

Određivanje litofacijesa na temelju graničnih vrijednosti u kartiranju indikatorskim krigingom, primjer donjopontskog ležišta, Savska depresija

K. Novak Zelenika

IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Kartiranje litofacijesa je vrlo važan postupak, posebno prilikom opisa ležišta jer omogućava uvid u okoliše taloženja te oblike i granice ležišnih tijela. Tehnika indikatorskog kriginga se najčešće koristi za kartiranje litofacijesa. Temelji se na indikatorski transformiranim podacima, a prikazuje postojanje ili odsutnost određenog litofacijesa. Indikatorska transformacija ulazne podatke pretvara u vrijednosti 0 i 1, na temelju graničnih vrijednosti. U vrijeme ranog ponta turbiditi su predstavljali najznačajniji transportni mehanizam u hrvatskom dijelu Panonskoga bazenskoga sustava. Transportirani detritus uglavnom potječe iz Istočnih Alpi. Bio je nekoliko puta pretaložavan dok konačno nije bio istaložen u Savskoj depresiji. Kao posljedica dugog transporta, u Savsku je depresiju mogao doći samo srednjoznati i sitnozrnati pijesak te silt (Tb do Td intervali iz Boumine sekvencije). U mirnim razdobljima, kada turbiditne struje nisu bile aktivne, taložio se tipični dubljevodni sediment, kasnije litificiran u lapor. Prikazana je analiza podataka iz jezgara i karotaznih mjerenja u gornjomiocenskim ležištima polja Kloštar, a u svrhu definiranja graničnih vrijednosti za opis različitih litofacijesa. Pravim odabirom graničnih vrijednosti moguće je na kartama vjerojatnosti, dobivenim indikatorskim krigingom uočiti taložni kanal i smjer donosa materijala.

Ključne riječi: litofacijesi, turbiditi, indikatorski kriging, gornji miocen, Savska depresija, Hrvatska

1. UVOD

Razdoblje kasnog panona i ranog ponta pripada drugoj transtenzijskoj fazi¹⁰, kada zbog termalne subsidencije dolazi do ponovnog otvaranja mnogih depresija u cijelom Panonskom bazenskom sustavu, stvarajući prostor pogodan za taloženje velike količine pješčanog materijala. U to vrijeme dolazi do taloženja glavnih pješčenjačkih ležišta ugljikovodika.¹⁷

U vrijeme ekstenzije Panonskog bazenskog sustava prostori pogodni za sedimentaciju u Hrvatskoj su bili rubni dijelovi Medvednice, Papuka, Psunja te dublji dijelovi Savske, Dravske, Slavonsko-Srijemske i Murske depresije.^{9,18} No, još uvijek se točno ne zna kolika je površina te na kojim planinama današnje Sjeverne Hrvatske bila izdignuta kao kopno te davala materijal za sedimentaciju. Najviše, poput Medvednice i Papuka zasigurno su bili otoci, no i dalje ostaje otvoreno pitanje jesu li one niže, poput Moslavačke gore ili Krndije bili otoci ili tek podvodna uzdignuća, posebno u vrijeme najjače ekstenzije. U vrijeme kasnog panona i ranog ponta turbiditi su bili dominantni transportni mehanizam klastita u hrvatskom dijelu Panonskog bazenskog sustava, npr.^{14,15,18} Iako postoje hipoteze o tome kako su lokane planine, koje su bile izdignute iznad razine jezera u vrijeme ranog ponta dale određenu količinu materijala, dokazano je da glavnina istaloženog detritusa potječe iz Istočnih Alpi. Taj materijal je najprije bio istaložen u Bečkom bazenu, a nakon toga, turbiditnim strujama nekoliko puta pretaložen prije samog ulaska u Savsku depresiju (slika 1). U vrijeme

