

History of geostatistical analyses performed in the Croatian part of the Pannonian Basin System

T. Malvić

REVIEW

Development of geostatistics, applied in the analyses of the hydrocarbon reservoir in Croatia, can be followed through four main stages. The first included variogram analysis in one dimension mostly performed in the area of the Bjelovar Subdepression. The second encompassed Simple and Ordinary Kriging techniques for porosity mapping, the first cokriging map and calculation of mean square error as validation tool for maps. It was followed by work on application of "jack-knifing" sampling technique and making algorithm for Lagrange multiplier estimation. The last stage was period of work with Indicator Kriging for lithofacies mapping, and using of simulation (Gaussian and Indicator) mostly for estimation of zonal uncertainty. The selection of reservoir variables applicable for geostatistical mapping mostly included porosity (variable with theoretically normal distribution) and thickness (with normal distribution in special cases). Geostatistical maps are the best visual outcomes for reservoir properties when 20 or more hard data is available. This limit often can be reduced on datasets of 10 points when secondary variable is available.

Key words: geostatistics, kriging, cokriging, simulations, Pannonian Basin System, Neogene, Croatia

1. INTRODUCTION IN SET OF GEOSTATISTICAL ANALYSES PERFORMED IN THE CROATIAN PART (CPBS) OF PANNONIAN BASIN SYSTEM (PBS)

The different geomathematical, mostly geostatistical analyses, had been performed in two largest Croatian depressions, i.e. in the Sava and Drava Depressions. The most of the geostatistical calculations had been based on 10-25 data points, also including the descriptive statistical analyses. The analysed localities in the Sava Depres-

sion were the Kloštar, Ivanić and Okoli Fields, and, in the Drava Depression, the Stari Gradac-Barcs Nyugat, Molve, Beničanci and Galovac-Pavljani (Figure 1.1). Particularly, the entire Bjelovar Subdepression had been covered with 1D vertical variograms of porosity calculated in the numerous exploration and production wells.

In the Sava Depression, the Kloštar Field is the most comprehensive geostatistical (and geomathematical) analysed fields. The results are published in numerous references.^{1, 2, 7, 12, 13, 14, 17} The results obtained in the Ivanić Field are given in one reference.⁴

In the Drava Depression the geostatistical analyses had been performed for Beničanci in the eastern part and Stari Gradac-Barcs Nyugat and Molve Fields in the western. The results had been published into numerous references.^{3, 5, 8, 9, 10, 11, 15, 16}

2. THE FIRST PERIOD OF EARLY RESEARCHING UNTIL 2003

The very first variogram sets in CPBS had been made between 2002 and 2003 and included the set of vertical variograms for porosity measurements collected in the Bjelovar Subdepression (Figure 2.1).

The data had been collected from Badenian, Pannonian and Pontian sediments. In the Badenian the largest porosity and variogram ranges are obtained in the Galovac-Pavljani field (Figure 2.2), where values average are respectively 7.99% and 0.64 m. Pannonian sandstones (Figure 2.3) are characterised with significant total thickness of poor permeable or impermeable sediments. It is why for relatively high average porosity (23.3%), low average range had been calculated (0.57 m). Younger Lower Pontian sandstones (Peplana Sandstones) have generally more uniform lithology than older

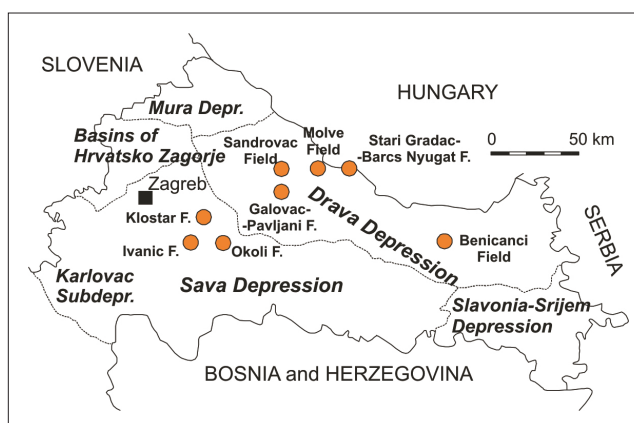


Fig. 1.1. Croatian part of the Pannonian Basin System and locations with the results of geostatistical analyses presented in this review

Sl. 1.1. Hrvatski dio Panonskoga bazenskoga sustava te lokacije za koje su rezultati geostatističkih analiza prikazani u ovome pregledu

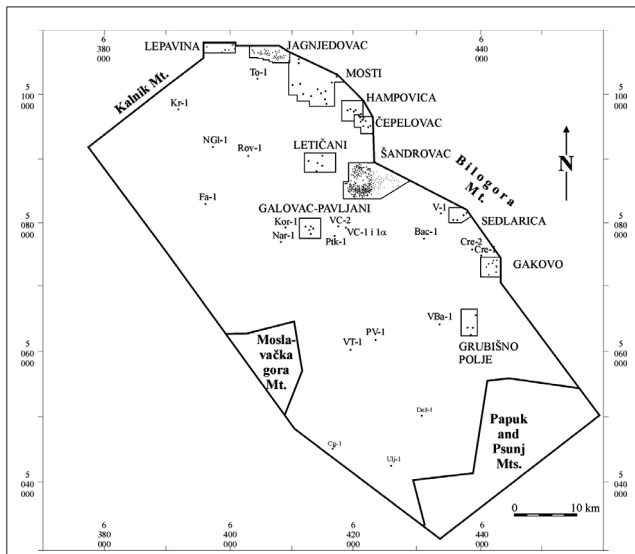


Fig. 2.1. Location map of the Bjelovar Subdepression (from⁶)
Sl. 2.1. Položajna karta Bjelovarske subdepresije (iz⁶)

Lower Pontian sandstones (Poljana Sandstones). The most favourable reservoir properties are described in the Šandrovac field, where are documented generally the highest values of 29.99% and 0.95 m (Figure 2.4).

3. THE SECOND PERIOD OF INTERPOLATION ALGORITHMS TESTING (2003-2008)

The very first time variograms that were applied for geostatistical interpolations in the CPBS and related maps was done in 2003 (ref. ¹¹), in the Drava Depression comparing results of Inverse Distance Weighting, Ordinary Kriging and Collocated Cokriging method/techniques. The accuracy of particular approach is determined by the geological evaluation of the isoporosity line shapes and calculation of the mean square error (MSE). As the most appropriate map for porosity distribution is calculated used Collocated Cokriging maps (Figures 3.1).

The similar comparison had been done in the Lower Pontian reservoir of the Kloštar Field, using Ordinary Kriging, Moving Average, Inverse Distance Weighting and Nearest Neighbour methods/techniques. MSE value obtained by Ordinary Kriging (Figure 3.2) was 366.93, Moving Average 369.26, Inverse Distance Weighting 371.97 and Nearest Neighbour 389.00. The relatively low differences resulted from relatively small input dataset, which can not reflect the true advantage of using exact interpolators, especially kriging.

The most comprehensive interpolation, regarding available point data, had been performed in the Late Pannonian Ivanić Field sandstone reservoir. There were collected 82 point data of porosity with average porosity 15.13% and variance 16.41 (ref. ⁴). The obtained and approximated variograms are given in Figures 3.3 and 3.4. The porosity map had been interpolated using Ordinary Kriging technique, clearly outlining the strike of the main depositional channel filled by medium and fine-grained sand during Upper Pannonian stage. The direction of channel follows the isoporosity lines with values 15% and larger (Figure 3.5).

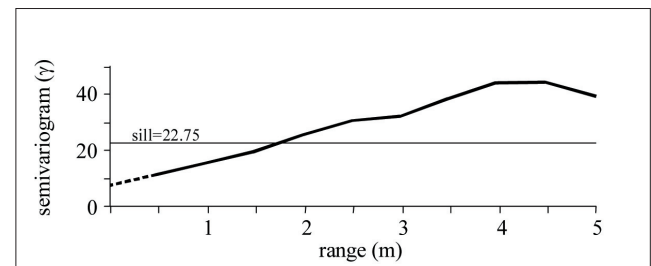


Fig. 2.2. Experimental variogram in the Galovac-Pavljani Field Badenian reservoir (from⁶)
Sl. 2.2. Eksperimentalni variogram u polju Galovac-Pavljani izračunati u badenskom ležištu (iz⁶)

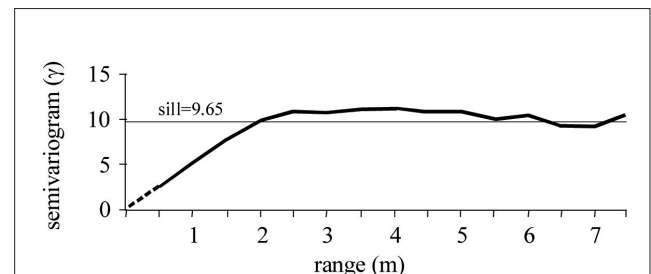


Fig. 2.3. Experimental variogram in the Galovac-Pavljani Field Late Pannonian reservoir (from⁶)
Sl. 2.3. Eksperimentalni variogram u polju Galovac-Pavljani izračunati u gornjopanskom ležištu (iz⁶)

