

Review of deterministic geostatistical mapping methods in Croatian hydrocarbon reservoirs and advantages of such approach

E. Husanović and T. Malvić

REVIEW

In the last decade, many geostatistic mapping methods have been done in the Croatian part of the Pannonian Basin System. Great number of those maps has shown clastic reservoirs of Miocene age, mostly containing sandstones. All of those mappings have been based on data collected from Sava and Drava depression. In some earlier studies, as well as here, it has been shown that geostatistic maps are more appropriate for display of the distribution of reservoir variables. Because of different calculation theory and results interpretation in general, for stochastic geostatistical methods, the advantages of deterministical geostatistical methods for mapping porosity and reservoir thickness are displayed (techniques of Ordinary Kriging and Cokriging).

Key words: determinism, geostatistics, Miocene, clastites, Sava Depression, Drava Depression

1. INTRODUCTION

Data sources, number of data and type of data are extremely important for reservoir mapping when using subsurface geological maps. Two of the most common sources are seismic measurements and well data, also referred commonly as „hard data“ (especially well data), because according to practice they are most reliable. Reliability of maps can be estimated visually, based on the interpretation of the shapes of isolines (geological map shape assessment) or by numeric methods (most commonly cross-validation). Because of the different number of measurements that enter the estimation, data grouping in clusters, and interpolation on map borders, manual interpolation or mathematic equations can be used (computer algorithms). Referring to the algorithms, geostatistic and simpler mathematic methods of interpolation are discerned. Geostatistics has been studied as a set of methods, primarily defined as an advanced interpolation algorithms. The most significant advantage of geostatistics is the variogram function itself. There are several spatial interpolation methods by which one can calculate the weighting factor for a number of measured points in relation to their relative position to the location that is being analysed. However, kriging is the only method that takes into account the spatial anisotropy data estimated through focused variograms. Spatial anisotropy data indicates a strong dependence of the location, whose value is estimated on the basis of the measured points, with the direction of observation. Without that kind of variogram, it would be impossible to estimate the distribution of variables such as secondary porosity.

2. SOME INTERPOLATION METHODS

2.1. SIMPLER INTERPOLATION METHODS

Estimation or interpolation of variable values in places where not measured can be based on similar values of

the observed primary variable (autocorrelation) but also the use of one or more secondary variables in the same area, under the condition that they are correlated with the primary variable (ref.¹⁵). There are three interpolation methods reported with simple mathematical models that have been widely used for defining the reservoir variables dispersion.

2.1.1. Inverse Distance Method

That method is based on the assumption that the value of the variable being evaluated affects mostly the nearest measured value. The impact of each point is inversely proportional to the distance between that point and the location of the estimated value. Number of points included in the estimation is determined by radius of a circle described around that location. The result depends on the value of the exponent distances, usually that value empirically chosen as 2, because then the simplest calculation method is used (ref.¹). That method is often used as an alternative to geostatistical methods. It is very successful if the measured values are not strongly clustered because then the number of data is less than 15.

2.1.2. Nearest Neighbourhood Method

In that method each node of the grid gets assigned value of the nearest point (ref.¹) what shows the zonal distribution of values. It is useful when there is a small number of data, or when there are relatively large areas where is no data, and they need to be mapped schematically. Although the map does not provide a reliable display, approximate distribution of the values of variables in the analysed area can be determinate through the zones.

2.1.3. Moving Average Method

When the moving average method is being used value is calculated for each grid point as the middle of the measured data within a specific area. Estimation point is at the centre of ellipsoid or a circle, and all the measured

data within those areas are included in its assessment. There is a need to define the minimum amount of data that can be taken into account when averaging of the values is being done. If the number of data within an ellipsoid or circle is below the threshold, the point value will not be estimated.¹

2.2. GEOSTATISTICAL INTERPOLATION METHODS

2.2.1. Variogram analysis

Variogram is a basic geostatistical tool. It is used to determine the spatial dependences, and thus to better define the interconnection point data that has to be jointly mapped. The result of the variogram creation is an experimental variogram, which is further approximated by a theoretical model. Such a model is an input for kriging method by which is being interpolated, as it is considered to be, the best maps (Ref. ¹¹). Variogram equation can be simplified by eliminating the number 2 from the denominator and the resulting function 2γ is then called semivariograms (Expression 1):

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \cdot \sum_{n=1}^{N(h)} [z_n - z_{n+h}]^2 \quad (1)$$

where are:

- $2\gamma(h)$ variogram value;
- $N(h)$ number of data pairs compared with distance 'h';
- z_n variable value on location 'n';
- z_{n+h} variable value on a location on distance 'h' from observed location 'n'.

2.2.2. Kriging

Kriging method is the most known geostatistical procedure or algorithm (e.g.^{13, 14}). It is preceded by the determination of spatial dependence, i.e. variogram analysis. Kriging is considered an advanced method for estimating the value of a regionalized variable at selected points of the grid. Regionalized variable is often a random variable, since the grid of point samples for any variable can never be completely safe from a representative sample of a volume (e.g. rock) that is analysed. Kriging estimation can be described by a simple linear expression (Expression 2), which is later announced as a matrix equation. Variable values at a selected location (Z_k) are being estimated based on existing data (z_i). Corresponding weight coefficient (λ) is being associated with the all data, which describes the influence of the measured data in the value of the variable to be estimated (2):

$$Z_k = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times z_i \quad (2)$$

Kriging weighting coefficients are being calculated by system of linear equations (described for example in refs.^{3, 5, 7, 11}), and mainly depend on the distance from the data point to be estimated and their distribution. There are different Kriging techniques such as simple kriging, ordinary kriging, indicator kriging, universal kriging and disjunctive kriging. For simple kriging, as basic techniques, matrix equation written in full form (Expression 3) is:

$$\begin{pmatrix} \gamma(Z_1 - Z_1) & \gamma(Z_1 - Z_2) \dots & \gamma(Z_1 - Z_n) \\ \gamma(Z_2 - Z_1) & \gamma(Z_2 - Z_2) \dots & \gamma(Z_2 - Z_n) \\ \gamma(Z_n - Z_1) & \gamma(Z_n - Z_2) \dots & \gamma(Z_n - Z_n) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(X_1 - X) \\ \gamma(X_2 - X) \\ \gamma(X_n - X) \end{pmatrix} \quad (3)$$

where are:

- γ variogram value on distance between two points;
- λ weighting coefficient for location 'i';
- $Z_1 \dots Z_n$ measured values in points.

All other kriging techniques have some "restriction factors" (constraint) added. That has fully complied with the condition that they can be called the best linear unbiased estimator (abbr. BLUE). However, when Simple Kriging is used the requirement that the estimation is unbiased is not fulfilled.

2.3. COKRIGING

Cokriging is an upgrade of kriging methods. Kriging uses spatial correlation on a set of control points. It also takes into account the correlation between the primary and the dependent variables, secondary ones. It is considered that secondary variable is sampled denser than the primary and at the same time in a dependence on the primary variable. A number of secondary variables data is the main reason for its introduction and computation in correlation with primary variable (ref.¹⁷). Significance or strength to do the primary and secondary variables are usually calculated by using the correlation, either linear (Pearson correlation coefficient) or nonlinear correlation coefficient (Spearman's correlation coefficient). The Pearson correlation coefficient is used in cases where the variables of the model observed are in a linear relationship and a continuous normal distribution. However, such cases in the analysis of hydrocarbon reservoirs are rare, since relations between the reservoir variables, if they exist, are usually nonlinear. That is why every Spearman correlation coefficient is used in the transformation which translates to a linear relationship (e.g., relationship between seismic attributes and well geology data of hydrocarbon reservoirs) by determination the rankings of those data. When the ranking order is done, the minimum value of each variable is assigned a rank of 1, the next largest rank 2 and so on until the last which is assigned the highest rank. Specificity of that method is the existence of so-called Collocated Cokriging, or the formation of two groups of the same type of matrix equations for the two dependent variables (Expression 4), i.e. one group for the primary and secondary variables (e.g., ref.¹²).

