

Kartiranje gornjomiocenskih pješčenjačkih facijesa metodom indikatorskog kriginga

K. Novak Zelenika, T. Malvić i J. Geiger

PRETHODNO PRIOPĆENJE

Kartiranje facijesa bitan je zadatak u modeliranju ležišta nafte i plina. Vrsta facijesa izravno utječe na vrijednosti poroznosti i propusnosti, svojstva koja podržavaju migraciju i nakupljanje ugljikovodika. U hrvatskom dijelu Panonskog bazena najveći dio ležišta izgrađen je od različitih vrsta gornjopanonskih i donjopontskih pješčenjaka. Različite vrste tih pješčenjaka nastale su kao rezultat taložnih okoliša turbidita, povremeno aktivnih u relativno mirnom, dubljem (uglavnom do 200 m) brakičnom jezerskom okolišu, uz taloženje lapora na bazenskoj ravnici. Pješčenjačka tijela izdužena su pravcem SZ-JI, s ostrim prijelazom prema krovinskim i podinskim bazenskim laporima. S druge strane, bočni prijelaz je postupan, a započinje s čistim srednjoznastim pješčenjacima, prema sitnozrnastim pješčenjacima ili siltovima, laporovitim pješčenjacima, pjeskovitim laporima i konačno bazenskim laporima. Takva bočna promjena litofacijesa analizirana je u polju Kloštar, u najvećem pješčenjačkom naftnom ležištu „T“, donjopontske starosti. Ulazni podatci bili su dostupni u 19 bušotina gdje su postojala najnovija karotažna mjerenja i račun srednje poroznosti ležišta. Uz načinjenih 6 dodatnih virtualnih bušotina, za koje su vrijednosti procijenjene na temelju interpolacije u programu Surfer™, raspolagalo se s pouzdanim ulaznim skupom podataka. Litofacijesi su analizirani karotažnim dijagramima, kartama poroznosti te konačno, indikatorskim variogramima i facijesnim kartama indikatorskog kriginga. Promjene vrijednosti poroznosti i njihove vjerojatnosti jasno su uočene na kartama indikatorskog kriginga, a također se mogu korelirati s taložnim okolišom u lokacijama odabranih bušotina. Ovo je prvi put da je primijenjena metoda indikatorskog kriginga u pješčenjačkim ležištima ugljikovodika u Hrvatskoj, a rezultati su potvrdili da je ova interpolacijska tehnika prikladna i korisna u kartiranju facijesa na temelju dubinskih podataka.

Ključne riječi: facijes, pješčenjak, lapor, indikatorski variogram, indikatorski kriging, gornji miocen, Savska depresija, Hrvatska

1. UVOD

Kartiranje gornjomiocenskih litofacijesa u hrvatskom dijelu Panonskoga bazena danas je još uvijek jedan od najvažnijih smjerova istraživanja u hrvatskoj geologiji nafte i plina.

Tim se postupkom dobiva uvid kako u sedimentacijske okoliše, tako i u oblike i granice ležišta ugljikovodika. Nemoguće je prikazati sve varijacije facijesa na jednoj karti, ali to je ujedno razlog zašto je razvijeno nekoliko metoda za njihovo kartiranje. Jedna od najpoznatijih temelji se na uspoređivanju oblika krivulja spontanog potencijala (SP) i krivulja otpora (R) što je u hrvatskoj literaturi prikazano npr. u radovima.^{12, 13, 14, 15, 16, 17}

Ipak, postoji i drukčiji način prepoznavanja litofacijesa na temelju dubinskih podataka. Kada su dostupne kvantitativne interpretacije poroznosti preko karotažnih dijagrama mogu se povezati određeni intervali poroznosti s jednim litofacijesom, što znači da bi se kartiranjem tih intervala moglo kartirati bočno prostiranje određenog litofacijesa. Nažalost, u takvim slučajevima postoji i velika nesigurnost. S jedne strane, proračun efektivne poroznosti iz karotažnih dijagrama sam po sebi je postupak koji uključuje aproksimacije. Ponekad pitanje nije „kolika je poroznost na određenoj lokaciji“, nego „kolika je vjerojatnost da se vrijednost poroznosti na toj lokaciji nalazi u određenom intervalu“ ili „koja je vjerojatnost da je poroznost veća ili manja od određene granične vrijednosti“. No, s druge strane, jako dugo nije postojala uobičajena metoda koja bi se

uvriježila kao standardni način kartiranja lateralne distribucije intervala poroznosti.

