

# Strukturno-tektonska analiza krednog kompleksa u zapadnim delovima Gledićkih planina (Vardarska zona, Srbija)

---

*Interpretacijom strukturnih podataka određene su karakteristike tektonskog sklopa krednog kompleksa zapadnih delova Gledićkih planina i objašnjen mehanizam oblikovanja proučavanih sedimenata. U istraživanju je korišćena metoda strukturno-tektonske analize terena, pomoću koje su interpretirane karakteristike osnovnih elemenata plikativnog i rupturnog sklopa istraživanog područja. Utvrđena je velika poremećenost sedimenata. Nabori u proučavanim sedimentima su kosi i zatvoreni, sa osama koje tonu ka jugozapadu. Nastali su u tektonskom režimu kompresije pravca SI-ZJZ do SI-JZ, koja je najverovatnije vezana za gornjokrednu kontinentalnu koliziju. Kredni sedimenti su, barem lokalno, pretrpeli ekstenzione deformacije. Nastanak normalnih raseda dogodio se u uslovima postkolizione ekstenzije regionalnog karaktera, pravca SI-JZ, sinhrono sa oligomiocenskim magmatizmom u Dinaridima i ekstenzionim kretanjima u Panonskom regionu. Pored jakih kompresionih deformacija, proučavani sedimenti su pretrpeli i transkurentne deformacije, koje su uticale na njihov finalni tektonski sklop. Transkurentni rasedi nastali su u tektonskom režimu sa kompresijom pravca SSI-JJZ i ekstenzijom pravca ZSZ-IJI, uslovljenog gornjomiocenskom kontinentalnom kolizijom i navlačenjem ka JZ.*

---

## Uvod

Gledićke planine predstavljaju geotektonski kompleksno područje, usled složenosti tektonskih deformacija koje su ih tokom geološke istorije oblikovale. Ovo istraživanje ima za cilj da pomoću strukturno-tektonske analize geoloških struktura, nastalih kao proizvod tih deformacija, njihove morfologije i kinematike postanka, interpretira tektonske karakteristike terena, mehanizam i genezu tektonskih procesa, koji su delovali u zapadnim delovima Gledićkih planina. Shodno tome, istraživanje je obuhvatilo terensko merenje, statističku analizu i interpretaciju nabornih i razlomnih elemenata sklopa uočenih u krednim kompleksima na istraživanom području.

---

*Andrija Avramović (1995), Kraljevo, Jelene Četković 7/16, učenik 4. razreda Gimnazije u Kraljevu*

*Nemanja Cvetković (1996), N. Beograd, Juriša Gagarina 275/76, učenik 3. razreda Devete gimnazije „Mihailo Petrović Alas” u Beogradu*

### MENTORI:

*dr Ana Mladenović, istraživač-saradnik Departmana za regionalnu geologiju Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu*

*Dušica Petrašinović, dipl. inž. geologije, profesor geološke grupe predmeta u Geološkoj i hidrometeorološkoj školi „Milutin Milanković” u Beogradu*

Područje istraživanja nalazi se u centralnoj Srbiji, na oko 170 km južno od Beograda i oko 10-20 km severoistočno od Kraljeva. Obuhvata zapadne delove Gledičkih planina. Geografski položaj područja prikazan je na slici 1.

Najranija istraživanja geoloških karakteristika područja izveli su Žujović (1893) i Cvijić (1909, 1925-26) (prema Marković *et al.* 1975). Gočanin (1934-1940) je istraživao mezozoik Gledičkih planina. Saradnici Geološkog instituta „Jovan Žujović” SAN (1958) izradili su detaljnu manuskriptnu kartu šire okoline Kraljeva, na kojoj interpretiraju osnove geološke građe područja. U periodu od 1955. do 1960. godine Zavod za geološka i geofizička istraživanja u Beogradu obavio je geološko kartiranje istraživanog područja, za potrebe izrade Osnovne geološke karte SFRJ 1:100000. Anđelković (1956) je proučavao litološki sastav i tektonski sklop krednih kompleksa Gledičkih planina. Predstavio je osnovni tektonski sklop, markirao postojanje izraženih plikativnih i rupturnih oblika, izdvojio najvažnije tipove litoloških članova područja i paleontološki dokumentovao njihovu starost. Mladenović i Petrović (2011) su izradili geofizički i strukturno-tektonski model čačansko-kraljevačkog basena, a u okviru istraživanog područja definisali postojanje neotektonski aktivnih ruptura pružanja ZJZ-ISI i S-J.

Geološka građa terena istraživanog područja je složena. Zastupljene su stene jurske, kredne, neogene i kvartarne starosti (Marković *et al.* 1975). Strukturna merenja za potrebe ovog rada izvršena su u sledećim litostratigrafskim jedinicama: (1) turon-senonski klastiti, peskoviti i laporoviti krečnjaci ( $K_2^{2,3}$ ), (2) alb-cenomanski peščari, peskoviti laporci i krečnjaci ( $K_{1,2}$ ), (3) krečnjaci apta i alba ( $K_1^{4+5}$ ), (4) barem-aptski peščarsko-glinoviti sedimenti ( $K_1^{3+4}$ ) i (5) valendin-otrivski karbonatno-peščarski sedimenti ( $K_1^{1+2}$ ).

Po svom regionalnom geotektonskom položaju područje istraživanja pripada Centralnoj i Istočnoj Vardarskoj zoni, što predstavlja osnovnu problematiku ovog područja (Dimitrijević 1995). Istočnu Vardarsku zonu na Gledičkim planinama izgrađuju flišni sedimenti valendin-otriva i barem-apta, zatim apt-albski krečnjaci i albski laporovito-peščarski sedimenti. Centralnoj Vardarskoj zoni pripadaju alb-cenomanski i turon-senonski sedimenti. Razmatrajući strukturu flišnih sedimenata Gledičkih planina, Dimitrijević (1995) pretpostavlja postojanje najmanje dve deformacione faze, koje on naziva fazama nabiranja: prva faza, vezana za regionalna kompresiona kretanja i druga faza, izazvana transkurentnim kretanjima. Sličnu interpretaciju sklopa područja daje i Anđelković (1956). Prema Markoviću *et al.* (1975) složenu tektoniku Gledičkih planina uslovio je njihov položaj neposredno uz Srpsko-makedonsku masu. Pregledna geološka karta sa prikazom litostratigrafske građe i osnovnih strukturnih oblika data je na slici 1.

Osnovne karakteristike sklopa su veće naborne strukture, koje usled kasnijeg reversnog kretanja prelaze u kraljušti. Zastupljeni sedimenti su izrazito poremećeni i ubrani, a slojevi često i prevrnuti, tako da se i na malom prostoru i pružanje i pad slojnih površi menjaju (Anđelković 1956).

Prvobitne strukture deformisane su longitudinalnim i mlađim transverzalnim rasedima, pri čemu rasedne zone konvergiraju od severa ka jugu (Marković *et al.* 1975). Anđelković (1956) smatra da su glavni pravci pružanja raseda i nabornih struktura dinarski, tj. SSZ-JJI i SZ-JI.