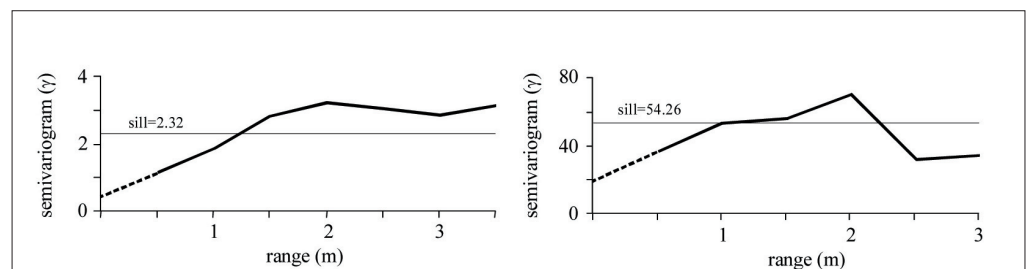


Fig. 2.4. Experimental variograms in the Šandrovac Field Early Pontian reservoir (from⁶)
Sl. 2.4. Eksperimentalni variogram u polju Šandrovac izračunati u donjopontskom ležištu (iz⁶)

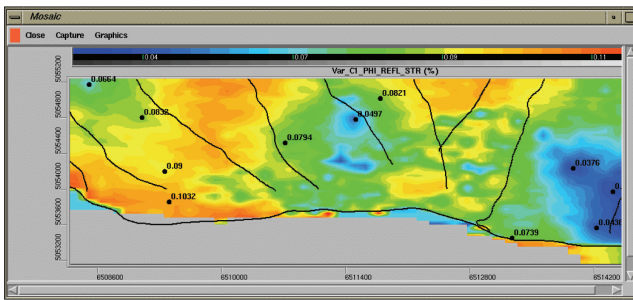


Fig. 3.1. Porosity distribution in the Beničanci Field Badenian reservoir interpolated by Collocated Cokriging. Mean square error of estimation is 2.185 (from^{10, 11})

Sl. 3.1. Razdioba poroznosti u polju Beničanci unutar badenskog ležišta interpolirana kolociranim kokrigingom. Srednja kvadratna pogreška procjene je 2,185 (iz^{10, 11}).

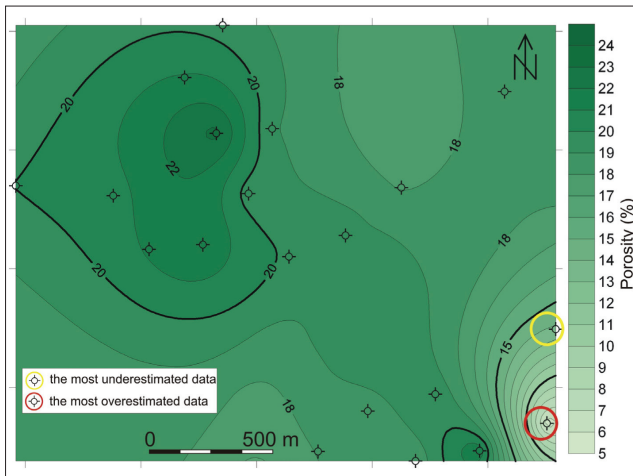


Fig. 3.2. Porosity distribution in the Kloštar Field Late Pannonian reservoir interpolated by Ordinary Kriging. Mean square error of estimation is 366.93 (from²).

Sl. 3.2. Karta poroznosti u polju Kloštar u gornjopanonskom ležištu interpolirana običnim krigingom. Srednja kvadratna pogreška procjene je 366.93 (iz²).

4. THE THIRD PERIOD OF IMPROVEMENTS IN GEOSTATISTICAL THEORY APPLIED IN THE CPBS (2008-2009)

There are two theoretical papers representing the main improvements in theoretical geostatistical work done in ref.⁹ published application of jack-knifing algorithm on the small dataset (up to 15 point data) in the CPBS. Later, Malvić and Balić⁷ analysed the principle of calculation of Lagrange coefficient into Ordinary Kriging equations, and proposed algorithm for its calculation.

4.1. Jack-knifing methodology applied onto small porosity dataset in the CPBS

Variogram analysis is a standard tool in the spatial analysis of hydrocarbon reservoir parameters, which include several sources of uncertainties. The first reason is the imperfection of measuring devices. The second (and more frequent) is the result of a (too) small number of wells and their irregular pattern, insufficient for reliable analysis of spatial dependence. Such source of uncertainty can be empirically quantified using a method called 'jack-knifing', example of which is given in ref.⁹ for the Stari Gradac-Barcs Nyugat Field. In that case omnidirectional experimental semivariogram has been calculated for data derived from clastics lithofacies of Badenian age, approximated by a spherical model. Set of "n" 'jack-knifed' experimental semivariograms were calculated. Based on this set, error bars (Figure 4.1) can be graphically constructed around each point of the experimental semivariogram.

It made possible to observe a particular well's name as characterised by the highest influence on the error bars. There such locations are spatially outlined well zones in the Badenian reservoir of the Stari Gradac-Barcs Nyugat Field where the lack of data has the most influence (Figure 4.2). Those are zones that lead to the highest estimation error using the spatial model.

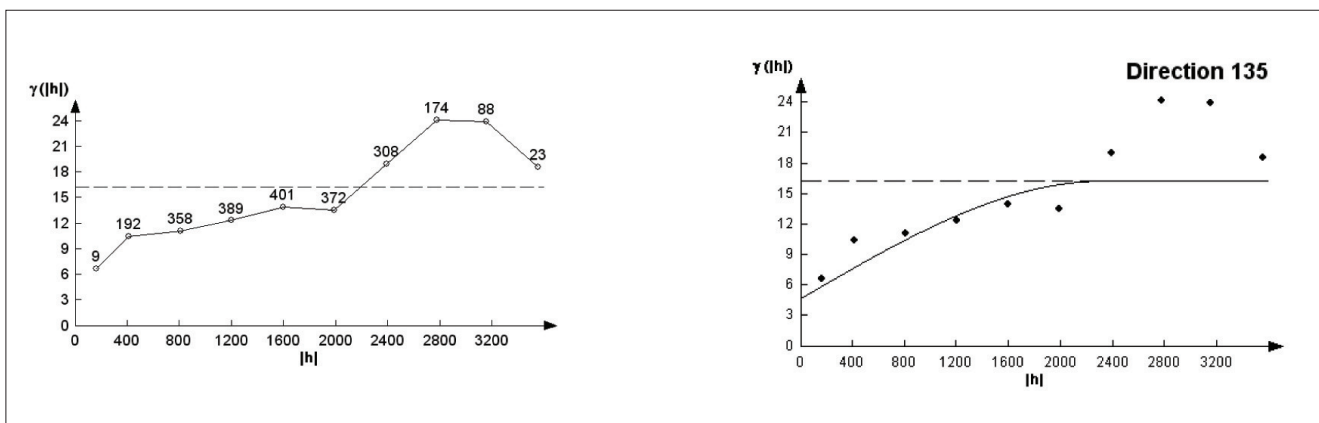


Fig. 3.3. Variograms of the primary axis of the Late Pannonian reservoir in the Ivanić Field (from⁴)

Sl. 3.3. Variogrami na primarnoj osi za gornjopanonsko ležište u polju Ivanić (iz⁴)

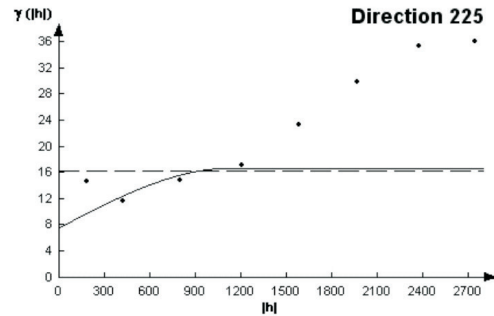
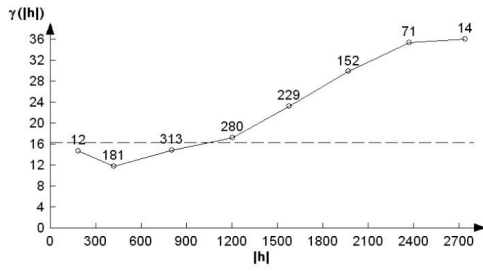


Fig. 3.4. Variograms of the secondary axis of the Late Pannonian reservoir in the Ivanić Field (from⁴)
 Fig. 3.4. Variograms of the secondary axis of the Late Pannonian reservoir in the Ivanić Field (from⁴)

