

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO – GEOLOŠKO – NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij naftnog rudarstva

**IZRAČUN 1D VARIOGRAMA UNUTAR PJEŠČENJAČKIH LEŽIŠTA I
NJIHOVE KROVINE POLJA ŠANDROVAC**

Diplomski rad

Marko Vekić

N 155

Zagreb, 2016.

IZRAČUN 1D VARIOGRAMA UNUTAR PJEŠČENJAČKIH LEŽIŠTA I NJIHOVE KROVINE
POLJA ŠANDROVAC

MARKO VEKIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pijerottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Polje Šandrovac smješteno je u sjevernom dijelu Bjelovarske subdepresije. Ležišta u polju su litološki heterogena te sadrže znatnu količinu CO₂ u otopljenom i prirodnom plinu. Geostatistički alat korišten u ovom radu zove se variogram. Variogramom se određuje koje su vrijednosti skupa podataka na određenoj udaljenosti još uvijek u zavisnosti. Variogrami u ovom radu su izrađeni u računalnom programu Variowin, a postupak izrade, kao i parametri variograma opisani su u poglavlju 4. U tom poglavlju dan je opis variograma, opis njegovih parametara kao i variogramski modeli koji se koriste u geostatistici. Nadalje, dane su detaljne upute izrade variograma u računalnom programu Variowin koje su popraćene slikama. U poglavlju 5 prikazani su podaci korišteni u izradi variograma, izrađeni variogrami te aproksimacija variograma matematičkim modelom. Korišteni su pravi podaci za ležište te „umjetni“ podaci za krovinu. Na temelju tih podataka prvo su načinjeni histogrami šupljikavosti ležišta i krovine. Nakon toga je izračunata varijanca, srednja vrijednost te vrijednosti minimalne i maksimalne šupljikavosti. Nadalje, načinjeni su variogrami te aproksimacija variograma teorijskim modelom. Zaključeno je da se variogrami dobiveni na temelju podataka iz tablice 5-1 ne mogu aproksimirati niti jednim od mogućih teorijskih modela, stoga je takav slijed događaja (taloženja) prikazan grafički slikama 5-12, 5-13, 5-14 i 5-15. Variogrami dobiveni na temelju podataka iz tablice 5-2 aproksimirani su eksponencijalnim modelom.

Ključne riječi: polje Šandrovac, geostatistika, variogram, Variowin, varijanca, teorijski modeli

Diplomski rad sadrži: 39 stranica, 6 tablica i 30 slika.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Tomislav Malvić, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Tomislav Malvić, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Josipa Velić, profesor emerita RGNF
Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF

Datum obrane: 19. rujna 2016.

CALCULATION OF 1D VARIOGRAM WITHIN SANDSTONE RESERVOIRS AND THEIR
TOP IN THE ŠANDROVAC FIELD

MARKO VEKIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mineralogy, Petrology and Mineral Deposits,
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The Šandrovac Field is located in the northern part of the Bjelovar Sag (subdepression). Reservoirs in the Šandrovac field are lithologically heterogeneous, containing a considerable amount of CO₂, both in solution gas and natural gas. Geostatistical tool used in this thesis is called the variogram. The variogram determines which values of data series on a certain distance are still in correlation. Variograms in this thesis were made using the Variowin computer program. The creation procedure and the parameters of the variogram were described in Chapter 4. In that chapter, the description of the variogram, as well as the description of its parameters and variogram models, used in geostatistics, were given. Furthermore, detailed instructions on the making of variograms using the Variogram computer program accompanied by figures were shown. The data used in the making of variograms, the completed variograms and the approximation of variograms by mathematical models, were shown in Chapter 5. Real data for reservoir and "artificial" data for top were used. Based on that data, first to be made were the porosity histograms of the reservoir and the top. After that, the variance, median as well as minimal and maximal porosity values were calculated. Furthermore, variograms and the approximation of variograms by theoretical models were made. It was concluded that variograms made from data in Chart 5-1 could not be approximated by any theoretical model. Because of that, such sequence (sedimentation) was shown graphically in figures 5-12, 5-13, 5-14 and 5-15. Variograms, which were made from data in Chart 5-2, were approximated by the exponential model.

Keywords: the Šandrovac Field, geostatistics, the variogram, Variowin, variance, theoretical models

Thesis contains 39 pages, 6 tables and 30 figures.

Original in Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Tomislav Malvić, Ph.D.

Reviewers: Associate Professor Tomislav Malvić, Ph.D.
Professor Emerita Josipa Velić, Ph.D.
Full Professor Zdenko Krištafor, Ph.D.

Date of defense: 19 September 2016

SADRŽAJ

I. POPIS TABLICA.....	II
II. POPIS SLIKA.....	III
III. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA.....	IV
1. UVOD.....	1
2. ZEMLJOPISNI SMJEŠTAJ I OSNOVNE GEOLOŠKE ZNAČAJKE POLJA ŠANDROVAC.....	2
3. REZULTATI DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....	7
4. KORIŠTENE METODE.....	11
4.1. Parametri variograma.....	11
4.2. Variogramski modeli.....	15
4.3. Izračun parova podataka.....	16
5. IZRAČUN VARIOGRAMA.....	19
5.1. Izračun osnovnih statističkih vrijednosti (histogram, varijanca, srednja vrijednost, minimum i maksimum).....	21
5.2. Izračun variograma u računalnom programu Variowin.....	22
5.3. Aproksimacija variograma teorijskim modelom.....	28
6. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI.....	34
7. LITERATURA.....	36

I. POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Koordinate polja Šandrovac po Gauss–Krügeru očitane u točkama 1 – 7.....	4
Tablica 5-1. Vrijednosti šupljikavosti pješčenjaka (ležišta) iz bušotine Ša-1.....	19
Tablica 5-2. Umjetne vrijednosti šupljikavosti lapora (krovine) iz bušotine Ša-1.....	20
Tablica 5-3. Vrijednosti veličine ćelija i broja ćelija za variograme sa slika 5-3, 5-4 i 5-5.....	24
Tablica 5-4. Vrijednosti veličine ćelija i broja ćelija za variograme sa slika 5-9, 5-10 i 5-11.....	28
Tablica 5-5. Vrijednosti parametara aproksamacije teorijskim modelom za variograme sa slika 5-12, 5-13 i 5-14.....	30

II. POPIS SLIKA

Slika 2-1. Zemljopisni smještaj polja Šandrovac.....	2
Slika 2-2. Strukturna karta Bjelovarske subdepresije po plohi EK – markera Z' dobivena iz bušotinskih i seizmičkih podataka ručnom interpolacijom i ucrtavanjem rasjeda.....	5
Slika 2-3. Međusobni odnosi formacija i taložnih megaciklusa u Dravskoj depresiji.....	6
Slika 4-1. Parametri variograma.....	12
Slika 4-2. Primjer izračuna variograma podjelom karte na ćelije.....	14
Slika 4-3. Izgled krivulje sfernog, eksponencijalnog i Gaussovog teorijskog modela.....	15
Slika 4-4. Formule po kojima se definira ponašanje varijable za sferni, eksponencijalni i Gaussov teorijski model.....	16
Slika 4-5. Određivanje koordinata u x i y smjeru (lijevo) i pokretanje naredbe „Run !“ (desno) u potprogramu Prevar2D.....	17
Slika 4-6. Otvaranje prozora „ <i>Directional Variogram</i> “ (lijevo) te odabiranje varijable i parametara „ <i>Lag spacing</i> “ i „ <i>Number of lags</i> “ (desno).....	17
Slika 4-7. Primjer variograma dobivenog potprogramom Vario2D.....	18
Slika 4-8. Primjer aproksimacije variograma teorijskim modelom potprogramom Model.....	18
Slika 5-1. Histogram šupljikavosti pješčenjaka (ležišta) iz bušotine Ša-1 (podatci iz tablice 5-1).....	21
Slika 5-2. Histogram šupljikavosti lapora (krovine) iz bušotine Ša-1 (podatci iz tablice 5-2).....	22
Slika 5-3. Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka polja Šandrovac (1).....	23
Slika 5-4. Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka polja Šandrovac (2).....	23
Slika 5-5. Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka polja Šandrovac (3).....	24
Slika 5-6. Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka u bušotini Ša-5 (1) / pješčenjaci Pepelana.....	25
Slika 5-7. Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka u bušotini Ša-5 (2) / pješčenjaci Pepelana.....	25

Slika 5-8: Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka u bušotini Ša-35 / pješčenjaci Pepelana.....	26
Slika 5-9. Semivariogramska krivulja šupljikavosti lapora polja Šandrovac (1).....	27
Slika 5-10. Semivariogramska krivulja šupljikavosti lapora polja Šandrovac (2).....	27
Slika 5-11. Semivariogramska krivulja šupljikavosti lapora polja Šandrovac (3).....	28
Slika 5-12. Aproksimacija variograma sa slike 5-4 eksponencijalnim modelom.....	29
Slika 5-13. Aproksimacija variograma sa slike 5-5 eksponencijalnim modelom.....	29
Slika 5-14. Aproksimacija variograma sa slike 5-6 eksponencijalnim modelom.....	30
Slika 5-15. Prva faza - stanje prije taloženja pijeska.....	31
Slika 5-16. Druga faza - veliki donos pijeska (dominantno) i silta.....	31
Slika 5-17. Treća faza - nagli prekid donosa pijeska i silta.....	32
Slika 5-18. Četvrta faza - nastavak taloženja mulja bogatog karbonatima.....	32
Slika 5-19. Litološki stup analiziranog pješčenjačkog ležišta te neposredne krovine i podine u bušotini Ša-1 polja Šandrovac.....	33

III. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

$N(h)$ - broj parova podataka uspoređenih na udaljenosti 'h' kod računa variograma;

z_n - vrijednost varijable na lokaciji 'n';

z_{n+h} - vrijednost varijable na lokaciji udaljenoj za 'h' od promatrane lokacije 'n'.

°C - Celzijev stupanj;

$2\gamma(h)$ - vrijednost variograma.

1. UVOD

U geologiji je, kao jednoj od temeljnih geoznanosti, nužno ispravno donijeti zaključke na temelju skupa podataka koji su često brojno ograničeni. Stoga su razvijeni različiti geostatistički alati i metode, a jedan od takvih alata korišten u ovome radu zove se variogram. Variogramom se, kao geostatističkim alatom, određuje ponašanja odabrane varijable u prostoru, odnosno definira se prostorna zavisnost.

U ovome radu izrađeni su različiti 1D variogrami na temelju podataka prikupljenih iz bušotine Ša-1 polja Šandrovac. Polje Šandrovac je smješteno u sjevernom dijelu Bjelovarske subdepresije. Ležišta polja Šandrovac sadrže znatnu količinu CO₂ zapadno od glavnog poprečnog rasjeda (od 50 do 80 %), dok istočno sadrže vrlo malo CO₂ (do 0,3 %). Temeljem podataka prikupljenih iz ležišta polja Šandrovac te prikazanih u tablicama, izrađeni su različiti variogrami pomoću računalnog programa Variowin. Također su prikazane upute za korištenje navedenog programa, aproksimacija variograma matematičkim modelom, kao i izračun osnovnih statističkih vrijednosti na temelju prikupljenih podataka. U poglavlju 4 je vidljivo kako se variogrami dobiveni na temelju podataka prikupljenih iz pješčenjačkog ležišta ne mogu aproksimirati matematičkim modelom, a problem je objašnjen grafički, taložnim modelom, u četiri slike (faze). U poglavlju 6 (diskusija i zaključci) detaljno su obrađeni i objašnjeni dobiveni variogrami, te je donesen zaključak na temelju istih.

2. ZEMLJOPISNI SMJEŠTAJ I OSNOVNE GEOLOŠKE ZNAČAJKE POLJA ŠANDROVAC

Polje Šandrovac je smješteno na južnim obroncima središnjega dijela Bilogore (**slika 2-1**). Teren je izrazito brdovit, ispresjecan jarcima i vododerinama. Iz tog razloga gotovo sve bušotine izrađene na tom polju su koso usmjerene (**Feigl, 2008**). Nadmorska visina kreće se od 145 do 280 m (**Feigl, 2008**). Najveće mjesto u okolici je grad Bjelovar, na 13 km udaljenosti od polja. Polje Šandrovac zahvaća područja Koprivničko-križevačke, Bjelovarsko-bilogorske i Virovitičko-podravske županije. Klima na području polja Šandrovac je toplo umjerenog kišnog tipa, bez izrazito sušnog razdoblja (**Gregurić et al., 2005**). Srednja temperatura najhladnijeg mjeseca iznosi oko 0 °C, a srednja temperatura najtoplijeg mjeseca nije veća od 22 °C. Srednja godišnja temperatura zraka na području polja Šandrovac iznosi oko 10,8 °C (**Gregurić et al., 2005**).