Plikativni (naborni) stuktorni oblici nastaju usled kontinuiranih plastičnih deformacija stenske mase, kao direktna posledica tektonskog oblikovanja (Fossen 2010). Ovi oblici su najbolji pokazatelji vrste, geometrije i kinematike strukturalnih deformacija koje su oblikovale proučavani teren (Antić 2010). Plikativni sklop u krednim sedimentima istraživanog područja odlikuje se nabornim strukturama, među kojima preovlađuju nabori većih razmera (Marković *et al.* 1975). Vergenca aksijalnih površi nabora orijentisana je ka ZJZ. Kod struktura nižeg reda i sekundarnih nabora zapajaju se i suprotne vergence. Usled izraženosti kasnijih deformacija i transkurentnih kretanja, samo jedan deo nabornih struktura je sačuvao svoj prvobitni oblik. Veći deo nabora je deformisan usled kasnijeg kretanja po longitudinalnim ili transverzalnim rasedima, što otežava razumevanje geneze sklopa.

Disjunktivni (razlomni) strukturalni oblici (rupture) nastaju prekidom kontinuiteta stenske mase tj. usled krtog loma stenske mase izazvanog dejstvom stresa (Fossen 2010). Oni su jedan od najboljih indikatora pravca, intenziteta i kinematike deformacija koje su delovale na neku stensku masu. Disjunktivni sklop područja karakteriše postojanje longitudinalnih dislokacija, od kojih većina ima karakter reversnih raseda i u tesnoj su vezi sa plikativnim oblicima (Marković *et al.* 1975). Kretanje po pomenutim rasedima je reversno, prema JZ. Dominantna dislokacija područja je ona duž koje je valentin-otrivski fliš navučen na barem-aptski fliš (Anđelković 1956). U okviru istraživanog područja uzdužne dislokacije dobijaju karakter reversnih rasednih zona, samo sa povremeno izraženim kraljuštima, sa čestom pojavom rasednih breča i glina.

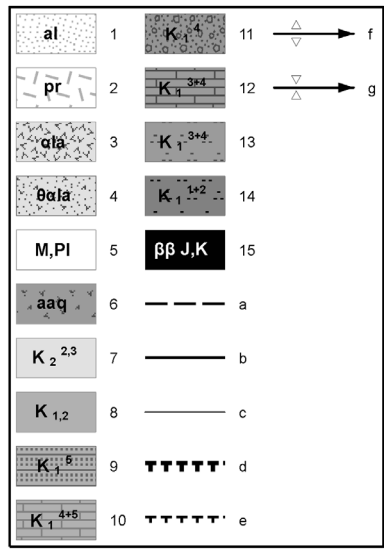
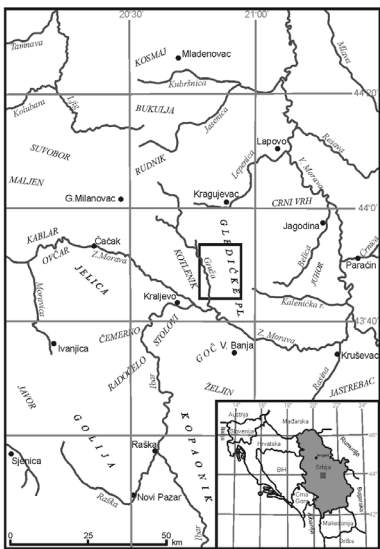
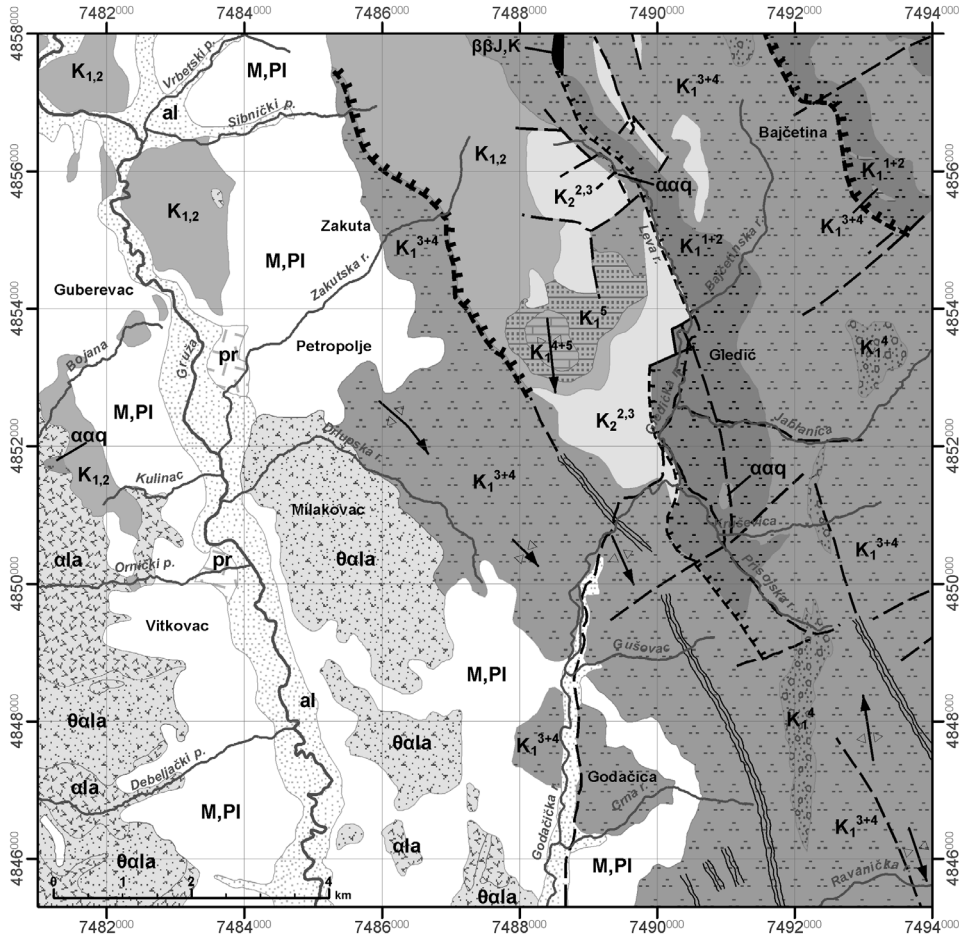
## Materijal i metode

Istraživanje je izvedeno tokom jula i avgusta 2014. godine standardnom metodom strukturalno-tektonske analize (Dimitrijević 1964). Određene su karakteristike strukturalnih oblika na terenu i izmereni njihovi elementi pada (azimut i padni ugao), urađena statistička analiza dobijenih podataka i izvršena strukturalna interpretacija (Dimitrijević 1978; Fossen 2010). Dobijeni rezultati poslužili su za objašnjenje sklopa proučavanog terena, određivanje njegovih tektonskih karakteristika i geodinamičkog razvoja.

Metodološki postupak strukturalne analize, primenjen u ovom radu, obuhvatio je strukturalnu analizu elemenata plikativnog sklopa i strukturalnu analizu elemenata disjunktivnog sklopa.

## Terensko prikupljanje podataka

Terensko prikupljanje strukturalnih podataka izvršeno je klasičnim metodama geološkog kartiranja iz oblasti strukturalno-geoloških istraživanja



Slika 1 (naspravna strana). Pregledna geološka karta istraživanog područja (prema OGK SFRJ K34-06 Kraljevo): 1 – aluvijum (al); 2 – proluvijum (pr); 3 – labradorski andeziti ( $\alpha$ la); 4 – piroklastiti labradorskih andezita ( $\theta\alpha$ la); 5 – klastiti, krečnjaci i gline panon-ponta (M, Pl); 6 – andeziti i daciti (aaq); 7 – turon-senonski klastiti, peskoviti i laporoviti krečnjaci ( $K_2^{2,3}$ ); 8 – alb-cenomanski peščari, peskoviti laporci i krečnjaci ( $K_{1,2}$ ); 9 – albski peščari, peskoviti laporci i laporci ( $K_1^5$ ); 10 – krečnjaci apta i alba ( $K_1^{4+5}$ ); 11 – aptski konglomerati i konglomeratični peščari ( $K_1^4$ ); 12 – barem-aptski krečnjaci ( $K_1^{3+4}$ ); 13 – barem-aptski peščarsko-glinoviti sedimenti ( $K_1^{3+4}$ ); 14 – valendin-otrivski karbonatno-peščarski sedimenti ( $K_1^{1+2}$ ); 15 – dijabazi ( $\beta\beta$ J,K); a – rased, pretpostavljeni; b – rased, sigurno utvrđen; c – rasedna zona; d – čelo navlake; e – kraljušt; f – osa antiklinale; g – osa sinklinale.