Kontinuiranim razvojem geostatistike, kasnih osamdesetih godina prošlog stoljeća, razvijena je posebna metoda kriginga, nazvana indikatorski kriging (skr. IK).^{5, 7} Primijenili su je mnogi autori^{2, 3, 4, 7} upravo za rješavanje niza ranije opisanih problema. Kasnije je nekoliko autora primijenilo ovu metodu na vrlo širokom spektru spomenutih slučajeva, uključujući kartiranje tipova tla² i facijesa⁸ kao kategoričkih varijabli, procjenjujući geološke atribute s velikim brojem ekstremnih vrijednosti,⁹ ili kartiranjem proizvodnih podataka iz ležišta ugljikovodika.⁶ Primjena u praksi omogućila je nastanak nekoliko profesionalnih priručnika, kako bi se izložila primjenjivost metode te prikazala teorijska osnova indkatorskog kriginga. U ovom radu sažeta su ključna pitanja koja se tiču primjene te metode s ciljem prikazivanja mogućnosti kartiranja litofacijesa, koristeći podatke o poroznosti, dobivene interpretacijom karotažnih dijagrama. Kao primjereno područje za analizu izabrano je područje starijeg naftnog polja Kloštar, smještenog na rubu Savske depresije.

2. ANALIZIRANO PODRUČJE

Najveći broj ležišta ugljikovodika na JZ rubu Panonskog bazenskog sustava (tj. unutar Savske, Dravske, Slavonsko-Srijemske i Murske depresije) nalazi se u pješčenjacima starosti gornjeg panona i donjeg pont

(gornji miocen). Njihovi sedimentološki modeli dobro su poznati.^{10,12,14,16,17} Većina tih pješčenjaka nastala je kao rezultat periodičke aktivnosti turbiditnih struja u mirnom, brakičnom, jezerskom okolišu, gdje su se veći dio vremena u geološkoj prošlosti taložili hemipelagički lapori.

Gornjomiocenski turbiditni pješčenjaci taloženi su u strukturnim depresijama koje su se nalazile između regionalnih rasjeda s izrazitim pomakom po pružanju (tzv. „pull-ašart“ bazenima). Kasnije su, zbog inverzije, uslijed djelovanja transpresije kao posljedice orijentacije osi najvećeg horizontalnog naprezanja uglavnom u smjeru sjevera, to postala strukturna uzdignuća (antiklinale). Krajem pliocena i u kvartaru, a vrlo vjerojatno već i u gornjem miocenu započinje migracija ugljikovodika u te zamke.

Sedimentacija u manjim strukturnim depresijama jako je utjecala na raspodjelu facijesa, kao i na granice ležišta. Rasjedne plohe često su ujedno i granice između turbiditnih pješčenjaka i bazenskih lapora, jer su mutne struje taložile pješčenjake periodično, s laporima u krovini i podini. Bočne granice facijesa nisu oštre, nego postoji široka prijelazna zona prema bazenskoj ravnici, predstavljena od (u središnjem dijelu podvodnog kanala) srednjozrnastih do sitnozrnastih pješčenjaka, laporovitih pješčenjaka, pjeskovitih lapora i naposljetku lapora. Granulometrijski sastav pješčenjaka također se mijenja u smjeru paleotransporta turbiditnih struja,¹⁰ od srednjozrnastih do sitnozrnastih pješčenjaka.