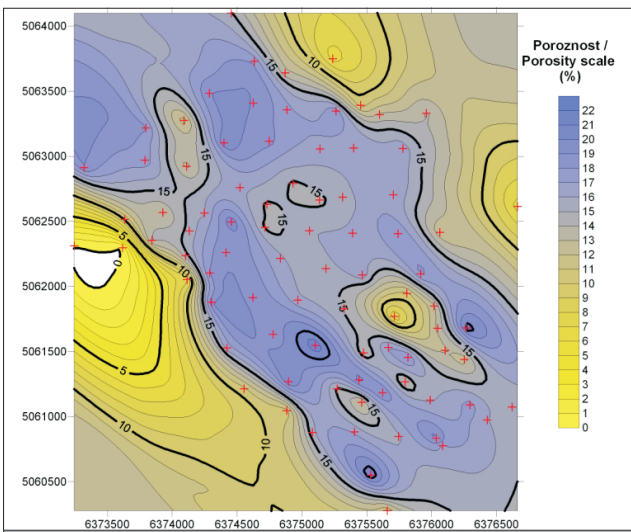


Fig. 3.5. Porosity map of the Late Pannonian reservoir in the Ivanić Field (from⁴)
 Sl. 3.5. Karta poroznosti gornjopanonskog ležišta u polju Ivanić (iz⁴)

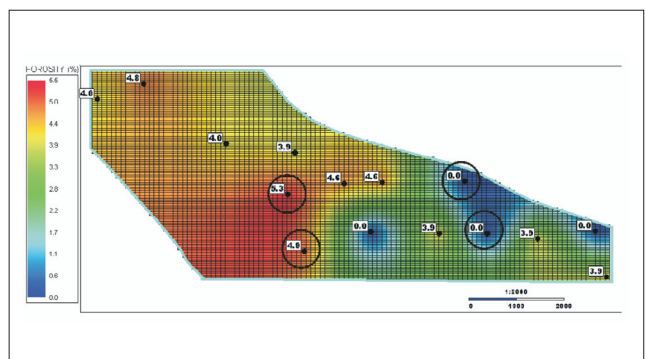


Fig. 4.2. Location of well data with the highest influence on "jack-knifed" semivariogram (from⁷)
 Sl. 4.2. Smještaj bušotina koje su imale najveći utjecaj na izračun "jack-knifed" variograma (iz⁹)

4.2. Algorithm for calculation of Lagrange multiplier in Ordinary Kriging equations

The Lagrange multiplier allows the minimization of variance in Ordinary Kriging. So the knowing this values in the kriging matrices, and way how to calculate it, gives the real advantage in the understanding of interpolation for each particular dataset. The role of multiplier has been shown in ref.⁷ as comparisons of estimation in point (Figure 4.3) using Simple and Ordinary Kriging. Value of -0.931 9 for Lagrange multiplier resulted in the lower kriging variance for Ordinary (6.70 m²) than Simple (7.63 m²) Kriging.

Another test included calculation of Ordinary Kriging matrices several times for the single grid of 4 midpoints of the box lines and unknown value in the centre (ref.⁷). Using of experimental variogram approximated by a spherical model, sill 1, range 200 m and without nugget effect, the Lagrange values of 0.06, 0.9 and -0.9 had been tested. The minimal variance was obtained for the first one. The algorithm for estimation of Lagrange value that corresponds to minimal kriging variance had been given in Figure 4.4.

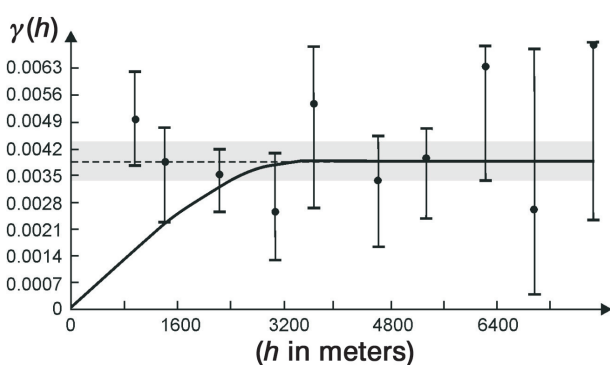
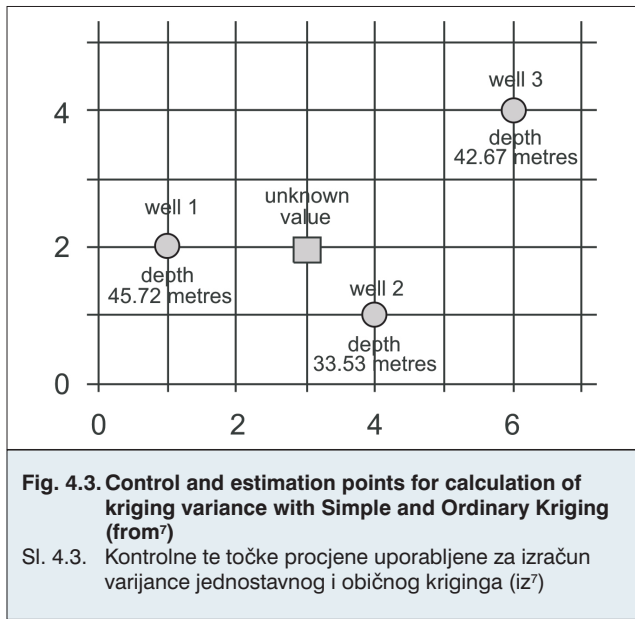


Fig. 4.1. "Jack-knifed" semivariogram of the Badenian clastics lithofacies in the Stari Gradac-Barcs Nyugat Field (from⁹)
 Sl. 4.1 "Jack-knifed" semivariogram podataka iz klasičnog litofacijesa badenske starosti polja Stari Gradac-Barcs Nyugat (iz⁹)

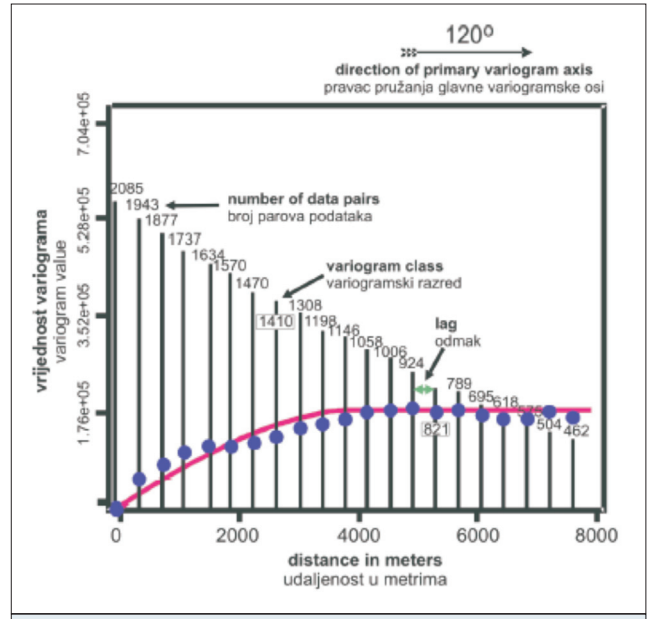
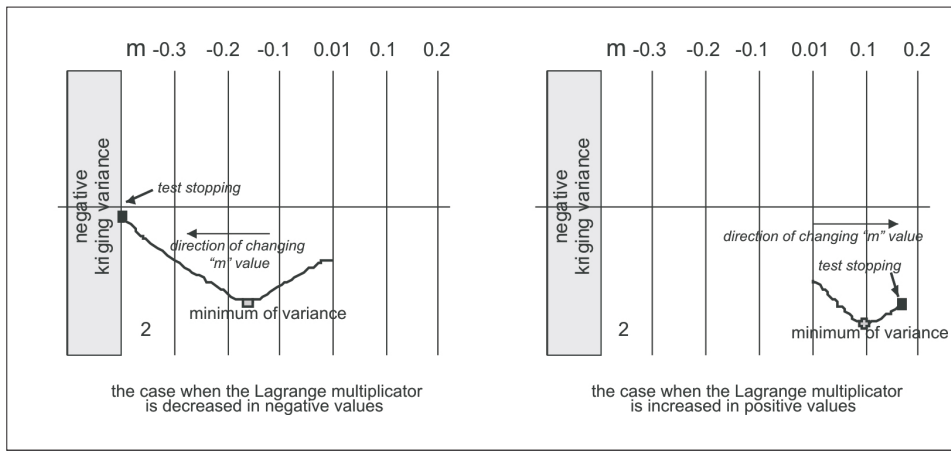


5. THE FOURTH PERIOD OF ADVANCE APPLICATION OF COKRIGING; INDICATOR KRIGING AND SIMULATIONS (FROM 2009)

This period included application of other geostatistical deterministical techniques than Simple and Ordinary Kriging. It is specially characterised with extensive application of stochastic simulation, mostly for interpretation of depositional features and reservoir's lithofacies.

5.1. Application of cokriging in reservoir with secondary porosity

Cokriging as mapping method showed its full advantages in the analysis of one of the reservoir lithofacies into in the Molve Field. The heterogeneity of reservoirs asked separately observation of even four such lithofacies. Into



lithofacies "III" of Lower Triassic age (lithologically mostly quartzites) was established correlation between porosity as primary and reflection strength as secondary variable (refs.^{8,10}) with R=0.51. Correlation is statistically significance, what was confirmed using t-test. How secondary variable was sampled at much more grid nodes than primary (2500 vs. 16 points), anisotropic experimental variogram is modelled for secondary dataset (Figure 5.1). So, variogram parameters could be much better estimated.