Figure 1 (opposite page). Overview geological map of investigated area (according to OGK /General Geologic Map/ SFRJ K34-06 Kraljevo): 1 – alluvium (al); 2 – proluvium (pr); 3 – labradorite-andesites ( $\alpha$ la); 4 – pyroclastics of labradorite-andesites ( $\theta\alpha$ la); 5 – Pannonian-Pontian clastics, limestones and clays (M, Pl); 6 – andesites and dacites (aaq); 7 – Turonian-Senonian clastics, sandy and marly limestones ( $K_{2,3}$ ); 8 – Albian-Cenomanian sandstones, sandy marls and limestones ( $K_{1,2}$ ); 9 – Albian sandstones, sandy marls and marls ( $K_{15}$ ); 10 – Aptian-Albian limestones ( $K_1^{4+5}$ ); 11 – Aptian conglomerates and conglomeratic sandstones ( $K_1^4$ ); 12 – Barremian-Aptian limestones ( $K_1^{3+4}$ ); 13 – Barremian-Aptian sandy-cleyey sediments ( $K_1^{3+4}$ ); 14 – Valanginian-Hauterivian carbonate-sandy sediments ( $K_1^{1+2}$ ); 15 – Diabases ( $\beta\beta$ J,K); a – fault, approximate; b – fault, certain; c – fault zone; d – nappe head; e – system of reverse faults; f – axis of anticline; g – axis of sincline.

(Dimitrijević 1964; Dimitrijević 1978; Coe *et al.* 2010). Određene su morfološke karakteristike strukturnih oblika, urađena njihova genetska klasifikacija i izmereni elementi pada (azimut i padni ugao) pojedinačnih oblika pomoću geološkog kompasa. Od plikativnih oblika, na terenu je uočena slojevitost, a od disjunktivnih pukotine i rasedi.

Mereni su elementi pada slojnih površi, genetskih sistema pukotina (kompresione, tenziona i klizna) i strukturnih elemenata raseda (rasedna površ i a-lineacija). Merenje je izvršeno na 110 otkrivenih izdanaka stenske mase i na taj način je prikupljeno 787 podataka o orijentaciji slojnih površi, 244 podatka o orijentaciji pukotinskih sistema i 12 podataka o orijentaciji rasednih površi i odgovarajućih a-lineacija raseda.

## Statistička analiza strukturnih podataka

Cilj statističke analize bio je utvrđivanje prostorne orijentacije, međusobnog odnosa i morfoloških karakteristika proučavanih strukturnih elemenata, izradom odgovarajućih strukturnih dijagrama.

Standardnim postupkom statističke analize slojevitosti (Dimitrijević 1964) izrađeni su konturni dijagrami slojevitosti. Podaci koji su uzeti za izradu konturnog dijagrama su elementi pada slojnih površi na terenu. Primjenjeni postupak je u određenim delovima modifikovan za korišćenje

računarskog softvera u statističkoj analizi. Modifikovani metodološki postupak izrade pomoću računarskog softvera predstavili su Banjac i Marović (1990).

Statističkom analizom pukotina, izvršenom po standardnom postupku (Dimitrijević 1964; Dimitrijević 1978), uz modifikacije Banjca i Marovića (1990), izrađeni su konturni dijagrami i rozete za svaku genetsku vrstu pukotina. Podaci koji su korišćeni za izradu dijagrama su elementi pada pukotina.

Analiza raseda izvršena je inverzijom stresa, koja predstavlja matematičko-statistički postupak rekonstrukcije tenzora stresa na osnovu merenih elemenata pada rasednih površi i odgovarajućih  $\alpha$ -lineacija na njima. Inverzijom stresa rekonstruiše se elipsoid deformacija odgovornih za nastanak proučavanih raseda, određivanjem orijentacije glavnih osa stresa  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  i  $\sigma_3$  i izračunavanjem linearnog odnosa njihovih magnituda ( $R$ ). Pri tome se stres smatra glavnim uzročnikom strukturnih deformacija (Blagojević i Trivić 1996). Metod inverzije korišćen u ovom radu je Simple Shear Tensor Average (Spang 1974; Delavux i Sperner 2003) koji radi po izloženim teorijskim principima Angeliera i Goguela (1979) i Angeliera (1989), kao i Blagojevića i Trivića (1996).

Statistička analiza podataka o slojevitosti i pukotinama urađena je pomoću računarskog programa SpheriStat v3.2 (1990-2010 Pangea Scientific, [www.pangeasci.com](http://www.pangeasci.com)). Analiza raseda je izvršena korišćenjem računarskog programa MyFault v1.05 (2005-2013, [www.pangeasci.com](http://www.pangeasci.com)). Postupak koji ovaj program primenjuje tokom analize dat je programskim kodom u Sperner *et al.* (1993).

## Interpretacija strukturnih podataka

Na osnovu statistički dobijenih konturnih dijagrama slojevitosti, standardnim postupkom (Dimitrijević 1964; Petrović 1991) koji analizira pravilnost raspodele podataka, izvršena je interpretacija nabornih struktura. Postupak se sastojao iz nekoliko faza: (1) određivanje maksimuma gustine slojnih površi na konturnom dijagramu, (2) izračunavanje položaja analognih krila nabora (Petrović 1991), (3) utvrđivanje položaja ose nabora, (4) određivanje položaja aksijalne površi i (5) određivanje smera i ugla vergence nabora. Ovim postupkom dobijeni su podaci o morfologiji i geometriji nabora, koji su kasnije poslužili za njegovu klasifikaciju i interpretaciju drugih konstruktivnih struktura. Opis i klasifikacija interpretiranih nabora izvršeni su prema Fleuty (1964) i Marshak i Mitra (1988). Primeenom ovog postupka dobijaju se osobine srednjeg ili statističkog nabora, koji generalno objašnjava ubranost proučavanih geoloških jedinica.

Određivanjem statističkih vrednosti orijentacije genetskih vrsta pukotina i njihovog dominantnog pravca pružanja, izvršena je interpretacija pukotinskih sistema. Kasnije su analitičkim postupkom Dimitrijevića (1978), koji je prikazao Petrović (1991) određeni položaji tektonskih osa  $a$ ,  $b$  i  $c$ , koje formiraju tektonski koordinatni sistem i predstavljaju koordinatne ose troosnog elipsoida deformacija (Fossen 2010). Interpretacija se

zasniva na hipotezi da kompresione pukotine nastaju u ravni upravnoj na tektonsku osu c, dok su tenziona upravna na tektonsku osu a. Tektonska osa b upravna je na dve prethodno utvrđene ose stresa (Ragan 2009; Dimitrijević 1978). Dobijeni položaji tektonskih osa realnih pukotinskih sistema mogu poslužiti kao reper za upoređivanje sa ostalim statističkim pukotinskim sistemima.

