

# Odabir i geomatematička obrada varijabli za skupove manje od 50 podataka pri kreiranju poboljšanoga dubinskogeološkoga modela na primjeru iz zapadnoga dijela Savske depresije

---

Ivšinović, Josip

Doctoral thesis / Disertacija

2019

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:977620>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Josip Ivšinović

**ODABIR I GEOMATEMATIČKA  
OBRADBA VARIJABLI ZA SKUPOVE  
MANJE OD 50 PODATAKA PRI  
KREIRANJU POBOLJŠANOGA  
DUBINSKOGEOLOŠKOGA MODELA NA  
PRIMJERU IZ ZAPADNOGA DIJELA  
SAVSKE DEPRESIJE**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2019.



University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Josip Ivšinović

**SELECTION AND GEOMATHEMATICAL  
CALCULATION OF VARIABLES FOR  
SETS WITH LESS THAN 50 DATA  
REGARDING THE CREATION OF AN  
IMPROVED SUBSURFACE MODEL,  
CASE STUDY FROM THE WESTERN  
PART OF THE SAVA DEPRESSION**

DOCTORAL DISSERTATION

Zagreb, 2019



Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Josip Ivšinović

**ODABIR I GEOMATEMATIČKA  
OBRADBA VARIJABLI ZA SKUPOVE  
MANJE OD 50 PODATAKA PRI  
KREIRANJU POBOLJŠANOGA  
DUBINSKOGEOLOŠKOGA MODELA NA  
PRIMJERU IZ ZAPADNOGA DIJELA  
SAVSKE DEPRESIJE**

DOKTORSKI RAD

Mentor:  
prof. dr. sc. Tomislav Malvić

Zagreb, 2019.





University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Josip Ivšinović

**SELECTION AND GEOMATHEMATICAL  
CALCULATION OF VARIABLES FOR SETS  
WITH LESS THAN 50 DATA REGARDING  
THE CREATION OF AN IMPROVED  
SUBSURFACE MODEL, CASE STUDY  
FROM THE WESTERN PART OF THE SAVA  
DEPRESSION**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:  
Dr. Tomislav Malvić, Full Prof.

Zagreb, 2019

## **Informacije o mentoru:**

### **prof. dr. sc. Tomislav Malvić**

Diplomirao je u rujnu 1995. na Rudarsko-geološko naftnom fakultetu u Zagrebu te započeo raditi kao znanstveni novak na Zavodu za geologiju i geološko inženjerstvo. Prvi projekti na kojima je sudjelovao bili su Duboka geološka građa i neotektonski odnosi u Hrvatskoj (109020 voditelj prof. dr. Eduard Prelogović), te Dubinska geološka i geohazardna istraživanja u Hrvatskoj (195018 voditelj prof. dr. Josipa Velić). Asistirao je u održavanju praktičnoga dijela predmeta (nositelj prof. dr. Zvonimir HERNITZ): Geologija kaustobiolita, Geologija ležišta fluida i Dubinsko kartiranje, Bio je uključen u različita naftnogeološka istraživanja u hrvatskom dijelu Panonskoga bazena. Rezultati su objavljeni u magistarskoj i doktorskoj radnji te nekoliko radova. U kolovozu 2002. pridružio se Službi za geološku razradu ležišta u Sektoru za razradu INA-Naftaplina kao specijalist za geostatistiku. Bio je odgovoran za statističke, geostatističke i stohastičke analize primjenjenje na naftna i plinska polja, tj. njihove geološke modele u razradnoj fazi. Objavio je nove znanstvene i stručne radove iz geostatistike. Također, nastavio je surađivati na projektima financiranih od Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa i to: Doprinosi stratigrafskih i statističkih metoda u naftnoj geologiji (0195035 voditelj prof. dr. Josipa Velić). Od kolovoza 2005. promoviran je u eksperta, od 2007. u savjetnika direktora Sektora za razradu, a od 2013. je vodeći/stariji stručnjak. Uglavnom je uključen u analize geomatematičkih problema primijenjenih na razradu ležišta ugljikovodika. Radio je kao interni recenzent elaborata o rezervama, ali i savjetnik iz područja naftne geologije u kojima ima iskustva. Od akad. god. 2007./2008. radi kao gostujući predavač na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu. Godine 2009. izabran je u znanstveno zvanje znanstvenoga suradnika u području prirodnih znanosti, polje geoznanosti, grana geologija. Godine 2013. izabran je u zvanje višega znanstvenoga suradnika, a 2013. u zvanje znanstvenoga savjetnika te izvanrednoga profesora. Do danas u Hrvatskoj znanstvenoj bibliografiji ima gotovo 300 upisa. Od toga je 6 autorskih i 10 uredničkih knjiga te 70 izvornih znanstvenih radova. Do sada je uspješno komentorirao 3 doktorata, odnosno ukupno 28 ocjenskih radova. Načinio je nekoliko desetaka recenzija radova i studija. Primio je godišnju nagradu baze Publons (*Clarivate Analytics*), za multidisciplinarno područje, a koja se prima 1 posto recenzenata s najviše potvrđenih pregleda u razdoblju 9. 2018. – 9. 2019. Dobitnik je niza nagrada kako u Hrvatskom geološkom društvu (medalje odsjeka i 6 godišnjih nagrada), na hrvatskim izložbama inovacija (2 zlatne, 2 srebrne, 1 brončana medalja, 1 posebno zlatno priznanje), te niza priznanja i zahvalnica (HGD, Hrvatska geološka ljetna škola). Od siječnja 2015. radi u potpunosti na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u znanstveno-nastavnom zvanju izv. prof., a dana 10. travnja 2018. izabran je u zvanje redovitog profesora. Dana 26. ožujka 2019. postao je znanstvenim savjetnikom u trajnom zvanju.

*Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Tomislavu Malviću na pomoći, podršci, ukazanom povjerenju i brojnim korisnim savjetima tijekom izradbe rada.*

*Također zahvaljujem i članovima povjerenstva za ocjenu rada, prof. emeriti dr. sc. Josipi Velić, i prof. dr. sc. Jasenki Sremac na uloženom trudu i korisnim primjedbama koji su doprinijeli boljem sadržaju disertacije.*

*Na kraju veliko hvala mojoj supruzi Ivani, sinu Filipu, ocu Danku, majci Ljiljani te obitelji na potpori i razumijevanju.*

## SAŽETAK

### **Odabir i geomatematička obradba varijabli za skupove manje od 50 podataka pri kreiranju poboljšanoga dubinskogeološkoga modela na primjeru iz zapadnoga dijela Savske depresije**

**Ključne riječi:** geostatističko kartiranje, metoda ponovljenog uzorkovanja, neogenska pješčenjačka ležišta, geološka vjerojatnost, rizično neutralna vrijednost, Savska depresija, Hrvatska

Objekti doktorskoga istraživanja su dva gornjomiocenska pješčenjačka ležišta ugljikovodika zapadnoga dijela Savske depresije. Trenutačno se iz njih pridobivaju ugljikovodici sekundarnom metodom, tj. utiskivanjem slojne vode. Istraženost toga prostora na razini je koja dopušta značajna poboljšanja i nadogradnju geoloških modela s ciljem povećanja iscrpka ležišta. To se posebno odnosi na metode statističke i geomatematičke analize niza ležišnih varijabli poput šupljikavosti, propusnosti (primarne varijable) te utisnutih volumena vode (sekundarna varijabla). Većinu postojećih karata ležišta (strukturnih, šupljikavosti i sl.) treba načiniti znatno detaljnije, poglavito s većim brojem ulaznih vrijednosti.

Matematički algoritmi poput variograma i krigiranja bili su glavni alati u izučavanju prostorne zavisnosti i moguće anizotropije spomenutih varijabli. Statističke metode ponovnoga uzorkovanja bile su alat kojim se proširio broj vrijednosti statističkih parametara te time unaprijedile analize prostora u kojima je broj podataka oskudan, tj. približno manji od 50 mjerenja po odabranoj regionaliziranoj varijabli. Za mali ulazni skup podataka (<20) primijenjene su sljedeće interpolacijske metode: inverzne udaljenosti, najbližeg i prirodnoga susjedstva.

Metodologija izračuna geološke vjerojatnosti (POS) je primijenjena prilikom izračuna postojanosti preostalih ekonomskih količina ugljikovodika. Modifikacija metodologije izračuna POS-a je primijenjena za ležišta koja su sekundarnoj fazi pridobivanja (zavodnjavanje ležišta). Izračun neutralne vrijednosti novčanih jedinica je primijenjen za istraživanje dodatnih količina ugljikovodika u postojećim strukturama te pridobivanje ugljikovodika prilikom zavodnjavanja ležišta.

## EXTENDED ABSTRACT

### **Selection and geomathematical calculation of variables for sets of 50 data regarding the creation of an improved subsurface geological model, case study from the western part of the Sava Depression**

**Key words:** geostatistical mapping, Jack-knifing method, Neogene sandstone reservoirs, geological probability, risk neutral value, Sava Depression, Croatia

The objects of the doctoral research are two hydrocarbon fields with Upper Miocene sandstone reservoirs, located in the western part of the Sava Depression. Namely, those are the "A" field with "L" reservoir and the "B" field with "K" reservoir. Both currently produce hydrocarbons using a secondary method (water injection). This is very mature explored and developed area, what allows significant improvements and upgrades of geological models in order to increase hydrocarbon recovery. This applies especially for methods of statistical and geomathematical analysis of numerous reservoir variables such as porosity and permeability (primary variables) and injected water volumes (secondary variable). Furthermore, the most existing reservoirs maps (structural, porosity, etc.) should be made in much more detail, using advancing mapping algorithms.

Mathematical algorithms such as variograms and Kriging had been the main tools in analysing spatial dependence and possible anisotropy of the selected variables. The Kriging method has a long history of application in the field of Croatian part of the Pannonian Basin System (CPBS). The statistical method Jack-knifing was a tool who extend the number of values of statistical parameters and thus to improve the analysis in which the number of data deficient, i.e. approximately less than 50 measurements per selected regionalized variable (porosity: reservoir "L" 25 data, reservoir "K" 19 data).

For a small input data set (<20), for variables injected volume of water (reservoir "L" 10 data; reservoir "K" 3 data) and permeability (reservoir "L" 10 data; reservoir "K" 18 data) following interpolation methods are applied: Inverse Distance, Nearest and Natural Neighbourhood. The size of the small input set for different types of variables, i.e., measured points, was defined by 20 or more „solid“ data, and about 15 has been sufficient to apply the Inverse Distance and Nearest Neighbourhood methods. For a small input data set, the recommended mapping method is the Inverse Distance method. When interpreting mapping

results after applying Ordinary Kriging (before or after Jack-knifing method) or interpolation method for a small sample of the final evaluation of the resulting maps is necessary to fulfill the following: visually (maps with no expressed local value („bull-eyes“ or „butterflies“), are appropriate) and numerically (using the cross-validation value). According to the results of the cross-validation values, the Inverse Distance method in the cases of mapping permeability and injected volume of water for reservoirs “K” and “L” is most acceptable.

The methodology for calculating geological probability was applied in calculating the persistence of the remaining economic quantities of hydrocarbons in the western part of the Sava Depression. A modification of the methodology for the calculation of geologic probability was applied to the reservoirs that are in the secondary hydrocarbon production phase. The variables that are included in the geological probability calculation are: trap, reservoir, source rocks, migration and hydrocarbons preservation. The calculated value of exploratory geological probability for the western part of the Sava Depression is 0.4218, while the value of the modified geological probability for reservoirs in the secondary hydrocarbons production phase is 0.5625.

The calculation of the risk neutral value of monetary units has been applied to: exploration of additional hydrocarbons in existing structures and production hydrocarbons from water flooding reservoirs. The calculated value of  $2.32 \cdot 10^6$  risk-neutral USD (500 000 m<sup>3</sup> of geological reserves of hydrocarbons) for the exploration geological probability value is the investment maximum in the western Sava Depression exploration area for the company's 50 million USD hydrocarbon exploration budget. For the value of the modified geological probability, the amount of the risk-neutral USD for the “L” reservoir is  $1.21 \cdot 10^6$ , and for the “K” reservoir  $1.17 \cdot 10^6$ , which is also the investment maximum for the company's 35 million USD hydrocarbon production budget.

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. PREGLED METODA ODRADBE PODATAKA.....	3
2.1. «Klasični» statistički alati često primjenjivani u geologiji.....	3
2.1.1. Osnovna statistička obradba podataka.....	3
2.1.2. Statistički testovi.....	5
2.1.3. Korelacija.....	8
2.2. Interpolacijske metode za mali uzorak.....	11
2.2.1. Thiessenovi poligoni kao statistička metoda kartiranja.....	11
2.2.2. Metoda inverzne udaljenosti kao statistička metoda kartiranja.....	13
2.2.3. Metoda najbližeg susjedstva kao statistička metoda kartiranja.....	15
2.2.4. Metoda prirodnoga susjedstva kao statistička metoda kartiranja.....	16
2.3. Geostatističke metode i tehnike izračuna prostorne zavisnosti kao statističkih metoda kartiranja.....	17
2.3.1. Variogram.....	18
2.3.2. Krigiranje.....	20
2.3.2.1. Jednostavno krigiranje.....	21
2.3.2.2. Obično krigiranje.....	22
2.3.3. Metoda ponovljenoga uzorkovanja.....	23
2.3.4. Metoda krosvalidacije.....	25
2.4. Geološka izglednost (POS) postojanja ležišta ugljikovodika.....	26
3. ZEMLJOPISNO PODRUČJE DOKTORSKOGA ISTRAŽIVANJA.....	30
4. POVIJEST RANIJIH, METODOLOŠKI ILI PROSTORNO DJELOMICE SLIČNIH, GEOMATEMATIČKIH ISTRAŽIVANJA TE OSNOVNE GEOLOŠKE ZNAČAJKE ODABRANOGA PROSTORA.....	33
4.1. Osnovne geološke značajke istraživanog područja.....	36

5. DUBINSKI LEŽIŠNI ODNOSI I PODATCI TE KARTE ODABRANIH LEŽIŠNIH VARIJABLI U POLJU „A“ .....	46
5.1. Strukturni odnosi ležišta „L“ .....	46
5.2. Podatci o granulometrijskom sastavu, šupljikavosti, zasićenju i propusnosti pješčenjaka ležišta „L“ .....	47
5.3. Prikaz strukturnih odnosa hidrodinamičke jedinice „L“ te njihov odraz u pridobivanju iz te jedinice.....	49
5.4. Primjena interpolacijskih metoda za ležište „L“ .....	52
5.5. Variogramaska analiza i primjena metode običnoga krigiranja šupljikavosti u ležištu „L“ .....	55
5.6. Korelacija šupljikavosti i propusnosti ležišta „L“ .....	60
5.7. Zavodnjavanje ležišta „L“ .....	62
6. DUBINSKI LEŽIŠNI ODNOSI I PODATCI TE KARTE LEŽIŠNIH VARIJABLI U POLJU „B“ .....	67
6.1. Strukturni odnosi ležišta „K“ .....	67
6.2. Podatci o granulometrijskom sastavu, šupljikavosti, zasićenju i propusnosti pješčenjaka ležišta „K“ .....	67
6.3. Prikaz strukturnih odnosa hidrodinamičke jedinice „K1“ te njihov odraz u pridobivanju iz te jedinice.....	70
6.4. Primjena interpolacijskih metoda za ležište „K“ .....	72
6.5. Variogramaska analiza i primjena metode običnoga krigiranja šupljikavosti u ležištu „K“ .....	75
6.6. Korelacija šupljikavosti i propusnosti ležišta „K“ .....	80
6.7. Zavodnjavanje ležišta „K“ .....	81
7. IZRAČUN GEOLOŠKE VJEROJATNOSTI POSTOJANJA DODATNIH LEŽIŠTA UGLJIKOVODIKA U ŠIREM PROSTORU STRUKTURA „A“ I „B“ .....	84
7.1. Procjena postojanja regionalnih zamki.....	85
7.2. Procjena postojanja novih ležišta u analiziranom prostoru.....	87
7.3. Procjena postojanja dovoljnih volumena zrelih matičnih stijena za nova ležišta..	88
7.4. Migracija.....	89



7.5. Očuvanje ugljikovodika.....	90
7.6. Izračun ukupne geološke vjerojatnosti (POS-a) u širem prostoru struktura „A“ i „B“ .....	91
7.7. Modifikacija POS-a za slučajeve kada se iz pješčenjačkih ležišta pridobiva sekundarnim metodama, primjer za Savsku depresiju.....	93
<b>8. RIZIČNO NEUTRALNA VRIJEDNOST MOGUĆIH OTKRIĆA.....</b>	<b>97</b>
8.1. Izračun rizično neutralne vrijednosti za buduće istraživanje u prostoru zapadnoga dijela Savske depresije, na primjeru dokazanih rezervi u poljima „A“ i „B“ .....	100
8.2. Izračun rizično neutralne vrijednosti za prostor polja „A“ i „B“ uz primjenu prilagođenoga POS-a.....	101
<b>9. RASPRAVA O GLAVNIM PREDNOSTIMA I NEDOSTATCIMA UPORABLJENIH METODA I DOBIVENIH REZULTATA.....</b>	<b>103</b>
<b>10. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>112</b>
<b>11. LITERATURA.....</b>	<b>115</b>
11.1. Objavljeni radovi.....	115
11.2. Stručna i arhivska izvješća.....	125
11.3. Internetske poveznice.....	125
11.4. Popis korištenih programa.....	126
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>127</b>
<b>PRILOZI.....</b>	<b>130</b>

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Kritično područje F-testa .....	5
Slika 2-2. Kritično područje t-testa .....	6
Slika 2-3. Shematski prikaz Thiessonovog poligona .....	12
Slika 2-4. Primjena Theissenovih poligona za procjenu dubina ležišta naftno-plinskog polja Šandrovac.....	13
Slika 2-5. Izmjerene i procijenjene vrijednosti unutar radijusa metode inverzne udaljenosti ..	14
Slika 2-6. Raspodjela šupljikavosti u klastičnim ležištima polja Stari Gradac-litofacijes I (član Mosti, badenske starosti) metodom inverzne udaljenosti.....	15
Slika 2-7. Mreža metode najbližeg susjedstva, procjena točke E u odnosu na izmjerene točke A, K, P ili G.....	16
Slika 2-8. Mreža metode prirodnoga susjedstva, procjena točke X u odnosu na izmjerene točke A <sub>1-4</sub> .....	17
Slika 2-9. Parametri poluvariograma .....	19
Slika 2-10. Tri eksperimentalna poluvariogramaska modela koja se najčešće koriste u geologiji.....	19
Slika 2-11. Vertikalni variogram, bušotina Pav-1, pješčenjaci Poljana .....	20
Slika 2-12. Karta šupljikavosti na jednoj od struktura u zapadnom dijelu Savske depresije (ležište panonske starosti) dobivene interpolacijom krigiranjem.....	23
Slika 2-13. Iterativni postupak pri računanju vrijednosti krosvalidacije.....	25
Slika 2-14. Geološki događaji prikazani u pet kategorija s pripadajućim vjerojatnostima.....	28
Slika 2-15. Dijagram toka za izračun geološke izglednosti.....	29
Slika 3-1. Zemljopisni položaj polja „A“ i „B“ unutar Savske depresije.....	31
Slika 3-2. Reljefna karta istraživanoga naftno-plinskog polja „A“ i „B“ .....	31
Slika 4-1. Kronostratigrafske, biostratigrafske i litostratigrafske jedinice Savske depresije....	36
Slika 4-2. Regionalne geološke makrojedinice unutar Panonskoga bazenskoga sustava (PBS).....	37
Slika 4-3. Vremenska skala glavnih tektonskih i taložnih razdoblja u neogenu i kvartaru unutar HPBS-a) .....	38
Slika 4-4. Shematski prikaz regionalnoga jezerskoga okoliša i promjena jezerskih pelitnih i turbiditnih okoliša na granici Savske i Dravske depresije.....	39
Slika 4-5. Tipski geološki stup istraživanoga polja „A“ i „B“, s oznakama formalnih i neformalnih litostratigrafskih jedinica.....	42

Slika 4-6. Složeni geološki stup istraživanoga polja „A“, s oznakama formalnih i neformalnih litostratigrafskih jedinica.....	44
Slika 4-7. Složeni geološki stup istraživanoga polja „B“, s oznakama formalnih i neformalnih litostratigrafskih jedinica.....	45
Slika 5-1. Dio ležišta „L“ u kojem se podržava ležišni tlak utiskivanjem slojne vode.....	50
Slika 5-2. Korelacijski profil L-161 – L-153 - L-27 unutar ležišta „L“.....	51
Slika 5-3. Korelacijski profil L-63 – L-57 – L-27–L-131a unutar ležišta „L“ .....	52
Slika 5-4. Interpolirano područje (plavo) ležišta „L“.....	53
Slika 5-5. Rezultati interpolacijskih metoda inverzne udaljenosti, najbližeg i prirodnoga susjedstva za ležište „L“ (lijevo-propusnost; desno-utisnuti volumeni).....	54
Slika 5-6. Vrijednost šupljikavosti za ležište „L“.....	56
Slika 5-7. Eksperimentalni variogram šupljikavosti ležišta „L“.....	56
Slika 5-8. Prostorni raspored šupljikavosti ležišta „L“ dobiven običnim krigiranjem iz eksperimentalnoga variograma.....	57
Slika 5-9. Eksperimentalni variogram dobiven nakon primjene metode ponovnoga uzrokovanja.....	58
Slika 5-10. Prostorni raspored šupljikavosti ležišta „L“ dobiven običnim krigiranjem iz eksperimentalnoga variograma nakon metode ponovnoga uzrokovanja.....	59
Slika 5-11. Prostorni raspored šupljikavosti ležišta „L“ dobiven metodom inverzne udaljenosti iz eksperimentalnoga variograma nakon metode ponovnog uzrokovanja..	60
Slika 5-12. Odnosi šupljikavosti i propusnosti za ležište „L“.....	61
Slika 5-13. Karta utisnutih količina vode dobivena metodom najbližeg susjedstva.....	63
Slika 5-14. Karta utisnih količina vode dobivena metodom inverzne udaljenosti.....	64
Slika 5-15. Količine vode ležišta „L“ kumulativno utisnute u razdoblju od 2005. do 2015. godine.....	65
Slika 5-16. Usporedba utisnutih volumena i pridobivenih količina kapljevine za bušotinu L-27, L-87, L-131, L-154, L-160 i L-161 ležišta „L“.....	66
Slika 6-1. Hidrodinamička jedinica „K1“ u kojoj se podržava ležišni tlak utiskivanjem slojne vode.....	70
Slika 6-2. Korelacijski profil J-166 – J-174.....	71
Slika 6-3. Korelacijski profil J-167 - J-25 $\alpha$ - J-166 - J-149 unutar hidrodinamičke jedinice „K1“.....	72
Slika 6-4. Interpolirano područje (plavo) ležišta „K“.....	73
Slika 6-5. Rezultati interpolacijskih metoda inverzne udaljenosti, najbližeg i prirodnoga	

susjedstva za ležište „K“ (lijevo-propusnost; desno-utisnuti volumeni).....	74
Slika 6-6. Vrijednost šupljikavosti za hidrodinamičku jedinicu „K1“.....	76
Slika 6-7. Eksperimentalni variogram šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“.....	76
Slika 6-8. Prostorni raspored šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“ dobiven običnim krigiranjem iz eksperimentalnoga variograma.....	77
Slika 6-9. Eksperimentalni variogram dobiven nakon primjene metode ponovnoga uzrokovanja.....	78
Slika 6-10. Prostorni raspored šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“ dobiven običnim krigiranjem iz eksperimentalnoga variograma nakon metode ponovnoga uzrokovanja.....	79
Slika 6-11. Prostorni raspored šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“ dobiven metodom inverzne udaljenosti iz eksperimentalnoga variograma nakon metode ponovnoga uzrokovanja.....	80
Slika 6-12. Odnosi šupljikavosti i propusnosti za ležište „K“.....	81
Slika 6-13. Količine vode ležišta „K“ kumulativno utisnute u razdoblju od 2005. do 2015. godine.....	82
Slika 6-14. Usporedba utisnutih volumena i pridobivenih količina kapljevine za bušotinu J-166, J-169, J-170 i J-172 ležišta „K“.....	83
Slika 7-1. Čelije i pripadajuće geološke vjerojatnosti formacije Ivanić-Grad u zapadnom dijelu Savske depresije.....	84
Slika 7-2. Istraženost neogenskih i kvartarnih stijena u Savskoj i Dravskoj depresiji.....	85

## POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Interpretacija vrijednosti korelacije.....	9
Tablica 5-1. Granulometrijski sastav ležišta „L“ .....	47
Tablica 5-2. Laboratorijski i podaci iz karotažnih krivulja o šupljikavosti ležišta „L“ .....	48
Tablica 5-3. Laboratorijski i podaci iz karotažnih krivulja o zasićenju i propusnosti ležišta „L“ .....	49
Tablica 5-4. Srednje vrijednosti i ukupni utisni volumeni vode za „L“ ležište.....	53
Tablica 5-5. Rezultati krosvalidacije za „L“ ležište.....	55
Tablica 5-6. Šupljikavost i propusnost ležišta „L“ .....	60
Tablica 5-7. Izračunati rangovi Spearmanovoga koeficijenta ležišta „L“ .....	62
Tablica 6-1. Granulometrijski sastav ležišta „K“ .....	68
Tablica 6-2. Laboratorijski i podaci iz karotažnih krivulja o šupljikavosti ležišta „K“ .....	69
Tablica 6-3. Laboratorijski i podaci iz karotažnih krivulja o zasićenju i propusnosti ležišta „K“ .....	69
Tablica 6-4. Srednje vrijednosti i ukupni utisni volumeni vode za „K“ ležište.....	73
Tablica 6-5. Rezultati krosvalidacije za „K“ ležište.....	75
Tablica 6-6. Šupljikavost i propusnost za ležište „K“ .....	80
Tablica 6-7. Izračunati rangovi Spearmanovoga koeficijenta ležište „K“ .....	81
Tablica 7-1. Odabrane vjerojatnosti opaženih pojava u analiziranom prostoru (plavi pravokutnici) za kategoriju „Zamka“ .....	86
Tablica 7-2. Određene vjerojatnosti (plavi pravokutnici) za kategoriju „Ležište“ .....	87
Tablica 7-3. Određene vjerojatnosti (plavi pravokutnici) za kategoriju „Matične stijene“ .....	89
Tablica 7-4. Određene vjerojatnosti (plavi pravokutnici) za kategoriju „Migracija“ .....	90
Tablica 7-5. Određene vjerojatnosti (plavi pravokutnici) za kategoriju „Očuvanje ugljikovodika“ .....	91
Tablica 7-6. Određene kategorije (plavi pravokutnici) za ležišta polja „A“ i „B“, tj. zapadni dio Savske depresije.....	92
Tablica 7-7. Modifikacija POS-a unutar kategorije „OČUVANJE UGLJIKOVODIKA“ (žuto obojeno napravljena modifikacija, prekríženo prijašnja podjela) za ležišta s primijenjenim sekundarnim metodama pridobivanja.....	94
Tablica 7-8. Modificirana struktura POS-a za naftno-plinska donjopontska ležišta polja sa sekundarnim načinom pridobivanja ugljikovodika zapadnoga dijela Savske depresije.....	95

Tablica 8-1. Izračunate rizično neutralne vrijednosti novčanoga rizika za više scenarija za zapadni dio Savske depresije.....	100
Tablica 8-2. Izračunate rizično neutralne vrijednosti novčanoga rizika za više scenarija za ležište „L“, polje „A“ i ležište „K“, polje „B“.....	102
Tablica 9-1. Preporučene metode za mali ulazni skup podataka.....	105
Tablica 9-2. Usporedba vrijednosti krosvalidacije za karte dobivene običnim krigiranjem iz prvobitnoga variograma i nakon primjene metode ponovljenoga uzorkovanja.....	107

## POPIS PRILOGA

Prilog 1: Složeni geološki stup za ležište „L“ .....	130
Prilog 2: Složeni geološki stup za ležište „K“ .....	131
Prilog 3: Dio strukturne karte po krovini donjopontskoga ležišta „L“, naftno-plinskoga polja „A“ .....	132
Prilog 4: Karta efektivnih debljina ležišta „L“ .....	133
Prilog 5: Strukturna karta po krovini donjopontskoga ležišta „K“, naftno-plinskoga polja „B“ .....	134
Prilog 6: Karta efektivnih debljina ležišta „K“ .....	135
Prilog 7: Strukturna karta po plohi repera Z' za zapadni dio Savske depresije.....	136
Prilog 8: Strukturna karta po plohi repera Rφ za zapadni dio Savske depresije.....	137

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

$A_i$	površina pojedinoga poligona
$a_1$	vrijednost iz linearne regresije za očekivane vrijednosti iz normalnoga „statističkoga reda“
$A(x,y)$	vrijednost unutar poligona kod primjene metode najbližeg susjedstva
C	trošak (milijuna USD)
CE	odgovarajući novčani ekvivalenti u milijunima rizično neutralnih dolara (RN\$)
d	udaljenost
$d_1 \dots d_n$	udaljenost smjesta 1...n od mjesta procjene $z_{IU}$
$d_i$	razlika između rangova za svaki par podataka pri izračunu Spearmanovog koeficijenta korelacije
e	matematička konstanta, Eulerov broj
EMV	očekivana monetarna vrijednost (USD)
EU	očekivane jedinice korisnosti
$F(x)$	funkcija Thiessenovoga poligona
GU	godišnje ulaganja (milijuna \$)
i	diskontna stopa
ib	bušotina
k	broj godina
K	kovarijanca
$L(x,\mu)$	Lagrangeova funkcija
$m_1, \bar{X}$ i $\bar{Y}$	aritmetička sredina uzorka $m_1, X$ i $Y$
MSE	srednja kvadratna pogreška procjene
n	veličina uzorka
$n_k$	broj parova podataka u k-tom bloku
$N(h)$	broj parova podataka uspoređenih na udaljenosti „h“ kod variograma
NPV	neto sadašnja vrijednost potencijalnih rezervi
NT	novčani tok (USD)
$p(l)$	vjerojatnost postojanja ležišta (dij. jed.)
$p(m)$	vjerojatnost migracije (dij. jed.)
$p(ms)$	vjerojatnost postojanja matične stijene (dij. jed.)
$p(oCH)$	vjerojatnost očuvanja ugljikovodika (dij. jed.)



$p(z)$	vjerojatnost postojanja zamke (dij. jed.)
POS	vjerojatnost geološkoga događaja (POS) u dij. jed.
$r$	koeficijent korelacije
R	ukupna dobit (milijuna USD)
RAV	rizično prilagođena vrijednost
$r_p$	koeficijent Pearsonove korelacije
$r_s$	Spearmanov koeficijent korelacije,
rtc	rizično nesklona funkcija
$r(u)$	prva aproksimacija funkcije korisnosti
$s$	standardna devijacija
$s_1^2, s_2^2$	korigirane varijance uzoraka kod izračuna t-testa
$SE(\theta)_{pu}$	standardna pogreška metode ponovljenoga uzorkovanja
SV	stvarna vrijednost uzorka
sign	neparna matematička funkcija (signum funkcija)
$t$	vrijednost t-testa
U	jedinice korisnosti izražene u milijunima rizično neutralnih dolara (RN\$)
W	vrijednost Shapiro-Wilk testa
$w_i$	udio površine analiziranih poligona u ukupnoj površini metode prirodnog susjedstva
$x \text{ i } T$	točke u prostoru
X	vektor ponovnoga uzrokovanja
$X(x,y)$	procijenjena točka
$X_{1,2,\dots}$	podatci
$X_i, Y_i$	i-te vrijednosti uzoraka X i Y
$X_j, Y_j$	j-te vrijednosti uzoraka X i Y
Z	regionalizirana varijabla.
$z(u_n)$	vrijednost na lokaciji „ $u_n$ “
$z(u_n+h)$	vrijednost na lokaciji „ $u_n+h$ “
$z_1 \dots z_n$	stvarne vrijednosti na lokaciji 1...n
$z_i$	poznate vrijednosti varijable u okolnom području
$z_{IU}$	procijenjena vrijednost
$z_k$	vrijednost varijable dobivene procjenom
$\mu$	Lagrangeov faktor
$2\gamma(h)$	vrijednost variograma na udaljenosti „h“

$\gamma$	vrijednost variograma
$\theta$	empirička srednja vrijednost replikatora metode ponovljenoga uzorka
$\theta_i$	replikator metode ponovljenoga uzorka
$\lambda_i$	težinski koeficijent za svaku lokaciju
$\sigma^2$	varijanca
$\sigma_x^2$	varijanca uzorka x
$\sigma_y^2$	varijanca uzorka
$\tau_k$	Kendallov koeficijent korelacije

# 1. UVOD

Geologija je u mnogim svojim dijelovima znanstvena grana vrlo ovisna o alatima primijenjene statistike, a poglavito geomatematike. Geomatematika je skup matematičkih metoda koje se primjenjuju u geologiji, a može se podijeliti na tri poddiscipline: "klasičnu" statistiku, geostatistiku i neuronske mreže. Pod pojmom „klasična“ statistika u geomatematici se podrazumijeva korištenje statističkih alata koji se primjenjuju u geologiji, time čineći skupinu matematičkih metoda kao što su histogram, srednja vrijednost, izučavanje razdiobe, usporedba varijanci (F-test), usporedba sredina (t-test), koeficijent korelacije i sl. (npr. MALVIĆ, 2008c; MALVIĆ & MEDUNIĆ, 2015). Geostatistika je grana geomatematike koja primjenjuje teorije determinističke procjene, stohastičkih procesa, odnosno statističkoga zaključivanja o različitim prostornim pojavama. Najvažniji pojam u geostatistici je regionalizirana varijabla (npr. MALVIĆ, 2009a; MESIĆ KIŠ & MALVIĆ, 2014; MESIĆ KIŠ, 2017). Pod pojmom regionalizirane varijable podrazumijeva se mjerena ili modelirana veličina čije se ponašanje dijelom opisuje slučajnom, a dijelom determinističkom komponentom.

Brojne se geološke varijable takvim alatima analiziraju numerički, kvalitativno te prostorno. Ukupni rezultati rabe se za izgradnju prostornih geoloških modela različite razlučivosti i namjene. Analizirani prostor pripada zapadnom dijelu Savske depresije. Odabrane su dvije dubinske geološke strukture s nizom potrebnih mjerenja i postojećih geoloških rješenja. U obje su otkrivena ležišta ugljikovodika u gornjomiocenskim pješčenjacima iz kojih se oni još uvijek pridobivaju sekundarnom metodom utiskivanja (slojne) vode s ciljem podržavanja ležišnoga tlaka. Stoga je u disertaciji odabrani istraživački prostor opisan geološkom građom naftno-plinskih polja „A“ (ležište „L“) i „B“ (ležište „K“, hidrodinamička jedinica „K1“) u kojima se primjenjuju sekundarne metode pridobivanja ugljikovodika. Ona uključuje strukturne odnose, podatke o granulometriji, šupljikavost, propusnost, zasićenje, rezerve ugljikovodika i druge povezane geološke varijable. Iz takvih podataka izveo se je detaljan geološki model, koji uključuje taložnu povijest i geološke korelacijske profile. Podatci iz geoloških varijabli nadopunili su se i onima iz proizvodnje, odnosno analizirat će se zavisnost utisnutih količina vode, debljine i šupljikavosti u odabranim pješčenjačkim jedinicama. Nadalje, različite metode prostorne raspodjele (metoda inverzne udaljenosti, najbližega susjedstva, krigiranje) uporabiti će se za prikaz geoloških varijabli koje opisuju geološka i proizvodna svojstva odabranih pješčenjačkih ležišta, poput

debljine i šupljikavosti, a moguće i propusnosti. Kako je broj podataka uvijek „pre mali“ s obzirom na želje interpretatora, a u analiziranim strukturama često puta manji za svaku pojedinačnu geološku varijablu od 50, pa čak i od 30 podataka kao preporučenoga statističkoga minimuma reprezentativnosti podataka uzorka, skupove treba testirati i prikazati pouzdanim tehnikama. Stoga se u analizi niza varijabli, a posebice onih koje su se prostorno prikazivale metodom krigiranja, uporabila metoda dodatnoga uzorkovanja, kako bi se izvorni skupovi uvećali reprezentativnim „umjetnim“ podacima, variogramski obradili te kartografski prikazali. U takvim slučajevima kartiranje bušotinskih vrijednosti ovisi o nekoliko postavki kao što su: (a) raspored utisno-mjerne mreže bušotina, (b) gustoća rasjednih zona u kartiranom prostoru te (c) broj bušotina s proizvodnim i karotažnim mjerenjima (mjerenja otpornosti, krivulja gustoće, neutronske karotaže itsl.). Kod takvih kartografskih modela statističke metode kartiranja uglavnom su najprimjereniji alati za prikaz poznatih utisnutih i pridobivenih količina, vrste i iznosa njihove zavisnosti, čak i radijusa širenja ili pridobivanja.

Metodom determinističke ocjene geološke vjerojatnosti geoloških kategorija koje opisuju odabrane strukture i ležišta ocijenila se mogućnost otkrića dodatnih količina rezervi, uglavnom u rubnim dijelovima polja „A“ i „B“. Kako se u ležišta polja „A“ i „B“ desetljećima utiskuje slojna voda, te količine su se promatrale kao dodatna „nezavisna“ kategorija kojom se unaprijedila postojeća metoda procjene vjerojatnosti. Jedan od glavnih problema kod analize i prostorne raspodjele varijabli u takvim ležišnim prostorima je nastanak i određivanje veličine prijelazne zone različitih fluidnih faza. Tako veze između «statičkih» geoloških varijabli i «dinamičkih» fizikalnih mogu korektno biti opisane jedino iskazima vjerojatnosti. To svojstvo, za razliku od determinizma, uključuje stohastiku, što se posebice može koristiti kada je dubinska ležišna struktura opisana prijelaznim pojavama, bilo litološkim, bilo fizikalnim, koje se svojim prostorima djelomice preklapaju (primjer je odnos preklapanja zona oko utisnih i pridobivnih bušotina).

Dobiveni vjerojatnosni rezultati uporabili su se za završnu ekonomsku procjenu isplativosti ulaganja u daljnja istraživanja novih ležišta, te u pridobivanje ugljikovodika iz postojećih ležišta (zavodnjavanje ležišta). Ona je načinjena metodom izračuna rizično neutralnih novčanih jedinica, a na temelju geološke izglednosti novih otkrića, neto sadašnje vrijednosti i veličine ulaganja tijekom jedinice vremena. Kod svih analiza koristila se analogija s rezultatima dobivenim u odabranim sličnim taložnim prostorima i odabranim analizama geoloških varijabli.

## 2. PREGLED METODA ODRADBE PODATAKA

Područje geomatematike dijeli se na tri grane:

1. "Klasičnu" statistiku;
2. Geostatistiku (determinizam i stohastiku);
3. Neuronske mreže.

U ovom poglavlju obrađene su interpolacijske metode za mali ulazni skup podataka koje su se koristile tijekom izradbe karata geoloških varijabli, a to su: inverzna udaljenost, prirodno susjedstvo i najbliže susjedstvo. Također, na istraživanim ležištima primijenjene su variogramске analize i metode običnoga krigiranja. Za povećavanje ulaznoga skupa podataka primijenjena je metoda ponovljenoga uzorkovanja. Krosvalidacija je upotrebljena u svrhu provjere primjerenosti dobivenih karata istraživanih geoloških varijabli. Također, upotrijebljena je deterministička metoda procjene geološke vjerojatnosti (POS).

### 2.1. «Klasični» statistički alati često primjenjivani u geologiji

Pod pojmom „klasična statistika“ u geomatematici se podrazumijeva korištenje statističkih alata koje se primjenjuju u geologiji i srodnim geoznanostima, time čineći skupinu matematičkih metoda primijenjenih u geomatematici. To su (npr. MALVIĆ & MEDUNIĆ, 2015; MALVIĆ, 2008c): histogram, srednja vrijednost, izučavanje razdiobe, usporedba varijanci (F-test), usporedba sredina (t-test), klaster analiza i koeficijenti korelacije.

