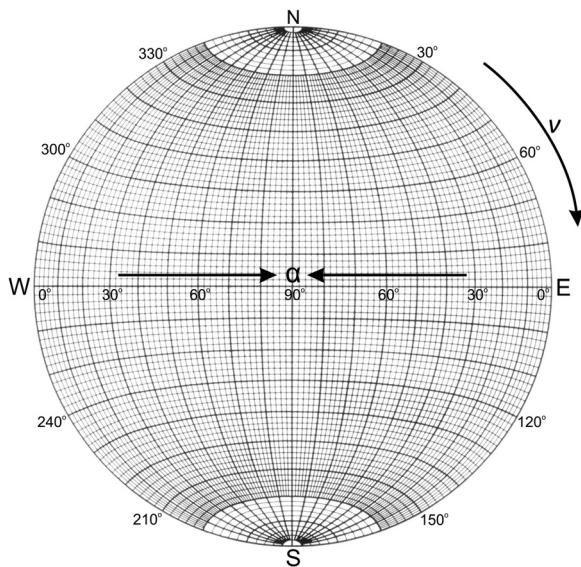
Strukturna analiza slojevitosti i utvrđivanje nabornih struktura

Strukturna analiza i interpretacija slojevitosti sastojala se iz dve faze: (1) statističke analize prikupljenih elemenata pada o orientaciji slojnih površi na terenu, (2) utvrđivanja i objašnjenja nabornih struktura.

Statistička analiza prikupljenih podataka o slojnim površima na terenu Rebeljske reke izvršena je korišćenjem računarskog programa SpheriStat v3.2 (1990-2010 Pangea Scientific, www.pangeasci.com). Cilj statističke analize bio je izrada odgovarajućih strukturnih dijagrama, na osnovu kojih se mogla vršiti dalja interpretacija tektonskog sklopa. U ovom radu je statističkom analizom izrađen konturni dijagram slojevitosti (Dimitrijević 1978), na kome je, odgovarajućim klasama, prikazana gustina orientacije slojnih površi u prostoru.

Podaci koji su uzeti za izradu konturnog dijagrama slojevitosti su elementi pada (azimut i padni ugao) svih izmerenih slojnih površi na terenu, sintetisanih tako da čine jedinstveni uzorak, reprezentativan za celokupno istraživano područje. Primenjen je proces izrade konturnog dijagrama (Dimitrijević 1964) koji obuhvata nekoliko uzastopnih postupaka: (1) izradu početnog tačkastog dijagrama, (2) određivanje klase gustine, (3) izvlačenje izolinija gustine i (4) grafičko opremanje konturnog dijagrama. Ovaj proces je u određenim delovima modifikovan za korišćenje računarskog programa u statističkoj analizi.

Tačkasti dijagram dobijen je nanošenjem elemenata pada (azimuta i padnog ugla) svake pojedinačne slojne površi na Šmitovu mrežu. Šmitova mreža (Van der Pluijm i Marshak 2004) predstavlja jednu vrstu stereografske projekcije koja se u strukturnoj geologiji koristi za dvodimenzionalni prikaz trodimenzionalno orijentisanih geoloških struktura. Mreža je izdeljena na segmenate $2^\circ \times 2^\circ$, koji su konstantni u svim delovima mreže, od centra do njenih rubova. Azimut (v) se nanosi kružno po periferiji dijagrama, počev od severa za vrednosti od $0-360^\circ$, dok se padni ugao (α) nanosi horizontalno po sredini dijagrama, počev od istoka ili zapada, i ima



Slika 3.
Prikaz Šmitove mreže:
 v – azimut,
 α – padni ugao.

Figure 3.
Display of Schmidt's
equal-area net:
 v – azimuth,
 α – deep angle.

vrednosti od 0-90° (slika 3). Pri tome, sferna projekcija ravan prikazuje kao luk (trasu), dok je linija prikazana tačkom (polom) (Ragan 2009). Nanošenjem položaja slojnih površi na Šmitovu mrežu i njihovim prikazivanjem putem polova (tačaka) formira se tačkasti dijagram, koji služi za dalju izradu konturnog dijagrama.

Pri statističkim ispitivanjima slojevitosti od posebne važnosti je raspored polova na Šmitovoj mreži i pravilnost tog rasporeda. Zbog toga je bitno određivanje gustine kojom polovi zaposedaju određena područja na mreži, naročito položaji gde se nalaze maksimumi gustine polova. Da bi se gustina slojnih površi prikazanih polovima jasnije i preciznije prikazala, početno formiran tačkasti dijagram se prevodi u konturni dijagram (vidi sliku 10) na kojem su pojedinačnim konturama (koje predstavljaju izolinije gustine polova) izdvojena područja koja imaju približno istu gустину polova, odnosno isti procenat tačaka po jedinici površine (Dimitrijević 1978).

Određivanje broja klasa gustine predstavlja je narednu fazu formiranja konturnog dijagrama. U teoriji se za pregledne konturne dijagrame definiše 3 do 4, a za detaljan prikaz raspodele polova definiše se od 5 do 7 klasa gustine (Dimitrijević 1964). Proces izračunavanja klasa gustine započeo je određivanjem maksimalne gustine tačaka na dijagramu, nakon čega je određen najmanji broj tačaka, koji definiše broj izolinija gustine. Broj izolinija, odnosno broj klasa gustine, izabran je na osnovu maksimalnog, odnosno minimalnog broja tačaka po jedinici površine dijagrama. U ovom radu određeno je ukupno 5 klasa gustine, sa granicama klasa u brojevima tačaka 1-2-4-6-7.

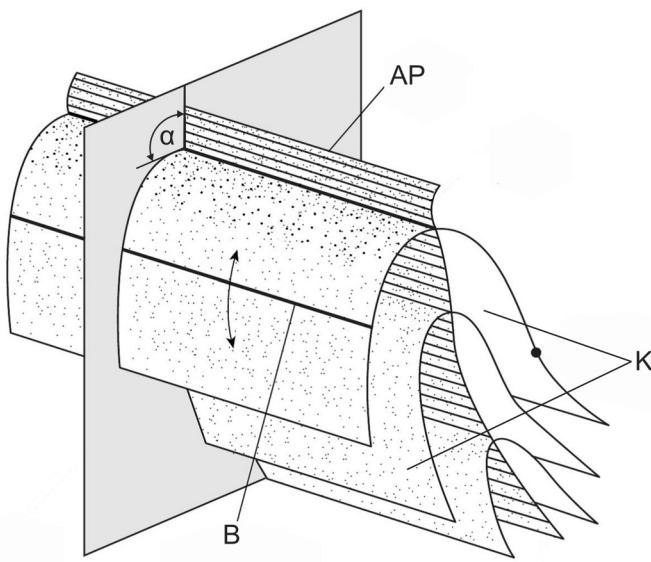
Izvlačenje izolinija gustine vrši se po principu izračunavanja broja tačaka (polova) po jednoprocenntnoj kružnoj površi (površini koja obuhvata 1% ukupne površine dijagrama, ekvivalentno brojačkoj mreži M. Dimitrijevića 1964). Pri tome se polovi (tačke) uzimaju u obzir iako su brojni u

susednim krugovima koji se sa njima preklapaju. Nakon toga izvlačenje izolinija gustine se vrši interpolacijom tako da izolinije obuhvate područja iste klase gustine, a pri tome polja iste gustine moraju biti kontinuirana, a izolinije se ne mogu prekidati niti presecati.

