

Mapping of the Late Miocene sandstone facies using indicator kriging

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

PRELIMINARY COMMUNICATION

Facies mapping is one of very important tasks in modelling of oil and gas reservoirs. Facies type has direct influence on porosity and permeability values, which eventually influence both the migration and accumulation of hydrocarbons. The most numerous reservoirs in the Croatian part of the Pannonian basin major are in the Late Pannonian and Early Pontian sandstones. Various types of these sandstones were formed in turbiditic depositional environment, which had been periodically activated in relatively calm, deeper (mostly up to 200 meters), brackish lake environment with marl sedimentation over the basin plain. Sandstones form sedimentary bodies that are very elongated in approximately NW-SE direction, with sharp transition toward basin marls in bottom and top. On the contrary, lateral transition is gradual, from the clean, medium-grained sandstones, toward fine-grained sandstones or siltites, silty sandstones, marly sandstones, sandy marls and eventually basin marls. Such lateral facies transition in the Kloštar field was analysed, focusing at the largest sandstone oil reservoir 'T' of Early Pontian age. There were available 19 wells with the newest e-logs and calculated average porosity in reservoirs. With 6 additionally constructed virtual wells using Surfer residual calculation, this made a reliable input dataset. The (litho)facies are analysed through e-logs, porosity map and, eventually, indicator variograms and Indicator Kriging facies map. Transition of porosity values and their probabilities are clearly recognized on the Indicator Kriging maps, and can be correlated with the interpreted depositional environment at the specific well location. This is the first time that Indicator Kriging was applied in Croatian sandstone hydrocarbon reservoirs and result positively confirmed that this interpolation technique is appropriate and useful tool for facies mapping based on subsurface data.

Key words: facies, sandstone, marl, indicator variogram, indicator kriging, Late Miocene, Sava depression, Croatia

1. INTRODUCTION

Mapping of the Upper Miocene depositional facies in the Croatian part of the Pannonian basin is still one of the most important tasks in the Croatian petroleum geology.

Mapping of facies is important for getting insight to sedimentary environments, shapes and boundaries of hydrocarbon reservoirs. It is impossible to show all varieties on one map and that is the reason why several facies mapping methods were developed. One of the well known methods is based on spontaneous potential (SP) and resistivity (R) curve (in Croatia it was represented in works of e.g. refs.^{12, 13, 14, 15, 16, 17}

However there is another way for lithofacies interpretation based on subsurface data: if quantitative well-log interpretations of porosity are available, specific porosity intervals can be related to some lithofacies types. That is how by mapping of these intervals the lateral distribution of the corresponding lithofacies can be predicted. Unfortunately this is burdened with significant uncertainties. On one hand, the calculation of effective porosity from well-logs has uncertainty of its own. Consequently sometimes the meaningful question is not 'What is the porosity at a particular location', but rather 'What is the probability of porosity lying in a particular interval' or 'What is the probability of porosity being smaller/larger than a particular cutoff'. On the other hand, there hasn't been any traditional way to map the lateral distribution of a porosity interval for a long time.

However, by continuous development of geostatistical tools, during the late 80's a special method for kriging was introduced, called Indicator Kriging (IK).^{5, 7} This method has already been applied by other authors^{2, 3, 4, 7} to address the problems mentioned above. Later, several authors applied this method for a wide variety of problems including mapping of soil types² and facies mapping⁸ as categorical variables, estimating of geological attributes with great number of extreme values,⁹ or mapping of the production data of a hydrocarbon reservoir.⁶ By accumulating the practice, several textbooks appeared, summarizing these applications and giving theoretical background of IK.

In this paper certain key questions are summarized concerning the meaningful application with aim to demonstrate the possible application in approaching lithofacies mapping using IK of porosity from well-logs. An old oil field located close to the margin of the Sava depression named Kloštar field is chosen as a suitable study area.

2. THE STUDY AREA

Most of the oil and gas reservoirs in SW corner of the Pannonian basin (i.e. in the Sava, Drava, Slavonia-Srijem and Mura depressions) are in sandstones of Late Pannonian and Early Pontian age (Late Miocene). Depositional model of these sandstones is well interpreted by now.^{10, 12, 14, 16, 17} They represent a result of periodical activity of turbiditic currents in calm, brackish,

lake environment, where hemipelagic marls were deposited most of the time.

Late Miocene sandstone-prone turbidites entered the structural depressions, located between regional strike-slip faults (mostly like pull-apart basins). Parts of these depressions were later subjected to structural uplifts as a result of the inversion due to transpression resulted from the N-S orientation of the horizontal component of regional stress. Hydrocarbons started to migrate in these traps in Late Pliocene and Early Quaternary, and probably even in Late Miocene (e.g. ref. 1).

Sedimentation in smaller structural depressions had great influence on facies distribution, as well as on boundaries of the reservoir. Fault planes are also often boundaries between turbiditic sandstone and basin marl. It means that sandstones had been deposited periodically, with marl in their top and base. Lateral facies boundaries are not sharp and there is wide transition zone toward the basin plain. Laterally there is transition from (in axial parts of submarine channels) medium-grained to fine-grained sandstone, marly sandstone, sandy marlstone and finally marl. Also, granulometric composition of sandstones changes in the direction of turbidite current palaeotransport,¹⁰ from medium-grained to fine-grained sandstones.

Kloštar field is located 35 km east of Zagreb on the western slopes of Moslavačka Gora Mountain, with altitude from 110 to 180 m.

Geologically, Kloštar field belongs to the Sava depression. Reservoir rocks are of Miocene age and Palaeozoic age. There are 5 oil and gas prone lithostratigraphic units with altogether 20 reservoirs. Sandstone reservoirs are located in three units. The oldest is named 'Pre-Valencianensis beds' (Early Pannonian) with sandstone lens. Reservoirs of the '2nd sandstone series' and '1st sandstone series' (Early Pontian) have greater lateral extension and contain major hydrocarbon reserves.