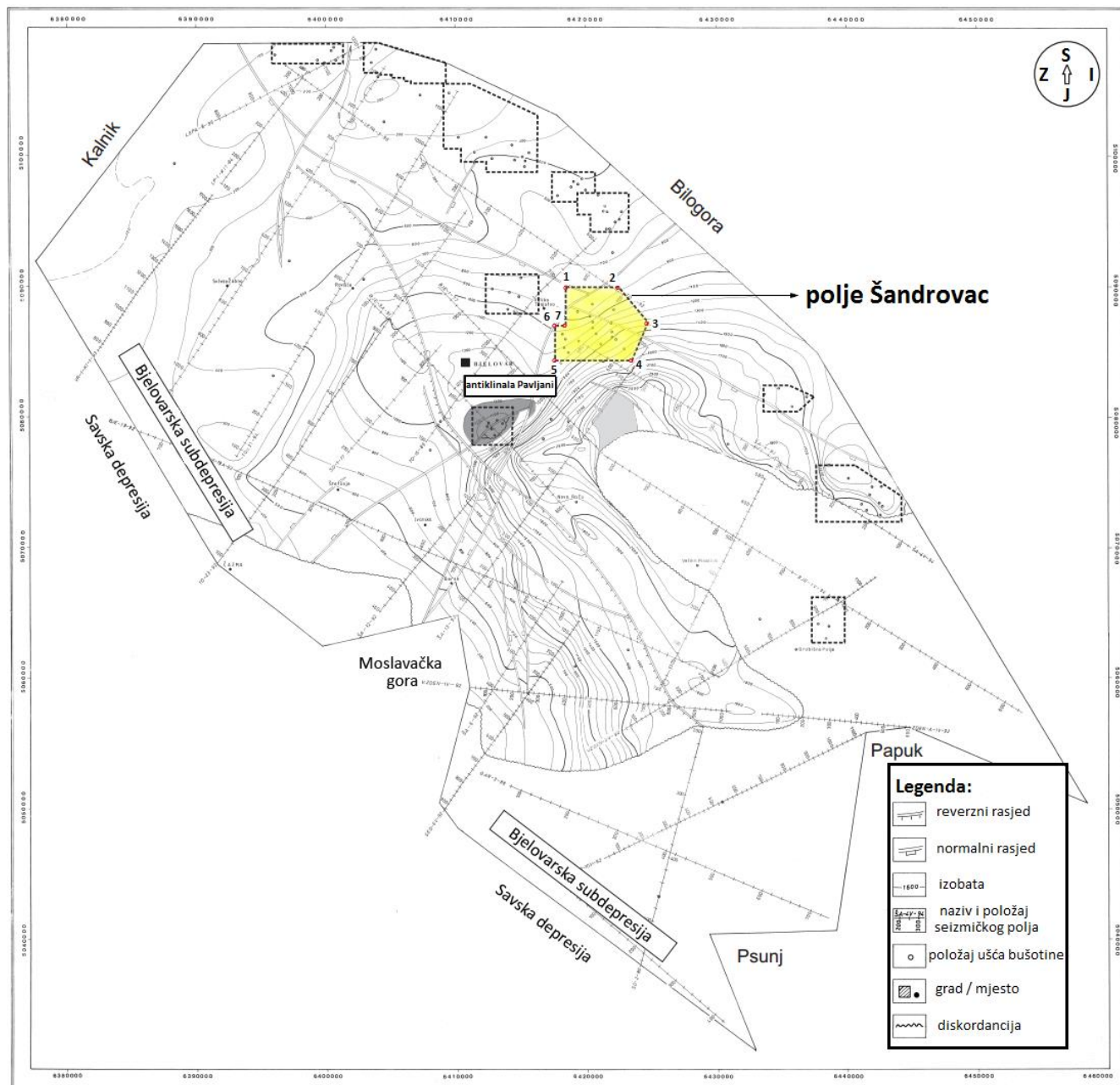
Slika 2-1. Zemljopisni smještaj polja Šandrovac (modificirano prema **Majstorović Bušić et al., 2015**)

Ležišta polja Šandrovac predstavljaju klasičnu uzdignutu strukturu, a polje je geografski smješteno u Bjelovarskoj subdepresiji koja je dio Dravske depresije. Kao velika geomorfološka struktura, Moslavačka gora odvaja Bjelovarsku subdepresiju od Savske depresije. Na današnju topografiju najviše je utjecala Bilogora, koja je uzdignuta tijekom pliocena, pleistocena i holocena. Polje pokriva površinu od oko 39 km² (**Mesić Kiš i Malvić, 2014**). Nastajanje Bjelovarske subdepresije rezultat je aktivnosti glavnog transkurentnog rasjednog sustava (rasjeda s horizontalnim kretanjem), skupa s ostalim rasjednim sustavima dijagonalno ili poprečno u odnosu na Bjelovarsku subdepresiju ili u smjeru središnjeg Dravskog rasjeda (**Mesić Kiš i Malvić, 2014**). Debljina neogensko-kvartarnih taloga u Bjelovarskoj subdepresiji rijetko prelazi 3000 m, u odnosu na 7000 m u zoni središnje Dravske depresije (**Mesić Kiš i Malvić, 2014**). Razlog tomu je što se Bjelovarska subdepresija nije nalazila unutar glavnog smjera prenošenja materijala, naročito u transpresijskom periodu u kojem je prinos sedimenata bio znatno manji (**Mesić Kiš i Malvić, 2014**).

Postoji 5 EK - markera unutar Bjelovarske subdepresije (Rs7, Rs5, Z', Δ i D') i jedan EK reper - granica (Tg/Pt) na temelju kojih je **Malvić 2003.** godine u svojoj doktorskoj disertaciji izradio strukturne karte te ih ponovo objavio **2011.** godine. U ovome radu izdvojena je strukturna karta po plohi EK - markera Z' kao najvažnijeg markera za polje Šandrovac (**slika 2-2**). Dubina Z' – markera predstavlja granicu panona i pontaa. To je ujedno i jedan od kronostratigrafski najvažnijih markera u Dravskoj depresiji. Glavna pješčenjačka ležišta unutar polja Šandrovac nalazi se u sedimentima donjeg pontaa. Zbog toga EK – marker Z' ima najveću važnost u strukturnom i naftno-geološkom smislu za polje Šandrovac, kao i za cijelu Bjelovarsku subdepresiju. Područje označeno žutom bojom na **slici 2-2** predstavlja polje Šandrovac, dok numerirane točke označene crvenom bojom predstavljaju točke poligona oko polja Šandrovac iz kojih su očitane Gauss–Krügerove koordinate. Koordinate polja Šandrovac po Gauss–Krügeru očitane u točkama 1 – 7 sa **slike 2-2** iznose (**tablica 2-1**):

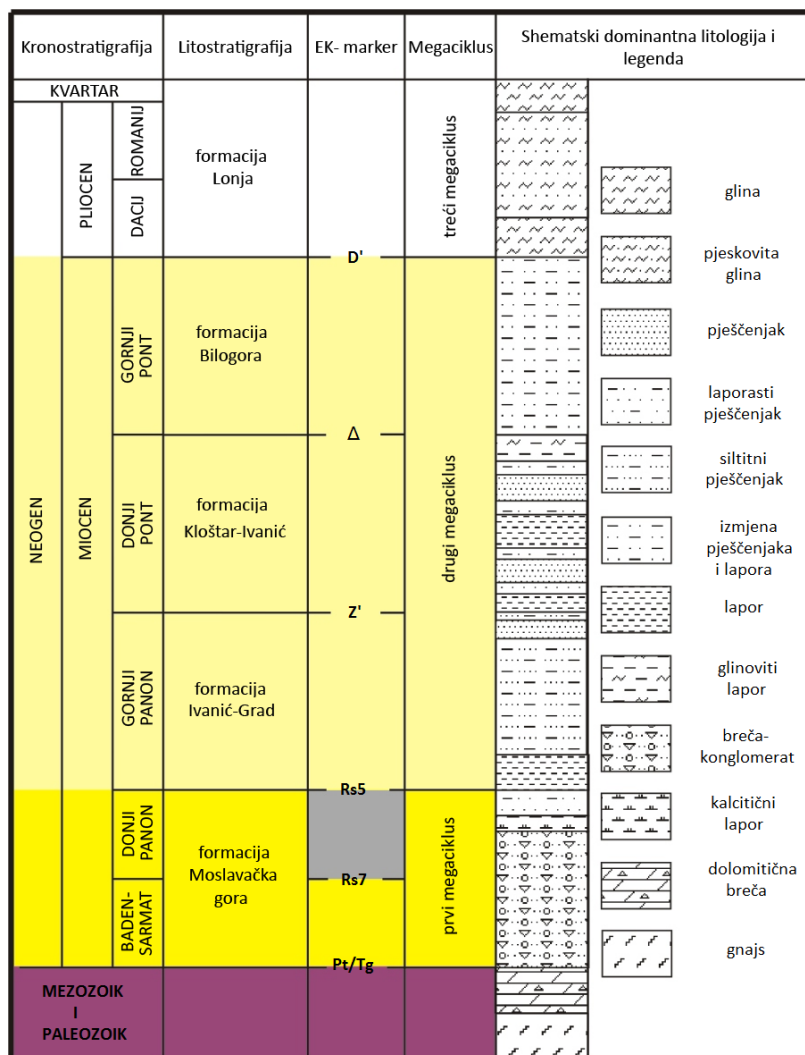
Tablica 2-1. Koordinate polja Šandrovac po Gauss–Krügeru očitane u točkama 1 – 7

$x_1 = 6418000$	$x_4 = 6424000$	$x_7 = 6419000$
$y_1 = 5089000$	$y_4 = 5084000$	$y_7 = 5086500$
$x_2 = 6423000$	$x_5 = 6418000$	
$y_2 = 5089000$	$y_5 = 5084000$	
$x_3 = 6425000$	$x_6 = 6418000$	
$y_3 = 5087000$	$y_6 = 5086500$	



Slika 2-2. Strukturna karta Bjelovarske subdepresije po plohi EK – markera Z' dobivena iz bušotinskih i seizmičkih podataka ručnom interpolacijom i ucrtavanjem rasjeda (modificirano prema Malvić, 2011)

Malvić je 2012. godine izradio opći geološki stup Dravske depresije (slika 2-3) na kojoj je vidljivo da EK – marker Z' predstavlja granicu panona i ponta.



Slika 2-3. Međusobni odnosi formacija i taložnih megaciklusa u Dravskoj depresiji (modificirano prema Malvić, 2012)

3. REZULTATI DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Polje Šandrovac otkriveno je 1962. godine bušotinom Ša-1, a pušteno u pridobivanje 1967. godine s 14 bušotina (**Feigl, 2008**). S vremenom se broj bušotina povećao, rezultirajući većom eksploatacijom nafte i plina. Do sredine 2007. godine izrađene su 294 bušotine (**Feigl, 2008**). Najveće godišnje pridobivanje u primarnoj fazi razrade ostvareno je 1971. godine (408124 m³/god) nakon čega dolazi do prirodnog pada pridobivanja (**Kale, 2000**). U primarnoj fazi iskorištavanja ležišta pridobiveni fluid crpio se režimom otopljenog plina i/ili kombiniranim režimom (režim otopljenog plina, režim plinske kape i vodonaporni režim) (**Kale, 2000**).

Struktura ležišta polja Šandrovac ima oblik brahiantiklinale ispresjecane velikim brojem normalnih rasjeda, koji dijele strukturu na 54 tektonska bloka (**Feigl, 2008**). Ležišta sadrže znatnu količinu CO₂ u otopljenom i prirodnom plinu. Prisutnost CO₂ u nekim ležištima (primjerice ležištima E i E' na zapadnom dijelu polja) iznosi od 50 do 80 %, dok je njegova prisutnost u nekim ležištima (primjerice istočni dio) vrlo niska i iznosi maksimalno 0,3 % (**Kale, 2000**). Daljnim istraživačkim dubokim bušotinama (Ša-2, Ša-19, Ša-140, Ša-164) utvrđeni su visoki udjeli CO₂, čak do 96,05 % (**Kale, 2000**). Naslage nabušene tim bušotinama su konglomerati i pješčenjaci mezozojske starosti, a nalaze se na zapadnom dijelu strukture (**Kale, 2000**).

Za polje Šandrovac rađeno je niz znanstvenih studija, npr: **Malvić je 2003.** godine napravio 1D variogram i statističku analizu ležišnih sustava u Bjelovarskoj subdepresiji gdje je analizirao ponašanje šupljikavosti u vertikalnom smjeru u pješčenjačkim članovima Mosti, Poljana i Pepelana. Analiziranje je obavljeno *in situ* s dovoljnim brojem izmjerenih vrijednosti šupljikavosti. Najpoželjnije vrijednosti šupljikavosti opažene su u polju Galovac-Pavljani člana Mosti. Pješčenjački član Poljana pokazao je najizraženije promjene litoloških svojstava, te vrlo često loše propusne ili nepropusne sedimente. Pješčenjaci Pepelana pokazali su homogeniji litološki sastav od pješčenjaka Poljana.

Novosel i Sečen su 2004. godine napravili analizu utjecaja sadržaja CO₂ u dijelu ležišta polja Šandrovac na iscrpak nafte u prvotnoj i drugotnoj fazi iskorištavanja ležišta. U radu je objašnjeno kako su ležišta nafte u polju Šandrovac možda jedinstvena u svijetu po tome što se u dva odvojena dijela nalazi nafta s bitno različitim sadržajem CO₂ u sastavu plina. Analizom

povijesti iskorištavanja ležišta u prvotnoj i drugotnoj fazi dokazana je djelotvornost prirodno otopljenog CO₂ u nafti na njen iscrpak.

Nadalje, **Mršić i Čikeš su 2009.** godine objavili detaljan postupak izračunavanja indikatorske krivulje pri pridobivanju povremenim plinskim liftom temeljen na podacima izmjerenim i prikupljenim na ušću triju bušotina. Obavljena su mjerenja dinamičkog tlaka i pridobivanja na tri eksploatacijske bušotine naftnih polja Šandrovac i Bilogora: Šandrovac-75, Bilogora-52 i Šandrovac-34. Mjerenjem dinamičkog tlaka u bušotinama dobiven je uvid u stvarne vrijednosti parametara povremenog lifta koje se uobičajeno pretpostavljaju na temelju iskustvenih vrijednosti ili se izračunavaju na temelju empirijskih jednadžbi objavljenih u literaturi. Na temelju izmjerenih vrijednosti izvedena je nova empirijska jednadžba za izračunavanje parametra duljine perioda dosezanja minimalnog tlaka u bušotini zbog značajne razlike u rezultatima izmjerenih vrijednosti i vrijednostima dobivenih na temelju empirijskih jednadžbi.

Nadalje, **Mesić Kiš i Malvić su 2014.** godine prvi put primijenili zonalnu procjenu i interpolaciju kao istovremene pristupe podacima iz polja Šandrovac. Kao ulazni podatci uporabljene su dubine EK markera Z', tj. granice panona i ponta (prije približno 7,1 milijuna godina). One su statistički analizirane na razini cijele subdepresije. Odabrano je 18 bušotinskih smjestašta unutar polja Šandrovac gdje su karotažom određene dubine markera. I oni su očitani izravno sa spomenute karte te kartirani metodom Thiessenovih poligona ili krigiranjem. Zaključeno je da je opravdano dubinsko kartiranje na oba prikazana načina te usporedba rješenja kada kartiranje uključuje značajne lokalne nesigurnosti te mali broj podataka.

Ostali bitni radovi u hrvatskom dijelu Panonskog bazenskog sustava u kojima su korištene geostatističke metode, posebice krigiranje i kokrigiranje, odnose se na polja u Savskoj i Dravskoj depresiji, gdje su takve metode često primjenjivane u zadnjih desetak godina. Stoga su **Husanović i Malvić 2014.** godine objavili rad pod naslovom „**Pregled dosadašnjih determinističkih geostatističkih kartiranja ležišta ugljikovodika u Republici Hrvatskoj te prednosti takvoga pristupa**“.

Na području Savske depresije na poljima Ivanić i Kloštar metode krigiranja i kokrigiranja su primijenjene s uspjehom zato što je postojao relativno veliki ulazni skup vrijednosti (**Balić et al., 2008; Malvić, 2008; Novak Zelenika et al., 2010**).

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, a kartirala se šupljikavost ležišta (**Malvić, 2008**). Karte šupljikavosti interpolirane krigiranjem prikazale su preciznije rezultate u odnosu na karte šupljikavosti dobivene ostalim metodama (**Malvić, 2008**).