Grafička oprema dijagrama je završni stadijum izrade konturnog dijagrama. Pri tome se različite klase gustine boje različitim nijansama, počev od najsvetlijih do najtamnijih. Radi dalje jasnije interpretacije prikazanih strukturnih podataka, na dijagramu se izvlači periferijski krug, označava centar i pravac severa. Detaljniji postupak i metodološki pristup izrade konturnog dijagrama za prikazivanje strukturnih podataka korišćenjem računarskog softvera dali su Banjac i Marović (1990).

Za utvrđivanje nabornih struktura i definisanje postojanja nabornih oblika iskorišćen je postupak Dimitrijevića (1964). Ovaj postupak, inače standardni statistički metod strukturno-geoloških proučavanja slojevitosti u nekom području, zasniva se na prethodno izvršenom terenskom strukturnom istraživanju, pri čemu su sistematski izmereni elementi pada slojnih površi na terenu, a zatim izvršena statistička analiza i izrada strukturnih dijagrama, na kojima se analizira pravilnost njihovog rasporeda. Proučavanje nabora pruža finalne podatke o obliku, geometriji morfoloških elemenata i tipu nabora (Dimitrijević 1978). Treba napomenuti da se putem analize strukturnih dijagrama jedino može konstatovati prisustvo i dobiti osobine „srednjeg“ ili „statističkog“ nabora, što je i učinjeno u ovom radu.

Pod naborom se u strukturnoj geologiji i tektonici podrazumeva složena geološka struktura nastala kao posledica kontinuiranih plastičnih deformacija stenskih masa i predstavlja elementarni strukturni oblik plastičnih deformacija u zemljinoj kori (Petković 1977). Nabor karakterišu sledeći strukturni elementi: (1) krila nabora, (2) osa nabora, (3) aksijalna površ nabora i (4) vergence nabora (slika 4). Krilo nabora predstavlja



Slika 4.
Morfološki elementi
nabora (prema Van der
Pluijm i Marshak 2004,
modifikovano):
K – krila nabora,
B – osa nabora,
AP – aksijalna površ,
α – ugao vergence.

Figure 4.
Morphological elements
of fold (according to
Van der Pluijm and
Marshak 2004,
modified):
K – fold limbs, B – fold
axis, AP – axial surface
of fold, α – vergence
angle.

površinu dela nabora između njegovog temena i dna (Dimitrijević 1978). Osa nabora (B-osa) predstavlja liniju koja je statistički paralelna svim diferencijalno malim slojnim površima koje čine nabor (Dimitrijević 1978). Aksijalna površ predstavlja simetralnu površ između krila nabora (Ramsay i Lisle 2000). Vergenca nabora predstavlja ugao otklona ravni aksijalne površi od vertikalne ravni, komplementaran sa padnim uglom aksijalne površi (Dimitrijević 1964).

Postupak utvrđivanja nabora se odvijao u nekoliko suksesivnih faza: (1) određivanje elemenata pada maksimuma i podmaksimuma gustine slojnih površi, (2) izračunavanje pružanja analognih krila nabora (koji odgovaraju maksimumu i podmaksimumu gustine), (3) utvrđivanje položaja ose nabora, (4) određivanje pružanja aksijalne površi nabora i (5) određivanje smera i ugla vergence nabora.

Maksimum i podmaksimum gustine slojnih površi određeni su vizuelno na osnovu konturnog dijagrama slojevitosti (Dimitrijeviću 1964). Centri utvrđenih maksimuma i najizraženijeg (po intenzitetu) podmaksimuma gustine slojnih površi određeni su svojim statistički očitanim elementima pada.

Statistički utvrđeni elementi pada maksimuma i najizraženijeg podmaksimuma su po Dimitrijeviću (1964) računski označeni kao elementi pada ekvivalentnih krila nabora. Pritom, položaj maksimuma gustine slojnih površi (M_1) markira krila nabora K_1 , dok položaj najizraženijeg podmaksimuma gustine (M_2) markira položaj krila nabora K_2 . Položaji tako markiranih krila nabora prikazani su odgovarajućim trasama na dijagramu (Van der Pluijm i Marshak 2004).

Osa nabora (B) je po Ramsay i Lisle (2000) i Dimitrijeviću (1964) geometrijski određena kao tačka preseka trasa prethodno označenih krila nabora K_1 i K_2 . Na dijagramu je prikazana svojim polom, sa odgovarajućim elementima pada.

Položaj aksijalne površi (AP) nabora određen je geometrijski nalaženjem trase koja predstavlja simetralnu ravan između prethodno određenih položaja krila nabora, i koja pri tom seče osu nabora B (Ramsay i Lisle 2000). Na dijagramu je prikazana svojom trasom.

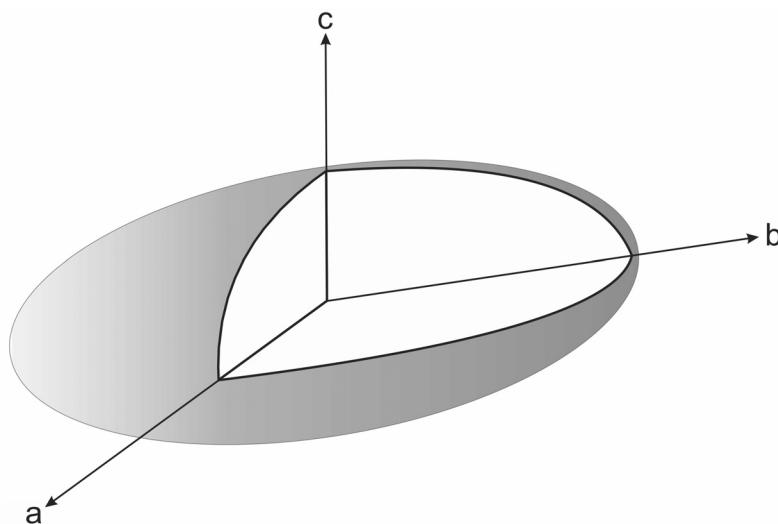
Vergenca nabora (ρ) određena je na osnovu smera otklona prethodno utvrđene trase aksijalne površi od vertikalne ravni. Pri tome se uzima generalni smer otklona celokupne trase aksijalne površi. Ugao vergence nabora je računski određen kao komplementarni ugao padnom uglu aksijalne površi (Dimitrijević 1964).

Određivanjem položaja, elemenata pada i geometrijskog odnosa krila, ose, aksijalne površi i vergence nabora, dobijeni su podaci koji definišu ukupnu morfologiju i geometriju nabora i mogu poslužiti za njegovu preciznu klasifikaciju, kao i za dalju interpretaciju drugih geoloških struktura. Kao što je već rečeno, ovako određen nabor sa svojim karakteristikama predstavlja samo rezultat statističke analize gustine slojnih površi, i kao takav generalno objašnjava način ubranosti određenog područja u celini.

Interpretacija pukotinskog sklopa područja

Interpretacija pukotinskog sklopa izvršena je po standardnom postupku (Dimitrijević 1964; Van der Pluijm i Marshak 2004). Ovaj postupak zasniva se na prethodno utvrđenim morfološkim elementima „srednjeg“ ili „statističkog nabora“. Primenom ovog postupka mogu se dobiti, tj. rekonstruisati samo statistički sistemi pukotina, reprezentativni za celo područje. Postupak obuhvata dve faze: (1) utvrđivanje položaja tektonskih osa i (2) rekonstrukciju sistema pukotina.