3. DATA SET

The input dataset included porosity data collected in 25 points of Kloštar field, as average value of Lower Pontian oil reservoirs of '1st sandstone series'.

In the analysed reservoir, porosity from wells varies between 13.8 and 23.3%. It is assumed that the lowest

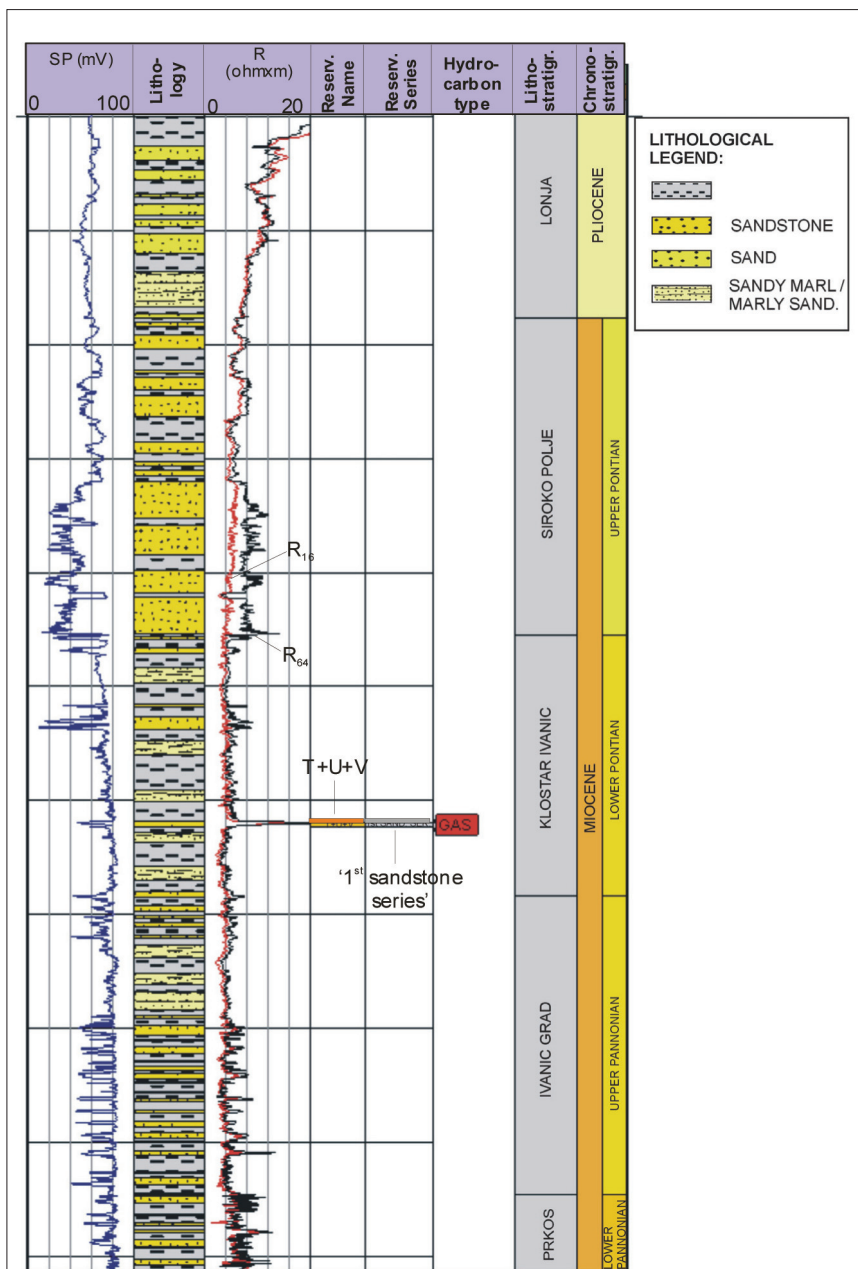


Fig. 1. Composite geological column (including stratigraphy, e-logs and lithology) of the well with minimum average porosity in the analysed sandstone reservoir 'T' (location belongs to sandy marl lithofacies)

Sl. 1. Složeni geološki stup (uključuje stratigrafiju, karotažu i litologiju) kroz bušotinu u kojoj je određena najmanja srednja poroznost u analiziranom ležištu 'T' (lokacija pripada litofacijsu pjeskovitog lapora)

value represents marlitic sand, as the transitional facies toward basin marl. On contrary, the maximal value had been measured in the clean sandstone, deposited in the deepest and central part of the transport channel. Of course, the average porosity value of wells strongly depends of their location in depositional environment, and it is represented by geological sections of the two mentioned "extreme" wells shown on Figures 1 and 2.