Polje Kloštar nalazi se 35 km istočno od Zagreba, na zapadnim padinama Moslavačke gore. Nadmorska visina iznosi od 110 do 180 m (slika 1).

Geološki se polje nalazi u Savskoj depresiji. Ležišne stijene su miocenske ili paleozojske starosti. Postoji pet litostratigrafskih jedinica koje sadrže naftu i plin, s ukupno dvadeset ležišta. Pješčenjačka ležišta svrstana su u tri jedinice. Najstarija je nazvana 'prevalencijenezijjskim slojevima' (donji panon) i sadrži jednu leću pješčenjaka. Ležišta u '2. pješčenjačkoj seriji' i '1. pješčenjačkoj seriji' (donji pont) imaju veće bočno prostiranje i sadrže glavninu rezervi ugljikovodika.

3. SKUP PODATAKA

Ulazni podatci bili su vrijednosti poroznosti, raspoređene na 25 lokacija u polju Kloštar. Predstavljaju prosječne vrijednosti u pješčenjačkim naftonosnicima '1. serije' donjopontske starosti.

U analiziranom ležištu vrijednosti poroznosti variraju između 13,8 i 23,3%. Pretpostavljeno je da najmanja vrijednost predstavlja laporoviti pješčenjak, kao prijelazni facijes prema bazenskom laporu. Najveća vrijednost izmjerena je u čistom pješčenjaku, taloženom u najdubljem i središnjem dijelu taložnog kanala. Naravno, prosječna vrijednost poroznosti iz bušotinskih podataka jako ovisi o položaju u taložnom paleookolišu, što se može jasno prepoznati na dijagramima koji pripadaju bušotinama s gorespomenutim „ekstremnim“ vrijednostima na slikama 1 i 2.

4. INDIKATORSKI KRIGING (IK)

Kratak pregled indikatorskog formalizma i tehnike indikatorskog krigena temelji se na radovima.^{3,4, 5, 6, 7}

4.1. Indikatorski formalizam i neke posljedice

Jedan od najčešćih načina za odredbu facijesa, u područjima bez jezgara, je upotreba graničnih vrijednosti poroznosti. Točnije, ako se pojedinačni facijes odredi vrijednošću varijable v_{cutoff} te ako se postojanje ili odsutnost facijesa označi vrijednostima 1 i 0, može se odrediti indikatorska varijabla (slika 3) na sljedeći način:

$$I(x) = \begin{cases} 1 & \text{ako } z(x) \leq v_{cutoff} \\ 0 & \text{ako } z(x) > v_{cutoff} \end{cases} \quad (4.1)$$

gdje su:

$I(x)$ indikatorska varijabla;
 $z(x)$ mjerena vrijednost;
 v_{cutoff} granična vrijednost.

Pretpostavimo da se umjesto jedne granične vrijednosti v_{cutoff} na skup podataka primjeni l graničnih vrijednosti, tako da:

$$I(x, v_i) = \begin{cases} 1 & \text{ako } z(x) \leq v_{i \text{ cutoff}} \\ 0 & \text{ako } z(x) > v_{i \text{ cutoff}} \end{cases} \quad (4.2)$$

Gdje je $z(x)$ vrijednost regionalizirane varijable kao što je poroznost na lokaciji x .

Zato su izvorni podatci transformirani u l novih vrijednosti, od kojih svaka poprima vrijednosti od 0 ili 1. Važno je uočiti da se postavljanjem v_i kao granične vrijednosti prvenstveno dobiva slika o učestalosti iznad ili ispod odabrane granične vrijednosti. To se može prikazati na način da vjerojatnost poroznosti $z(x)$ ispod granične vrijednosti v_i unutar područja A odgovara

$$P(A; z) = \frac{1}{A} \int_A I(x, v_i) dx \quad (4.3)$$

Ako je poznata $P(A, v)$, može se izračunati vjerojatnost bušotina s vrijednosti poroznosti iznad granične vrijednosti v_i :