Tektonske ose određene su statistički postupkom Dimitrijevića (1964). Tektonske ose predstavljaju koordinatne ose troosnog elipsoida deformacija. Položaj tektonskih osa prikazan je na slici 5. Formiraju tektonski koordinatni sistem, pri čemu je deformaciona ravan (šrafirana na slici 5) određena osama a i c . Osa a se nalazi u deformacionoj ravni, i paralelna je pravcu najvećeg izduženja elipsoidea deformacija. Tektonska osa b je normalna na osu a i deformacionu ravan ac . Tektonska osa c je normalna na ose a i b i leži u deformacionoj ravni.



Slika 5.

Tektonske koordinatne ose elipsoida deformacija (prema Fossen 2010, modifikovano):
a, b, c – tektonske ose,
ac – deformaciona ravan.

Figure 5.

Tectonic coordinate axes of deformation ellipsoid (according to Fossen 2010, modified): a, b, c – tectonic axes; ac – deformation plane

Postupak utvrđivanja položaja tektonskih osa zasniva se na teorijskoj prepostavci da se u nabranim tektonskim sklopovima položaj ose nabora poklapa sa položajem tektonske ose b , što predstavlja početni uslov za dalju interpretaciju (Dimitrijević 1964). Na osnovu položaja ose b i njenog odnosa sa ostalim osama elipsoidea deformacija, utvrđuju se i položaji tektonskih osa a i c . Tektonska osa a se nalazi na simetrali (polovini ugla raspona) poznatih krila nabora K_1 i K_2 . Tektonska osa c je normalna na određene položaje osa a i b .

Rekonstrukcija sistema pukotina izvršena je na osnovu položaja tektonskih osa a , b i c . U teoriji strukturne geologije se pod pojmom pukotina (ruptura, frakturna) podrazumeva mehanički diskontinuitet stenske mase po

kome se kretanje u datom veličinskom području može zanemariti (Dimitrijević 1978).

Položaji rekonstruisanih sistema pukotina utvrđuju se na osnovu pretpostavljenog mehanizma deformacija koji dovodi do geneze glavnih grupa pukotina. Normalno na pravac maksimalne kompresije nastaju kompresione pukotine, i njihov položaj se može rekonstruisati u ravni koju grade tektonske ose *a* i *b*. Tenzione (relaksacione) longitudinalne pukotine nastaju normalno na pravac maksimalne tenzije i nalaze se u ravni koju izgrađuju tektonske ose *b* i *c*. Tenzione poprečne pukotine takođe nastaju normalno na pravac maksimalne tenzije, a njihov položaj se nalazi u ravni koju izgrađuju tektonske ose *a* i *c* (Dimitrijević 1964). Sistem kliznih pukotina (pukotina smicanja) nastaje usled promene prirode i pravca dejstva stresa od kompresionog ka tenzionom, oko ravni koja rotira oko tektonske ose *b* (Sychev i Kulikova 2013). Njihov položaj se utvrđuje na osnovu položaja tektonske ose *b* i ugla koji zaklapaju sa tektonskom osom *c*, koji se kod takvih pukotina kreće od 30 do 40°(Dimitrijević 1964).

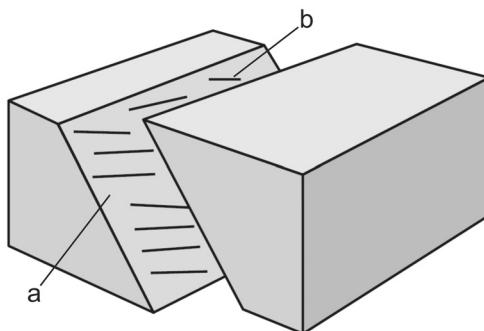
Krajnji rezultat interpretacije pukotinskog sklopa područja predstavlja utvrđivanje rekonstruisanih sistema pukotina, njihovog položaja i orientacije, kao i geometrijskog odnosa sa ostalim strukturnim elementima. Kao i u slučaju nabora, ovako dobijeni sistemi pukotina daju samo statističku sliku koja najviše odgovara primjenjenom teorijskom modelu i na taj način predstavlja generalnu interpretaciju pukotinskog sklopa istraživanog područja.

Teorijska postavka i metodologija strukturne analize raseda

U teoriji strukturne geologije pod rasedom se podrazumeva strukturni element nastao u uslovima krtog loma, označen površinom mehaničkog diskontinuiteta po kojoj se kretanje, vršeno paralelno površi rasedanja, u datom veličinskom području ne može zanemariti (Dimitrijević 1978). Strukturna analiza raseda obuhvatila je tri bitna dela: (1) terensko prikupljanje podataka o elementima pada rasednih površi i odgovarajućih tragova kretanja po njima, (2) statističku obradu prikupljenih podataka primenom inverznog metoda stres analize i (3) interpretaciju dobijenih rezultata o karakteristikama raseda.

Terensko proučavanje raseda

Na terenu sliva Rebeljske reke, klasičnim metodama geološkog kartiranja (Dimitrijević 1978) koje se odnose na način prikupljanja strukturnih geoloških podataka, izvršeno je merenje geološkim kompasom elemenata pada (azimut i padni ugao) osnovnih strukturnih elemenata raseda – rasedne površi i a-lineacije. Rasedna površ definiše se kao površ mehaničkog diskontinuiteta stenske mase po kojoj se odvijalo kretanje blokova raseda (Watt 1982). A-lineacija (strije, brazde) je predstavljena paralelnim brazdama na rasednoj površi, koje ukazuju na smer kretanja blokova raseda, a



Slika 6. Strukturni elementi raseda
 (prema Van der Pluijm i Marshak 2004, modifikovano):
 a – rasedna površ, b – a-lineacija (tragovi kretanja).

Figure 6. Structural elements of fault
 (according to Van der Pluijm and Marshak 2004, modified):
 a – fault plane, b – a-lineation (movement traces).

nastaju kao posledica kretanja blokova raseda i istovremenog usecanja linijskih tragova na rasednu površ (Dimitrijević 1964). Strukturni elementi raseda prikazani su na slici 6.

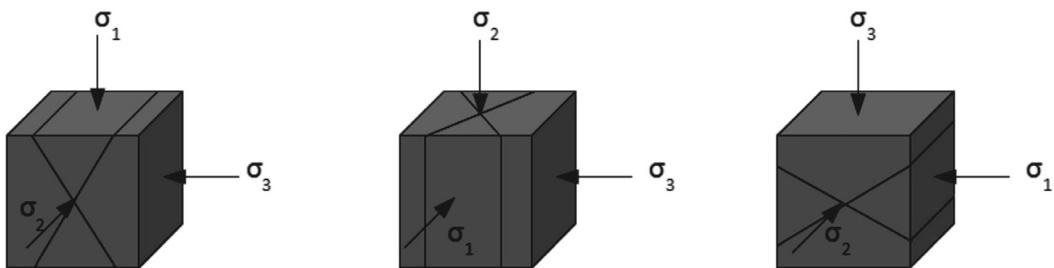
Merenje je izvršeno na uočene dve rasedne strukture, a ukupno je prikupljeno 12 podataka o elementima pada rasednih površi i a-lineacijama, a za dalju statističku analizu iskorišćeno je 8 podataka.

Statistička analiza raseda inverznim metodom analize stresa

Uzrok nastanka mnogih geoloških struktura se može pronaći u dejstvu stresa. Stres poseduje neke osobine, koje se uzimaju kao osnov za strukturna istraživanja: (1) postoji u svakoj tački neke strukture i (2) ima različiti pravac i magnitudu. Polje stresa tokom vremena varira, pa su usled toga jedini pokazatelji pravca i intenziteta stresa koji izaziva stvaranje tog polja stresa, strukture krtog loma – rupture (Ramsay i Lisle 2000).