#### 2.1.1. Osnovna statistička obradba podataka

Pod osnovnom statističkom obradom podatka (npr. PETZ, 1974; PFAFF, 2012) podrazumijeva se računanje sljedećih parametara: aritmetičke sredine ( $\bar{X}$ ), varijance ( $\sigma^2$ ), korigirane varijance ( $s^2$ ) i standardne devijacije ( $s$ ). Svi izračunati parametri su ulazne varijable za daljnje statističke analize kao što su korelacije, procjene, testovi itsl. Aritmetička sredina ( $\bar{X}$ ) je nepristrani procjenitelj očekivanja slučajne varijable, a računa se prema **izrazu 2.1:**

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i}{n} \quad (2.1)$$

gdje su:

$\bar{X}$  - aritmetička sredina,

$n$  - veličina uzorka,

$Y_i$  - vrijednost  $i$ -toga razreda,

$X_i$  - vrijednost  $i$ -toga razreda.

Varijanca se definira kao prosječno kvadratno odstupanje od prosjeka, a računa se prema **izrazu 2.2**:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (2.2)$$

gdje su:

$\sigma^2$  - varijanca,

$\bar{X}$  - aritmetička sredina,

$n$  - veličina uzorka,

$x_i$  - vrijednost  $i$ -toga razreda.

Nepistrani procjenitelj varijance je korigirana varijanca ( $s^2$ ) koja se računa po sljedećem **izrazu 2.3**:

$$s^2 = \frac{n}{n-1} \cdot \sigma^2 \quad (2.3)$$

gdje su:

$s^2$  - korigirana varijanca,

$n$  - veličina uzorka,

$\sigma^2$  - varijanca.

Standardna devijacija je standard za mjerenje varijabilnosti rezultata, a računa se po **izrazu 2.4**:

$$s = \sqrt{\frac{n}{n-1} \cdot \sigma^2} \quad (2.4)$$

gdje su:

$s$  - standardna devijacija,

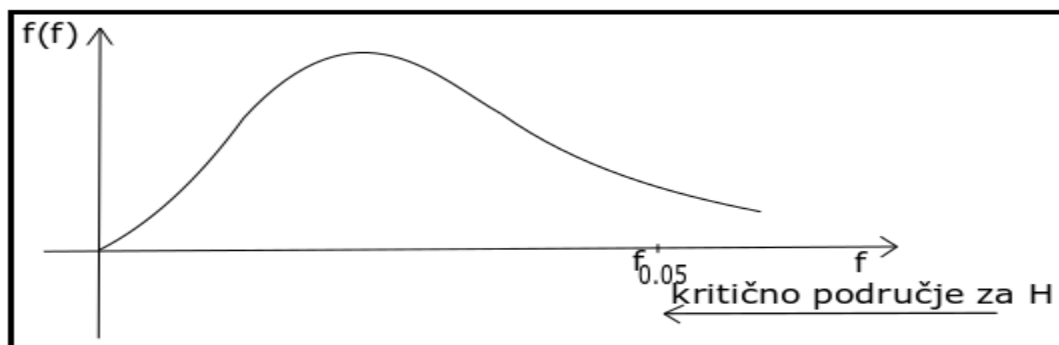
$n$  - veličina uzorka,

$\sigma^2$  - varijanca.

### 2.1.2. Statistički testovi

F-test i t-test koriste se pri provjeri značajnosti korelacija, dok se Shapiro-Wilkov test koristi za pravilan odabir korelacije. F-test se koristi za usporedbu varijanci dvaju uzoraka koji imaju normalnu tj. jednoliku distribuciju. Nul-hipoteza ovoga testa je sljedeća:  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ . Provođenje F-testa za ispitivanje jednakosti dviju varijanci provodi se na sljedeći način (npr. PFAFF, 2012):

1. Iz svakoga uzorka izračuna se procjena za varijancu ( $s_1^2$ , odnosno  $s_2^2$ ).
2. Izračuna se test-vrijednost  $f = s_1^2 / s_2^2$ , uz  $s_1^2 > s_2^2$ .
3. Iz tablice za F-razdiobu za stupnjeve slobode  $k_1 = n_1 - 1$  i  $k_2 = n_2 - 1$  ( $k_1$  je stupanj slobode koji se odnosi na uzorak iz kojeg je izračunata veća procjena varijance) očita se  $f_{0,05}$  (**slika 2-1.**), ako je  $f > f_{0,05}$  hipoteza se odbacuje, a u suprotnome se ne odbacuje.



**Slika 2-1.** Kritično područje F-testa (iz: PFAFF, 2012)

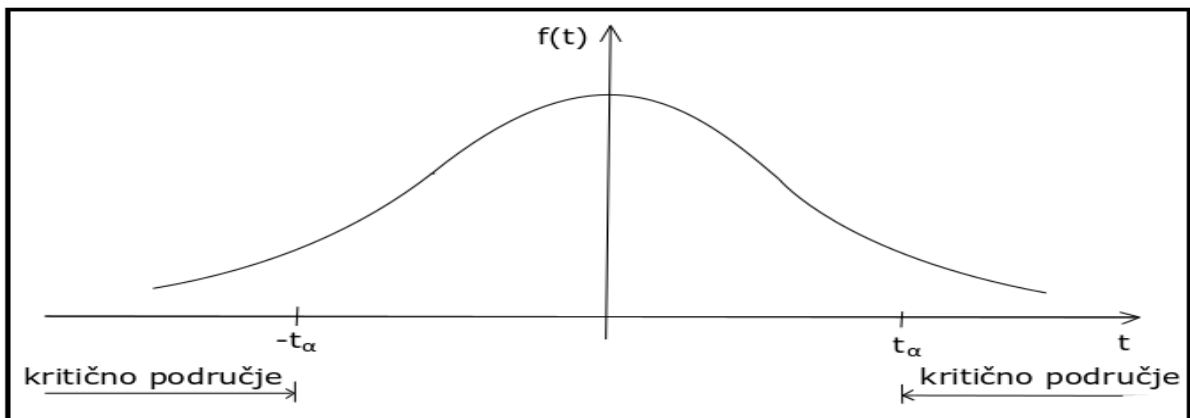
Glede t-testa, postoje dvije vrste: parametarski t-test i t-test o jednakosti očekivanja dviju slučajnih varijabli (PFAFF, 2012). Za obje vrste t-testa glavna pretpostavka je da varijable tj. uzorci imaju normalnu distribuciju. Za parametarski t-test nul-hipoteza je sljedeća  $\mu=\mu_0$ , tj. da je očekivanje točno neki određeni broj tj. parametar. Za izračunavanje t-testa (npr. BENŠIĆ & ŠUVAK, 2013) koristi se sljedeći **izraz 2.5**:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (2.5)$$

gdje su:

- $t$  - vrijednost t-testa,
- $\bar{X}$  - aritmetička sredina,
- $s$  - standardna devijacija,
- $n$  - veličina uzorka.

Za provjeru hipoteze dobiveni se iznos za  $k=n-1$  očitava iz t-razdiobe (**slika 2-2.**), a ako je  $k>31$  napravi se aproksimacija u normalnu razdiobu.



**Slika 2-2.** Kritično područje t-testa (PFAFF, 2012)

Za t-test o jednakosti očekivanja dviju slučajnih varijabli potrebna je prethodna potvrda hipoteze F-testa. Nul-hipoteza je predstavljena jednakošću očekivanja dvaju promatranih uzoraka. Potrebno je prije izračunavanja t-testa izračunati prema **izrazu 2.6** korigiranu varijancu:



$$s_d^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2} \quad (2.6)$$

gdje su:

$s_1^2, s_2^2$  - korigirane varijance uzoraka,

$n_1, n_2$  - veličina uzorka.

Vrijednost t-testa dobiva se iz **izraza 2.7**:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{s_d} \quad (2.7)$$

gdje su:

$t$  - vrijednost t-testa,

$\bar{X}_1, \bar{X}_2$  - aritmetičke sredine uzoraka,

$s$  - standardna devijacija.

Za provjeru t-testa, dobiveni se rezultat uspoređuje s  $t_{0,05}$  ili  $t_{0,01}$  očitane za  $k=n_1+n_2-1$  iz t-razdiobe (**slika 2-2.**). Nul-hipoteza testa podrazumijeva normalnu razdiobu, tj. jednolikost, uzorka. Ona se provjerava Shapiro-Wilkovim testom (W) koji se izračunava (GÜNER et al., 2009) prema **izrazu 2.8**:

$$W = \frac{\left( \sum_{i=1}^n a_i Y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - m_1)^2} \quad (2.8)$$

gdje su:

$W$  - vrijednost Shapiro-Wilk testa,

$Y_i$  - vrijednost i-toga razreda varijable  $Y$ ,

$m_1$  - aritmetička sredina uzorka,

$a_1$  - vrijednost iz linearne regresije za očekivane vrijednosti iz normalnoga „statističkoga reda“.

Važno je naglasiti kako se nulta hipoteza ne prihvaća ako je „p-vrijednost“ manja ili jednaka od praga značajnosti, tj. od 0,05.

### 2.1.3. Korelacija

Korelacija predstavlja međusobnu povezanost između različitih pojava predstavljenih vrijednostima dvaju obilježja. Za izračunavanje koeficijenta korelacije potrebno je izračunati kovarijancu ( $K$ ) koja predstavlja zajedničko mijenjanje dviju varijabli tj. područje vrijednosti promjene oko aritmetičke sredine, a računa se **izrazom 2.9**:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \bar{X} \cdot \bar{Y}}{n} \quad (2.9)$$

gdje su:

$K$  - kovarijanca,

$X_i, Y_i$  - vrijednost  $i$ -toga razreda varijable  $X$ ,

$n$  - veličina uzorka,

$\bar{X}$  - aritmetička vrijednost  $x$  uzorka,

$\bar{Y}$  - aritmetička vrijednost  $y$  uzorka.

Parametar koji se izračunava i njime se vrjednuje kvaliteta korelacija dvaju uzoraka je koeficijent korelacije ( $r$ ). Predstavlja mjeru statističke linearne korelacije (npr. PFAFF, 2012), a računa se prema **izrazu 2.10**:

$$r = \frac{K}{\sqrt{\sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2}} \quad (2.10)$$

gdje su:

$r$  - koeficijent korelacije,

$K$  - kovarijanca,

$\sigma_x^2$  - varijanca uzorka  $x$ ,

$\sigma_y^2$  - varijanca uzorka  $y$ .

Koeficijent korelacije može poprimiti vrijednost od -1 do 1, ovisno o vrsti korelacije (negativne ili pozitivne). Kako bi se provjerila postojanost korelacije između podataka dvaju uzoraka, potrebno je znati pravilno interpretirati izračunatu vrijednost korelacije  $r$ . Prema PFAFF (2012) interpretacija koeficijenta vrijednosti  $r$  je:

$|r| \leq 0,5$  smatra se da nema linearne ovisnosti,

$0,5 \leq |r| \leq 0,7$  linearna ovisnost,

$0,7 \leq |r|$  jaka linearna ovisnost.

Prema HINKLE et al. (2003) interpretacija koeficijenta korelacije je prikazana u donjoj **tablici 2-1**. Međutim, svaka takva korelacija utvrđuje se na temelju dovoljno velikoga broja uzoraka u pojedinačnim znanstvenim granama.

**Tablica 2-1.** Interpretacija vrijednosti korelacije (prema HINKLE et al., 2003)

Vrijednost korelacije (+/-)	Interpretacija
0,9-1,0	Vrlo visoka (pozitivna/negativna) korelacija
0,7-0,9	Visoka (pozitivna/negativna) korelacija
0,5-0,7	Srednja (pozitivna/negativna) korelacija
0,3-0,5	Niska (pozitivna/negativna) korelacija
0,0-0,3	Ne postoji korelacija

U nastavku opisana je korelacija po metodama Pearsona, Kendalla i Spearmana. Najvažniji uvjet za primjenu Pearsonove korelacije je da su promatrane varijable normalno (jednoliko) raspodjeljene. Normalna (Gaussova) razdioba najpoznatija je, i u prirodi najčešće zastupljena funkcija razdiobe (MALVIĆ & MEDUNIĆ, 2015). Prije izračuna značajnosti korelacije potrebno je korelaciju potvrditi t-testom ili F-testom. Pearsonov koeficijent korelacije (npr. MALVIĆ & MEDUNIĆ, 2015) se računa prema sljedećem **izrazu 2.11**:

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2.11)$$

gdje su:

$r_p$  - koeficijent Pearsonove korelacije,

$X_i, Y_i$  -  $i$ -te vrijednosti uzoraka  $X$  i  $Y$ ,

$\bar{X}, \bar{Y}$  - srednje vrijednosti uzoraka  $X$  i  $Y$ ,

$n$  - veličina uzorka.

Na Pearsonovu korelaciju, prema autorima GOODWIN & LEECH (2006), može utjecati šest faktora:

- a) količina varijabilnosti podataka;
- b) razlike u izgledu dviju distribucija;
- c) manjak linearnosti;
- d) prisutnost jednoga ili više odudaranja;
- e) karakteristike uzorka;
- f) pogreške mjerenja.

Kendallov koeficijent korelacije se koristi kada promatrani uzorak nije normalno, tj. jednoliko, raspodjeljen. **Izraz 2.12** koji se koristi (npr. TAYLOR, 1987) je:

$$\tau_K = \sum \sum_{i < j} \text{sign}[(X_i - X_j)(Y_i - Y_j)] \cdot \frac{2}{n_k(n_k - 1)} \quad (2.12)$$

gdje su:

$\tau_k$  - Kendallov koeficijent korelacije,

$X_i, Y_i$  -  $i$ -te vrijednosti uzoraka  $X$  i  $Y$ ,

$X_j, Y_j$  -  $j$ -te vrijednosti uzoraka  $X$  i  $Y$ ,

$\text{sign}$  - neparna matematička funkcija (signum funkcija),

$n_k$  - broj parova podataka u  $k$ -tom bloku.

Kendallov koeficijent ( $\tau_k$ ) nije se tako često rabio kao Spearmanov koeficijent za izračun korelacija ranga zbog složenijega izračuna. S druge strane, oba se temelje na istim pretpostavkama o ponašanju podataka.

U većini slučajeva, ove vrijednosti su vrlo bliske i uvijek će dovesti do sličnih zaključaka, ali ako su obje istovremeno računane uvijek treba interpretirati manju vrijednost korelacije. Spearmanov  $r_s$  smatra se usporedivim s Pearsonovim koeficijentom korelacije s obzirom na udjel varijabilnosti.

Spearmanov koeficijent koristi se kada se ne može primijeniti Pearsonov koeficijent korelacije tj. kada ne postoji jednolikost uzorka (normalna razdioba). Tada je izračun koeficijenta neosjetljiv na iznos odstupanja podataka. Nedostatci su gubitak informacija o pravoj vrijednosti kod pretvorbe te uporaba parametarske statistike. Ako su oba gubitka značajna Spearmanov korelacijski koeficijent svaki podatak tretira rangom od najvišega prema najnižem, bilježeći njihovu razliku. **Izraz 2.13** za Spearmanov koeficijent korelacije (npr. GAUTHIER, 2001; MUKAKA, 2012; MALVIĆ & MEDUNIĆ, 2015) glasi:

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (2.13)$$

gdje su:

- $r_s$  - Spearmanov koeficijent korelacije,
- $d_i$  - razlika između rangova za svaki par podataka,
- $n$  - veličina uzorka.

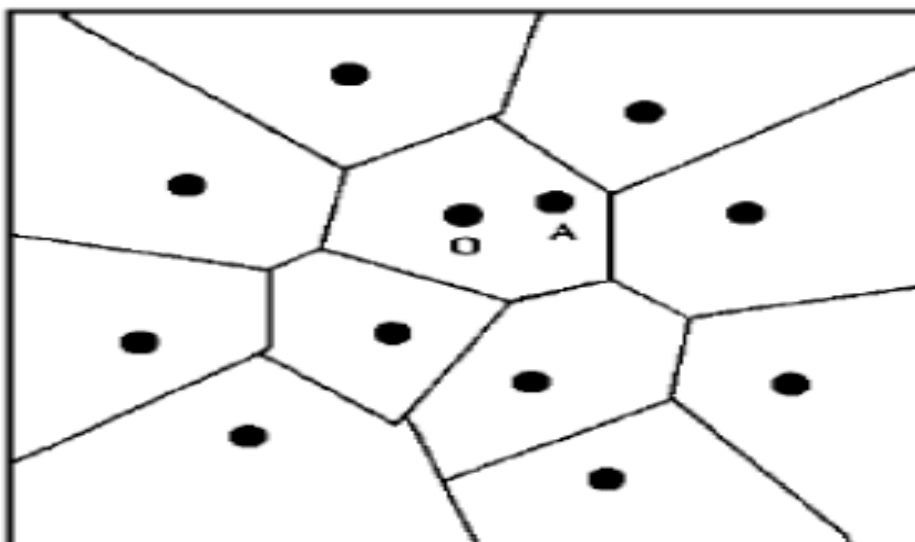
Odabir odgovarajućega koeficijenta korelacije najviše ovisi o vrsti uzorka, pojavi netipičnih vrijednosti te ispunjenju parametarskih pretpostavki.

## 2.2. Interpolacijske metode za mali uzorak

Interpolacijske metode koje se koriste za dubinskogeološko kartiranje za mali ulazni skup podataka najčešće su: Thiessenovi poligoni, inverzne udaljenosti, najbližeg susjedstva i prirodno susjedstva.

### 2.2.1. Thiessenovi poligoni kao statistička metoda kartiranja

Promatrano područje je podijeljeno u poligone, a svaki poligon sadrži jednu točku iz ulaznih varijabli. Svaka interpolirana točka (u poligonu) poprima vrijednost najbliže mjerene točke. Shematski prikaz Thiessenovoga poligona je na **slici 2-3**.



*Slika 2-3. Shematski prikaz Thiessenovoga poligona (npr. LIU et al., 2015)*

Točka O na **slici 2-3** predstavlja težište Thiessenovoga poligona, dok točka A prikazuje nepoznatu vrijednost unutar poligona. **Izraz 2.14** za izračunavanje Thiessenovoga poligona (npr. FIEDLER, 2003; HAN & GRID, 2006; SHERIZA et al., 2011, MESIĆ KIŠ & MALVIĆ, 2014; MESIĆ KIŠ, 2017) je:

$$F(x) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.14)$$

gdje su:

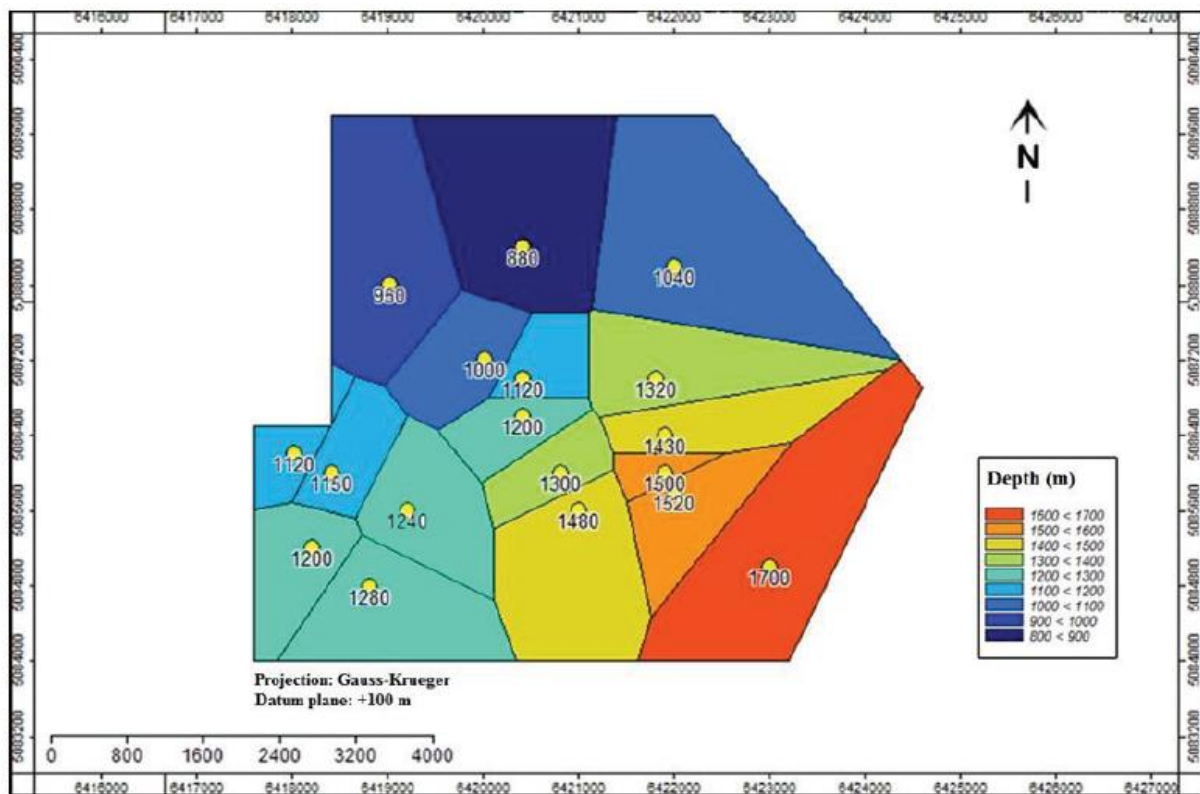
$F(x)$  - funkcija Thiessenovoga poligona,

$n$  - veličina uzorka,

$A_i$  - površina pojedinoga poligona,

$x_i$  - vrijednosti podataka ulaznih varijabli.

Primjer izrađene karte metodom Thiessenovoga poligona prikazan je na **slici 2-4**.

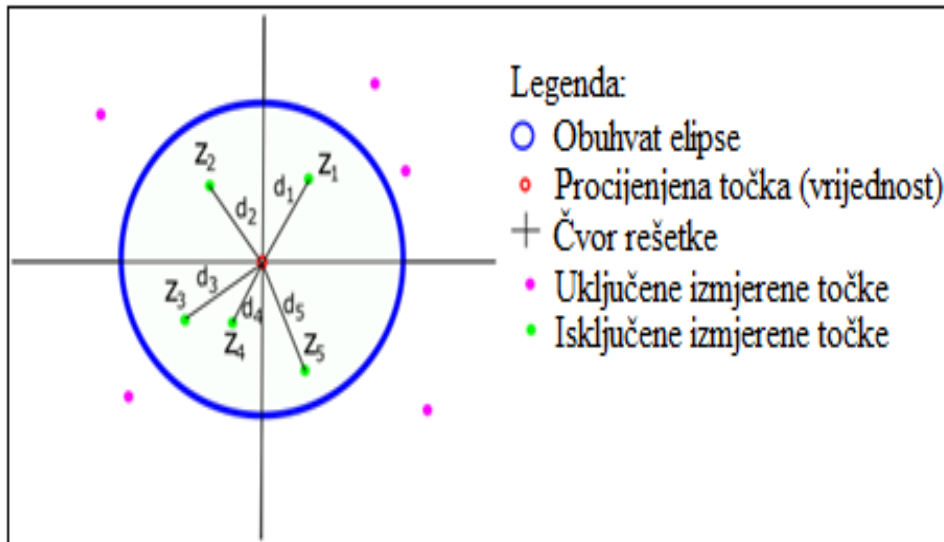


*Slika 2-4. Primjena Theissenovih poligona za procjenu dubina ležišta naftno-plinskog polja Šandrovac (MESIĆ KIS & MALVIĆ, 2014)*

Prednost ove metode jest jednostavnost primjene na malom skupu podataka, dok je nedostatak veliko uopćavanje utjecaja vrijednosti susjednoga podatka.

### **2.2.2. Metoda inverzne udaljenosti kao statistička metoda kartiranja**

Metoda inverzne udaljenosti jednostavna je interpolacijska metoda, gdje se vrijednost varijable procjenjuje prema vrijednostima okolnih izmjerenih vrijednosti. Broj izmjerenih vrijednosti koje su uključene u procjenu određene su radijusom kružnice ili elipsoida oko mjesta procjene (**slika 2-5**).



*Slika 2-5. Izmjerene i procijenjene vrijednosti unutar radijusa metode inverzne udaljenosti*

Vrijednost procijenjenog podatka je obrnuto proporcionalna o udaljenosti mjerenoga podatka i smjesta procjene. **Izraz 2.15** za procjenu metodom inverzne udaljenosti (npr. BALIĆ et al., 2008; MEDVED et al., 2010; LY et al., 2011) glasi:

$$z_{IU} = \frac{\frac{z_1}{d_1^p} + \frac{z_2}{d_2^p} + \dots + \frac{z_n}{d_n^p}}{\frac{1}{d_1^p} + \frac{1}{d_2^p} + \dots + \frac{1}{d_n^p}} \quad (2.15)$$

gdje su:

$z_{IU}$  - procijenjena vrijednost,

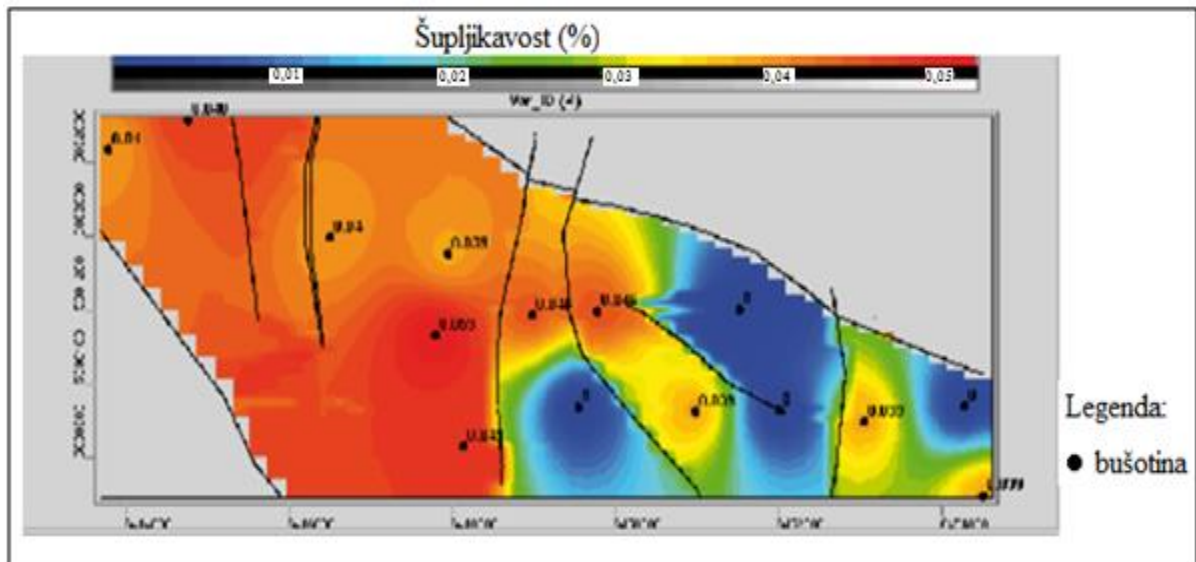
$d_1 \dots d_n$  - udaljenost smjesta 1 ...n od mjesta procjene  $z_{IU}$ ,

$p$  - eksponent udaljenosti,

$z_1 \dots z_n$  - stvarne vrijednosti na lokaciji 1 ...n.

Primjer izrađene karte metodom inverzne udaljenosti prikazan je na **slici 2-6**.



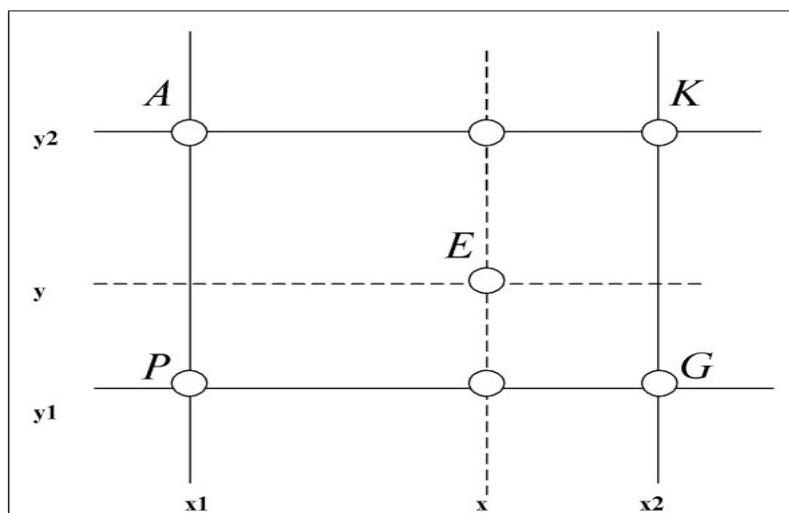


*Slika 2-6. Raspodjela šupljikavosti u klastičnim ležištima polja Stari Gradac-litofacies I (član Mosti, badenske starosti) metodom inverzne udaljenosti (iz: MALVIĆ, 2008c)*

Rezultat interpolacije ovisi o eksponentu udaljenosti koji se uobičajeno odabire s vrijednostima između 1 i 3, a najčešće se koristi iznos 2, koji je empirijski dokazan kao najprimjerenija vrijednost za prihvatljivo dubinsko geološko kartiranje. Metoda je primjenjiva ako ulazne varijable nisu izrazito grupirane, ali i kada je broj podataka manji od 15, jer tada matematičke naprednije metode nisu u mogućnosti izračunati kvalitetnu procjenu (npr. HUSANOVIĆ & MALVIĆ, 2014; IVŠINOVIĆ 2018b).

### **2.2.3. Metoda najbližeg susjedstva kao statistička metoda kartiranja**

Metoda najbližeg susjedstva je najjednostavnija interpolacijska metoda koja popunja vrijednosnu mrežu, uvažavajući vrijednost najbližeg susjednoga podatka, a rezultat metode su zonalne raspodjele vrijednosti (npr. HUSANOVIĆ & MALVIĆ, 2014; KITIKIDOU et al., 2014). Procjena vrijednosti metodom najbližeg susjedstva na primjeru procijenjene točke E u odnosu na izmjerene točke A, K, P ili G prikazana je na **slici 2-7**.



**Slika 2-7.** Mreža metode najbližeg susjedstva, procjena točke *E* u odnosu na izmjerene točke *A*, *K*, *P* ili *G* (iz: OLIVIER et al., 2012)

Udaljenost u prostoru računa se prema izrazu za Euklidovu udaljenost (**izraz 2.16**):

$$d(x, T) = \sqrt{(X_1 - T_1)^2 + \dots + (X_n - T_n)^2} \quad (2.16)$$

gdje su:

*d* - udaljenost,

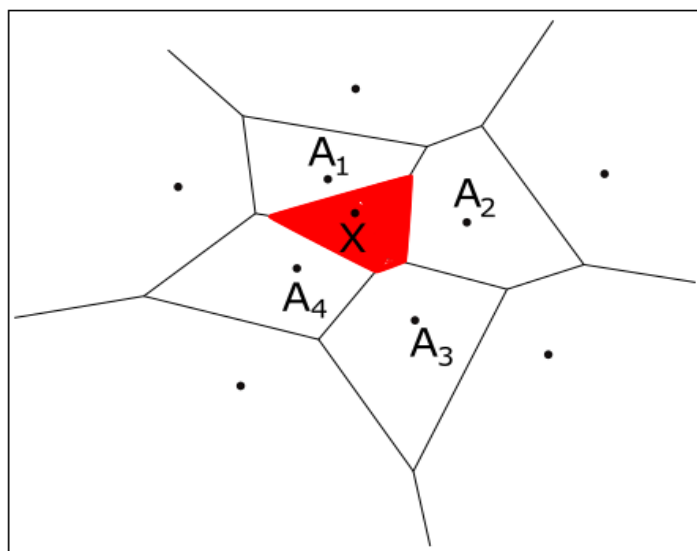
*n* - veličina uzorka,

*x* i *T* - točke u prostoru.

Upotrebljiva je kada postoji mali broj podataka, odnosno kada postoje relativno velike zone bez podataka, a potrebno ih je shematski kartirati.

#### **2.2.4. Metoda prirodnoga susjedstva kao statistička metoda kartiranja**

Metoda prirodnoga susjedstva je jednostavna metoda interpolacije koja se temelji na Voronoyevim poligonima. Na **slici 2-8** prikazana je nepoznata vrijednost „*X*“ procijenjena iz podataka „*A*<sub>1-4</sub>“.



*Slika 2-8. Mreža metode prirodnoga susjedstva, procjena točke X u odnosu na izmjerene točke A<sub>1-4</sub> (npr. BOISSONNAT & CAZALS, 2001; TSIDAEV, 2016)*

Matematički **izraz 2.17** za procijenjenu vrijednosti metodom prirodnoga susjedstva (npr. TRAVERSONI, 1994; BOISSONNAT & CAZALS, 2001; TSIDAEV, 2016):

$$X(x, y) = \sum_{i=1}^n (w_i A(X_i, Y_i)) \quad (2.17)$$

gdje su:

$X(x,y)$  - procijenjena točka,

$A(x,y)$  - izmjerena vrijednost u najbližem susjedstvu,

$w_i$  - udio površine analiziranih poligona u ukupnoj površini.

### **2.3. Geostatističke metode i tehnike izračuna prostorne zavisnosti kao statističkih metoda kartiranja**

Geostatistika je grana primijenjene statistike koja primjenjuje teorije determinističke procjene, zatim stohastičkih procesa, odnosno statističkoga zaključivanja na različite prostorne pojave u brojnim znanostima. Najvažniji pojam u geostatistici u naftno-geološkoj struci je regionalizirana varijabla (npr. MESIĆ KIŠ & MALVIĆ, 2014; MESIĆ KIŠ, 2017). Pod pojmom regionalizirane varijable podrazumijeva se mjerenu ili procijenjenu veličinu čije ponašanje se dijelom opisuje slučajnom, a dijelom determinističkom varijablom. Svaka takva

varijabla pokazuje svojstvo prostorne kontinuiranosti i kao takva je modelirana u prostoru. Kvalitetnim opisom svojstva regionalizirane varijable dovodi se do preciznije procjene regionalizirane varijable. Prilikom interpolacije koristi se jedna primarna (autokorelacija) ili više sekundarnih varijabli koje su u korelaciji s primarnom varijablom.

### 2.3.1. Variogram

Variogram prikazuje prostornu zavisnost koja ovisi samo o udaljenosti između dviju točaka, a posredno i razlici vrijednosti između njih. Za relativno mali broj mjerenja (15-40), variogram će bolje opisati strukturu slučajnoga polja nego kovarijanca, za koju treba znatno više mjerenja (npr. ANDRIČEVIĆ et al., 2006). **Izraz 2.18** variograma (npr. MALVIĆ, 2008c; BALIĆ et al., 2008) glasi:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \cdot \sum_{n=1}^{N(h)} [z(u_n) - z(u_n + h)]^2 \quad (2.18)$$

gdje su:

$2\gamma(h)$  - vrijednost variograma na udaljenosti „ $h$ “,

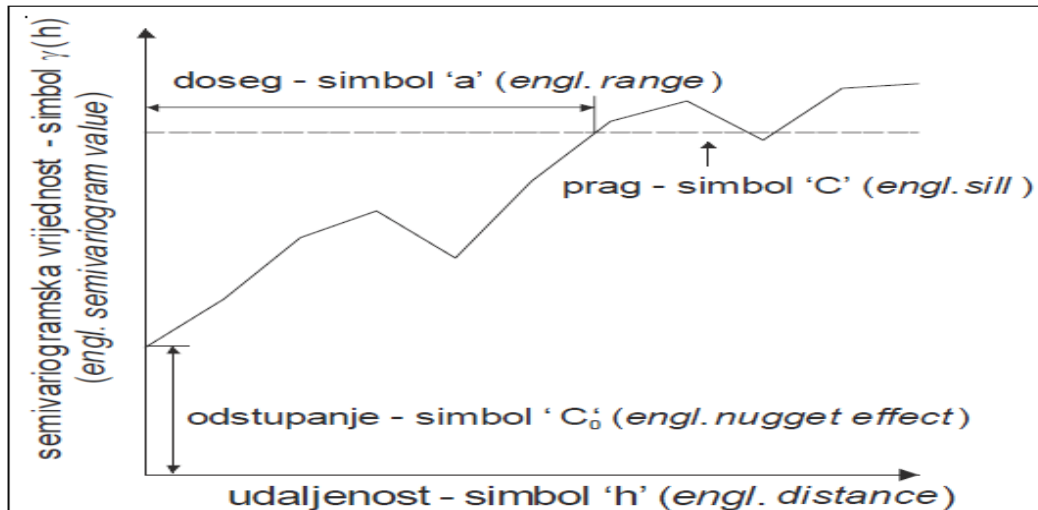
$N(h)$  - broj parova podataka uspoređenih na udaljenosti „ $h$ “,

$z(u_n)$  - vrijednost na lokaciji „ $u_n$ “,

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

Varijable poluvariograma (semivariograma) (eksperimentalne krivulje) (**slika 2-9**) su:

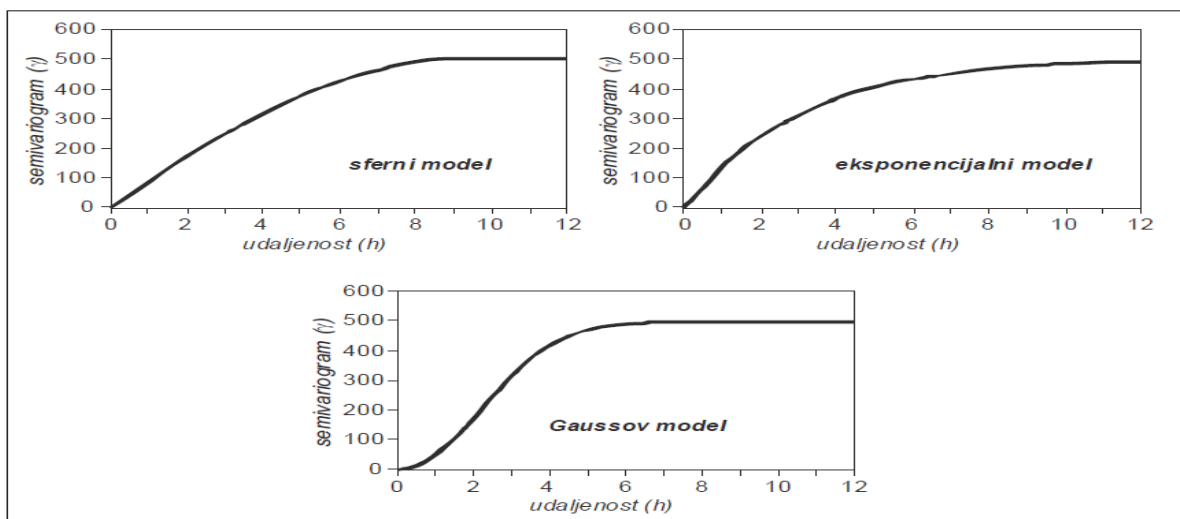
- Odstupanje koje predstavlja slučajnu komponentu regionalizirane varijable;
- Prag koji je razlika između pojedinačnih vrijednosti uzorka i aritmetičke sredine;
- Doseg kao vrijednost pri kojoj dolazi do prvoga sjećanja s vrijednošću praga;
- Udaljenost, odnosno razmak između podataka za usporedbu.