$$P(z(x) > v_i) = 1 - P(A, v) \quad (4.4)$$

Vjerojatnost se može procijeniti izravno iz n promatranih vrijednosti $z(x)$:

$$P^*(A, v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(v_i) I(x_k, v_i) \quad (4.5)$$

gdje su λ_i ($i=1, 2, \dots, n$) n težinskih koeficijenata, izračunatih krigenom kroz niz proračuna rezidualnih indikatorskih podataka $[I(x_k, v) - F^*(z)]$.⁷ U prethodnom izrazu $F^*(z)$ je nepristrana procjena učestalosti, $F(z)$:

$$F(z) = E\{P(A, v)\} \quad (4.6)$$

Jedna od najvažnijih posljedica gore prikazanog izvoda je opisivanje indikatorskog formalizma za kontinuirane varijable kao alata za izravnu procjenu razdiobe nesigurnosti u područjima bez mjerenih podataka. Tako

se i globalna funkcija distribucije vjerojatnosti ulaznih podataka može procijeniti pomoću niza graničnih vrijednosti.

4.2. Kratak pregled metode indikatorskog kriginga (IK)

Kada podatci nisu prostorno grupirani, može se načiniti procjena $F^*(z)$ iz histograma svih dostupnih podataka. Primjenom procjene jednostavnim krigingom koristi se izraz za rezidual $[P^*(A, v_l) - F^*(v_l)]$ da bi se dobilo sljedeće:

$$P^*(A, v_l) - F^*(v_l) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(v_l) [i(x_i, v_l) - F^*(v_l)] \quad (4.7)$$

gdje je $\lambda_i(v_l)$ k -ti težinski koeficijent za graničnu vrijednost v_l .

Treba primijetiti da je procjena jednostavnim krigingom različita od procjene običnim krigingom jer nije nužno da zbroj svih težinskih koeficijenata bude jednak jedinici. Sustav jednadžbi jednostavnog kriginga može se prikazati kao:

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k(v_l) \gamma_i(x_i - x_m; v_l) = \bar{\gamma}(x_k, x_{k+h}; v_l), k = 1, 2, K, n \quad (4.8)$$

U gornjoj jednadžbi $\gamma_i(x_i - x_m; v_l)$ predstavlja vrijednosti indikatorskog semivariograma na udaljenosti $x_i - x_m$ za graničnu vrijednost v_l , dok izraz $\bar{\gamma}(x_k, x_{k+h}; v_l)$ predstavlja srednju vrijednost indikatorskog semivariograma između lokacija x_k i x_{k+h} za graničnu vrijednost v_l .

Takav postupak indikatorskog kriginga se ponavlja za svaku l -tu graničnu vrijednost, koja diskretizira interval varijabilnosti kontinuirane varijable z . Distribucija nesigurnosti dobivena iz l procjena indikatorskim krigingom predstavlja probabilistički model nesigurnosti oko vrijednosti $z(u)$, za koju nije bilo mjerenja. Izračun indikatorskog kriginga zahtjeva, naravno, izradu variograma za svaku graničnu vrijednost.

Važno je primijetiti da je točan odabir l graničnih vrijednosti ključan za primjerenu uporabu indikatorskog kriginga. U slučaju prevelikog broja graničnih vrijednosti, vrijeme proračuna drastično raste, no s premalo graničnih vrijednosti moguće je da će se izgubiti neki bitni detalji vezani uz distribuciju.⁴ Općenito, preporučeni broj graničnih vrijednosti trebao bi biti između 5 i 11.