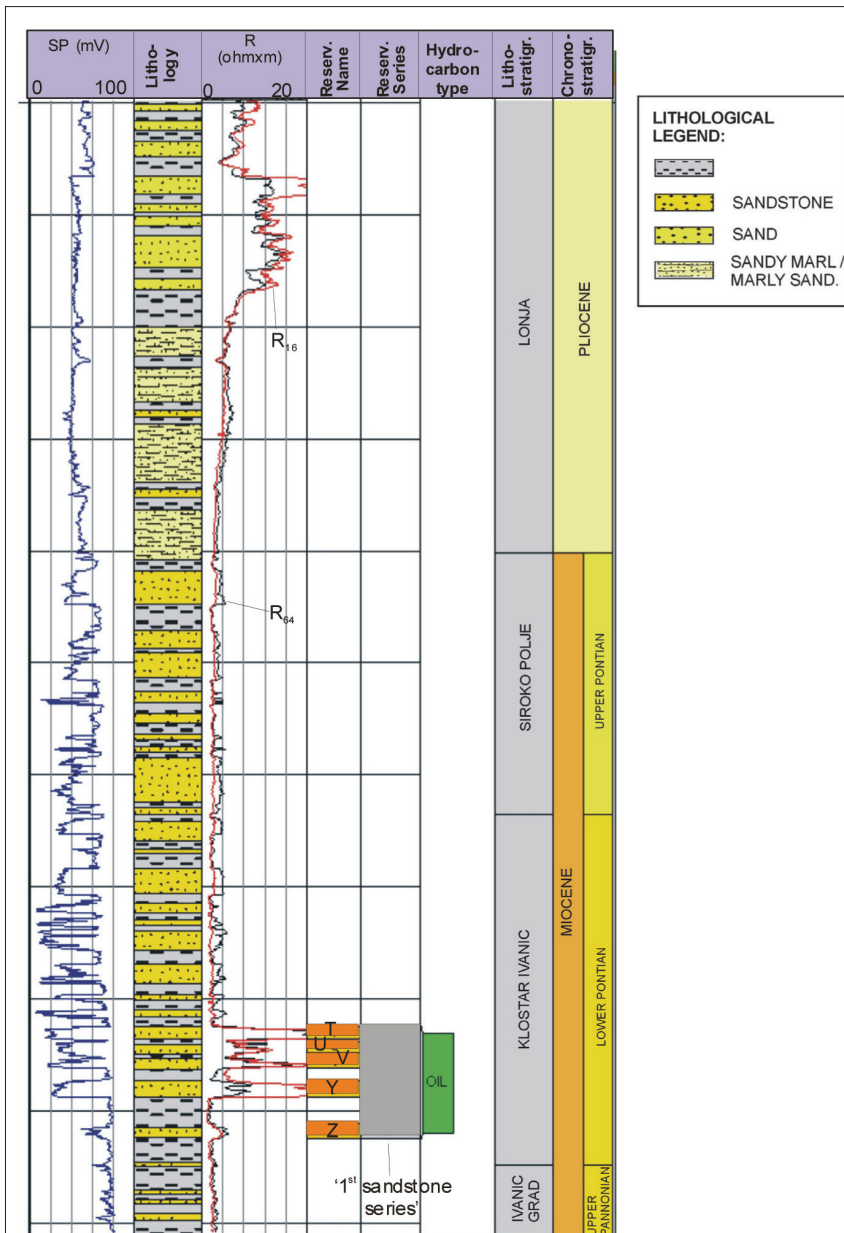


Fig. 2. Composite geological column (including stratigraphy, e-logs and lithology) of the well with maximum average porosity in the analysed sandstone reservoir 'T' (location belongs to medium grained sandstones lithofacies)

Sl. 2. Složeni geološki stup (uključuje stratigrafiju, karotažu i litologiju) kroz bušotinu u kojoj je određena najveća srednja poroznost u analiziranom ležištu 'T' (lokacija pripada litofacijesu srednjozrnatih pješčenjaka)

4. INDICATOR KRIGING (IK)

The following brief review on indicator formalism and Indicator Kriging technique are based on the works of refs. 3, 4, 5, 6, 7

4.1. Indicator formalism and some consequences

Within an uncored region, one of the most frequently used method for facies identification is the usage of po-

rosity cutoffs. More precisely, if a particular facies can be recognized by a cutoff, and if the presence of this facies is assigned with 1 and absence with 0 respectively, one can introduce a so-called indicator variable (like in Figure 3) with the following form:

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

where:

- $I(x)$ is the indicator variable;
- $z(x)$ is originally measured value;
- v_{cutoff} is cutoff value.

Let's assume that instead of a single threshold cutoff, l cutoffs v_i are applied to the observed data, such that

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

where $z(x)$ is the value of a regionalized variable such as porosity at location x .

Thus, raw data are transformed into l new variables, each taking on the value of 0 or 1. Note, that by selecting v_i cutoffs the main purpose is to obtain a reasonable picture of the frequency of wells or reservoir sections above or below each cutoff. It can be shown, that the probability of porosity $z(x)$ below a cutoff v_i within an area A equals

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

With knowledge of $P(A, v)$, one can derive the probability of wells with porosity above cutoff v_i :

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

This probability can be estimated directly from n observed values of $z(x)$:

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

where λ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) are n weights being calculated from a kriging system through calculation of residual indicator data $[I(x_k, v) - F^*(z)]$.⁷ In this latter expression $F^*(z)$ is an unbiased estimate of frequency, $F(z)$:

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

One of the most impressive consequences of the above derivations is that the aim of the indicator formalism for continuous variables is to directly estimate the distribution of uncertainty at unsampled location. The global probability distribution function of the input data set also then can be estimated at a series of threshold values.

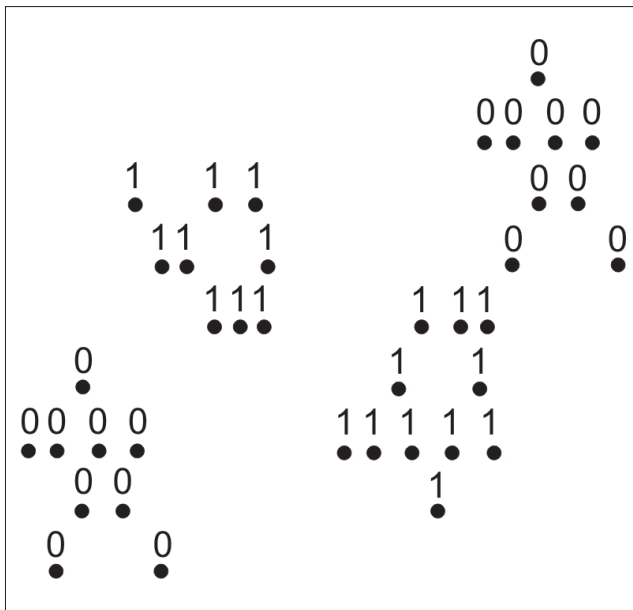


Fig. 3. Expression of 35 imaginary values where '1' used for sandstone locations and '0' for non-sandstone locations
 Sl. 3. Skupina od 35 zamišljenih podataka gdje '1' predstavlja lokacije pješčenjaka, a '0' lokacije ostalih litofacijesa

4.2. Brief summary of Indicator Kriging (IK)

If data are not clustered spatially, the estimate of $F^*(z)$ can be done from the histogram of all data available. In the case of Simple Kriging estimator, the residual $[P^*(A, v_i) - F^*(v_i)]$ is used to derive as follows:

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

where $\lambda_i(v_i)$ is the k -th weight for cutoff v_i .