*Slika 2-9. Parametri poluvariograma (iz: MALVIĆ, 2008c)*

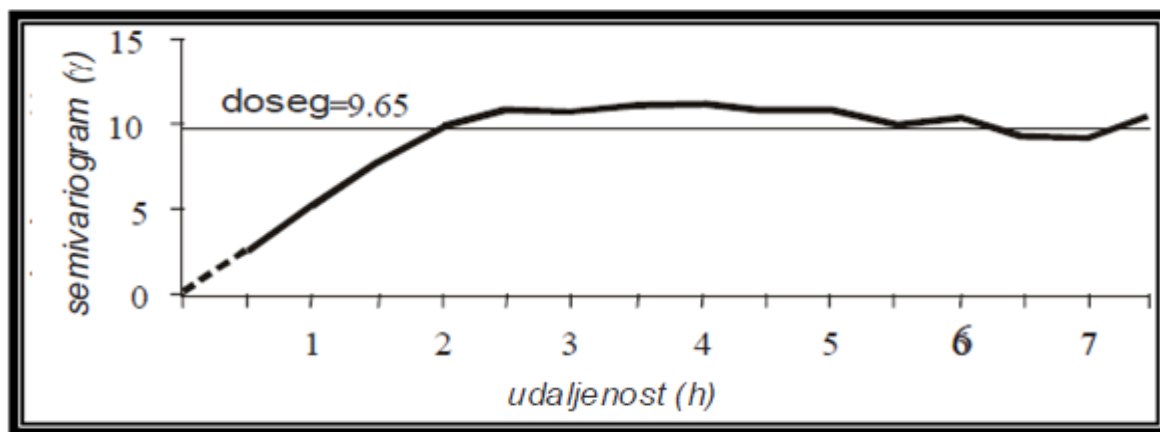
Za variogram se veže svojstvo anizotropije, a pod njome se podrazumijeva promjena vrijednosti variograma ovisno o smjeru u kojem se računa. Također, vrlo bitno svojstvo variograma je osciliranje pod kojim se podrazumijeva postojanost prostorne ovisnosti podataka. Što se tiče ekstrema unutar promatranih podataka, poželjno je takve podatke odbaciti, posebno u brojnijim skupovima ( $>30$  mjerenja), kako ne bi značajno utjecali na izračun variograma zbog velike razlike kvadrata (**jednadžba 2.18**).

Variogramski modeli mogu se aproksimirati s nekoliko teorijskih modela, a pet su najčešći. To su sferni, eksponencijalni, Gaussov, linearan i logaritamski (MALVIĆ, 2008c). Među njima, tri najčešća su sferni, eksponencijalni i Gaussov (**slika 2-10**).



*Slika 2-10. Tri eksperimentalna poluvariogramska modela koja se najčešće koriste u geologiji (iz: MALVIĆ, 2008c)*

Poluvariogram je funkcija identična variogramu (MALVIĆ, 2008c). Pod jednodimenzionalnim (1D) variogramom podrazumijeva se dobivanje variograma duž jedne osi, npr. po okomici pojedine bušotine (npr. **slika 2-11.**). On je poseban primjer variogramske analize i rijetko se koristi se za kasnije 1D kartiranje, već najčešće interpretaciju prostorne zavisnosti iz samoga variograma.



**Slika 2-11.** Vertikalni variogram, bušotina Pav-1, pješčenjaci Poljana (iz: MALVIĆ, 2008c)

### 2.3.2. Krigiranje

Krigiranje je geostatistička metoda prostorne procjene neke varijable, odnosno njezine interpolacije. Procjena se temelji na upotrebi postojećih izmjerenih podataka kojima su dodijeljeni odgovarajući težinski koeficijenti. Procjena se računa prema **izrazu 2.19** (npr. MALVIĆ, 2008b; BALIĆ et al., 2008):

$$z_k = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z_i \quad (2.19)$$

gdje su:

- $z_k$  - vrijednost varijable dobivene procjenom,
- $\lambda_i$  - težinski koeficijent za svaku lokaciju,
- $z_i$  - poznate vrijednosti varijable u okolnom području.

Za primjenu gornjeg izraza kartirana varijabla mora biti normalno raspodijeljena. Težinski koeficijenti se dobivaju sustavom linearnih (matričnih) jednadžbi. Proračun težinskih koeficijenata ovisi o udaljenosti mjerene i procijenjenih točaka, tj. prostornoj zavisnosti variograma. Za metodu krigiranja postoje brojne tehnike koje se razlikuju po obliku matričnih jednadžbi, a neke od njih su:

- jednostavno krigiranje,
- obično krigiranje (najčešća primjena u geologiji),
- indikatorsko krigiranje,
- kokrigiranje,
- univerzalno krigiranje.

### 2.3.2.1. Jednostavno krigiranje

Najjednostavniji oblik metode krigiranja je jednostavno krigiranje, a njegova matrična **jednadžba (2.20)** glasi (npr. MALVIĆ, 2008c; MALVIĆ & NOVAK ZELENKA, 2013):

$$\begin{bmatrix} \gamma(Z_1 - Z_1) & \gamma(Z_1 - Z_2) & \dots & \gamma(Z_1 - Z_n) \\ \gamma(Z_2 - Z_1) & \gamma(Z_2 - Z_2) & \dots & \gamma(Z_2 - Z_n) \\ & & \ddots & \\ \gamma(Z_n - Z_1) & \gamma(Z_n - Z_2) & \dots & \gamma(Z_n - Z_n) \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x) \\ \gamma(x_2 - x) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

gdje su:

$\gamma$  - vrijednost variograma,

$n$  - veličina uzorka,

$\lambda$  - težinski koeficijent,

$Z$  - regionalizirana varijabla.

Jednostavno krigiranje je temelj za ostale metode krigiranja, a nedostatak ove metode je što ne zadovoljava uvjet nepristrane procjene, tj. zbroj svih težinskih koeficijenata ne mora biti 1

### 2.3.2.2. Obično krigiranje

Dodavanjem Lagrangeova faktora ( $\mu$ ) jednostavnom krigiranju dobiva se matična jednadžba običnoga krigiranja. **Izraz 2.21** za Lagrangeovu funkciju (npr. JUFFIN, 1975; BERTSEKAS, 1996) je:

$$L(x, \mu) = f(x) + \mu \cdot h(x) \quad (2.21)$$

gdje su:

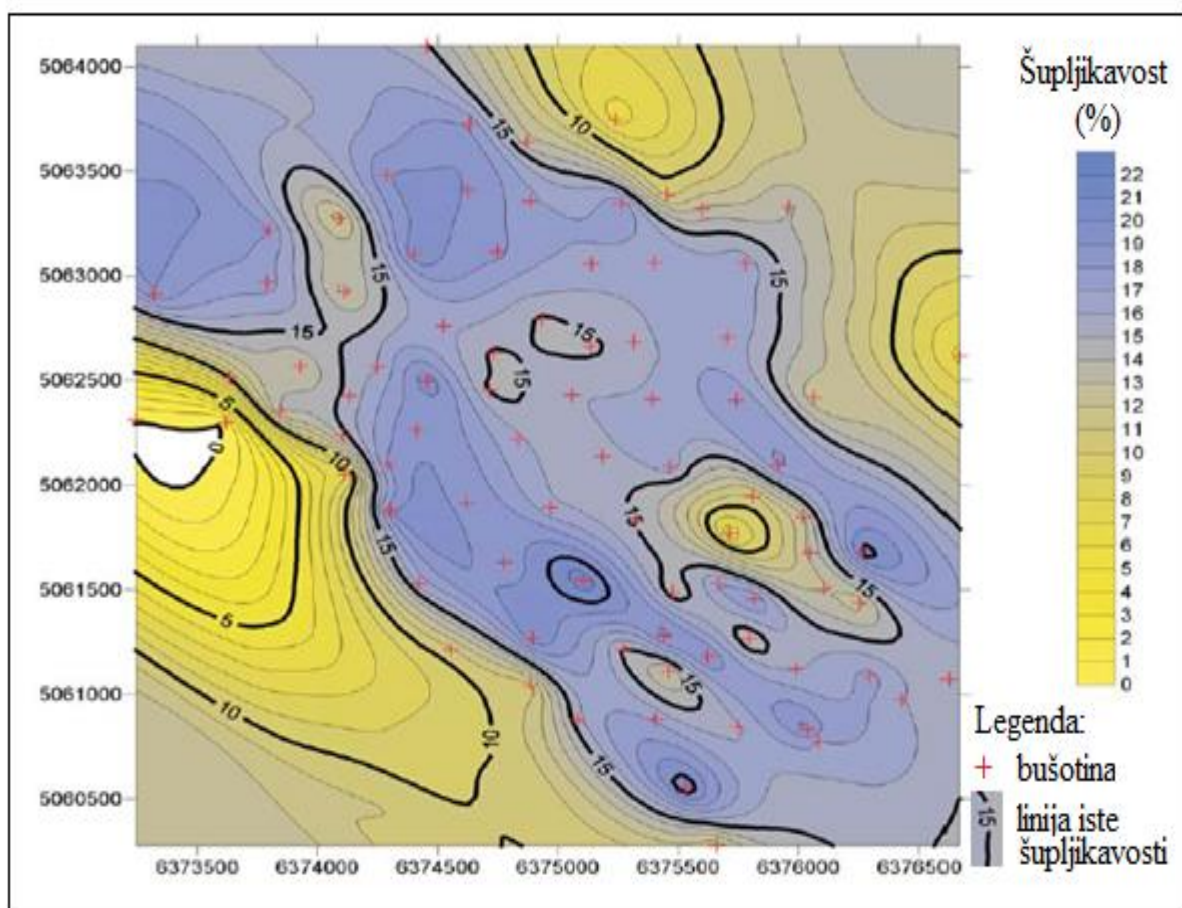
- $L(x, \mu)$  - Lagrangeova funkcija,
- $f(x), h(x)$  - Funkcije od  $x$  vrijednosti,
- $\mu$  - Lagrangeov faktor.

Lagrangeov faktor omogućuje određivanje maksimalne i minimalne vrijednosti neke (više) varijabilne funkcije  $f(x, y, \dots)$  u slučaju postojanja ograničenja ulaznih vrijednosti. Uporabom Lagrangeova faktora ( $\mu$ ) postiže se minimiziranje iznosa varijance, u ovom slučaju krigiranja. Matična **jednadžba (2.22)** za obično krigiranje glasi (npr. MALVIĆ, 2008c; MALVIĆ & NOVAK ZELENKA, 2013):

$$\begin{bmatrix} \gamma(Z_1 - Z_1) & \gamma(Z_1 - Z_2) & \dots & \gamma(Z_1 - Z_n) \\ \gamma(Z_2 - Z_1) & \gamma(Z_2 - Z_2) & \dots & \gamma(Z_2 - Z_n) \\ & & \ddots & \\ \gamma(Z_n - Z_1) & \gamma(Z_n - Z_2) & \dots & \gamma(Z_n - Z_n) \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x) \\ \gamma(x_2 - x) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Oznake u **jednadžbi (2.22)** iste su kao i u **jednadžbi (2.20)** uz dodatak  $\mu$  što predstavlja Lagrangeov faktor. Primjer karte dobivene metodom krigiranja prikazan je na **slici 2-12**.





**Slika 2-12.** Karta šupljikavosti na jednoj od struktura u zapadnom dijelu Savske depresije (ležište panonske starosti) dobivene interpolacijom krigiranjem (iz: MALVIĆ, 2008a)

### 2.3.3. Metoda ponovljenoga uzorkovanja

Ponovno uzorkovanje (engl. *Jack-knifing*) je metoda dodatnoga uzorkovanja skupa podataka bez uporabe teorijskih distribucija (npr. MALVIĆ & BASTAIĆ, 2008; MALVIĆ & VRBANAC, 2013). Izvorni podatci se grupiraju u istovrsne skupine. Svaka pojedina skupina se izostavlja iz izvornoga skupa te se procjeni novi skup podataka. Postupak se, kod manjega broja vrijednosti (<50), može načiniti i na razini pojedinačnoga podataka, bez grupiranja, što je primijenjeno u disertaciji. Skup podataka kod ponovnoga uzorkovanja (**izraz 2.23**) glasi:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_{n-1}) \quad (2.23)$$

gdje su:

$X$  - vektor ponovnog uzrokovanja,

$X_{1,2,\dots}$  - podatci,

$n$  - veličina uzorka.

Postupak se ponavlja dok se svaki podatak ne bude u jednoj iteraciji obrisao iz ulaznog skupa. Replikator metode ponovljenog uzorka je određen kao vrijednost procjene u  $i$ -tom podatku podataka metode ponovljenog uzorka (**izraz 2.24**) (npr. MCINTOSH, 2016):

$$\theta_i = s(X_i) \quad (2.24)$$

gdje su:

$\theta_i$  - replikator metode ponovljenog uzorka,

$s$  - procjena,

$X_i$  - vrijednost „ $i$ ”-toga ulaza.

Izraz za empiričku srednju vrijednost replikatora metode ponovljenog uzorka (**izraz 2.25**) je (npr. WU, 1986, MCINTOSH, 2016):

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i}{n} \quad (2.25)$$

gdje su:

$\theta$  - empirička srednja vrijednost replikatora metode ponovljenog uzorka,

$\theta_i$  - replikator metode ponovljenog uzorka,

$n$  - veličina uzorka.

Standardna pogreška metode ponovljenog uzorkovanja je (**izraz 2.26**) (npr. WU, 1986, SHAO, 1992; MCINTOSH, 2016) glasi:

$$SE(\theta)_{pu} = \sqrt{\frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta)^2}{n}} \quad (2.26)$$

gdje su:

$SE(\theta)_{pu}$  - standardna pogreška metode ponovljenoga uzorkovanja,

$\theta_i$  - replikator metode ponovljenoga uzorka,

$\theta$  - empirička srednja vrijednost replikatora metode ponovljenoga uzorka,

$n$  - veličina uzorka.

### 2.3.4. Metoda krosvalidacije

Krosvalidacija je numerička metoda procjene za provjeru uspješnosti primijenjene interpolacijske metode računajući vrijednost srednje kvadratne pogreške procjene vrijednosti. Postupak izračuna vrijednosti je vrlo jednostavan i primjenjiv. Iz ulaznoga skupa podataka zanemari se jedan podatak (slučajnim odabirom ili sekvencijski), a onda se na istom mjestu izračuna nova vrijednost iz ostatka. Postupak se ponavlja onoliko puta kolika je veličina ulaznoga skupa podataka. Primjer algoritma za devet mjerenih podataka prikazan je na **slici 2-13**.

		Izvorni podatci								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Korak iteracije	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	7	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	8	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Legenda:

Uključeni podatak

Izostavljeni podatak

*Slika 2-13. Iterativni postupak pri računanju vrijednosti krosvalidacije*

Na kraju postupka iteracije zbrajaju se kvadrati razlika između izmjerene i procijenjene vrijednosti te se dobiva vrijednost krosvalidacije. **Izraz 2.27** za srednju kvadratnu pogrešku procjene (*engl. Mean Square Error*, skr. *MSE*) je (npr. RODRIGUEZ et al. 2010, HUSANOVIĆ & MALVIĆ, 2014; ARLOT & LERASLE 2016):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SV - P)_i^2 \quad (2.27)$$

gdje su:

<i>MSE</i>	- srednja kvadratna pogreška procjene (engl. Mean Square Error, skr. MSE),
<i>n</i>	- veličina uzorka,
<i>SV</i>	- stvarna vrijednost uzorka,
<i>P</i>	- procijenjena vrijednost,
<i>ib</i>	- bušotina.

Kada se uspoređuje više rezultata iste procjene načinjene različitim algoritmima, jedan od kriterija odabira najprimjerenije je izbor rješenja s najmanjom vrijednošću krosvalidacije (npr. MALVIĆ et al. 2019a; MALVIĆ et al. 2019b).

#### 2.4. Geološka izglednost (POS) postojanja ležišta ugljikovodika

Izračun geološke izglednosti postojanja ležišta ugljikovodika je djelomice kvalitativan postupak, jer svaka varijabla je procijenjena (a) bilo u trenutku uporabe te jednadžbe na nekom smjestištu, (b) bilo iz objavljenih, empirijskih vjerojatnosnih tablica za neki prostor. Obično granice i vrijednosti postavlja najiskusniji i najškolovaniji geolog glede geoloških varijabli sustava koji se procjenjuje.

Determinističkom procjenom neovisnih kategorija unutar sustava analiziraju se potencijalna ili dokazana ležišta, odnosno njihova odabrana svojstva (tzv. prilagođena geološka vjerojatnost). Osnovne neovisne kategorije su (npr. MALVIĆ, 2003; MALVIĆ & RUSAN, 2009): zamka, ležište, migracija, matična stijena i očuvanje ugljikovodika. Određene su na temelju podataka iz bušotina, karotažnih dijagrama, seizmičke interpretacije, analize jezgara, stratigrafije i proizvodnje. Pomoću navedenih vrijednosti (**slika 2-14**) izračunava se geološki rizik, geološka vjerojatnost, odnosno geološka izglednost (engl. *Probability of Success*, skr. *POS*) za svaki promatrani stratigrafski interval upotrebom sljedeće **jednadžbe 2.28** (MALVIĆ, 2009b):

$$POS = p(z) \cdot p(l) \cdot p(m) \cdot p(ms) \cdot p(oCH) \quad (2.28)$$

gdje su:

- POS* - geološka izglednost (dij. jed.),  
*p* - vjerojatnost geološkoga događaja (dij. jed.),  
*p(z)* - vjerojatnost postojanja zamke (dij. jed.),  
*p(l)* - vjerojatnost s obzirom za ležište (dij. jed.),  
*p(m)* - vjerojatnost s obzirom na migraciju (dij. jed.),  
*p(ms)* - vjerojatnost s obzirom na matičnu stijenu (dij. jed.),  
*p(oCH)* - vjerojatnost s obzirom na očuvanje ugljikovodika (dij. jed.).

Pet vjerojatnosnih razreda izdvojeno je unutar HPBS-a u svakoj pojedinačnoj potkategoriji: siguran događaj (1,0), vrlo vjerojatan (0,75), vjerojatan (0,5), malo vjerojatan (0,25) te najvjerojatnije nepostojeći, tj. neutvrđen (0,05) (MALVIĆ & RUSAN, 2009). Vrijednost zadnjeg razreda iznosi 0,05, jer u slučaju nepostojanja vjerojatnosti vrijednost geološke izglednosti bi iznosila 0.

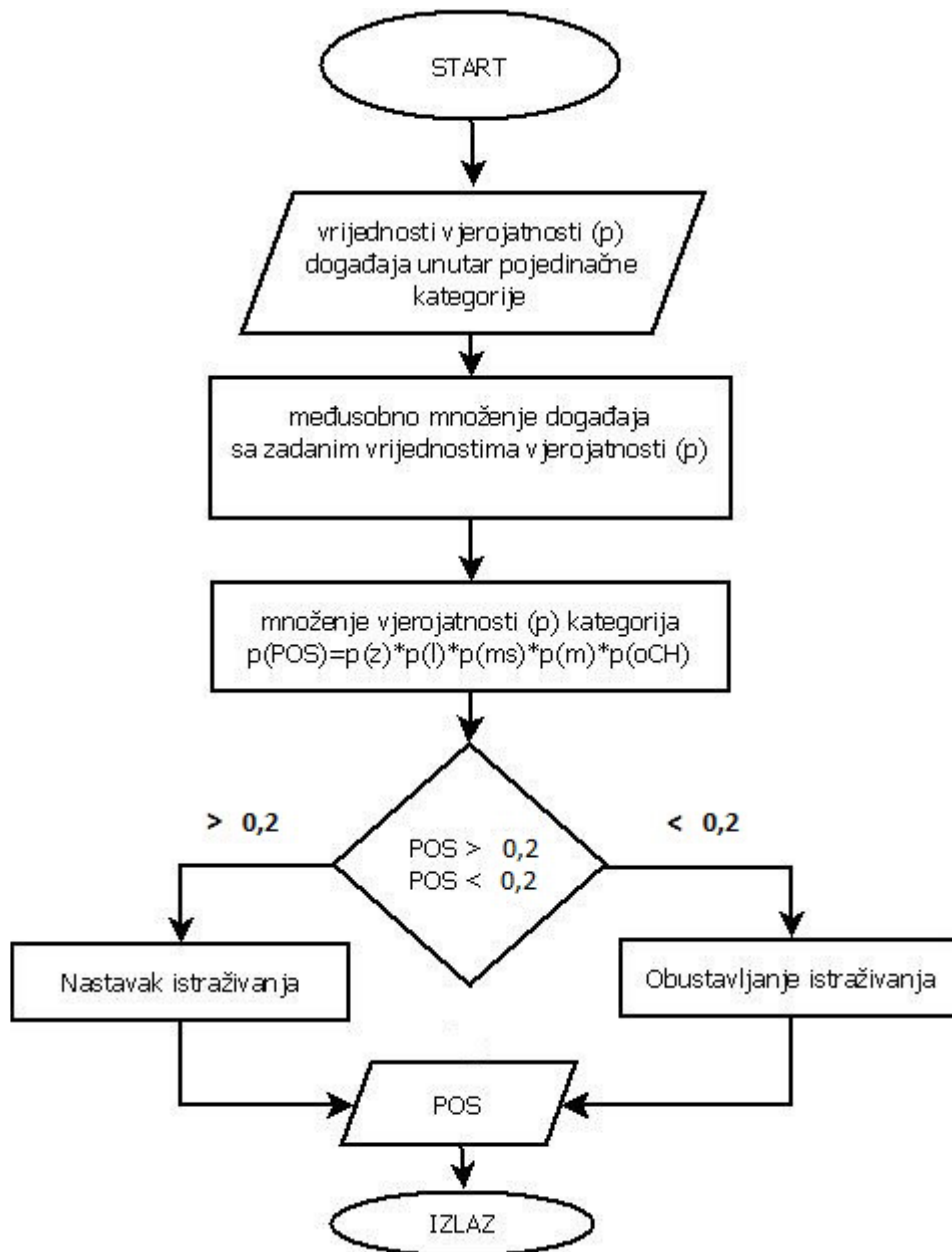
TRAP		RESERVOIR		SOURCE ROCKS		MIGRATION		HC PRESERVATION	
Structural		Reservoir type		Source facies		HC shows		Reservoir pressure	
Anticline and buried hill linked to basement	1.00	Sandstone clean and laterally extended; Basement granite, geiss, gabbro; Dolomites and Algae reefs (secondary porosity)	1.00	Kerogen type I and/or II	1.00	Production of hydrocarbons	1.00	Higher than hydrostatic	1.00
Faulted anticline	0.75	Sandstones, rich in silt and clay; Basement with secondary porosity, limited extending; Algae reefs, filled with skeletal debris, mud and marine cements	0.75	Kerogen type III	0.75	Hydrocarbons in traces; New gas detected >10 %	0.75	Approximately hydrostatic	0.75
Structural nose closed by fault	0.50	Sandstone including significant portion of silt/clay particles, limited extending;	0.50	Favourable palaeo-facies organic matter sedimentation	0.50	Oil determined in cores (luminescent analysis, core tests)	0.50	Lower than hydrostatic	0.50
Any "positive" faulted structure, margins are not firmly defined	0.25	Basement rocks, including low secondary porosity and limited extending	0.25	Regionally known source rock facies, but not proven at observed locality	0.25	Oil determined in traces (lumin. anal., core tests)	0.25		0.25
Undefined structural framework	0.05	Undefined reservoir type	0.05	Undefined source rock type	0.05	Hydrocarbon are not observed	0.05		0.05

Stratigraphic or combined		Porosity features		Maturity		Position of trap		Formation water	
Algae reef form	1.00	Primary porosity >15 %; Secondary porosity >5 %	1.00	Sediments are in catagenesis phase ("oil" or "wet" gas-)	1.00	Trap is located in proven migration distance	1.00	Still aquifer of field-waters	1.00
Sandstones, pinched out	0.75	Primary porosity 5-15 %; Secondary porosity 1-5 %	0.75	Sediments are in metagenesis phase	0.75	Trap is located between two source rocks depocentres	0.75	Active aquifer of field-waters	0.75
Sediments changed by diagenesis	0.50	Primary porosity <10 %; Permeability <1x10 <sup>-3</sup> micrometer <sup>2</sup>	0.50	Sediments are in early catagenesis phase	0.50	Short migration pathway (<=10 km)	0.50	Infiltrated aquifer from adjacent formations	0.50
Abrupt changes of petrophysical properties (caly, different facies)	0.25	Secondary porosity <1 %	0.25	Sediments are in late diagenesis phase	0.25	Long migration pathway (>10 km)	0.25	Infiltrated aquifer from surface	0.25
Undefined stratigraphic framework	0.05	Undefined porosity values	0.05	Undefined maturity level	0.05	Undefined source rocks	0.05		0.05

Quality of cap rock		Data sources		Timing	
Regional proven cap rock (seals, isolator)	1.00	Geochemical analysis on cores and fluids	1.00	Trap is older than matured source rocks	1.00
Rocks without reservoir properties	0.75	Analogy with close located geochemical analyses	0.75	Trap is younger than matured source rocks	0.75
Rocks permeable for gas (gas leakage)	0.50	Thermal modeling and calculation (e.g. Lopatin, Waples etc.)	0.50	Relation between trap and source rocks is unknown	0.50
Permeable rocks with locally higher silt/clay content	0.25	Thermal modeling at just a few locations	0.25		0.25
Undefined cap rock	0.05	Undefined data sources	0.05		0.05

*Slika 2-14. Geološki događaji prikazani u pet kategorija s pripadajućim vjerojatnostima (MALVIĆ & VELIĆ, 2015, izvornik je na engleskom)*

Algoritam za računanje POS-a prikazan je na **slici 2-15**. Vrijednosti za POS i p su odabrane kao kategoričke vjerojatnosti iz intervala 0-1.



**Slika 2-15.** Dijagram toka za izračun geološke izglednosti (iz: REŽIĆ & VARENINA, 2017)

Prema autorima, broj 0,2 bila je granična vrijednost na temelju koje se odlučuje hoće li biti daljnjih istraživanja ili neće u prostoru HPBS-a, za ležišta gornjega miocena.

### 3. ZEMLJOPISNI SMJEŠTAJ ISTRAŽIVANOGA PROSTORA

Naftno-plinska polja „A“ i „B“ udaljena su oko 90 km jugoistočno od Zagreba. Oba istraživana polja smještena su u istočnom dijelu Sisačko-moslavačke županije.

Sisačko-moslavačka županija zauzima površinu od 4467,76 km<sup>2</sup>, što čini 7,89 % ukupnoga kopnenoga područja Republike Hrvatske, dok u strukturi ukupne površine najveći udio čine poljoprivredne površine (52 %), šumsko zemljište (44 %) i neplodne površine (4 %) ([http://simora.hr/userfiles/file/Razv\\_strategije/ZRS/Analiza%20stanja\\_13.4.2016.pdf/](http://simora.hr/userfiles/file/Razv_strategije/ZRS/Analiza%20stanja_13.4.2016.pdf/)).

Sisačko-moslavačka županija pripada području središnje Hrvatske. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine na području županije živi 172 439 stanovnika. Gustoća je naseljenosti 38,59 stanovnika/km<sup>2</sup>. Županija se sastoji od 7 gradova (Sisak, Glina, Hrvatska Kostajnica, Kutina, Novska, Petrinja i Popovača) i 12 općina (Donji Kukuruzari, Dvor, Gvozd, Hrvatska Dubica, Jasenovac, Lekenik, Lipovljani, Majur, Martinska Ves, Sunja, Topusko i Velika Ludina), a upravno središte županije nalazi se u gradu Sisku.

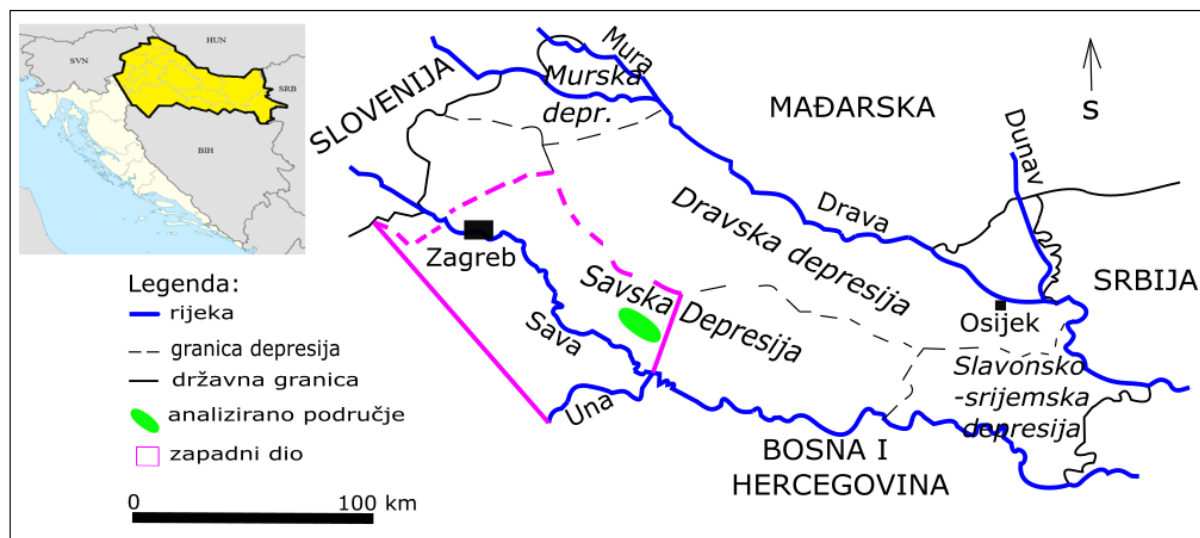
Prema svjetski prihvaćenim kriterijima tipiziranja klime (W. Köppen), najveći dio područja kontinentalne Hrvatske obuhvaća umjereno topla kišna klima (tip C), dok samo visoka gorska područja imaju snježno-šumsku klimu (tip D). Područje Sisačko-moslavačke županije pripada podvarijanti tipa C klime i to umjereno toploj vlažnoj klimi s toplim ljetom (Cfb). Srednje siječanjske temperature kreću se od -2 do 0 °C, a srpanjske od 18 do 22 °C ([http://simora.hr/userfiles/file/Razv\\_strategije/ZRS/Analiza%20stanja\\_13.4.2016.pdf/](http://simora.hr/userfiles/file/Razv_strategije/ZRS/Analiza%20stanja_13.4.2016.pdf/)).

Kroz istraživano područje prolazi autocesta A3 (Bregana-Zagreb-Lipovac). Udaljenost istraživanih polja „A“ i „B“ od prometnoga čvora autoputa A3 je cca 7 km. Također, kroz istraživano područje prolazi međunarodna pruga RH1 TEN-T (Paneuropski koridor X), Salzburg – Solun, koja povezuje Srednju i Zapadnu Europu s Jugoistočnom Europom i Bliskim istokom. Hrvatski dio međunarodnoga željezničkoga koridora je Savski Marof - Zagreb - Dugo Selo - Novska - Vinkovci - Tovarnik. Udaljenost polja „A“ i „B“ od međunarodnoga željezničkoga pravca je oko 5 km.

Na istraživanom području nalaze se sljedeća hidrografska područja: međusliv Save od Krapine do Česme, sliv Ilove, međusliv Save od Česme do Ilove s Pakrom, Česme, sliv Ilove, međusliv Save od Ilove do Orljave, sliv Kupe (dio), međusliv Save od Kupe do Une, sliv Une u RH ([http://simora.hr/userfiles/file/Razv\\_strategije/ZRS/Analiza%20stanja\\_13.4.2016.pdf/](http://simora.hr/userfiles/file/Razv_strategije/ZRS/Analiza%20stanja_13.4.2016.pdf/)). Udaljenost rijeke Save od istraživanih polja je oko 15 km, dok je udaljenost rijeke Lonje 14 km.

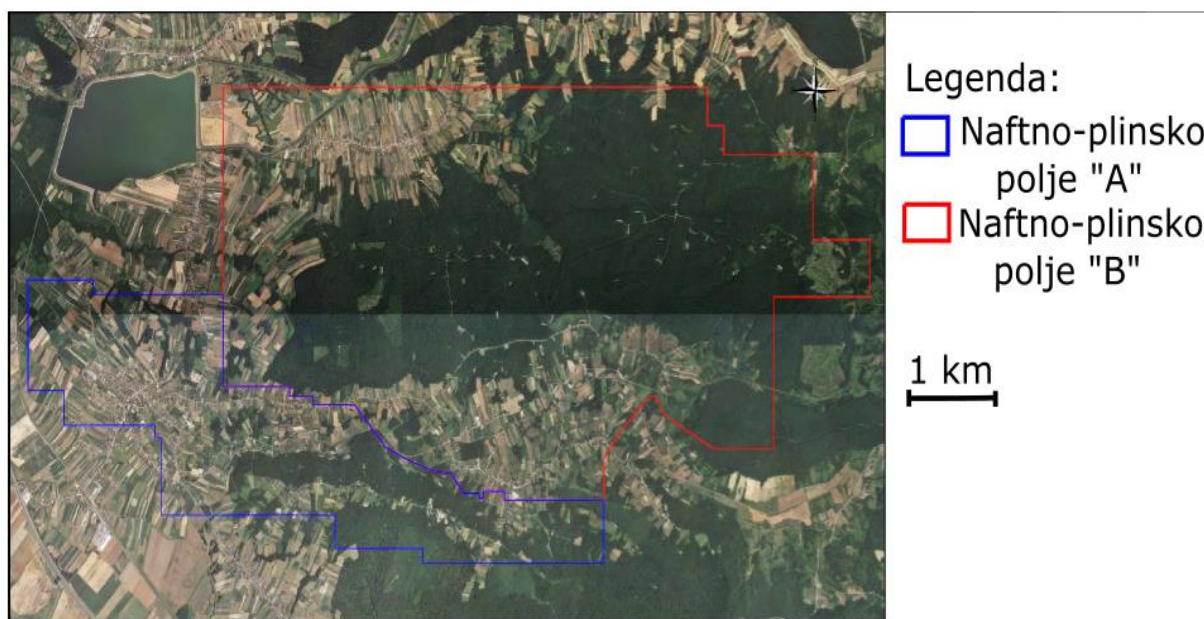


Površina eksploatacijskoga područja polja „A“ je 14,07 m<sup>2</sup>, dok je polja „B“ 42,23 m<sup>2</sup>. Lokalni zemljopisni smještaj istraživanih polja „A“ i „B“ unutar Savske depresije je prikazan na **slici 3-1**.



*Slika 3-1. Zemljopisni položaj polja „A“ i „B“ unutar HPBS-a*

Satelitska karta užega područja istraživanoga naftno-plinskoga polja „A“ (plavi okvir) i naftno-plinskoga polja „B“ (crveni okvir) prikazana je na **slici 3-2**. Ova je slika priređena je pomoću usluge Google Maps.



*Slika 3-2. Reljefna karta istraživanoga naftno-plinskoga polja „A“ i „B“*

Polje „A“ prostire se na brežuljkastom terenu zapadnih obronka Psunja u smjeru pravca sjeverozapad-jugoistok. Nadmorska visina terena je od 113 do 216 m što čini maksimalnu visinsku razliku od 103 m. Glavna karakteristika reljefa polja „A“ je nepristupačnost i strmost, što za posljedicu ima više koso usmjerenih kanala bušotina. Pojedina strma područja su aktivna ili povremena klizišta, koja se aktiviraju za vrijeme kišnih perioda. Jugoistočni dio polja je pošumljen, dok je ostalo područje pod obradivim površinama i livadama.

Najniži dio terena polja „B“ predstavlja dolina na južnoj strani polja s kotom 120 m, dok je najviši na sjeveroistočnome dijelu polja na 231 m. Visinska razlika iznosi 111 m. Morfologija je izražena strmim padinama. Sjeverni dio polja je pošumljen, dok je južni pod obradivim površinama i livadama.