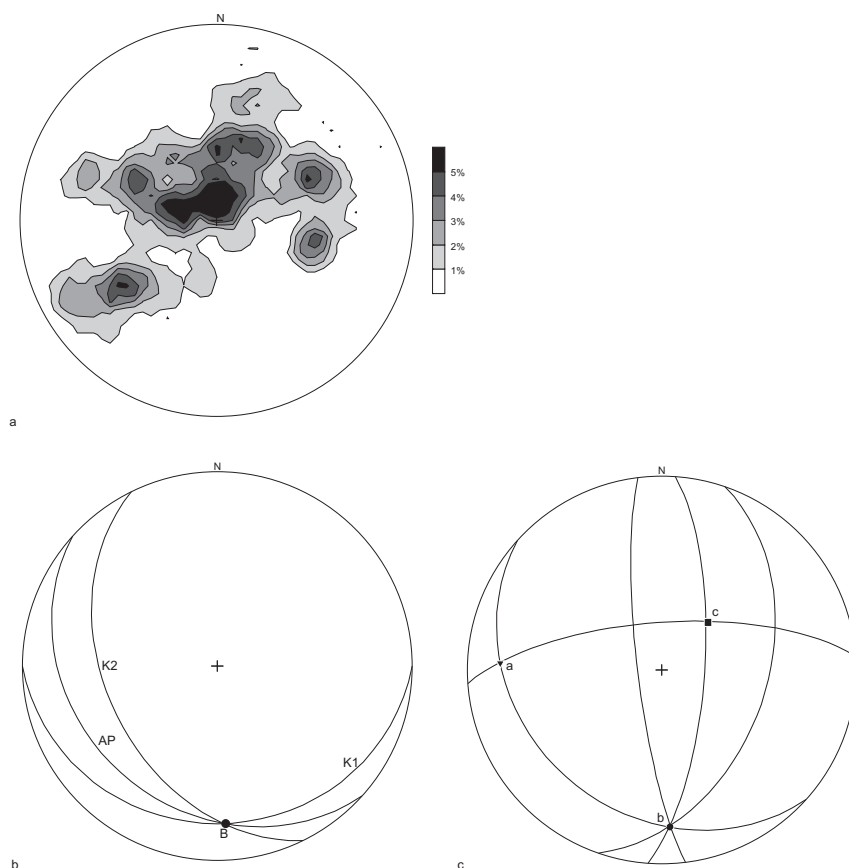
Pored interpretacije realnih (merenih) pukotinskih sistema, na osnovu rezultata statističke analize slojevitosti, istim analitičkim postupkom, izvršeno je određivanje položaja tektonskih osa i rekonstrukcija (teorijskih) pukotinskih sistema, čija je geneza vezana za naborne strukture. Tektonske ose određene su na osnovu pretpostavke da se u ubranim tektonskim sklopovima položaj ose nabora poklapa sa položajem tektonske ose b (Dimitrijević 1964). Na osnovu položaja ose b i njenog odnosa sa ostalim osama elipsoida deformacija, utvrđeni su položaji osa a i c. Rekonstrukcija (teorijskih) pukotinskih sistema izvedena je na osnovu poznatih položaja tektonskih osa, prema usvojenom mehanizmu deformacija (Dimitrijević 1978). Položaj kompresionih pukotina određuje se u ravni koju grade ose a i b. Tenziona longitudinalne pukotine nastaju u ravni osa b i c. Tenziona poprečne pukotine nalaze se u ravni tektonskih osa a i c. Sistem kliznih pukotina nastaje u ravni koja rotira oko ose b, a određene su na osnovu ugla koji zaklapaju sa osom b, koji kod takvih pukotina iznosi oko 30° (Sychev i Kulikova 2013; Dimitrijević 1964).

Krajnji rezultat interpretacije pukotinskog sklopa predstavljaju utvrđeni položaji i pružanje realnih (merenih) i rekonstruisanih (teorijskih) sistema pukotina, orijentacija njihovih tektonskih osa i njihov geometrijski odnos sa ostalim elementima sklopa. Rekonstruisani sistemi pukotina predstavljaju samo statističku sliku koja najviše odgovara primenjenom teorijskom modelu ubiranja i deformacija i daje generalnu interpretaciju pukotinskog sklopa proučavane geološke jedinice, koja može da se poredi sa realno merenim i interpretiranim pukotinskim sistemima.

Interpretacija rezultata analize raseda izvršena je grafički pomoću Šmitovih dijagrama i Morovih dijagrama. Strukturni elementi raseda (rasedna površ i a-lineacija) su na Šmitovoj mreži (Van der Pluijm i Marshak 2004) prikazani i interpretirani korišćenjem Anželijerovog metoda (Angelier i Goguel 1979; Angelier 2002). Morov krug stresa (Scheidegger 1963) iskorišćen je u cilju procene odnosa komponenti stresa koje su izazvale kretanje proučavanih raseda. Stanje stresa prikazano je na  $\sigma_n$ - $\tau$  dijagramu (normalni stres-stres smicanja), u skladu sa magnitudama glavnih osa stresa. Ona stanja stresa, za koja je odnos normalnog i stresa smicanja odgovarajući modelu rasedanja, uzimaju se kao odgovorna za nastanak raseda (Mohr 1928). Interpretacijom raseda, sagledavanjem orijentacije glavnih osa stresa i njihovog linearnog odnosa, rekonstruisan je elipsoid deformacija. Na taj način definisani su parametri stresa koji je izazvao nastanak proučavanih raseda u krednim sedimentima istraživanog područja.

## Rezultati i diskusija

Strukturalni oblici uočeni su i proučavani u pet litostratigrafskih jedinica krednih sedimenata Gledičkih planina: (1) valendin-otrivski karbonatno-peščarski sedimenti ( $K_1^{1+2}$ ), (2) barem-aptski peščarsko-glinoviti sedimenti ( $K_1^{3+4}$ ), (3) krečnjaci apta i alba ( $K_1^{4+5}$ ), (4) alb-cenomanski peščari, peskoviti laporci i krečnjaci ( $K_{1,2}$ ) i (5) turon-senonski klastiti, peskoviti i laporoviti krečnjaci ( $K_2^{2,3}$ ) (Marković *et al.* 1975). Zbog međusobne strukturne konkordantnosti litostratigrafskih jedinica, rezultati istraživanja prikazani su integrisano, za celo istraživano područje. Ovo je najbolje odgovaralo realnoj tektonskoj slici na terenu i omogućava pregledan prikaz i interpretaciju rezultata.



Slika 2. Strukturni dijagrami dobijeni statističkom analizom slojevitosti: a – konturni dijagram slojevitosti, b – statistički nabor rekonstruisan na osnovu merenih slojevitosti, c – dijagram tektonskih osa i rekonstruisanih sistema pukotina statističkog nabora

Figure 2. Structural diagrams as result of statistical analysis of bedding: a – contour diagram of bedding, b – statistical fold reconstructed by measure of beddings orientation, c – diagram of tectonic axes and reconstructed joint systems of statistical fold



Statističkom analizom orijentacije slojnih površi uočenih u krednim sedimentima izrađen je konturni dijagram (slika 2a). Na dijagramu se izdvajaju maksimum i submaksimum gustine prostorne orijentacije slojevitosti. Maksimum gustine u severnom delu dijagrama markira krilo nabora K1 koje pada ka jugu. Najizraženiji submaksimum u severoistočnom kvadrantu markira krilo nabora K2 koje pada ka jugozapadu. Osa nabora tone ka jugoistoku. Aksijalna površ nabora blago tone ka jugozapadu, sa severoistočnom vergencom (slika 2b).