Standardne metode strukturno-geoloških istraživanja u svojoj osnovi se oslanjaju na principe dinamike pucanja (Antić 2010). Po ovim metodama može se rekonstruisati polje stresa koje je vladalo u trenutku nastanka određenih ruptura. Fenomen nastanka ruptura objašnjen je onda kad se utvrdi da je dato polje stresa bilo dominantno u odnosu na druge moguće faktore (Scheidegger 1963).

Anderson je definisao tri osnovna stanja stresa (Anderson 1942): (1) normalno ili gravitaciono (sa vertikalnom osom maksimalnog stresa σ_1), (2) transkurentno (sa vertikalnom osom srednjeg stresa σ_2) i (3) reversno (sa vertikalnom osom minimalnog stresa σ_3). Andersenova stanja stresa sa modelima rasedanja prikazana su na slici 7.



Slika 7. Andersenova stanja stresa i modeli rasedanja (prema Antić 2010, modifikovano):

a – normalno (gravitaciono) stanje stresa, b – transkurentno stanje stresa, c – reversno stanje stresa; σ_1 – osa maksimalnog stresa, σ_2 – osa srednjeg stresa, σ_3 – osa minimalnog stresa.

Figure 7. Anderson's stress states and models of faulting (according to Antić 2010, modified):

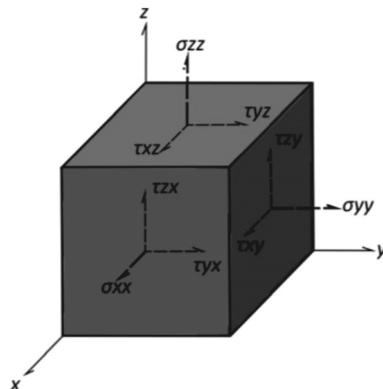
a – normal (gravitation) stress state, b – strike-slip stress state, c – reverse (thrust) stress state; σ_1 – maximal stress axis, σ_2 – intermediate stress axis, σ_3 – minimal stress axis.

Za rekonstrukciju položaja glavnih osa stresa koriste se samo orijentacije rasednih površi nastalih direktnim dejstvom proučavanog stresa, što predstavlja ograničenja ove teorije (Antić 2010). Ovo ograničenje je prevaziđeno hipotezom da je osa maksimalnog stresa σ_1 , koji je delovao duž neke ravni, teorijski paralelna lineacija (strijama, brazdama) nastaloj usled kretanja blokova raseda po toj istoj ravni (Wallace 1951; Bott 1959). Iz ovog sledi da na pravac kretanja po rasednoj površi utiču četiri osnovna faktora – orientacija tri glavne ose stresa (σ_1 , σ_2 i σ_3) i pokazatelj linearног odnosa njihovih magnituda (R).

Inverzni metod stres analize predstavlja matematičko-statistički postupak rekonstrukcije tenzora stresa na osnovu merenih elemenata pada rasednih površi i odgovarajućih a-lineacija na njima. Za cilj ima rekonstrukciju elipsoida deformacija koje su uzrokovale nastanak proučavanih rasednih struktura, određivanjem glavnih osa stresa σ_1 , σ_2 i σ_3 , kao i izračunavanje linearног odnosa njihovih pojedinačnih magnituda. Pri tome se stres uzima kao glavni generator strukturnih deformacija stenskih masa (Blagojević i Trivić 1996).

Važne prepostavke koje moraju biti ispunjenje prilikom primene inverznog metoda su: (1) kretanje se odvijalo u pravcu paralelnom maksimalnoj tangencijalnoj komponenti stresa na rasednoj površi, (2) a-lineacija predstavlja jedini osnov za uspešnu rekonstrukciju tenzora stresa, usled toga što stres može da prouzrokuje kretanje i duž reaktiviranih raseda, (3) populacija raseda koja se proučava mora, barem generalno, nastati usled deformacija istog kinematskog akta (Blagojević i Trivić 1996) i (4) pokret koji izaziva kretanje duž jednog raseda teoretski ne utiče na karakter i smer kretanja drugog (Ramsay i Lisle 2000).

Stanje stresa koje vlada na bilo kojoj ravni može se definisati preko poznatih komponenti tenzora stresa i to u tri međusobno upravne ravni koje



Slika 8.
Prikaz dejstva stresa u
tri dimenzije
(Antić 2010)

Figure 8.
Display of stress effect
in 3D
(Antić 2010)

su paralelne jediničnim vektorima pravouglog Dekartovog troosnog koordinatnog sistema x, y, z (Antić 2010), prikazanog na slici 8.

Tada se tenzor stresa (T) može prikazati:

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}.$$

Kako po stavu o konjugovanosti stresa (Angelier 1979) sledi:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx} \text{ i } \tau_{yz} = \tau_{zy}$$

proizilazi da tenzor stresa umesto od 9 komponenti, zavisi od 6 komponenti stresa i može se u koordinatnom sistemu x, y, z , prikazati simetričnom matricom

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}.$$

U svojstvenom koordinatnom sistemu, tj. u koordinatnom sistemu glavnih osa stresa (σ_1, σ_2 i σ_3) tenzor stresa se svodi na sledeći oblik:

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

pri čemu je $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ i $\sigma_1 \neq \sigma_3$ (elipsoid stresa).

Ukupni tenzor stresa (T) može se dalje razložiti na sferni i redukovani tenzor:

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - R & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - R & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - R \end{bmatrix} = k_1(T_0 + k_2 I)$$

pri čemu su k_1 i k_2 konstante skaliranja ($k_1 > 0$), I jedinična matrica, T_0 devijatorski deo tenzora stresa a R prosečan normalni stres (Blagojević i Trivić 1996). Prosečan normalni stres, koji predstavlja koeficijent oblika elipsoida stresa, izračunava se preko glavnih osa stresa σ_1 , σ_2 i σ_3 relacijom

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

pri čemu važi $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ i $\sigma_1 \neq \sigma_3$, a R ima vrednosti $0 \leq R \leq 1$ (Sperner *et al.* 1993).

Na osnovu iznetog vidi se da pomoću prikupljenih terenskih podataka koji određuju smer i pravac tangencijalnog stresa (elemenata pada rasednih površi i odgovarajuće a-lineacije), može izračunati samo devijatorski tenzor stresa T_0 . Njegov značaj je u tome što on, u kombinaciji sa jediničnim vektorom normale na rasednu površ (**n**), predstavlja faktor koji utiče na smer kretanja po rasednoj površi. Tangencijalne komponente stresa koji je izazvao to kretanje ispoljavaju se u vidu a-lineacije (strija, brazdi). Po ovom principu može se za svaku rasednu površ izračunati teorijska lineacija kao pokazatelj dejstva stresa za date vrednosti koeficijenta R (Blagojević i Trivić 1996).

Potpuni tenzor stresa (T) moguće je izračunati direktnim inverznim metodom kojim se linearno minimalizuju uglovi između pravaca merenih a-lineacija i računski dobijenog pravca delovanja maksimalnog stresa, duž svake rasedne površi ponaosob (Blagojević i Trivić 1996). Metod minimalizuje tangencijalni stres τ normalan na izmerene a-lineacije, nakon čega se određuje orientacija glavnih osa stresa i izračunava relativni odnos njihovih magnituda (Angelier i Goguel 1979).

Metod inverzije korišćen u ovom radu je postupak stres analize Simple Shear Tensor Average (Spang 1974) koji radi po gore izloženom teorijskom principu. Analiza je izvršena u računarskom programu MyFault v1.05 (2005-2013, www.pangeasci.com). Postupak koji ovaj program primenjuje prilikom analize je baziran na programskom kodu iznetom u radu Spernera i saradnika (1993).