#### **4. POVIJEST RANJIH, METODOLOŠKI ILI PROSTORNO DJELOMICE SLIČNIH, GEOMATEMATIČKIH ISTRAŽIVANJA TE OSNOVNE GEOLOŠKE ZNAČAJKE ODABRANOGA PROSTORA**

Dosadašnja istraživanja iz geomatematike, a koja su ocijenjena važnima i za ovaj rad, navedena su zbog lakšega praćenja razvoja teorije i primjene geomatematičkih metoda, poglavito u Hrvatskoj, od najstarijeg prema najnovijem objavljenom istraživanju. U radu MALVIĆ et al. (2005) su prikazani rezultati više alata „klasične“ statistike kao npr. šupljikavost-dubina (grafička relacija), t-test, F-test, Pearsonov R u svrhu interpretacije vrijednosti šupljikavosti ležišta starosti donjeg ponta u središnjem dijelu Bjelovarske subdepresije. Podatci su dobiveni iz jezgra pet bušotina. U radu je analiziran utjecaj povećanja dubine na vrijednost šupljikavosti, na primjerima Pepelana i Poljana formacijama. MARTINIUS & NÆSS (2005) su primijenili stohastičke metode na ležišnom modelu polja Tortóla (Španjolska) u svrhu određivanja taložnoga modela. POPOV et al. (2006) su opisali razvoj prostora Paratetisa i Mediterana tijekom miocena i pliocena. RUSSELL et al. (2006) su kartirali šupljikavost ležišta naftnoga polja Blackfoot u središnjoj Alberti metodom kokrigiranja uz krosvalidaciju, a uporabom seizmičkih i karotažnih podataka. STRAUSS et al. (2006) su unaprijedili sekvencijsku stratigrafiju miocena središnjeg i južnoga dijela Bečkoga bazena koristeći statističku obradu seizmičkih 3D podataka. ROSE (2007) je opisao prednosti primjene metode determinističke geološke vjerojatnosti u istraživanju i pridobivanju ugljikovodika. HÖLZEL et al. (2008) su u radu opisali evoluciju Bečkoga bazena tijekom srednjeg i gornjeg miocena. Analizirali su tektoniku bazena i izradili karte na uzorku od 50 bušotinskih podataka. MALVIĆ (2008a) je opisao prostorno modeliranje podataka šupljikavosti te kartiranje pomoću krigiranja za ležište naftnog polja smještenog u hrvatskom dijelu Panonskoga bazena, tj. u području Savske depresije. Krigeova metoda (krigiranje) istaknuta je kao najprimjerenija interpolacijska tehnika za šupljikavost, ali i druge geološke podatke u pješčenjačkim ležištima miocenske starosti. MALVIĆ & BASTAIĆ (2008) su koristili variogramsku analizu varijabli ležišta. Za primjere su uzeta ležišta polja Stari Gradac i Barcs-Nyugat. Ležišta ova dva polja prikladna su za primjenu „jack-knifing“ metode, koja je za sada opisana i primijenjena u hrvatskoj geologiji isključivo u ovoj analizi. Nadalje, MALVIĆ (2009b) je upotrijebio determinističko-stohastički pristup prilikom računanja determinističke geološke vjerojatnosti za polje Stari Gradac - Barcs Nyugat. Do tada se upotrebljavao deterministički pristup i s obzirom na litologiju ležišta (heterogenost,

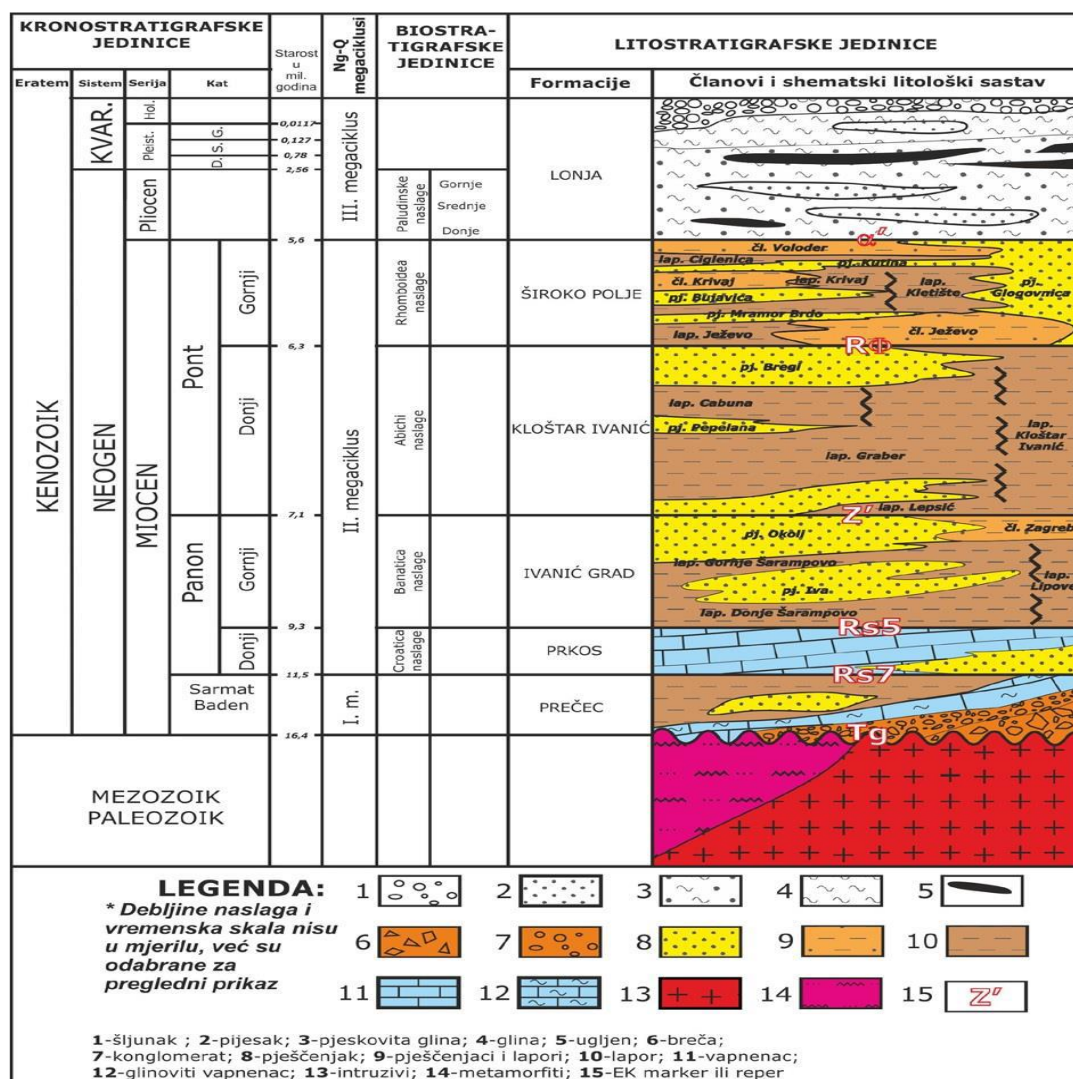
raspucanost ležišta), uz pravilan odabir stohastičkih realizacija dobiva se realni izračun POS-a. MALVIĆ & BALIĆ (2009) su prikazali i objasnili metodu izračuna najčešćih tehnika pri kartiranju: jednostavnoga i običnoga krigiranja i indikatorskoga krigiranja. Objasnen je Lagrangeov multiplikator i njegova optimalna vrijednost pri računanju običnoga krigiranja. MALVIĆ & RUSAN (2009) su opisali metodologiju izračuna geološke vjerojatnosti te rizično neutralnih dolara primijenjenu u Bjelovarskoj subdepresiji. CASTELEYN et al. (2010) su analizirali mogućnost skladištenja CO<sub>2</sub> na primjeru iscrpljenih ležišta i dubokih akvifera Pariškoga bazena, koji su sličnih litologija s dijelom onih u Savskoj depresiji. HÖLZEL et al. (2010) su opisali tektonska zbivanja tijekom donjeg miocena u Bečkom bazenu. MALVIĆ & VELIĆ (2010) su primijenili geomatematičke metode i to variogramsku analizu, sekvencijske Gaussove simulacije i obično krigiranje, a za kartiranje šupljikavosti ležišta plinskoga polja Molve. NOVAK ZELENKA & MALVIĆ (2010) su analizirali ležišta naftno-plinskog polja Kloštar koje se nalazi u Savskoj depresiji, te je napravljena geostatistička analiza. Upotrijebljene su uvjetne sekvencijske Gaussove simulacije, a za sve odabrane varijable odabrani su odgovarajući teorijski variogrami. U radu NOVAK ZELENKA et al. (2010) su analizirani litofacijesi na osnovi karotažnih dijagrama, karata šupljikavosti te konačno, indikatorskih variograma i facijesnih karata indikatorskoga krigiranja. U ovom radu je prvi puta primijenjena metoda indikatorskoga krigiranja u pješčenjačkim ležištima u hrvatskom dijelu Panonskoga bazena. NOVAK ZELENKA & MALVIĆ (2011) su analizirali tri varijable: šupljikavost, dubinu i debljinu ležišta uz korištenje sekvencijske Gauss simulacije (SGS). Primijenjena je metoda na ležištima polja Kloštar u Savskoj depresiji. Prilikom analize korišteno je 100 realizacija po simulaciji. MALVIĆ (2012b) je opisao četiri glavna razdoblja primjene geostatistike. Odabir ležišnih varijabli koje se obično kartiraju geostatistikom najčešće uključuje šupljikavost (s teorijski normalnom razdiobom) te debljinu (s isto takvom razdiobom u posebnim uvjetima). Geostatističke karte predstavljaju najbolje grafičke izlaze za prikaz ležišnih obilježja u slučaju ulaznoga skupa od 20 ili više "čvrstih" (mjerenih) podataka. BAŁA et al. (2012) su statistički analizirali metamorfozirane pješčenjačke u 34 bušotine polja Sêdziszów (Poljska). MALVIĆ (2012a) je opisao taložne okoliše tijekom neogena i kvartara za hrvatski dio Panonskoga bazenskoga sustava. MALVIĆ & JOVIĆ (2012) su metodom kartiranja običnoga krigiranja prikazali cjeloviti razvoj taložnih okoliša i struktura ležišta naftnoga polja Kloštar tijekom neogena i kvartara. CAO et al. (2014) su opisali najčešće geostatističke metode (variogramska analiza, stohastičke simulacije, krigiranje, kokrigiranje) koje se općenito koriste pri opisivanju šupljikavosti i propusnosti ležišta. HUSANOVIĆ & MALVIĆ (2014) su obradili tri najčešće

metode kartiranja. Karta šupljikavosti dobivena metodom inverzne udaljenosti pokazala se najuspješnijom. Ležišta Savske depresije imaju homogen litološki sastav (pješčenjaci), pa je sukladno tome odabir metode kartiranja (obično krigiranje) najprihvatljiviji. NOVAK ZELENKA & MALVIĆ (2014) su primarno za šupljikavost koristili sekvencijske indikatorske simulacije, dok su karte debljina ležišta koristili kao sekundarne (dopunski) izvor podataka. U radu su analizirani šupljikavost i debljina ležišta naftno-plinskoga polja Kloštar. VELIĆ et al. (2015) su u sveučilišnom udžbeniku opisali temeljne postavke kod istraživanja ležišta ugljikovodika, ali i temeljne regionalne značajke takvih ležišta u Sjevernoj Hrvatskoj. MALVIĆ & VELIĆ (2015) su primijenili stohastički model koji se temelji na determinističkom pristupu za izračunavanje POS-a. Model je primijenjen na klastičnim ležištima hrvatskoga dijela Panonskoga bazenskog sustava (HPBS) na dva parametra: pojavi ugljikovodika i vrsti izolatorske stijene. MALVIĆ & MEDUNIĆ (2015) su, također u udžbeniku, obradili geostatističke i statističke alate koji se primjenjuju u geologiji, posebice hrvatskoj. PEEL & BROOKS (2016) su statistički obradili slučajeve primjene geološke vjerojatnosti, a kada ista nije donijela dobitak u istraživanju. Iz takvih rezultata predložili su unaprjeđenja takvoga pristupa i izračuna. ŠPELIĆ et al. (2016) su analizirali podatke iz Bjelovarske subdepresije, te su na vrlo brojnom skupu mjerenja dobivenih pretvorbom karte u točkaste podatke, taj prostor kartirali običnim krigiranjem. MESIĆ KIŠ (2016) je obradila dubinske podatke ležišta naftno-plinskoga polja Šandrovac koje se nalazi u Bjelovarskoj subdepresiji, odnosno u jugozapadnom dijelu Dravske depresije. Interpolacijske metode korištene za prikaz seta podataka, a teoretski obrađene i primijenjene metode u radu su: obično krigiranje, inverzne udaljenosti i pokretne sredine. MESIĆ KIŠ (2017) je primijenila novu tehniku krigiranja geoloških varijabli (dubine) na području HPBS-a. Primijenjena je tehnika univerzalnoga krigiranja te kreiranje općeg modela kartiranja, lokalno na ležištu polja Šandrovac, a regionalno na cijeloj subdepresiji. Napravljena je usporedbe s običnim krigiranjem i metodom Thiessenovih poligona. IVANČIĆ et al. (2018) su opisali geološka zbivanja u miocenu na području slovenskoga dijela Panonskoga bazenskog sustava (bazenu Slovenj Gradeca). MALVIĆ (2018) je opisao primijenjene stohastičke simulacije na donjopontskim ležištima. Opisao je simulacijski algoritam i teoriju stohastičke simulacije, te potreban broj ulaznih podataka za izvršenje simulacije. MALVIĆ et al. (2019a) su opisali metodu ponovljenoga uzorkovanja kod primijene napredne variogramске analize i kartiranja ležišnih varijabli u zapadnom dijelu Savske depresije.

#### 4.1. Osnovne geološke značajke istraživanog područja

Pridobivanje ugljikovodika iz Savske depresije je započelo od 40-ih godina XX. stoljeća. Savska depresija je smještena uz jugozapadni rub Panonskoga bazenskog sustava. Najveće dubine neogensko-kvartarnih sedimenata su u zapadnom dijelu južno od Moslavačke gore, a procijenjene su na više do 5000 m (VELIĆ, 2007). Istraživani zapadni dio Savske depresije je prikazan na **slici 3-1**.

Površina zapadnoga dijela Savske depresije je oko 8000 km<sup>2</sup>, dok je površina okomitih projekcija dosad otkrivenih ležišta ugljikovodika oko 930 km<sup>2</sup>. ŠIMON (1973, 1981) je utvrdio litostratigrafske jedinice u Savskoj depresiji. Tamo postoji šest formacija koje su prikazane na **slici 4-1**.

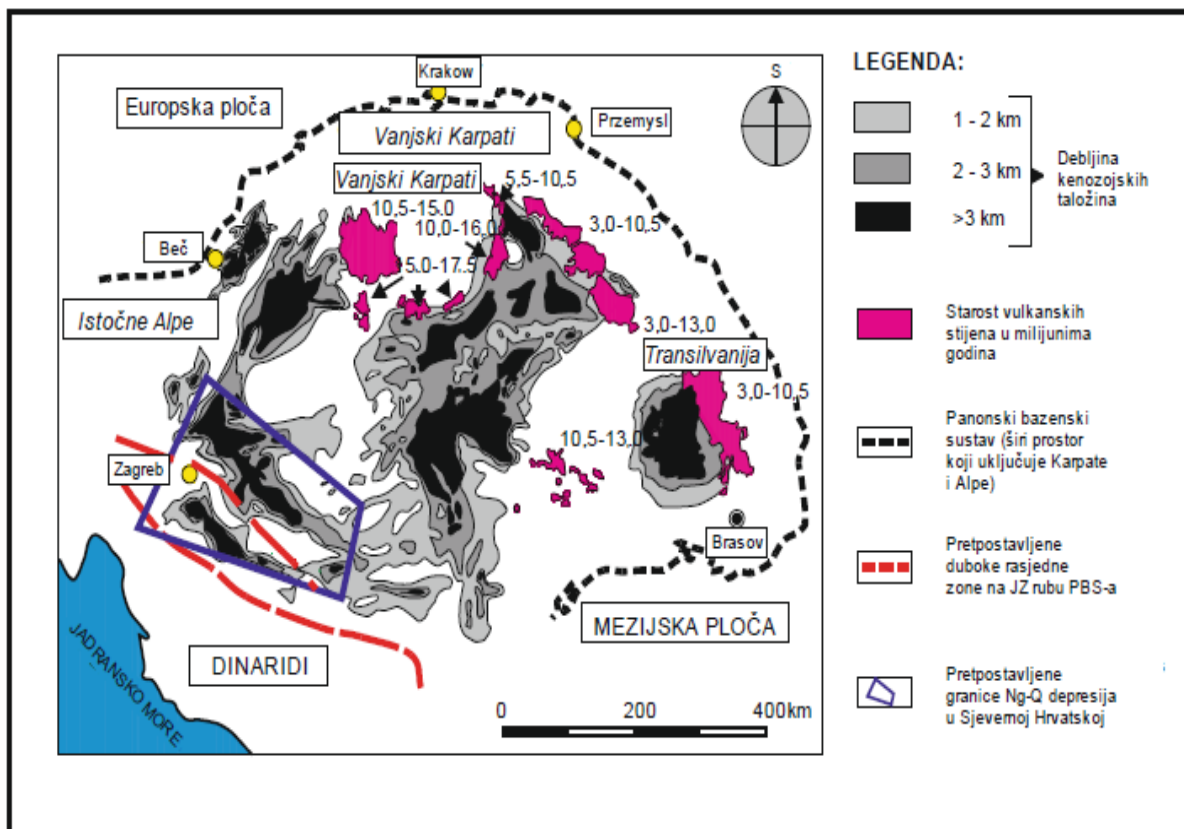


**Slika 4-1.** Kronostratigrafske, biostratigrafske i litostratigrafske jedinice Savske depresije (prilagođeno iz MALVIĆ & CVETKOVIĆ, 2013)



Ležišta ugljikovodika potvrđena su u svim formacijama, osim u najmlađoj formaciji Lonja. Najviše ugljikovodika se pridobilo iz gornjopanonskih i donjopontskih ležišta, na dubinama od 500 do 2300 m (VELIĆ, 2007).

Kako bi se razumio razvoj tipičnoga pješčenjačkoga ležišta neogenske starosti u Sjevernoj Hrvatskoj (hrvatskom dijelu Panonskoga bazenskog sustava, skr. HPBS) ovdje je prikazan, sažeto, taložni model toga prostora. Sam HPBS poseban je prepoznatljivi dio PBS-a kao cjeline, smješten na njegovom jugozapadnom rubu. Površina HPBS-a je nešto veća od 20 000 m<sup>2</sup>. Tektonika je uzrok današnjega oblika i raznolikosti naslaga, te karakterističnoga regionalnoga pružanja struktura sjeverozapad – jugoistok. Također, to je uzrok zašto se danas taj prostor dijeli geološki u četiri regionalne depresije (jedinice II. reda unutar PBS-a, koji je cjelina I. reda): Savsku, Dravsku, Mursku i Slavonsko-srijemsku (slika 4-2).



**Slika 4-2.** Regionalne geološke makrojedinice unutar Panonskoga bazenskog sustava (PBS) (modificirano nakon MALVIĆ 2012a, ROYDEN, 1988)

Kako je položaj depresija HPBS-a uvijek bio na rubu prostora PBS-a, njihov prostor bio je uglavnom prekriven plitkim morskim i jezerskim okolišem, često izoliranim od većih vodenih masa u središnjem dijelu PBS-a. Tako je prostor HPBS-a prekrivalo more Paratetis

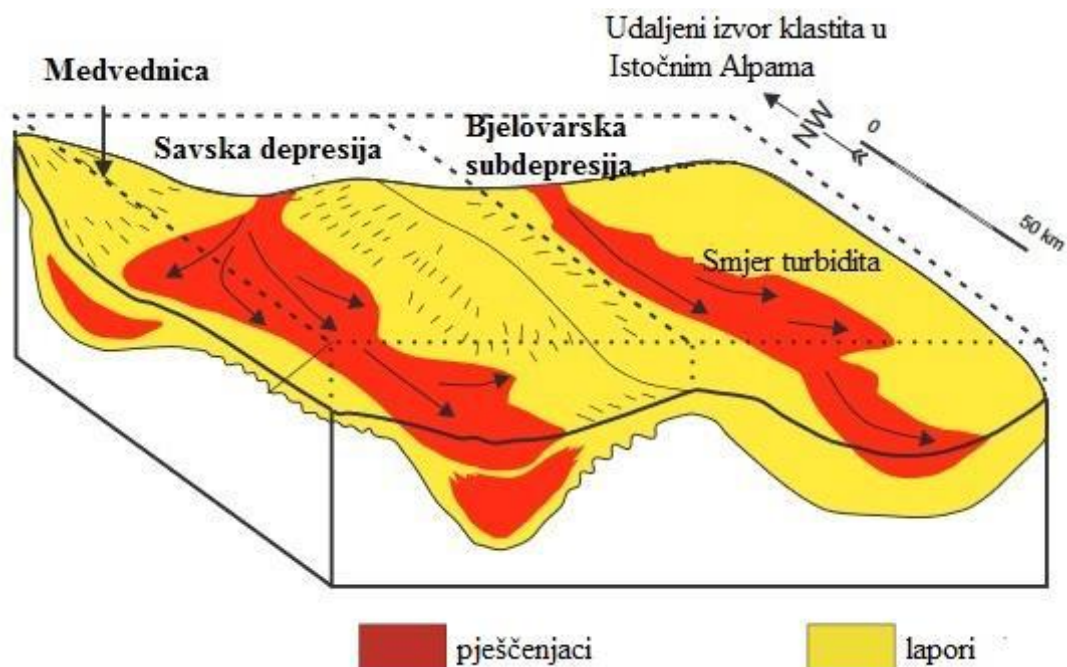
tijekom badena i sarmata (približno prije 16,4-11,5 mil. god.). Slijedilo ga je, regionalno izolirano Panonsko jezero u starijem panonu (11,5-9,3 mil. god.), koje se dezintegriralo tijekom mlađega panona (9,3-7,1 mil. god.) i pontica (7,1-5,7 mil. god.) u niz jezera koja su u jednom trenutku (pliocen) bila spojena u Slavonsko jezero (PAVELIĆ & KOVAČIĆ, 2018). Proces je završen s (i danas) prevladavajućim kontinentalnim okolišima, od mlađega romanija do holocena. Vremenska skala glavnih tektonskih i taložnih razdoblja u neogenu i kvartaru unutar HPBS-a, prikazana je na **slici 4-3**.

starost u milijunima godina																			
19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
otnang		karpat	baden			sarmat		panon rani		panon kasni		pont rani		pont kasni		dacij, romanij		pleistocen, holocen	
moguća djelomična ekstenzija		prva transtenzijska faza			prva transpresijska faza		druga transtenzijska faza				druga transpresijska faza								
		lokalno trošenje stijena s kopna i mehanizam donosa aluvijalnim lepezama			oplicavanje i smanjenje saliniteta		udaljeni klastični izvor materijala i mehanizam donosa turbiditnim strujama				završno strukturno oblikovanje, migracija ugljikovodika, kontinentalni okoliši								

*Slika 4-3. Vremenska skala glavnih tektonskih i taložnih razdoblja u neogenu i kvartaru unutar HPBS-a (iz: MALVIĆ & VELIĆ, 2011)*

Na cijelom prostoru HPBS-a, od badena do mlađega pontica, dominantni su klastični taložni okoliši. U to vrijeme iznimno velike količine pjeskovitoga i siltnoga detritusa prenošene su turbiditnim strujama u taj prostor. U razdobljima kada takve aktivnosti turbiditnih struja nije bilo, taložene su uglavnom različite vrste lapora, kako u morskom tako i jezerskom okolišu. Stoga se lapori smatraju stijenama «mirnoga» okoliša, odnosno okoliša «niske» energije. Takve izmjene detritusa unutar jezera s povremenim iznimno aktivnim turbiditnim strujama opisane su, npr., u MALVIĆ (2012a, **slika 4-4**).





*Slika 4-4. Shematski prikaz regionalnoga jezerskoga okoliša i promjena jezerskih pelitnih i turbiditnih okoliša na granici Savske i Dravske depresije (iz: VRBANAC et al., 2010b; modificirano poslije u: MALVIĆ & VELIĆ, 2011; MALVIĆ, 2012a)*

Posljedica takvih zbivanja su današnja ležišta ugljikovodika otkrivena u gornjopanonskim i donjopantskim pješčenjacima. Sva su ona turbiditnoga podrijetla te su zbog toga litološki izgrađena od nekoliko pješčenjačkih litofacijesa. U središnjim dijelovima ležišnih struktura to su uglavnom pješčenjaci koji su na rubovima potpuno zamijenjeni glinovitim siltitima. Dok su ležišta uglavnom «čisti» pješčenjaci taloženi u središnjim dijelovima struktura (ali i depresija), u kojima dominira najkrupniji, psamitski detritus, u rubnim dijelovima taj isti detritus predstavljen je siltnim, glinovitim pa i laporovitim pješčenjakom. Svi takvi prijelazi imaju veliki odraz u litološkoj heterogenosti ležišta, ali i u sekundarnoj migraciji ugljikovodika te, na kraju, i današnjim režimima pridobivanja te iscrpku.

Nadalje, prema nekim novijim istraživanjima u stratigrafiji miocena Panonskog bazenskog sustava nekadašnji kat pont je zamijenjen podkatom gornjeg panona. Autori PAVELIĆ & KOVAČIĆ (2018) smatraju ovu zamjenu opravdanom jer se vrsta *Paradacna abichi* (koja se smatrala markerom pont; JENKO, 1944) pojavljuje prije pontskih intervala koji su zabilježeni u sjevernom Crnomorskom bazenu (6,04 - 5,60 milijuna godina; KRIJGSMANETAL et al., 2010). U raspravi o današnjoj pripadnosti naslaga pontu gornjemu

panonu, razmišljanja su dvojaka. Prema PAVELIĆU & KOVAČIĆU (2018) trebalo bi prihvatiti tvrdnje autora MANDIĆ et al. (2015) koji naslage Abichi i Rhomboidea svrstavaju u gornji panon. Brojni drugi autori su, najčešće u starijim radovima, opisali litologiju, floru i faunu (i) tih naslaga pa tako i naslage Abichi i Rhomboidea pridijelili donjem i gornjem pontu (npr. KRANJEC & BLAŠKOVIĆ, 1976) ili nisu uopće raspravljali o njihovoj pripadnosti nekome od katova miocena/pliocena (PECIMOTIKA et al., 2015). I u nekim nedavnim radovima (npr. MALVIĆ et al., 2019a,b) pontski kat uredno se koristio za prikaz podataka iz ležišnih sustava unutar Savske depresije.

Kronostratigrafsku podjelu HPBS-a treba svakako usporediti s litostratigrafijom toga prostora, jer su neizostavno i snažno povezane i korelativne. Litostratigrafsku podjelu neogena i kvartara HPBS-a s karakterističnim litološkim sekvencijama prvi je detaljno opisao ŠIMON (1973, 1980). Panonski i pontski sedimenti opisani su na sljedeći način.

Kod gornjopanonskih naslaga lapor se taložio iz visoko koncentriranih suspenzijskih tokova (turbidita) u relativno dubljoj i mirnoj jezerskoj sredini (još uvijek sredini jezera Panon). Litološki se međusobno izmjenjuju pješčenjaci i lapori (npr. VELIĆ, 1980). Starost gornjeg panona dokazana je na temelju determiniranih makrofosila školjke *Congerina banatica*, a opis makrofosila opisan je u radu SREMAC (1981). Gornjopanonske naslage odgovaraju formaciji Ivanić-Grad u Savskoj depresiji. Formacija je omeđena sljedećim EK-markerima Rs5 i Z'. EK-marker Z' je nabušen u 2540 bušotina na prostoru HPBS-a (HERNITZ et al., 2002).

Donjopanonske naslage predstavljene su izmjenom čvrstog glinovitog vapnenca i siltnih lapora (u literaturi se koristio kolokvijalni naziv „bijeli lapori“). Karakteristični fosil je puž *Radix croatica* koji je sastavni dio donjopanonskih Croatica naslaga (JENKO, 1944; SREMAC, 1981). Fosilna asocijacija ukazuje na plitkovodni bočati paleookoliš jezera Panon. Donjopanonske naslage odgovaraju formaciji Prkos u Savskoj depresiji, a formacija se nalazi između EK-markera Rs7 i Rs5 (npr. VELIĆ et al., 2002), a u 585 bušotina je nabušen EK-marker Rs7 tijekom istraživanja i razradbe ležišta HPBS-a (HERNITZ et al., 2002).

Lapori pontskih sedimentnih naslaga su bez vidljive slojevitosti. Nastali su taloženjem mirnijem, manjem, no ponegdje i nešto dubljem, zaštićenom jezerskom prostoru niskog energetskog potencijala. BOŠKOV-ŠTAJNER (1961) kod opisivanja donjopontskih Abichi naslaga istaknula je kako one sadrže 30-65 % kalcijevog karbonata, a BOŠKOV-ŠTAJNER & REŠČEC (1961) opisale su gornjopontske naslage (formacije Široko Polje) Sjeverne Hrvatske. Usporedivi su s facijesom donjopontskih slojeva Abichi prema školjkašu *Paradacna abichi* te gornjopontske Rhomboidea slojeve, prema školjkašu *Congerina*

*rhomboidea*, koji je rasprostranjen u Panonskome bazenskom sustavu (BOŠKOV-ŠTAJNER 1961; BOŠKOV-ŠTAJNER & REŠČEC 1961). Prema OŽEGOVIĆU (1944) slojevi Abichi bi odgovarali srednjem dijelu pontu. Donjopontski sedimenti odgovaraju formaciji Kloštar Ivanić, dok gornjopontski sedimenti odgovaraju formaciji Širko Polje u Savskoj depresiji. EK markeri za donjopontske sedimentne naslage su Z' i R $\phi$ , dok su za gornjopontske sedimentne naslage R $\phi$  i  $\alpha'$ . Granica pontu i paludinskih slojeva prema OŽEGOVIĆU (1944) je vrlo oštra što se može vidjeti završetkom bočatih i početkom slatkovodnih sedimenata.

Pontske i panonske sedimentne naslage razlikuju se po boji i čvrstoći lapora kao i po povećanom udjelu pješčenjaka turbiditskog podrijetla. Također, granice litostratigrafskih granica su jasno određene EK markerima (specifičan izgled krivulje otpornosti na karotažnim dijagramima) koji se mogu pratiti na kilometarskim udaljenostima. Zbog niza ranijih rezultata u regionalnom opisu ugljikovodičnih opisa Savske depresije, vrijedeće i vrlo uporabljive litostratigrafske korelacije u Savskoj depresiji (VELIĆ, 2007), te usporedbe ovih i prethodnih rezultata, unutar ove disertacije zadržana je podjela na panon i pont, pa se pontski kat spominje u rezultatima različitih stratigrafskih analiza.

Naftno-plinska polja „A“ i „B“ nalaze se u hrvatskom dijelu Panonskoga bazenskog sustava (HPBS), tj. u zapadnom dijelu Savske depresije. Istraživana ležišta su u „zreloj“ fazi pridobivanja i na njima su primijenjene sekundarne metode pridobivanja ugljikovodika utiskivanjem slojne vode.

Tipski geološki stup za polja „A“ i „B“, načinjen na temelju bušotinskih podataka iz naslaga do, uključujući, formaciju Kloštar Ivanić prikazan je na **slici 4-5**. Većina bušotina probušila je samo stijene do uključivo formacije Kloštar Ivanić jer su unutar nje dokazana ležišta ugljikovodika, a tek su rijetke nabušile i dublje naslage. Zato je tipski geološki stup ograničen samo do naslaga donjega pontu.

Starost u mil. god.	Kronostratigrafske jedinice		Litostratigrafske jedinice	Litološki stup	Neformalna jedinica ležišta/hidr. jed.
0-5,6	KVARTAR		FORMACIJA LONJA		
	NEOGEN	ROMANIJ			
5,6-6,3		PLIOCEN	DACIJ	FORMACIJA ŠIROKO POLJE	
	GORNJI PONT				
6,3-7,1	MIOCEN	DONJI PONT	FORMACIJA KLOŠTAR IVANIĆ		N
					B
					K
					JL/L

**Legenda:**

- glina
- glinjak s proslojkom lapora
- lapor
- pješčenjak

*Slika 4-5. Tipski geološki stup istraživanoga polja „A“ i „B“, s oznakama formalnih i neformalnih litostratigrafskih jedinica*

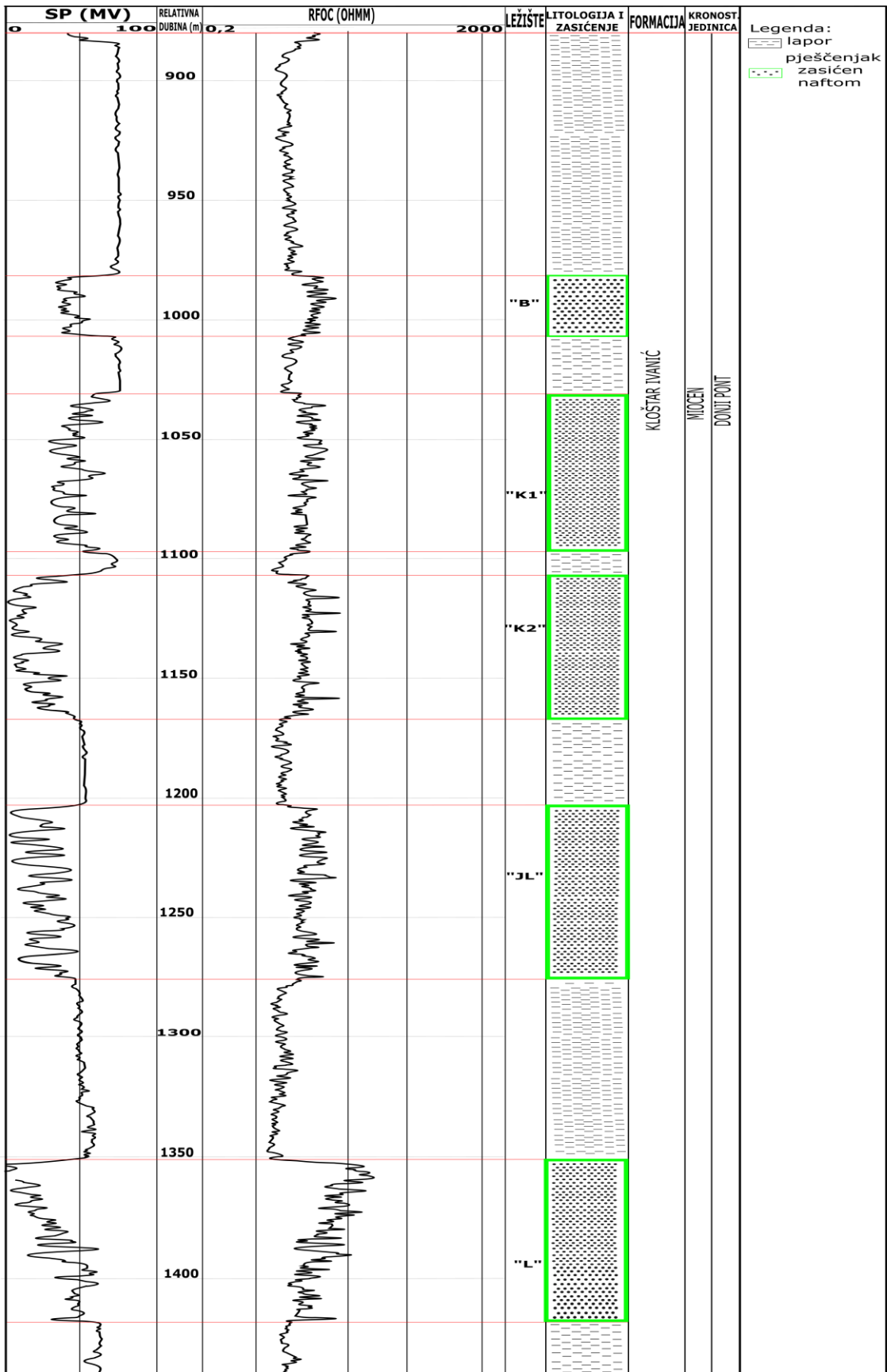
Litološka svojstva donjopontskih naslaga formacije Kloštar Ivanić je dobra sortiranost krupnoklastičnih čestica. U donjem dijelu pojavljuju se uglavnom tvrdi pješčenjaci, koji prema krovinskom dijelu formacije, a posebice u formaciji Široko Polje (gornji pont), postaju slabo vezani, pa čak i sitnozrnati, nevezani pijesci. Lapori ove formacije su sive do sivosmeđe boje, srednje tvrdoće, čija se kompaktnost idući prema krovinskom dijelu smanjuje, a udio glinovite komponente raste. Intervali lapora predstavljaju nepropusne stijene u krovini

svakoga pješčenjačkoga ležišta. Debljina lapora je 30-150 m, dok prosječna debljina pješčenjaka iznosi 20-150 m.

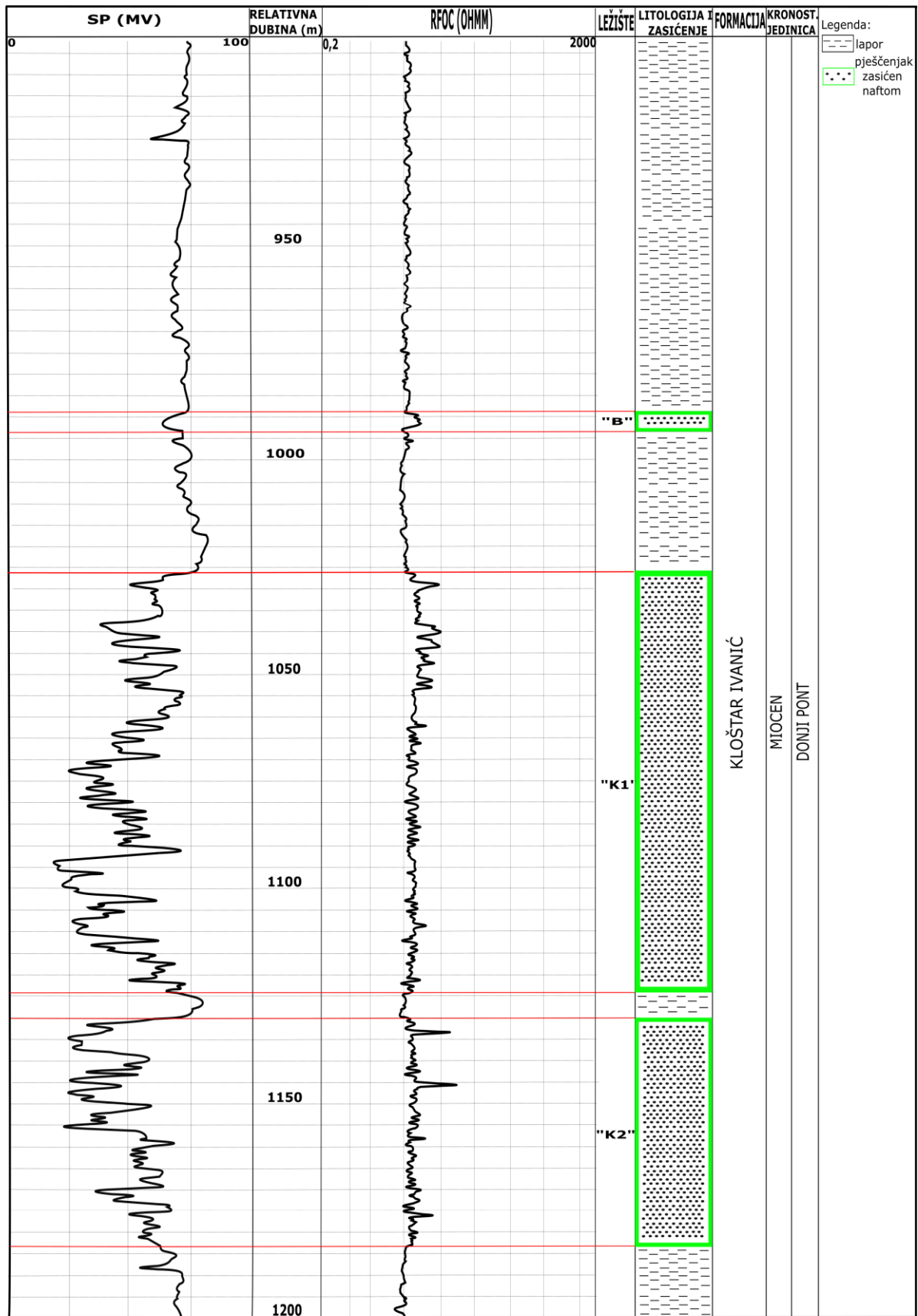
Naslage gornjega ponta su svijetlosivi mekani lapori, prosječne debljine 85 metara. U pliocenu su dokazani slabo vezani pješčenjaci različitih debljina. Te stijene su u izmjeni s manjim ili većim intervalima lapora. Debljina naslaga pliocena je oko 600 m. Kratak geološko, proizvodno, povijesni opis istraživanih ležišta naftno-plinskih polja je dan u sljedećim potpoglavljima.

Kvartarne naslage formacije Lonja su debljine oko 20-30 m. Sastoje se od sivih i smeđesivih glina, ilovače, pijeska i humusa.

Složeni geološki stupovi istraživanih ležišta naftno-plinskih polja „A“ i „B“ prikazani su na **slikama 4-6 i 4-7** i **prilozima 1 i 2** za istraživana ležišta obrađena u sljedećim poglavljima.



Slika 4-6. Složeni geološki istraživanoga polja „A“, s oznakama kronostratigrafskih te formalnih i neformalnih litostratigrafskih jedinica



Slika 4-7. Složeni geološki stup istraživanoga polja „B“, s oznakama kronostratigrafskih te formalnih i neformalnih litostratigrafskih jedinica

## 5. DUBINSKI LEŽIŠNI ODNOSI I PODATCI TE KARTE ODABRANIH LEŽIŠNIH VARIJABLI U POLJU „A“

Varijable koje su se interpolirale u ovom i idućem poglavlju su: šupljikavost, propusnost i utisnuti volumeni vode. Ove tri varijable su najvažnije prilikom optimiziranja i kontrole primjene sekundarnih metoda pridobivanja ugljikovodika. Ograničene skupove predstavljaju i zbirni geološki podatci objedinjeni po bušotinama za (uglavnom) formaciju Kloštar-Ivanić. Oni su prikazani složenim geološkim (karotažno-litološkim) stupovima i korelacijskim profilima. To je jedini način za korektno 1D i 2D prikazivanje regionalnih geoloških odnosa u analiziranim poljima i ležištima. Oni uvijek (geološki stupovi) ili najčešće (korelacijski profili) predstavljaju modelske prikaze objedinjenih podataka, promatrano točkasto u prostoru, unutar granica istraživanja.

Istraživačka bušenja na polju „A“ započela su 1960. godine, a 1962. godine započela su razradna bušenja. Iz donjopontskih pješčenjačkih ležišta se trenutno pridobivaju ugljikovodici. Polje „A“ ima oblik brahiantiklinale pravca pružanja sjeverozapad-jugoistok koja ima u središnjem dijelu dva tjemena. Na području polja utvrđene su sljedeće kronostratigrafske jedinice: srednji miocen, gornji miocen (donji panon, gornji panon, donji pont i gornji pont), pliocen (dacij i romanij) te pleistocen i holocen. Ležišta nafte i plina formirana su u sitno do srednjozrnastim, slabo do čvrsto vezanim kvarceno-tinčastim pješčenjacima. Krovinske stijene pješčenjaka su laporiti koji prema najdubljim ležištima prelaze u kalcitne lapore.