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z_i + \sum_{i=1}^n x_j \cdot s_j \quad (4)$$

where are:

- Z_c value estimated by cokriging;
- x_j weighting coefficient of the secondary variable for each location 'j';
- s_j known value of the secondary variable, control point (hard-data).

2.4. CROSS-VALIDATION METHOD

Cross-validation is a numerical error estimation method, i.e. simple numerical method used to verify the perfor-

mance assessment of a particular interpolation method or technique. It is based on the neglect of one existing value in each location, and calculating new at that same location. The procedure is repeated sequentially or randomly for each measured point. The value of the new appraisal, in the previously measured point, is based on an assessment of the selected method (or technique) from any remaining measured values. At the end squared difference from all existing sites is summed and the final result of cross-validation is obtained (Expression 5). It is also called the mean square estimation error (MSE). If the same set of input data is used in different methods of assessment then the lower values obtained by cross-validation mean a better method for the particular case (ref.²).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{real measured value} - \text{estimated value})^2 \quad (5)$$

where are:

MSE mean square error;
real measured value onto location 'i' (from totally 'n');
estimated value for location 'i' by interpolation algorithm.

3. DETERMINISTICAL GEOSTATISTICAL MAPS PUBLISHED UNTILL TODAY FOR CROATIAN HYDROCARBON RESERVOIR

Geostatistical deterministical methods, kriging and cokriging, are often applied in the last ten years in the Sava and Drava Depressions.

3.1. MAPS INTERPOLATED IN THE SAVA DEPRESSION

In the Sava Depression, for the Ivanić and Kloštar Fields, highly reliable data interpolation by kriging and cokriging has been achieved because there were available relatively large dataset. (refs.^{1, 12, 19}).

3.1.1. The Ivanić Field

The Ivanić Field is located in the northwestern part of the Sava Depression. Reservoirs are part of the Miocene sedimentary systems with dominant members presented by sandstone and marl. Mapped reservoir age is Upper Pannonian. The chosen variable for mapping using geostatistics is porosity. Porosity maps interpolated by kriging (Figure 1) displays the more precise results compared to the porosity map obtained by other methods. Given the similar lithological composition and structure of other deposits of the same age in the Sava Depression, it was found that the use of Ordinary Kriging for mapping porosity (with sufficient data) throughout the depression always gave the best maps of that variable.

3.1.2. The Kloštar Field

The Kloštar Field is also situated in the northwestern part of the Sava Depression and represents one of the largest fields, which produces more than 50 years. The largest reservoirs are sandstones of the Upper

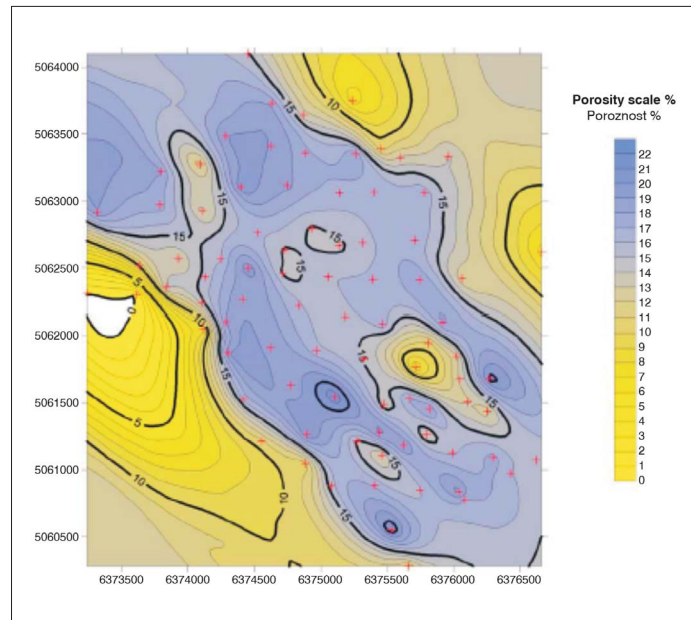


Fig. 1. Map porosity interpolated by kriging with anisotropic variogram model, the Ivanić Field (ref.¹²)

Sl. 1. Karta poroznosti interpolirana krigingom s anizotropnim variogramskim modelom, polje Ivanić (lit. ¹²)

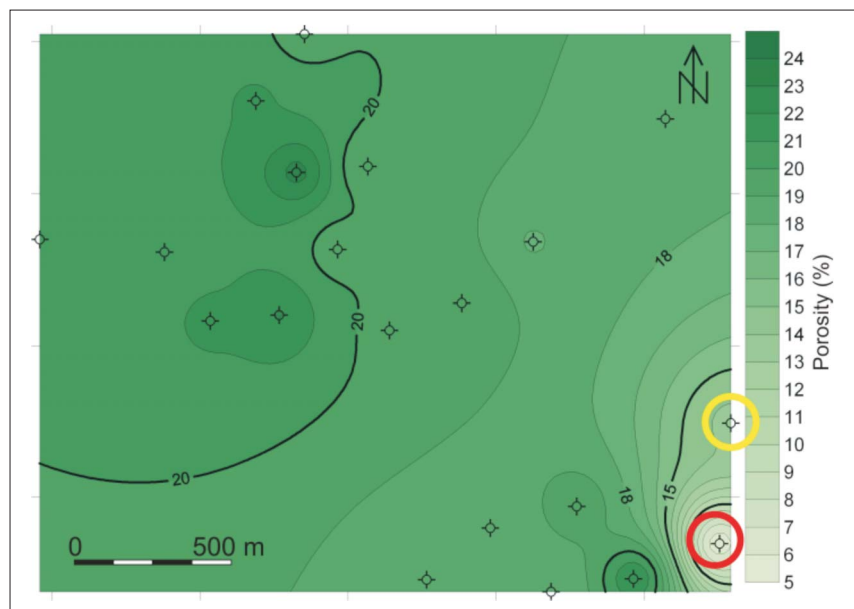


Fig. 2. Map porosity interpolated by kriging with isotropic variogram model, the Kloštar Field (ref.¹). Yellow circle shows on the most under-estimated, and red on the most over-estimated data.

Sl. 2. Karta poroznosti interpolirana krigingom s izotropnim variogramskim modelom, polje Kloštar (lit. ¹). Žuti krug označava najpodcjenjeniji, a crveni najprečjenjeniji podatak.

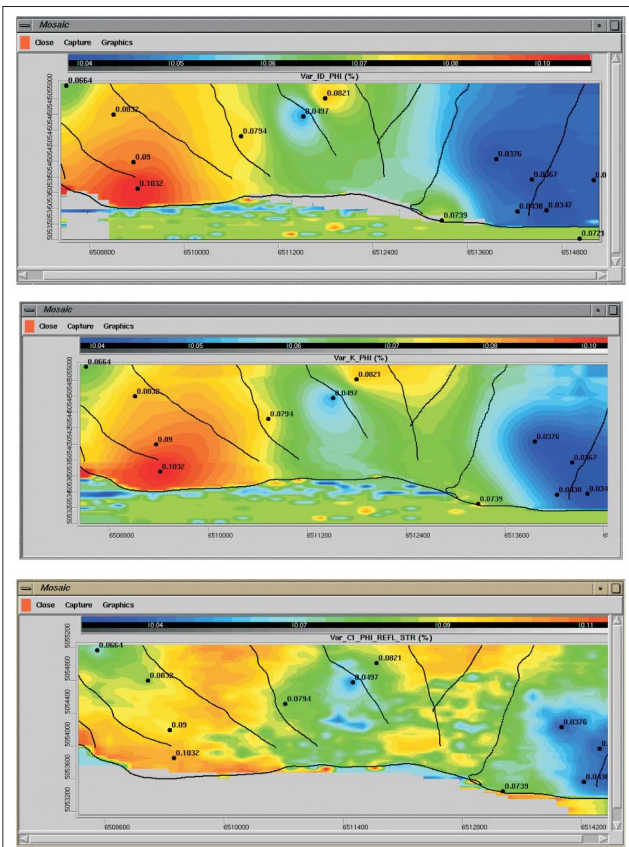


Fig. 3. Distribution of porosity calculated by inverse distance (above), ordinary kriging (centre) and collocated cokriging (below) in the Badenian breccias, the Beničanci Field (ref.¹⁵)

Sl. 3. Raspodjela poroznosti izračunata metodom udaljenosti (gore), običnim krigingom (u sredini) i kolociranim kokrigingom (dolje) u badenskim brečama, polje Beničanci (lit.¹⁵)

Pannonian and Lower Pontian. Analyses in that field were focused on the largest oil reservoir operationally called "T", of the Lower Pontian age. Mapping was done on a set of 25 well's averaged porosity values. They were mapped by Ordinary (Figure 2) and Indicator Kriging. Again, the kriging method was evaluated as the best method for mapping reservoir variables (porosity, thickness and depth of the reservoir).