kasnog panona Savskom depresijom su dominirali relativno dugački i malobrojni, tektonski otvoreni, taložni kanali¹⁹, koji su predstavljali mjesta taloženja pješčanog detritusa. No u ranom pontu događali su se dodatni pokreti (recimo jača aktivacija strike-slipova) i reaktivacija rasjeda. Međutim, glavni smjer turbiditnih struja u kasnom panonu i ranom pontu bio je sjeverozapad-jugoistok²⁰, a najjače taloženje u najdubljim dijelovima depresije rezultiralo je tamo i najvećim debljinama materijala. Nadalje, zbog dugog transporta turbiditnim strujama (iz Istočnih Alpi) logično je za zaključiti kako je samo srednjo i sitnozrnati pijesak i silt (Tb do Td litofacijes) mogao biti transportiran u Savsku depresiju. U mirnim razdobljima, kada turbiditne struje nisu bile aktivne, taložio se tipični dubokovodni sediment, kalcitom bogati mulj, koji je kasnije prešao u lapor.

Litostratigrafski, sedimenti donjeg ponta (7,1-6,3 mil. god., vremenska skala prema⁴) u Savskoj depresiji (slika 2) predstavljeni su izmjenom pješčenjaka i lapora, no osim čistih kanalskih pješčenjaka i bazenskih lapora javljaju se i svi prijelazni oblici poput laporovitog pješčenjaka i pjeskovitog lapora. Prilikom opisa ležišta ugljikovodika upravo je kartiranje litofacijesa važan postupak, koji pruža uvid u vrstu i granice taložnih okoliša, ali i oblike i granice ležišta. Upravo se tehnika indikatorskog kriginga najčešće koristi u kartiranju litofacijesa. Osnova joj je indikatorska transformacija ulaznih podataka u vrijednosti 0 ili 1, a na temelju različitih graničnih vrijednosti.¹² Dobivene karte

prikazuju vjerojatnosti da je kartirana varijabla manja od određene granične vrijednosti, a pravilnim određivanjem graničnih vrijednosti moguće je na kartama uočiti taložni kanal ili smjer donosa materijala, a neizravno, recimo iz vrijednosti poroznosti, zaključiti i o izmjenama litofacijesa.

2. OSNOVE KARTIRANJA INDIKATORSKIM KRIGINGOM

Osnove indikatorskog kriginja jako su dobro opisane u radovima.^{2,3,5,6,8,12} Koristi se za izradu karata sa samo dvije vrijednosti, tzv. "two type map", tj. za binarno kartiranje gdje je uvjetna vjerojatnost procijenjena tako da se kartirana varijabla može opisati s jednom od dvije moguće vrijednosti.^{3,8,16} Osnova indikatorskog kriginja je indikatorska transformacija, što znači da se mjerene vrijednosti transformiraju u indikatorske (na temelju graničnih vrijednosti, engl. cut-off) te postaju varijable 0 i 1. Indikatorska varijabla će na svakoj mjerenoj lokaciji biti izračunata na temelju granične vrijednosti za neku geološku varijablu (npr. poroznost) izrazom:

$$I(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z(x) \leq v_{\text{cutoff}} \\ 0 & \text{if } Z(x) > v_{\text{cutoff}} \end{cases} \quad (1)$$

gdje su:

- $I(x)$ - indikatorska varijabla
 $Z(x)$ - mjerena vrijednost
 v_{cutoff} - granična vrijednost

Karte dobivene indikatorskim kriginjom su karte vjerojatnosti, a prikazuju vjerojatnosti da je vrijednost kartirane varijable manja (ili veća) od granične vrijednosti određene za tu varijablu kao važnu za njezinu interpretaciju. Na primjer, indikatorske karte prikazuju vjerojatnosti da je debljina manja od 100 m, poroznost manja od 19% ili neki drugi sličan podatak.