For primary variogram axis of 120° lag spacing was about 350 m, range 4 000 m, and spherical approximation had been done. Range of secondary axis was 2 900 m. Using that variograms the porosity was interpolated by Ordinary Cokriging technique (Figure 5.2).

5.2. Application of Indicator Kriging for reservoir's lithofacies mapping

Indicator Kriging is specific interpolation technique based on data transformation, i.e. applied on non-linear transformed data. Novak Zelenika et al.¹⁴ presented indicator analysis made for from Upper Miocene reservoir porosity data in the Kloštar Field (Figure 5.3). Each cutoff had been analysed with own variogram model, which was conse-

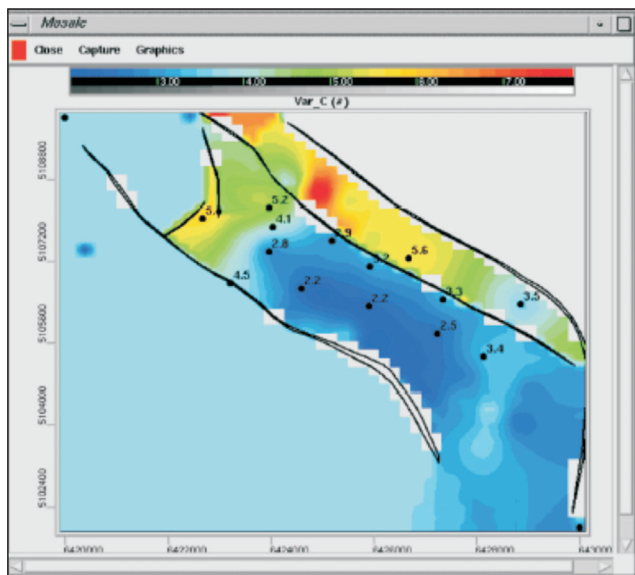


Fig. 5.2. Porosity interpolation obtained by Ordinary Cokriging in lithofacies III of the Molve Field (from^{8,10})

Sl. 5.2. Poroznost interpolirana običnim kokrigingom u litofacijesu "III" u polju Molve (iz^{8, 10})

quently used for obtaining probability maps (Figure 5.4). Such maps were basis for interpretation of present-day strike of different reservoir's lithofacies, from which could be concluded about palaeo-transport directions and depositional environment during Late Pannonian and Early Pontian on the Kloštar structure.

5.3. Simultaneous application of the Indicator Kriging (IK), Sequential Indicator Simulation (SIS) and Sequential Gaussian Simulation (SGS)

Such simultaneous analysis and comparison of deterministical and stochastic results had been again done on the data from the Kloštar Field (refs.^{12,13}). Two similar datasets were available; one was collected into Late Pannonian (23 data) and other in Early Pontian (19 wells) reservoir sandstone "series". Here are given results from ref.¹², obtained for thickness, porosity and depth as selected variables. The porosity had been estimated with Sequential Gaussian Simulations to get insight in the area of the maximum reservoir heterogeneity as well as general directions of the highest porosities that correspond with strike of the main depositional channel (Figure 5.5). The similar simulations are done for thickness and depth (Figures 5.6

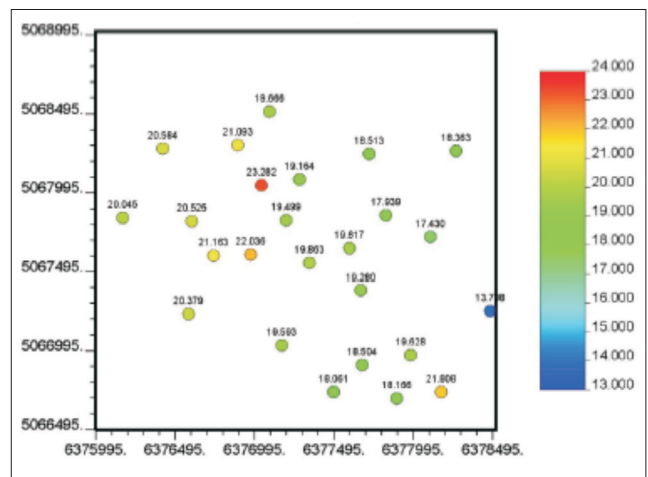


Fig. 5.3. Hard-data porosity value map of 25 wells in Kloštar Field, including 6 artificial hard-data (from¹⁴)

Sl. 5.3. Rasporod 25 točkastih ("čvrstih") podataka poroznosti u polju Kloštar u kojima je uključeno i 6 "umjetno" generiranih vrijednosti (iz¹⁴)

and 5.7), with goal to confirm assumptions derived from porosity modelling.

One of the important post-processing results that could be derived from set of realizations is new histogram (Figure 5.8) of mapped variable. In simulation, all simulated values are treated as the hard-data, and it is valid sequentially what means that during simulation number of "hard" data is continuously increased. Consequently, at the end of that process the histogram can be re-calculated from the much more data than it was available in the input set.

A stochastic approach is especially useful when the amount of input data is moderate, i.e. larger than minimum for application of geostatistics. In the most of stochastic analyses in the CPBS that varies between 18 and 23 input points, when consequently variogram models include large uncertainties. Using stochastic maps for outlining zonal uncertainties can significantly improve further analyses (not necessarily geostatistical). When variograms have a large nugget the stochastic approach

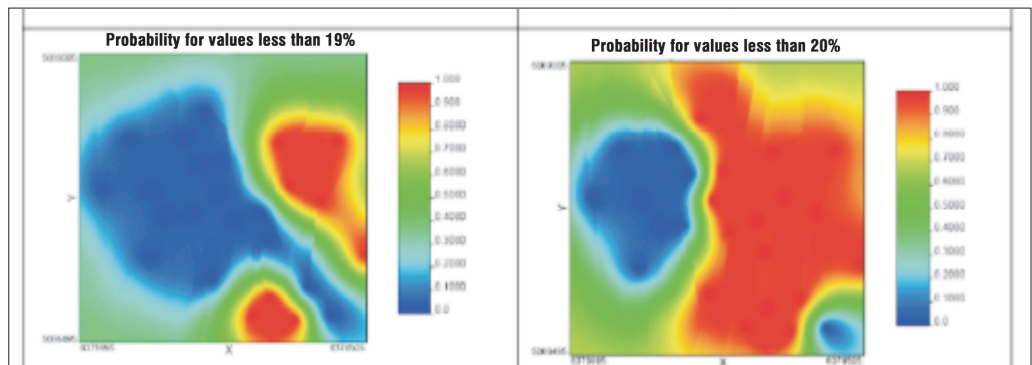


Fig. 5.4. Probability maps for porosity cutoffs (14, 18, 19, 20, 22%). Probability '1' means that cell's value is lesser than selected cutoff (from¹⁴)

Sl. 5.4. Karte vjerojatnosti za granične vrijednosti poroznosti (14, 18, 19, 20, 22%). Vjerojatnost '1' znači da je vrijednost ćelije manja od odabrane granične vrijednosti (iz¹⁴)

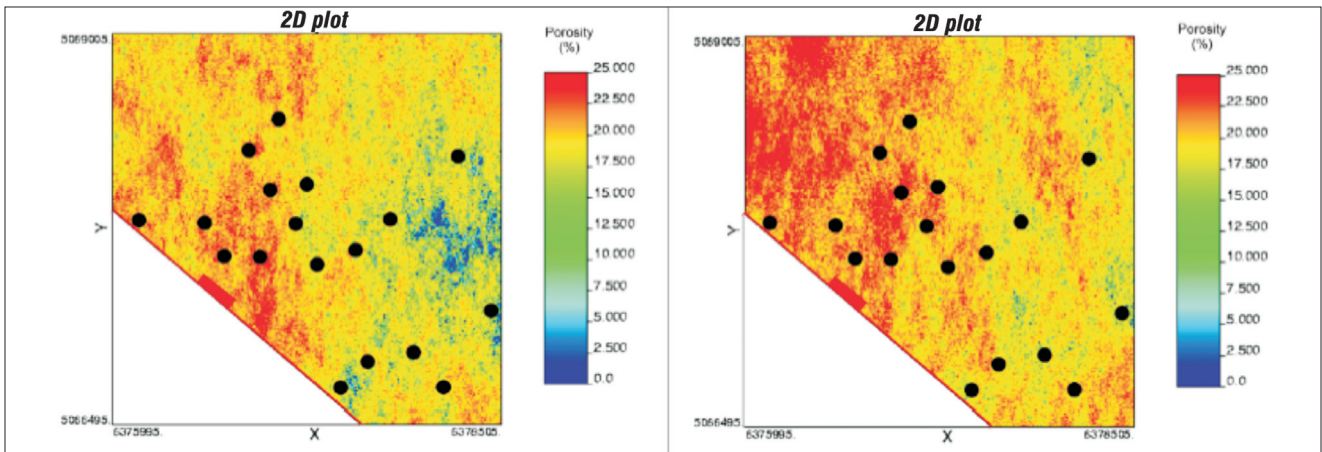


Fig. 5.5. The 1st (left) and 100th (right) realizations for porosity (scale 0-25%) obtained by SGS in the Early Pontian reservoir (from¹²)
 Sl. 5.5. 1. (lijevo) i 100. (desno) realizacija poroznosti (interval 0-25%) dobivene uporabom SGS-a u donjopontskom ležištu (iz¹²)