### 5.1. Strukturni odnosi ležišta „L“

Prema klasifikaciji BRODA (1945) ležišta polja „A“, pa tako i ležište „L“ pripadaju skupini slojnih, zasvođenih ležišta, koja su ograničena litološkim i tektonskim ekranom, odnosno kombinacijom oba. Primjer dijela strukturne karte ležišta „L“ dan je u **prilogu 3**, karta efektivne debljine ležišta „L“ prikazana je u **prilogu 4**. Ležišne stijene proslojene su laporima i pjeskovitim laporima u ritmičkoj izmjeni, raznih debljina proslojaka. Ležište „L“ predstavlja veliku hidrodinamičku jedinicu i zbog primjene sekundarnih metoda pridobivanja bit će predmet istraživanja u sljedećim potpoglavljima.



## 5.2. Podatci o granulometrijskom sastavu, šupljikavosti, zasićenju i propusnosti pješčenjaka ležišta „L“

Podatci o granulometrijskom sastavu dobiveni su analizom uzoraka iz jezgri u laboratoriju (sijanje laboratorijskim sitima, mjerenje mikroskopom itsl.), dok je postotak CaCO<sub>3</sub> određen kalcimetrijom. U **tablici 5-1** prikazan je granulometrijski sastav ležišta „L“.

*Tablica 5-1. Granulometrijski sastav ležišta „L“ (iz: \*\*, prilog 3)*

Bušotina	Srednji promjer zrna (mm)	Koeficijent sortiranosti So	Koeficijent asimetrije Sk	Sadržaj pijeska (%)	Sadržaj Krupno-zrnatog silta (%)	Sadržaj gline (%)	Sadržaj CaCO <sub>3</sub> uz granulom. (%)	Sadržaj CaCO <sub>3</sub> (%)	Broj podataka
2	0,095	1,697	0,831	71,5	21	7,5	30,6		3
57	0,282	1,640	1,087	63	47		26,8	22,3	3
83	0,068	1,581	0,938	53	42	5	29	25	28
91	0,074	1,558	0,935	59	38	3	31,8		23
92	0,063	1,546	1,02	54	44	2	29		6
145	0,081	2,31	0,683	59,5	37,5	3	26,5		6
153	0,066	2,135	0,786	50	47,7	2,3	26,5		11

Podatci potvrđuju tipične donjopontske pješčenjake Savske depresije, uz dvije važne vrijednosti geneze pješčenjaka, a posljedično i njihova ležišna svojstva. Prvo je veliki udjel silta, što ove pješčenjake svrstava djelomice u siltne pješčenjake. Taj udjel također utječe negativno na njihova ležišna svojstva, posebice homogenost i izotropnost. Također, veliki udjel kalcitnih čestica unutar matriksa potvrđuju standardni izvorišni model detritusa iz Istočnih Alpa, no ujedno i čini glavni cementacijski materijal u takvim pješčenjacima (kalcitnim), što može imati posljedice na nastanak šupljikavosti otapanjem, ali i smanjenje iste cementiranjem kalcitom

U **tablici 5-2** prikazani su podatci o šupljikavosti ležišta „K“ dobiveni laboratorijskim mjerenjem i/ili interpretacijom karotažnih krivulja (mjerenje otpornosti, krivulje gustoće i neutronska karotaža).

*Tablica 5-2. Laboratorijski i podatci iz karotažnih krivulja o šupljikavosti ležišta „L“ (iz elaborata: \*\*, prilog 3)*

Laboratorijski podatci			Karotažni podatci				Usvojeno	
Bušotina	Broj podataka	$\Phi_{sred}$ dij. jed.	Bušotina	$\Phi_{sred}$		$\Phi_{sred}$		
				Plin dij. jed.	Nafta dij. jed.	Plin dij. jed.	Nafta dij. jed.	
2,5	68	0,247	2,5,7,32,111 $\alpha$ , 119 $\alpha$ , 144, 151, 152	0,19	0,239	0,2	0,239	
			2,5,7,32,111 $\alpha$ , 119 $\alpha$ , 144, 151, 153			0,2	0,239	
			131 $\alpha$ ,153,155,161	0,167	0,156	0,167	0,156	
			27,59,87,87 $\alpha$ ,160				0,197	
8	16	0,235	27,59,87,87 $\alpha$ ,149,160	0,18	0,197	0,189	0,197	
			26,29,43,117	0,201	0,191	0,201	0,191	
			27,59,87,87 $\alpha$ ,160				0,197	
			136 $\alpha$		0,145	0,145	0,145	
			136 $\alpha$		0,145	0,145	0,145	
			31,57,62,156			0,21	0,206	
57,62	29	0,223	57,62,156		0,195	0,206	0,206	
			63		0,121	0,21	0,210	
60,68	223	0,238	4 $\alpha$ ,33 $\beta$ ,37,60,65,65 $\alpha$ ,66,68,123 $\alpha$ ,147	0,166	0,209	0,166	0,214	
			4 $\alpha$ ,33 $\beta$ ,37,60,65 $\alpha$ ,66,68,123,147				0,214	
			79,89,139				0,195	
73,85,145	283	0,223	34 $\beta$ ,73,85,140,145		0,174		0,192	

Iz deset bušotina dobiveni su laboratorijskim mjerenjem vrijednosti šupljikavosti od 0,223 do 0,247 dij. jed. iz 619 podataka. Iz karotažnih mjerenja u 47 bušotina dobivena je vrijednost šupljikavosti od 0,167 do 0,201 dij. jed. za plinsko zasićenje i od 0,145 do 0,239 dij. jed. za naftno zasićenje. Podatci o zasićenju i propusnosti ležišta “L” prikazani su u **tablici 5-3**.

**Tablica 5-3. Laboratorijski i podatci iz karotažnih krivulja o zasićenju i propusnosti ležišta „L“ (iz: \*\*, prilog 3)**

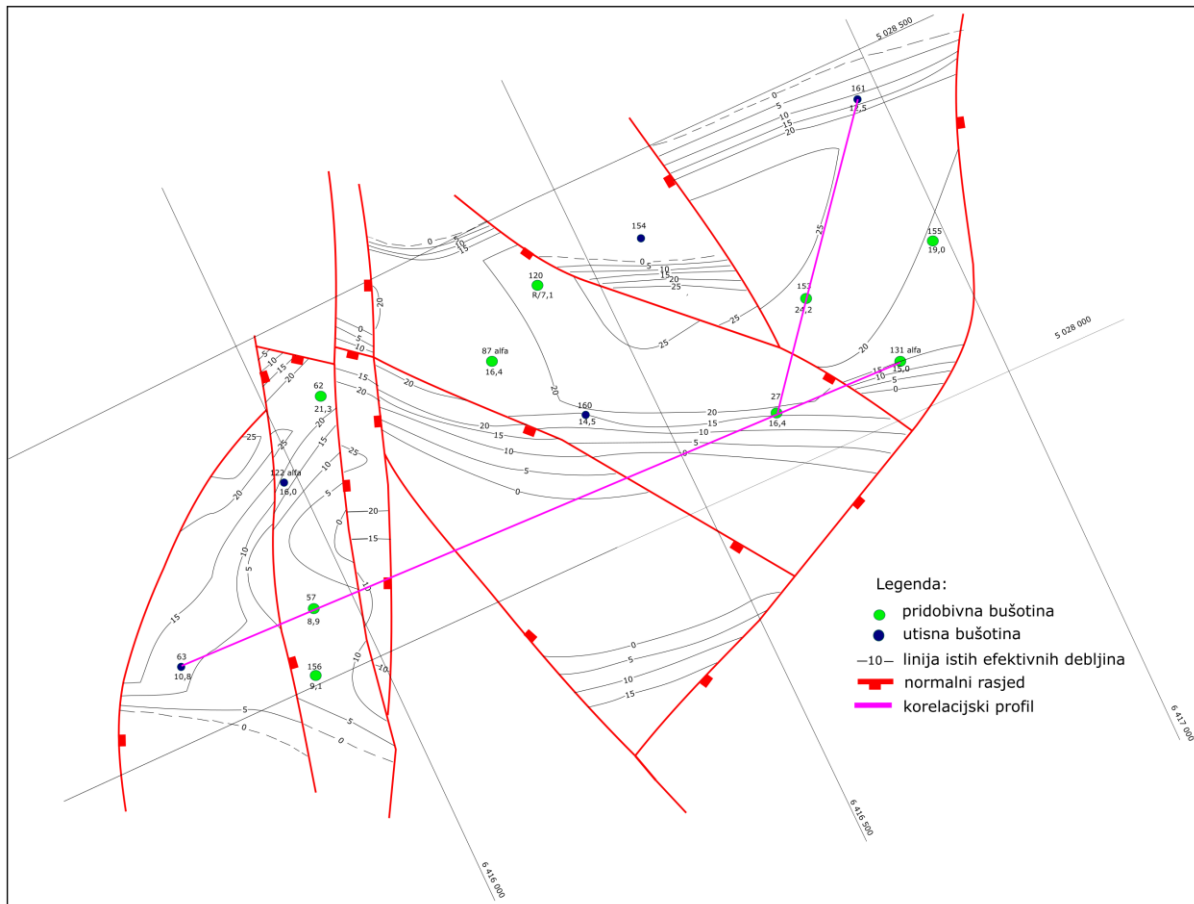
Bušotina	Laboratorijski podatci		Karotažni podatci		Usvojeno		Propusnost ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )		
	Plin	Nafta	Plin	Nafta	Plin	Nafta	Bušotina	Broj podataka	$k_{\text{sred}}$
	$S_g$ dij. jed.	$S_o$ dij. jed.	$S_g$ dij. jed.	$S_o$ dij. jed.	$S_g$ dij. jed.	$S_o$ dij. jed.			
2,5,7,32,111 $\alpha$ , 119 $\alpha$ , 144, 151, 152	0,722	0,606	0,303	0,370	0,71	0,618	2,5	23	8
	0,709	0,610			0,709	0,610			
131 $\alpha$ ,153,155,161	0,712	0,732	0,3	0,365	0,706	0,732			
		0,643				0,643			
27,59,87,87 $\alpha$ ,149,160	0,727	0,746	0,313	0,293	0,707	0,726	8	2	24,2
26,29,43,117	0,742	0,77	0,284	0,276	0,729	0,747			
		0,599				0,599			
136 $\alpha$	0,623	0,746		0,406	0,623	0,746			
	0,68	0,715			0,68	0,715			
	0,573	0,711			0,573	0,711			
57,62,156	0,671	0,697		0,228	0,671	0,697	57,62	3	27
63	657	0,696		0,26	0,657	0,718			
4 $\alpha$ ,37,60,65,65 $\alpha$ ,66,68, 123 $\alpha$ ,147	0,668	0,746	0,375	0,275	0,647	0,736	60,66	92	23,2
		0,77				0,77			
		0,77				0,77			
34 $\beta$ ,73,85,140,145		0,765		0,348		0,765			

Zasićenje ležišta „L“ u 42 bušotine određeno je laboratorijskim mjerenjima, a u njih 36 karotažnim krivuljama. Usvojeno srednje zasićenje za plin je od 0,599 do 0,770 dij. jed., dok je zasićenje naftom 0,573 do 0,716 dij. jed.. Propusnost ležišta „L“ određeno je u sedam bušotina i iznosi od 8 do  $27 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

### 5.3. Prikaz strukturnih odnosa hidrodinamičke jedinice „L“ te njihov odraz u pridobivanju iz te jedinice

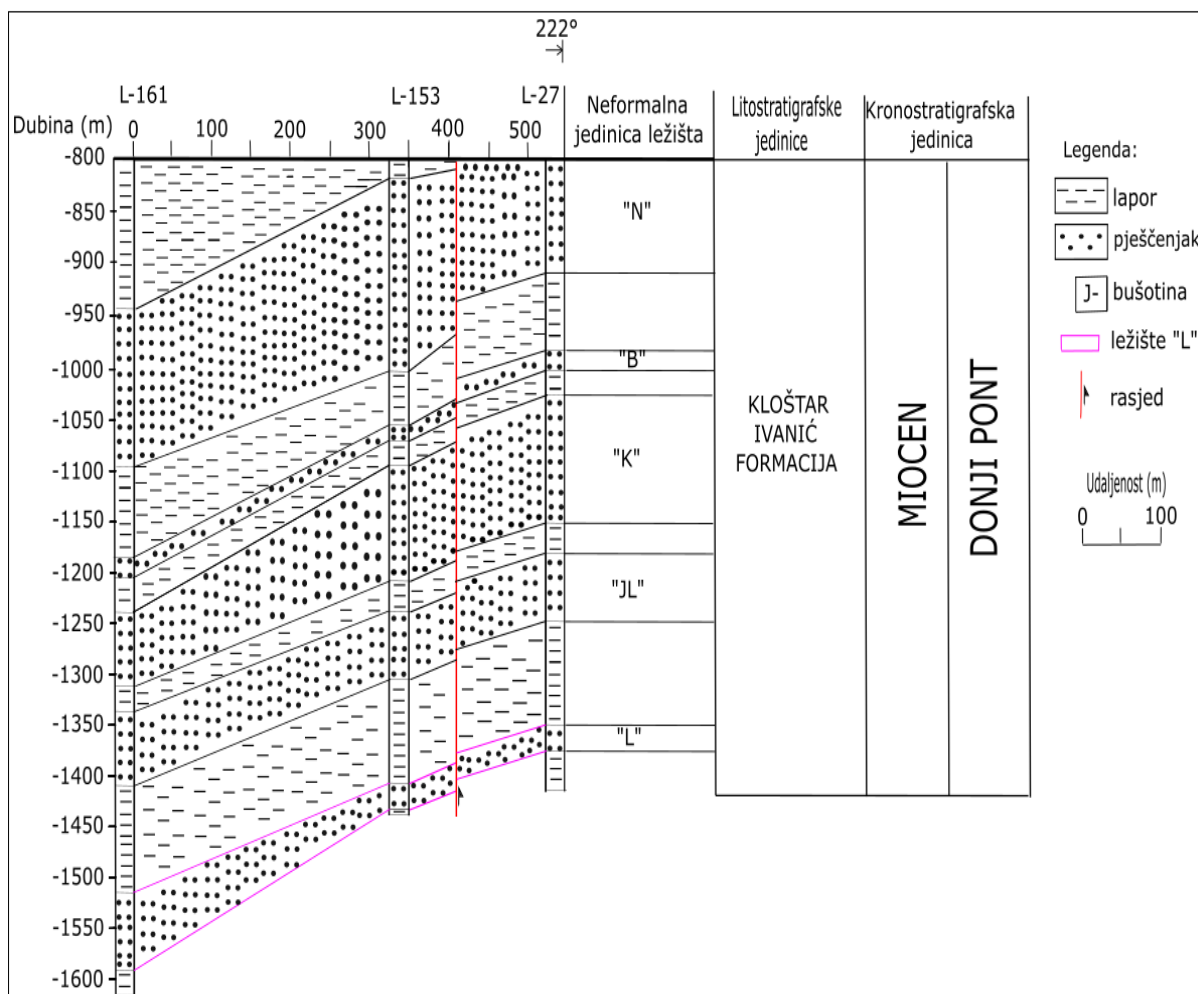
Pridobivanje iz ležišta „L“ započelo je 1962. Energetski režimi iskorištavanja ležišta kroz povijest pridobivanja su kombinacija režima plinske kape, otopljenoga plina, vodonapornoga režima i podržavanja tlaka zavodnjavanjem. Iz ležišta „L“ crpi se iz 22 pridobivne bušotine, a zbog velikoga udjela u rezervama u polja „A“ utiskivanje slojne vode se primjenjuje od 1993. godine uz pomoć 10 utisnih bušotina s ciljem povećavanja iscrpka. Utiskivanje slojne vode se provodi u ležištu „L“ (prilog 3 i 4) naftno-plinskoga polja „A“. Na

karti efektivnih debljina (**slika 5-1**) dijela ležišta „L“ prikazani su korelacijski profili koji su obuhvaćeni analizom.



*Slika 5-1. Dio ležišta „L“ u kojem se podržava ležišni tlak utiskivanjem slojne vode (iz:\*\*)*

Prema **tablici 5-2** usvojena prosječna šupljikavost ležišta za plin je 18,4 %, za naftu 19,7 %, a prema **tablici 5-3** prosječna propusnost ležišta iznosi  $17,5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ . Korelacijski profil L-161 - L-153 - L-27 unutar ležišta „L“ prikazan je na **slici 5-2**.

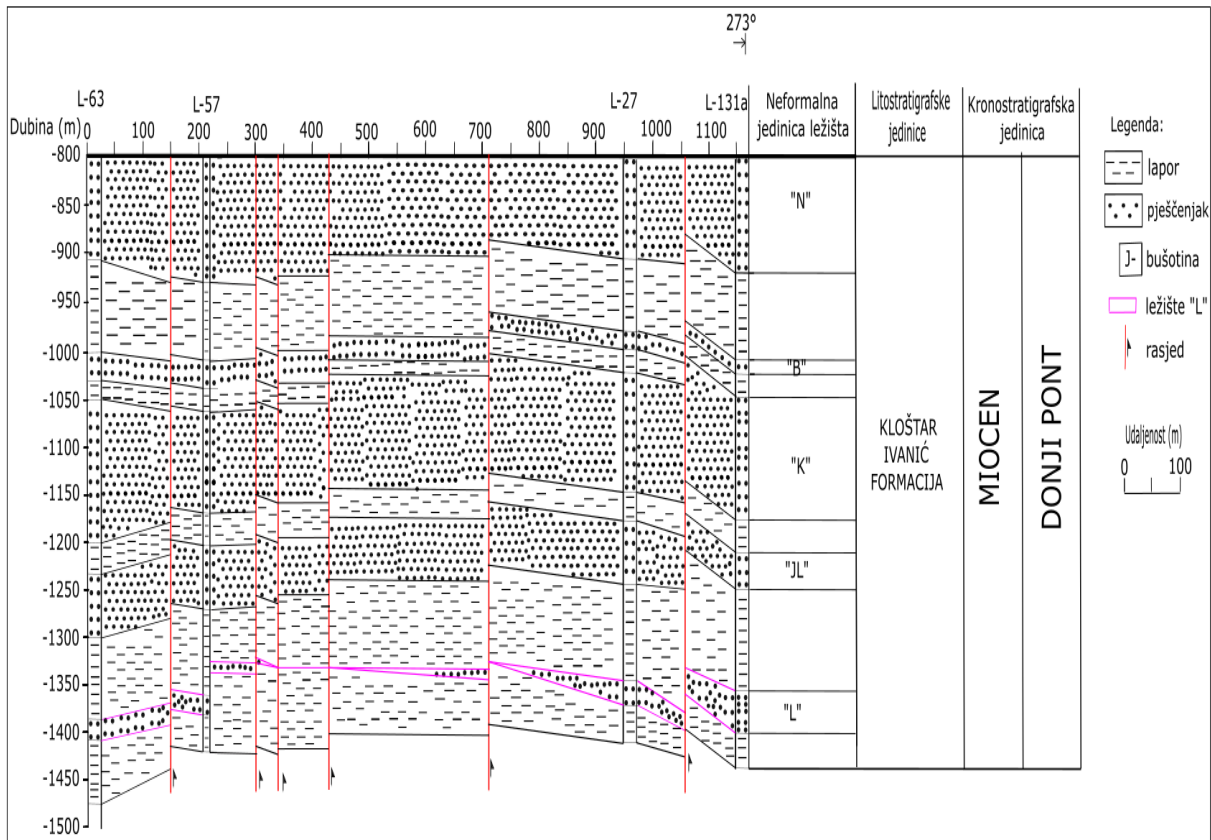


*Slika 5-2. Korelacijski profil L-161 – L-153 - L-27 unutar ležišta „L“*

Iz korelacijskoga profila (**slika 5-2**) zaključeno je sljedeće:

- sličnost u debljini članova formacije Kloštar Ivanić („N“ ležište oko 150 m, „B“ ležište oko 20 m, „K“ ležište prosječno oko 80 m, „JL“ ležište oko 80 m i ležište „L“ prosječno oko 45 m), iako ima promjena u prostoru,
- stanjivanje ležišta „L“ idući od bušotine L-161 (oko 70 m) prema L-153 (oko 20 m).

Korelacijski profil L-63 - L-57 - L-27 - L-131a unutar ležišta „L“ prikazan je na **slici 5-3**.



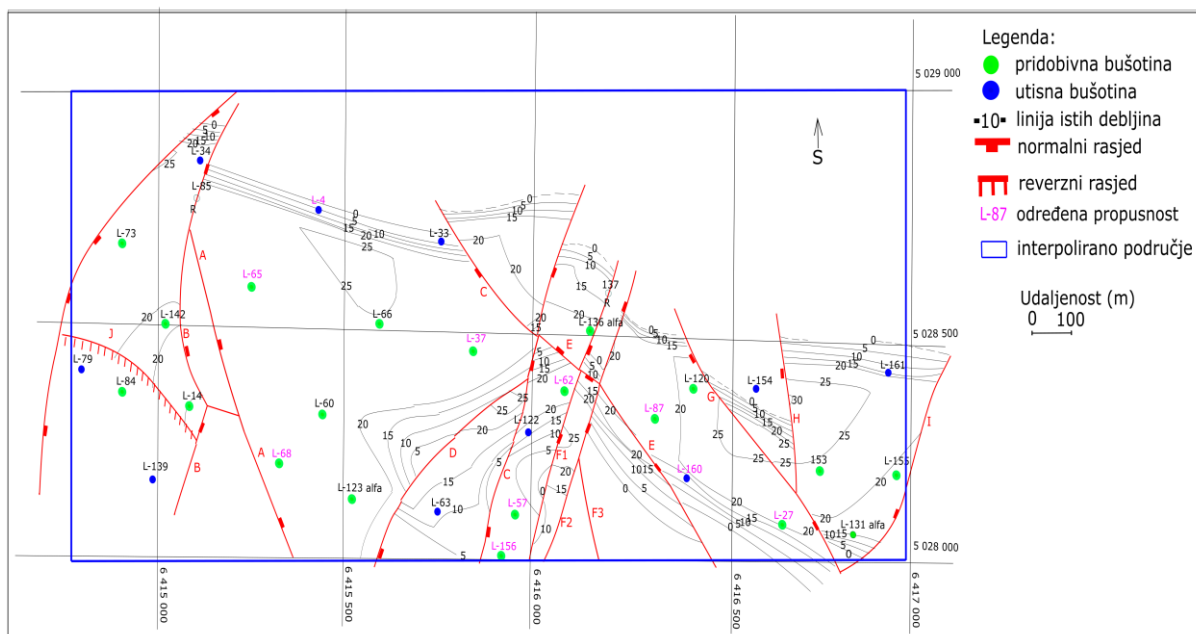
*Slika 5-3. Korelacijski profil L-63 – L-57 – L-27–L-131a unutar ležišta „L“*

Iz korelacijskoga profila (**slika 5-3**) zaključeno je sljedeće:

- sličnost debljine članova formacije Kloštar Ivanić uz varijacije u prostoru,
- ležište „L“ je slične debljine u bušotinama L-63, L-57 i L-27 (oko 20 m), dok se debljina povećava prema bušotini L-131a (oko 30 m).

#### **5.4. Primjena interpolacijskih metoda za ležište „L“**

Interpolacijske metode za mali ulazni skup podataka su primijenjene za kartiranje varijabli propusnosti i utisnutih volumena vode. Područje koje je obuhvaćeno interpolacijom prikazano je na **slici 5-4**.



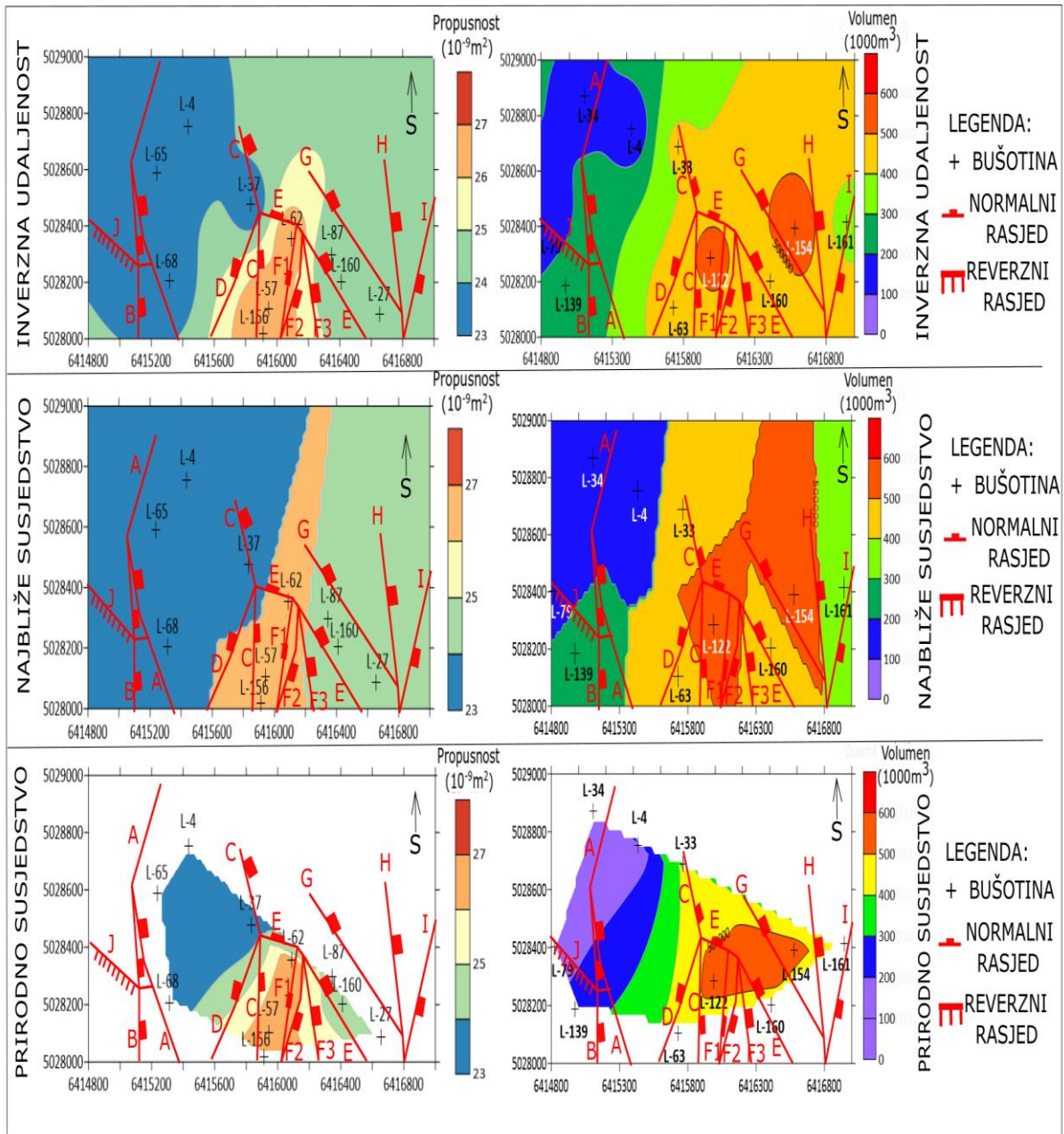
*Slika 5-4. Interpolirano područje (plavo) ležišta „L“*

Interpolirane varijable su vrlo važne pri interpretaciji ležišta i planiranju sekundarnih metoda (utiskivanje slojne vode) pridobivanja ugljikovodika. Propusnost ležišta je određena iz jezgri bušotina u laboratoriju, dok su podaci o utisnutim volumenima uzeti iz proizvodnih podataka tvrtke INA d.d. do 2015. godine. Vrijednosti propusnosti i utisnutih volumena vode su dati u **tablici 5-4**.

*Tablica 5-4. Srednje vrijednosti i ukupni utisni volumeni vode za „L“ ležište*

Bušotine u ležištu “L”	Propusnost ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) (horizontalna srednja vrijednost)
L-27, L-87, L- 160	24,2
L-57, L-62, L-156	27,0
L-4, L-37, L-65, L-68	23,2
Bušotine	Utisni volumen ( $\text{m}^3$ )
L-4	132116
L-33	420251
L-34	167108
L-63	440031
L-79	132352
L-122	535171
L-139	241085
L-154	565872
L-160	467987
L-161	376438

Za izradbu karata korišten je program SURFER 15.0. U dijelu ležišta „L“ postoji deset utisnih bušotina u svrhu ostvarivanja sekundarnih metoda pridobivanja tj. utiskivanja slojne vode. Propusnost ležišta je određena u deset bušotina. Na **slici 5-5** prikazane su karte za varijable propusnost i utisnutih volumena vode dobivene metodom inverzne udaljenosti, najbližeg i prirodnoga susjedstva.



*Slika 5-5. Rezultati interpolacijskih metoda inverzne udaljenosti, najbližeg i prirodnoga susjedstva za ležište „L“ (lijevo-propusnost; desno-utisnuti volumeni)*



Rezultati krosvalidacije za primijenjene interpolacijske metode istraživane varijable ležišta „L“ su prikazani u **tablici 5-5**.

**Tablica 5-5. Rezultati krosvalidacije za „L“ ležište**

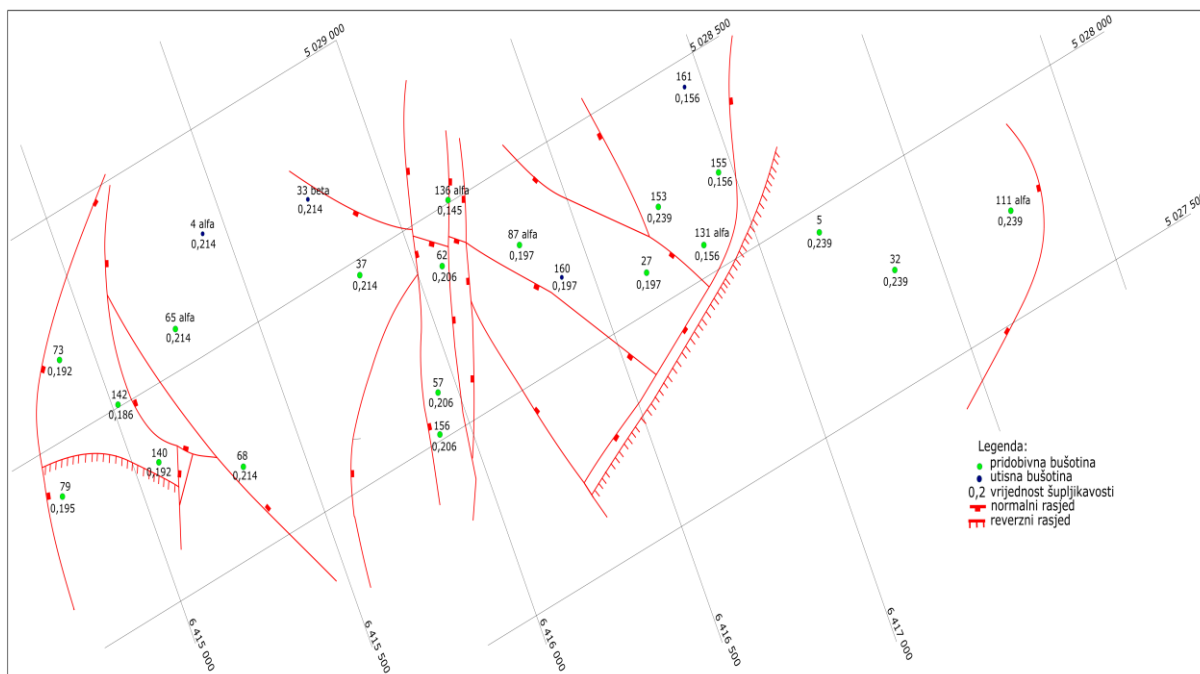
Varijabla	Broj podataka	Vrijednost kros-validacije		
		Inverzne udaljenosti	Najbližega susjedstva	Prirodnoga susjedstva
Utisni volumen	10	$1,21 \cdot 10^{10}$	$2,64 \cdot 10^{10}$	$2,36 \cdot 10^{10}$
Propusnost	10	1,41	2,22	3,48

Prema iznosu krosvalidacije za primijenjene interpolacijske metode, za varijable „Utisnuti volumen“ i „Propusnost“ najprimjerenija interpolirajuća metoda inverzne udaljenosti uz uvjet nepostojanja efekta izražene lokalne vrijednosti.

### **5.5. Variogramaska analiza i primjena metode običnoga krigiranja šupljikavosti u ležištu „L“**

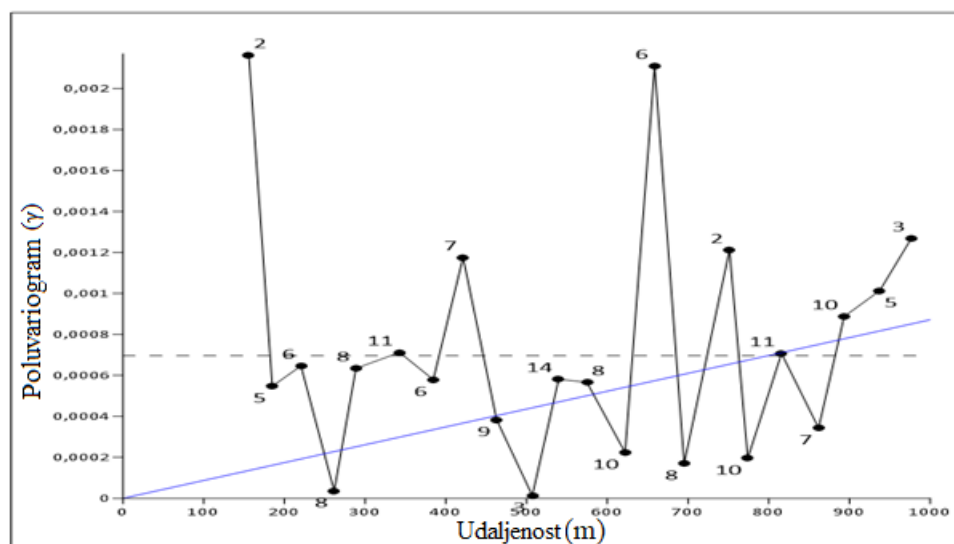
Uz kartiranje utisnutih količina načinjene su i nove karte šupljikavosti za odabrana ležišta. Na taj način utisnute količine moguće je usporediti ne samo sa strukturnim kartama, već i ležišnom šupljikavošću kao najvažnijom ležišnom varijablom koja je proistekla iz njegova litološkoga sastava i dubine.

Podatci o šupljikavosti su za pojedine bušotine izmjerene u laboratoriju i/ili očitane iz karotažnih krivulja. Za ležište „L“ vrijednost šupljikavosti je određena u 25 bušotina (**slika 5-6**).



*Slika 5-6. Vrijednost šupljikavosti za ležište „L“ (iz:\*\*)*

Kako se može vidjeti iz **slike 5-6** vrijednost šupljikavosti ranije je aproksimirana u bušotinama kao jedinstvena u većini blokova. Iz toga razloga bilo je potrebno za ovo ležište izraditi nove karte šupljikavosti. Odlučeno je uporabiti krigiranje kao dokazano najprimjereniju metodu kartiranja varijabli gornjomiocenskih ležišta ugljikovodika Sjeverne Hrvatske (npr. MALVIĆ (2008a), NOVAK ZELENICA et al. (2010), NOVAK ZELENICA (2012), MESIĆ KIŠ (2017)). Eksperimentalni variogram šupljikavosti ležišta „L“ prikazan je na **slici 5-7**.

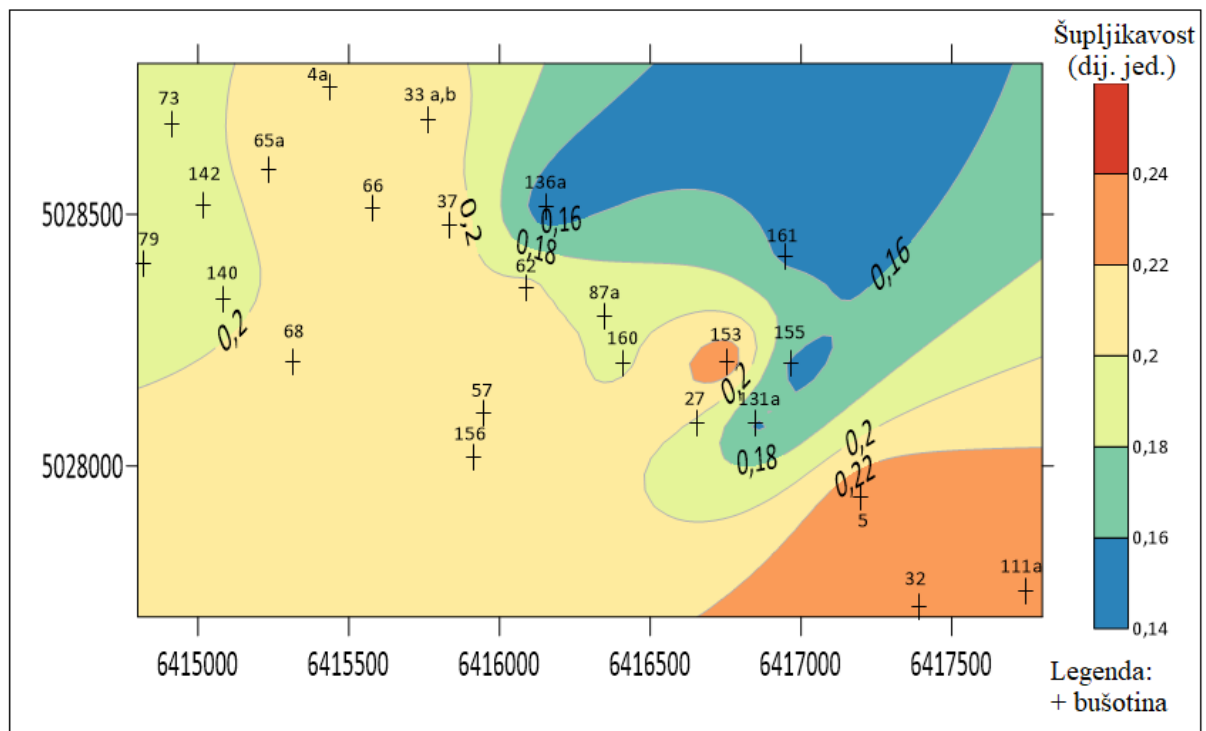


*Slika 5-7. Eksperimentalni variogram šupljikavosti ležišta „L“*

Vrijednosti očitane iz eksperimentalnoga variograma šupljikavosti ležišta „L“ (slika 5-7):

- prag ili varijanca iznosi 0,0007,
- doseg iznosi 180,
- odstupanja nema,
- aproksimacija s linearnim modelom.

Iz linearnoga modela variograma (slika 5-7) dobivena je karta šupljikavosti metodom običnoga krigriranja (slika 5-8). Nažalost, variogram je obilježen vrlo velikim oscilacijama tako da je aproksimacija bilo kojim modelom vrlo nesigurna i ispravnost odabira krigriranja moguće je provjeriti tek usporedbom krosvalidacije rezultata više metoda. Također, kod aproksimacije poluvariograma zanemarana je prva eksperimentalna točka zbog maloga broja parova podataka i iznimno velikoga odstupanja.