3. DEFINIRANJE LITOFACIJESA NA TEMELJU OPISA JEZGARA

Pregled jezgara omogućio je definiranje nekoliko ležišnih litofacijesa. Ukupno je pregledano 13 jezgara u kojima je utvrđen vrlo sličan mineralni sastav u gornjopanonskim i donjopontskim ležištima. Jedina razlika bila je u tome što gornjopanonska ležišta sadrže više tinjaca (posebno muskovita), a u donjopontskim ležištima utvrđen je neizmijenjeni biotit, koji nije prisutan u gornjopanonskim sedimentima. Kloritizirani biotit prisutan je i u gornjopanonskim i u donjopontskim pješčenjacima. Nadalje, samo su dvije bušotine imale podatke dobivene iz jezgara i karotažnih dijagrama za isti interval jednoga donjopontskoga ležišta. Stoga je određivanje litofacijesa uključivalo i elemente subjektivnosti temeljene na iskustvu. Pješčenjakom je nazvan onaj litofacijes u kojem je dominirao srednjo i sitnozrnati pješčani materijal. Dominantno sitnozrnati materijal definirao je silt ili siltitni (moguće i laporoviti) pješčenjak. Jezgre čistih lapora nisu pronađene. Neke od pregledanih jezgara s litološkom odredbom prikazane su slikom 3.

4. ULAZNI PODATCI ZA KARTIRANJE INDIKATORSKIM KRIGINGOM

Ulazni podatci za kartiranje indikatorskim kriginjom bile su srednje poroznosti donjopontskog ležišta, dobivene karotažnim mjerenjem iz 20 bušotina (tablica 1). Budući da su sve bušotine korištene u kartiranju načinjene prije više desetaka godina, bile su dostupne samo krivulje konvencionalne karotaže te iz nje izračunate srednje poroznosti. U dvije bušotine bilo je moguće usporediti vrijednosti poroznosti dobivene iz jezgara i karotažnih mjerenja (tablica 1). Prostorno promatrano, vrijednosti srednje poroznosti ovise o smještaju bušotine u različitim litofacijesima nastalim u gornjomiocenskom taložnom okolišu, a numerički su iznosile između 5,5 i 23,3 % (tablica 1).

Tablica 1. Ulazni bušotinski podatci (iz¹⁰)

Bušotina	Ležište	Srednja poroznost izračunata iz karotaže (%)	Srednja poroznost izračunata iz jezgre (%)
Bušotina 1	Donjopontsko ležište	23,3	15,8
Bušotina 2		22,0	21,2
Bušotina 3		19,9	
Bušotina 4		19,5	
Bušotina 5		19,6	
Bušotina 6		21,1	
Bušotina 7		20,5	
Bušotina 8		20,1	
Bušotina 9		21,2	
Bušotina 10		17,9	
Bušotina 11		19,2	
Bušotina 12		13,8	
Bušotina 13		5,5	
Bušotina 14		19,7	
Bušotina 15		18,2	
Bušotina 16		21,8	
Bušotina 17		18,1	
Bušotina 18		18,5	
Bušotina 19		19,6	
Bušotina 20		18,4	

5. ODREĐIVANJE GRANIČNIH VRIJEDNOSTI

Prema radu¹² pravilan odabir graničnih vrijednosti jako je bitan prilikom kartiranja indikatorskim kriginjom. Odabirom prevelikog broja graničnih vrijednosti vrijeme potrebno za proračun se drastično povećava, no s odabirom premalog broja prilikom kartiranja mogu se izgubiti neki vrlo važni detalji distribucije. Preporučeni broj graničnih vrijednosti za ovaj tip ležišta i broj ulaznih podataka je 5-11.

U mnogim statističkim analizama, posebno u geostatističkom kartiranju, npr.^{3,7}, normalna distribucija je matematička osnova za pravilno korištenje deskriptivne statistike, koja uključuje varijancu, aritmetičku sredinu, mod, medijan itd. Variogram, kao osnova kartiranja krigingom, ovisi o varijanci, što bi značilo da je normalna distribucija uvjet reprezentativnosti variograma, što i jeste kod većine tehnika kriginga. Zato mnogim geostatističkim metodama prvi korak u modeliranju i kartiranju predstavlja normalna transformacija ulaznih podataka. U radu¹³ prikazano je da je najbolji način definiranja graničnih vrijednosti grupiranje podataka u nekoliko razreda, koji će slijediti normalnu distribuciju. Slika 4 predstavlja normalno distribuirane razrede poroznosti u ovoj analizi. Granice poroznosti tih razreda su kasnije uporabljene kao granične vrijednosti za indikatorsku transformaciju ulaznih podataka dobivenih iz donjopontskog ležišta.