Polje Kloštar također se nalazi u sjeverozapadnom dijelu Savske depresije i ujedno je jedno od najvećih polja. Najveća ležišta su pješčenjačka, starosti gornjega panona i donjega ponta. Na ovom polju analizirano je najveće naftno ležište operativno nazvano „T“, starosti donjega ponta (**Balić et al., 2008; Novak Zelenika et al., 2010**). Kartiralo se na skupu od 25 bušotinskih vrijednosti šupljikavosti, a korištene su metode običnog i indikatorskog krigiranja (**Balić et al., 2008; Novak Zelenika et al., 2010**).

Na području Dravske depresije analizirana su polja Stari Gradac-Barcs Nyugat, Molve i Beničanci. Na ležištima u tim poljima primjenjivane su metode krigiranja i kokrigiranja (**Malvić i Đureković, 2003; Malvić, 2008; Malvić i Prskalo, 2008; Malvić et al., 2009**).

Polje Stari Gradac-Barcs Nyugat ima heterogeno ležište čiji litološki sastav obuhvaća klastite, dolomite, kvarcite i metavulkanite. Ležište je podijeljeno u četiri litofacijesa: Klastiti (badenske starosti), Dolomiti (starosti donjeg trijasa), Kvarciti (starosti donjeg trijasa) i Metavulkaniti (starosti od karbona do perma), a kartirala se šupljikavost u dijelu ležišta starosti donjeg trijasa (**Malvić i Đureković, 2003; Malvić, 2006; Malvić, 2008**). Metoda kojom se kartiralo bila je obično krigiranje (**Malvić i Đureković, 2003; Malvić, 2008**).

Polje Molve također ima vrlo heterogeno ležište čiji litološki sastav varira od klastita, dolomita, kvarcita i metavulkanita. Ležište u polju Molve također je podijeljeno u četiri litofacijesa: Litofacijes I (vapnenci miocenske starosti), Litofacijes II (uglavnom dolomiti starosti jure i trijasa), Litofacijes III (metakvarciti starosti perma i trijasa) i Litofacijes IV (uglavnom retrogradni metamorfozirani gnajs; paleozoik i starije) (**Malvić et al., 2009**). 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 (**Malvić et al., 2009**). Šupljikavost je kartirana metodom kokrigiranja, a seizmički atribut snage refleksije korišten je kao drugotni podatak. U ostalim litofacijesima korištena je metoda običnog krigiranja (**Malvić et al., 2009**).

Ležište polja Beničanci sastoji od krupnih klastita (uglavnom breča) badenske starosti. Za interpolaciju šupljikavosti korištene su metode krigiranja i kokrigiranja (**Malvić i Đureković, 2003; Malvić i Prskalo, 2008**). Iz nekoliko seizmičkih atributa odabrana je snaga refleksije kao sekundarni izvor informacija u interpolaciji šupljikavosti metodom kokrigiranja. Upotrebom drugotne informacije ostvarena je bolja i pouzdanija procjena raspodjele šupljikavosti unutar ležišta (**Malvić i Đureković, 2003; Malvić i Prskalo, 2008**).

4. KORIŠTENE METODE

Geostatistička metoda korištena za izradu 1D variograma u ovome radu zove se variogramaska analiza. Variogram (2γ) je jedan od osnovnih geostatističkih alata koji se koristi za određivanje ponašanja odabrane varijable u prostoru, odnosno za definiranje prostorne zavisnosti. Često se naziva i semivariogramom (γ) koji ima potpuno jednaka svojstva, osim što su obje strane variogramske jednadžbe “kraćene” s vrijednošću 2 (Malvić, 2008). Matematički se variogramom mjeri razlika između dviju prostorno udaljenih točkastih vrijednosti odabrane varijable. Definiran je formulom 4-1 (npr. Kupfersberger i Deutsch, 1999):

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \cdot \sum_{n=1}^{N(h)} [z(u_n) - z(u_n + h)]^2 \quad (4-1)$$

gdje je:

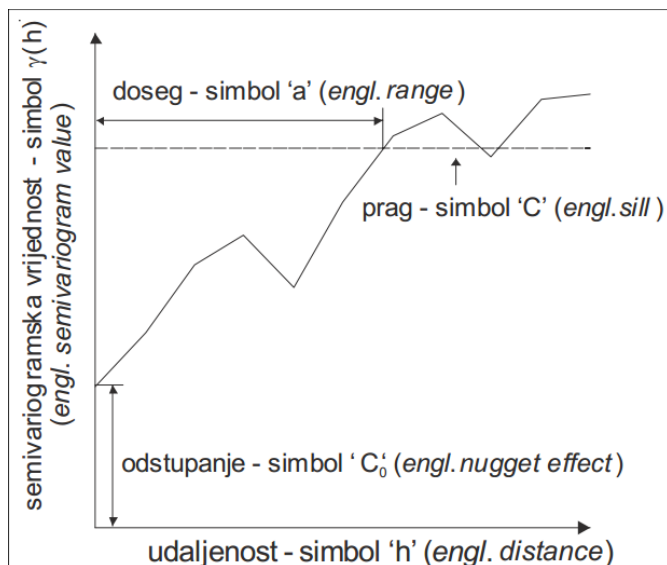
$N(h)$ - broj parova podataka uspoređenih na udaljenosti „ h “;

$z(u_n)$ – vrijednost na lokaciji „ u_n “;

$z(u_n+h)$ – vrijednost na lokaciji „ u_n+h “.

4.1. Parametri variograma

Na svakoj variogramskoj krivulji može se očitati pet parametara (slika 4-1): odstupanje (engl. *nugget*), prag (engl. *sill*), doseg (engl. *range*), udaljenost ili korak (engl. *distance*) i eventualno odmak (engl. *lag*) (Malvić et al., 2008; Malvić, 2008) (slika 4-1).



Slika 4-1. Parametri variograma (Malvić, 2008)

Odstupanje (C_0) predstavlja slučajnu komponentu regionalizirane varijable, odnosno pojavu kada krivulja siječe os Y u nekoj pozitivnoj vrijednosti (C). To je obilježje gotovo svih variograma, a upućuje na razliku u vrijednostima vrlo bliskih uzoraka koji se u praksi smatraju uzorcima s jedinstvene lokacije. Uklanja se smanjenjem površine ili povećanjem broja uzoraka, no u praksi se ono vrlo često ne može eliminirati (Malvić, 2008).

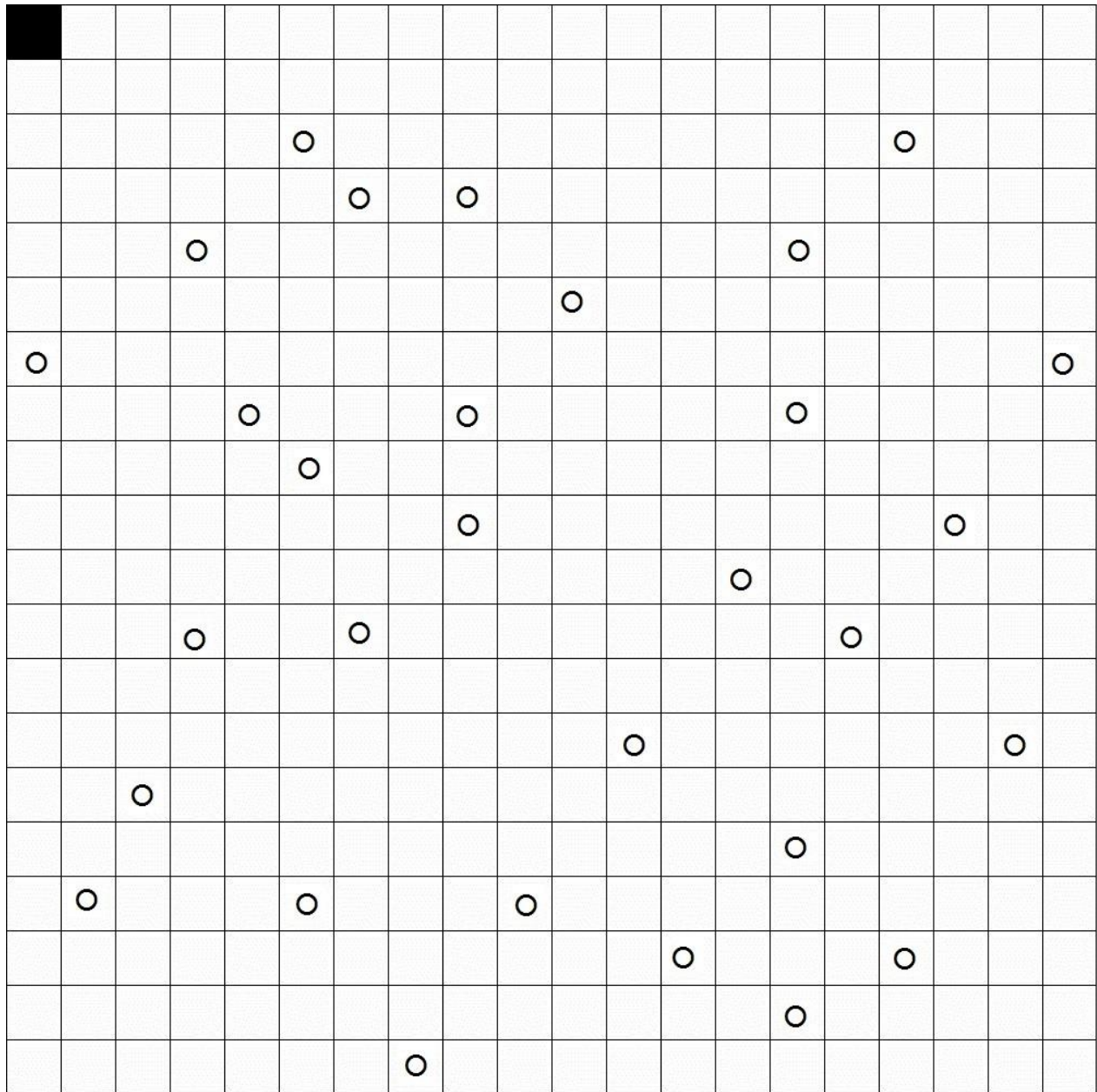
Prag (C) je razlika pojedinačnih vrijednosti i srednje vrijednosti skupova podataka, što je ujedno definicija varijance. Nakon dosezanja praga (ako ga posjeduje) krivulja semivariograma često će prestati pravilno rasti te će nastaviti oscilirati oko njega (Malvić, 2008).

Doseg (a) je vrijednost na kojoj semivariogram prvi put presijeca prag, a nakon toga ne postoji prostorna korelacija ili ovisnost podataka (Malvić, 2008).

Udaljenost (h) je vrijednost na kojoj se međusobno uspoređuju podatci. Svaka udaljenost čini jednu klasu. Toj se vrijednosti može dodijeliti tolerancija nazvana odmak. To znači da granicama klase dodajemo vrijednost odmaka šireći tako klasu. Time se povećava broj parova i dobiva se bolji rezultat (Malvić, 2008).

Variogramaska analiza služi za definiranje prostorne zavisnosti varijabli, a kao rezultat dobije se eksperimentalni semivariogram koji se aproksimira teorijskim modelom.

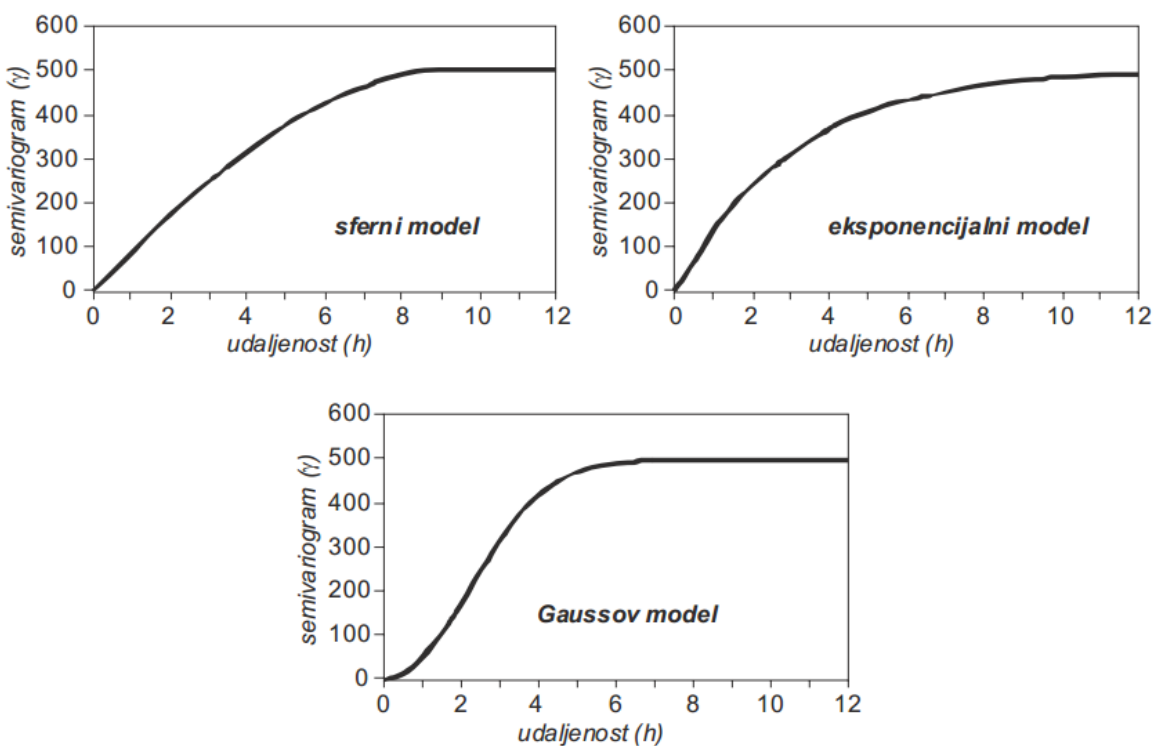
Način na koji se računa variogram je sljedeći: promatrano područje (ploha, karta) podijeli se na ćelije, u ovome primjeru dimenzija 20x20, sveukupno 400 ćelija (**slika 4-2**). Recimo da je svaka ćelija duljine 10 m te da postoji 30 mjerenja koja predstavljaju ulazne vrijednosti, a čija je srednja vrijednost prethodno izračunata. Kružićem označene ćelije prikazuju neku mjerenu vrijednost (točku) (**slika 4-2**). Variogram se računa u točkama, a točke na variogramu predstavljaju takozvane korake. Korak predstavlja razlučivost variograma, a veća razlučivost daje preciznije razlaganje sitnih detalja variograma. Što je koraka više, variogram ima veću razlučivost te je za posljedicu lakše povući teorijsku krivulju. Postavlja se pitanje kako izračunati variogram u nekoj točki? Variogram se računa u koracima „h“. Počinje se od vrijednosti $h=1$ (prvi korak). Za svaki korak račun počinje iz prve ćelije označene crnom bojom (**slika 4-2**). Udaljenost 1 predstavlja jednu ćeliju duljine 10 m. Nakon toga, ide se redom ćeliju po ćeliju i promatra se postoji li u sljedećoj ćeliji neko mjerenje. U ćeliji 2 ga nema, u ćeliji 3 također, itd, ... i prvi puta se na mjerenu vrijednost nailazi u ćeliji 46. Ta ćelija ima neku mjerenu vrijednost. Na temelju te vrijednosti izračuna se variogram u toj točki te se dobije neka vrijednost variograma „ 2γ “. Tu vrijednost se oduzme od srednje vrijednosti mjerenih podataka te se dobije neki broj, tj. prvu razliku para podataka. Nakon što se izračuna variogram za tu točku, dalje se redom ide po ćelijama dok se ne naiđe na sljedeću mjerenu vrijednost. Promatra se koliko ima mjerenih vrijednosti oko te ćelije (u svim smjerovima za udaljenost $h=1$, tj. za jednu ćeliju). Tada se postupak ponovi te se dobije drugu razliku para podataka. Za korak $h=1$ variogram će biti moguće izračunati u svakoj ćeliji koja je u doticaju sa ćelijom kojoj je pridružena neka mjerena vrijednost. Zbrajanjem svih dobivenih vrijednosti „ 2γ “ dobiva se ukupna suma „ 2γ “ tj. vrijednost variograma za korak 1. Korak 2 ($h=2$) uključuje računanje variograma na sličan način. Jedina razlika je u tome što se ovoga puta promatra postoji li na udaljenosti od 2 ćelije od ćelije u kojoj se trenutno nalazi neka mjerena vrijednost, a postupak računanja variograma u toj točki izvodi se na isti način kao što je objašnjeno za korak 1. Računajući variograme u koracima može se vidjeti u kojem koraku će vrijednost variograma prijeći varijancu. To će se dogoditi u nekom koraku, primjerice koraku 7. Taj korak govori koliko se daleko može „gledati“ u ćelijama da još uvijek ima smisla „gledati“. Drugim riječima, sedma ćelija u bilo kojem smjeru nije bitna za izradu karata jer više ne postoji ovisnost između mjerenih podataka.