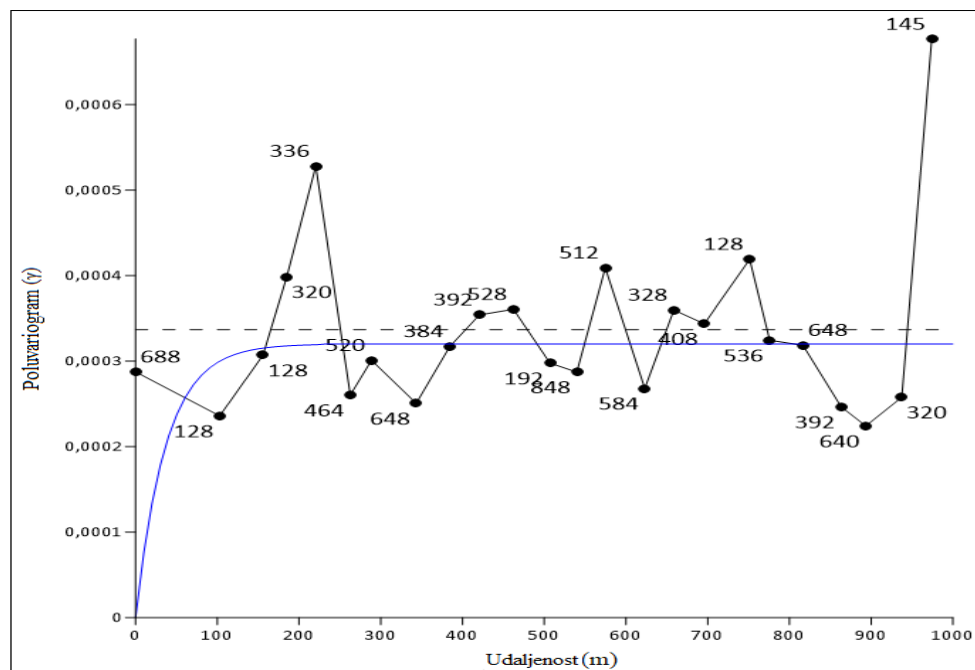


*Slika 5-8. Prostorni raspored šupljikavosti ležišta „L“ dobiven običnim krigriranjem iz eksperimentalnoga variograma*

Vrijednost krosvalidacije za dobivenu kartu (slika 5-8) iznosi 0,000676. Međutim, variogramski model je vrlo nepravilan, s oscilacijama koje počinju već od prve eksperimentalne točke. Stoga je njegova aproksimacija načinjena linearnim modelom te je bilo upitno predstavlja li takva karta bolje rješenje od onih dobivenih inverznom udaljenošću.

Kako bi se dobio pouzdaniji variogramski model, broj podataka «umjetno» je povećan uporabom metode ponovnoga uzrokovanja.

Unaprijeđeni variogramski model pomoću metode ponovnoga uzrokovanja prikazan je na **slici 5-9**. Takav model znatno je smanjio oscilacije kod prvih nekoliko točaka, te, uz zanemarivanje prve, je aproksimiran eksponencijalnim modelom.

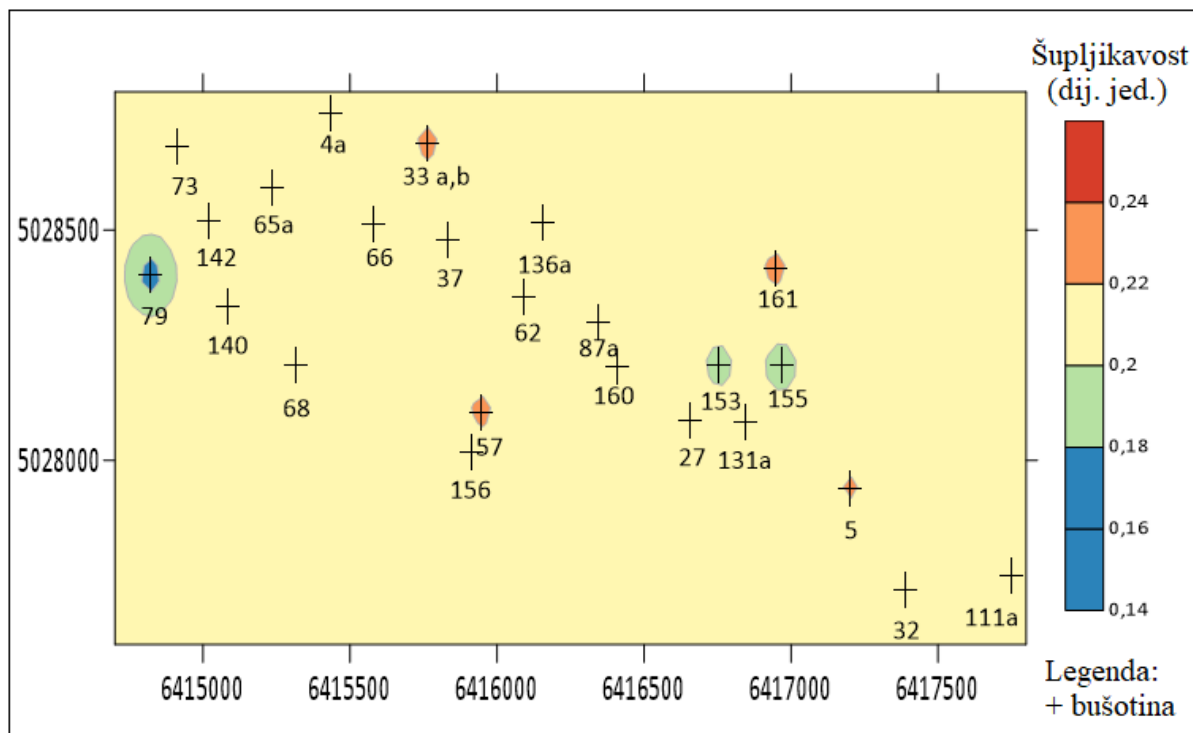


*Slika 5-9. Eksperimentalni variogram dobiven nakon primjene metode ponovnoga uzrokovanja*

Novo variogramski skup podataka je veći od prvobitnoga (**slika 5-7**) što se može vidjeti iz **slike 5-9**. Vrijednosti su ponovno očitane iz eksperimentalnoga variograma šupljikavosti ležišta „L“ (**slika 5-9**) i glase:

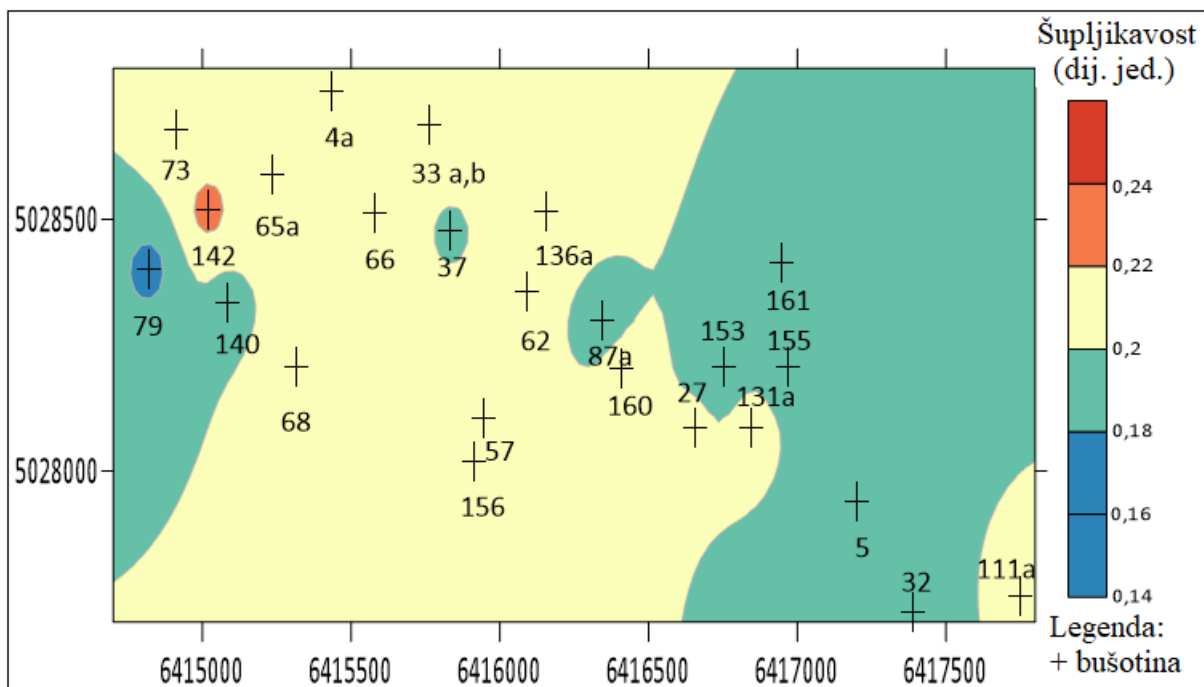
- prag ili varijanca 0,00034,
- doseg 170,
- odstupanje 0,00029,
- aproksimacija s eksponencijalnim modelom.

Iz eksponencijalnoga modela variograma (**slika 5-9**) dobivena je karta metodom običnoga krigiranja (**slika 5-10**).



**Slika 5-10.** Prostorni raspored šupljikavosti ležišta „L“ dobiven običnim krigiranjem iz eksperimentalnoga variograma nakon metode ponovnoga uzrokovanja

Vrijednost krosvalidacije za dobivenu kartu (**slika 5-10**) iznosi 0,000420. Ona je niža od one za prethodno krigiranje, a dobivena karta ima razvijene „vrlo lokalne“ vrijednosti (tzv. engl. *bull-eyes*) što nije prihvatljivo. Stoga je ovo primjer kada jednostavnija metoda inverzne udaljenosti daje znatno bolji rezultat nego krigiranje. Iako je broj podataka bio veći od deset, variogramski model nije bio pouzdan. Male razlike u vrijednostima šupljikavosti te nepravilan raspored bušotina znatno se bolje aproksimiraju jednostavnijom interpolacijskom formulom, pa je karta šupljikavosti ležišta „L“ načinjena inverznom udaljenošću (**slika 5-11**).



*Slika 5-11. Prostorni raspored šupljikavosti ležišta „L“ dobiven metodom inverzne udaljenosti iz eksperimentalnoga variograma nakon metode ponovnog uzrokovanja*

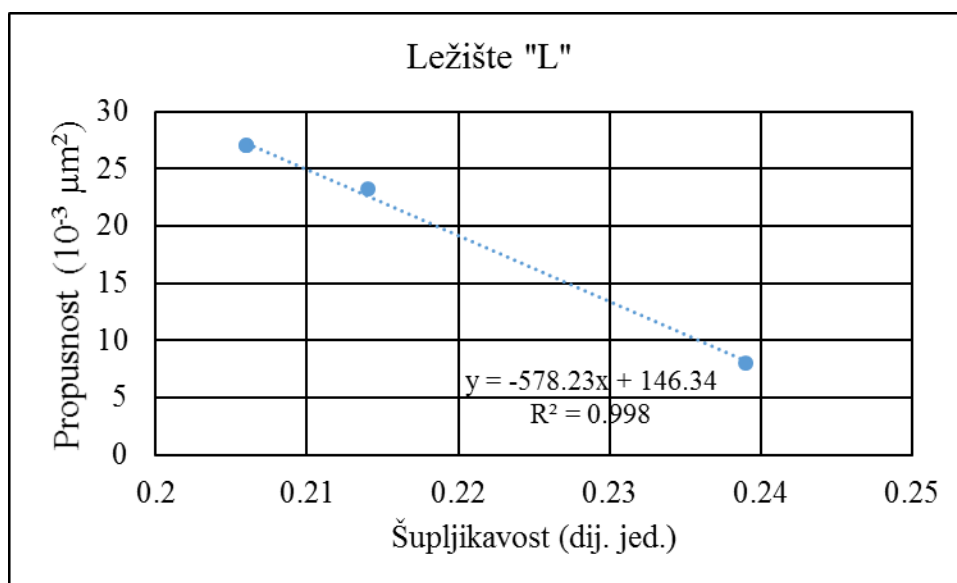
### 5.6. Korelacija šupljikavosti i propusnosti ležišta „L“

Šupljikavost i propusnost uglavnom nisu u izravnoj linearnoj vezi. Ona se može ponekad iskazati jakom linearnom vezom tek nakon što se podatci propusnosti prikažu na log-normalnoj skali, odnosno logaritamski transformiraju. To se provodi nad svakim pojedinačnim podatkom koji poprima novu vrijednost ( $t_2 = \log t_1$ ). Transformacija se najčešće radi zbog normalizacija podataka, stabilizacija varijance te postizanja linearnoga odnosa (korelacije) dviju varijabli. Podatci šupljikavosti i propusnosti za ležište „L“ (iz **tablica 5-2** i **5-3**) prikazani su u **tablici 5-6**. Nije načinjena logaritamska transformacija propusnosti.

*Tablica 5-6. Šupljikavost i propusnost ležišta „L“*

Ležište "L"	Šupljikavost (dij. jed.)	0,239	0,206	0,214
	Propusnost ( $10^{-3} \text{ m}^3$ )	8	27	23,2

Rezultati izračuna linearne korelacije i grafički prikaz šupljikavosti i propusnosti ležišta „L“ prikazani su na **slici 5-12**.



*Slika 5-12. Odnosi šupljikavosti i propusnosti za ležište „L“*

Koeficijent linearne korelacije ( $r$ ) za ležište „L“ iznosi 0,99, što označava jaku linearnu ovisnost. Dijelom je rezultat očekivan zbog samo 3 para podataka, pa je i raspršenje bilo nezatno. Postojane te veze bilo je opisano i u laboratorijsko-karotažnim računima, a ovdje je tek utvrđen mogući numerički iznos te veze.

Pad propusnosti s porastom šupljikavosti objašnjen je zapunjavanjem pornoga prostora sitnim detritusom silta i gline. Veće su pore jače zapunjene pelitnim česticama, a može se pretpostaviti i otapanje te rekristalizacija utjecajem slojne vode ležišta “L”. Veza šupljikavosti i propusnosti u pješčenjacima gotovo uvijek postoji, no rijetko linearna, jer porast vrijednosti jedne varijable neće u jednakom omjeru uvećati/smanjiti vrijednosti druge varijable, ali će ju uglavnom prouzročiti.

Kako je spomenuto, Spearmanov koeficijent koristi se kada ne postoji jasan linearan odnos između dviju varijabli. Stoga ovdje nisu uspoređene njihove izvorne vrijednosti, već su one rangirane i uspoređene. Takav pristup već je ranije uporabljen u istraživanju ležišta ugljikovodika HPBS, u ležištu naftnog polja Beničanci za odnos amplitude i šupljikavosti, a izračunata korelacija je iznosila -0,64 što predstavlja dobru korelacijsku ovisnost (MALVIĆ & PRSKALO 2010). Izračunati rangovi za propusnosti i šupljikavosti ležišta „L“ prikazani su u **tablici 5-7**.

**Tablica 5-7.** Izračunati rangovi Spearmanovoga koeficijenta ležišta „L“

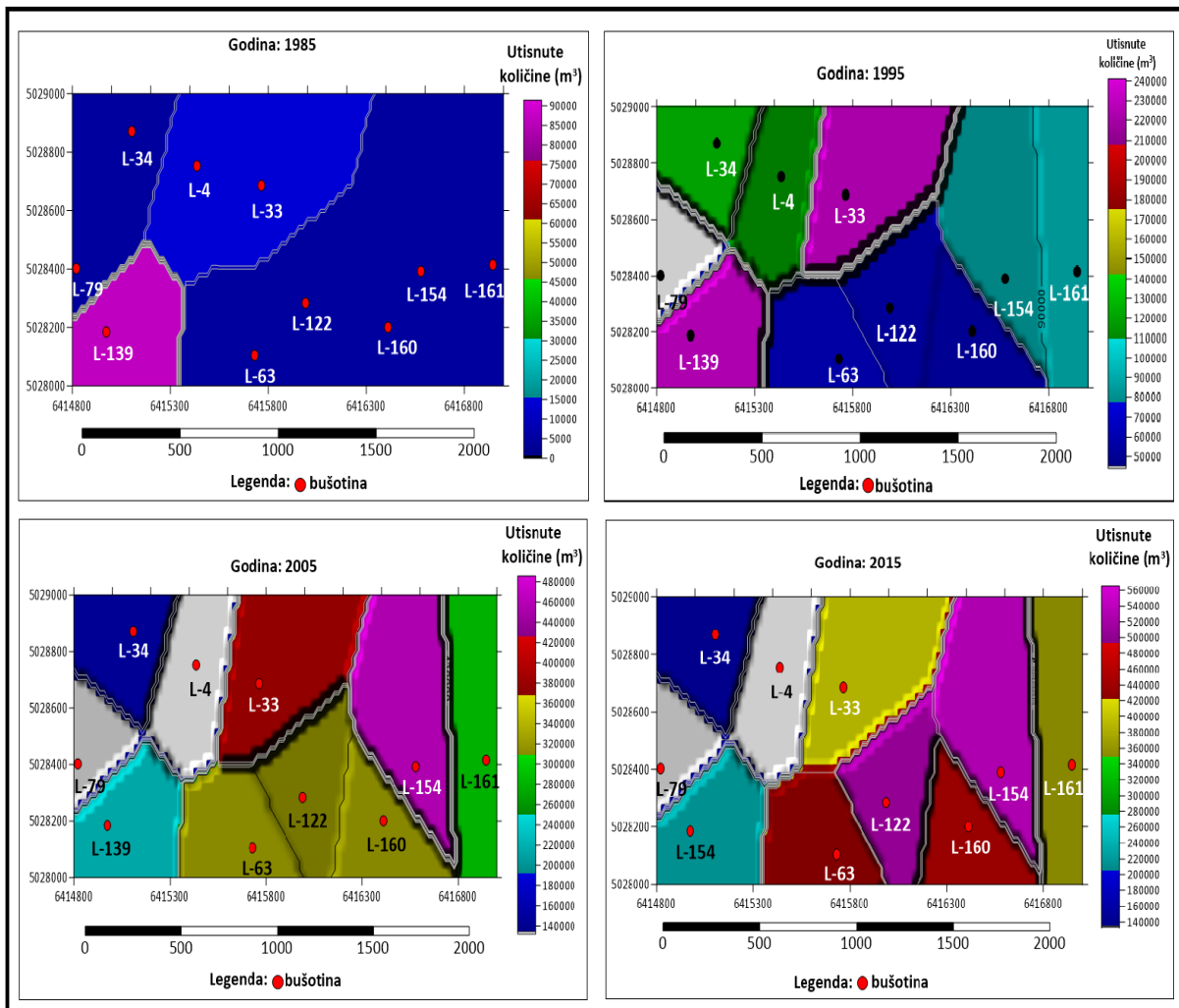
Ležište "L"	Šupljikavost (dij. jed.)	0,239	0,206	0,214
	Rang	1	3	2
	Propusnost ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	8	27	23,2
	Rang	4	1	3

Za odnos šupljikavosti i propusnosti ležišta „L“ iznos Spearmanovoga koeficijenta je -0,80. Ovaj rezultat potvrđuje prethodni dobiveni linearni koeficijent korelacije, tj. vezu. Čak što više, on je puno primjereniji u ovom slučaju kada nismo sigurni predstavljaju li petrofizikalne vrijednosti, tj. skup dostupnih podataka, njihov reprezentativni skup, a zbog premaloga broja podataka.

### **5.7. Zavodnjavanje ležišta „L“**

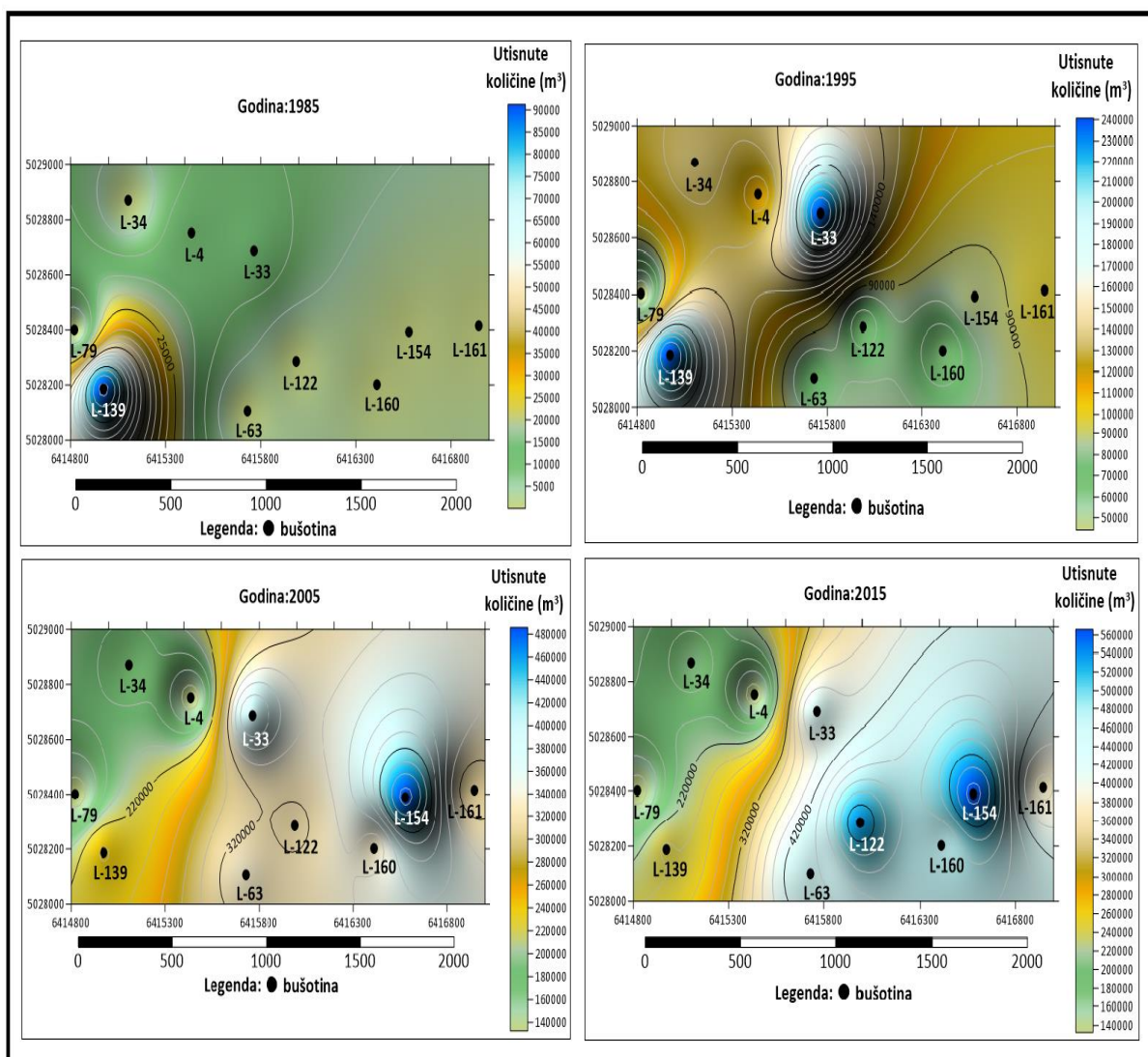
Metode koje su primijenjene za kartiranje utisnutih količina su: najbližeg susjedstva i inverzne udaljenosti, a karte su izrađene u programu SURFER 15.0. Podatci o utisnutim količinama su prikupljeni za razdoblje od 1985. do 2015. godine te su za to razdoblje napravljene karte utisnutih količina. Na **slici 5-13** prikazane su karte utisnutih količina vode dobivenih metodom najbližeg susjedstva.





*Slika 5-13. Karta utisnutih količina vode dobivena metodom najbližeg susjedstva (IVŠINOVIĆ, 2018b)*

Karta dobivena metodom najbližeg susjedstva rezultirala je poligonima (zonama) iz ulaznih podataka ležišta, što je i odlika ove metode. U razdoblju utiskivanja slojne vode, može se primijetiti kako su se u pojedinim bušotinama količine utisnute vode značajno povećale, ali izgled poligona nije se promijenio od prvobitnih poligona, već su se mijenjale boje sukladno utisnutim količinama. Prednosti ove metode kartiranja su dobivanje grube slike širenja vodne fronte u kartiranom prostoru, odnosno poligoni oslikavaju maksimalni doseg vode iz pojedine utisne bušotine, a doseg može biti spriječen nepropusnom rasjednom zonom ili promjenom litoloških svojstava ležišta ili bloka što se vidi prema nelinearnim granicama poligona. Nedostatak ove metode je nepostojanje prijelazne zone između pojedinih poligona. Na **slici 5-14** prikazane su karte utisnutih količina vode dobivenih metodom inverzne udaljenosti.

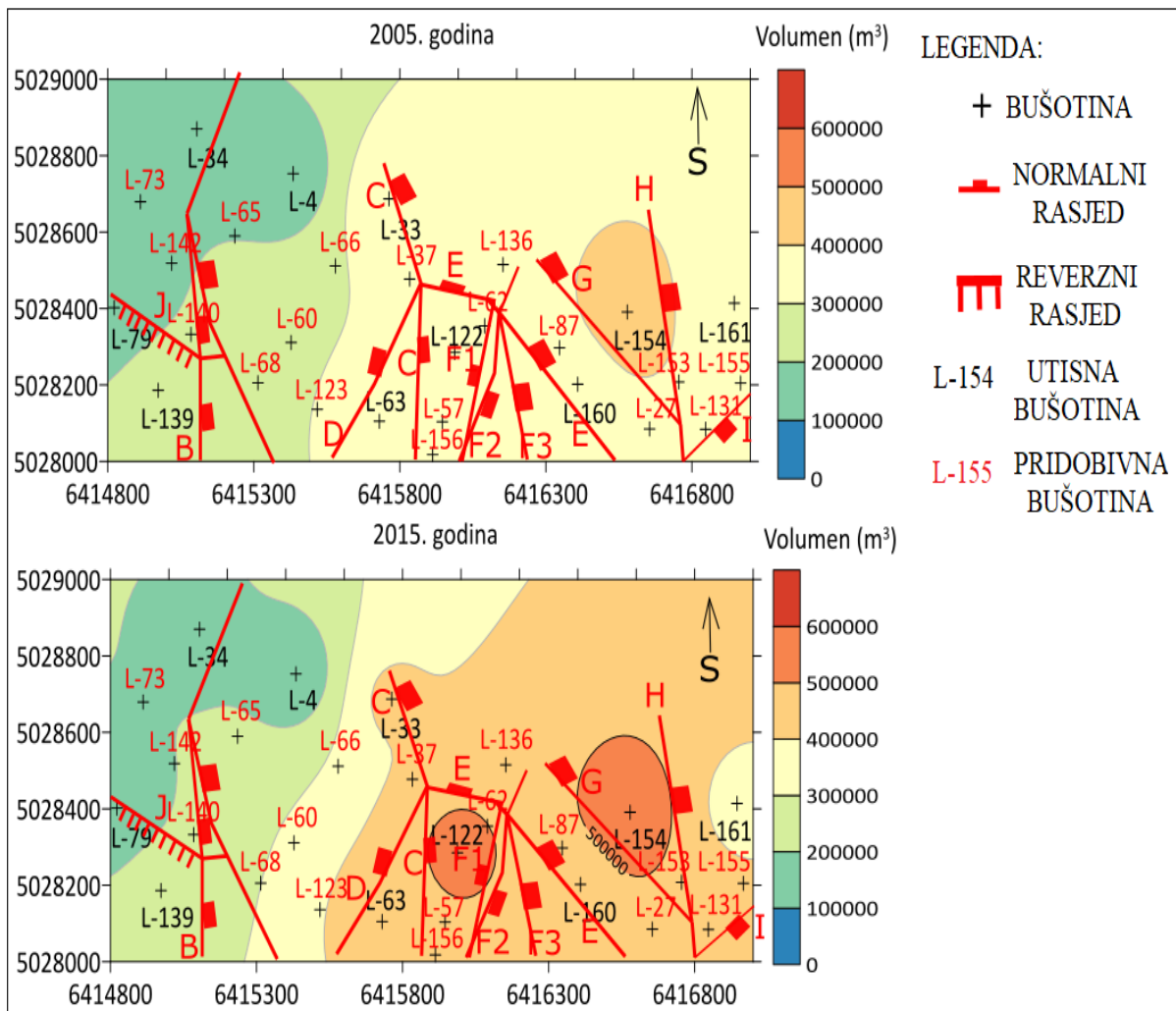


*Slika 5-14. Karta utisnih količina vode dobivena metodom inverzne udaljenosti (IVŠINOVIĆ, 2018b)*

Karte dobivene metodom inverzne udaljenosti prikazale su jasno širenje vodene fronte kroz kartirani prostor promjenom boje. Tijekom dužeg vremenskoga razdoblja utiskivanja slojne vode može se primijetiti kako su utisnute količine istočnoga dijela kartiranoga prostora manje, dok su u zapadnom dijelu veće, te se može zaključiti kako se litološka svojstva mijenjaju s istoka na zapad kartiranoga područja ili postojanje većeg broja rasjeda koji su nepropusni ili slabo propusni. Prijelazne zone mogu se interpretirati kao promjena litoloških svojstava unutar kartiranoga prostora, ili u slučaju male ili gotovo nikakve prijelazne zone na mogućnost postojanja nepropusnoga rasjeda.

Na **slici 5-15** je prikazano zavodnjavanje ležišta „L“ u razdoblju od deset godina (2005.-2015.), karta je interpolirana metodom inverzne udaljenosti. Tijekom promatranoga

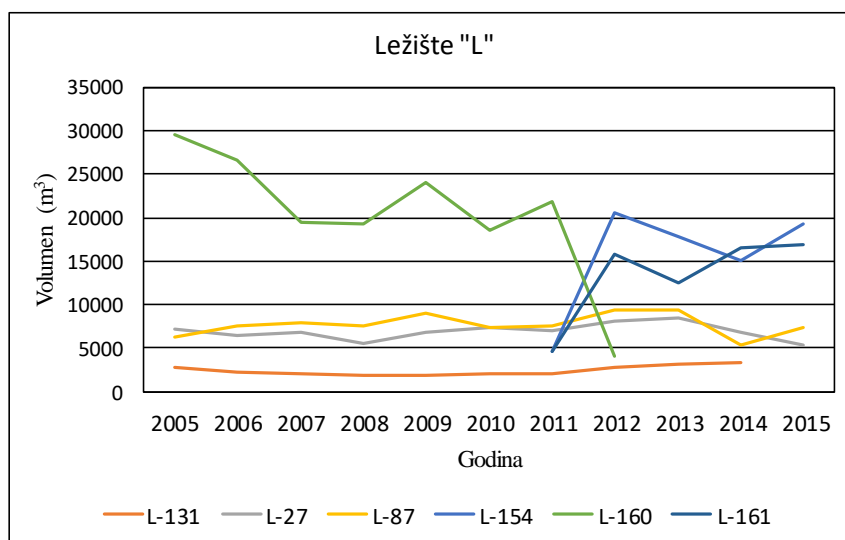
razdoblja slojna voda se utiskivala u deset bušotina, dok se kapljevina (nafta i slojna voda) pridobivala u šesnaest bušotina.



**Slika 5-15.** Količine vode ležišta „L“ kumulativno utisnute u razdoblju od 2005. do 2015. godine

Utiskivanje slojne vode je bilo kontinuirano sukladno dostupnim volumenima slojne vode (izdvojenim iz kapljevine), rad utisnih bušotina je bio reguliran, a posljedično time i rad pridobivnih bušotina. Prema **slici 5-15** tijekom promatranoga razdoblja zavodnjavanje je bilo veće na istočnom dijelu ležišta „L“, što je bilo za očekivati prema rezultatima kartiranja vrijednosti šupljikavosti (**slika 5-8, 5-10 i 5-11**) i propusnosti (**slika 5-5**). Na zapadnom dijelu ležišta to je bilo manje izraženo zbog litoloških svojstava ležišta. Za promatrano razdoblje u zapadnom dijelu ležišta za pridobivne bušotine L-27, L-87 i L-131 i utisne bušotine L-154,

L-160 i L-161 na **slici 5-16** prikazani su utisnuti volumeni i pridobiveni volumeni kapljevine iz navedenih bušotina.



*Slika 5-16. Usporedba utisnutih volumena i pridobivenih količina kapljevine za bušotinu L-27, L-87, L-131, L-154, L-160 i L-161 ležišta „L“*

Odaziv u povećanju kapljevine je vidljiv na svim pridobivnim bušotinama što se može vidjeti na **slikama 5-15 i 5-16**. Može se vidjeti kako je na pridobivnoj bušotini L-87 nakon izvjesnoga vremena došlo do pada pridobivene kapljevine, nakon prestanka utiskivanja slojne vode u utisnoj bušotini L-160. Također, takav isti trend se može primijetiti između pridobivne bušotine L-131 i utisne bušotine L-161. Zavodnjavanje ovoga dijela i cijeloga ležišta je uspješno jer se postigao odaziv u povećanju kapljevine u pridobivnim bušotinama. Naravno, utisnute količine i pridobivene količine kapljevine su uvjetovane geološkim varijablama ležišta što je opisano, prikazano i objašnjeno u prethodnim poglavljima za ležište „L“.

## 6. DUBINSKI LEŽIŠNI ODNOSI I PODATCI TE KARTE LEŽIŠNIH VARIJABLI U POLJU „B“

Prve istraživačke bušotine na polju „B“ su izrađene 1961. godine, dok se intenzivno razradno bušenje odvijalo u razdoblju od 1970. do 1971. godine. Iz donjopontskih pješčenjačkih ležišta se trenutačno pridobivaju ugljikovodici. Stratigrafski slijed stijena u polju „B“ je: miocen (donji panon, gornji panon, donji pont, gornji pont), pliocena, holocena i pleistocena. Strukturni oblik ležišta polja „B“ čini brahiantiklinala pravca pružanja sjeverozapad-jugoistok. Karakteristika njenoga oblika su brojna uzdignuća i uleguća, pa je izgledom nalik antiklinoriju. Struktura je ispresijecana brojnim normalnim rasjedima čiji skok je od 20 do 200 m. U ležištima polja „B“ utvrđeno je zasićenje ugljikovodicima u ležištima formiranim u naslagama pliocenske i miocenske starosti. Ležišne stijene su srednje do čvrsto vezani kvarcno-tinjčasti pješčenjaci. Oni su mjestimice proslojeni srednje tvrdim, a blizu krovine i mekanim, pjeskovitim, laporom. Dubine zalijeganja ležišta zasićenih ugljikovodicima kreću se od 1000 do 2000 m.

### 6.1. Strukturni odnosi ležišta „K“

Cilj analize bilo je najveće ležište polja, neformalno nazvano „K“. Ujedno bi se mogla smatrati ekvivalentom formalnoj litostratigrafskoj jedinici ranga sloja. Ležište „K“ pripada tipu slojevitih nadsvođenih ležišta u kombinaciji s tektonskim ekranom.

Prema dosadašnjim rezultatima izučavanja strukturnih i ležišnih odnosa smatra se da tektonski blokovi u većini slučajeva predstavljaju zasebne strukturno-tektonske zamke, gdje je u najvišim dijelovima došlo do nakupljanja ugljikovodika. Stoga oni predstavljaju zasebne hidrodinamičke jedinice. Ležište „K“ se sastoji od više hidrodinamičkih jedinica. Prikaz efektivnih debljina ležišta „K“ dan je u **prilogu 5**. Svaki od kartiranih volumena predstavlja zasebnu hidrodinamičku jedinicu, a predmet izučavanja je jedinica „K1“ (**prilog 6** (plavo)).

### 6.2. Podatci o granulometrijskom sastavu, šupljikavosti, zasićenju i propusnosti pješčenjaka ležišta „K“

Donjopontska ležišta, pa tako i ono „K“ i prethodni istraživani „L“, čine sitnozrnati, tinjčasti pješčenjaci. U **tablici 6-1** prikazan je granulometrijski sastav ležišta „K“.

**Tablica 6-1. Granulometrijski sastav ležišta „K“ (iz:\*)**

Bušotina	Srednji promjer zrna Md	Koeficijent sortiranosti So	Koeficijent asimetrije Sk	Sadržaj pijeska (%)	Sadržaj sitnoga silta (%)	Sadržaj gline (%)	Sadržaj CaCO <sub>3</sub> uz granulom. (%)	Broj podataka
25	0,071	1,560	1,239	56	44	0	30,1	14
31	0,101	1,430	0,980	76	24	0	28,4	4
33	0,099	1,660	1,100	75	25	0	35,4	1
45	0,094	1,496	1,445	85	15	0	28,8	1
55	0,094	1,461	1,172	77	23	0	27,6	41
57	0,037	1,564	1,251	28	72	0	20,4	2
59	0,095	1,460	1,150	79	21	0	27,0	15
68	0,098	1,530	1,300	53	21	0	28,7	1
120	0,065	1,167	1,044	72	47	0	31,2	18

Podatci ukazuju na tipične donjopontske pješčenjake Savske depresije, kao i u slučaju ležišta „L“, jer imaju sličnu genezu i ležišna svojstva pješčenjaka (udio silta, homogenost, izotropnost, izvorišni detritus itsl.).

U **tablici 6-2** prikazani su podatci o šupljikavosti ležišta „K“ dobiveni laboratorijskim mjerenjem i/ili interpretacijom karotažnih krivulja (mjerenje otpornosti, krivulje gustoće i neutronska karotaža). Usprkos relativno velikom udjelu siltnih čestica u pješčenjaku, šupljikavost ležišta uglavnom je veća od 20 % i s nekoliko postotaka varira unutar ležišta, tj. dijelova zasićenim plinom ili naftom. Takva raspodjela ukazuje na to kako su sitnije arenitne, te pelitne čestice raspršene unutar pješčenjaka nepravilno, tj. heterogeno. Iz toga se može zaključiti kako postoje zone manje propusnosti unutar ležišta, što ima posljedice kod planiranja crpljenja i pridobivanja fluida (i to negativne, jer se režim mora kontinuirano prilagođavati trenutačnom stanju, a posljedično s time i mijenja se mreža zavodnjavanja).

**Tablica 6-2. Laboratorijski i podatci iz karotažnih krivulja o šupljikavosti ležišta „K“ (iz elaborata:\*)**

Laboratorijski podatci			Podatci iz karotažnih krivulja			Usvojeno	
Bušotina	Broj podataka	$\Phi_{\text{sred}}$ dij. jed.	Bušotina	$\Phi_{\text{sred}}$		$\Phi_{\text{sred}}$	
				Plin dij. jed.	Nafta dij. jed.	Plin dij. jed.	Nafta dij. jed.
			2	0,226	0,207	0,226	0,207
			16,28,100,176 $\alpha$	0,231	0,238	0,231	0,238
			43,67,82,159,164		0,249		0,249
			163,165 $\beta$		0,225		0,225
			169	0,182		0,182	
			120,171,172	0,233		0,233	
25,168	40	0,315	25,101,102,148,149,162,166,167,168,169,173,174		0,217		0,224
120	16	0,272	120,158,170,171,172	0,217	0,223	0,217	0,230
			87		0,227		0,227
			Kz-32		0,183		0,183

Iz triju bušotina dobiveni su laboratorijski mjerenjem vrijednosti šupljikavosti od 0,272 do 0,315 dij. jed. Iz karotažnih mjerenja u 36 bušotina dobivena je vrijednost šupljikavosti od 0,182 do 0,223 dij. jed. za plinsko zasićenje i od 0,183 do 0,249 dij. jed. za naftno zasićenje. Na temelju podataka iz **tablice 6-2** bilo je moguće izračunati podatke o zasićenju i propusnosti u ležištu „K“, te su prikazani u **tablici 6-3**.