6. DEFINIRANJE LITOFACIJESA NA TEMELJU GRANIČNIH VRIJEDNOSTI

Empirijsko iskustvo je pokazalo da pješčenjaci u ovakvom tipu ležišta imaju poroznost između 15 i 25%. Budući da je riječ o ležištu ugljikovodika, njegov najveći dio nalazi se u pješčenjacima. Odabrane bušotine ravnomjerno su raspoređene po ležištu te je većina karotažnih mjerenja napravljena u pješčenjacima. No

Tablica 2. Ulazni bušotinski podatci koji definiraju Bouma sekvenciju te min. i maks. graničnu vrijednost				
Bušotina	Ležište	Srednja poroznost izračunata iz karotaže (%)	Prepoznati interval Boumine sekvencije	Granične vrijednosti za kartiranje indikatorskim krigingom (naznačene su minimalna i maksimalna vrijednost)
Bušotina 1	Donjopontsko ležište	23,3		Maksimum
Bušotina 2		22,0		
Bušotina 3		19,9		
Bušotina 4		19,5		
Bušotina 5		19,6		
Bušotina 6		21,1		
Bušotina 7		20,5		
Bušotina 8		20,1		
Bušotina 9		21,2		
Bušotina 10		17,9		
Bušotina 11		19,2		
Bušotina 12		13,8	Tc	Minimum
Bušotina 13		5,5	Te	
Bušotina 14		19,7		
Bušotina 15		18,2		
Bušotina 16		21,8		
Bušotina 17		18,1		
Bušotina 18		18,5		
Bušotina 19		19,6		
Bušotina 20		18,4		

ipak, u jednoj je bušotini izmjerena prilično mala vrijednost poroznosti (5,5%). Takva niska vrijednost upućuje na lapore, ili odnosno na Te interval Bouma sekvencije. U jednoj bušotini izmjerena poroznost iznosi 13,8%, te ona predstavlja dio taložnog okoliša s izmjenom lapora, pjeskovitih lapora i laporovitih pješčenjaka, tj. Tc Bouma sekvencu. Budući da postoji samo jedno mjerenje u Tc i jedno u Te intervalu, a to mjerenje iz Te intervala ne predstavlja najvišu vrijednost poroznosti u laporima (što je također zaključeno na temelju iskustva), ono ne može predstavljati granicu između Te i Td litofacijesa. Dakle, nije bilo moguće odrediti granice intervala Te i Td ili Tc i Td. Stoga je odlučeno kartirati samo Tc i Tb intervale s ciljem pronalaska granice između njih. Bušotina s minimalnom vrijednošću je zbog navedenoga isključena iz variogramске analize i kartiranja.¹² Preostala najniža i najviša vrijednost poroznosti (13,8% i 23,3%; tablica 2) odredile su minimalnu i maksimalnu graničnu vrijednost za indikatorsko kartiranje.

7. KARTIRANJE INDIKATORSKIM KRIGINGOM

Karte indikatorskog kriginga daju vjerojatnosti da je kartirana varijabla manja od određene granične vrijednosti. To znači da karta vjerojatnosti za poroznost manju od 19% u sebi sadrži i vjerojatnost za poroznost manju i od 18%. Puno bolji opis litofacijesa mogao bi se postići kartiranjem intervala 18-19% poroznosti, međutim isti se rezultat može dobiti preklapanjem dviju karata (jedne koja pokazuje vjerojatnost da je kartirana varijabla manja od 18% i druge, koja pokazuje vjerojatnost da je kartirana varijabla manja od 19%). Područja najnižih vjerojatnosti za poroznost manju od 18% te područja najviših vjerojatnosti za poroznost manju od 19% upravo predstavljaju područje intervala poroznosti 18-19%.