Slika 4-2. Primjer izračuna variograma podjelom karte na ćelije

4.2. Variogramski modeli

Postoji pet češćih teorijskih modela s kojima se gotovo svi eksperimentalni variogrami mogu matematički aproksimirati, a to su: sferni, eksponencijalni, Gaussov, linearni i logaritamski (Hohn, 1988). Razlikuju se prema tome sadržavaju li prag te po načinu ponašanja krivulje u blizini ishodišta (Malvić, 2008). U interpretaciji geoloških varijabli najčešće se koriste sferni, eksponencijalni i Gaussov model, dok su modeli bez praga rijetki u naftnogeološkoj praksi (slika 4-3).



Slika 4-3. Izgled krivulje sfernog, eksponencijalnog i Gaussovog teorijskog modela (prema Malvić, 2008)

Formule po kojima se definira ponašanje varijable određene odabranim teorijskim modelom su sljedeće (**slika 4-4**) (**Isaaks i Srivastava, 1989**):

$$\gamma(h) = C \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - \left(\frac{h^3}{2a^3} \right) \right] \quad h \leq a$$

Sferni model

$$\gamma(h) = C \quad h > a$$

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(\frac{-h}{a}\right) \right]$$

Eksponencijalni model

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(\frac{-h^2}{a^2}\right) \right]$$

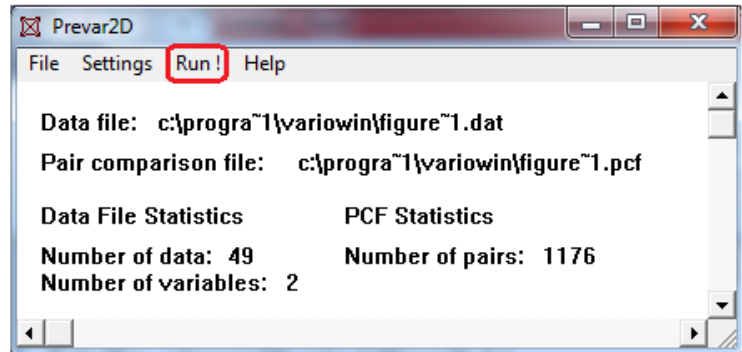
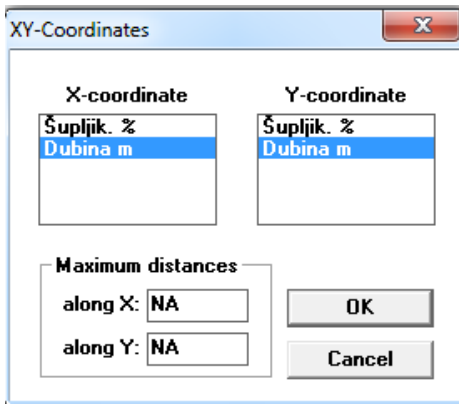
Gaussov model

Slika 4-4. Formule po kojima se definira ponašanje varijable za sferni, eksponencijalni i Gaussov teorijski model (**Isaaks i Srivastava, 1989**)

4.3. Izračun parova podataka

Za izračun variograma i njegovu aproksimaciju teorijskim modelom korišten je računalni program Variowin 2.2.1. koji se može besplatno preuzeti s interneta. Računalni program Variowin sadrži tri potprograma: potprogram „Prevar2D“, potprogram „Vario2D“ i potprogram „Model“. Rezultat jednog potprograma predstavlja ulazni podatak za drugi.

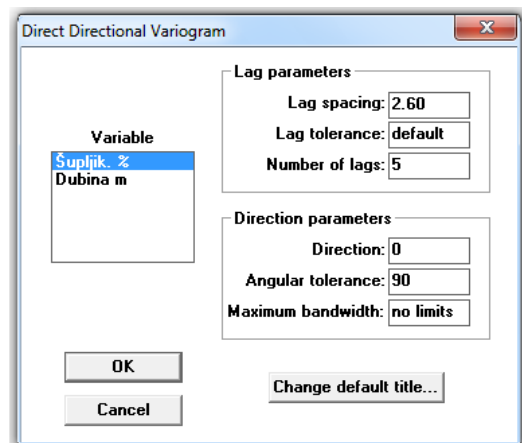
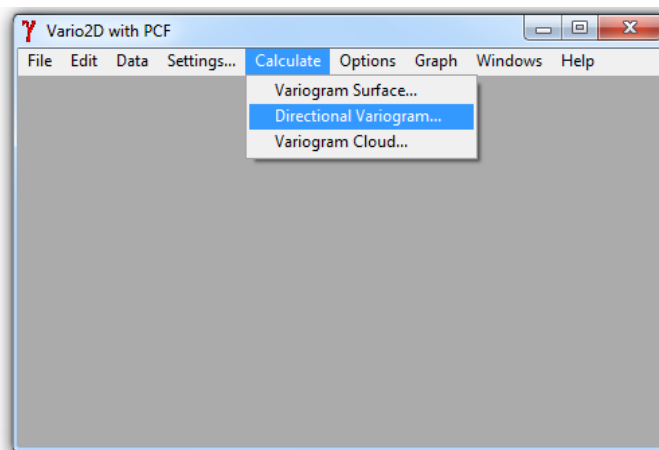
Ulazni podatci trebaju biti u „ASCII“ obliku zapisa. Nakon pripreme podataka pokretanjem potprograma „Prevar2D“ potrebno je učitati iste te odrediti željene koordinate u x i y smjeru (**slika 4-5**). Naredbom „Run !“ određuje se broj svih mogućih parova podataka na različitim udaljenostima (**slika 4-5**). Potprogram koristi ulazne podatke i sprema ih kao datoteku „pcf“ oblika zapisa.



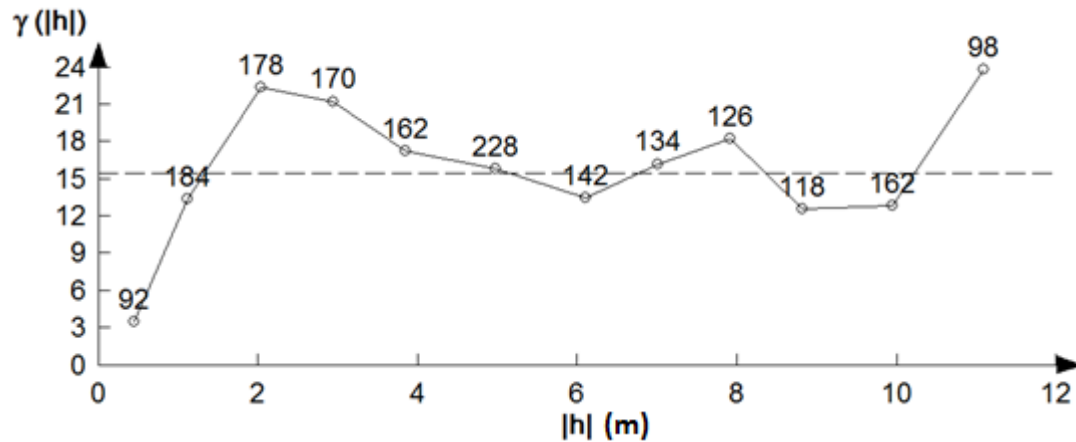
Slika 4-5. Određivanje koordinata u x i y smjeru (lijevo) i pokretanje naredbe „Run !“ (desno) u potprogramu Prevar2D

Kao što je vidljivo na slici 4-5 dubina je postavljena na obje koordinate, jer to odgovara 1D variogramu. U slučaju 2D variograma, svaka koordinata bi imala svoj zasebni skup podataka, npr. na koordinati x bila bi šupljikavost, a na koordinati y dubina.

Sljedeći korak uključuje pokretanje potprograma Vario2D u kojem se izrađuje eksperimentalni variogram. Potrebno je učitati prethodno dobivenu datoteku „.pcf“ oblika zapisa te otvoriti prozor „*Directional Variogram*“ (usmjereni variogram) (slika 4-6). U navedenom prozoru potrebno je odabrati varijablu (u ovom slučaju šupljikavost) i unijeti željene vrijednosti za „*Lag spacing*“ (veličina ćelija) i „*Number of lags*“ (broj ćelija) kako bi se dobio variogram (slika 4-6, slika 4-7).



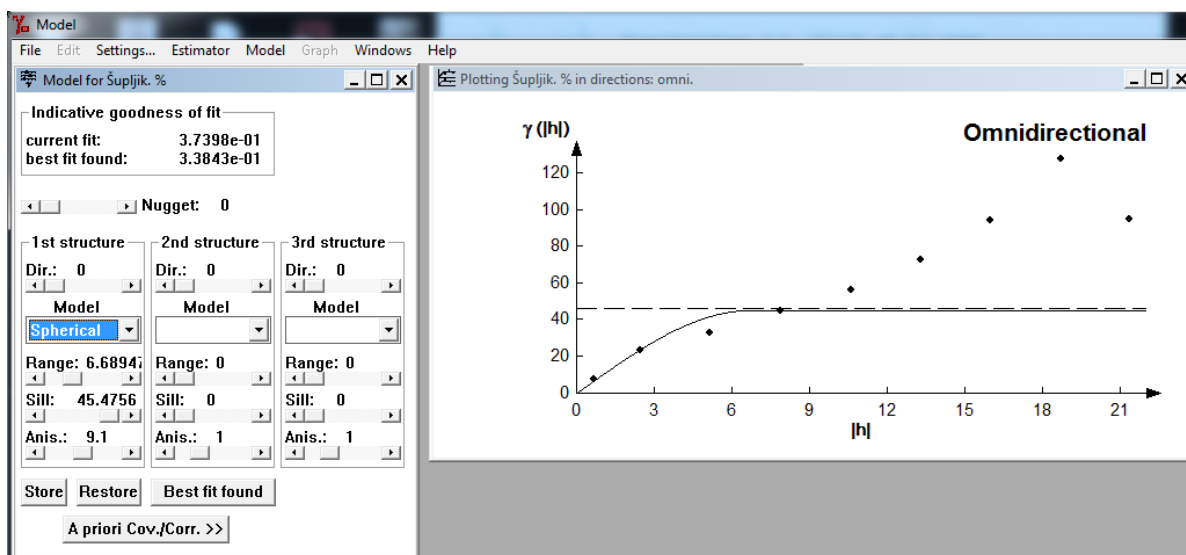
Slika 4-6. Otvaranje prozora „Directional Variogram“ (lijevo) te odabiranje varijable i parametara „*Lag spacing*“ i „*Number of lags*“ (desno)



Slika 4-7. Primjer variograma dobivenog potprogramom Vario2D

Dobiveni variogram potrebno je sačuvati kao datoteku „var“ oblika zapisa

Posljednji korak uključuje pokretanje potprograma „Model“ koji služi za aproksimaciju variograma jednim od ranije spomenutih teorijskih modela (sfernim, eksponencijalnim ili Gausovim). Učitavanjem prethodno sačuvane datoteke „var“ oblika zapisa te odabirom teorijskog modela potrebno je prilagoditi odstupanje, doseg i prag kako bi se dobila što točnija aproksimacija variograma odabranim teorijskim modelom (slika 4-8).



Slika 4-8. Primjer aproksimacije variograma teorijskim modelom potprogramom Model

5. IZRAČUN VARIOGRAMA

Za izračun variograma u ovome radu korištene su dvije skupine podataka. **Tablica 5-1** prikazuje podatke šupljikavosti pješčenjačkog ležišta u ovisnosti o dubini i temelji se na stvarnim podacima prikupljenim iz bušotine Ša-1. **Tablica 5-2** prikazuje podatke šupljikavosti pokrovnih stijena lapora u ovisnosti o dubini, dok su podatci u toj tablici „umjetni“, a približno odgovaraju šupljikavosti lapora. Podatci označeni žutom bojom su „umjetni“, tj. dobiveni korištenjem srednje vrijednosti prethodnog i nahodnog podatka, a vrijednosti šupljikavosti označene crvenom bojom u tablici **5-2** nisu realne i kao takve ne prikazuju stvarnu šupljikavost lapora. Iz tablice **5-1** vidljivo je da debljina ležišta iznosi 16 m.