**Tablica 6-3. Laboratorijski i podatci iz karotažnih krivulja o zasićenju i propusnosti ležišta „K“ (iz:\*)**

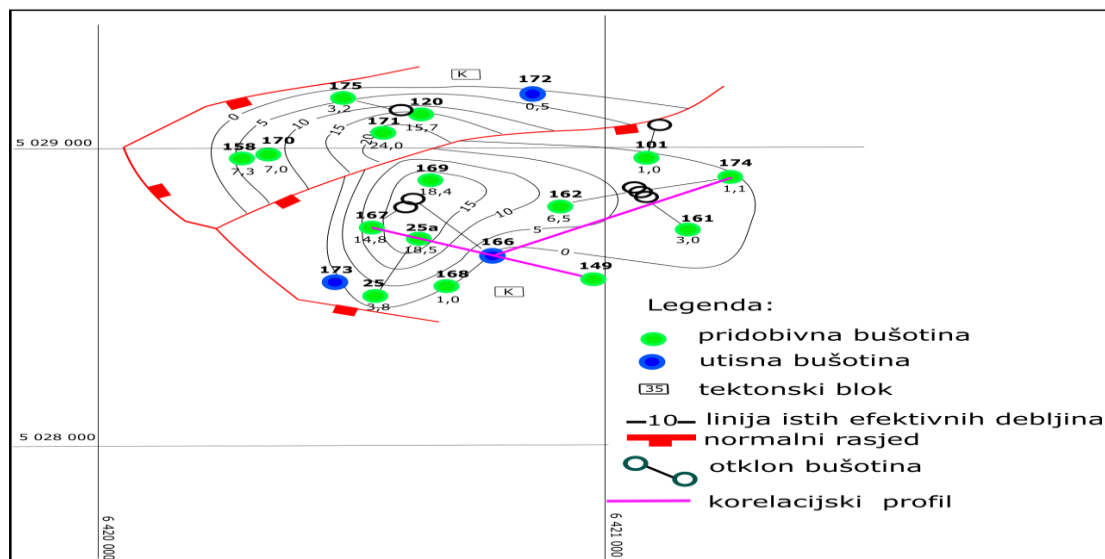
Bušotina	Laboratorijski podatci		Podatci iz karotažnih krivulja		Usvojeno		Propusnost ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )		
	Plin	Nafta	Plin	Nafta	Plin	Nafta	Bušotina	Broj podataka	$k_{\text{sred}}$
	$S_g$ dij. jed.	$S_o$ dij. jed.	$S_g$ dij. jed.	$S_o$ dij. jed.	$S_g$ dij. jed.	$S_o$ dij. jed.			
2	0,736	0,528	0,320	0,300	0,708	0,528			
16,28,100,176 $\alpha$	0,737	0,650	0,299	0,436	0,719	0,650			
43,67,82,159,164		0,642		0,368		0,637			
163,165 $\beta$		0,660		0,480		0,660			
169			0,295		0,705				
120,171,172			0,205		0,795				
25,101,102,148,149,162,166,167,168,169,173,174		0,649		0,418	0,725	0,649	25,168	11	121,2
120,158,170,171,172,175	0,721	0,656		0,445	0,693	0,656	120	12	29,6
87		0,685				0,685			
32		0,716		0,483		0,716			

Zasićenje ležišta „K“ u 32 bušotine određeno je laboratorijskim mjerenjima, a u njih 36 karotažnim krivuljama. Usvojeno srednje zasićenje za plin je od 0,693 do 0,795 dij. jed., dok je zasićenje naftom 0,528 do 0,716 dij. jed..

Propusnost ležišta „K“ određena je u tri bušotine i iznosi od 29,6 do  $121,2 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ . Srednje efektivna debljina ležišta „K“ za plin iznosi 9,02 m, a naftu 10,01 m.

### 6.3. Prikaz strukturnih odnosa hidrodinamičke jedinice „K1“ te njihov odraz u pridobivanju iz te jedinice

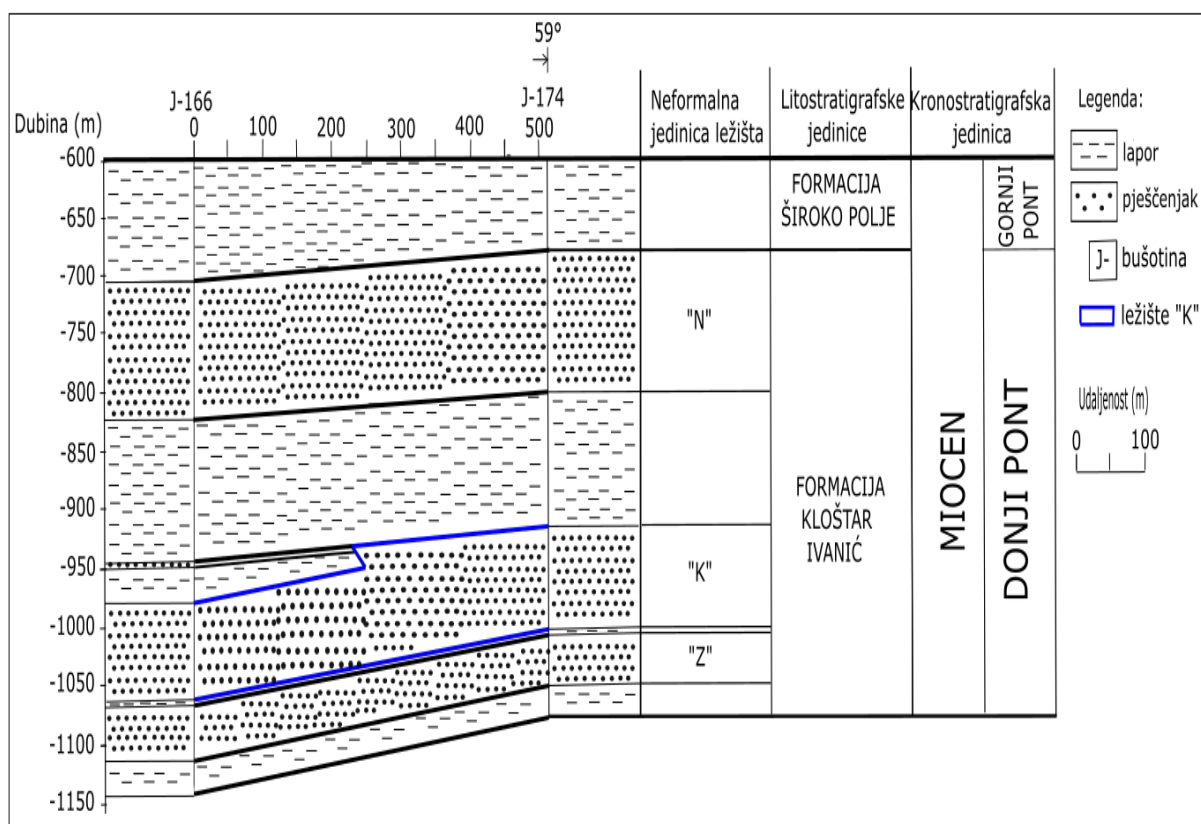
Hidrodinamička (HD) jedinica „K1“ predstavlja najveći tektonski blok i HD jedinicu unutar ležišta „K“. Očekivani iscrpак ležišta „K“ je 25,58 %. U rezervama nafte cijeloga polja ležište „K“ sudjeluje s 13,3 % i najveće je. Pridobivanje iz toga ležišta započelo je 1974. godine. Energetski režimi iskorištavanja ležišta kroz povijest pridobivanja su kombinacija režima plinske kape, otopljenoga plina, vodonapornoga režima i podržavanja tlaka zavodnjavanjem. Iz ovoga ležišta do sada se pridobivalo pomoću 26 bušotina, a trenutno iz 15 bušotina. Ostale bušotine su zatvorene zbog prodora pijeska, plina ili vode u bušotinu. Mjernih bušotina danas je devet. Na **slici 6-1** prikazana je hidrodinamička jedinica/ležište „K1“ u kojoj se pridobivanje podržava utiskivanjem slojne vode.



**Slika 6-1.** Hidrodinamička jedinica „K1“ u kojoj se podržava ležišni tlak utiskivanjem slojne vode (iz:\*)



Prema **tablici 6-2** usvojena prosječna šupljikavost za plin je 21,0 %, za naftu 22,7 %, a prema **tablici 6-3** prosječna propusnost iznosi  $75,4 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ . U hidrodinamičkoj jedinici „K1“ s devet pridobivnih bušotina, zbog velikoga udjela u rezervama u ležištu „K“ utiskivanje slojne vode se primjenjuje od 1993. godine uz pomoć tri utisne bušotine. Geološki profil utisne bušotine J-166 i pridobivne bušotine J-174 prikazan je na **slici 6-2**.

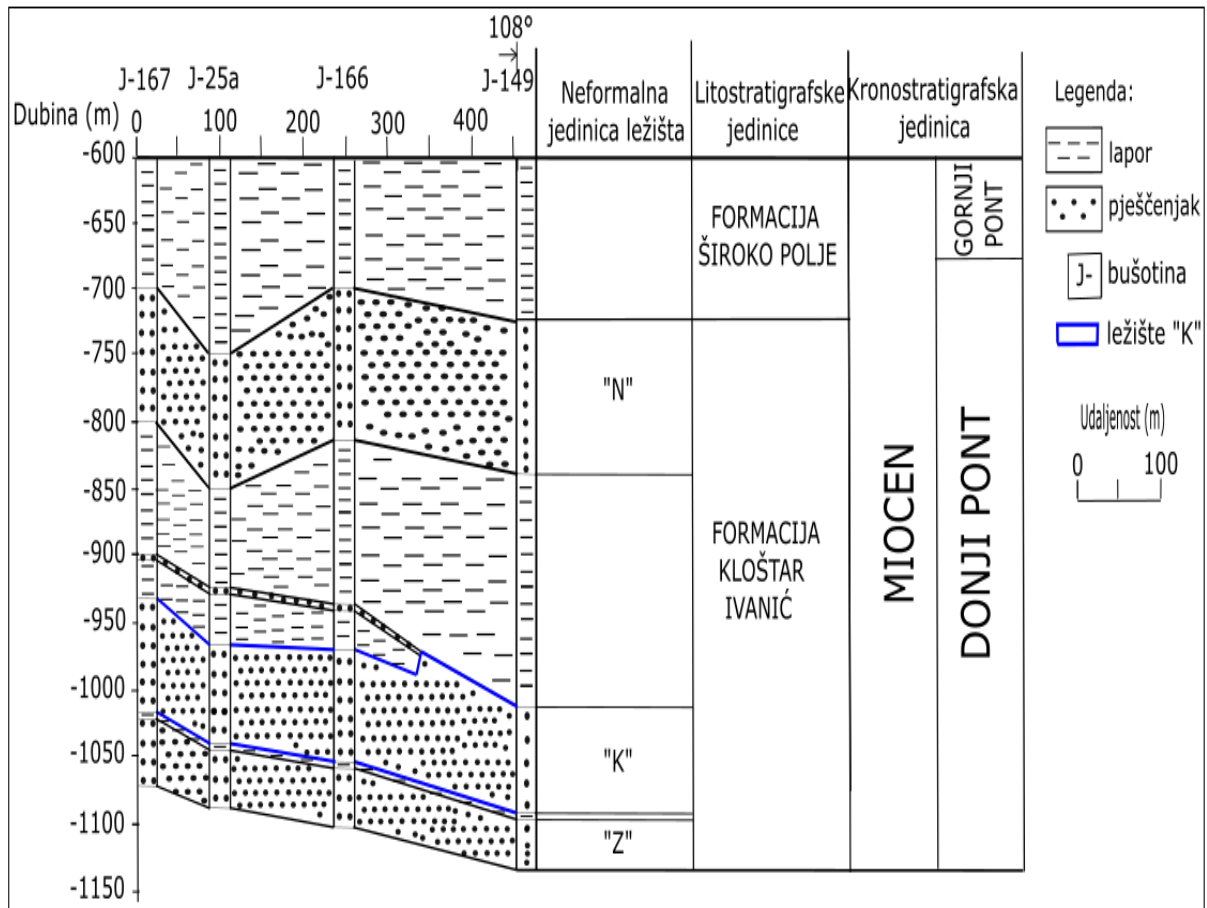


**Slika 6-2.** Korelacijski profil J-166 – J-174

Na **slici 6-2** je geološki korelacijski profil koji povezuje jednu utisnu i jednu pridobivnu bušotinu. Mogu se opaziti dvije pojave:

- Debljine članova unutar formacije Kloštar Ivanić su slične, iako ne jednake u prikazanom prostoru;
- Članovi manje debljine (lapori) na nekim se dubinama/dijelovima mogu korelirati u prostoru, no drugdje oni isklinjavaju između bušotina;
- Upravo isklinjavanje, uz rasjedanje, ima najveću ulogu u dijeljenju ležišta na hidrodinamičke jedinice.

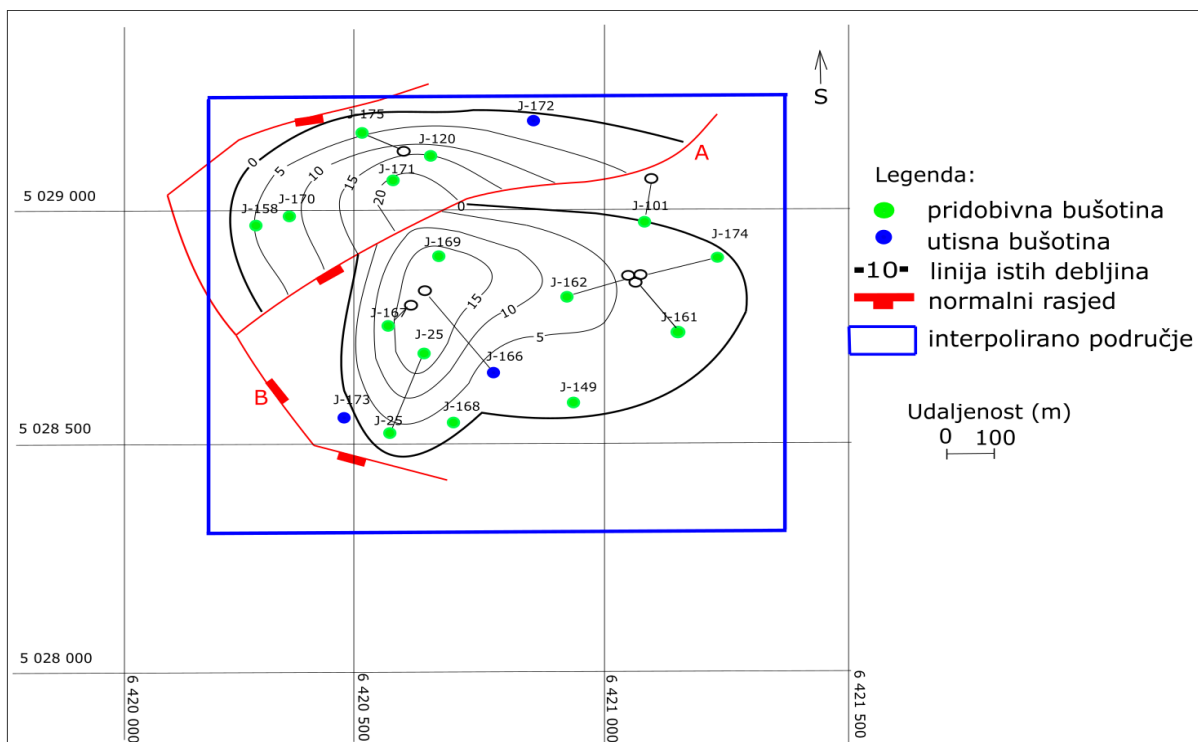
Nešto dužim geološkim profilom, između bušotina J-167, J-25 $\alpha$ , J-166 i J-149, prikazuje se slična pojava isklinjavanja unutar hidrodinamičke jedinice „K1“ (slika 6-3). Međutim, na njemu se također može opaziti i pojava djelomične strukturne inverzije unutar formacije Kloštar Ivanić, gdje dublji članovi približnoga profila homokline prema krovini prelaza u boru, tj. u sinklinalu s dnom u bušotini J-25a te antiklinalu s tjemenom u bušotini J-166.



*Slika 6-3. Korelacijski profil J-167 - J-25 $\alpha$  - J-166 - J-149 unutar hidrodinamičke jedinice „K1“*

#### 6.4. Primjena interpolacijskih metoda za ležište „K“

Interpolacijske metode koje su primijenjene za kartiranje varijabli propusnosti i utisnutih volumena vode su metode najbližeg susjedstva, prirodnoga susjedstva i inverzne udaljenosti. Područje koje je obuhvaćeno interpolacijom prikazano je na **slici 6-4**.



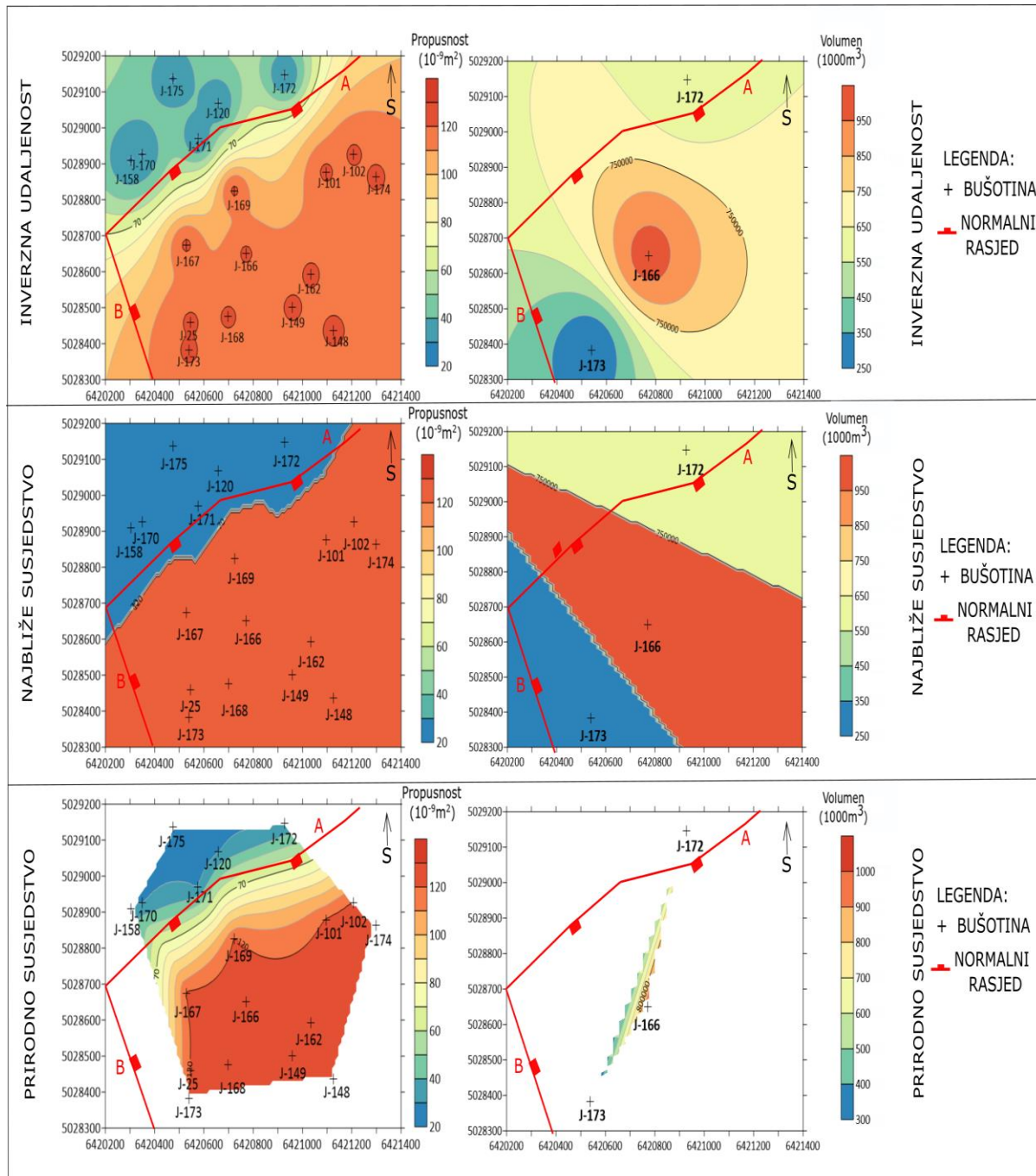
**Slika 6-4.** Interpolirano područje (plavo) ležišta „K“

Ove dvije varijable su bitne pri interpretaciji i planiranju sekundarnih metoda pridobivanja ugljikovodika (utiskivanje slojne vode). Propusnost ležišta je određena iz jezgri bušotina u laboratoriju, dok su podaci o utisnutim volumenima uzeti iz proizvodnih podataka tvrtke INA d.d. do 2018. godine. Vrijednosti propusnosti i utisnutih volumena vode su dati u **tablici 6-4.**

**Tablica 6-4.** Srednje vrijednosti i ukupni utisni volumeni vode za „K“ ležište

Bušotine u ležištu “K”	Propusnost ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) (horizontalna srednja vrijednost)
J-25, J-101, J-102, J-148, J-149, J-162, J-166, J-167, J-168, J-169, J-173, J-174	121,2
J-120, J-158, J-170, J-171, J-172, J-175	29,6
Bušotine	Utisni volumen ( $\text{m}^3$ )
J-166	992 045
J-172	593 591
J-173	273 788

U hidrodinamičkoj jedinici „K1“ tri bušotine su opremljene kao utisne u svrhu podržavanja ležišnoga tlaka, dok je propusnost određena u 18 bušotina. Na **slici 6-5** prikazane su karte varijabli propusnost i utisnutih volumena vode dobivene metodama inverzne udaljenosti, najbližeg i prirodnoga susjedstva.



**Slika 6-5.** Rezultati interpolacijskih metoda inverzne udaljenosti, najbližeg i prirodnog susjedstva za ležište „K“ (lijevo-propusnost; desno-utisnuti volumeni)

Rezultati krosvalidacije za 3 interpolacijske metode i dvije varijable ležišta „K“ su prikazani u **tablici 6-5**.

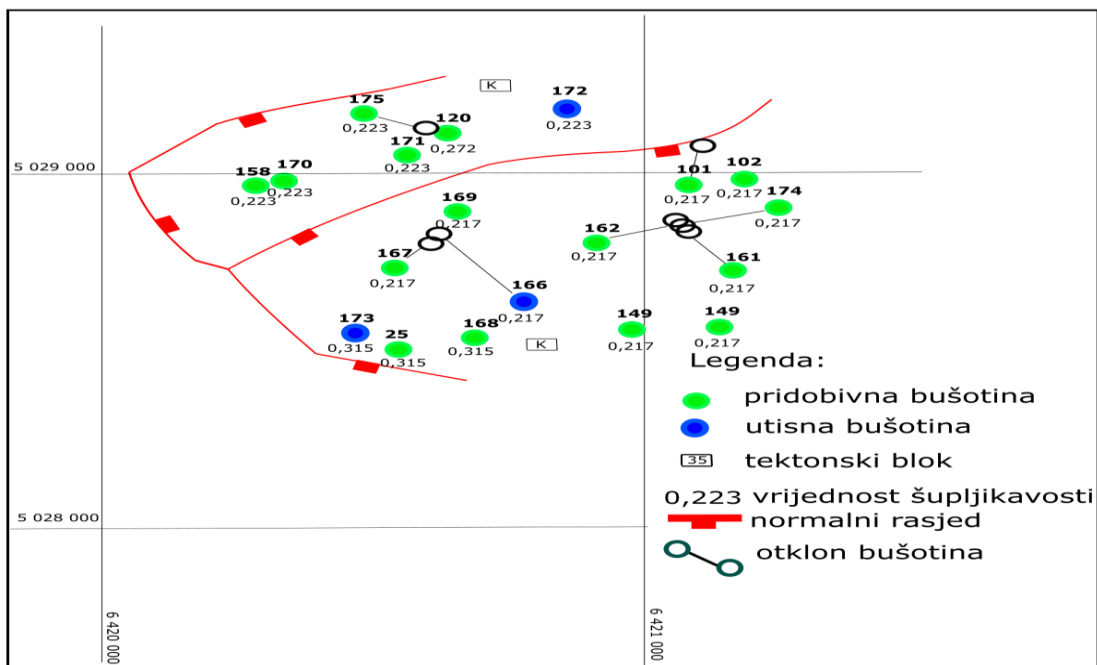
**Tablica 6-5. Rezultati krosvalidacije za „K“ ležište**

Varijabla	Broj podataka	Vrijednost kros-validacije		
		Inverzne udaljenosti	Najbližega susjedstva	Prirodnoga susjedstva
Utisni volumen	3	$2,86 \cdot 10^{11}$	$3,96 \cdot 10^{11}$	-
Propusnost	18	480,8	1 397,4	1 044,7

Zbog maloga broja ulaznoga skupa prilikom njihovoga kartiranja, bilo koja interpolacijska metoda će dati tek skicu mogućega rješenja, ali i u tom slučaju primijenjena metoda za kartiranje bi bila inverzne udaljenosti (**slika 6-5; tablica 6-5**), jer ona vrijednosti interpolira (postoje prijelazne vrijednosti između mjerenih točaka). Također, vrijednost krosvalidacije je manja kod metode inverzne udaljenosti, negoli kod preostale dvije primijenjene metode. Za utisnute količine vode u donjopontsko pješčenjačko ležište hidrodinamičke jedinice „K1“ u slučajima manjim od 5 ulaznih podataka, nije moguća primjena metode prirodnoga susjedstva.

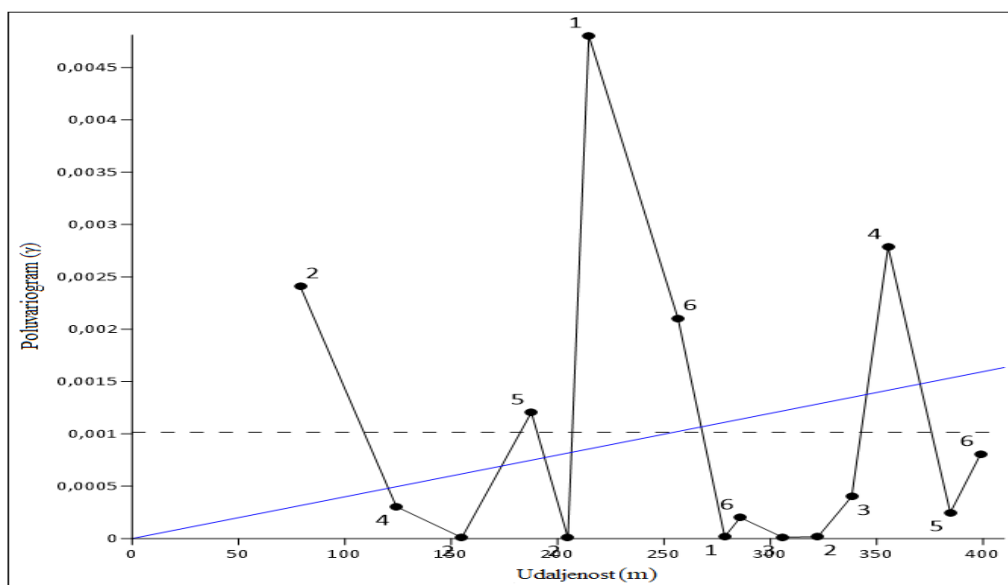
## **6.5. Variogramaska analiza i primjena metode običnoga krigiranja šupljikavosti u ležištu „K“**

Podatci o šupljikavosti su za pojedine bušotine izmjerene u laboratoriju i/ili očitane iz karotažnih krivulja. Za hidrodinamičku jedinicu „K1“ vrijednost šupljikavosti je određena u 19 bušotina (**slika 6-6**).



**Slika 6-6.** Vrijednost šupljikavosti za hidrodinamičku jedinicu „K1“ (iz:\*)

Kako se može vidjeti iz **slike 6-6** vrijednosti šupljikavosti su većinom iste ili variraju po blokovima. Iz tog razloga bilo je potrebno za ovo ležište izraditi nove karte šupljikavosti. Eksperimentalni variogram šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“ prikazan je na **slici 6-7**.

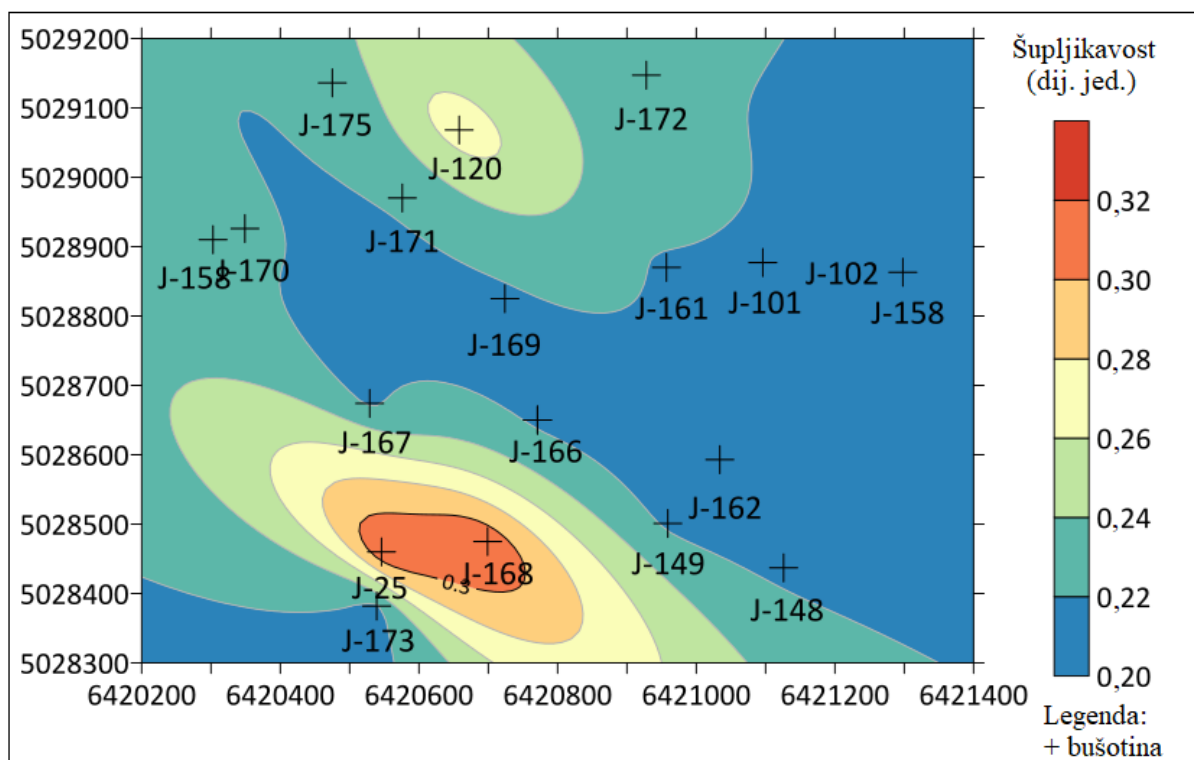


**Slika 6-7.** Eksperimentalni variogram šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“

Vrijednosti očitane iz eksperimentalnoga variograma šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“ (slika 6-7):

- prag ili varijanca 0,001,
- doseg 110,
- odstupanja nema,
- aproksimacija s linearnim modelom.

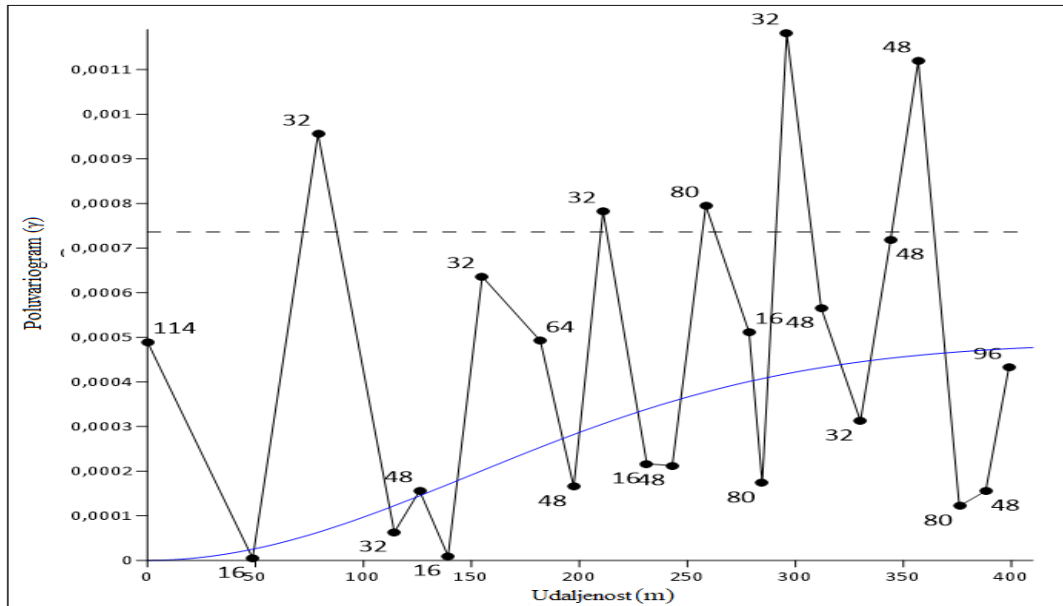
Iz linearnoga modela variograma (slika 6-7) dobivena je karta šupljikavosti metodom običnoga krigiranja (slika 6-8). Veliko osciliranje podataka u variogramu je slično kao i za ležišta na polju „A“, pa će se primijeniti linearni model sa zanemarivanjem prve eksperimentalne točke.



*Slika 6-8. Prostorni raspored šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“ dobiven običnim krigiranjem iz eksperimentalnoga variograma*

Vrijednost krosvalidacije za dobivenu kartu (slika 6-8) iznosi 0,0013197, a poluvariogramski model je vrlo nepravilan, s oscilacijama koje počinju već od prve eksperimentalne točke. U slučaju polja „A“ za dobivanje pouzdanoga variogramskog modela, broj podataka «umjetno» je povećan uporabom metode ponovnoga uzrokovanja te je dobiveni variogramski model prikazan na slici 6-9.





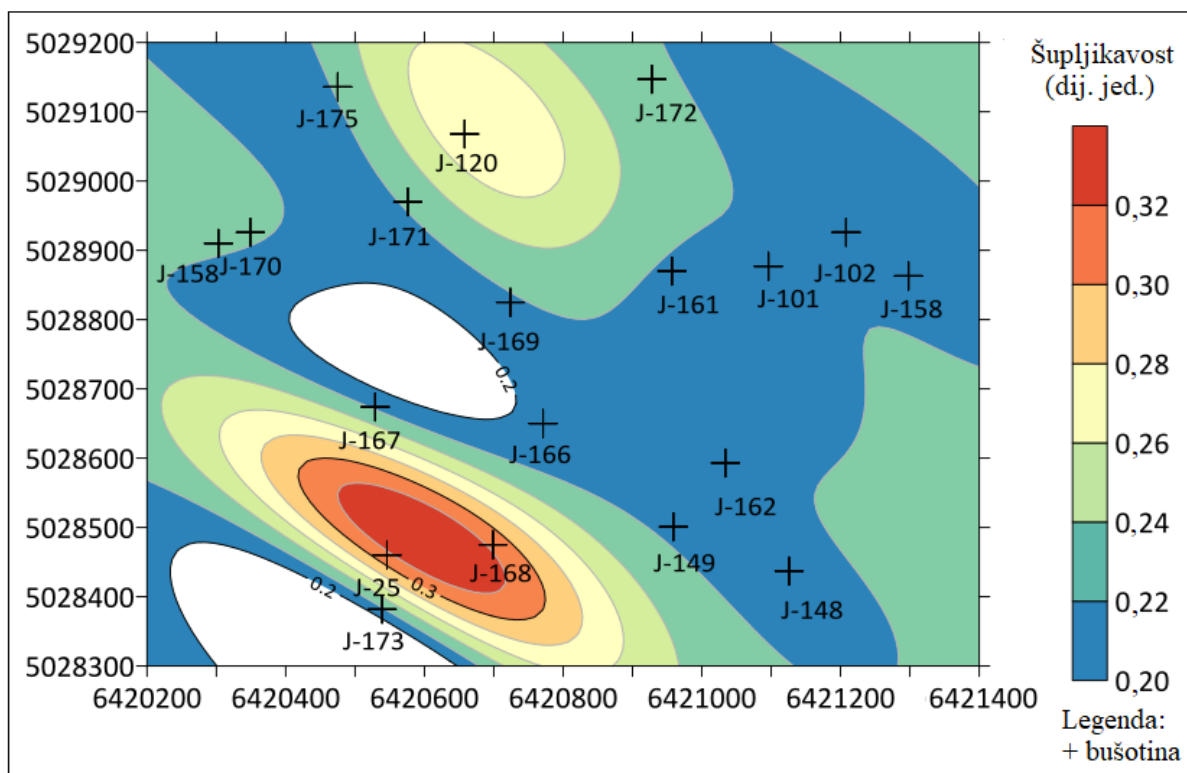
*Slika 6-9. Eksperimentalni variogram dobiven nakon primjene metode ponovnoga uzrokovanja*

Novi procijenjeni skup podataka je veći od prvobitnoga (**slika 6-7**) što se može vidjeti po broju parova podataka na **slici 6-9**. Vrijednosti očitane iz eksperimentalnoga variograma šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“ dobivene nakon primjene metode ponovnoga uzrokovanja (**slika 6-9**) su:

- prag ili varijanca 0,00073,
- doseg 70,
- odstupanje 0,00049,
- aproksimacija s Gausovim modelom.

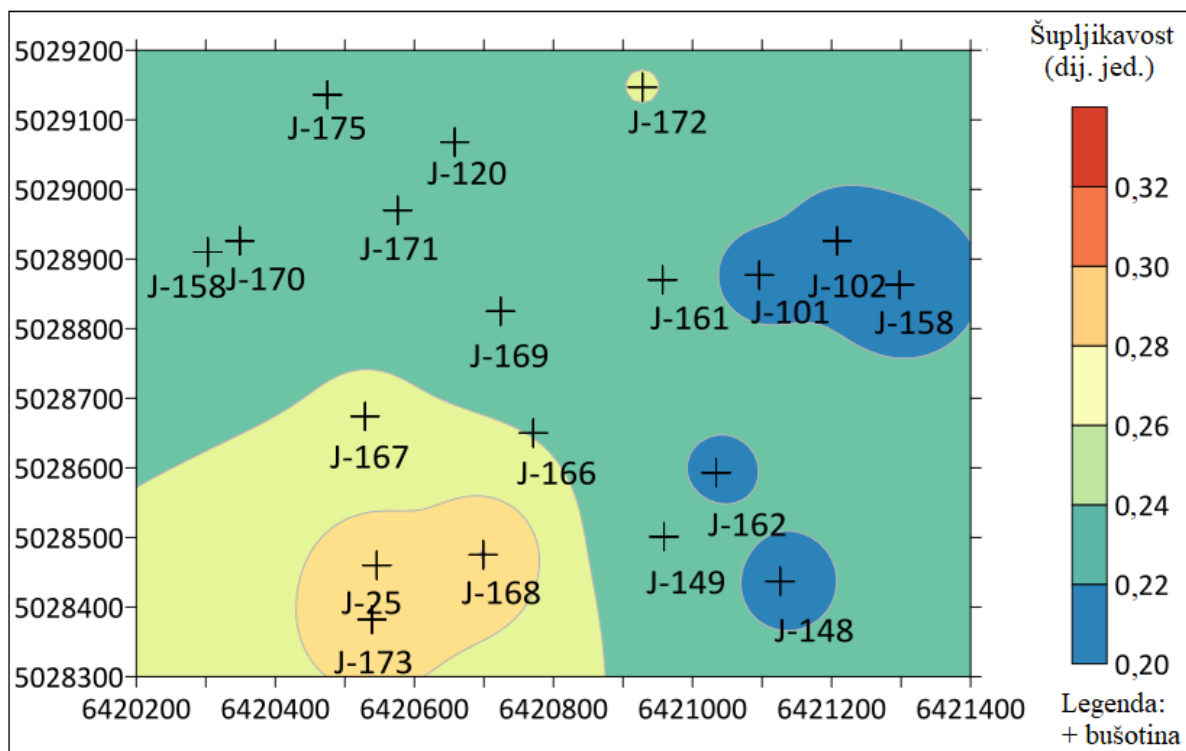
Iz Gaussovoga modela variograma (**slika 6-9**) dobivena je karta metodom običnoga krigiranja (**slika 6-10**).