Interpretacija rezultata analize raseda

Rezultati dobijeni primenom metode inverzije Simple Shear Tensor Average grafički su prikazani i interpretirani na dva načina: (1) Šmitovom mrežom i (2) Morovim krugovima stresa.

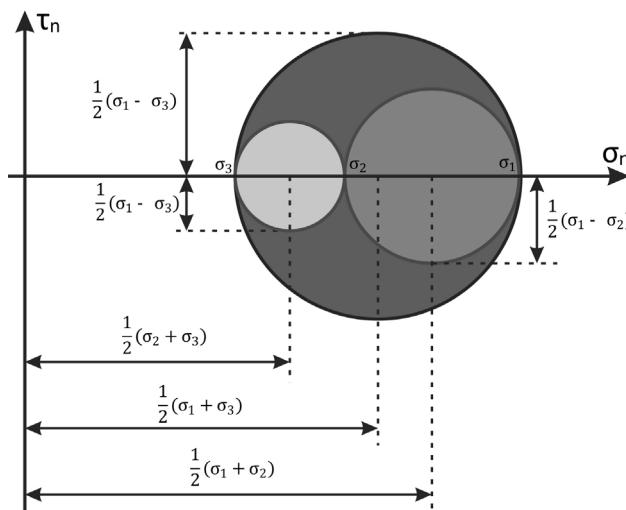
U ovom radu su strukturni elementi raseda (položaji rasednih površi i a-lineacija) na Šmitovoj mreži (Van der Pluijm i Marshak 2004) prikazani korišćenjem Anželijerovog metoda (Angelier i Goguel 1979). Ravni pojedinačnih rasednih površi prikazane su trasama (lukovima), dok su položaji a-lineacije prikazani strelicama, čiji smer pokazuje kretanje blokova proučavanih raseda. Položaji glavnih osa stresa, σ_1 , σ_2 i σ_3 , prikazane su kružnicama čiji prečnik odgovara maksimalnoj, srednjoj i minimalnoj osi stresa, respektivno. Pravci delovanja horizontalnog stresa (kompresije ili tenzije) u trenutku rasedanja, prikazani su strelicama na obodima Šmitovog

dijagrama. Ovakvim načinom prikaza i interpretacije strukturnih elemenata omogućena je rekonstrukcija elipsoida deformacija, povezivanjem položaja elemenata raseda i orientacija osa stresa.

Morov krug stresa (Scheidegger 1963), korišćen u ovom radu, predstavlja grafički prikaz orientacija rasednih površi i odnosa magnituda glavnih osa stresa. Koristi se u cilju procene komponenti stresa koje su izazvale nastanak proučavanog raseda. Stanja stresa se prikazuju na σ_n - τ dijagramu (σ_n – normalni stres, τ – tangencijalni stres) pomoću tri kruga. Pri tome je odnos komponenata stresa definisan koeficijentom trenja (ϕ), izraženog formulom:

$$\phi = \frac{\tau}{\sigma_n}.$$

Ona stanja stresa koja dodiruju teorijski konstruisane kružnice, odnosno za koja je odnos normalnog i tangencijalnog stresa zadovoljavajući, definišu se kao odgovorna za nastanak raseda (Mohr 1928). Orientacije rasednih površi za koje je odnos normalnog i tangencijalnog napona, tj. koeficijent trenja, prenizak, smatraju se neodgovarajućim za dato rešenje stresa. Prikaz teorijskog izgleda Morovog kruga stresa dat je na slici 9.



Slika 9.
Teoretski prikaz
Morovog kruga stresa
(Antić 2010)

Figure 9.
Theoretical display of
Mohr's circle plot
(Antić 2010)

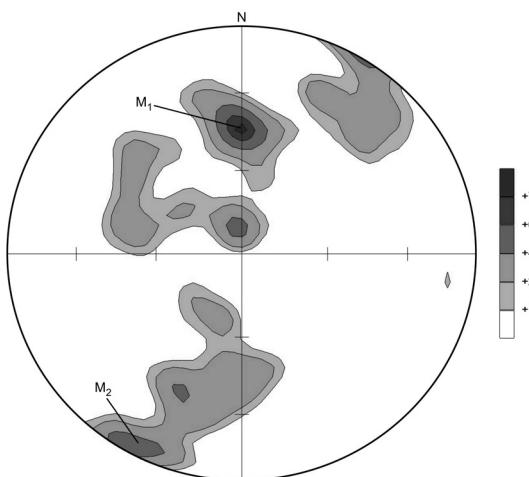
Interpretacijom podataka analize raseda, sagledavanjem orientacije glavnih osa stresa i njihovog linearног odnosa, rekonstruisan je elipsoid deformacija i na taj način konačno rešen stres koji je izazvao nastanak proučavanih raseda na terenu.

Rezultati i diskusija

Rezultati istraživanja su, shodno primjenjenoj metodologiji strukturnih istraživanja, prikazani u dve grupe: (1) rezultati strukturne analize slojevitosti i (2) rezultati strukturne analize raseda.

Rezultati strukturne analize slojevitosti

Istraživanjem slojevitosti na terenu Rebeljske reke prikupljeno je ukupno 111 merenja o pojedinačnim slojnim površima izdanaka stenskih masa na terenu. Statističkom analizom ovih podataka izrađen je konturni dijagram, na kome su prikazane gustine raspodele prostornih položaja slojnih površi, reprezentativno za celo istraživano područje. Konturni dijagram je prikazan na slici 10.



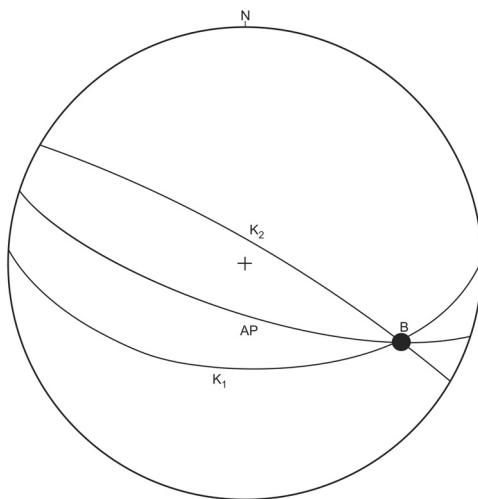
Na konturnom dijagramu slojevitosti izdvajaju se jedan maksimum i tri podmaksimuma gustine slojnih površi. Maksimum (M_1) se nalazi u severnom delu dijagrama i ima elemente pada 359/44 (azimut / padni ugao). Od tri podmaksimuma, najizraženiji podmaksimum (M_2) nalazi se u jugozapadnom kvadrantu dijagrama i ima elemente pada 210/7. Ostala dva podmaksimuma se nalaze u severozapadnom (sa elementima pada 348/80) i jugozapadnom delu dijagrama (sa elementima pada 203/35).

Ovakva raspodela gustine slojevitosti na konturnom dijagramu ukaže da su slojne površi na terenu istraživanog područja tektonski deformisane. Usled toga, sagledavajući raspodelu gustine sa dijagrama, moguće je na celokupnom istraživanom području utvrditi prisustvo nabora. Na osnovu položaja maksimuma (M_1) i glavnog podmaksimuma utvrđeni su položaji krila nabora. Maksimum gustine (M_1) markira krilo nabora K_1 koje pada ka jugu, sa elementima pada 179/74. Najizraženiji podmaksimum gustine označava krilo nabora K_2 , koje pada ka severoistoku, sa elementima pada 30/83. Ugao raspona koji zaklapaju krila nabora iznosi 58° . Osa nabora (B) je definisana u preseku krila nabora jugoistočnom kvadrantu dijagrama i ima elemente pada 117/26. Aksijalna površ (AP) nabora nalazi se na simetralnoj ravni krila nabora u jugozapadnom kvadrantu i ima elemente pada 198/73. Vergenca nabora je 27° ka severoistoku.