Interpretacijom geometrijskih karakteristika (tabela 1) statističkog nabora može se reći da su nabori zastupljeni u proučavanim sedimentima zatvoreni i kosi sa osama koje blago tonu ka jugoistoku. Krila nabora su raspona oko 40°. Nabori imaju severoistočne vergence. Ovakve naborne strukture najbolje su izražene u flišnim tvorevinama istraživanog područja.

Tabela 1. Statističke vrednosti morfoloških elemenata nabora

Morfološki elementi nabora	Vrednosti (°)
Krilo nabora K1	180/20
Krilo nabora K2	244/42
Aksijalna površ (AP)	222/27
Osa nabora (B)	177/20
Vergenca nabora ( $\varphi$ )	63 SI
Raspon krila nabora ( $\beta$ )	40

Određeni su položaji tektonskih koordinatnih osa na osnovu utvrđenih elemenata statističkog nabora (tabela 2). Tektonska osa a nalazi se u severozapadnom kvadrantu dijagrama. Osa b nalazi se u jugoistočnom kvadrantu, dok se tektonska osa c nalazi u severoistočnom kvadrantu dijagrama (slika 2c). Statistički rekonstruisani sistemi pukotina su: kompresione pukotine, tenzione poprečne pukotine, tenzione longitudinalne pukotine i sistem kliznih pukotina (tabela 2).

Tabela 2. Statističke vrednosti elemenata pada tektonskih osa i rekonstruisanih pukotinskih sistema (°)

Tektonske ose	a	272/18
	b	177/20
	c	44/62
Rekonstruisani pukotinski sistemi	Kompresione	222/27
	Tenzione poprečne	356/70
	Tenzione longitudinalne	94/72
	Klizne	263/80 i 109/45

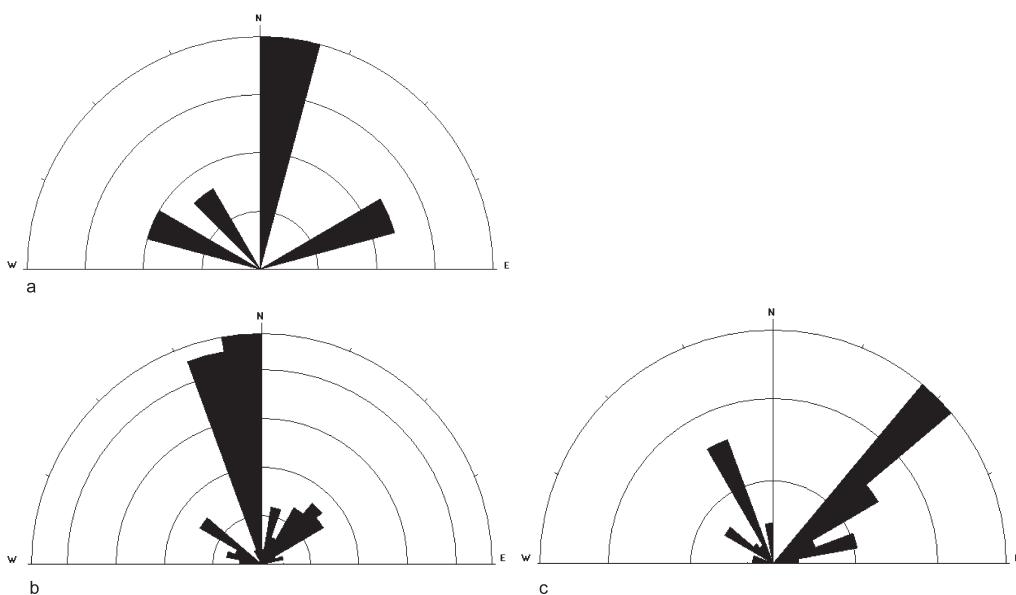
Na osnovu položaja tektonskih osa i osobina nabora može se zaključiti da su ovi nabori nastali usled regionalne kompresije koja je imala pravac

ISI-ZJZ do SI-JZ. Ovakva geneza nabora se može uzeti kao reprezentativna za celokupno istraživano područje.

Pretpostavlja se da su takva kompresiona kretanja nastala usled kontinentalne kolizije nakon finalnog zatvaranja Vardarskog okeana (Schmid *et al.* 2008), i koja se prema Zeliću *et al.* (2010) i Robertsonu i Karamati (1994) na ovom području dogodila tokom gornje krede. Ovakav geodinamički mehanizam je najverovatnije imao glavnu ulogu u deformaciji proučavanih krednih sedimenata. Sagledavajući regionalni sklop Vardarske zone, nije isključena mogućnost da su ovi nabori barem inicijalno obrazovani usled nekih od starijih kompresionih deformacija ovog područja (Zelić *et al.* 2010). Takođe, veliko rasipanje gustina položaja slojevitosti na dijagramu ukazuje da su proučavani nabori pretrpeli i sekundarno ubiranje, ali nema dovoljno merenih podataka da bi se ono kvantitativno objasnilo.

Potvrđena je velika poremećenost i ubranost krednih sedimenata na terenu istraživanog područja, naročito u kontanku različitih litostratigrafskih jedinica, što ide u prilog izraženim kompresionim deformacijama.

Statističkom analizom orijentacije merenih pukotina utvrđeno je prisustvo tri genetska sistema pukotina: kompresione, tenzione i klizne pukotine (tabela 3). Kompresione pukotine imaju dominantno pružanje S-J (slika 3a). Tenzione pukotine javljaju se u dva sistema. Dominantno pružanje tenzionih longitudinalnih pukotina je SSZ-JJI, a tenzionih poprečnih SI-JZ (slika 3b). Klizne pukotine imaju pružanje SSZ-JJI i SI-JZ (slika 3c).



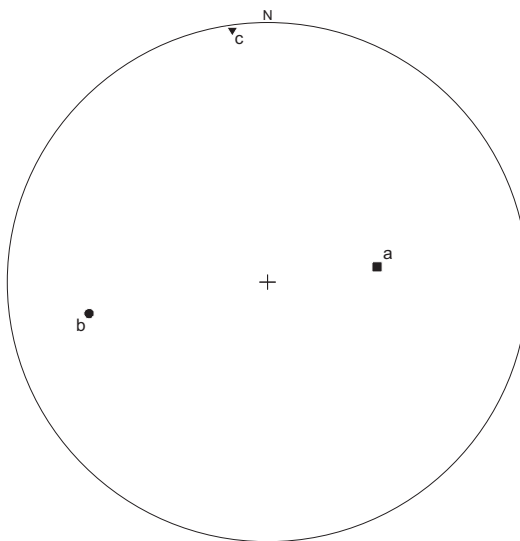
Slika 3. Strukturni dijagrami pukotinskih sistema krednih sedimenata: a – rozeta pružanja kompresionih pukotina; b – rozeta pružanja tenzionih pukotina; c – rozeta pružanja pukotina smicanja

Figure 3. Structural diagrams of joints system in Cretaceous sediments: a – roset of compressional joints; b – roset of tensional joints; c – roset of strike-slip joints

Tabela 3. Statističke vrednosti elemenata pada merenih pukotinskih sistema i tektonskih osa dobijenih iz pukotinskih sistema (°)

Pukotinski sistemi	Kompresione	95/61
	Tenzione poprečne	265/31
	Tenzione longitudinalne	79/54
	Klizne	42/63 i 60/68
Tektonske ose	a	82/55
	b	260/31
	c	352/3

Na osnovu merenih položaja tenzionih pukotina, rekonstruisan je položaj tektonske ose a u severoistočnom kvadrantu, a ose b u jugozapadnom kvadrantu. Položaj ose c rekonstruisan je u severozapadnom kvadrantu dijagama (tabela 3, slika 4).