Note, the simple kriging estimator differs from the Ordinary Kriging approach by not requiring the sum of weights to equal one. The Simple Kriging system of equation can be given as:

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

In the above equation $\gamma_i(x_i - x_m; v_i)$ are the indicator semivariogram values for the distance $x_i - x_m$ at cutoff v_i , and the terms $\bar{\gamma}(x_k; x_{k+h}; v_i)$ are average indicator semivariogram values between location x_k and x_{k+h} at cutoff v_i .

The IK process is repeated for all l cutoff (threshold) values, which discretize the interval of variability of the continuous attribute z . The distribution of uncertainty, built from assembling the l indicator kriging estimates, represents a probabilistic model for the uncertainty about the unsampled value $z(u)$. Obviously this Indicator Kriging procedure requires a variogram measure of correlation corresponding to each threshold.

It is important to note, that correct selection of the l cutoffs is essential for Indicator Kriging. In case of too many

cutoffs the computation time increase drastically, but with too few cutoffs one can lose some important details of the distribution.³ In general the number of cutoffs should be between 5 and 11.

Kriging of an indicator variable does not result only in values 0 and 1, but rather estimates along a continuous scale in the [0,1] interval. Thus Indicator Kriging yields probabilities (or relative frequencies) of the $\{z(x) < v_i\}$ events. Assuming that rank-ordered cutoffs are $(v_1 < v_2 < \dots < v_n)$, it is obvious that the estimated probabilities must obey the relations:

$$P^*(z(x); v_i) \leq P^*(z(x); v_{i+1}) \text{ for all } i \tag{4.9}$$

Linear estimation of probabilities belonging to l cutoffs permits one to draw several types of maps. For each cutoff, e.g. a map of the probabilities of not exceeding cutoff (i.e. $P^*(z(x), v_i)$), or the probabilities of exceeding v_i : $(1 - P^*(z(x), v_i))$ can be evidently drawn. It is also evident that the estimated mean can be calculated through a discrete sum:

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

where v_i^* is the central value of the interval $[v_{i-1}; v_i]$.

Isoquantile maps can be drawn from the conditional distribution function fitted at each grid node. For instance, the median can be found by interpolation between v_{max} and v_{max-1} , where $P^*(A; v_{max})$ is the highest value of $P^*(A; v) \leq 0.5$. The same procedure yields quantiles for any value of p , allowing one to map confidence intervals around a mean or median. The estimated confidence intervals can be calculated directly from the conditional distribution and do not need any assumption of the type of distribution of estimation variance.

4.3. Advantages and side effects

Using Indicator Kriging does not require stationarity assumption, or multivariate normality. One of the most important advantages is its robustness in respect to the extreme (outlier) values. Another important fact arises from the indicator formalism. By indicator cutoffs the originally continuous distribution is discretized. From this point the analysis runs on interval data rather than crisp data. That is, the preciseness of the input data is not necessarily required. It is enough to know that at a particular location the porosity lies in a particular interval. If this meets with one of the initially defined cutoff pairs, the input data set can be extended by adding this information. This is the property which we used in this work to make the input data set denser.

5. ADDING OF THE NEW "HARD" DATA AND VARIOGRAM ANALYSIS OF INDICATOR SET

The input dataset included porosity data collected in 19 wells from the reservoir "T". The very densely vertically spaced porosity values were averaged well by well for the whole reservoir interval. The minimum of 5.448% has been excluded from further analysis because it was recognised as outlier.

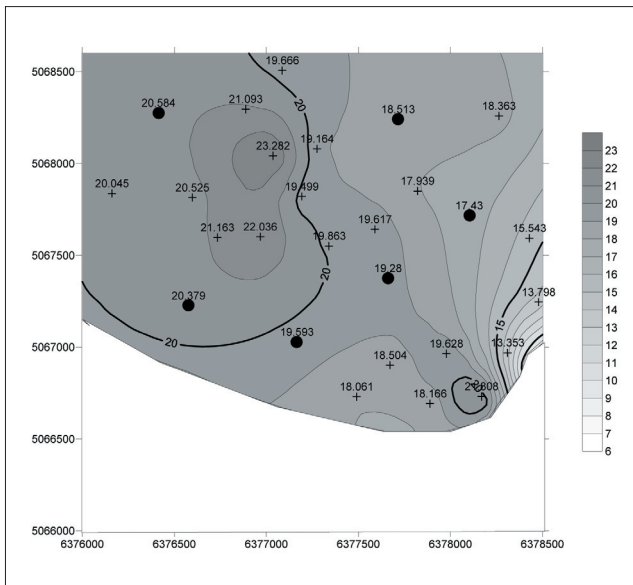


Fig. 4. Porosity distribution based on hard data derived from wells (+) and additional artificial hard data (?) with porosity estimated using Surfer™
 Sl. 4. Distribucija poroziteta na temelju čvrstih bušotinskih podataka (+) i dodatno konstruiranih točaka (?) u kojima je poroznost procijenjena Surferom™

The wells are very irregularly spaced, with large areas of missing information (Fig. 4). To avoid this problem, six additional points (A, B, C, D, E and F) were set to the locations with lack of data. Their porosity values were esti-

mated from the neighbouring wells using a linear variogram model. Additional hard data, their estimated porosity and X, Y locations are visible also in Figure 4 and in Table 1.