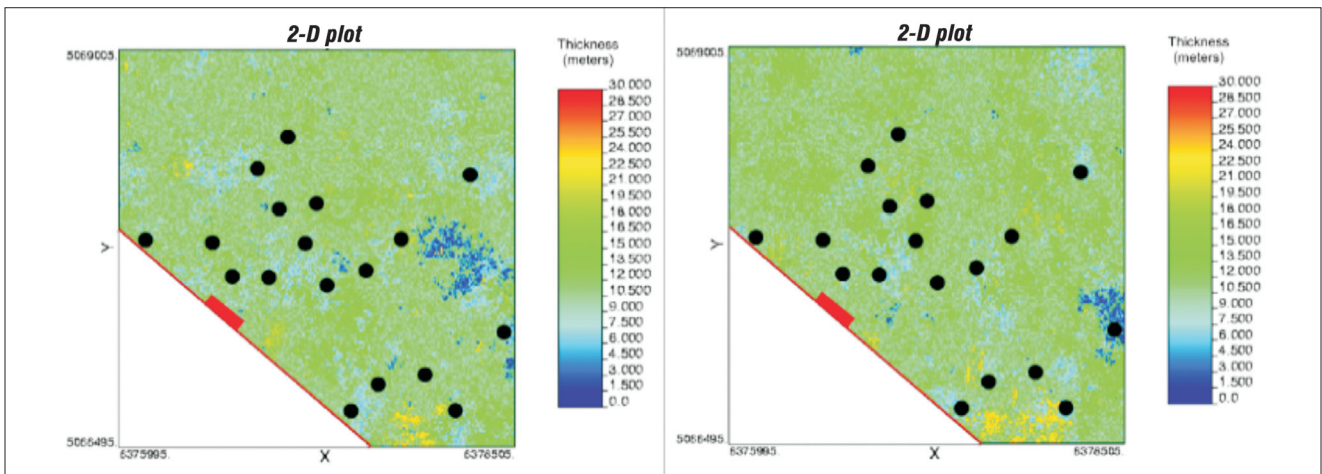


Fig. 5.6. The 1st (left) and 100th (right) realizations for thickness (scale 0-30m) obtained by SGS in the Early Pontian reservoir (from¹²)

Sl. 5.6. 1. (lijevo) i 100. (desno) realizacija debljine (interval 0-30 m) dobivene uporabom SGS-a u donjopontskom ležištu (iz¹²)

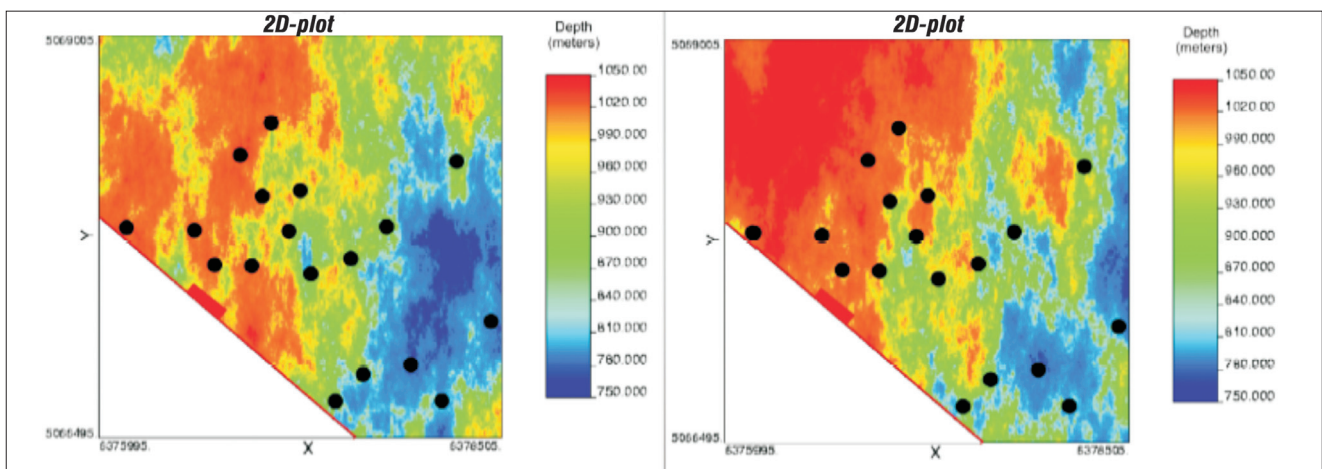


Fig. 5.7. The 1st (left) and 100th (right) realizations for depth (scale 600-1100m) obtained by SGS in the Early Pontian reservoir (from¹²)

Sl. 5.7. 1. (lijevo) i 100. (desno) realizacija dubine (600 - 1 100 m) dobivene uporabom SGS-a u donjopontskom ležištu (iz¹²)

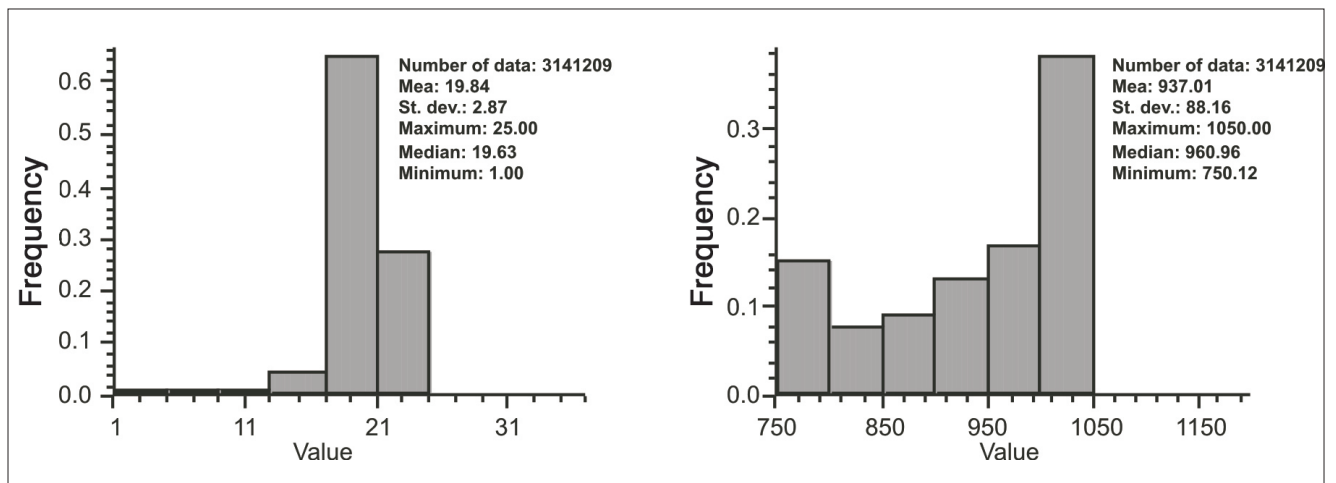


Fig. 5.8. Histogram of porosity (left) and depth (right) values calculated from 100 SGS realizations for Early Pontian reservoir of the Kloštar Field (from¹²)

Sl. 5.8. Histogram poroznosti (lijevo) i dubine (desno) izračunat iz 100 SGS realizacija načinjenih u donjopontskom ležišta polja Kloštar (iz¹²)

will partially remove the "bull's-eye" effect, like it is visible on Figures 5.5 and 5.7.

6. CONCLUSIONS

In presented examples can be easily followed development of geostatistics through four main stages of their application in the analyses of the hydrocarbon reservoir in the CPBS:

- The first stage included simple and comprehensive application of variogram analysis (modelling) in the one dimension, mostly performed in the area of the Bjelovar Subdepression.
- The second period was characterised by using of Simple and Ordinary Kriging techniques for mapping, mostly for interpolation of reservoir porosities. Also, this was time when the first cokriging maps had been done and, for different geostatistical and non-geostatistical methods/techniques applied for the same datasets, mean square error had been calculated as way to choose "the most appropriate" map.
- The third period encompassed the work on theory of "jack-knifing" sampling technique application and defining of areas with the largest uncertainties in variogram modelling and mapping. Also, the algorithm for estimation of Lagrange multiplier value in the Ordinary Kriging equations had been constructed.
- The last, fourth stage, was period of work with "non-linear" technique of Indicator Kriging, and using of simulations (Gaussian and Indicator).