Tablica 5-1. Vrijednosti šupljikavosti pješčenjaka (ležišta) iz bušotine Ša-1

Šupljikavost (%)	Dubina (m)	Šupljikavost (%)	Dubina (m)	Šupljikavost (%)	Dubina (m)
21,30	797,70	27,05	803,14	21,70	808,58
20,25	798,02	31,40	803,46	24,00	808,90
19,20	798,34	27,65	803,78	26,30	809,22
22,70	798,66	23,90	804,10	28,30	809,54
26,20	798,98	20,08	804,42	30,30	809,86
25,35	799,30	17,70	804,74	29,80	810,18
24,50	799,62	23,20	805,06	29,30	810,50
23,50	799,94	28,70	805,38	26,75	810,82
22,50	800,26	28,40	805,70	24,20	811,14
21,75	800,58	28,10	806,02	20,50	811,46
21,00	800,90	27,10	806,34	16,80	811,78
19,95	801,22	26,10	806,66	18,40	812,10
18,90	801,54	22,15	806,98	20,00	812,42
17,15	801,86	18,20	807,30	21,45	813,06
15,40	802,18	19,85	807,62	22,90	813,70
19,05	802,50	21,50	807,94		
22,70	802,82	21,60	808,26		

Tablica 5-2. Umjetne vrijednosti šupljikavosti lapora (krovine) iz bušotine Ša-1

Šupljikavost (%)	Dubina (m)	Šupljikavost (%)	Dubina (m)	Šupljikavost (%)	Dubina (m)
4,00	780,70	6,30	786,14	6,30	791,58
6,25	781,02	3,60	786,46	5,25	791,90
8,50	781,34	3,65	786,78	4,20	792,22
8,40	781,66	3,70	787,10	4,85	792,54
8,30	781,98	4,30	787,42	5,50	792,86
6,30	782,30	4,90	787,74	17,4	793,18
4,30	782,62	5,65	788,06	29,30	793,50
4,20	782,94	6,40	788,38	26,75	793,82
4,10	783,26	5,60	788,70	24,20	794,14
4,55	783,58	4,80	789,02	20,50	794,96
5,00	783,90	5,20	789,34	16,80	795,78
5,55	784,22	5,60	789,66	18,40	796,10
6,10	784,54	5,50	789,98	20,00	796,42
7,25	784,86	5,40	790,30	21,45	796,74
8,40	785,18	7,05	790,62	22,90	797,06
8,70	785,50	8,70	790,94		
9,00	785,82	7,50	791,26		

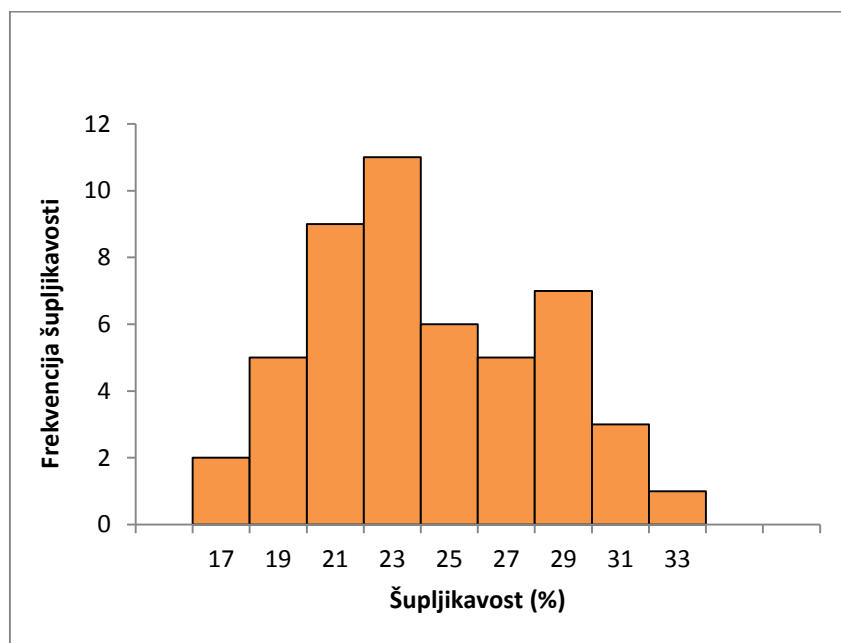
Nužno je ponovno napomenuti da je, radi nedovoljnog broja podatka, svaki drugi podatak u navedenim tablicama „umjetan“, tj. dobiven korištenjem srednje vrijednosti prethodnog i nahodnog podatka (podatci označeni žutom bojom). Takvim dobivenim skupom podataka omogućen je izračun variograma na temelju većeg broja podataka, čime raste pouzdanost variogramskog računa. Naravno, povećanje broja podataka srednjom vrijednošću između dva mjerena ima svoje očite nedostatke, jer se namjerno smanjuje broj mjerenih vrijednosti u ulaznom skupu. To iz pouzdanog skupa vrijednosti može načiniti skup čija se vjerodostojnost lako može staviti pod pitanje. Međutim, obje analizirane jedinice su relativno homogene, posebice lapor, te dovoljnih debljina da se u taložnom okolišu brakičnog regionalnog jezera razviju cjelovite taložne sekvencije pješčenjaka turbidnog te lapora hemipelagičkog podrijetla. Iz toga proizlazi da će se promjene veličine zrna u njima ponašati pravilno, odnosno postupno prelaziti iz krupnije u sitnije, zrnatije taložine. Posljedično, promjena šupljikavosti i propusnosti po okomici uglavnom će slijediti linearno spajanje dviju mjerenih točaka. Na takvoj dužini svaka matematička vrijednost vjerojatno bi se vrlo dobro podudarala s mjerenom da postoji. Nadalje, zbog promjena taložnih okoliša koje su po pružanju znatno veće negoli po okomici naslaga,

ovakvo pravilo ne bi se moglo primijeniti za bočnu analizu petrofizikalnih vrijednosti, jer su promjene previše nepoznate (kaotične) da bi se mogle opisati takvim taložnim modelom iz koga bi mogle biti uzete opće jednadžbe promjene vrijednosti šupljikavosti ili propusnosti bočno u prostoru. U stvari, takve jednadžbe mogu načiti aproksimaciju po nekoj površini i stvoriti kontinuiranu varijablu, ali kroz postupke koje nazivamo kartiranjem.

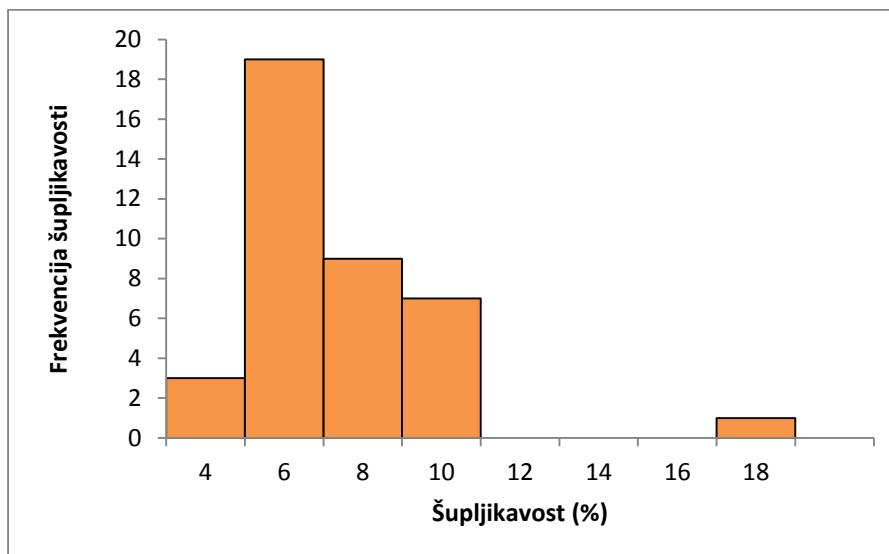
Kod statističke analize nužno je prvo načiniti histograme navedenih podataka, izračunati varijancu, srednju vrijednost te njihov minimum i maksimum. Oni su prikazani u sljedećem potpoglavlju.

5.1. Izračun osnovnih statističkih vrijednosti (histogram, varijanca, srednja vrijednost, minimum i maksimum)

Histogram predstavlja grafički prikaz raspodjele podataka. U ovom radu načinjeni su histogrami za podatke iz **tablice 5-1** i **tablice 5-2**, a prikazani su na slikama **5-1** i **5-2**.



Slika 5-1. Histogram šupljikavosti pješčenjaka (ležišta) iz bušotine Ša-1 (podatci iz **tablice 5-1**)



Slika 5-2. Histogram šupljikavosti lapora (krovine) iz bušotine Ša-1 (podatci iz **tablice 5-2**)

Broj razreda u histogramu sa slike **5-1** iznosi 10, a u histogramu sa slike **5-2** 8.

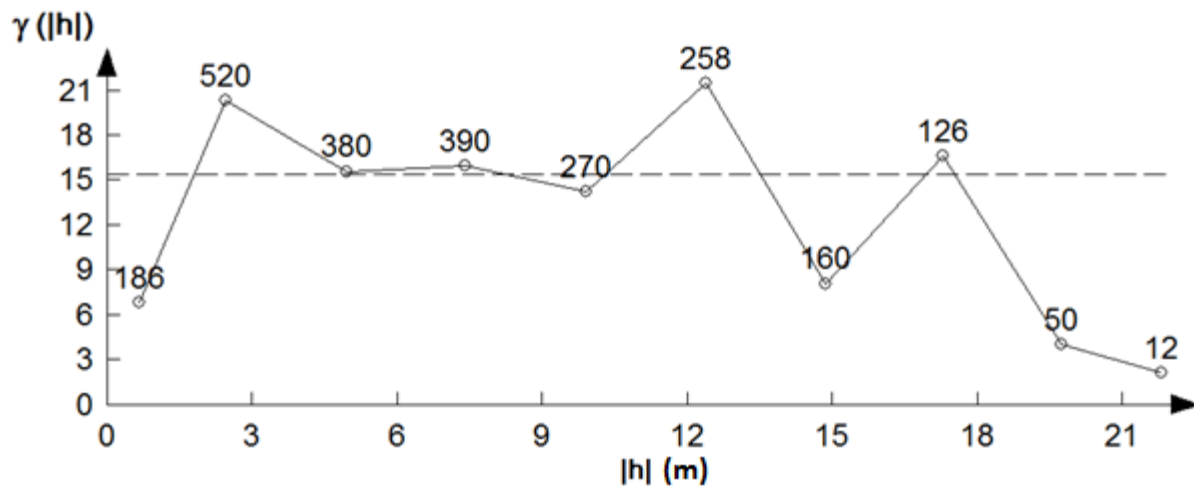
Podatci iz **tablice 5-2** koji su označeni crvenom bojom nisu korišteni kao ulazne vrijednosti za histogram na **slici 5-2** jer nisu realne i kao takve ne prikazuju stvarnu šupljikavost lapora.

Varijanca je mjera raspršenosti podataka, odnosno ona opisuje širinu intervala u kojem su ti podatci raspodijeljeni. Varijanca je dobivena pomoću funkcije „VAR“ u računalom programu Microsoft Excel. Varijanca za podatke šupljikavosti iz **tablice 5-1** iznosi **15,6936**, a za podatke šupljikavosti iz **tablice 5-2** **47,0619**.

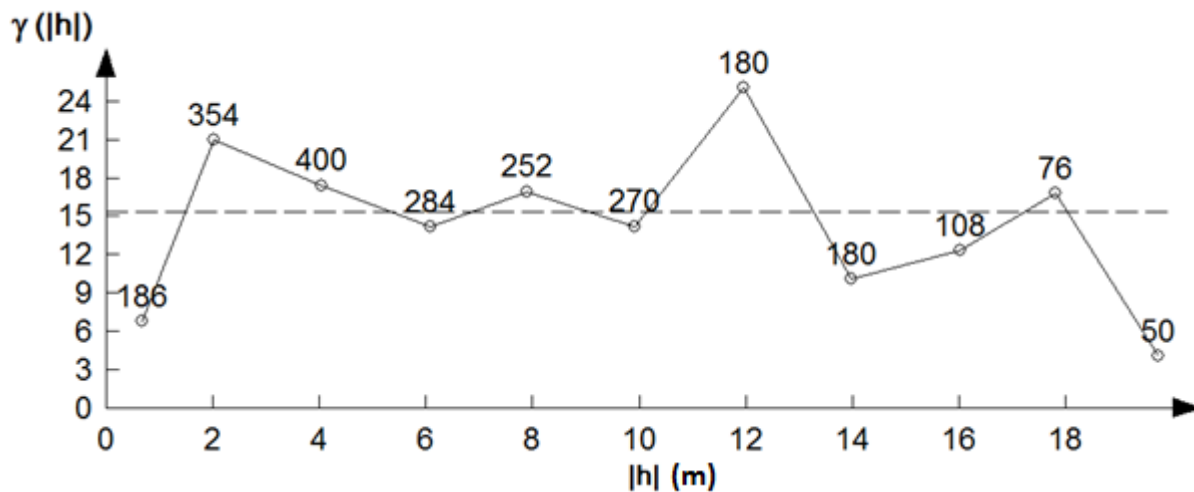
Srednja vrijednost za podatke šupljikavosti iz **tablice 5-1** iznosi **23,1588**, a za podatke šupljikavosti iz **tablice 5-2** **9,11327**. Minimalna vrijednost šupljikavosti za podatke iz **tablice 5-1** iznosi **15,4**, a za podatke šupljikavosti iz **tablice 5-2** **3,6**. Maksimalna vrijednost šupljikavosti za podatke iz **tablice 5-1** iznosi **31,4**, a za podatke šupljikavosti iz **tablice 5-2** **29,3**.