Na osnovu utvrđenih statističkih vrednosti morfoloških elemenata, nabor se prema Dimitrijeviću (1978) klasificiše kao normalni kosi nabor.

Slika 10.
Konturni dijagram
slojevitosti:
 M_1 – maksimum
gustine,
 M_2 – najizraženiji
podmaksimum.

Figure 10.
Contour diagram of
stratification:
 M_1 – density
maximum,
 M_2 – strongest density
submaximum.



Slika 11.

Dijagram utvrđenog nabora i njegovih morfoloških elemenata:

B – osa nabora, K₁, K₂ – krila nabora, AP – aksijalna površ nabora.

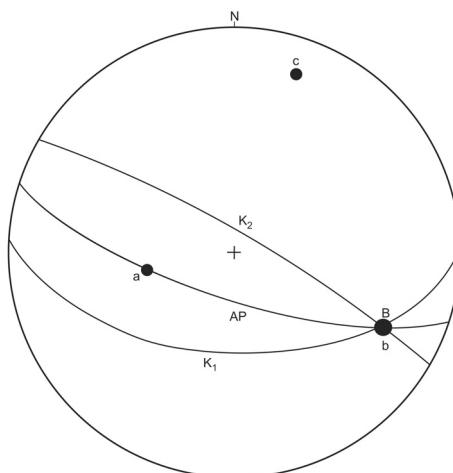
Figure 11.

Diagram of determined fold and its morphological elements:

B – fold axis, K₁, K₂ – fold limbs, AP – axial surface of fold.

Prikaz nabora i njegovih morfoloških elemenata na Šmitovom dijagramu dat je na slici 11.

Tektonska osa *b* (određena na osnovu položaja ose nabora *B*) nalazi se u jugoistočnom kvadrantu dijagrama i ima elemente pada 117/26. Tektonska osa *a* se nalazi u jugozapadnom kvadrantu dijagrama i ima elemente pada 258/58. Tektonska osa *c* je, na osnovu poznatih položaja tektonskih osa *a* i *b*, locirana u severoistočnom delu dijagrama i ima elemente pada 17/18. Prikaz položaja tektonskih osa *a*, *b* i *c* u odnosu na morfološke elemente nabora dat je na slici 12.



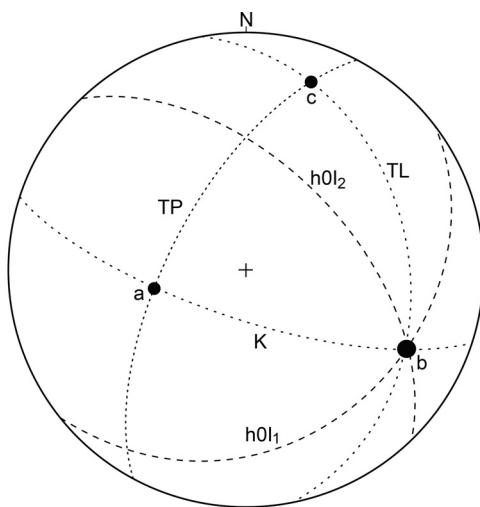
Slika 12. Dijagram utvrđenih položaja tektonskih osa:

a – tektonska osa *a*, *b* – tektonska osa *b*, *c* – tektonska osa *c*, *B* – osa nabora, K₁, K₂ – krila nabora, AP – aksijalna površ nabora.

Figure 12. Diagram of determined tectonic axes positions:

a – tectonic axis *a*, *b* – tectonic axis *b*, *c* – tectonic axis *c*, *B* – fold axis, K₁, K₂ – fold limbs, AP – axial surface of fold.

Interpretacija pukotinskog sklopa područja urađena je pomoću prethodno utvrđenih položaja tektonskih osa a , b i c , na osnovu usvojenog teorijskog modela strukturalnih deformacija. Položaji rekonstruisanih sistema pukotina i morfoloških elemenata nabora prikazani su Šmitovim dijagramom na slici 13. Rekonstruisani sistem kompresionih pukotina (K) interpretiran je u ravni koju čine ose a i b , sa elementima pada 192/70. Nastale su normalno na pravac maksimalne kompresije. Tenzione longitudinalne pukotine (TL) interpretirane su u ravni koju formiraju tektonske ose b i c , nastale normalno na pravac maksimalne tenzije, sa elementima pada 79/32. Sistem tenzionih poprečnih pukotina (TP) interpretiran je u ravni koju čine ose b i c , sa elementima pada 298/64, duž pravca maksimalne tenzije. Spregnuti sistem kliznih pukotina $h0l_1$ i $h0l_2$ interpretiran je u odnosu na tektonsku osu b , sa elementima pada 142/28 i 46/54, respektivno.



Slika 13. Rekonstruisani sistemi pukotina:
a, b, c – tektonske koordinatne ose, K – kompresione pukotine,
TL – longitudinalne pukotine, TP – tensione poprečne pukotine,
h0l₁, h0l₂ – spregnuti sistem kliznih pukotina.

Figure 13. Reconstructed joints systems:
a, b, c – tectonic coordinate axes, K – compresion joints, TL – longitudinal tension joints, TP – transverse tension joints, h0l₁, h0l₂ – composite system of shear joints.

Na osnovu položaja i geometrijskog odnosa morfoloških elemenata nabora i pružanja rekonstruisanih sistema pukotina može se zaključiti da su obe grupe tektonskih struktura nastale u uslovima istog ili sličnog tektonskog režima. Iz ovoga se može zaključiti da su za vreme tektonskog oblikovanja i nabori i rekonstruisani sistemi pukotina svoju genezu ostvarili usled dejstva istih tektonskih deformacija.

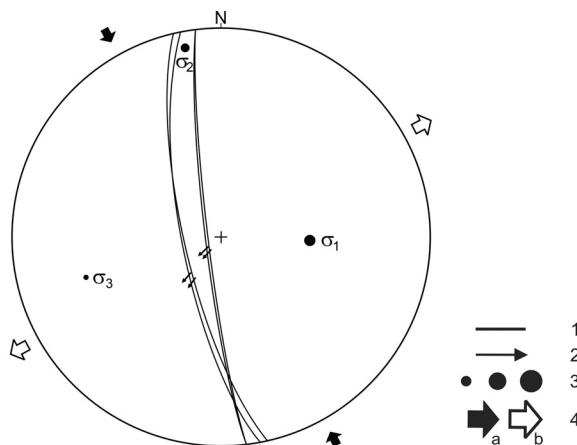
Sa druge strane, prisustvo interpretiranog spregnutog sistema pukotina smicanja, po svojoj genezi (Sychev i Kulikova 2013), ukazuje na to da stres koji je izazvao strukturne deformacije nije bio homogen, već je na stenske

mase delovao stres promenljive prirode, od kompresione ka tenzionoj. Ovakva priroda deformacija se, sagledavajući širi regionalni geotektonski položaj i razvoj istraživanog područja, generalno može objasniti tektonskim procesima navlačenja koji su se dešavali u širem regionu nakon završetka finalnih faza zatvaranja okeana Neotetisa krajem mezozoika (Schmid *et al.* 2008).