Any kind of presented geostatistical analyses always ask for carefully selection of geological variable that wish to be mapped. It means that such variable need to be measured in statistically significant number of data, correctly averaged and has the property of normal distribution. The exceptions are indicator methods that are designed for non-normal distribution. Also, log-normal distribution could be often processed into normal distri-

bution. In the case of indicator methods, i.e. Indicator Kriging and Sequential Indicator Simulation, there is need for careful selection of cutoff values. With too many classes (e.g., more than 10) of mapped variable, processing time drastically increases, requiring some minimum size of input dataset (e.g., more than 30). On contrary, using just few cutoffs (less than 5) can result in impossibility to observe some geological features of the mapped variable. Definition of classes based on cutoffs that approximately follow normal distribution is useful, because it makes possible to calculate the descriptive statistics of input data assuming Gaussian distribution and improve interpretation of indicator maps that are regularly based only on 3rd order stationarity.

Based on experience (i.e., examples presented in this paper), geostatistics can be the easiest applied for reservoir porosity or thickness mapping. Porosity is "by definition" defined with normal distribution. However, this property is also valid for thickness in some special situation, e.g., when it is regularly sampled in palaeo-environments of special shapes. The smallest dataset that could be geostatistically mapped can be also derived from experience. The datasets lesser than 10 points can not be object of variogram analysis, so it means that they can be appropriate mapped only with mathematically simpler methods like Inverse Distance Weighting or applying zonal estimation like Nearest Neighbour. In the range of 10-20 points the Ordinary or Simple Kriging can be regularly applied, but knowing that variograms still include significant uncertainties around some experimental points. Even then, the mean square error of estimation will be the lowest for geostatistical methods. However, Indicator Kriging, based on non-linear transformation of input data (more than 5) will be applied when dataset has about 20 or more points. For larger datasets the geostatistical approach is always primary option. Cokriging always can replace the same kriging algorithm if the correlative secondary variable is available. The ex-

istence of such secondary variable even can help in using geostatistics when number of data (10-15) is questionable for kriging application.

The similar "rules of thumb" are valid for application of simulations. However, here is also the need for defining number of equiprobable realization. For the dataset with 30 or more points the abundant number of realizations (some tens or 100 in usual approach) is welcome. Such set can be easily post-processed with goal to select median, the smallest, the largest etc. realization (based on, e.g., total sum of all estimated cells) and use it in further processes. However, in the limited datasets (10-20 points), and intention only recognizing the areas of the largest uncertainties, it is enough to calculate 5-10 realizations for such purpose.

NOTE

The most of those results are first time compiled for the invited lecture given in Department for Geology and Palaeontology at the University of Szeged, Hungary, on 9th December 2011. It was part of regular program for the subject about geostatistics, lead by Prof. Dr. János Geiger.

7. REFERENCES

- Balić, D. & Malvić, T. (2010): Ordinary Kriging as the most Appropriate Interpolation Method for Porosity in the Sava Depression Neogene Sandstone, *Naftaplin*, 30, 3, 81-90.
- 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, 27-35.
- Malvić, T. (2008a): Kriging, cokriging or stochastic simulations, and the choice between deterministic or sequential approaches, *Geologia Croatica*, 61, 1, 37-47.
- Malvić, T. (2008b): Izrada karte poroznosti krigiranjem u pješčenjačkim ležištima, primjer iz Savske depresije, *Kartografija i geoinformacije*, 7, 9, 12-19.
- 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.
- Malvić, T. (2003): Naftnogeološki odnosi i vjerojatnost pronalaska novih zaliha ugljikovodika u bjelovarskoj uleknini (Oil-Geological Relations and Probability of Discovering New Hydrocarbon Reserves in the Bjelovar Sag), University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb, 123 p.
- Malvić, T. & Balić, D. (2009): Linearnost i Lagrangeov linearni multiplikator u jednadžbama običnoga kriginga, *Nafta*, 60, 1, 31-43.
- Malvić, T., Barišić, M. & Futivić, I. (2009): Cokriging geostatistical mapping and importance of quality of seismic attribute(s), *Nafta*, 60, 5, 259-264.
- Malvić, T. & Bastaić, B. (2008): Reducing variogram uncertainties using the 'jack-knifing' method, a case study of the Stari Gradac - Barcs-Nyugat field, *Bulletin of Hungarian Geological Society (Foltani Kozlony)*, 138, 2, 165-174.
- Malvić, T. & Prskalo, S. (2008): Značenje amplitudnog atributa u predviđanju poroznosti - primjer iz Dravske depresije, *Nafta*, 59, 1, 39-51.
- Malvić, T. & Đureković, M. (2003): Application of methods: Inverse distance weighting, ordinary kriging and collocated cokriging in porosity evaluation, and comparison of results on the Beničanci and Stari Gradac fields in Croatia, *Nafta*, 54, 9, 331-340.
- Novak Zelenika, K. & Malvić, T. (2011): Stochastic simulations of dependent geological variables in sandstone reservoirs of Neogene age: A case study of Kloštar Field, Sava Depression, *Geologia Croatica*, 64, 2, 173-183.
- Novak Zelenika, K., Velić, J., Malvić, T. & Cvetković, M. (2011): Geological Variables Fitting in Normal Distribution and Application in Indicator Geostatistical Methods. In: *IAMG 2011 Conference proceedings* (Eds. Marschallinger, R., Zobl, F.), 245-251, IAMG, Salzburg.
- Novak Zelenika, K., Malvić, T. & Geiger, J. (2010): Kartiranje gornjomiocenskih pješčenjačkih facijesa metodom indikatorskog kriginga, *Nafta*, 61, 5, 225-233.
- Smoljanović, S. & Malvić, T. (2005): Improvements in reservoir characterization applying geostatistical modelling (estimation & stochastic simulations vs. standard interpolation methods), Case study from Croatia, *Nafta*, 56, 2, 57-63.
- Trgovičić, V., Babić-Puntarec, T. & Malvić, T. (2007): Application of deterministic and stochastic methods in OOIP calculation: Case study of Galovac-Pavljani field, *Naftaplin*, 25, 4, 47-60.
- Velić, J., Malvić, T. & Cvetković, M. (2011): Palinspastic reconstruction of synsedimentary tectonics of Neogene and Quaternary sediments in the Kloštar Field (Sava Depression, Pannonian Basin, Croatia), *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (ZDGG)*, 162, 2, 193-203.



Tomislav Malvić, INA-Industry of Oil Plc., Sector for Geology and Geological Engineering, Šubiceva 29, 10000 Zagreb, e-mail: tomislav.malvic@ina.hr, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Department of Geology and Geological Engineering, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Povijest geostatističkih analiza načinjenih u hrvatskom dijelu Panonskoga bazenskoga sustava

T. Malvić

PREGLEDNI ČLANAK

Razvoj geostatistike, primijenjene u ležištima ugljikovodika u Hrvatskoj, može se pratiti kroz četiri glavna razdoblja. Prvi je obuhvatio jednodimenzionalne variogramske analize načinjene u Bjelovarskoj subdepresiji. Drugo razdoblje uključilo je uporabu tehnika jednostavnoga i običnoga kriginga za kartiranje poroznosti, zatim izradu po prvi puta karte kokrigingom te izračun srednje kvadratne pogreške kao alata za provjeru "točnosti" karata. Slijedila je primjena tehnike uzorkovanja nazvane "jack-knifing" te izrada algoritma za izračun Lagrangeova multiplikatora. Zadnji period uključio je rad s indikatorskim krigingom za kartiranje litofacijesa te uporabu simulacija (Gaussovih i indikatorskih) uglavnom za određivanje nesigurnosti u pojedinačnim zonama. Odabir ležišnih varijabli koje se obično kartiraju geostatistikom najčešće uključuje poroznost (s teorijski normalnom razdiobom) te debljinu (s isto takvom razdiobom u posebnim uvjetima). Geostatističke karte predstavljaju najbolje grafičke izlaze za prikaz ležišnih obilježja kada ulazni skup obuhvaća 20 ili više "čvrstih" (mjerenih) podataka. Ta granica se može spustiti i na 10 takvih podataka u slučajevima kada postoji i sekundarna varijabla.

Cljučne riječi: geostatistika, kriging, kokriging, simulacije, Panonski bazen sustav, neogen, Hrvatska

1. UVOD U REZULTATE GEOSTATISTIČKIH ANALIZA NAČINJENIH U HRVATSKOM DIJELU (HPBS) PANONSKOGA BAZENSKOGA SUSTAVA (PBS)

Različite geomatematičke, uglavnom geostatističke analize, načinjene su u dvije najveće hrvatske depresije, tj. u Savskoj i Dravskoj depresiji. Većina geostatističkih izračuna temeljila se na 10 - 25 podataka, također obuhvativši deskriptivne statističke analize. Unutar Savske depresije analizirani su podatci prikupljeni na poljima Kloštar, Ivanić i Okoli, dok su unutar Dravske depresije to bila polja Stari Gradac-Barcs Nyugat, Molve, Beničanci i Galovac-Pavljeni (slika 1.1). Posebno treba izdvojiti područje Bjelovarske subdepresije gdje je u nizu regionalnih i proizvodnih bušotina izračunat veliki broj jednodimenzionalnih (vertikalnih) variograma poroznosti.