3.2. MAPS INTERPOLATED IN THE DRAVA DEPRESSION

In the Drava Depression the Stari Gradac-Barcs Nyugat, Molve and Beničanci Fields were analysed. In those fields kriging and cokriging were applied equally.

3.2.1. The Beničanci Field

The field consists of coarse clastics (mainly breccia) of Badenian age. Cokriging and Ordinary Kriging were used to interpolate porosity. From several seismic attributes reflection strength was chosen as a second-

ary source of information in the cokriging interpolation porosity¹⁶. By use of secondary information more reliable estimation of porosity distribution in the reservoir was obtained. The resulting solution (Figure 3) shows that Collocated Cokriging gave significantly heterogeneous (and hence realistic) picture than the porosity maps made with ordinary kriging and inverse distance^{10, 15}. Due to the relatively small number of inputs (14) on the map with use of cokriging is still relatively easier to identify the location of wells, but the effect of the concentric lines of equal values in their surroundings is not longer markedly accentuated. Also in the area between the wells was highlighted the feature of seismic attributes and heterogeneity, which is the characteristic of that reservoir. Accuracy of the method was tested with cross-validation equation, and the result of cokriging was the lowest compared to the other two cards (cokriging <inverse distance <kriging = 2.19 <2.78 <2.97).

3.2.2. The Stari Gradac-Barcs Nyugat Field

The Stari Gradac-Barcs Nyugat Field has heterogeneous reservoirs whose lithological composition comprises clastic rocks, dolomite, quartzites and metavolcanites. Age reservoir extends from the Ordovician to Badenian, and the results of mapping the porosity of the reservoir, which is the Lower Triassic are displayed here (Figure 4). Method used for mapping was Ordinary kriging. The accuracy of the results is determined by geological evaluations isolate porosity forms and results of cross-validation.

3.2.3. The Molve Field

The Molve Field is marked with geologically very heterogeneous reservoirs whose lithological composition varies from clastic rocks (breccias), dolomite, quartzites (metamorphosed sandstones) and metavolcanites. Reservoir age ranges from the Ordovician, then Lower and Upper Triassic, to Badenian, with frequent unconformities. Therefore it is divided into four lithofacies. Due to the heterogeneity of the reservoir it was very difficult to correlate seismic attributes and reservoir parameters in each lithofacies individually so that was made in only one of them (Figure 5). Porosity within the Lower Triassic

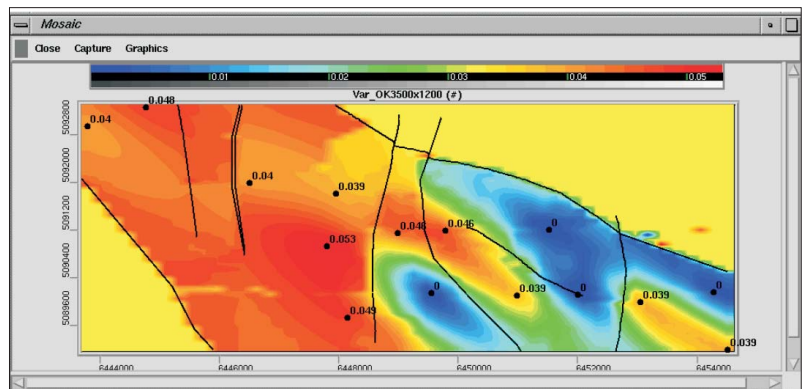


Fig. 4. Distribution of porosity, Ordinary Kriging ellipsoid 3 500x1 200, Stari Gradac-Barcs Nyugat - lithofacies I, Badenian breccia (ref.¹⁵)

Sl. 4. Raspodjela poroznosti, obični kriging elipsoid 3 500x1 200, Stari Gradac-Barcs Nyugat - litofacijes I, tj. badenske breče (lit.¹⁵)

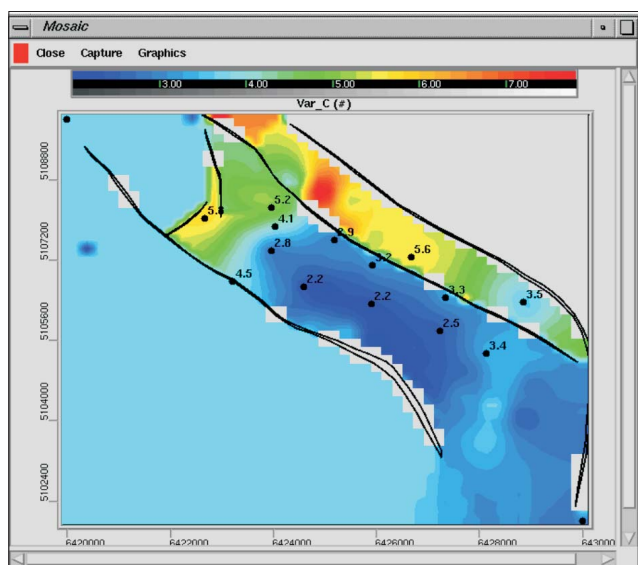


Fig. 5. The distribution of porosity, Ordinary Cokriging, Molve, lithofacies III, i.e. Lower Triassic clastics (ref.17)

Sl. 5. Raspodjela poroznosti, obični kokriging, Molve, litofacijes III, tj. donjotrijaski klastiti (lit. 17)

clastics was mapped using cokriging, and seismic reflection strength attribute was used as a secondary figure. In other lithofacies Ordinary Kriging was used.

4. TABULAR REVIEW OF PREVIOUS RESULTS

In Table 1 is presented a brief overview of depressions and fields within those depressions, their age, lithology, and deterministical geostatistical methods with whom porosity mapping was done. Fields within the Sava Depression are Ivanić and Kloštar and they contain the Upper Miocene sandstone reservoirs. In the Drava Depression were analysed Stari Gradac-Barcs Nyugat, Molve and Beničanci Fields. Stari Gradac-Barcs Nyugat and Molve reservoir age is ranging from Palaeozoic to Cenozoic, and in Beničanci only Cenozoic. In the Stari Gradac-Barcs Nyugat Field by geostatistically was mapped only one part of reservoir located in the Badenian clastics, whereas in the Molve lithofacies were mapped all reservoir lithofacies, from Palaeozoic to Cenozoic eras, i.e. metavolcanites, quartzites, dolomites

and breccias. The Beničanci Field reservoir age is Badenian, and lithology those are breccias.

5. EXAMPLE OF INVERSE DISTANCE VS. KRIGGING MAPS FOR BED THICKNESS AND ADVANTAGES OF GEOSTATISTICS

In order to make mapping, which would also be a model and example of the use of deterministical geostatistical interpolation methods compared with simpler algorithms, a set of point data was generated. They are interpolated in the SURFER 8 program. The set contains 25 observations that by their characteristics are: a) geographically belong to the northwestern part of the Sava Depression, b) contain the point information on the bed thickness within the maximum and minimum values that were identified in sandstone reservoirs of the Sava Depression.