5.2. Izračun variograma u računalnom programu Variowin

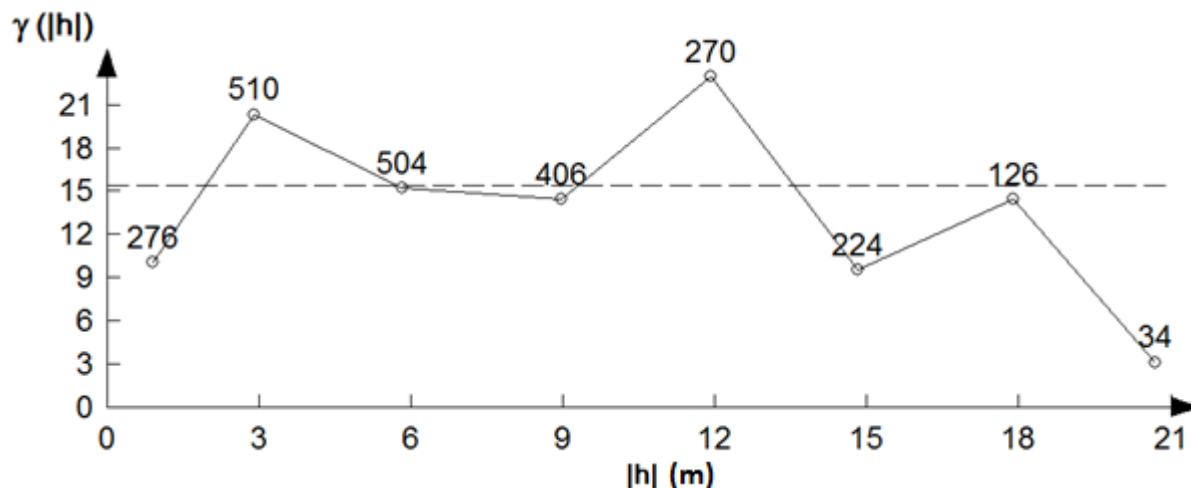
Na slikama **5-3**, **5-4**, **5-5**, **5-9**, **5-10** i **5-11** prikazani su neki od dobivenih variograma pomoću programa Variowin. Variogrami se razlikuju samo po različitim vrijednostima veličine ćelija i broja ćelija. Za podatke iz **tablice 5-1**, tj. za vrijednosti šupljikavosti pješčenjaka (ležišta) iz bušotine Ša-1 dobiveni su sljedeći variogrami (**slika 5-3**, **slika 5-4**, **slika 5-5**):



Slika 5-3. Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka polja Šandrovac (1)



Slika 5-4. Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka polja Šandrovac (2)



Slika 5-5. Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka polja Šandrovac (3)

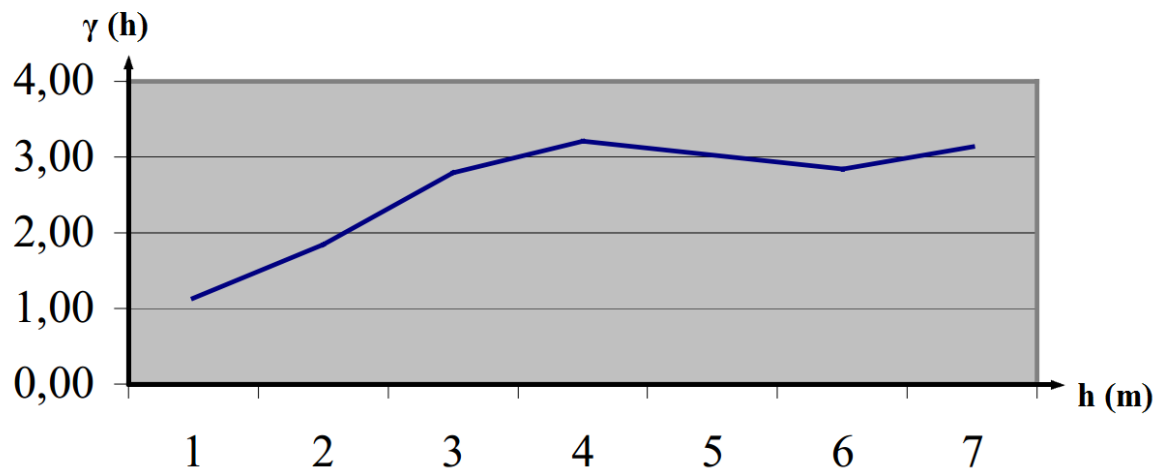
Vrijednosti veličine ćelija i broja ćelija za navedene variograme su sljedeće (**tablica 5-3**):

Tablica 5-3. Vrijednosti veličine ćelija i broja ćelija za variograme sa slika **5-3**, **5-4** i **5-5**

Slika 5-3		Slika 5-4		Slika 5-5	
Veličina ćelija	2	Veličina ćelija	2,5	Veličina ćelija	3
Broj ćelija	10	Broj ćelija	11	Broj ćelija	8

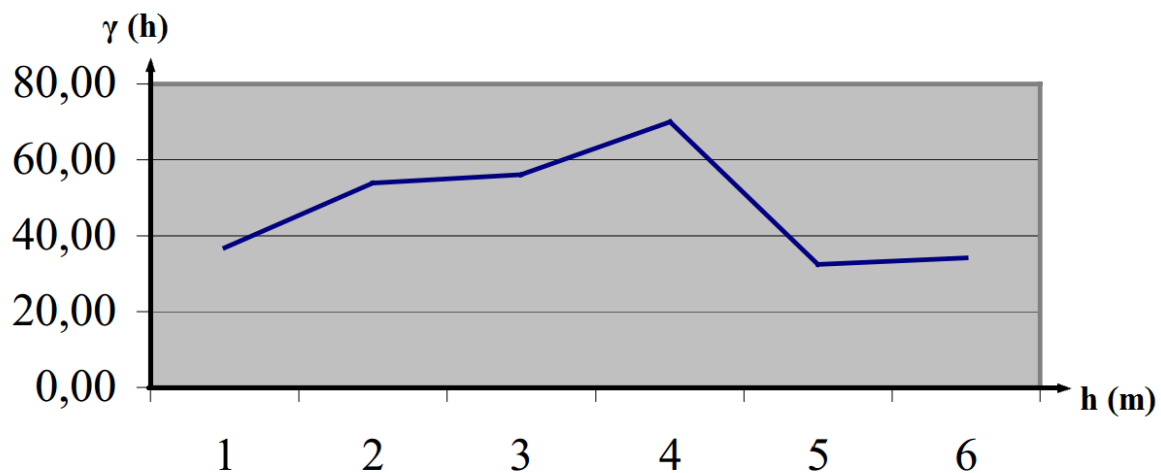
Malvić je u svojoj doktorskoj disertaciji **2003.** godine načinio niz 1D variograma na temelju podataka vrijednosti šupljikavosti dobivenih iz bušotina u različitim ležištima u Bjelovarskoj uleknini, uključujući i polje Šandrovac. Variogrami su računati pomoću vlastitog računalnog programa čiji je programski kod napisan u programskom jeziku Microsoft Visual Basic™, a crtani su u računalnom programu Microsoft Excel. Radi usporedbe, na sljedećim slikama (**slika 5-6**, **slika 5-7**, **slika 5-8**) prikazani su dobiveni variogrami:

Ša-5
680,3-686,3 m (h=0,5 m)



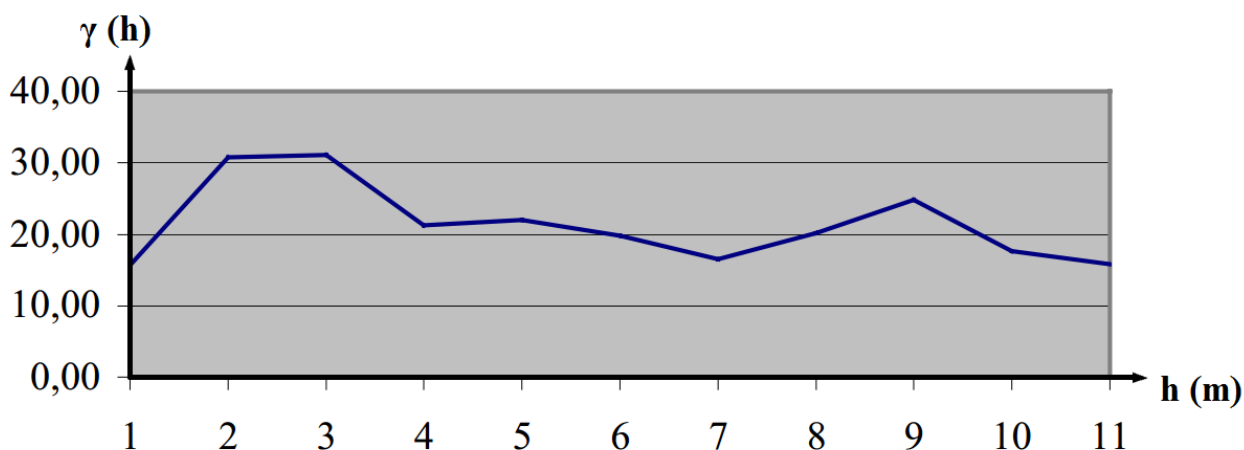
Slika 5-6: Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka u bušotini Ša-5 (1) / pješčenjaci Pepelana (modificirano prema Malvić, 2003)

Ša-5
810,6-816,6 m (h=0,5 m)



Slika 5-7: Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka u bušotini Ša-5 (2) / pješčenjaci Pepelana (modificirano prema Malvić, 2003)

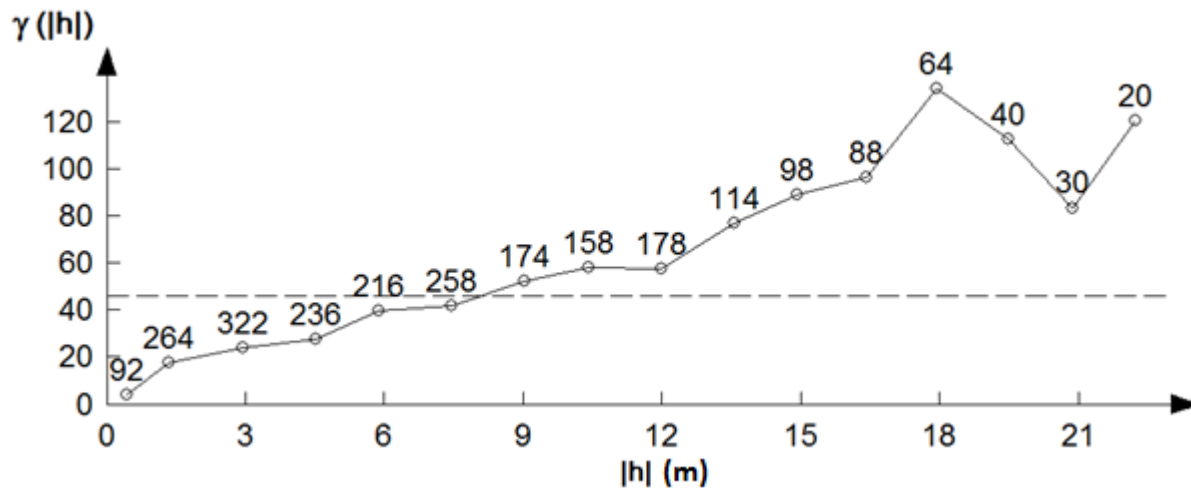
Ša-35 797,7-813,7 m (h=0,5 m)



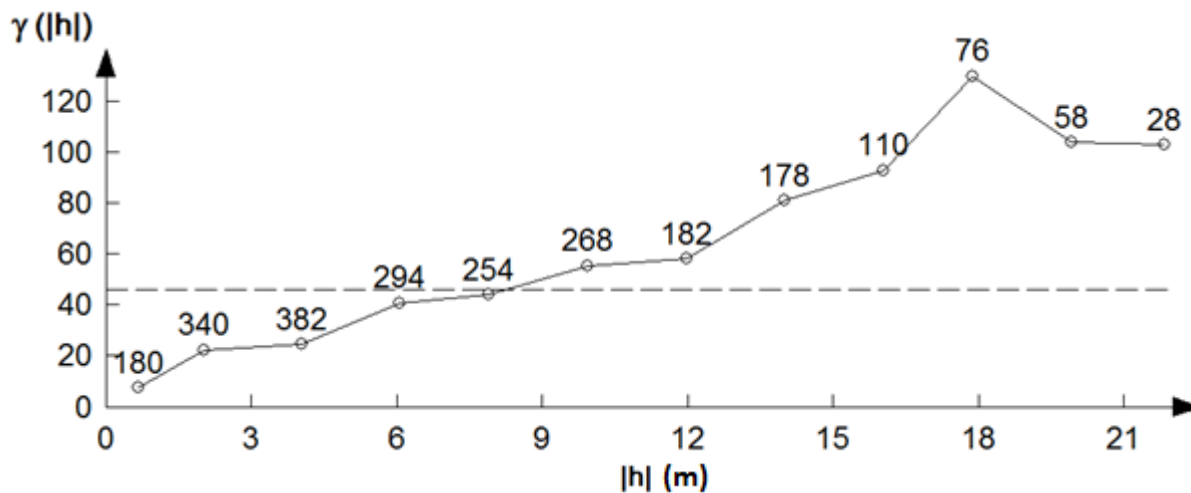
Slika 5-8: Semivariogramska krivulja šupljikavosti pješčenjaka u bušotini Ša-35 / pješčenjaci Pepelana (modificirano prema **Malvić, 2003**)

Na navedenim slikama vidljiva su 3 variograma dobivena na temelju vrijednosti šupljikavosti pješčenjaka prikupljenih iz bušotina u polju Šandrovac. Također je vidljivo kako je variogram na slici **5-8** dobiven na temelju istih podataka korištenih u ovome radu (**tablica 5-1**). Njihova sličnost opaža se u tome da variogrami sa slike **5-3**, **5-4** i **5-5** i variogram sa slike **5-8** pokazuju da nema nikakve prostorne zavisnosti mjerenih vrijednosti šupljikavosti.