U Savskoj depresiji područje polja Kloštar obuhvatilo je najopsežnije geostatističke (i uopće geomatematičke) analize. Rezultati su objavljeni u brojnim radovima.^{1, 2, 7, 12, 13, 14, 17} Rezultati dobiveni u polju Ivanić su prikazani u jednom radu.⁴

U Dravskoj depresiji geostatističke analize su načinjene u polju Beničanci (istočni dio) te poljima Stari gradac-Barcs Nyugat i Molve (zapadni dio). Rezultati su objavljeni u nizu radova.^{3, 5, 8, 9, 10, 11, 15, 16}

2. PRVO RAZDOBLJE, ODNOSNO RANA ISTRAŽIVAČKA FAZA DO 2003. GODINE

Prvi skup variograma u HPBS načinjen je između 2002. i 2003. godine. Uključio je niz vertikalnih variograma

poroznosti izmjerene na različitim mjestima unutar Bjelovarske subdepresije (slika 2.1).

Ti podatci prikupljeni su u stijenama badenske, panonske i pontske starosti. Unutar badenskih su najveće poroznosti i variogramski dosezi izračunati u polju Galovac-Pavljeni (slika 2.2), gdje su iznosile 7,99% te 0,64 m. Panonski pješčenjaci (slika 2.3) obilježeni su debljinama slabo propusnih ili nepropusnih sedimenata, što je uzrokovalo da iako su zabilježene visoke prosječne poroznosti (23,3%), izračunati su mali variogramski dosezi (0,57 m). Mlađi donjopontski pješčenjaci (pješčenjaci Pepelana) imaju homogeniji sastav. Najpovoljnija ležišna svojstva opisana su u polju Šandrovac, gdje su i prosječne vrijednosti najveće (29,99% te 0,95 m; slika 2.4).

3. DRUGO RAZDOBLJE TESTIRANJA PRIMJERNOSTI INTERPOLACIJSKIH ALGORITAMA (2003.-2008.)

Prvi variogrami koji su primijenjeni za geostatističke interpolacije u HPBS-u načinjeni su 2003.¹¹ i to u području Dravske depresije gdje su uspoređeni rezultati inverzne udaljenosti, običnog kriginga i kolociranog kokriginga. Preciznost pojedinih pristupa ocjenjena je geološkom procjenom oblika linija izporoznosti te izračunom srednje kvadratne pogreške procjene (engl. skr. MSE). Kao najprimjerenija karta odabrana je ona dobivena kolociranim kokrigingom (slika 3.1).

Slična usporedba načinjena je i za podatke iz donjopontskoga ležišta u polju Kloštar, uporabom običnog kriginga, pokretne sredine, inverzne udaljenosti i najbližeg susjedstva. MSE vrijednost dobivene za

različite metode/tehnike iznosile su za kartu interpoliranu običnim krigingom (slika 3.2) 366,93, pokretnu sredinu 369,26, inverznu udaljenost 371,97 te najbliže susjedstvo 389,00. Relativno male razlike rezultat su malobrojnog ulaznog skupa koji nije mogao iskazati pravu prednost uporabe "egzaktnih" interpolatora, posebno kriginga.

Interpolacija u polju Ivanić, u gornjopanonskom pješčenjačkom ležištu, načinjena je iz (do sada) najvećeg ulaznog skupa podataka. Prikupljeno je 82 mjerenja poroznosti, uprosječena te projicirana u točke. Srednja vrijednost svih podataka iznosila je 15,13%, a varijanica 16,41.⁴ Eksperimentalni i teorijski variogrami prikazani su na slikama 3.3 i 3.4. Poroznost je interpolirana tehnikom običnoga kriginga, a karta jasno prikazuje pružanje glavnoga taložnog kanala ispunjenog srednjo i sitnozrnatim pijeskom tijekom gornjega panona. Pravac pružanja kanala prati liniju izoporoznosti s vrijednostima od 15% i većima (slika 3.5).

4. TREĆE RAZDOBLJE UNAPRIJEĐENJA GEOSTATISTIČKE TEORIJE PRIMIJENJENE U HPBS-U (2008. I 2009.)

Rezultati prikazani u ovome poglavlju objavljeni su u dva teorijska rada. Prvo su Malvić i Bastaić⁹ prikazali uporabu "jack-knifing" algoritma na malom skupu podataka (do 15 mjerenja) iz HPBS-a. Zatim su u⁷ objašnjeni principi uporabe Lagrangeova koeficijenta u jednadžbama običnoga kriginga te predloženi algoritam za njegov izračun.

4.1. "Jack-knifing" metodologija uporabljena na malome skupu podataka iz HPBS-a

Variogramska analiza predstavlja standardni alat za prostornu analizu svojstava ležišta ugljikovodika, no i dalje sadrži određene nesigurnosti koje su rezultat nekoliko uzroka. Prvi je nesavršenost mjernih uređaja. Drugi (i češći) je premali broj bušotina, tj. podataka, te njihov česti nepravilni raspored, koji ne omogućuje pouzdani izračun. Taj, drugi, izvor nesigurnosti može se empirijski kvantificirati koristeći metodu nazvanu "jack-knifing". Njezina primjena na podatcima iz polja Stari Gradac-Barcs Nyugat opisana je u⁹. Izračunat je neusmjereni eksperimentalni semivariogram za podatke prikupljene u klastitima badenske starosti, te aproksimiran sfernim modelom. Zatim je izračunat skup od "n" tzv. "jack-knifed" semivariograma, na temelju kojih je bilo moguće dobiti intervale nesigurnosti oko svake variogramске točke (slika 4.1).

Bilo je moguće odrediti pojedinačne bušotine koje su najviše utjecale na širinu razreda nesigurnosti, tj. one bušotine u polju Stari Gradac-Barcs Nyugat u čijim vrijednostima je nesigurnost bila najviše izražena (slika 4.2). Mjesta tih bušotina predstavljaju središta zone u kojima je najveća pogrješka procjene temeljene na opisanom prostornom modelu.

Lagrangeov multiplikator dodan je u jednadžbe običnoga kriginga sa svrhom minimiziranja varijance procjene. Zbog toga poznavanje te vrijednosti unutar

matrica te načina kako ju najbolje izračunati predstavlja veliku prednost prilikom interpolacije nekoga skupa podataka. Uloga uporabe multiplikatora detaljno je prikazana u radu⁷ na primjeru procjena jednostavnim i običnim krigingom za isti skup mjerenja (slika 4.3). U tom primjeru vrijednost multiplikatora od -0,931 9 rezultirala je nižom varijancom procjene kod običnoga (6,70 m²) negoli jednostavnog (7,63 m³) kriginga.

Sljedeći test uključio je nekoliko kalkulacija matrica običnog kriginga za 4 poznate vrijednosti u polovištima stranica kvadrata te nepoznatu vrijednost u njegovom središtu.⁷ Eksperimentalni variogram aproksimiran je sfernim modelom s pragom 1, dosegom 200 m te bez odstupanja. Testirane su vrijednosti Lagrangeova koeficijenta od 0,06, 0,9 i -0,9. Minimalna varijanica procjene dobivena je za prvu vrijednost. Algoritam za izračun vrijednosti koeficijenta koji će osigurati najmanju varijancu kriginga prikazan je na slici 4.4.

5. ČETVRTO RAZDOBLJE NAPREDNE PRIMJENE KOKRIGINGA, INDIKATORSKOG KRIGINGA I SIMULACIJA (OD 2009.)

To razdoblje uključilo je primjenu drugih geostatističkih tehnika od ranije opisanih. Posebno je obilježeno širokom uporabom stohastičkih simulacija, poglavito kod interpretacije taložnih okoliša i ležišnih litofacijesa.

5.1. Primjena kokriginga u ležištima obilježenima sekundarnom poroznošću

Metoda kokriginga pokazala je svoju prednost kod analize jednoga ležišnog litofacijesa u polju Molve. Heterogenost cijeloga ležišta zahtijeva je pojedinačno kartiranje svakoga od četiri litofacijesa. Unutar litofacijesa "III" donjotrijaske starosti (litološki uglavnom sastavljenom od kvarcita) izračunata je korelacija s vrijednošću R=0,51 između varijabli poroznosti (kao primarne) te snage refleksije (kao sekundarne)^{8,10}. Dokazano je kako je korelacija statistički značajna uporabom t-testa. Kako je sekundarna varijabla bila uzorkovana na puno više točaka unutar mreže negoli primarna (2 500 nasuprot 16 točaka), na temelju tih podataka izračunat je anizotropni variogramski model (slika 5.1) iz kojega su variogramski parametri bili puno bolje određeni negoli da je uporabljena primarna varijabla.

Tako je za primarnu variogramsku os pravca pružanja 120° širina razreda bila 350 m, doseg 4 000 m te je aproksimiran sfernim modelom. Doseg na sekundarnoj osi bio je 2 900 m, a interpolacija poroznosti je načinjena tehnikom običnog kokriginga (slika 5.2).