Rezultati strukturne analize raseda

Analizom položaja raseda na dijagramu uočava se da rasedi na istraživanom području imaju dominantan pravac pružanja SSZ-JJI. Statističkom analizom elemenata pada rasednih površi i a-lineacije, kretanje vršeno po rasednim površima označeno je kao normalno-levo. Rasedi su klasifikovani po Dimitrijeviću (1978) kao normalni-levi. Rasedne površi imaju padni ugao u rasponu od 30-50°, pa su ovi rasedi označeni kao rasedi srednjeg pada. Rasedi su, u skladu sa njihovim odnosom prema aksijalnoj površi utvrđenog regionalnog nabora, označeni kao dijagonalni.

Inverznom analizom stresa određene su orientacije glavnih osa stresa i definisani uslovi stresa tokom rasedanja. Osa maksimalnog stresa σ_1 nalazi se u jugoistočnom kvadrantu dijagrama i ima elemente pada 102/68. Osa srednjeg stresa σ_2 locirana je u severozapadnom kvadrantu dijagrama i ima elemente pada 349/9. Osa minimalnog stresa σ_3 nalazi se u jugozapadnom kvadrantu, sa elementima pada 256/20. Vrednost koeficijenta oblika elipsoida stresa (R) za proučavane rasede iznosi 0.49. Na osnovu ove vrednosti i orientacije osa stresa tektonski režim u kome su nastali ovi rasedi označen je kao transkurentni. Pri tome je dominantni pravac kompresije SSZ-JJI, a tenzije ISI-ZJZ. Na slici 14 Šmitovim dijagrameom prikazani su položaji rasednih površi, odgovarajućih a-lineacija i glavnih osa stresa.

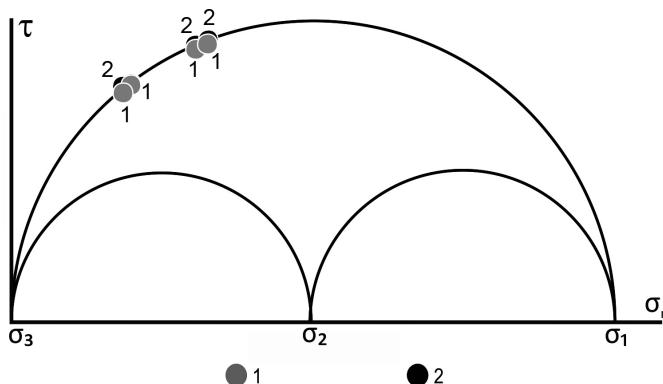


Slika 14. Rezultati stres analize: 1 – rasedna površ, 2 – a-lineacija, 3 – ose stresa σ_1 , σ_2 i σ_3 , respektivno, 4a – kompresija, 4b – tenzija.

Figure 14. Results of stress analysis: 1 – fault plane, 2 – a-lineation, 3 – stress axis σ_1 , σ_2 and σ_3 , respectively, 4a – compression, 4b – tension.

Analizom položaja rasednih površi na Morovim krugovima stresa, na osnovu odnosa normalne i smičuće komponente stresa, utvrđeno je da je kretanje po rasedu imalo smičući karakter, sa uticajem dejstva normalne komponente stresa. Ovim su potvrđene prethodno iznete tvrdnje o mehanizmu kretanja po rasedu i uslovima stresa koji je vladao prilikom rasanja. Položaj raseda na Morovom dijagramu prikazan je na slici 15.

Geneza raseda uočenih na istraživanom području najverovatnije je os-tvarena neotektonskim procesima nastalim delovanjem deformacionih faza tenzije prirode, kao posledica kretanja i rotacije Jadranske mikro-ploče u odnosu na Dinaridski orogen. Pri tome Mladenović *et al.* (2014) određuju pravac tenzije S-J do SI-JZ, koji se generalno poklapa sa pravcem delovanja tenzije na proučavane rasede.



Slika 15.
Morovi krugovi stresa
proučavanih raseda:
1 – rešeni stres,
2 – maksimalni stres.

Figure 15.
Mohr's circle plot of
investigated faults:
1 – resolved stress,
2 – maximum stress.

Zaključak

Ovim istraživajem je interpretiran tektonski sklop područja Rebeljske reke kod Valjeva. Primenom metode strukturno-tektonske analize terena izvedeno je terensko merenje, statistička analiza i interpretacija strukturnih podataka dve vrste strukturalnih elemenata uočenih na terenu – slojevitosti i raseda.

Strukturnom analizom slojevitosti utvrđeno je prisustvo kosog normalnog nabora, regionalnog pružanja. Na osnovu morfoloških elemenata nabora definisani su položaji tektonskih osa, koji su pokazali prisustvo četiri glavne grupe rekonstruisanih sistema pukotina: kompresione, tenzije longitudinalne, tenzije poprečne i klizne. Prisustvo spregnutog sistema kliznih pukotina ukazuje na to da je stres koji je izazvao deformacije proučavanih struktura bio promenljive prirode, od kompresione do tenzije, kao posledica duktilnih tektonskih oblikovanja nakon finalnih faza zatvaranja mezozojskog Neotetisa na istraživanom području. Geometrija i orientacija morfoloških elemenata nabora i orientacija tektonskih osa sistema pukotina pokazuju da su i nabori i rekonstruisani sistemi pukotina generisani upravo u istom tektonskom režimu, pod uticajem istih ili sličnih tektonskih deformacija.

Strukturnom analizom raseda utvrđeno je da je kretanje po dijagonalnim rasedima srednjeg pada i pružanja SSZ-JJI bilo normalno-levo. Sâmo kretanje je imalo smičući karakter, sa uticajem normalne komponente stresa. Na osnovu orientacije glavnih osa stresa rasedi su interpretirani kao normalni (gravitacioni). Ovi rasedi, nastali u transkurentnom tektonskom režimu, sa dominantnim pravcem kompresije SSI-JJZ i tenzije ISI-ZJJ. Geneza raseda je uzrokovana neotektonskim procesima tenzionih deformacionih faza, pravca tenzije S-J do SI-JZ, usled kretanja i rotacije Jadranske mikro-ploče u odnosu na Dinaride.

Zahvalnost. Veliku zahvalnost upućujem Ani Mladenović, master inž. geologije, istraživaču-saradniku Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, na pruženoj stručnoj pomoći tokom izrade rada. Zahvaljujem se članovima Petničke meteorske grupe na pruženoj pomoći i saradnji za vreme izvođenja terenskog dela istraživanja. Dušici Petrašinović, dipl. inž. geologije se zahvaljujem za pružene stručne savete i pomoć prilikom izvođenja istraživanja i procesa obrade rezultata.

Literatura

- Anderson E. M. 1942. *The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain*. Edinbrug: Oliver and Boyd
- Andđelković M. 1988. *Geologija Jugoslavije*. Beograd: Građevinska knjiga
- Angelier J. 1989. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, **11**: 37.
- Angelier J. 2002. Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV – a new method free of choise among nodal planes. *Geophysical Journal International*, **150**: 558.
- Angelier J., Goguel J. 1979. Sur une méthode simple de détermination des axes principaux des contraintes pour une population de failles. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, **288**: 307.
- Antić M. 2010. Strukturno-tektonske karakteristike Gornjačko-suvoplaninske zone na širem prostoru klisure Gornjak. Diplomski rad. Departman za istorijsku i dinamičku geologiju, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Dušina 7, Beograd.
- Banjac N., Marović M. 1990. O jednom metodu izrade konturnih i prstenastih dijagrama pomoću računara. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, **54**: 173.