Smjer sjeverozapad-jugoistok može se uočiti na karti vjerojatnosti za graničnu vrijednost 19% (slika 5). Plavom bojom na karti su prikazana područja najvećih vjerojatnosti da je poroznost veća od 19%, tj. na temelju iskustva to su područja čistih pješčenjaka. Smjer sjeverozapad-jugoistok također je smjer regionalnog normalnog rasjeda koji na jugozapadu zatvara ležište. Slika 5 (vjerojatnost za vrijednosti poroznosti manje od 20%) pokazuje najveću vjerojatnost pojave najviših poroznosti u strukturno najdubljem dijelu ležišta. Ipak, detaljnijim promatranjem karata za graničnu vrijednost 19 i 20% (slika 5), moguće je rekonstruirati smjer donosa materijala. Taložni kanal smjera sjeverozapad-jugoistok također se može uočiti na slici 5 za graničnu vrijednost 19%, no ukoliko se granična vrijednost poveća samo za 1%, taložni kanal se više ne može vidjeti. Ipak, povećane vrijednosti poroznosti mogu se jako dobro vidjeti na zapadnom dijelu ležišta. Budući da je taložni kanal najjasnije izražen na karti vjerojatnosti poroznosti manje od 19%, može se pretpostaviti da upravo ta vrijednost predstavlja granicu između Tc i Tb sekvenci.

8. ZAKLJUČAK

U vrijeme kasnog panona i ranog pontu u hrvatskom dijelu Panonskog bazenskog sustava prevladavala je

druga transtenzijska faza. Manja spuštenu, često i rasjednuta, područja unutar Savske depresije predstavljale su pogodna mjesta za nakupljanje sedimenata. Detritus, donasan turbiditima iz Istočnih Alpi bio je nekoliko puta pretaložavan, dok konačno nije došao do Savske depresije. Zbog dugog transporta (nekoliko stotina kilometara), turbiditi sadrže nepotpunu Bouma sekvencu (Tb-Td).

Iako normalna distribucija nije uvjet za indikatorsko kartiranje, definiranje razreda na način da oni otprilike prate normalnu distribuciju, može biti vrlo korisno, što je ovdje i načinjeno. Na taj je način moguće izračunati deskriptivnu statistiku ulaznih podataka te poboljšati interpretaciju indikatorskih karata. Interpretacija poroznosti na karti vjerojatnosti poroznosti manje od 19% u donjopontskom ležištu je pokazala da je najkrupniji materijal u ovom dijelu Savske depresije uglavnom došao sa sjevera (kao što je interpretirano u²⁰). Dio tog materijala taložen je u lokalnim sinklinalama. U vrijeme ranog ponta bio je donesen do regionalnog rasjeda, gdje se istaložio dio srednjozrnatog materijala, dok je drugi dio transportiran paralelno s rasjedom u smjeru jugoistoka.

Kartama indikatorskog kriginga dokazana je heterogenost ležišta na temelju postojanja različitih litofacijesa od čistih pješčenjaka u središnjem dijelu kanala, preko laporovitih pješčenjaka, pjeskovitih lapora do čistih lapora. Bolje su određene i granice dijelova ležišta veće i manje poroznosti. Indikatorske karte su također pokazale vjerojatnost pojave određenog litofacijesa na nekoj lokaciji. Vrlo je važno pokušati kartirati određenu graničnu vrijednost koja predstavlja granicu između različitih litofacijesa. Na taj je način moguće na kartama uočiti taložni kanal i smjer donosa materijala. U kartiranom području, opisnom ovim radom, granicu između Tc i Tb Bouma sekvenci vjerojatno predstavlja vrijednost od 19% poroznosti.



Autor:

Kristina Novak Zelenika, INA-Industrija nafte d.d., SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina, Sektor za geologiju i upravljanje ležištima, Šubićeveva 29, 10000 Zagreb, e-mail: kristina.novakzelenika@ina.hr

UDK : 550.8 : 553.28 : 551.4 (497.5)

550.8	geološka istraživanja
553.28	vrste ležišta, osobine ležišta
551.4	kartografija, kriging
(497.5)	R Hrvatska, Savska depresija