5.1. Bed thickness map interpolated by Inverse Distance

Bed thickness map was made based on the input data by Inverse Distance Method (Figure 6). The isotropic radius search data within the grid was assumed. Distance exponent value is set to 2, because it was the most commonly used value of that method in most applications in geosciences. By method of cross-validation squared estimation error (MSE) was calculated and the most under-estimated and over-estimated data were given, isolated during cross-validation.

Cross-validation results are:

- a) Square error of the variable "thickness" 4020.68;
- b) The root mean square error of the variable "thickness" 63.41;
- c) The most underestimated data is at X = 6376000, Y = 5068000 where the measured value of "thickness" Z = 90, and the estimated value of "thickness" E = 46.30;
- d) The most overestimated data is at X = 6376050, Y = 5068050, which is measured by the value of "thickness" Z = 45, and the estimated value of "thickness" E = 85.01.

5.2. Bed thickness map interpolated by Ordinary Kriging

Based on the input data (values in X, Y, Z axes) bed thickness map was made by kriging method (Figure 7). The

Table 1. Table view of age, lithology and used geostatistical methods for reservoirs porosity deterministical mapping ²⁰				
DEPRESSION NAME	FIELD	RESERVOIR AGE	LITHOLOGY	METHOD
SAVA	Ivanić	Upper Pannonian to Lower Pontian	sandstone	Ordinary kriging
	Kloštar	Palaeozoic to Lower Pontian	sandstone	Ordinary and Indicator Kriging
DRAVA	Stari Gradac-Barcs Nyugat	Badenian	breccias	Ordinary Kriging
	Molve (lithofacies I)	Badenian	breccias	Ordinary Kriging
	Molve (lithofacies II)	Upper Triassic	dolomites (fractured)	Ordinary Kriging
	Molve (lithofacies III)	Lower Triassic	quartzite (fractured)	Ordinary Cokriging
	Molve (lithofacies IV)	Ordovician	metavolcanites (fractured)	Ordinary Cokriging
	Beničanci	Badenian	breccias	Ordinary Kriging, Ordinary Cokriging

simplest linear model variogram with slope 1 was made. Mean square estimation error (MSE) was calculated by using the cross-validation, and again most underestimated and most overestimated data while performing cross-validation.

Cross-validation results are:

- MSE of the variable "thickness" is 3980.83;
- The root mean square error of the variable "thickness" 63.09;
- the most underestimated data $X = 6376000$, $Y = 5068000$ where the measured value of "thickness" $Z = 90$, and the estimated value of "thickness" $E = 46.01$;
- the most overestimated data is at $X = 6376050$, $Y = 5068050$, where the measured value of "thickness" $Z = 45$, and the estimated value of "thickness" $E = 83.64$.

6. RESULTS REVIEW AND CONCLUSION

An example of the three most common, mathematically simpler, mapping methods (methods of Inverse Distance, Nearest Neighbourhoods, and Moving Average) was given in the work. Porosity map obtained by Inverse Distance was proven to be most successful. That method is also the most common alternative to the application of geostatistics, especially when there are too few input parameters for the variogram analysis. For the use of geostatistics, previously published results from the Sava and Drava Depressions are showed. For those mapped fields reservoirs age ranged from Palaeozoic to Cenozoic (Upper Miocene), and lithological composition varied from metavolcanite, quartzite, dolomite, breccia to sandstone. The Sava Depression reservoirs were characterized by homogeneous lithological composition (sandstone) as compared to the Drava Depression reservoirs (clastics and metamorphites magmatites). Similarly, for the Sava Depression was also easier to recommend a mapping method as the most appropriate (Ordinary Kriging). Due to the heterogeneity of the reservoir lithology in the Drava Depression, particularly in the Molve Field, the importance of application of seismic attributes as secondary variables was highlighted, of course, where a significant correlation with the primary could have been established.

In the second part of that work two thickness maps were made in SURFER 8 on an imaginary set of 25 data, which, by the values of coordinates (X, Y), and the approximate thickness of the reservoir, belongs to the Sava Depression. For creation of those maps methods of Inverse Distance and kriging were used. On the visual assessment basis maps obtained immediately implies that in that case the kriging method was appropriate because it was showing a particular trend (giving the same value isoline along north-south line, and the downward trend in thickness towards the west) in the distribution of thickness, which could not be clearly seen on map obtained by inverse distance. Comparing the results of cross-validation is also evident that the kriging method had a lower value of the mean square error or regionally better estimates the required variables. On the basis of examples, one can conclude that the mapping sets of fif-

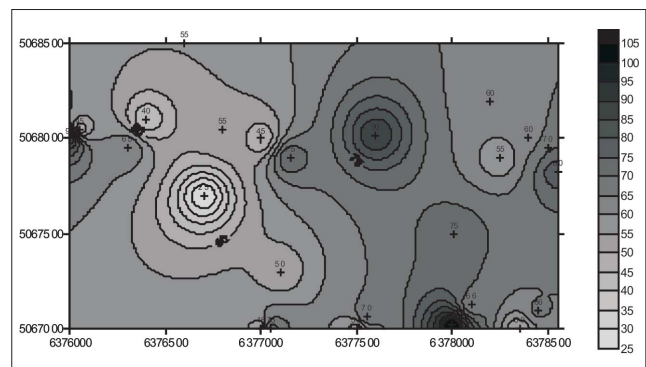


Fig. 6. Map of the thickness distributions made by Inverse Distance (legend shows metres)

Sl. 6. Karta razdiobe debljina napravljena metodom inverzne udaljenosti (legenda predstavlja metre)

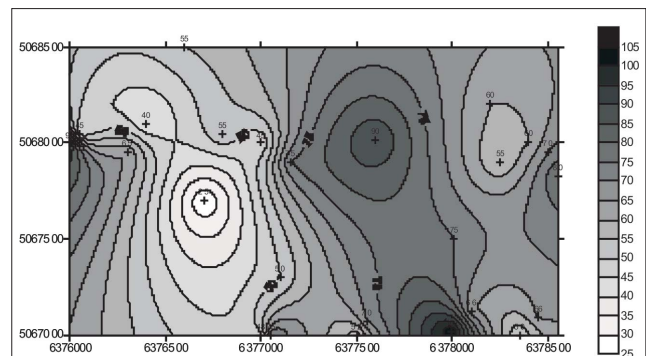


Fig. 7. Map of the thickness distributions made by kriging method (legend shows metres)

Sl. 7. Karta razdiobe debljina napravljena metodom kriginga (legenda prikazuje metre)

teen and more information is almost always better to use a geostatistical interpolation methods in order to obtain more precise insights into structural and stratigraphic forms on the subsurface geological maps and into geological variables of the hydrocarbon reservoirs.

7. REFERENCES

Published:

- BALIĆ, D., VELIĆ, J. & MALVIĆ, T. (2008): Selection of the most appropriate interpolation method for sandstone reservoirs in the Kloštar oil and gas field. *Geologia Croatica*, 61, 1, 27-36.
- DAVIS, B (1987): Uses and Abuses of Cross Validation in Geostatistic. *Mathematical Geology*, 19, 3, 241-248.
- HOHN, M. E. (1988): *Geostatistics and Petroleum Geology*. Van Nostrand Reinhold, 400 p., New York.
- JENSEN, J. L., LAKE, L. W., CORBETT, P. W. M. & GOGGIN, D. J. (2000): *Statistics for Petroleum Engineers and Geoscientists*. Prentice Hall PTR, 390 p., New Jersey.
- JOURNAL, A. G. & HUIJBREGTS, C. J. (1978): *Mining Geostatistics*. Academic Press, 600 p., London.
- KRIGE, D. G. (1951): A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52, 119-139.
- LIEBHOLD, A. M., ROSSI, R. E. & KEMP, W. P. (1993): Geostatistics and Geographic Information System in Applied Insect Ecology. *Annual Review of Entomology*, 38, 303-327.