Nadalje, rezultat indikatorskog kriginga nikada neće biti samo u diskretnim vrijednostima 0 ili 1, nego će odgovarati kontinuiranoj procjeni duž intervala [0,1]. Dakle, indikatorski kriging daje vjerojatnosti (ili relativne učestalosti) događaja $\{z(x) < v_l\}$. Pretpostavimo li niz rangiranih graničnih vrijednosti ($v_1 < v_2 < \dots < v_n$), očito je da procijenjene vjerojatnosti moraju poštovati odnos:

$$P^*(z(x); v_l) \leq P^*(z(x); v_{l+1}) \text{ za svaki } l \quad (4.9)$$

Linearna procjena vjerojatnosti l graničnih vrijednosti omogućuje izradu nekoliko tipova karata. Za svaku graničnu vrijednost može se npr. izraditi karta vjerojatnosti da se neće dostići granična vrijednost (tj. $P^*(z(x), v_l)$), ili da će se dostići v_l : $(1 - P^*(z(x), v_l))$. Također,

procijenjena srednja vrijednost može se izračunati kroz sljedeći zbroj:

$$q^*(A; 0) = \sum_{i=1}^l v_i^* \{P(A; v_{i-1}) - P^*(A; v_i)\} \quad (4.10)$$

gdje je v_i^* centralna vrijednost intervala.

Pomoću funkcije uvjetne distribucije prilagođene svakom čvoru mreže mogu se izraditi karte izokvantila. Npr. medijan se može utvrditi interpolacijom između v_{max} i v_{max-1} , gdje je $P^*(A; v_{max})$ najveća vrijednost $P^*(A; v) \leq 0,5$. Isti postupak daje kvantile za bilo koju vrijednost p , omogućujući kartiranje intervala oko srednje vrijednosti ili medijana. Procijenjeni interval pouzdanosti može se izračunati izravno iz uvjetne distribucije te nije potrebna pretpostavka o tipu distribucije varijance procjene.

4.3. Prednosti i nedostaci

Za primjenu metode indikatorskog kriginga nije potrebna pretpostavka stacionarnosti ili multivarijantna normalnost. Jedna od najvažnijih prednosti je robusnost prema ekstremnim vrijednostima. Druga važna činjenica proizlazi iz indikatorskog formalizma. Indikatorskim graničnim vrijednostima originalna kontinuirana distribucija je diskretizirana. Zato se analiza izvodi češće na intervalnim negoli podacima određenim jednom vrijednošću, a potpuna reprezentativnost ulaznih podataka nije nužna. Dovoljno je znati da se na određenim lokacijama vrijednosti poroznosti na određenom intervalu. U slučaju da se postoje jasne intervalne granične vrijednosti skup ulaznih podataka može se proširiti. To svojstvo korišteno je u ovom radu, kako bi se proširio skup ulaznih vrijednosti.

5. DODAVANJE NOVIH "ČVRSTIH" PODATAKA I VARIOGRAMSKA ANALIZA INDIKATORSKOG SKUPA

Ulazni skup podataka obuhvatio je poroznost izmjerenu u 19 bušotina. Tu su vrlo brojna vertikalna mjerenja osrednjena u svakoj bušotini za interval ležišta "T". Najmanja vrijednost od 5,448 % je ekstremna, stoga je isključena iz daljnjih analiza.

Prostorni raspored lokacija bušotina je neravno-mjeran, s velikim područjem bez ikakvih informacija (slika 4) te su zbog toga na tim mjestima određeno dodatnih šest točaka (A, B, C, D, E i F). Vrijednosti poroznosti za nove lokacije procijenjene su na temelju susjednih bušotinskih podataka, koristeći linearni variogramski model. Dodatni „čvrsti“ podatci, procijenjene poroznosti te njihove lokacije X i Y prikazane su na slici 4 i u tablici 1.

Pretpostavka je da vrijednosti poroznosti ukazuju na različite pješčenjačke litofacijese (tj. laporoviti pješčenjak, sitno i srednjozrnasti pješčenjak). Zbog toga je poroznost bila transformirana u 6 indikatorskih setova podataka, na temelju sljedećih (tablica 1) graničnih vrijednosti: 14, 18, 19, 20, 22 i 24%.