The presumption was that porosity values indicate different sandstone facies (i.e. marly sand, fine-grained and medium-grained sandstones). It is why porosity dataset had been transformed in the 6 indicator dataset, based on following (Table 1) cutoffs: 14, 18, 19, 20, 22 and 24%.

For each of the cutoffs, the corresponding indicator variogram was calculated using Variowin 2.21.¹¹

The variogram models to be used in indicator kriging algorithm must obey the following criteria:³

- The theoretical (model) function must be the same (spherical is used here)
- The sill must be identical (standardized variogram)
- The nugget effect must be the same (it is zero here)
- Only the range can change for different indicator variables (all ranges were relatively low).

For keeping the simplicity all the experimental indicator variograms are considered as omnidirectional (Fig. 5). For each of the six variables, the starting lag spacing was set to 250 m.

6. INDICATOR KRIGING MAPPING USING PROGRAM 'WINGSLIB'

Indicator Kriging (abbr. 'IK') in WinGslib™ package is primarily used to generate conditional probabilities

Table 1. Indicator transformations of porosity based on different cutoffs. Coordinates are in Gauss-Krueger system in zone 5 (E13°30' - E16°30') with latitude of origin 0° and longitude of origin 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

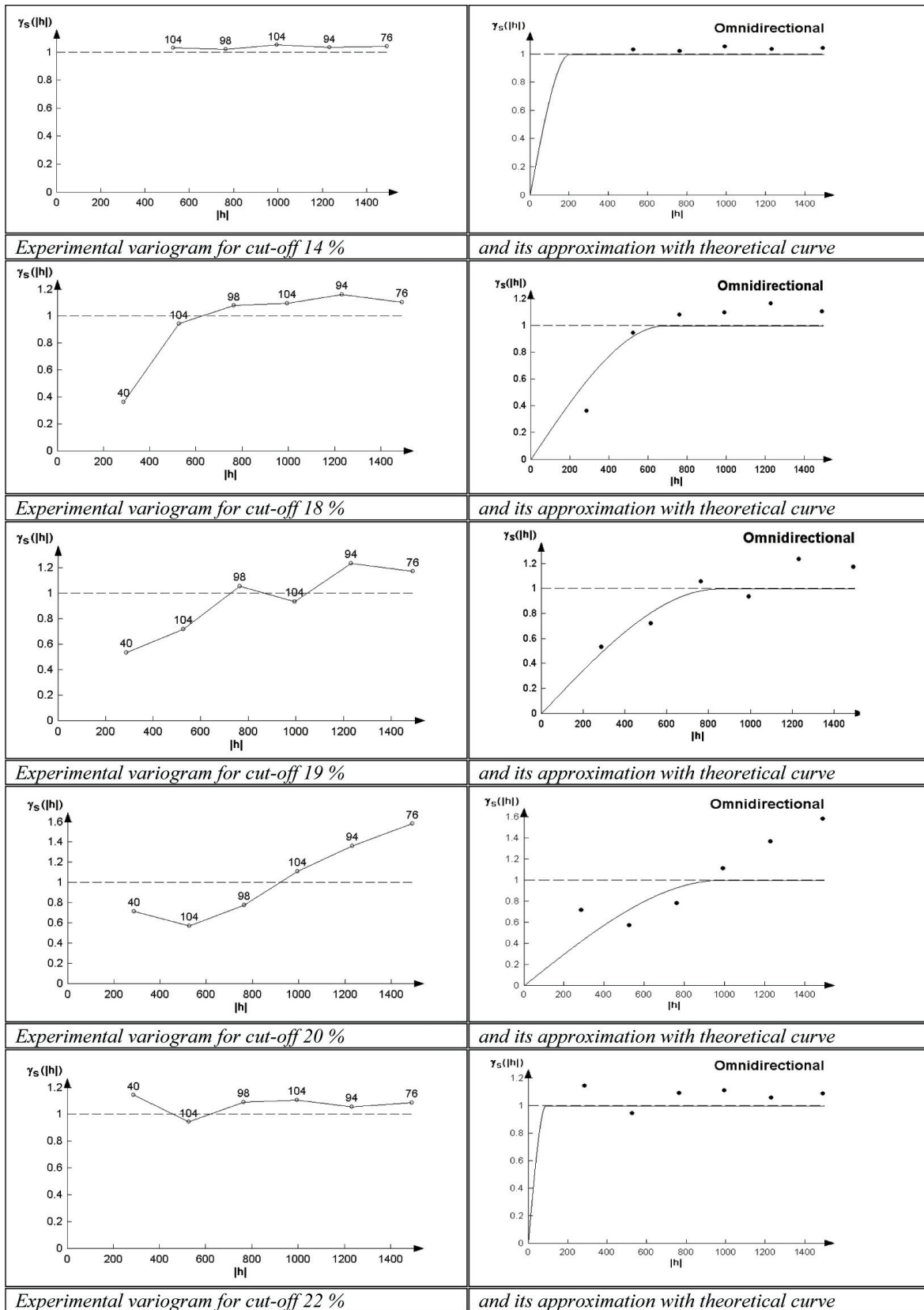


Fig. 5 Experimental variograms for different cut-offs (left) and their approximations with theoretical curves (right)

Sl. 5 Eksperimentalni variogrami za različite granične vrijednosti (lijevo) i njihova teorijska aproksimacija (desno)