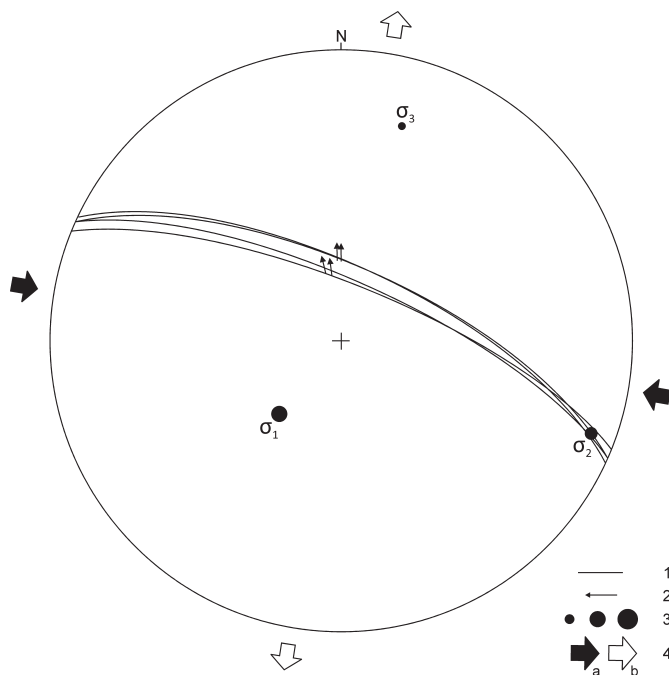


Slika 4.  
Dijagram položaja tektonskih osa a, b i c, rekonstruisanih na osnovu merenih tenzionih pukotina

Figure 4.  
Diagrams of tectonic axes a, b and c based on measure of orientation of tensional joints

Razlika u položaju tektonskih osa dobijenih iz pukotinskih sistema i položaja tektonskih osa rekonstruisanih na osnovu nabornih struktura (slika 3c i slika 4) ukazuje da su proučavani sedimenti pored kompresionih deformacija pretrpeli i kasnije transkurentne deformacije, koje su u značajnoj meri uticale na njihov tektonski sklop.

Proučavanjem rasednih struktura u krednim sedimentima utvrđeno je prisustvo i urađena statistička analiza za dva raseda. Rased 1 ima dominantno pružanje ZSZ-IJI. Kretanje po rasedu bilo je normalno-levo sa rasednom površi strmog pada 60-80° (Dimitrijević 1978). Inverzijom stresa određene su orijentacije glavnih osa stresa ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  i  $\sigma_3$ ) i definisani uslovi stresa tokom rasedanja (tabela 4). Koeficijent elipsoida deformacija iznosi 0.5. Dominantni pravac kompresije je ZSZ-IJI, a tenzije SSI-JJZ (slika 5).



Slika 5.  
Rezultati stres analize  
raseda 1:  
1 – rasedna površ  
2 – a-lineacija  
3 – ose stresa  
4a – kompresija  
4b – tenzija

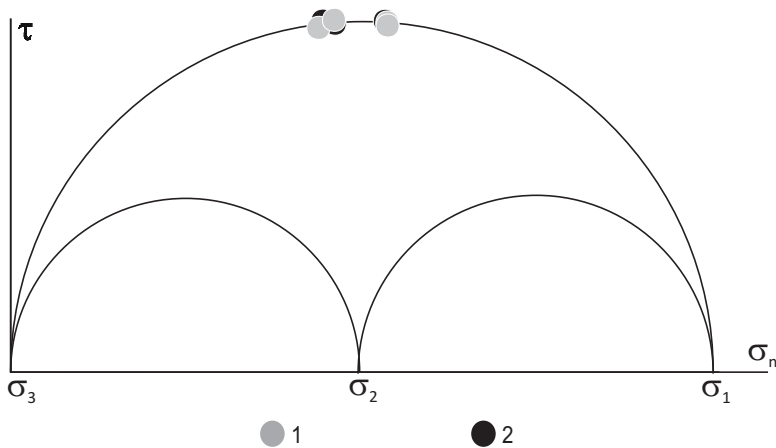
Figure 5.  
Results of stress  
analysis of fault 1:  
1 – fault plane  
2 – a-lineation  
3 – stress axis  
4a – compression  
4b – tension

Tabela 4. Glavne ose stresa za rased 1 i rased 2

Osa stresa	Elementi pada (°)	
	Rased 1	Rased 2
$\sigma_1$	241/75	15/45
$\sigma_2$	111/10	161/40
$\sigma_3$	19/11	267/18

Analizom položaja raseda na Morovim krugovima stresa, na osnovu odnosa normalne i smičuće komponente stresa utvrđeno je da je kretanje po rasedu imalo dominantno normalni karakter, sa malim uticajem smičuće komponente stresa (slika 6).

Ovakvi normalni rasedi nastali su u tektonskim uslovima ekstenzije pravca SI-JZ. Ovakva ekstenzija je po svom geodinamičkom mehanizmu verovatno imala postkolizioni karakter (Zelić *et al.* 2010) i bila je sinhrona sa oligomiocenskim magmatizmom u Dinaridima (Cvetković *et al.* 2007; Marović *et al.* 2007) i početnim ekstenzionim kretanjima u Panonskom regionu. Ovakvu sliku potvrđuju Mladenović *et al.* (2015), koji ističu važan uticaj magmatskih procesa u Dinaridima na razvoj ekstenzionih deformacija. Pri tome, ukazuju da je ekstenzija koja je deformisala proučavane tvorevine Vardarske zone morala imati regionalni karakter i da predstavlja uzrok izlivanja miocenskih magmatskih tvorevina. Robertson *et al.* (2013) smatra da su indikatori postojanja ekstenzionih deformacija u Vardarskoj zoni regionalno zastupljeni. Ovim istraživanjem oni su pronađeni samo u

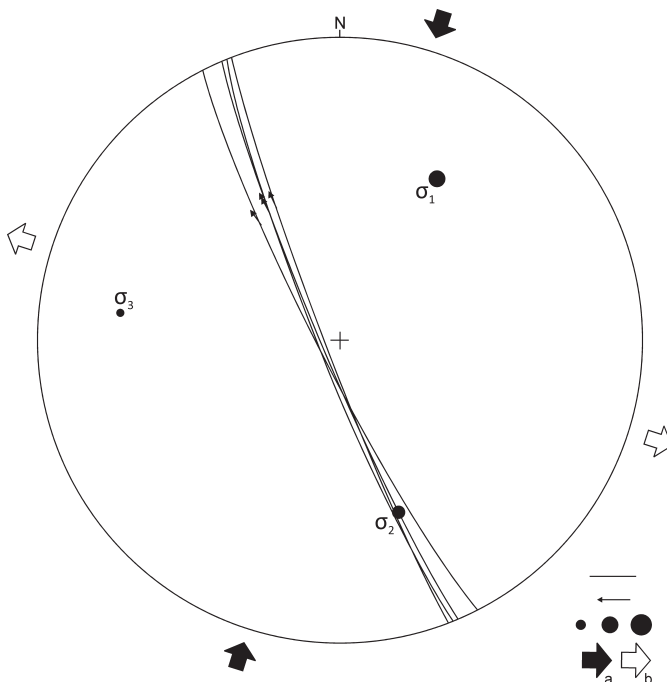


Slika 6.  
 Morov krug stresa  
 raseda 1:  
 1 – rešeni stres  
 2 – maksimalni stres