Za svaki skup podataka, određen graničnom vrijednošću izračunati su indikatorski variogrami pomoću programa Variowin 2.21.¹¹

Tablica 1. Indikatorska transformacija poroznosti na temelju različitih graničnih vrijednosti. Koordinate su u Gauss-Kruegerovom sustavu, unutar zone 5 (E13°30' - E16°30') sa zemljopisnom širinom ishodišta 0° te zemljopisnom dužinom ishodišta 15°.

X	Y	Por (%)	14 %	18 %	19 %	20 %	22 %	24 %
6376161,26	5067837,14	20,045	0	0	0	0	1	1
6376598,12	5067814,56	20,525	0	0	0	0	1	1
6376734,51	5067596,74	21,163	0	0	0	0	1	1
6376888,03	5068296,06	21,093	0	0	0	0	1	1
6377036,31	5068042,44	23,282	0	0	0	0	0	1
6376967,36	5067600,97	22,036	0	0	0	0	0	1
6377085,97	5068506,80	19,666	0	0	0	1	1	1
6377275,39	5068080,14	19,164	0	0	0	1	1	1
6377192,49	5067820,25	19,499	0	0	0	1	1	1
6377340,05	5067550,55	19,863	0	0	0	1	1	1
6377490,35	5066730,24	18,061	0	0	1	1	1	1
6377589,91	5067642,00	19,617	0	0	0	1	1	1
6377672,02	5066901,68	18,504	0	0	1	1	1	1
6377888,33	5066692,16	18,166	0	0	1	1	1	1
6377821,07	5067850,14	17,939	0	1	1	1	1	1
6377977,74	5066964,14	19,628	0	0	0	1	1	1
6378168,97	5066731,69	21,808	0	0	0	0	1	1
6378263,31	5068258,95	18,363	0	0	1	1	1	1
6378478,38	5067245,16	13,798	1	1	1	1	1	1
6376413,48	5068275,11	20,584	0	0	0	0	1	1
6376576,83	5067225,75	20,379	0	0	0	0	1	1
6377165,85	5067027,76	19,593	0	0	0	1	1	1
6377660,83	5067374,25	19,280	0	0	0	1	1	1
6378101,37	5067715,78	17,430	0	1	1	1	1	1
6377715,28	5068240,46	18,513	0	0	1	1	1	1

Variogramski modeli koji se koriste u algoritmu indikatorskog kriginja moraju zadovoljavati sljedeće kriterije: ³

- teorijska funkcija mora biti ista (korišten je sferni),
- prag mora biti identičan (standardizirani variogram),
- odstupanje također mora biti jednako (ovdje je nula),
- jedino se doseg može mijenjati za različite indikatorske varijable (sve vrijednosti dosega su relativno male).

Zbog jednostavnosti, svi su eksperimentalni indikatorski variogrami smatrani neusmjerenima (slika 5). Za svaku od 6 varijabli, početni variogramski korak bio je 250 m.

6. KARTIRANJE METODOM INDIKATORSKOG KRIGINGA POMOĆU PROGRAMA 'WINGSLIB'

Indikatorski kriging (skr. 'IK') u paketu WinGslib™ primarno se upotrebljava za izračunavanje uvjetnih vjerojatnosti pomoću programa za stohastičke simulacije 'sisim'. Nadalje, program 'ik3d' namijenjen je za jednostavni i obični indikatorski kriging primijenjen za kategoričke varijable ili kumulativne indikatorske vrijednosti, izračunate za kontinuiranu varijablu. U slučaju takve, kontinuirane varijable, indikatorski kriging izračunava neovisne diskretne modele (diskretne vjerojatnosti) za različite granične vrijednosti.