8. MALVIĆ, T. (2003): Vjerojatnost pronalaska novih zaliha ugljikovodika u bjelovarskoj uleknini [Oil-Geological Relations and Probability of Discovering New Hydrocarbon Reserves in the Bjelovar Sag]. Dissertation, University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, 123 p.
9. MALVIĆ, T. (2005): Rječnik osnovnih geostatističkih pojmova [Dictionary of basic geostatistical terms – in Croatian]. Herald of the Croatian Geological Society, 42, 2, 4 pp.
10. MALVIĆ, T. (2008a): Kriging, cokriging or stochastic simulations, and the choice between deterministic or sequential approaches. *Geologia Croatica*, 61, 1, 37-50.
11. MALVIĆ, T. (2008b): Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka [Application of geostatistics in geological data analysis – in Croatian]. INA-Industry of Oil Plc., 103 p., Zagreb.
12. MALVIĆ, T. (2008c): Izrada karte poroznosti krigiranjem u pješčenjačkim ležištima, primjer iz Savske depresije [Production of a Porosity Map by Kriging in Sandstone Reservoirs, Case study from the Sava Depression], *Kartografska i geoinformacije*, 7, 9, 12-19.
13. MALVIĆ, T. (2009a): Geostatistics as a Group of Methods for Advanced Mapping of Geological Variables in Hydrocarbon Reservoirs. *Annual of the Croatian Academy of Engineering*, 12, 69-83.
14. MALVIĆ, T. (2009b): Stohastički pristup u determinističkom izračunu geološkoga rizika – teorija i primjer [Stochastic approach in deterministic calculation of geological risk - theory and example]. *Nafta*, 60, 12, 658-662.
15. MALVIĆ, T. & UREK OVIĆ, M. (2003): Application of methods: inverse distance weighting, ordinary kriging and collocated cokriging in porosity evaluation on the Beničanci and Stari Gradac fields in Croatia. *Nafta*, 54, 9, 331-340.
16. MALVIĆ, T. & PRSKALO, S. (2008): Značenje amplitudnog atributa u predviđanju poroznosti – primjer iz Dravske depresije [Significance of the amplitude attribute in porosity prediction, Drava Depression Case Study]. *Nafta*, 59, 1, 39-51.
17. MALVIĆ, T., BARIŠIĆ & M., FUTVIĆ I. (2009): Geostatističko kartiranje kokrigingom te važnost kvalitetnog seizmičkog atributa [Cokriging geostatistical mapping and importance of quality of seismic attribute(s)]. *Nafta*, 60, 5, 259-264.
18. MALVIĆ, T., CVETKOVIĆ, M. & BALIĆ, D. (2008): Geomatematički rječnik [Geomathematical dictionary – in Croatian]. Croatian Geological Society, 74 p., Zagreb.
19. NOVAK ZELENKA, K., MALVIĆ, T. & GEIGER, J. (2010): Kartiranje gornjomiocenskih pješčenjačkih facijesa metodom indikatorskog kriginga [Mapping of the Late Miocene sandstone facies using Indicator Kriging]. *Nafta*, 61, 5, 225- 233.

Unpublished:

20. ŠIMUNDŽA, J. (2012): Primjena geostatističkih determinističkih metoda u kartiranju geoloških varijabli [The use of geostatistics and deterministic method in mapping geological variables – in Croatian]. Bachelor thesis, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, mentor: Malvić, T., 18 p.

ACKNOWLEDGMENTS

The presented results, data and synthesis are made as part of a research project entitled "Stratigraphical and geomathematical research of petroleum geological systems in Croatia" (project no. 195-1951293-0237), which is financed by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia.



Authors:

Ena Husanović, Marka Marojice street 23, 20000 Dubrovnik, Croatia
Corresponding author: Ena Husanović, ena.husanovic@yahoo.com

Tomislav Malvić, University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb, Croatia
INA-Industry of Oil Plc, Sector for geology and reservoir management, Šubićeva 29, Zagreb, Croatia

Pregled dosadašnjih determinističkih geostatističkih kartiranja ležišta ugljikovodika u Republici Hrvatskoj te prednosti takvoga pristupa

E. Husanović i T. Malvić

PREGLEDNI ČLANAK

U zadnjih desetak godina načinjena su brojna geostatistička kartiranja ležišta ugljikovodika u hrvatskom dijelu Panonskoga bazenskoga sustava. Najveći broj takvih karata prikazao je klastična ležišta miocenske starosti, uglavnom pješčenjačka. Sva kartiranja te vrste načinjena su na podacima iz Savske i Dravske depresije. U nekoliko ranijih radova, kao i ovdje, pokazano je kako su geostatističke karte primjerenije prikazale raspodjele ležišnih varijabli nego li neke druge interpolacijske metode koje su jednim imenom nazvane „matematički jednostavnije metode“. Zbog drugačije teorije izračuna te općenito interpretacije rezultata kod stohastičkih geostatističkih metoda, u ovome prikazu prednosti su prikazane za skupinu determinističkih geostatističkih metoda, tj. tehnika običnoga kriginga i kokriginga, na kartama poroznosti i debljina ležišta.

Ključne riječi: determinizam, geostatistika, miocen, klastiti, Savska depresija, Dravska depresija

1. UVOD

Kod kartiranja ležišta ugljikovodika dubinskim geološkim kartama posebno su važni izvori, broj i vrsta podataka. Dva najčešća izvora su seizmička mjerenja i bušotinski podatci (koji se i kolokvijalno nazivaju u engleskom jeziku „hard data“, jer se smatraju najpouzdanijima, posebno bušotinski podatci). Pouzdanost napravljene karte može se procijeniti vizualno na temelju oblika dobivenih izolinija (tzv. geološka procjena oblika na karti) i numeričkim metodama (najčešće je to kros-validacija). Zbog različitog broja mjerenja koja ulaze u procjenu, „grupiranja“ skupova podataka (u tzv. klastere), te interpolaciji na rubovima karata, može se primijeniti ručna interpolacija ili matematičke jednadžbe (algoritmi na računalima). Glede vrste algoritma razlikuju se geostatističke i matematički jednostavnije metode interpolacije. Geostatistika je promatrana kao skup metoda, primarno definiranih kao napredni interpolacijski algoritmi. Najznačajnija prednost geostatistike je sama funkcija variograma. Postoji nekoliko prostornih interpolacijskih metoda pomoću kojih se može izračunati težinski koeficijent za određeni broj mjerenih točaka u odnosu na njihov relativni položaj prema lokaciji koja se istražuje. Međutim, kriging je jedina metoda koja uzima u obzir prostornu anizotropiju podataka procijenjenu kroz usmjerene variograme. Prostorna anizotropija podataka ukazuje na zavisnost lokacije, čije se vrijednost procjenjuje na temelju mjerenih točaka, o smjeru promatranja. Bez takve vrste variograma bilo bi nemoguće procijeniti razdiobu varijabli poput sekundarne poroznosti.

2. NEKE INTERPOLACIJSKE METODE

2.1. JEDNOSTAVNIJE INTERPOLACIJSKE METODE

Procjena, odnosno interpolacija predstavlja vrijednost varijabli na mjestima na kojima nisu izmjerene, može se temeljiti na sličnim vrijednostima promatrane primarne varijable (autokorelacija) ali i korištenju jedne ili više sekundarnih varijabli na istom području, uz uvjet da su one korelirane s primarnom varijablom (lit. ¹⁵). Prikazane su tri interpolacijske metode sa jednostavnijim matematičkim modelima, a imaju široku primjenu pri definiranju rasprostiranja ležišnih varijabli.