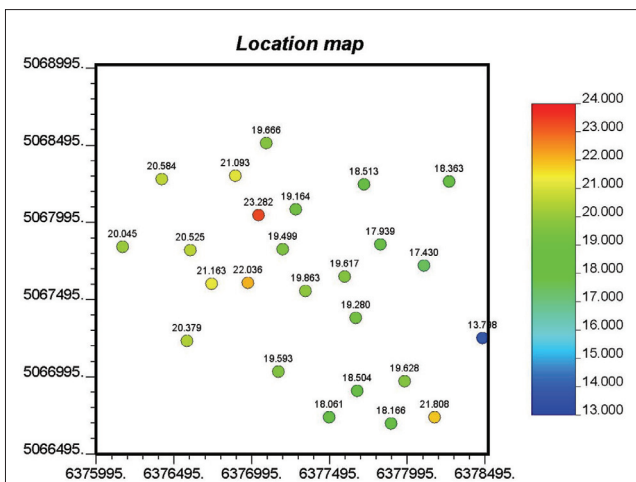


Fig. 6. Hard-data value map of 19 wells in Kloštar field with porosity value on each well, as well as 6 additional artificial hard data

Sl. 6. Položajna karta "čvrstih" (mjenjenih) vrijednosti poroznosti u 19 bušotina na polju Kloštar, kao i 6 dodatno konstruiranih točaka

within the 'sisim' stochastic simulation program. Moreover 'ik3d' is program for simply and ordinary Indicator Kriging for categorical variables or cumulative indicators calculated for continuous variable. In the case of continuous variable, the Indicator Kriging algorithm provides independent discrete models (discrete probabilities) for the various cutoffs.

The flexibility of the IK approach comes from modelling the various probabilities with different variogram distances. Program 'ik3d' provides the necessary statistics, but with two constraints. The first is related to the estimated value $F(u; z_k(n))$ to the bound 0 or 1, if originally valued outside the interval [0, 1]. The second constraint involves 'k' separate kriging results and it is harder condition than the first one. These constraints can help with negative indicator kriging weights or lack of data. Figure 6 is a map showing well locations and values. All maps in paper are created with program WinGslib™.

Cumulative probability distribution curve is obligatory input for indicator mapping. On Figure 7 'X' axis represents classes and 'Y' probabilities (in percentages).

Lots of input parameters had to be defined using 'ik3d'. Within the WinGslib system, the executables are parameterized by a special parameter file (abbr. 'par'). The procedure needs to be repetitive and that is why the main parameters of 'ik3d' program are listed here.

A 'Full IK' approach was used with 'Simple Kriging' estimation. This technique was chosen because it is based on global mean, and input dataset is small to take locally varying mean into consideration. In 'Grid definition' the number of cells both in X and Y directions was 251. The final model contains 63 001 cells.

As for cutoffs, six porosity values were selected: 14, 18, 19, 20, 22 and 24%. The corresponding cumulative probabilities were 0.08, 0.17, 0.36, 0.66 and 0.92 respectively.

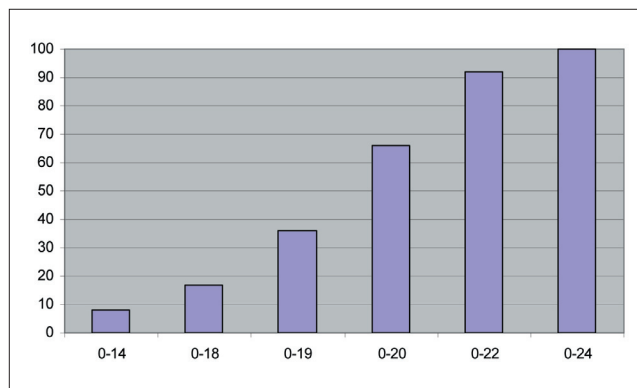


Fig. 7. Cumulative probability distribution for 8 porosity classes (Axes: X are porosity classes, Y is cumulative probability in %)

Sl. 7. Krivulja kumulativne vjerojatnosti prikazana kroz 8 razreda poroznosti (na osi X su vrijednosti razreda, na osi Y kumulativne vjerojatnosti u %)

The so called "E-type estimation" of porosity averaged for the whole reservoir interval is shown in Figure 8. This shows the most probable porosity value in the formation analysed.

Finally, the interpolated probability maps, for each of the selected cutoffs are shown in Figure 9.

Lateral distribution of the all mentioned facies (sandstone, marly sandstone, sandy marlstone and marl) across the analysed reservoir can be observed. Of course, such distribution depends on the selected cutoffs. In this case, the lowest porosities came from the part of reservoir with low oil saturation, close to the oil-water contact. The highest porosities correspond to the best part of the reservoir, i.e. these values are measured in the middle of the sandstone body.

The probability maps (Figure 9) have coloured legend. The blue colour means that there is no probability that

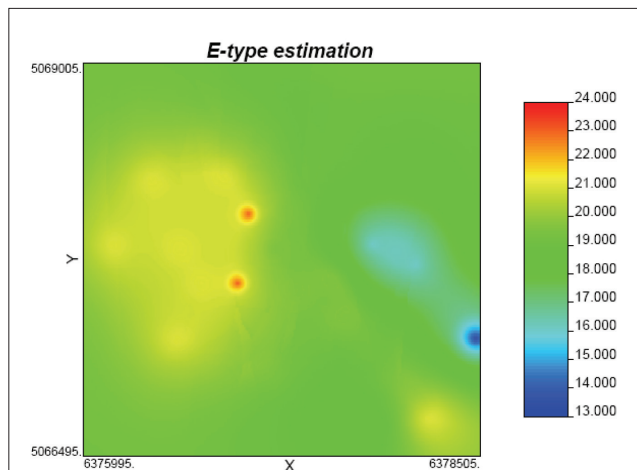


Fig. 8. E-type estimation of porosity derived from IK estimations of 5 cut-offs (14%, 18%, 19%, 20%, 22%)

Sl. 8. E-tip procjena poroznosti izračunata iz karata IK za 5 graničnih vrijednosti (14%, 18%, 19%, 20%, 22%)