Fleksibilnost pristupa tehnike IK očituje se u modeliranju različitih vjerojatnosti na različitim variogramskim udaljenostima. Program 'ik3d' pruža kao izlaz potrebnu

statistiku, ali uz dva ograničenja. Prvo se odnosi na procijenjenu vrijednost $F(u; z_r(n))$ koja iznosi 0 ili 1, no dobivena je iz izvornoga skupa čije vrijednosti mogu biti izvan intervala [0, 1]. Drugo ograničenje javlja se zbog 'k' različitih rezultata kriginja, te je „jače“ od prethodnoga. Oba ograničenja mogu biti rezultat negativnih težinskih koeficijenata indikatorskog kriginja ili premaloga broja podataka. Slika 6 prikazuje kartu izmjerenih vrijednosti i njihovih položaja. Sve karte u članku načinjene su u programu WinGslib™.

Krivulja distribucije kumulativne vjerojatnosti obavezan je ulazni podatak za indikatorsko kartiranje. Na slici 7 os 'X' predstavlja razrede, a 'Y' vjerojatnosti (u postotcima).

Prilikom rada programom 'ik3d' treba odrediti veliki broj vrijednosti. Ulazni zapis za program WinGslib s izvršnim parametrima je unutar posebne parametarske datoteke (skr. 'par'). Kako analiza treba biti ponovljiva, ovdje su navedeni svi glavni parametri za program 'ik3d'.

Koristio se 'Full IK' s procjenom 'Simple Kriging'. Ta tehnika odabrana je jer se temelji na globalnoj srednjoj vrijednosti, a ulazni skup je premali da bi se lokalnu sredinu moglo smatrati vjerodostojnom. U 'Grid definition' broj ćelija po osima X i Y je 251, a ukupni broj ćelija je 63 001.

Kao granične vrijednosti, odabrano je 6 vrijednosti poroznosti: 14, 18, 19, 20, 22 i 24%. Odgovarajuće kumulativne vjerojatnosti su: 0,08, 0,17, 0,36, 0,66 i 0,92.

Tzv. "E-type estimation" poroznosti, osrednjena za cijeli interval prikazana je slikom 8 i prikazuje najvjerojatnije vrijednosti poroznosti u analiziranom ležištu.

Na kraju, interpolirane karte vjerojatnosti za svaku pojedinu graničnu vrijednost prikazane su na slici 9.

Jasno je vidljiva bočna distribucija facijesa (od pješčenjaka, prema laporovitom pješčenjaku, pjeskovitom laporu te laporu) u analiziranom ležištu. Naravno, takva distribucija ovisi o odabranim graničnim vrijednostima. U ovom slučaju najmanje poroznosti su u dijelu ležišta koje ima malo zasićenje naftom, tj. blizu je kontakta nafta/voda. Najveće poroznosti odgovaraju „najboljem“ dijelu ležišta, tj. te vrijednosti su iz središnjega dijela pješčenjačkog tijela.

Karte vjerojatnosti (slika 9) imaju legendu u boji, plava boja znači da ne postoji vjerojatnost da će vrijednost ćelije biti manja od odabrane granične vrijednosti ($p = 0$). Crvena boja pokazuje da je vrijednost ćelije sigurno niža od odabrane granične vrijednosti ($p = 1$).

Npr. za graničnu vrijednost 14% (slika 9) samo ćelije u JI dijelu područja istraživanja mogu imati (uz određenu vjerojatnost) poroznosti koje su manje od 14%. Vjerojatnost postojanja takve male poroznosti je 0 za sve ostale dijelove ležišta prikazane na toj karti.

Nasuprot tome, karta za graničnu vrijednost 22% (slika 9) je gotovo cijela crvena (osim dvije lokacije u sredini karte), što znači da gotovo sigurno sve ćelije ($p = 1$) imaju vrijednosti poroznosti manju od 22%. Na ovaj se način interpretira skup karata vjerojatnosti (slika 9).