Figure 6.  
 Mohr's circle plot of  
 fault 1:  
 1 – resolved stress  
 2 – maximum stress

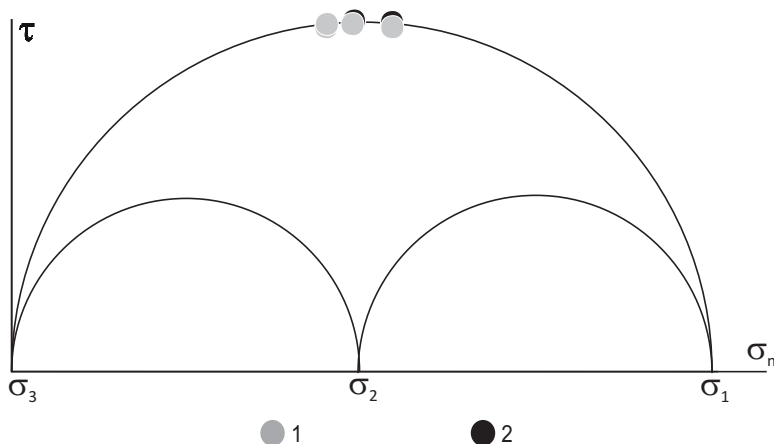
manjoj meri, zbog specifičnosti litostratigrafske građe područja (prisustvo flišnih tvorevina). U svakom slučaju, njihovo postojanje ukazuje da su kredni sedimenti Gledičkih planina morali, u izvesnoj meri, da pretrpe ekstenzione deformacije, barem na lokalnom nivou.

Rased 2 ima pružanje SZ-JI. Kretanje po rasedu bilo je transkurentno-desno sa rasednom površi subvertikalnog pada od 80-90° (Dimitrijević 1978). Inverznom analizom stresa određene su orijentacije glavnih osa stresa i definisani uslovi stresa tokom rasedanja. Koeficijent elipsoida deformacija za ovaj rased iznosi 0.5 (tabela 4). Dominantni pravac kompresije je SSI-JJZ, a tenzije ISI-ZSZ (slika 7).



Slika 7.  
 Rezultati stres analize  
 raseda 2:  
 1 – rasedna površ  
 2 – a-lineacija  
 3 – ose stresa  
 4a – kompresija  
 4b – tenzija

Figure 7.  
 Results of stress  
 analysis of fault 2:  
 1 – fault plane  
 2 – a-lineation  
 3 – stress axis  
 4a – compression  
 4b – tension



Slika 8.  
Mohr's circle plot of fault 2:  
1 – rešeni stres;  
2 – maksimalni stres.

Figure 8.  
Mohr's circle plot of fault 2:  
1 – resolved stress;  
2 – maximum stress.

Analizom položaja raseda na Morovim krugovima stresa, na osnovu odnosa normalne i smičuće komponente stresa utvrđeno je da je kretanje po rasedu imalo normalni karakter, sa jakim uticajem smičuće komponente stresa (slika 8).

Ovakvi transkurentni rasedi nastali su u uslovima tektonskog režima kompresije pravca SSI-JJZ i ekstenzije ZSZ-IJI. Postojanje ovakvih raseda (kao i razlika u položaju tektonskih osa rekonstruisanih iz nabornih struktura i iz merenih pukotinskih sistema) ukazuje da su transkurentne deformacije krednih sedimenata u značajnoj meri uticale na njihov finalni tektonski sklop. Ovakva tektonska slika se može objasniti dodatnim navlačenjem i kontinentalnom kolizijom ka JJZ, koja se prema Iliću i Neubaueru (2005) dogodila tokom gornjeg miocena.

## Zaključak

Interpretacijom tektonskog sklopa krednih sedimenata zapadnih delova Gledičkih planina potvrđena je velika poremećenost i ubranost sedimenata na ovom području. Proučavani nabori obrazovani su u tektonskom režimu kompresije pravca ISI-ZJZ do SI-JZ. Takva kretanja nastala su usled kontinentalne kolizije nakon finalnog zatvaranja Vardarskog okeana tokom gornje krede. Ovakav geodinamički mehanizam imao je značajnu ulogu u deformaciji proučavanih sedimenata. Pronađeni su indikatori sekundarnog nabiranja proučavanih nabora, ali nije bilo dovoljno podataka za njihovu kvantitativnu analizu. Takođe, nije isključena mogućnost da su proučavani nabori početno formirani u uslovima neke od starijih kompresionih faza, uočenih u regionalnom sklopu Vardarske zone.

Elementi disjunktivnog sklopa veoma su zastupljeni u istraživanim sedimentima, naročito u vidu pukotinskih sistema. Mereni i rekonstruisani položaji tetktonskih osa pukotinskih sistema ukazali su na činjenicu da su proučavani sedimenti, pored kompresionih deformacija pretrpeli i transkurentne deformacije, koje su u određenoj meri uticale na njihov tektonski sklop, i znatno otežale strukturnu interpretaciju ovog područja.

Usled specifičnosti litostratigrafske građe proučavanih sedimenata, rasedne strukture uočene su u manjoj meri, što je dalo mogućnost samo za opštu analizu stresa i mehanizma rasedanja. Normalni rasedi nastali su u uslovima regionalne ekstenzije pravca SI-JZ, koja je po svom geodinamičkom mehanizmu imala postkolizioni karakter i bila sinhrona sa oligomiocenskim magmatizmom u Dinaridima i početkom ekstenzije u Panonskom regionu. Indikatori ekstenzije rasprostranjeni su u celom regionalnom sklopu Vardarske zone. U okviru istraživanog područja oni su pronađeni u manjoj meri, ali njihovo opšte prisustvo ukazuje da su kredni sedimenti Gledičkih planina morali da pretrpe deformacije ekstenziona prirode, barem na lokalnom nivou. Transkurentni rasedi obrazovani su u transkurentnom tektonskom režimu, sa pravcom kompresije SSI-JJZ i ekstenzije ZSZ-IJI. Ovaj tektonski režim nastao je u uslovima dodatnog navlačenja i kontinentalne kolizije ka JJZ, tokom gornjeg miocena. Transkurentne deformacije, nastale ovim mehanizmom, su u značajnoj meri uticale na finalni tektonski sklop područja, i doprinele složenosti njegove interpretacije i uklapanja u regionalnu tektonsku građu Vardarske zone.

Na osnovu dobijenih rezultata objašnjena je geohronološka evolucija i geodinamički mehanizam strukturnog oblikovanja krednih sedimenata u zapadnim delovima Gledičkih planina. Buduća istraživanja bi trebalo posvetiti detaljnijem i širem terenskom proučavanju plikativnih, a naročito rupturnih oblika pojedinačnih jedinica Gledičkih planina, njihovoj međusobnoj komparativnoj analizi radi dobijanja preciznije geodinamičke slike sklopa područja.