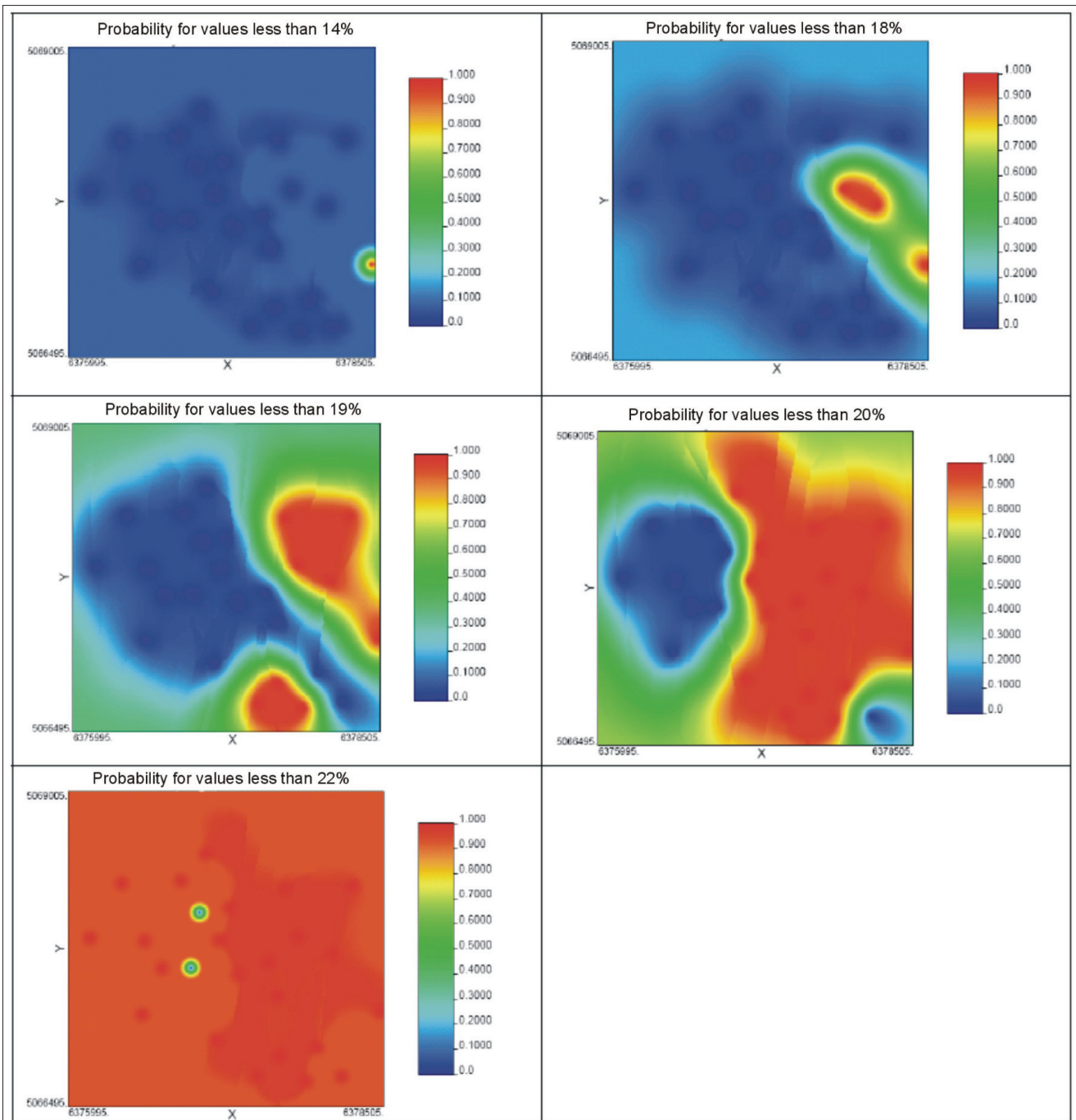


Fig. 9. Probability maps for porosity cutoffs. Probability '1' means for sure that value of cell will be lesser than selected cut-off
 Sl. 9. Karte vjerojatnosti za granične vrijednosti poroznosti. Vjerojatnost '1' znači kako je sigurno da će vrijednost ćelije biti manja od odabrane granične vrijednosti

the cell value will be less than selected cutoff ($p = 0$). The red colour shows that cell value is for sure lower than selected cutoff ($p = 1$).

For example, for the cutoff = 14% (Figure 9) only the cells being in the SE corner of the study area can have (with some probability) porosities lower than 14%. The probability of finding such a low porosity values is 0 for all the other parts of the map.

On contrary, the map for cutoff=22% (Figure 9) is almost entirely in red colour (except the two central locations). It means that almost all cells will surely ($p = 1$) have the values lower than 22%. This is the way how to read this set of probability maps (Figure 9).

7. DISCUSSION

The Indicator Kriging is a specific geostatistical technique for spatial phenomena with weak stationarity. In

fact, this kriging technique is weaker than any other kriging approximation. However, this technique is designed for estimating lateral uncertainty rather than 'crisp' values. It means that this approach estimates the local probability distributions on grid cells. IK works with interval data discretized form of the originally continuous distribution of a regionalized variable. That is why this method can be used at any case when data are too noisy, or when the 'exact' value is not known, but one can reliably estimate its interval (range of values).

Looking again at stationarity, there are three level of this condition. The first-order stationarity (which is invariant for any translation) is very strict requirement that cannot be satisfied using natural dataset. The weaker form is so called second-order stationarity which requires that the expected value must be independent on locations, and needs that the covariance is dependent only on the separation vector between any two locations. The third form is the so called intrinsic hypothesis which expects the mean to be independent and the existence of semivariogram. Just this third-order stationarity is assumed, because the decision to use variogram model means only the intrinsic hypothesis is expected as the minimum that the dataset has to satisfy (disregarding the nugget model).

Most of the kriging techniques are linear, but some of them are not. In fact, these are linear techniques applied on some non-linear transformation of the data. Indicator transformation (like in Equation 4.4) presented in analysis is one of such non-linear transformation and Indicator Kriging is non-linear technique as well. Such application in this analysis resulted in indicator variograms for different porosity cutoffs and, more important, in set of probability maps for such cutoffs. Using of these maps revealed the areal extension of porosity probability below defined cutoff.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper represents the theoretical analysis of geomathematical methods performed in 2009 in the project "Stratigraphical and geomathematical research of petroleum geological systems in Croatia (project no. 195-1951293-0237)", financed by the Ministry of Science, Education, and Sports of the Republic of Croatia.