7. DISKUSIJA

Indikatorski kriging specifična je geostatistička tehnika za prostorne pojave, obilježene slabom stacionarnošću. Zapravo, ova tehnika je nepouzdanija (slabija) od bilo koje druge aproksimacije krigingom. Ipak, razvijena je za procjenu lateralne nesigurnosti, a ne jedinstvene vrijednosti za sve ćelije mreže. Indikatorski kriging koristi intervalne podatke, kao diskretizirani oblik izvorne kontinuirane distribucije regionalizirane varijable. Iz tog se razloga ta metoda može koristiti uvijek kada su podatci obilježeni nesigurnošću bilo koje vrste ili kada ne znamo točnu vrijednost, ali znamo interval u kojem se ona kreće.

Što se tiče stacionarnosti, tri su razine tog uvjeta. Stacionarnost prvog reda (koja je invarijantna u bilo kojem smjeru) vrlo je jasan zahtjev, koji ne može zadovoljiti bilo koji stvarni (prirodni) skup podataka. Nepouzdaniji (slabiji) oblik je tzv. stacionarnost drugog reda, koja traži da očekivana vrijednost mora biti neovisna o lokaciji, dok je kovarijanca ovisna samo o vektoru udaljenosti između dvije lokacije. Treći oblik je tzv. intrinistična hipoteza kod koje srednja vrijednost mora biti neovisna i mora postojati semivariogram. Stacionarnost trećeg reda je u cijelosti pretpostavljena, budući da koristimo variogramski model, koja podrazumijeva zadovoljavanje intrinistične hipoteze kao minimalnog uvjeta koji je svojstven ulaznom skupu podataka.

Većina tehnika kriginga je linearna, no neke poput indikatorskog kriginga to nisu, jer predstavljaju linearne

tehnike primijenjene skupu podataka koji je transformiran nelinearno. Indikatorska transformacija (kao u jednadžbi 4.4), prikazana u analizi, jedna je od takvih nelinearnih transformacija, pa je time indikatorski kriging nelinearna tehnika. Takva je primjena rezultirala indikatorskim variogramima za različite granične vrijednosti poroznosti i, što je važnije, skupom karata vjerojatnosti za svaku graničnu vrijednost. Takvim kartama prikazana je distribucija vjerojatnosti poroznosti ispod određenih graničnih vrijednosti.

ZAHVALA

Rad predstavlja teorijsku analizu geomatematičkih metoda načinjenu u 2009. godini u okviru projekta „Stratigrafska i geomatematička istraživanja naftno-geoloških sustava u Hrvatskoj“ (broj 195-1951293-0237) financiranog od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa RH.

Podatci poroznosti su preuzeti iz projekta završenog u 2008. godini „Unaprijeđivanje geoloških interpretacijskih metoda u cilju povećanja iscrpka unutar pješčenjačkih ležišta“, financiranog i poduprtog od strane INA-e d.d. Projekt je suradnja Sektora za razradu (INA) i Zavoda za geologiju i geološko inženjerstvo (RGNF).

Zahvaljujemo autoru programa VARIOWIN 2.21., gosp. YVANU PANNATIERU, za upotrebu jednoga od najpopularnijih slobodnih programa za variogramsku analizu. Prava na Variowin © 1993, 1994, 1995 pridržava Yvan Pannatier.

Karte su načinjene licenciranom inačicom programskog paketa WinGslibTM.



Kristina Novak Zelenika, INA-Industrija nafte d.d., Sektor za geologiju i upravljanje ležištima, Šubićeva 29, 10000 Zagreb, (ležišni geolog).
e-pošta: kristina.novakzelenika@ina.hr

Tomislav Malvić, INA-Industrija nafte d.d., Sektor za geologiju i upravljanje ležištima, Šubićeva 29, 10000 Zagreb, (savjetnik).
Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, docent
e-pošta: tomlav.malvic@ina.hr

Janos Geiger, University of Szeged, Department of Geology and Paleontology, Egyetem street no. 2, Szeged, Hungary (izvanredni profesor).
e-mail: matska@geo.u-szeged.hu

UDK: 550.8 : 553.98 : 553.29 : 551.4

550.8	geološka istraživanja
553.98	ležišta nafte i plina
553.29	vrsta ležišta, pješčenjaci
551.4	kartiranje, kriging