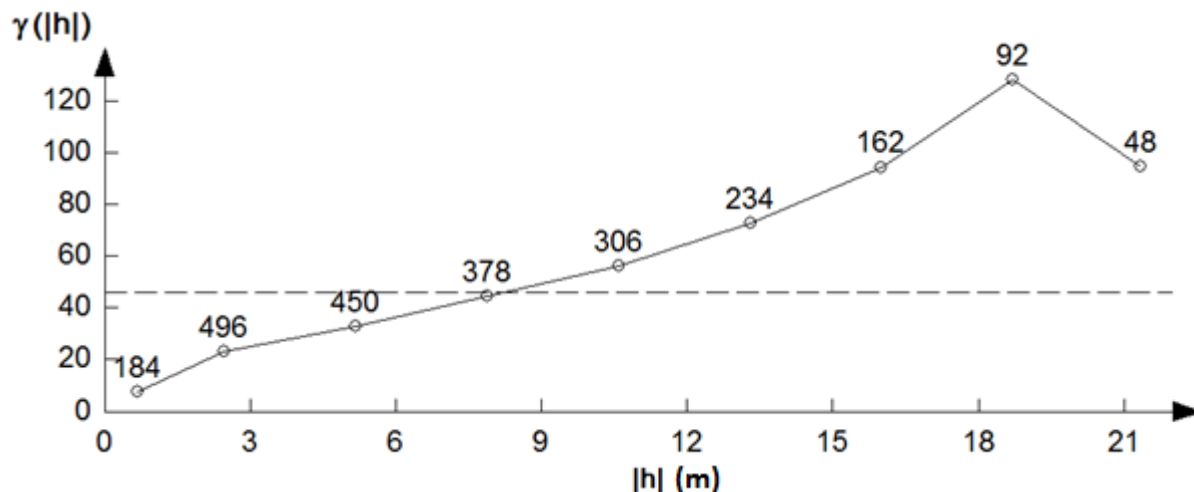
Za podatke iz **tablice 5-2**, tj. za fiktivne vrijednosti šupljikavosti lapora (krovine) iz bušotine Ša-1 dobiveni su sljedeći variogrami (**slika 5-9**, **slika 5-10**, **slika 5-11**):



Slika 5-9. Semivariogramska krivulja šupljikavosti lapora polja Šandrovac (1)



Slika 5-10. Semivariogramska krivulja šupljikavosti lapora polja Šandrovac (2)



Slika 5-11. Semivariogramska krivulja šupljikavosti lapora polja Šandrovac (3)

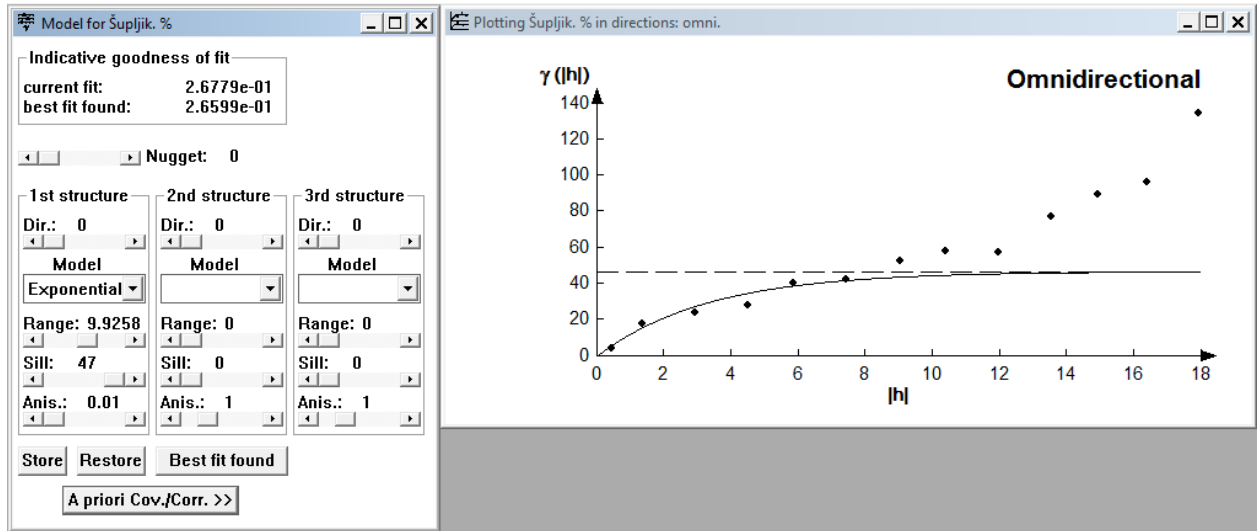
Vrijednosti veličine ćelija i broja ćelija za navedene variograme su sljedeće (**tablica 5-4**):

Tablica 5-4. Vrijednosti veličine ćelija i broja ćelija za variograme sa slika **5-9**, **5-10** i **5-11**

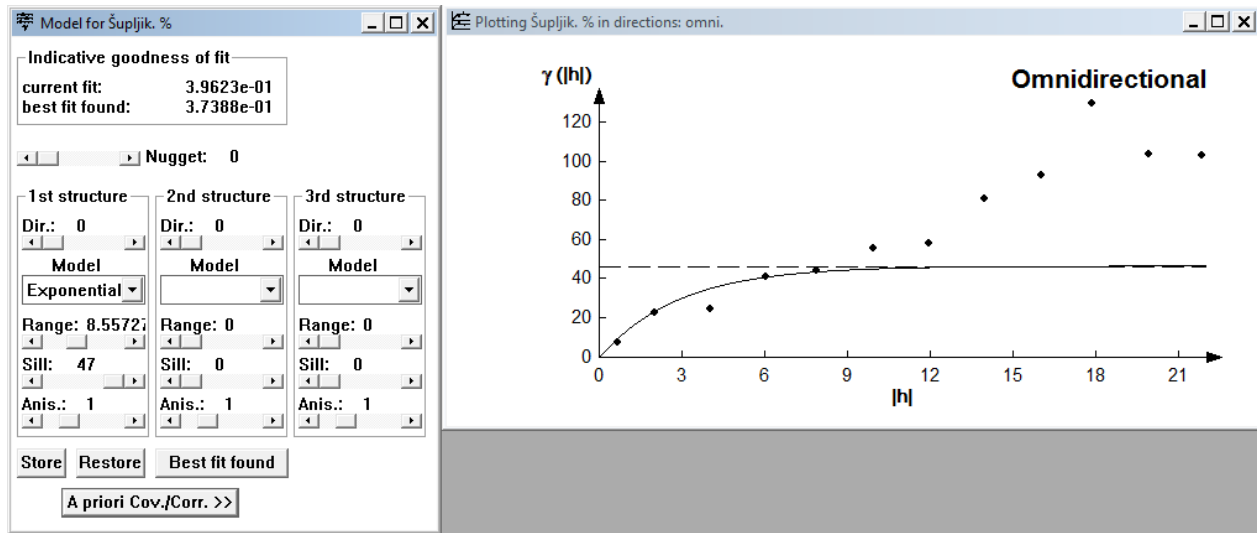
Slika 5-9		Slika 5-10		Slika 5-11	
Veličina ćelija	1,5	Veličina ćelija	2	Veličina ćelija	2,70
Broj ćelija	15	Broj ćelija	12	Broj ćelija	10

5.3. Aproximacija variograma teorijskim modelom

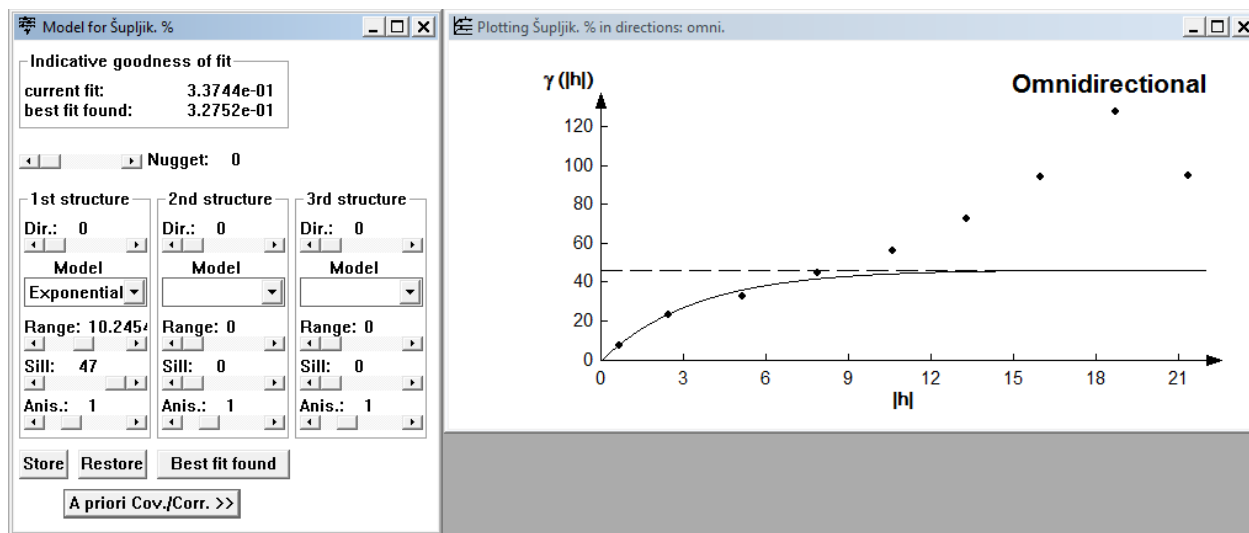
U prijašnjem potpoglavlju rečeno je da je aproksimacija variograma teorijskim modelom načinjena u potprogramu „Model“. Kao što je vidljivo sa slika **5-3**, **5-4** i **5-5**, variogrami dobiveni s takvim podacima ne mogu se aproksimirati niti jednim od mogućih teorijskih modela (sferni, eksponencijalni, Gaussov). Stoga takva aproksimacija nije napravljena niti prikazana u ovome radu. No, variogrami sa slika **5-9**, **5-10** i **5-11** mogu se aproksimirati i približno odgovaraju eksponencijalnom modelu. Takva aproksimacija načina je i prikazana na sljedećim slikama (**slika 5-12**, **slika 5-13**, **slika 5-14**):



Slika 5-12. Aproksimacija variograma sa slike 5-9 eksponencijalnim modelom



Slika 5-13. Aproksimacija variograma sa slike 5-10 eksponencijalnim modelom



Slika 5-14. Aproksimacija variograma sa slike 5-11 eksponencijalnim modelom

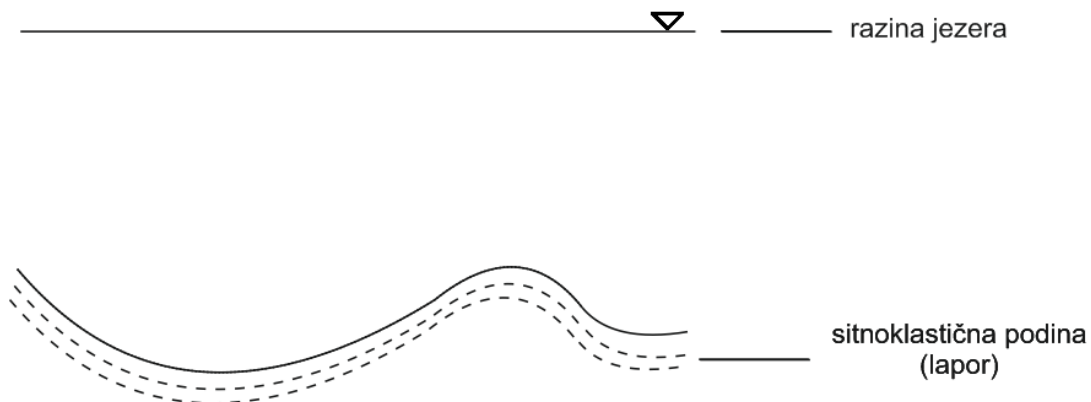
Vrijednosti parametara prikazanih aproksimacija teorijskim modelom su sljedeće (tablica 5-3-1):

Tablica 5-5. Vrijednosti parametara aproksimacije teorijskim modelom za variograme sa slika 5-12, 5-13 i 5-14

Slika 5-12		Slika 5-13		Slika 5-14	
Odstupanje	0	Odstupanje	0	Odstupanje	0
Doseg (m)	9,93	Doseg (m)	8,56	Doseg (m)	10,24
Prag	47	Prag	47	Prag	47

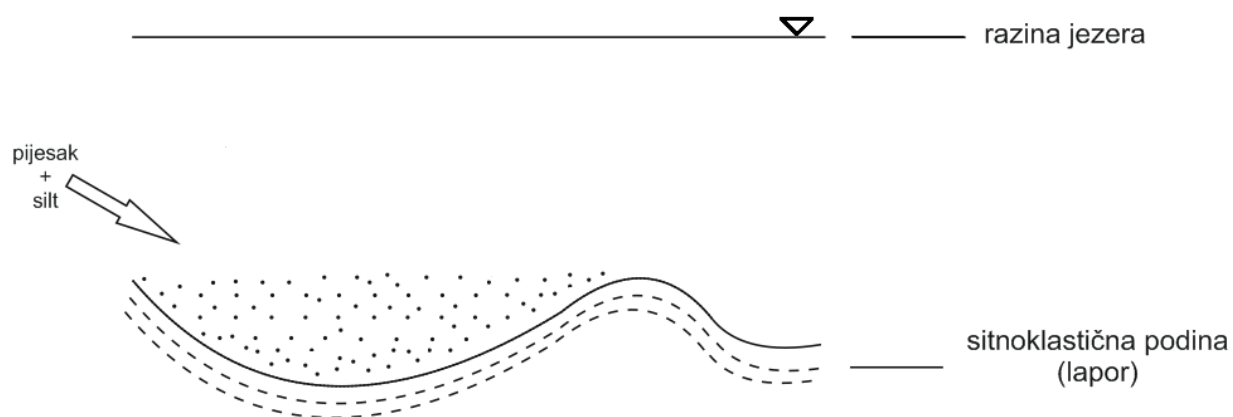
Iz prikazanih podataka vidljivo je da su vrijednosti dosega približno jednake, dok su vrijednosti odstupanja i pragova u potpunosti jednake. Već prije je naglašeno da se variogrami dobiveni na slikama 5-3, 5-4 i 5-5 ne mogu aproksimirati niti jednim od mogućih teorijskih modela. Razlog takvog izgleda variograma je nagli završetak taložnog okolišta koji će biti detaljno opisan u poglavlju 6. Slijed događaja (taloženja) moguće je prikazati grafički, u 4 faze (slika 5-15, 5-16, 5-17 i 5-18):