2.1.1. Metoda inverzne udaljenosti

Temelji se na pretpostavci da na vrijednost varijable koja se procjenjuje najviše utječu najbliže izmjerene vrijednosti. Utjecaj svake točke je inverzno proporcionalan udaljenosti između te točke i lokacije na kojoj se vrijednost procjenjuje. Broj točaka uključenih u procjenu određen je polumjerom kružnice opisane oko te lokacije. Rezultat ovisi o vrijednosti eksponenta udaljenosti, najčešće je ta vrijednost empirijski odabrana kao 2 jer je tada račun najjednostavniji (lit. ¹). Ova metoda se često koristi kao alternativa geostatističkim postupcima. Vrlo je uspješna ako točke izmjerenih vrijednosti nisu izrazito grupirane te je broj podataka manji od 15.

2.1.2. Metoda najbližeg susjedstva

Metoda dodjeljuje vrijednost najbliže točke svakom čvoru mreže (lit. ¹), tj. prikazuje zonalne raspodjele vrijednosti. Upotrebljiva je kada postoji mali broj podataka, odnosno kada postoje relativno velike zone na

kojima nema podataka, a potrebno ih je shematski kartirati. Iako karta ne daje pouzdan prikaz, putem zona se može odrediti približna raspodjela vrijednosti varijabli u analiziranom području.

2.1.3. Metoda pokretne sredine

Metodom pokretne sredine se računa vrijednost pojedine točke mreže kao srednja vrijednost podataka izmjerenih unutar određenog područja. Točka procjene nalazi se u središtu elipsoida ili kružnice, a svi izmjereni podatci unutar tog područja ulaze u njenu procjenu. Ovdje postoji potreba za definiranjem najmanjeg broja podataka koji se može uzeti u obzir kod osrednjavanja vrijednosti. Ako je broj podataka unutar elipsoida ili kružnice manji od graničnoga, vrijednost točke neće biti procijenjena (lit. ¹).

2.2. GEOSTATISTIČKE INTERPOLACIJSKE METODE

2.2.1. Variogramska analiza

Variogram je temeljni geostatistički alat. Služi za određivanje prostorne zavisnosti, a time i za bolje definiranje međusobne povezanosti točkastih podataka koji se žele zajednički kartirati. Rezultat izrade variograma je eksperimentalni variogram, koji se nadalje aproksimira teoretskim modelom. Takav model ulaz je za metodu kriginga kojom se interpoliraju, smatra se, u prosjeku najbolje karte (lit. ¹¹). Variogramsku jednadžbu moguće je pojednostavniti tako da se iz nazivnika eliminira broj 2 pa se dobivena funkcija 2γ naziva semivariogramom (izraz 1):

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \cdot \sum_{n=1}^{N(h)} [z_n - z_{n+h}]^2 \quad (1)$$

gdje su:

- $2\gamma(h)$ vrijednost variograma;
- $N(h)$ broj parova podataka uspoređenih na udaljenosti 'h';
- z_n vrijednost varijable na lokaciji 'n';
- z_{n+h} vrijednost varijable na lokaciji udaljenoj za 'h' od promatrane lokacije 'n'.

2.2.2. Kriging

Metoda kriginga predstavlja najpoznatiji geostatistički postupak ili algoritam (npr. lit. ^{13, 14}). Prethodi joj određivanje prostorne zavisnosti, odnosno variogramska analiza. Kriging se smatra naprednom metodom za procjenu vrijednosti regionalizirane varijable u odabranim točkama mreže. Regionalizirana varijabla često je i slučajna varijabla, jer mreža točkastih uzoraka za bilo koju varijablu nikada ne može u potpunosti sa sigurnošću predstavljati reprezentativni uzorak za neki volumen (npr. stijene) koji se analizira. Procjena krigingom može se opisati jednostavnim linearnim izrazom (izraz 2), koji se kasnije raspisuje u obliku matičnih jednadžbi. Vrijednosti varijable na odabranoj lokaciji (Z_k) procjenjuju se na temelju postojećih podataka (z_i). Svakom podatku pridružen je i odgovarajući težinski koeficijent (λ) kojim se opisuje utjecaj tog mjerenog podatka na vrijednost varijable koja se procjenjuje (2):

$$Z_k = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times z_i \quad (2)$$

Težinski koeficijenti kriginga izračunati su sustavom linearnih jednadžbi (opisani su npr. u lit. ^{3, 5, 7, 11}), a uglavnom ovise o udaljenosti podataka od točke koja se procjenjuje te njihovoj grupiranosti. Postoje različite tehnike kriginga kao što su jednostavni kriging (*engl. Simple Kriging*), obični kriging (*engl. Ordinary Kriging*), indikatorski kriging (*engl. Indicator Kriging*), univerzalni kriging (*engl. Universal Kriging*) i disjunktivni kriging (*engl. Disjunctive Kriging*). Kod jednostavnog kriginga, kao osnovne tehnike, matična jednadžba napisana u punome obliku (izraz 3) glasi:

$$\begin{pmatrix} \gamma(Z_1 - Z_1) & \gamma(Z_1 - Z_2) \dots & \gamma(Z_1 - Z_n) \\ \gamma(Z_2 - Z_1) & \gamma(Z_2 - Z_2) \dots & \gamma(Z_2 - Z_n) \\ \gamma(Z_n - Z_1) & \gamma(Z_n - Z_2) \dots & \gamma(Z_n - Z_n) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(X_1 - X) \\ \gamma(X_2 - X) \\ \gamma(X_n - X) \end{pmatrix} \quad (3)$$

gdje su:

- γ vrijednost semivariograma na udaljenosti dviju točaka;
- λ težinski koeficijent za lokaciju 'i';
- Z_1, \dots, Z_n mjerene vrijednosti u točkama.

Sve ostale tehnike kriginga imaju dodane neke „faktore ograničenja” (*engl. constraint*). Time je u potpunosti zadovoljen uvjet da ih se može nazvati najboljim linearnim nepristranim procjeniteljima (*engl. Best Linear Unbiased Estimator*, skr. *BLUE*). Međutim, kod jednostavnog kriginga nije ispunjen uvjet da je procjena nepristrana (*engl. „unbiased”*).

2.3. KOKRIGING

Kokriging predstavlja nadogradnju metode kriginga. Kriging koristi prostornu korelaciju na skupu kontrolnih točaka. Kokrigingom se računa korelacija između primarne varijable i zavisne, sekundarne varijable. Smatra se kako je sekundarna varijabla gušće uzorkovana nego li primarna, a u isto vrijeme u određenoj zavisnosti s primarnom varijablom. Veći broj podataka takve sekundarne varijable je i glavni razlog njezina uvođenja te računanja korelacije s primarnom (lit. ¹⁷). Značajnost ili jakost veze primarne i sekundarne varijable najčešće se računa korelacijom, bilo linearnim (Pearsonov koeficijent korelacije) ili nelinearnim koeficijentom korelacije (poput Spearmanovog koeficijenta korelacije). Pearsonov koeficijent korelacije koristi se u slučajevima kada između varijabli promatranog modela postoji linearna povezanost i neprekidna normalna distribucija. Međutim takvi su slučajevi u analizi ležišta ugljikovodika rijetki, jer odnosi između ležišnih varijabli, ako postoje, su najčešće nelinearni. Zato se svaki Spearmanov koeficijent korelacije gdje se koristi transformacija kojom se povezanost prevodi u linearnu (npr. veza između seizmičkog atributa i bušotinskog podataka u geologiji ležišta ugljikovodika) određivanjem rangova tih podataka. Tada se rangiranje radi tako da se najmanjoj vrijednosti svake varijable pridijeli rang 1, sljedećoj po veličini rang 2 i tako sve do posljednje kojoj se pridjeljuje najveći rang. Specifičnost metode kokriginga jest postojanje tzv. kolokacijskoga kokriginga, odnosno formiranje dviju skupina istovrsnih matičnih jednadžbi

za dvije zavisne varijable (izraz 4), tj. po jedna skupina za primarnu i sekundarnu varijablu (npr. u lit. ¹²).