Indikatorski kriging je posebna interpolacijska tehnika kojoj prethodi transformacija podataka, tj. interpolacija se radi s ne-linearno transformiranim podatcima. Novak Zelenika et al.¹⁴ su prikazali takvu indikatorsku analizu za podatke poroznosti prikupljene u gornjomiocenskom ležištu polja Kloštar (slika 5.3). Svaka odabrana granična vrijednost bila je opisana vlastitim variogramskim modelom iz kojega je načinjena odgovarajuća karta vjerojatnosti (slika 5.4). Skup takvih karata predstavljao je osnovu za interpretaciju današnjih

pružanja pojedinačnih litofacijesa, a iz kojih se može zaključiti o smjerovima paleotransporta i granicama taložnog okoliša tijekom gornjega panona i donjega ponta unutar granica strukture Kloštar.

5.3. Istovremena primjena indikatorskog kriginga (IK), sekvencijskih indikatorskih (SIS) i sekvencijskih Gaussovih simulacija (SGS)

Takva istovremena primjena te usporedba dobivenih determinističkih i stohastičkih rezultata načinjena je (ponovno) na podacima iz polja Kloštar.^{12,13} Bila su dostupna dva slična skupa podataka. Jedan je prikupljen u gornjopanomskim (23 podatka), a drugi u donjopontskim (19 podataka) ležišnim pješčenjačkim "serijama". Tu su prenijeti neki rezultati objavljeni u¹², a dobiveni za varijable debljine, poroznosti i dubine. Poroznost je procijenjena uporabom sekvencijskih Gaussovih simulacija, a kako bi se ocrtale zone najveće heterogenosti ležišta, ali i opći smjerovi njezine najveće vrijednosti koji ujedno odgovaraju pružanju glavnog taložnog kanala (slika 5.5). Slične analize načinjene su za varijable debljine i dubine (slike 5.6 i 5.7), a kako bi se potvrdile pretpostavke donesene na temelju modeliranja poroznosti.

Jedan od najvažnijih rezultata koji se može dobiti kasnijom obradbom tih rezultata (skupa realizacija) je izračun novoga histograma (slika 5.8) za kartiranu varijablu. Tijekom simulacije sve simulirane vrijednosti postaju smatrane "čvrstim" podacima, ravnopravnim mjerenima. Kako se simulacija sekvencijski odvija na taj način raste broj "čvrstih" podataka što na njezinom kraju omogućuje izračun histograma na temelju znatno većeg broja podataka od onih u ulaznom skupu.

Stohastički pristup posebno je koristan kada je veličina ulaznog skupa "umjerena", tj. nešto veća od procijenjenog minimuma da bi se geostatistika mogla uporabiti. Kod većine stohastičkih analiza načinjenih u HPBS broj takvih podataka kretao se između 18 i 23 vrijednosti, a tada variogramski model još uvijek uključuje "znatne" nesigurnosti. Uporabom stohastičkih rezultata za ocrtavanje zona većih nesigurnosti procjene mogu se znatno poboljšati daljnje analize (koje ne trebaju nužno biti ponovno geostatističke). Također, ako su variogrami karakterizirani velikim odstupanjem stohastički rezultati dijelom mogu odstraniti pojavu "bull's-eye" oblika, što se može uočiti na slikama 5.5 i 5.7.

6. ZAKLJUČCI

Kroz dane primjere lako se može pratiti razvoj geostatistike kroz četiri razdoblja njezine uporabe u analizama načinjenim u ležištima ugljikovodika u HPBS-u.

- Prvo razdoblje obuhvatilo je jednostavne, no brojne izračune variograma u jednoj dimenziji, uglavnom načinjene u prostoru Bjelovarske subdepresije.
- Drugo razdoblje obilježeno je uporabom jednostavnog i običnog kriginga za kartiranje, uglavnom poroznosti ležišta. To je također bilo vrijeme kada su načinjene prve karte metodom kokriginga, ali i uspoređeni

rezultati nekoliko geostatističkih i drugih metoda/tehnika uporabom srednje kvadratne pogreške procjene, a kako bi se odabrala "najprimjerenija" karta.

- Treći period uključio je rad na izučavanju i uporabi "jack-knifing" metode uzorkovanja, a kako bi se odredila kartirana područja obilježena najvećom nesigurnošću variogramskog rezultata te posljedično procjene. Također je određen algoritam za izračun vrijednosti Lagrangeovog multiplikatora u jednadžbama običnoga kriginga.
- Četvrto razdoblje obuhvatilo je rad s "nelinearnom" tehnikom indikatorskog kriginga te uporabu simulacija, kako Gaussovih tako i indikatorskih.

Svaki oblik prikazanih geostatističkih analiza uvijek zahtijeva pažljiv odabir geološke varijable(i) koju se želi kartirati. To podrazumijeva da su one izmjerene u statistički značajno broju, korektno osrednjene te da su obilježene normalnom razdiobom. Izuzetak su indikatorske metode koje su namijenjene za podatke bez takve razdiobe. Također i podatci s log-normalnom razdiobom često se mogu transformirati tako da poprime svojstva normalne distribucije. Nadalje, kod uporabe indikatorskih metoda (indikatorskog kriginga i sekvencijskih indikatorskih simulacija) potrebno je pažljivo odabrati granične vrijednosti. U slučaju kada one određuju preveliki broj razreda (npr. iznad 10) za kartiranu varijablu, vrijeme obradbe značajno se produžuje, a potrebno je da ulazni skup dostigne neku minimalnu veličinu (npr. preko 30 podataka). Suprotno tomu, uporaba tek nekoliko graničnih vrijednosti (ispod 5) može rezultirati u gubitku mogućnosti opažanja geoloških značajki koje se žele prikazati odabranom varijablom. Određivanje klasa koje će približno slijediti normalnu razdiobu može biti korisno, jer omogućuje uporabu deskriptivne statistike te lakšu interpretaciju indikatorskih karata koje su inače uvijek načinjene podrazumijevajući samo stacionarnost 3. reda.

Na temelju iskustva (tj. danih primjera) ovdje se može ustvrditi kako se geostatističko kartiranje ležišta može najlakše primijeniti kod promatranja poroznosti i debljine kao ležišnih varijabli. Poroznost je, "po definiciji", određena normalnom razdiobom. U nekim posebnim slučajevima tim svojstvom se može okarakterizirati i debljina, npr. kada je ta varijabla uzorkovana u taložnim paleokolišima posebne geometrije. Broj podataka koji se mogu kartirati geostatistikom također se može procijeniti iz iskustva. Takav skup s manje od 10 podataka ne može se variogramski analizirati, pa se za moguće kartiranje trebaju primijeniti matematički jednostavnije metode poput inverzne udaljenosti ili samo zonalne procjene poput najbližeg susjedstva. Kod skupova s 10 - 20 točaka uobičajeno se koriste obični ili jednostavni kriging, no variogrami i dalje uključuju nesigurnosti, posebno oko nekih od prikazanih eksperimentalnih točaka. Čak i u takvim slučajevima, vrijednost srednje kvadratne pogreške bit će najmanja kod geostatističkih rezultata. Međutim, indikatorski kriging, koji se koristi kod nelinearno transformiranih ulaznih podataka, a uključuje iznad 5 graničnih vrijednosti, primijenit će se za skupove s oko 20 ili više podataka. Za brojnije

skupove geostatističke metode predstavljat će uvijek prvi odabir. Nadalje, kokriging uvijek može zamijeniti jednaki algoritam kriginga ako postoji značajno korelirana sekundarna varijabla. Postojanje takve varijable može omogućiti primjenu geostatističkog kartiranja kod skupova od 10 do 15 podataka, kada uporaba kriginga može biti upitna.

Slična pravila vrijede i kod primjene simulacija. No tu se javlja i potreba određivanja broja jednakovjerojatnih realizacija. Kod skupova s 30 i više podataka obično se računa veliki skup (nekoliko desetaka ili često stotinu) takvih rješenja. Cijeli takav skup može kasnije biti lako obrađen u svrhu izračuna vrijednosti poput medijanske, najmanje, najveće i sličnih realizacija (ako je kartirana takva varijabla da se njezina vrijednost po ćelijama može recimo sumirati). No, kada je ulazni skup relativno oskudan (10 - 20 podataka), pa se žele samo okonturiti zone najveće promjenjivosti, tj. nesigurnosti, dovoljno je načiniti 5 - 10 realizacija.

BILJEŠKA

Većina rezultata prikazanih u ovome radu prvi je puta prikupljena i prikazana tijekom pozvanog predavanja. Ono je održano na Zavodu za geologiju i paleontologiju na Sveučilištu u Segedu, u Mađarskoj, 9. prosinca 2011. godine. Predstavljalo je dio nastavnog programa na kolegiju iz geostatistike čiji je nositelj prof. dr. sc. János Geiger.



Tomislav Malvić, INA-Industrija nafte d.d., Sektor za geologiju i upravljanje ležištima, Šubiceva 29, 10000 Zagreb, e-pošta: tomislav.malvic@ina.hr
Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

UDK: 550.8 : 553.28 : 551.4 : 519.876.5 (497.5)

550.8	geološka istraživanja
553.28	vrste ležišta, osobine ležišta
551.4	kartografija, kriging
519.876.5	simulacije, geostatistika
(497.5)	R. Hrvatska, Panonski bazen