I. Stanje prije taloženja pijeska



Slika 5-15. Prva faza - stanje prije taloženja pijeska

II. Veliki donos pijeska (dominantno) i silta



Slika 5-16. Druga faza - veliki donos pijeska (dominantno) i silta

III. Nagli prekid donosa pijeska i silta

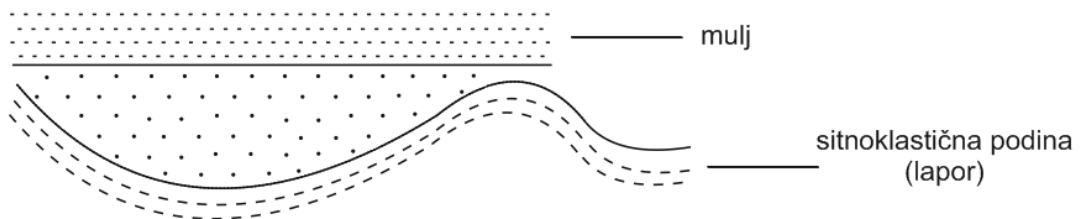
_____ ▽ _____ razina jezera



Slika 5-17. Treća faza - nagli prekid donosa pijeska i silta

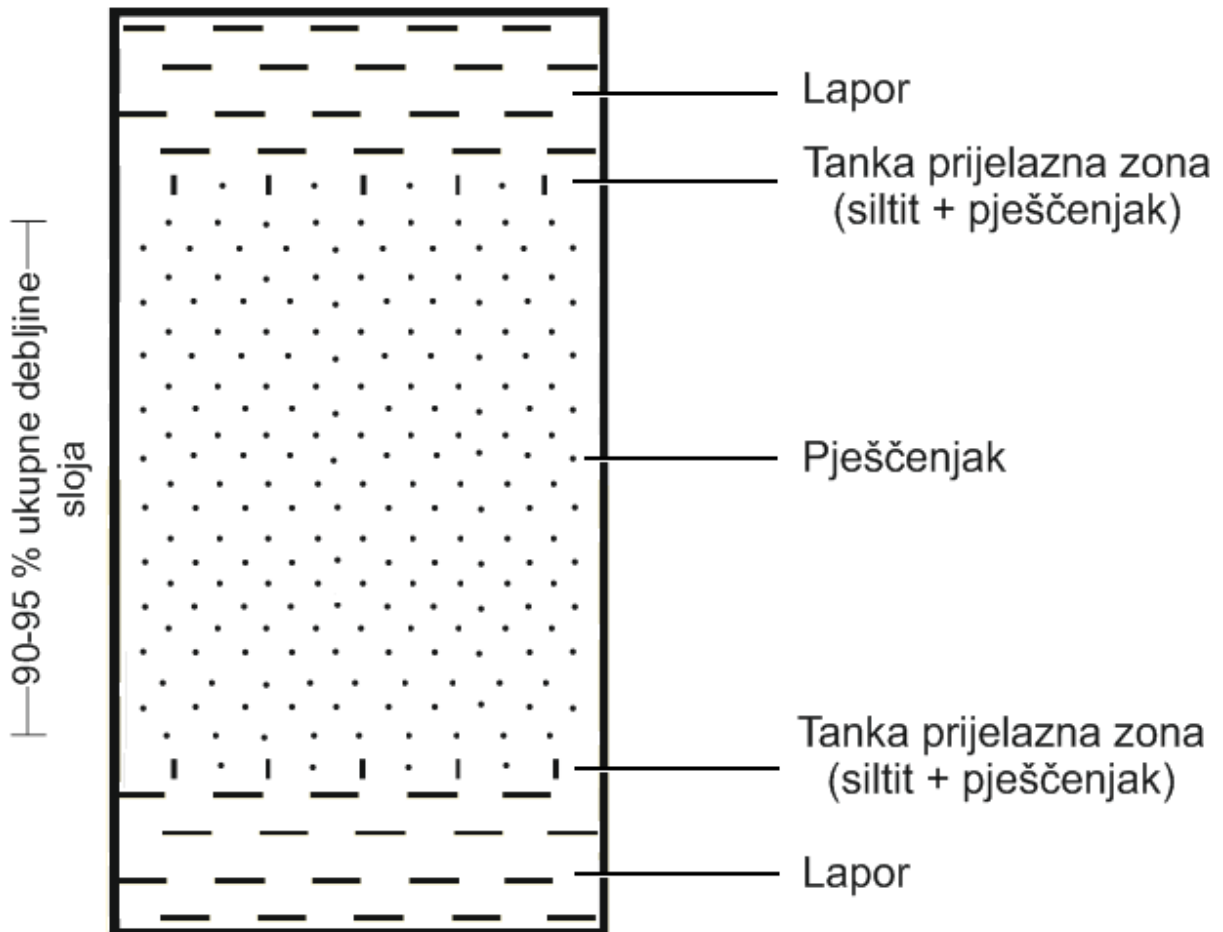
IV. Nastavak taloženja mulja bogatog karbonatima

_____ ▽ _____ razina jezera



Slika 5-18. Četvrta faza - nastavak taloženja mulja bogatog karbonatima

Rezultat ovakvog slijeda događa, tj. taloženja naslaga također se može prikazati litološkim stupom (slika 5-19):



Slika 5-19. Litološki stup analiziranog pješčenjačkog ležišta te neposredne krovine i podine u bušotini Ša-1 polja Šandrovac

6. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

Ležišta u polju Šandrovac su litološki heterogena. Posljedicom tektonskih pokreta struktura ležišta je ispresjecana mnogim rasjedima te je zbog toga podijeljena na 54 tektonska bloka. Također, plin u tom polju sadrži znatne količine otopljenog CO₂, čije se vrijednosti kreću od 0,3 % do čak 80 % na nekim mjestima. Izračun 1D variograma temeljio se na podacima dobivenim iz bušotine Ša-1.

Kao što je već prije navedeno, podatci za ležište dobiveni su na temelju pravih vrijednosti, dok su za krovinu vrijednosti „umjetne“. Variogrami dobiveni za krovinu prikazuju postupan rast i prostornu zavisnost, a kako su dobiveni na temelju „umjetnih“ podataka, nije ih bilo potrebno daljnje razmatrati, jer u sebi već sadrže trend procjene pa su variogrami samo to oslikali.

Rezultati variograma za ležište, dobiveni na slikama **5-3**, **5-4** i **5-5** pokazuju da nema nikakve zavisnosti između npr. vrijednosti šupljikavosti od 25,35 % na dubini od 799,30 m i vrijednosti šupljikavosti od 28,10 % na dubini od 806,02 m, tj., iz variograma je vidljivo da vrijednost šupljikavosti na dubini „a“ ne govori ništa manje o vrijednosti šupljikavosti na dubini „b“, nego što vrijednost šupljikavosti na dubini „c“ govori o vrijednosti šupljikavosti na dubini „d“. Njihova varijacija je podjednaka bilo gdje u intervalu pješčenjaka pa variogram postaje nepotrebno složeni geometrijski alat kojeg je dopušteno zamijeniti jednostavnim izračunom aritmetičke srednje vrijednosti za bilo koju točku po okomici u kojoj nema mjerene podatke. Porast i pad variogramskih vrijednosti uglavnom ne prikazuje prijelaz od krovine prema podini. Drugim riječima, ti variogrami upućuju na to da nema postupnog rasta vrijednosti, odnosno pada prostorne zavisnosti, a granica između pješčenjaka i lapora je oštra.

To se u prirodi može dogoditi kada je prijelazni dio između dvaju litofacijesa oštar, bilo zbog nagloga prestanka taloženja ili erozije. Ovdje se dogodilo da su zbog brzog taloženja u cijelome sloju svugdje prisutne jednako zrnate (negradirane) pješčenjačke čestice, tj. klasti. Takav slijed događaja grafički je opisan u četiri faze, na slikama **5-15**, **5-16**, **5-17** i **5-18** te litološkim stupom na slici **5-19**. Sa slika je vidljivo da je u kratkom vremenu donesena velika količina pijeska i silta, te je naglo prekinuta. Taloženje nije obuhvatilo samo jednu vrstu klastita po veličini niti se dogodila u istom kraćem razdoblju, ali svejedno, to je jedna taložna sekvencija koja je uspjela stvoriti litološki prepoznatljiv, povezan niz taložina. Stoga u takvoj sredini nema smisla tražiti prostornu zavisnost jer prijelazna zona i postupna promjena gradacije i šupljikavosti

ne postoji. Drugim rječima, nema nikakvoga uređenoga trenda, tj. "neuređenost," je u svakom dijelu jednaka.

U suprotnom slučaju imali bi postupan raspored i postupan pad, mogli bismo pronaći trend, što znači da bi se moglo odrediti kolika bi bila očekivana promjena u šupljikavosti od dubine "a" do dubine „b“ te procijeniti vrijednost u svakoj točki između njih. Srednja vrijednost u oba slučaja je otprilike ista, ali u drugom slučaju postoji postupan rast, stoga bi na variogramu bila vidljiva prostorna zavisnost i porast vrijednosti.

Kod pješčenjaka opisanih u ovome radu uređenosti u malome volumena nema, odnosno ona je jednakog stupnja neuređenosti kao i u cijelom uzorku. Stoga su minimalne i maksimalne vrijednosti šupljikavosti uglavnom slične u bilo kojem volumenu, odnosno izotropnost se javlja već na vrlo maloj skali. U načelu, sredina je vrlo homogena, ali tek na dovoljno velikoj skali, odnosno u dovoljno velikom uzorku kojim bismo zahvatili prosječan broj zrnaca različitog granulometrijskog sastava detritusa pijeska i ostalih klastita. Načelno, ne možemo znati kako su raspoređena zrna unutar uzorka. Priroda nije uvijek predvidljiva. Možemo samo predvidjeti u kojem smjeru zrna određenog granulometrijskog sastava ima više ili manje. Općenito, cijeli uzorak ima stohastički raspored zrna, a poznate su samo statističke veličine cijeloga uzorka. To prostorno znači da određeni granulometrijski sastav na jednom mjestu u uzorku ne govori ništa o tome da ju moramo imati i na nekom drugom, nasumično odabranom mjestu. Analogno tome, niti šupljikavost na mjestu „x“ neće ništa govoriti o šupljikavosti na mjestu „y“ ako koristimo prostornu statistiku. Stoga variogram pokazuje da nema nikakve prostorne zavisnosti. Ali, zato što je uzorak homogen, možemo sigurno odrediti minimum i maksimum šupljikavosti, aritmetičku sredinu te još neke opće statističke vrijednosti.

Paradoksalno, iz variograma koji ne prikazuje nikakvu prostornu zavisnost vidljivo je izvrsno pješčenjačko ležište. Zbog neuređenosti i rasporeda zrna zbog kojeg nema postupne gradacije takvi su pješčenjaci u principu krupnozrnati. Nema postupnog prijelaza sitnozrnatog i krupnozrnatog pijeska što je za naftu i plin izvrsno jer ne postoji niti jedan dio ležišta koji ima slabopropusna svojstva. Drugim riječima, ležište je idealno, a variogram ne prikazuje nikakvu prostornu zavisnost.

7. LITERATURA

1. 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), str. 27-36.
2. FEIGL, A., 2008. Procjena rasporeda propusnosti u pješčenjacima na primjeru naftnog polja Šandrovac. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb. Magistarski rad, str. 3-4.
3. GREGURIĆ, M., KRIŽ, S., BANOVIĆ, V., LIHTER, D., PAVIČIĆ, I., 2005. Prostorni plan uređenja općine Šandrovac. *Županijski glasnik*, 08/98, A – 57.
4. HOHN, M. E., 1988. *Geostatistics and Petroleum Geology*. Van Nostrand Reinhold, New York, 400 str.
5. HUSANOVIĆ, E., MALVIĆ, T., 2014. Pregled dosadašnjih determinističkih geostatističkih kartiranja ležišta ugljikovodika u Republici Hrvatskoj te prednosti takvoga pristupa. *Nafta*, 65, str. 64-68.
6. ISAAKS, E., SRIVASTAVA, R., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press Inc., New York, 580 str.
7. KALE, M., 2000. Praćenje kretanja utisnute vode u ležištima E serije na dijelu polja Šandrovac. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb. Diplomski rad, str. 3-4.
8. KUPFERSBERGER, H., DEUTSCH, C., V., 1999. Methodology for Integrating Analog Geologic Data in 3D Variogram Modeling. *AAPG Bulletin*, 83/8, Tulsa, str. 1262-1278.
9. MAJSTOROVIĆ BUŠIĆ, A., SREMAC, J., VELIĆ, J., MALVIĆ, T., 2015. Kriteriji determinacije sarmatskih naslaga u odabranim istraživačkim bušotinama Savske depresije (Criteria for determination of Sarmatian sediments in selected exploratory wells in Sava Depression). Osijek, 5. hrvatski geološki kongres.
10. MALVIĆ, T., 2003. Naftnogeološki odnosi i vjerojatnost pronalaska novih zaliha ugljikovodika u Bjelovarskoj uleknini. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb. Doktorska disertacija, str. 87.
11. MALVIĆ, T., 2003. One-dimensional variogram and statistical analysis in reservoir units of the Bjelovar sag, Croatia. *Nafta*, 54(7-8), str. 267-274.

12. 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, str. 63-70.
13. MALVIĆ, T., 2008. Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka. INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.
14. MALVIĆ, T., 2008. Izrada karte poroznosti krigiranjem u pješčenjačkim ležištima, primjer iz Savske depresije. *Kartografija i geoinformacije*, 7(9), str. 12-19.
15. MALVIĆ, T., 2008. Kriging, cokriging or stochastic simulations, and the choice between deterministic or sequential approaches. *Geologia Croatica*, 61(1), str. 37-50.
16. MALVIĆ, T., 2011. Geological maps of Neogen sediments in the Bjelovar Subdepression (northern Croatia). *Journal of Maps*, 7(1), str. 304-317.
17. MALVIĆ, T., 2012. Review of Miocene shallow marine and lacustrine depositional environments in Northern Croatia. *Geological Quarterly*, 56(3), str. 493-504.
18. MALVIĆ, T., BARIŠIĆ, M., FUTIVIĆ I., 2009. Geostatističko kartiranje kokrigingom te važnost kvalitetnog seizmičkog atributa. *Nafta*, 60(5), str. 259-264.
19. MALVIĆ, T., CVETKOVIĆ, M., BALIĆ, D., 2008. *Geomatematički riječnik*. Hrvatsko geološko društvo, Zagreb.
20. MALVIĆ, T.; ĐUREKOVIĆ, 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), str. 331-340.
21. MALVIĆ, T., PRSKALO, S., 2008. Značenje amplitudnog atributa u predviđanju poroznosti – primjer iz Dravske depresije. *Nafta*, 59(1), str. 39-51.
22. MESIĆ KIŠ, I., MALVIĆ, T., 2014. Zonalna procjena i interpolacija kao istovremeni pristupi u slučaju malog ulaznog broja podataka (primjer polja Šandrovac, Sjeverna Hrvatska) (Zonal estimation and interpolation as simultaneous approaches in the case of small input data set (Šandrovac field, Northern Croatia)). *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 29, str. 9-16.
23. MRŠIĆ, Z., ČIKEŠ, M., 2009. Izračunavanje indikatorske krivulje pri proizvodnji povremenim plinskim liftom (IPR curve calculating for a well producing by intermittent gas-lift method). *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 21, str. 83-93.

24. NOVAK ZELENIKA, K., MALVIĆ, T., GEIGER, J., 2010. Kartiranje gornjomicenskih pješčenjačkih facijesa metodom indikatorskog kriginga. Nafta, 61(5), str. 225- 233.
25. NOVOSEL, D., SEČEN, J., 2004. Analiza utjecaja sadržaja CO₂ u dijelu polja Šandrovac na iscrpak nafte u primarnoj i sekundarnoj fazi iskorištavanja ležišta (Disolved Carbon Dioxide Impact Analysis in a Part of Oil Field Šandrovac on the Oil Recovery in the Primary and Secondary Production Phases). INA-Industrija nafte d.d., Zagreb, str. 51-62.

Izjava

Ovom izjavom izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom.

Marko Vekić