Porosity data are taken from the project finished in 2008 "Improvements in geological interpretation methods with the purpose of increasing recovery in sandstone reservoirs", financed and supported by INA-Oil Company Plc. This was a cooperative endeavour of the Field Engineering and Reservoir Development Dept. (INA Plc., Croatia) and the Institute of Geology and Geological Engineering (Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb, Croatia).

We wish to thank author of VARIOWIN 2.21., Mr. YVAN PANNATIER, for using one of the most popular freeware software for variogram analysis. Variowin copyright © 1993, 1994, 1995 belongs to Yvan Pannatier.

Maps are created by licensed version of WinGslib™ software package.

8. REFERENCES

- Barić, G., Tari, V., Ivković, Ž. (2003): Petroleum systems in the southern part of the Pannonian basin and in the Adriatic offshore, Croatia. *Nafta* 54, 7-8, 299-307
- Brierkens, M.F.P, Burrough, P.A. (1993): The indicator approach to categorical soil data. Application to mapping and land use suitability analysis. *J. Soil Sci.* 44, 369-381
- Deutsch, C.V. & Journel, A.G. (1997) *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, 2nd edn. Oxford University Press, New York, 369 p.
- Deutsch, C.V. (2002): *Geostatistical Reservoir Modeling*. Oxford University Press., New York, 376 p.
- Hohn, M.E. (1988): *Geostatistics and petroleum geology*. New York, Van Nostrand Reinhold, 264 p.
- Hohn, M.E., McDowell, R.R. (1994): *Geostatistical Analysis of oil production and potential using indicator kriging*. In: Yarus, J.M., Chambers, R (eds, 1994): *Stochastic Modelling and Geostatistics. Principles, Methods and Case Studies*, AAPG Computer Applications in Geology, No. 3. 121-130
- Journel, A. G. (1983): Non-parametric estimation of spatial distribution. *Mathematical Geology*, 15, 3, 445-468.
- Journel, A.G. (1989): Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons. Short Course in Geology. *V8. AGU*
- Journel, A.G, Alabert, F.G. (1988): Focusing on spatial connectivity of extreme valued attributed: stochastic indicator models for reservoir heterogeneities. *SPE Paper # 18324*.
- Malvić, T. (2006) Middle Miocene Depositional Model in the Drava Depression Described by Geostatistical Porosity and Thickness Maps (Case study: Stari Gradac-Barcs Nyugat Field). *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 18, 63-70.
- Pannatier, Y. (1996) *Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer-Verlag, New York, 91 p.
- Saftić, B. (1998) *Genetska stratigrafska sekvencijska analiza u pontskim naslagama zapadnoga dijela Savske depresije [Genetic stratigraphic sequence analysis within the Pontian deposits of the western part of Sava depression]*, Doctoral dissertation, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering (monograph), University of Zagreb, 136 p.
- Steiner, I. (1999) *Utvrdjivanje moguće zaostale nafte i plina u postojećim ležištima i prijedlog tehnoloških postupaka pridobivanja [Determination of possible by-passed oil in existing reservoirs and proposal for technological methods for recovering]*. Steiner, Ivo (editor). Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering (monograph), University of Zagreb, 495 p.
- Vrbanac, B. (1996) *Paleostrukturne i sedimentološke analize gornjopanonskih naslaga formacije Ivanić grad u savskoj depresiji [Palaeostructural and sedimentological analyses of Late Pannonian sediments of Ivanić Grad formation in the Sava depression]*, Doctoral thesis, Faculty of Natural Sciences, Geological department, University of Zagreb, 303 p.
- Vrbanac, B. (2002a) Chronohorizons Based on Resistivity Curve Variations – Upper Miocene Sediments of the Ivanić Grad Formation in the Sava Depression (NW Croatia). *Geologia Croatica*, 55, 1, 11-24.
- Vrbanac, B. (2002b) *Facies and Facies Architecture of the Ivanić Grad Formation (Upper Pannonian) – Sava Depression, NW Croatia*. *Geologia Croatica*, 55, 1, 57-78.
- Vrbanac, B.; Velić, J. and Malvić, T. (2008) *Sedimentation of Late Pannonian clastic deposits in main and marginal basins (Sava depression vs. Bjelovar subdepression)*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, session's committee (ed.). Vienna, Copernicus Group, 2 p.



Kristina Novak Zelenika, INA-Oil industry, Sector for Geology and Reservoir Management, Šubićeva 29, 10000 Zagreb (Reservoir Geologist).
e-mail: kristina.novakzelenika@ina.hr

Tomislav Malvić, INA-Oil industry, Sector for Geology and Reservoir Management, Šubićeva 29, 10000 Zagreb (Adviser).
University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb (Assistant Professor)
e-mail: (Reservoir Geologist); tomlav.malvic@ina.hr

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

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 srednjozrastnim pješčenjacima, prema sitnozrastnim 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) srednjoznastih do sitnoznastih pješčenjaka, laporovitih pješčenjaka, pjeskovitih lapora i naposljetku lapora. Granulometrijski sastav pješčenjaka također se mijenja u smjeru paleotransporta turbiditnih struja,¹⁰ od srednjoznastih do sitnoznastih 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 glavinu 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 kriginja 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:

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

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 bušotina ili dijelova ležišta obilježenim vrijednostima 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 $z(x)$:

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

gdje su λ_i ($i=1, 2, \dots, n$) n težinskih koeficijenata, izračunatih kriginom 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:

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

U gornjoj jednadžbi $\gamma_l(x_i - x_m; v_l)$ 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: tomislav.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