- Blagojević B., Trivić B. 1996. Determinacija paleostres tenzora primenom inverznog metoda. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, **60**: 159.
- Bott M.H.P. 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, **46** (2): 102.
- Ćirović I., Kostić A., Madžarević Ž. 2005. Oreoli rasejavanja rudnih minerala u području Rebelja. U *Petničke sveske*, 58 (ur. B. Savić). Valjevo: Istraživačka stanica Petnica, str. 153-160.
- Delavux D., Sperner B. 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. *Geological Society London - Special Publications*, **212**: 75.
- Dimitrijević M. 1964. *Struktorna geologija*. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet
- Dimitrijević M. 1978. *Geološko kartiranje*. Beograd: ICS
- Dimitrijević M. 1995. *Geologija Jugoslavije*. Beograd: Geoinstitut
- Fossen H. 2010. *Structural Geology*. Cambridge University Press
- Grubić A., Obradović J. 1975. *Sedimentologija*. Beograd: Građevinska knjiga
- Hardcastle K.L., Hills L.S. 1981. BRUTE3 and SELECT: QuickBASIC 4 programs for determination of stress tensor configuration and separation of heterogeneous populations of fault-slip data. *Computers & Geosciences*, **17** (1): 23.
- Mladenović A. 2010. Geofizički model geološke grade čačansko-kraljevačkog tercijarnog basena. U *Zbornik radova 15. kongresa geologa Srbije sa međunarodnim učešćem* (ur. N. Banjac). Beograd: Srpsko geološko društvo, str. 669-675.
- Mladenović A., Trivić B., Cvetković V., Pavlović R. 2014. A brittle tectonic history of the Internal Dinarides: an inference based on the paleostress study in the Valjevo area (western Serbia). *Proceeding of EGU General Assembly*, **16**: 46.
- Mohr O. 1928. *Abhandlungen aus dem gebiete der technischen mechanik*. Berlin: W. Ernst & Sohn
- Mojsilović S., Filipović I., Baklajić D., Đoković I., Navalija M. 1975. *Tumač za list Valjevo L 34-136 OGK SFRJ*. Beograd: Savezni geološki zavod
- Petković K. 1975. *Geologija Srbije knj. IV – Tektonika*. Beograd: Univerzitet u Beogradu
- Petković K. 1977. *Tektonika*. Beograd: Zavod za regionalnu geologiju i paleontologiju Rudarsko-geološkog fakulteta
- Ragan M. D. 2009. *Structural Geology: An introduction to Geometrical Techniques*. Cambridge University Press

- Ramsay J. G., Lisle R. J. 2000. *The Techniques of Modern Structural Geology, Volume 3: Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology*. London: Academic Press
- Scheidegger A. E. 1963. *Principles of Geodynamics*. Springer
- Schmid S., Bernoulli D., Fügenschuh B., Matenco L., Schefer S., Schuster R., Tischler M., Ustaszewski K. 2008. The Alpine-Carpathian-Dinaride orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss Journal of Geosciences*, **101**: 139
- Spang J. H. 1974. Numerical dynamic analysis of calcite twin lamellae in the Greenport Center Syncline. *American Journal of Science*, **274**: 1044.
- Sperner B., Ratschbacher L., Ott R. 1993. Fault-Stress analysis: a Turbo Pascal program package for graphical presentation and reduced stress tensor calculation. *Comp & Geosci*, **19** (9): 1361.
- Sperner B., Zweigel P. 2010. A plea for more caution in fault-slip analysis. *Tectonophysics*, **482**: 29.
- Sychev S. N., Kulikova K. V. 2012. Structural Evolution of the Main Ural Fault Zone in the Western Framework of the Voikar-Synya Ophiolite Massif. *Geotectonics*, **46** (6): 427.
- Van der Pluijm B. A., Marshak S. 2004. *Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics*. New York: W. W. Norton & Company
- Vlajnić M., Vujinović A. 2011. Antimonitsko-cinabaritska mineralizacija Rebelske reke. U *Petničke sveske*, 69 (ur. B. Savić). Valjevo: Istraživačka stanica Petnica, str. 320-325.
- Wallace R.E. 1951. Geometry of shearing stress and relation to faulting. *Journal of Geology*, **59**: 118.
- Watt A. 1982. *Longman Illustrated Dictionary of Geology*. Longman

Andrija Avramović

Tectonic Assembly of Rebelj River Region

The interpretation of the tectonic composition in the of Rebelj river near Valjevo (western Serbia) has been done (Figure 1). The geological assembly of the investigated area is very complex. It is represented by Mesozoic age rocks (from T_2^2 to K_2^2). According to its regional geotectonic position the investigated area is located in the Vardar zone (Figure 2). The research was conducted during July and August 2013. The method of structural-tectonic analysis (Dimitrijević 1964) has been used. This method involved field observation, measurements and the determination of characteristics of two types of structural elements – stratification and faults, as well as statistical analysis and interpretation.

The structural analysis of stratification has been done through three phases: field observation of stratification, collection and measurement of stratification spatial orientation data, statistical analysis of collected data with determination of fold structures according to Dimitrijević (1964) and interpretation of joints assembly. The faults structural analysis included field observation and collecting spatial orientation data of fault plane and motion traces, statistical analysis of the collected by inverse stress analysis method Simple Shear Tensor Average (Spang 1974 and Sperner & Ratschbacher 1993) and the interpretation of faults characteristics and genesis.

Analysis of stratification indicated the presence of normal sloping fold (according to Dimitrijević 1978) with regional spreading, and with these characteristics: (1) fold limbs K₁ 179/46 (azimuth深深 angle) and K₂ 30/83 with a 58° range, (2) fold axis B 117/26, (3) axial surface of fold AP 198/73, (4) vergence angle 27° NE (Figure 11). Possible systems of joints were reconstructed by defining the positions of tectonic coordinate axes *a* 258/58, *b* 117/26 and *c* 17/18, and by the interpretation of morphological elements of folds (Figure 12). These joints systems are: (1) compression joints K 192/70, (2) longitudinal tension joints TL 79/32, (3) transverse tension joints TP 298/64, and (4) conjugate system of shear joints h0l₁ 142/28 and h0l₂ 46/54 (Figure 13). It was concluded, based on the orientation and geometrical relationship of morphological elements of fold and position of reconstructed joints system, that both – joints systems and fold, were formed under the effects of the same or generally the same tectonic deformation, in the same tectonic regime. The presence of the conjugated system of shear joints indicates that the stress which conducted the tectonic deformation of the investigated structures had a variable nature – from compression to tension. The main factor which caused these deformations were the tectonic processes of napping in the wider investigated area, which were generated after the completion of the final-phases of the Neothethys-ocean closure, at the end of the Mesozoic (Schmid *et al.* 2008).

The fault analysis showed the dominant orientation of the investigated faults as NNW-SSE. The movement observed on the fault planes was normal-left. The faults were classified as normal-left according to Dimitrijević (1978). The results of the inverse stress analysis defined the stress condition and orientation of the principal axes of manifested stress: (1) maximal stress axis σ₁ 102/68, (2) medium stress axis σ₂ 349/9 and (3) minimal stress axis σ₃ 256/20 (Figure 14). The R-factor value for the investigated faults is 0.49. The analysis of fault positions on the Mohr's circle plots showed that movement on the fault plane had dominant shear character, with the effect of the normal component of stress (Figure 15). Based on the R-factor value and the orientation of principal axis of stress, the tectonic regime in which these faults emerged was defined as strike-slip, with the dominant direction of compression NNW-SSE and tension ENE-WSW. The investigated faults were formed due to neotectonic processes of tensional deformation phases, as the result of movement and clockwise rotation of Adria micro-plate relative to Dinaric massive. These deformations had a dominant N-S to NE-SW direction of tension (Mladenović *et al.* 2014), which coincide with general tensional direction of investigated faults.