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z_i + \sum_{j=1}^n x_j \cdot s_j \quad (4)$$

gdje su:

- Z_c vrijednost procjenjena kokrigingom;
- x_j težinski koeficijent sekundarne varijable za svaku lokaciju j ;
- s_j poznata vrijednost sekundarne varijable, tzv. kontrolne točke (engl. *hard-data*).

2.4. METODA KROS-VALIDACIJE

Kros-validacija, odnosno numerička procjena pogreške jednostavna je numerička metoda koja se upotrebljava za provjeru uspješnosti procjene određenom interpolacijskom metodom ili tehnikom. Temeljena je na zane-marivanju po jedne postojeće vrijednosti na pojedinoj lokaciji te računanju nove na toj istoj lokaciji. Postupak se ponavlja sekvencijalno ili slučajno za svaku pojedinačnu mjerenu točku. Vrijednost nove procjene, u ranije izmjerenoj točki, zasniva se na procjeni odabranom metodom (ili tehnikom) iz svih preostalih izmjerenih vrijednosti. Na kraju se zbrajaju kvadrati razlika sa svih postojećih lokacija i dobije konačan rezultat krosvalidacije (izraz 5). On se još naziva srednja kvadratna pogreška procjene (engl. Mean Square Error, skr. MSE). Ako se za isti skup ulaznih podataka koriste različite metode procjene tada niže vrijednosti dobivene kros-validacijom označavaju bolju metodu za pojedini slučaj (lit. ²).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{stvarna (izmjerena) vrijed.} - \text{procijenjena vrijed.})^2 \quad (5)$$

gdje su:

- MSE - srednja kvadratna pogreška procjene;
- stvarna (izmjerena) vrijednost* – vrijednost izmjerena na smjestištu i (od ukupno n mjerenja);
- procijenjena vrijednost* – procjena na smjestištu i načinjena interpolacijskim algoritmom.

3. DOSADAŠNJI OBJAVLJENI REZULTATI DETERMINISTIČKIH GEOSTATISTIČKIH KARATA LEŽIŠTA UGLJIKOVODIKA U HRVATSKOJ

Geostatističke determinističke metode, kriginga i kokriginga, su često primjenjivane zadnjih desetak godina u Savskoj i Dravskoj depresiji.

3.1. KARTE INTERPOLIRANE U SAVSKOJ DEPRESIJI

U području Savske depresije na poljima Ivanić i Kloštar postignuta je vrlo pouzdana interpolacija podataka krigingom i kokrigingom iz razloga što je postojao relativno veliki ulazni skup vrijednosti. (lit. ^{1; 12; 19}).

3.1.1. Polje Ivanić

Polje Ivanić smješteno je u sjeverozapadnom dijelu Savske depresije. Ležišta su dio miocenskog taložnog

sustava s dominantnim članovima predstavljenim pješčenjakom i laporom. Starost kartiranog ležišta je gornjopanonska. Kao ležišna varijabla kartirana geostatistikom odabrana je poroznost ležišta. Karte poroznosti interpolirane krigingom (slika 1) prikazale su preciznije rezultate u odnosu na karte poroznosti dobivene ostalim metodama. Obzirom na sličan litološki sastav te strukture drugih ležišta iste starosti u Savskoj depresiji, ocijenjeno je kako bi uporaba običnog kriginga za kartiranje poroznosti (uz dovoljan broj podataka) u cijeloj depresiji uvijek dala najbolje karte te varijable.

3.1.2. Polje Kloštar

Polje Kloštar nalazi se također u sjeverozapadnom dijelu Savske depresije i predstavlja jedno od najvećih polja, na kojemu se proizvodi već 50 godina. Najveća ležišta su pješčenjačka, starosti gornjega panona i donjega panta. Analize na ovom polju bile su fokusirane na najveće naftno ležište operativno nazvano „T“, starosti donjega panta. Kartiralo se na skupu od 25 osrednjenih bušotinskih vrijednosti poroznosti. One su kartirane običnim (slika 2) i indikatorskim krigingom. Ponovno je metoda kriginga ocijenjena kao najboljom za kartiranje ležišnih varijabli (poroznosti, debljine i dubine ležišta).

3.2. KARTE INTERPOLIRANE U DRAVSKOJ DEPRESIJI

U području Dravske depresije analizirana su polja Stari Gradac-Barcs Nyugat, Molve i Beničanci. Na tim poljima primjenjivani su podjednako kriging i kokriging.

3.2.1. Polje Beničanci

Polje se sastoji od krupnih klastita (uglavnom breča) badenske starosti. Za interpolaciju poroznosti su korišteni kokriging te obični kriging. Iz nekoliko seizmičkih atributa odabrana je snaga refleksije kao sekundarni izvor informacija u interpolaciji poroznosti metodom kokriginga (lit.¹⁶). Upotrebom sekundarne informacije ostvarena je bolja i pouzdanija procjena distribucije poroznosti u ležištu. Dobiveno rješenje (slika 3) kolociranim kokrigingom prikazuje znatno heterogeniji (time i realniji) sliku negoli karte poroznosti načinjene običnim krigingom i inverznom udaljenošću (lit.^{10,15}). Zbog relativno maloga broja ulaznih vrijednosti (14) na karti kokriginga se još uvijek relativno lako prepoznaju lokacije bušotina, no više nije izrazito naglašen koncentrični efekt linija jednakih vrijednosti u njihovoj okolini. Također, u međubušotinskome prostoru vrlo je naglašeno obilježje seizmičkoga atributa odnosno heterogenost, što i jeste obilježje toga ležišta. Točnost metode testirana je i računom kros-validacije, a rezultat kokriginga bio je najniži u usporedbi s ostalim dvjema kartama (kokriging < inverzna udaljenost < kriging = 2,19 < 2,78 < 2,97).

3.2.2. Polje Stari Gradac-Barcs Nyugat

Polje Stari Gradac-Barcs Nyugat ima heterogeno ležište čiji litološki sastav obuhvaća klastite, dolomite, kvarcite i metavulkanite. Starost ležišta proteže se od ordovicija do badena, a ovdje su prikazani rezultati kartiranja poroznosti u dijelu ležišta koje pripada donjem trijasu (slika 4). Metoda kojom se kartiralo bila je obični kriging.

Točnost rezultata određena je geološkim evaluacijama oblika izolinija poroznosti te rezultatima kros-validacije.

3.2.3. Polje Molve

Polje Molve obilježeno je s geološki vrlo heterogenim ležištem čiji litološki sastav varira od klastita (breča), dolomita, kvarcita (metmorfoziranih pješčenjaka) i metavulkanita. Starost ležišta kreće se od ordovicija, donjeg i gornjeg trijasa do badena, uz česte diskordancije. Zato je podijeljeno u četiri litofacijesa. Zbog heterogenosti ležišta bilo je vrlo teško korelirati seizmičke atribute i parametre ležišta u svakom litofacijesu pojedinačno pa je to načinjeno samo u jednom od njih (slika 5). poroznost je unutar donjotrijaskih klastita katirana kokrigingom, a seizmički atribut snage refleksije korišten je kao sekundarni podatak. U ostalim litofacijesima korišten je običan kriging.

4. TABLIČNI PRIKAZ DOSADAŠNJIH REZULTATA

Tablica 1 prikazuje kratak pregled depresija te polja unutar tih depresija, njihovu starost, litologiju, te determinističke geostatističke metode kojima se kartirala poroznost. Polja unutar Savske depresije su Ivanić i Kloštar sa pješčenjačkim ležištima gornjeg miocena. Polja analizirana u Dravskoj depresiji su Stari Gradac-Barcs Nyugat, Molve i Beničanci. Starost ležišta u polju Stari Gradac-Barcs Nyugat i Molve je u rasponu od paleozoika do kenozoika, a u Beničancima samo kenozojska. U Starome Gradcu je geostatistikom kartiran samo dio ležišta u badenskim klastitima, dok su u polju Molve kartirani svi litofacijesi od paleozoika do kenozoika, tj. metavulkaniti, kvarciti, dolomiti te breče. Starost ležišta u polju Beničanci je badenska, a litološki to su breče.