**Zahvalnost.** Autori upućuju veliku zahvalnost mentorima, istraživaču-saradniku dr Ani Mladenović i Dušici Petrašinović, dipl. inž. geologije, na mnogobrojnim savetima i sugestijama datim za vreme izvođenja istraživanja, kao i korisnim uputstvima tokom same izrade rada. Takođe se zahvaljuju Radisavu Goluboviću, dipl. inž. geologije, na logističkoj pomoći za izvođenje istraživanja. Dr Marinku Toljiću, dipl. inž. geologije, zahvaljujemo se na korisnim komentarima, sugestijama i idejama, datim tokom pisanja ovog rada.

---

## Literatura

Andelković M. 1956. Geološki sastav i tektonika Gledičkih planina. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, **24**: 31-184.

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 choice 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**: 173-179.
- Blagojević B., Trivić B. 1996. Determinacija paleostres tenzora primenom inverznog metoda. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, **60**: 159-168.
- Coe A., Argles T., Rothery D., Spicer R. 2010. *Geological Field Techniques*. Milton Keynes: Blackwell
- Cvetković V., Prelević D., Downes H., Jovanović M., Vaselli O., Pecskey Z. 2004. Origin and geodynamic significance of Tertiary postcollisional basaltic magmatism in Serbia (central Balkan Peninsula). *Lithos*, **73**: 161.
- Delavux D., Sperner B. 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. *Geological Society London – Special Publications*, **212**: 75-100
- Dimitrijević M. 1964. *Strukturna geologija – skripta*. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet
- Dimitrijević M. 1978. *Geološko kartiranje*. Beograd: ICS
- Dimitrijević M. 1995. *Geologija Jugoslavije*. Beograd: Geoinstitut
- Dimitrijević M. N., Dimitrijević D. M. 1987. The paraflysch of the central Vardar subzone. U *The Turbidite basins of Serbia* (ur. M. D. Dimitrijević i M. N. Dimitrijević). Beograd: Department of natural and mathematical sciences of Serbian Academy of Sciences and Arts, str. 79-100.
- Fléuty M. J. 1964. The description of folds. *Proceedings of the Geologists' Association*, **75**: 461.
- Fossen H. 2010. *Structural Geology*. London: Cambridge University Press
- Ilić A., Neubauer F. 2005. Tertiary to recent oblique convergence and wrenching of the Central Dinarides: Constraints from a paleostress study. *Tectonophysics*, **410**: 465.
- Marković B., Urošević M., Pavlović Z., Terzin V., Jovanović Ž., Karović J., Vujišić T., Antonijević R., Malešević M., Rakić M.



1975. *Tumač za list Kraljevo K34-6 OGK SFRJ*. Beograd: Savezni geološki zavod
- Marović M., Đoković I., Toljić M., Milivojević J., Spahić B. 2007. Paleogene-Early Miocene deformations of Bukulja-Venčac crystalline (Vardar zone, Serbia). *Geološki anali Balkanskoga poluostrva*, 68: 9-20
- Marshak S., Mitra G. 1988. *Basic Methods of Structural Geology*. New York: Prentice Hall
- McClay K. 1987. *Mapping of Geological Structures*. New York: Wiley
- Mladenović A., Petrović D. 2011. Stress Condition Determination Based on Focal Mechanism Data: A Case Study on Kraljevo Earthquake. *6th Congress of Balkan Geophysical Society, Budapest, Proceedings*. Electronic edition (available through EAGE EarthDoc)
- Mladenović A., Trivić B., Cvetković V. 2015. How tectonics controlled post-collisional magmatism within the Dinarides: Inferences based on study of tectono-magmatic events in the Kopaonik Mts. (Southern Serbia). *Tectonophysics*, **646**: 36.
- Mohr O. 1928. *Abhandlungen aus dem gebiete der technischen mechanik*. Berlin: W. Ernst & Sohn
- Petrović B. 1991. *Strukturna geologija – praktikum*. Beograd: LMGK RGF
- Ragan M. D. 2009. *Structural Geology: An introduction to Geometrical Techniques*. Cambridge University Press
- Robertson A.H.F., Karamata S. 1994. The role of subduction-accretion processes in the tectonic evolution of the Mesozoic Tethys in Serbia. *Tectonophysics*, **234**: 73.
- Robertson A.H.F., Trivić B., Đerić N., Bucur I.L. 2013. Tectonic development of the Vardar ocean and its margins: Evidence from Republic of Macedonia and Greek Macedonia. *Tectonophysics*, **595-596**: 25.
- Scheidegger A.E. 1963. *Principles of Geodynamics*. Berlin: Springer-Verlag
- 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.
- 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
- Zelić M., Levi N., Malasoma A., Marroni M., Pandolfi L., Trivić B. 2010. Alpine tectono-metamorphic history of the continental units from Vardar Zone: the example of Kopaonik Metamorphic Complex (Dinaric-Hellenic Belt, Serbia). *Journal of Geology*, **45** (1): 59.
- Zelić M., Marroni M., Pandolfi L., Trivić B. 2010. Tectonic setting of the Vardar suture zone (Dinaric-Hellenic belt): the example of the Kopaonik area (southern Serbia). *Ofioliti*, **35** (1): 49.

---

*Andrija Avramović and Nemanja Cvetković*

## Structural Analasys of Cretaceous Complex in the Western Part of Gledić Mts. (Vardar Zone, Serbia)

By interpretation of structural data, we determined the basic characteristics of the tectonic composition of Cretaceous complexes in the western parts of Gledić Mts. (Central Serbia). The geological assembly of the investigated area is very complex. It is represented by Jurassic, Cretaceous, Neogene and Quaternary age rocks. According to its regional geotectonic position investigated area is located in the Vardar zone (Figure 1). The research was conducted during July and August 2014. We used the method of structural-tectonic analysis. This method involved field observations and determinations of brittle and ductile structural forms, its statistical analysis and interpretation.

Based on the results of structural analysis we concluded that the investigated sediments were strongly folded and disturbed. The folds in Cretaceous sediments were inclined and closed, with axes gently plunging to the SW (Figure 2). They were formed in the compressional tectonic regime with ENE-WSW compression direction, due to Upper Cretaceous continental collision, after final closure of the Vardar Ocean. This geodynamical mechanism had the most important role in the deformation of investigated sediments. Indicators of secondary folding were found, but there was an insufficient data amount to process their analysis. There is also a possibility that the investigated folds were initially formed due to some older compres-

sional phases, observed in the regional tectonic composition of the Vardar zone.

Disjunctive structure elements are present in large quantity in the investigated sediments, especially as joint systems (Figure 3). Measured and reconstructed positions of tectonic coordinate axes indicated that sediments, except compressional deformations, endured transform deformations, which influenced their tectonic composition to some extent (Figure 3, 4).

Due to specific lithological and stratigraphic structure of sediments, we observed faults in a small extent. Normal faults were formed in a tectonic regime with NE-SW extension direction (Figure 5, 6). By its geodynamical mechanism, the extension was regional, post-collisional and synchronous with magmatism of Oligocene and Miocene in Dinarides and extensional processes in the Pannonian region. Thus, Cretaceous sediments of Gledić Mts., at least locally, suffered extensional deformations. Indicators of extension are regionally present in the Vardar zone, but during this research they are observed in a smaller scale.

We found that transform faults were formed in strike-slip conditions of NNE-SSW compression and WNW-ESE extension (Figure 7, 8). Their tectonic mechanism is associated to additional movement and thrusting to the SW in Upper Miocene. Transform deformations, originated by this geodynamic mechanism, had a big significance in final forming of the tectonic composition of terrain in investigated area.

According to presented results and tectonic composition interpretations, the geochronological evolution of Cretaceous sediments in the western parts of Gledić Mountains was presented and mechanisms of structural deformations that occurred in investigated area have been explained.