5. PRIMJER USPOREDBE KARATA DEBLJINA SLOJA INTERPOLIRANIH INVERZKOM UDALJENOŠĆU I KRIGINGOM TE PREDNOSTI GEOSTATISTIKE

Kako bi se napravilo kartiranje, koje bi ujedno bilo i ogledni primjer uporabe determinističkih geostatističkih interpolacijskih metoda u usporedbi s jednostavnijim algoritmima, generiran je skup točkastih podataka. Oni su interpolirani programom SURFER 8. Skup sadrži 25

mjerenja koji po svojim obilježjima: a) zemljopisno pripadaju sjeverozapadnom dijelu Savske depresije, b) sadrži točkaste podatke o debljinama sloja u granicama maksimalne i minimalne vrijednosti kakve su približno utvrđene u pješčenjačkim ležištima Savske depresije.

5.1. Karta debljina sloja interpolirana inverznom udaljenošću

Na temelju ulaznih podataka metodom inverzne udaljenosti izrađena je karta debljina sloja (slika 6). Pretpostavljen je izotropni radijus pretraživanja podataka unutar mreže. Vrijednost eksponenta udaljenosti postavljena je na 2, jer je to najčešće rabljena vrijednost kod ove metode u većini primjena u geoznanostima. Metodom kros-validacije izračunata je kvadratna pogreška procjene (MSE) te dan najpodcjenjeniji (engl. most under-estimated data) te najprecjenjeniji (engl. most over-estimated data) podatak, izdvojeni tijekom kros-validacije.

Rezultati krosvalidacije su:

- kvadratna pogreška varijable „debljine“ 4 020,68;
- Korijen srednje kvadratne pogreške varijable „debljine“ 63,41;
- Najpodcjenjeniji podatak nalazi se na $X=6376000$, $Y=5068000$ gdje je mjerena vrijednost varijable „debljine“ $Z=90$, a procijenjena vrijednost varijable „debljine“ $E=46,30$;
- Najprecjenjeniji podatak nalazi se na $X=6376050$, $Y=5068050$, gdje je mjerena vrijednost varijable „debljine“ $Z=45$, a procijenjena vrijednost varijable „debljine“ $E=85,01$.

5.2. Karta debljine sloja interpolirana običnim krigingom

Na temelju ulaznih podataka (vrijednosti po X, Y, Z osima) napravljena je karta debljina sloja metodom kriginga (slika 7). Stavljene su najjednostavniji linearni model variograma s nagibom 1. Metodom krosvalidacije izračunata je kvadratna pogreška procjene (MSE) te ponovno najpodcjenjeniji (engl. most under-estimated data) te najprecjenjeniji (eng. most over-estimated data) podatak kod izvođenja kros-validacije.

Rezultati krosvalidacije su:

- Srednja kvadratna pogreška varijable „debljine“ 3980,83;

Tablica 1. Tablični pregled starosti, litologije i uporaobljene geostatističke determinističke metode za kartiranje poroznosti ležišta ²⁰				
NAZIV DEPRESIJE	NAZIV POLJA	STAROST LEŽIŠTA	LITOLOGIJA	METODA
Savska depresija	Ivanić	gornji panon do donji pont	pješčenjaci	običan kriging
	Kloštar	paleozoik do donji pont	pješčenjaci	običan i indikatorski kriging
Dravska depresija	Stari Gradac-Barcs Nyugat	baden	breče	običan kriging
	Molve (litofacijes I)	baden	breče	običan kriging
	Molve (litofacijes II)	gornji trijas	dolomiti (raspucani)	običan kriging
	Molve (litofacijes III)	donji trijas	kvarciti (frakturirani)	običan kokriging
	Molve (litofacijes IV)	ordovicij	metavulkaniti (frakturirani)	običan kokriging
	Beničanci	baden	breče	običan kriging, običan kokriging

- b) Korijen srednje kvadratne pogreške varijable „debljine“ 63,09;
- c) Najpodcjenjeniji podatak nalazi se na $X=6376000$, $Y=5068000$ gdje je mjerena vrijednost varijable „debljine“ $Z=90$, a procijenjena vrijednost varijable „debljine“ $E=46,01$;
- d) Najprecijenjeniji podatak nalazi se na $X=6376050$, $Y=5068050$ gdje je mjerena vrijednost varijable „debljine“ $Z=45$, a procijenjena vrijednost varijable „debljine“ $E=83,64$.

6. PREGLED REZULTATA I ZAKLJUČAK

Dan je primjer tri najčešće, matematički jednostavnije, metode kartiranja (metoda inverzne udaljenosti, najbližeg susjedstva te pokrene sredine). Karta poroznosti dobivena metodom inverzne udaljenosti pokazala se najuspješnijom. Ta metoda ujedno je i najčešća alternativa primjeni geostatistike, posebno kada postoji premali broj ulaznih podataka za izradu variogramске analize. Što se tiče primjene geostatistike, prikazani su dosada objavljeni rezultati s polja Savske i Dravske depresije. Na kartiranim ležištima spomenutih polja starost se kretala od paleozoika do kenozoika (gornjega miocena), a litološki sastav varirao je od metavulkanita, kvarcita, dolomita, breča do pješčenjaka. Ležišta Savske depresije obilježavao je homogeniji litološki sastav (pješčenjaci) u odnosu na ležišta Dravske depresije (klastiti, metamorfiti i magmatiti). Analogno tome, za ležišta Savske depresije je bilo i jednostavnije preporučiti jednu metodu kartiranja kao općenito najprimjereniju (obični kriging). Zbog heterogenosti ležišne litologije u Dravskoj depresije, naročito u zoni polja Molve, bila je naglašena važnost primjene seizmičkog atributa kao sekundarne varijable, naravno tamo gdje se mogla uspostaviti značajna korelacija s primarnom.

U drugom dijelu su napravljene dvije karte debljina sloja u programu SURFER 8 na imaginarnom skupu od 25 podataka, koji po vrijednostima koordinata (X,Y), ali i približnih ležišnih debljina, pripada prostoru Savske depresije. Za izradu karata korištene su metode inverzne udaljenosti i kriginga. Na temelju vizualne procjene dobivenih karata odmah se dalo naslutiti kako je i u ovom slučaju metoda kriginga bila primjerenija jer je pokazivala određeni trend (pružanje istih vrijednosti izolinija sjever-jug, te trend smanjivanja debljina prema zapadu) u rasporedu debljine koji se nije mogao jasno vidjeti na karti dobivenoj inverznom udaljenošću. Uspoređujući rezultate kros-validacije također je vidljivo da je metoda kriginga imala nižu vrijednost srednje kvadratne pogreške odnosno regionalno bolju procjenu tražene varijable. Na temelju prikazanih primjera može se zaključiti kako je kod kartiranja skupova od petnaest i više podataka gotovo uvijek bolje koristiti geostatističke metode interpolacije kako bi se dobili precizniji uvidi u strukturne i stratigrafske oblike na dubinskim geološkim kartama, odnosno u razdiobu geoloških varijabli ležišta ugljikovodika.

ZAHVALA

Prikazani rezultati, podatci i sinteze načinjeni su i kao dio istraživanja na projektu MZOŠ-a broj 195-1951293-0237 naslovljenom „Stratigrafska i geomatemička istraživanja naftnogeoloških sustava u Hrvatskoj“.



Autori:

Ena Husanović, Marka Marojice 23, 20000 Dubrovnik
Dopisni autor: Ena Husanović, ena.husanovic@yahoo.com

Tomislav Malvić, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb
INA-Industrija nafte d.d., Sektor za geologiju i upravljanje ležištima, Šubiceva 29, 10000 Zagreb

UDK : 550.8 : 553.982 : 551.4 (497.5)

550.8	geološka istraživanja
553.982	ležišta ugljikovodika
551.4	kartografija
(497.5)	R Hrvatska, Dravska depresija, Savska depresija