*Slika 6-10. Prostorni raspored šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“ dobiven običnim krigiranjem iz eksperimentalnoga variograma nakon metode ponovnoga uzrokovanja*

Vrijednost krosvalidacije za dobivenu kartu (slika 6-10) iznosi 0,0009704. Rezultati kartiranja šupljikavosti polja „B“ vrlo su slični rezultatima kartiranja polja „A“ za slučaj nerazvijenosti lokalnih vrijednosti. Zbog male razlike u vrijednostima šupljikavosti te nepravilnoga rasporeda bušotina znatno se bolje aproksimiraju jednostavnijom interpolacijskom formulom, iako je broj podataka veći od 10. Prostorni raspored šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“ dobiven metodom inverzne udaljenosti iz eksperimentalnoga variograma nakon metode ponovnoga uzrokovanja prikazan je na slici 6-11.



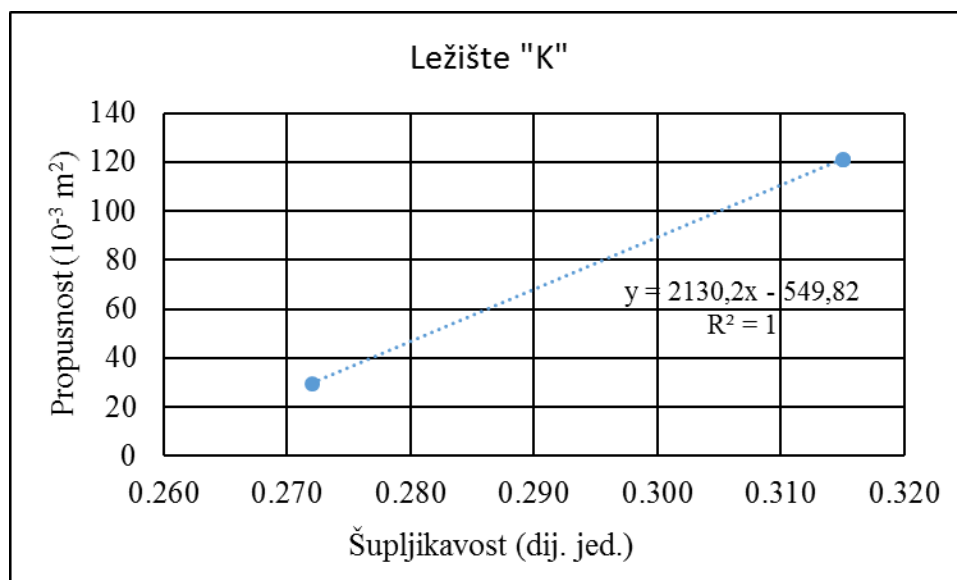
*Slika 6-11. Prostorni raspored šupljikavosti hidrodinamičke jedinice „K1“ dobiven metodom inverzne udaljenosti iz eksperimentalnoga variograma nakon metode ponovnoga uzrokovanja*

## 6.6. Korelacija šupljikavosti i propusnosti ležišta „K“

Podatci o šupljikavosti i propusnosti ležišta „K“ su preuzeti iz **tablica 6-2** i **6-3** i sumarno prikazani u **tablici 6-6**, dok su rezultati korelacije šupljikavosti i propusnosti ležišta „K“ prikazani na **slici 6-12**.

*Tablica 6-6. Šupljikavost i propusnost za ležište „K“*

Ležište "K"	Šupljikavost (dij. jed.)	0,272	0,315
	Propusnost ( $10^{-3} \text{ m}^3$ )	29,6	121,2



*Slika 6-12. Odnosi šupljikavosti i propusnosti za ležište „K“*

Koeficijent linearne korelacije za ležište „K“ (2 para) iznosi 1. To pripada skupini jakih linearnih ovisnosti. Izračunati rangovi za Spearmanov koeficijenta korelacije ležišta „K“ su prikazani u **tablici 6-7**.

*Tablica 6-7. Izračunati rangovi Spearmanovoga koeficijenta ležišta „K“*

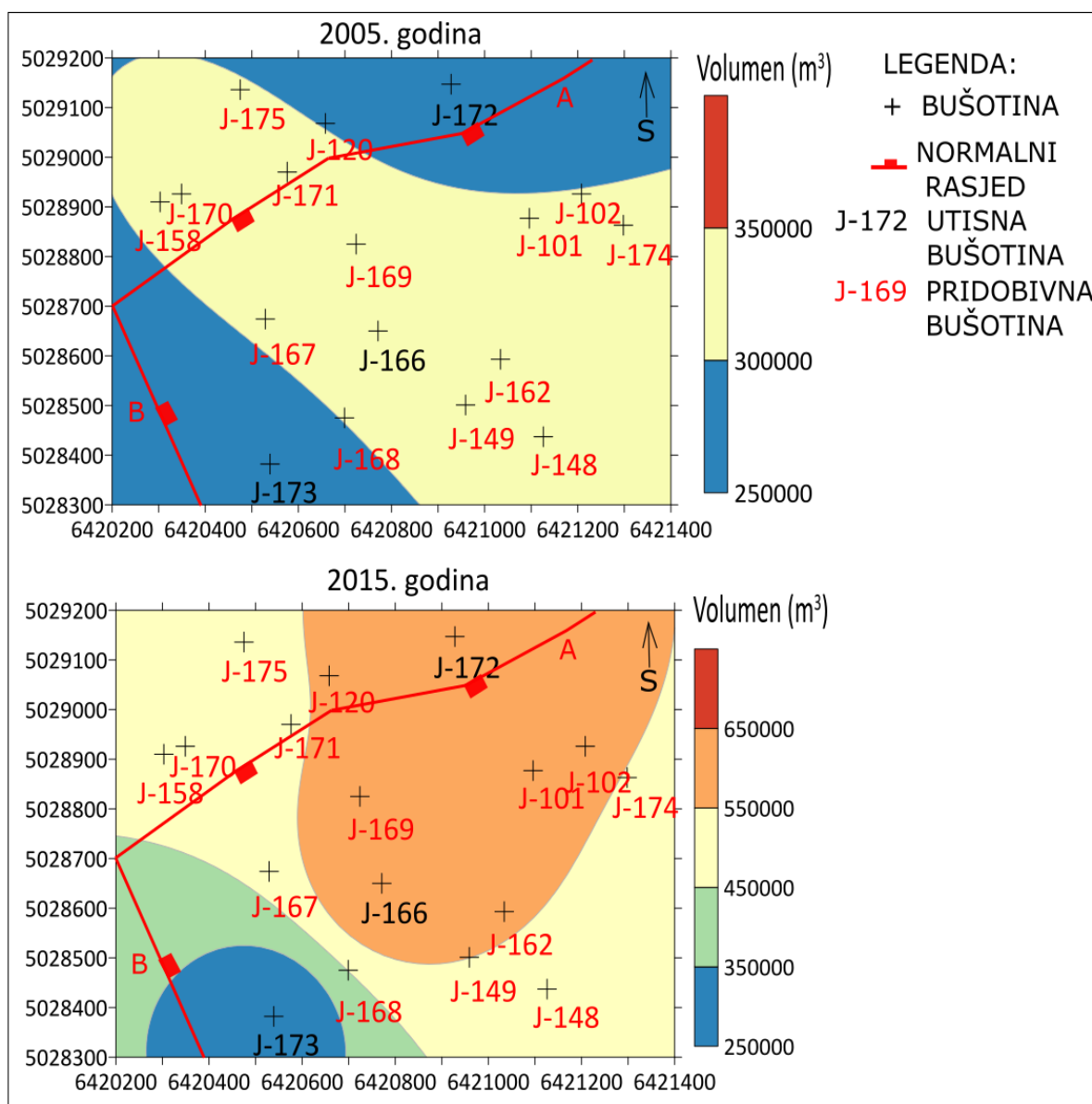
Ležište "K"	Šupljikavost (dij. jed.)	0,272	0,315
	Rang	3	1
	Propusnost ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	29,6	121,2
	Rang	3	1

Iznos Spearmanovoga koeficijenta za odnos šupljikavosti i propusnosti ležišta „K“ iznosi 1. S obzirom najmanji mogući ulazni skup podataka, dobiveni rezultat je očekivan. Važno je napomenuti kako ovisnost postoji između varijabli propusnosti i šupljikavosti, ali ovim računima ona nije niti dokazana niti opovrgnuta.

## 6.7. Zavodnjavanje ležišta „K“

Zavodnjavanje ležišta „K“ je ostvareno s tri utisne bušotine, a pridobivanje kapljevine je ostvareno s četrnaest pridobivnih bušotina. Razmatrano razdoblje zavodnjavanja ležišta „K“ je deset godina, tj. od 2005. godine do 2015. godine. Za to razdoblje interpolirane su

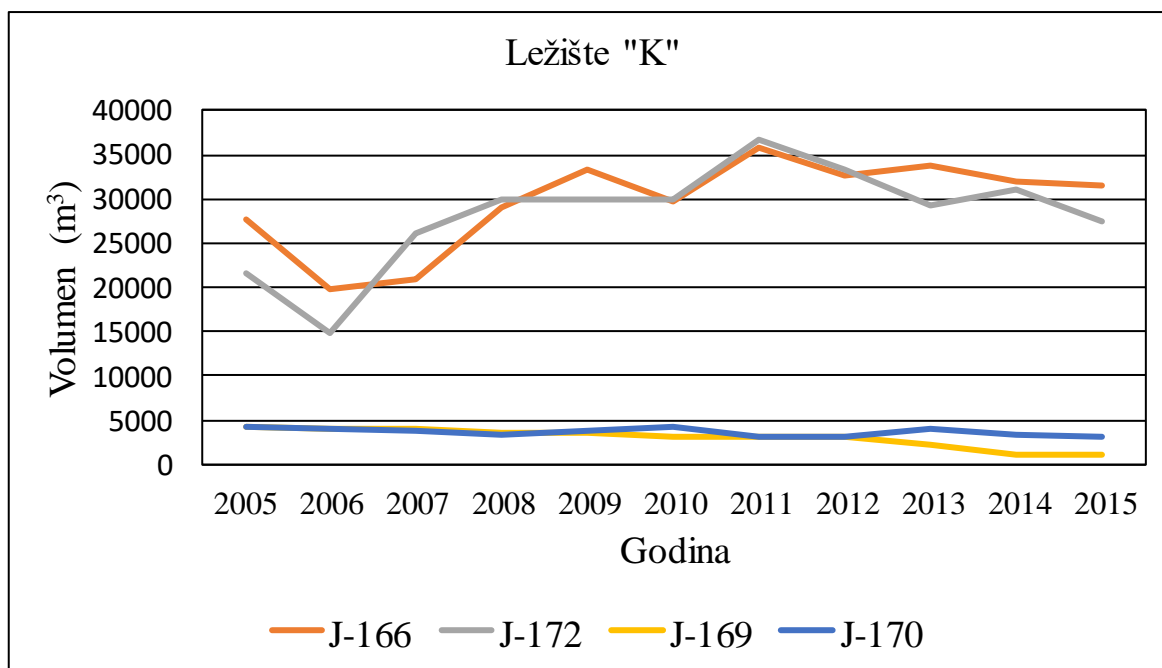
karte utisnutih volumena metodom inverzne udaljenosti, a rezultat interpolacije je prikazan na **slici 6-13**.



**Slika 6-13.** Količine vode ležišta „K“ kumulativno utisnute u razdoblju od 2005. do 2015. godine

Iz **slike 6-13** je vidljiva kontinuiranost utiskivanja slojne vode i širenje kroz cijelo ležište. Kako je vidljivo rasjed A (**slika 6-13**) je propusna rasjedna zona što se vidi iz razdiobe utisnutih volumena slojne vode. Kretanje slojne vode odvijalo se u središnjem i zapadnom dijelu ležišta, što je očekivano prema **slikama 6-5, 6-8, 6-10 i 6-11**. Usporedba

utisnih volumena slojne vode (J-166 i J-172) i pridobivenih količina kapljevina na pridobivnim bušotinama (J-169 i J-170) prikazana je na **slici 6-14**.

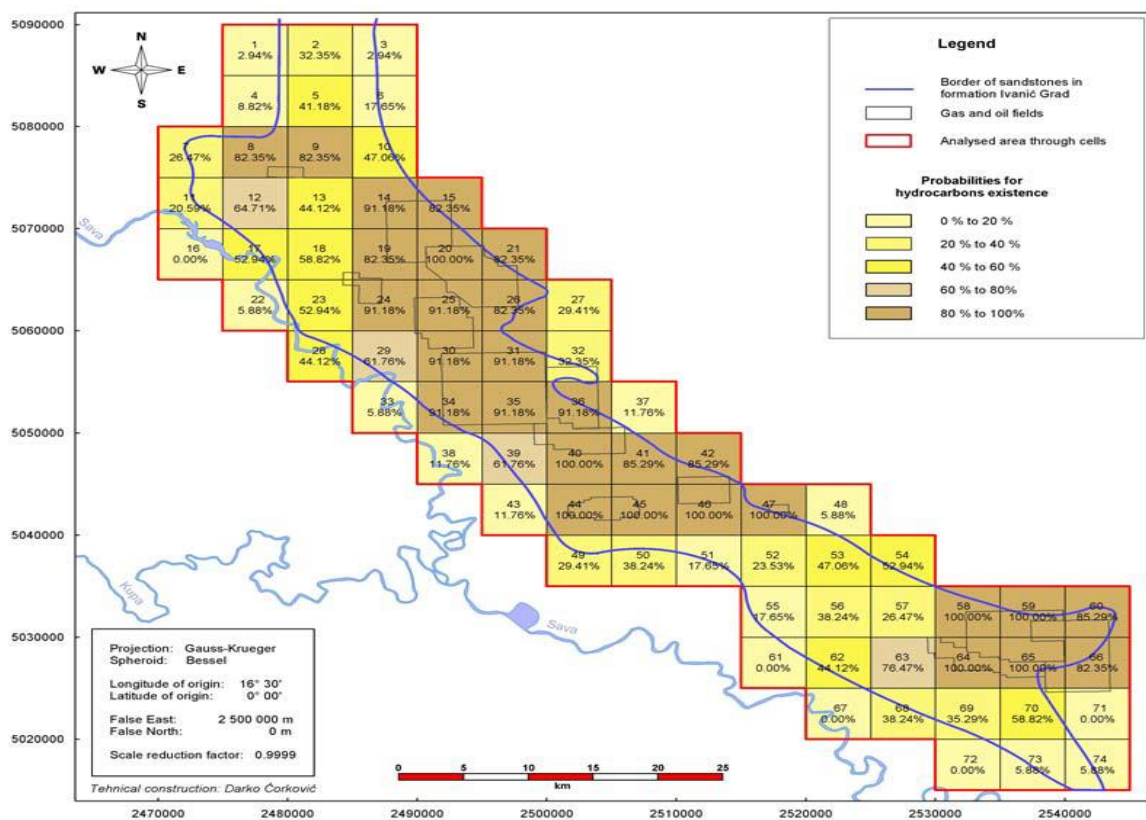


*Slika 6-14. Usporedba utisnutih volumena i pridobivenih količina kapljevine za bušotinu J-166, J-169, J-170 i J-172 ležišta „K“*

Kako je vidljivo iz pridobivenih i utisnutih volumena iz **slike 6-14** i zavodnjavanja ležišta iz **slike 6-13**, nije bilo značajnijeg povećanja kapljevine u pridobivnim bušotinama. Pridobiveni volumen je stalan tijekom pridobivanja bušotina (<5000 m<sup>3</sup> kapljevine) i uz porast utisnutih volumena slojne vode. Tijekom smanjenja utisnutih volumena slojne vode smanjuje se pridobiveni volumen kapljevine iz bušotina J-169 i J-170. Može se zaključiti kako je zavodnjavanje ležišta „K“ bilo zadovoljavajuće jer je održavan ležišni tlak.

## 7. IZRAČUN GEOLOŠKE VJEROJATNOSTI POSTOJANJA DODATNIH LEŽIŠTA UGLJIKOVODIKA U ŠIREM PROSTORU STRUKTURA „A“ I „B“

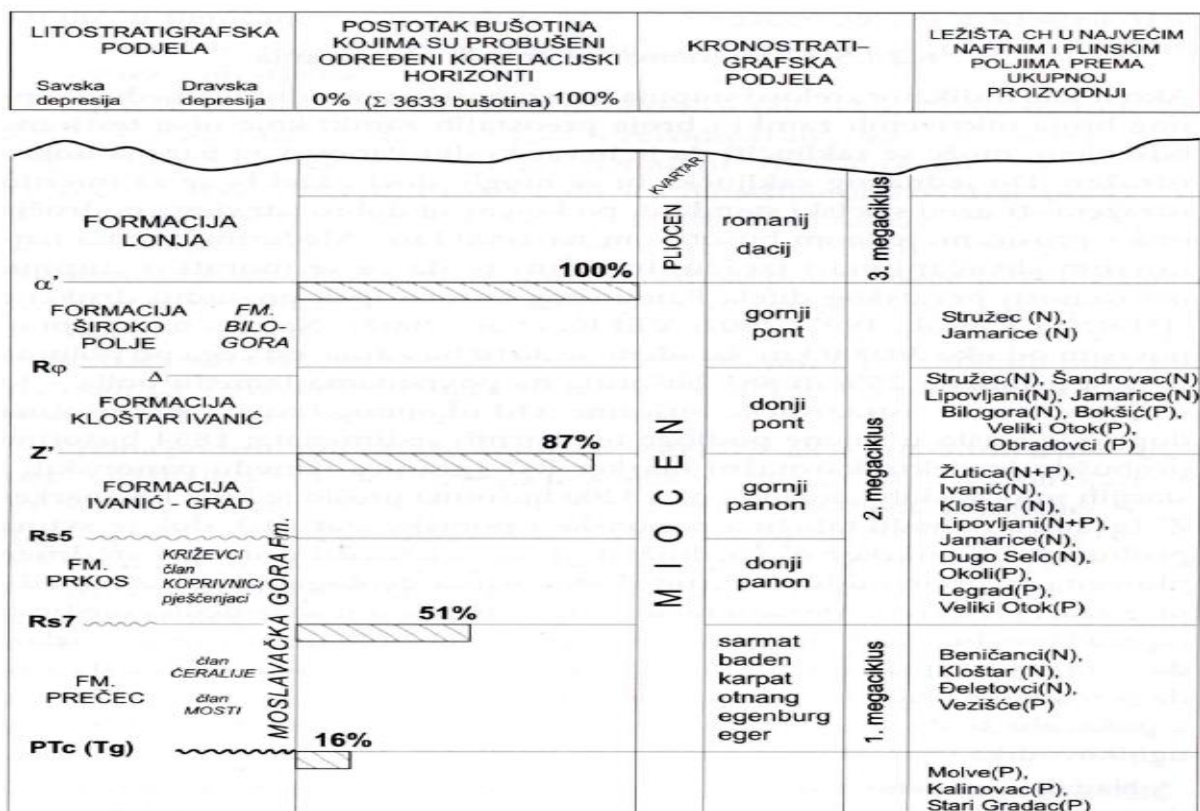
Zapadni dio Savske depresije je relativno dobro istražen prostor s velikim brojem bušotina i otkrivenih rezervi ugljikovodika, tj. naftno-plinskih polja. Upravo zbog izrađene površinske infrastrukture mogućnost otkrića i pridobivanje dodatnih količina ugljikovodika je ekonomski prihvatljivo i profitabilno. Na području zapadnoga dijela Savske depresije izračunat je POS za formaciju Ivanić-Grad za površinu ćelije od 25 km<sup>2</sup>, a rezultati su prikazani na slici 7-1.



Slika 7-1. Ćelije i pripadajuće geološke vjerojatnosti formacije Ivanić-Grad u zapadnom dijelu Savske depresije (iz: VRBANAC et al., 2010a, izvornik je na engleskom)

Istraženost neogenskih i kvartarnih naslaga za područje Savske i Dravske depresije je prikazana na slici 7-2. Prema njoj, unutar Kloštar Ivanić formacije nije istraženo 13 % volumena taložina što su dobre pretpostavke za pronalazak mogućih novih ležišta

ugljikovodika u širim prostorima polja „A“ i „B“. Za područje zapadnoga dijela Savske depresije mogućnost pronalaska novih ležišta u formaciji Kloštar Ivanić može se opaziti na strukturnim kartama po plohi repera  $R\phi$  i  $Z'$  (**prilozi 7 i 8**). Takva područja su rubni dijelovi struktura polja „A“ (**prilog 3**) i polja „B“ (**prilog 5**). Mogući je pronalazak produžetka postojećih ležišta na satelitskim strukturama donjopontske starosti. S obzirom na stupanj istraženosti prostora, očekivano ležište ne bi imalo velike geološke rezerve ugljikovodika (oko 500 000 m<sup>3</sup>). No, takvo novo otkriće ležišta ugljikovodika bi zasigurno produžilo vrijeme i rentabilnost pridobivanja ugljikovodika. U nastavku su po kategorijama izračunate deterministički pojedinačne vrijednosti kategorija POS-a za navedeni pretpostavku.



*Slika 7-2. Istraženost neogenskih i kvartarnih stijena u Savskoj i Dravskoj depresiji ( iz: VELIĆ, 2007)*

### 7.1. Procjena postojanja regionalnih zamki

Pod pojmom zamke podrazumijeva se migracijski zatvorena geološka struktura u kojoj su gravitacijski odvojeni ugljikovodici i slojna voda. Vjerojatnost kategorije zamki se izračunava prema sljedećem **izrazu 7.1**:



$$p(\text{zamka}) = p(\text{strukturalna zamka/stratigrafska zamka}) \cdot p(\text{izolator}) \quad (7.1)$$

Prema klasifikaciji BRODA (1945) ležišta polja „A“ i „B“ pripadaju skupini slojnih, zasvođenih ležišta, koja su ograničena litološkim i tektonskim ekranom, odnosno kombinacijom oba. Za polja „A“ i „B“, tj. za ležišta unutar formacije Kloštar Ivanić, vrijednost potkategorije „Strukturalna zamka“ iznosi 1,0, potkategorija „Stratigrafska ili kombinirana“ iznosi 0,75, jer ležišta u takvim zamkama u analiziranom prostoru nisu dokazana, ali se očekuju otkriti na rubovima, tj. unutar satelitskih struktura u okolici dvaju dokazanih polja. Potkategorija „Kvaliteta izolatorskih stijena“ iznosi 1,0 jer se radi o regionalno dokazanim nepropusnim donjopontskim laporima. Ukupna vjerojatnost za kategoriju „Zamka“ iznosi 0,75 (**tablica 7-1**).

**Tablica 7-1.** Odabrane vjerojatnosti opaženih pojava u analiziranom prostoru (plavi pravokutnici) za kategoriju „Zamka“ (MALVIĆ, 2009b)

ZAMKA	
Strukturalna zamka	p (dij. jed.)
Antiklinala i paleouzdignuće povezano sa starijim stijenama.	1,00
Rasjednuta antiklinala	0,75
Strukturalni nos zatvoren rasjedom	0,50
Svaka "pozitivna" rasjednuta strukturalna čije granice nisu točno određene	0,25
Strukturalni sklop nije određen	0,05
Stratigrafska ili kombinirana	p (dij. jed.)
Algni greben	1,00
Pješčenjak koji isklinjava	0,75
Sedimenti izmijenjeni dijagenezom	0,50
Nagla promjena petrofizikalnih svojstava (zbog gline, promjena facijesa)	0,25
Stratigrafski sklop nije određen	0,05
Kvaliteta izolatorskih stijena	p (dij. jed.)
Regionalno dokazane izolatorske stijene	1,00
Stijene bez ležišnih svojstava	0,75
Stijene propusne za plin ("gubitak plina")	0,50
Propusne stijene s mjestimice povećanim udjelom gline/silta	0,25
Izolatorske stijene nisu određene	0,05



## 7.2. Procjena postojanja novih ležišta u analiziranom prostoru

Ležište ugljikovodika je određeno vrstom stijene i iznosom šupljikavosti, što ujedno predstavlja potkategorije unutar POS-ove kategorije ležište (**izraz 7.2**):

$$p(\text{ležište}) = p(\text{vrsta ležišta}) \cdot p(\text{vrijednost šupljikavosti}) \quad (7.2)$$

Donjopontska ležišta „L“ (polje „A“) i „K“ (polje „B“) čine sitnozrnat, tinjčasti pješčenjaci, a tako je i u širem prostoru depresije, pa je iznos potkategorije „Vrsta ležišta“ 1,0. Srednja vrijednost šupljikavosti ležišta „L“ na polju „A“ je 0,184 dij. jed. za plinsko zasićenje i 0,192 dij. jed. za naftno zasićenje (**tablica 5-2**), dok za ležište „K“ na polju „B“ je 0,202 dij. jed. za plinsko zasićenje i 0,216 dij. jed. za naftno zasićenje (**tablica 6-2**). Prema tome vrijednost potkategorije „Vrijednost šupljikavosti“ je 1,0, jer je ona regionalno veća od 15 %. Vrijednost kategorije „Ležište“ se regionalno tada može postaviti na 1,0 (**tablica 7-2**).

**Tablica 7-2.** Određene vjerojatnosti (plavi pravokutnici) za kategoriju „Ležište“ (MALVIĆ, 2009b)

LEŽIŠTE	
Vrsta ležišta	p (dij. jed.)
Pješčenjak, čist i znatnoga lateralnoga prostiranja; Pz podina predstavljena granitom, gnajsom, gabrom; Dolomiti sa sekundarnom šupljikavošću; Algni grebeni sa značajnom sekundarnom šupljikavošću, razvijenom zbog okršavanja ili izloženosti (pod)površinskim procesima trošenja.	1,00
Pješčenjak, bogat siltom ili glinom; Stijene Pz i Mz podine sa sekundarnom šupljikavosti, maloga pružanja; Algalni grebeni ispunjeni s fragmentima skeleta s muljem i marinskim cementom.	0,75
Pješčenjak koji uključuje značajan udjel čestica gline/silta, maloga prostiranja.	0,50
Stijene Pz i Mz podine, uključujući nisku sekundarnu šupljikavost i relativno malo prostiranje.	0,25
Vrsta ležišta nije određena	0,05
Vrijednosti šupljikavosti	p (dij. jed.)
Prvotna šupljikavost (>15 %); Drugotna šupljikavost (>5 %).	1,00
Prvotna šupljikavost (5-15 %); Drugotna šupljikavost (1-5 %).	0,75
Prvotna šupljikavost (<10 %); Propusnost ( $1 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	0,50
Drugotna šupljikavost (>1 %)	0,25
Vrijednosti šupljikavosti nisu određene	0,05

### 7.3. Procjena postojanja dovoljnih volumena zrelih matičnih stijena za nova ležišta

Matične stijene su izvorišne stijene u kojima su se pod djelovanjem tlaka i temperature generirali ugljikovodici. Kategorija „Matična stijena“ je podijeljena u tri potkategorije: matični facijes, zrelost i izvor podataka. **Izraz 7.3** za vjerojatnost je:

$$p(\text{matične stijene}) = p(\text{matični facijes}) \cdot p(\text{zrelost}) \cdot p(\text{izvor podataka}) \quad (7.3)$$

Na području zapadnoga dijela Savske depresije matični facijes je kerogen tipa II i/ili III (BARIĆ, 2006). Za prostor Savske depresije prema BARIĆ (2006) te TROSKOT-ČORBIĆ et al. (2009) vrijednost TOC (engl. *Total Organic Carbon*, skr. TOC) je 1,4 i vitrinitne refleksije ( $R_o[\%]$ ) je od 0,6 do 0,8. Nafta polja „A“ i „B“ odlikuju se dugolančanom molekularnom strukturom (do  $C_{40}$ ), što se odražava visokom koncentracijom krutih parafina kojih je u nafti 16 % (VASILJEVIĆ, 2009). Ove visoko parafinske, voskaste nafte potječu iz matičnih stijena s povećanim udjelom terestričnih lipidnih komponenata, koje su prepoznate u Gojlu (VASILJEVIĆ, 2009). Vrijednost vjerojatnosti potkategorije je određena vjerojatnošću 0,75. Matične stijene ležišta polja „A“ i „B“ su nastale u marinskom okolišu tijekom srednjeg i gornjeg miocena (gornji baden do donji panon). Dubina matičnih stijena je od 1300 do 3362 m (TROSKOT-ČORBIĆ et al., 2009). Vjerojatnost generiranja prema tipu kerogena je 0,75, tj. to je vjerojatnost da su danas (ili su bili u nedavnoj geološkoj prošlosti) u katagenskoj i metagenskoj fazi zrelosti. Izvor podataka bile su geokemijske analize jezgara i fluida (npr. BARIĆ, 2006). Ukupna vjerojatnost kategorije „Matične stijene“ je 0,75 (**tablica 7-3**).

**Tablica 7-3. Određene vjerojatnosti (plavi pravokutnici) za kategoriju „Matične stijene“ (MALVIĆ, 2009b)**

<b>MATIČNE STIJENE</b>	
Matični facijesi	p (dij. jed.)
Kerogen tipa I i/ili II	1,00
Kerogen tipa III	0,75
Povoljni paleofacijesi uz taloženje organske tvari	0,50
Regionalno poznati facijesi matičnih stijena, ali nisu dokazani na promatranom lokalitetu	0,25
Vrsta matičnih stijena nije određena	0,05
Zrelost	p (dij. jed.)
Matične stijene su u katagenskoj fazi ("naftni" prozor ili "vlažnoga" plina)	1,00
Matične stijene su u metagenskoj fazi	0,75
Matične stijene su u ranoj katagenskoj fazi	0,50
Matične stijene su u kasnoj dijagenetskoj fazi	0,25
Razina zrelosti nije određena	0,05
Izvor podataka	p (dij. jed.)
Geokemijske analize jezgara i fluida	1,00
Analogija s prostorno bliskim geokemijskim analizama	0,75
Modeliranje i izračun termijske zrelosti (npr. Lopatin, Waples i dr.)	0,50
Modeliranje termijske zrelosti na tek nekoliko lokacija	0,25
Izvor podataka nije određen	0,05

#### 7.4. Migracija

Migracija ugljikovodika je kretanje ugljikovodika od matične do ležišne stijene, a dijeli se na prvotnu i drugotnu (primarnu i sekundarnu) migraciju. Potkategorije unutar ove kategorije su: pojava ugljikovodika, položaj zamke i vrijeme migracije, a vjerojatnost kategorije (**izraz 7.4**) je:

$$p(\text{migracija}) = p(\text{pojava ugljikovodika}) \cdot p(\text{položaj zamke}) \cdot p(\text{vrijeme}) \quad (7.4)$$

Pridobivanje ugljikovodika iz ležišta polja „A“ započelo je 1962. godine, dok je iz ležišta polja „B“ započelo 1970. godine, pa je potkategoriji „Pojava ugljikovodika“ vrijednost vjerojatnosti 1,0. Također, zamke na istraživanom području su određene unutar dokazanih migracijskih putova (npr. VELIĆ, 2007) te je vrijednost vjerojatnosti „Položaj zamke“ 1,0. Prema starosti zamka je starija od vremena kada su matične stijene dostigle zrelost (vjerojatnost „Vrijeme“ je 1,0). Ukupna vjerojatnost za kategoriju „Migracija“ iznosi 1,0.

**Tablica 7-4. Određene vjerojatnosti (plavi pravokutnici) za kategoriju „Migracija“**  
(MALVIĆ, 2009b)

<b>MIGRACIJA</b>	
Pojava ugljikovodika	p (dij. jed.)
Pridobivanje ugljikovodika	1,00
Ugljikovodici su opaženi u tragovima. Opažen je novi plin koncentracije >10 %	0,75
Nafta je opažena u jezgrama (luminiscentnom analizom, testiranjem jezgri)	0,50
Nafta je opažena u tragovima (luminiscentnom analizom, testiranjem jezgri)	0,25
Nisu opaženi ugljikovodici	0,05
Položaj zamke	p (dij. jed.)
Zamka je određena unutar dokazanoga migracijskoga puta	1,00
Zamka se nalazi između dva depocentra matičnih stijena	0,75
Kratki migracijski put (<10 km)	0,50
Dugi migracijski put (>10 km)	0,25
Matične stijene nisu određene	0,05
Vrijeme	p (dij. jed.)
Zamka je starija od zrelih matičnih stijena	1,00
Zamka je mlađa od zrelih matičnih stijena	0,75
Odnos između zamke i matičnih stijena je nepoznat	0,50
-	0,25
-	0,05

### 7.5. Očuvanje ugljikovodika

Kategorija „Očuvanje ugljikovodika“ je podijeljena na dvije potkategorije: tlak ležišta i slojna voda. Tlak ležišta osigurava kontinuirano pridobivanje ugljikovodika, dok slojna voda određuje buduće razdoblje pridobivanja ugljikovodika. **Izraz 7.5** za vjerojatnost kategorije „Očuvanje ugljikovodika“ je:

$$p(\text{očuvanje ugljikovodika}) = p(\text{tlak ležišta}) \cdot p(\text{slojna voda}) \quad (7.5)$$

Početni tlak ležišta „K“ polja „B“ na dubini od 1135 m je 123,8 bara (iz:\*), dok početni tlak ležišta „L“ polja „A“ na dubini 1367 m iznosi 157,3 bara (iz:\*\*). Početni tlakovi ležišta polja „A“ i „B“ su veći od hidrostatskoga tlaka, ali se tijekom pridobivanja ležišni tlak smanjio, tj. blizak je hidrostatskom tlaku, pa je prema tome vjerojatnost u potkategoriji „Očuvanje ugljikovodika“ 0,75. Potkategorija „Slojna voda“ za ležišta u zapadnom dijelu Savske depresije iznosi 1,0, jer su akviferi (vodonosni slojevi) mirnih ležišnih voda, tj. nema

značajnijeg prodora slojne vode unutar ležišta. Ukupna vjerojatnost za kategoriju „Očuvanje ugljikovodika“ je 0,75.

*Tablica 7-5. Određene vjerojatnosti (plavi pravokutnici) za kategoriju „Očuvanje ugljikovodika“ (MALVIĆ, 2009b)*

<b>OČUVANJE UGLJIKOVODIKA</b>	
Tlak ležišta	p (dij. jed.)
Veći od hidrostatičkoga	1,00
<b>Približno hidrostatički</b>	<b>0,75</b>
Manji od hidrostatičkoga	0,50
-	0,25
-	0,05
Slojna voda	p (dij. jed.)
<b>Miran akvifer ležišnih voda</b>	<b>1,00</b>
Aktivan akvifer ležišnih voda	0,75
Slojne vode se infiltriraju u ležište iz susjednih stijena	0,50
Akvifer je infiltriran vodom s površine	0,25
-	0,05

#### **7.6. Izračun ukupne geološke vjerojatnosti (POS-a) u širem prostoru struktura „A“ i „B“**

Kategorije koje su deterministički određene od potpoglavlja 7.1. do 7.5. su zbirno prikazane u **tablici 7-6**, dobivene vrijednosti su unijete u **izraz 2.28** za izračun POS-a. Izračunata vrijednost POS-a u širem prostoru struktura „A“ i „B“ iznosi 0,4218, a prema **slici 2-15** dobivena vrijednost je veća od 0,2. Time je opravdan nastavak daljnjih istraživanja (npr. REŽIĆ & VARENINA 2017).

**Tablica 7-6. Određene kategorije (plavi pravokutnici) za ležišta polja „A“ i „B“, tj. zapadni dio Savske depresije**

ZAMKA		LEŽIŠTE		MATIČNE STIJENE		MIGRACIJA		OČUVANJE UGLJIKOVODIKA	
Strukturna zamka	p	Vrste ležišta	p	Matični facijes	p	Pojava ugljikovodika	p	Tlak ležišta	p
Antiklinala i paleouzdignuće povezano sa starijim stijenama.	1,00	Pješčenjak, čist i znatnoga lateralnoga prostiranja; Pz podina predstavljena granitom, gnajsom, gabrom; Dolomiti sa sekundarnom šupljikavošću; Algalni grebeni ispunjeni sa značajnom sekundarnom šupljikavošću, razvijenom zbog okršavanja ili izloženosti (pod)površinskim procesima trošenja.	1,00	Kerogen tipa I i/ili II	1,00	Pridobivanje ugljikovodika	1,00	Veći od hidrostatičkog	1,00
Rasjednuta antiklinala	0,75	Pješčenjak, bogat siltom ili glinom; Stijene Pz i Mz podine sa sekundarnom šupljikavosti, maloga pružanja; Algalni grebeni ispunjeni s fragmentima skeleta s muljem i marinskim cementom.	0,75	Kerogen tipa III	0,75	Ugljikovodici su opaženi u tragovima. Opažen je novi plin koncentracije >10%	0,75	Približno hidrostatički	0,75
Strukturni nos zatvoren rasjedom	0,50	Pješčenjak koji uključuje značajan udjel čestica gline/silta, maloga prostiranja.	0,50	Povoljni paleo-facijesi ua taloženje organske tvari	0,50	Nafta je opažena u jezgrama (luminescentnom analizom, testiranjem jezgri)	0,50	Manji od hidrostatičkog	0,50
Svaka "pozitivna" rasjednuta struktura čije granice nisu točno određene	0,25	Stijene Pz i Mz podine, uključujući nisku sekundarnu šupljikavost i relativno malo prostiranje.	0,25	Regionalno poznati facijesi matičnih stijena, ali nisu dokazani na promatranom lokalitetu.	0,25	Nafta je opažena u tragovima (luminescentnom analizom, testiranjem jezgri)	0,25		0,25
Strukturni sklop nije određen	0,05	Vrsta ležišta nije određena	0,05	Vrsta matičnih stijena nije određena.	0,05	Nisu opaženi ugljikovodici	0,05		0,05
<b>Stratigrafska ili kombinirana</b>	<b>p</b>	<b>Vrijednosti šupljikavosti</b>	<b>p</b>	<b>Zrelost</b>	<b>p</b>	<b>Položaj zamke</b>	<b>p</b>	<b>Slojna voda</b>	<b>p</b>
Algalni greben	1,00	Primarna šupljikavost (>15 %); Sekundarna šupljikavost (>5 %).	1,00	Sedimenti su u katagenskoj fazi ("naftni" prozor ili "vlažnoga" plina	1,00	Zamka je određena unutar dokazanoga migracijskoga puta	1,00	Miran akvifer ležišnih voda	1,00
Pješčenjak koji isključuje	0,75	Primarna šupljikavost (5-15 %); Sekundarna šupljikavost (1-5 %).	0,75	Sedimenti su u metagenskoj fazi	0,75	Zamka se nalazi između dva depocentra matičnih stijena	0,75	Aktivan akvifer ležišnih voda	0,75
Sedimenti izmijenjeni dijagenozom	0,50	Primarna šupljikavost (<10 %); Propusnost ( $1 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	0,50	Sedimenti su u ranoj katagenskoj fazi	0,50	Kratki migracijski put (<10 km)	0,50	Slojne vode se infiltriraju u ležište iz susjednih stijena	0,50
Nagla promjena petrofizikalnih svojstava (zbog gline, promjena facijesa)	0,25	Sekundarna šupljikavost (>1 %)	0,25	Sedimenti su u kasnoj dijagenetskoj fazi.	0,25	Dugi migracijski put (>10 km)	0,25	Akvifer je infiltriran vodom s površine	0,25
Stratigrafski sklop nije određen	0,05	Vrijednosti šupljikavosti nisu određene	0,05	Razina zrelosti nije određena	0,05	Matične stijene nisu određene	0,05		0,05
<b>Kvaliteta izolatorskih stijena</b>	<b>p</b>			<b>Izvor podataka</b>	<b>p</b>	<b>Vrijeme</b>	<b>p</b>		
Regionalno dokazane izolatorske stijene	1,00			Geokemijske analize na jezgrama i fluidima	1,00	Zamka je starija od zrelih matičnih stijena	1,00		
Stijene bez ležišnih svojstava	0,75			Analogija s prostorno bliskim geokemijskim analizama.	0,75	Zamka je mlađa od zrelih matičnih stijena	0,75		
Stijene propusne za plin ("gubitak plina")	0,50			Modeliranje i izračun termijske zrelosti (npr. Lopatin, Waples i dr.)	0,5	Odnos između zamke i matičnih stijena je nepoznat	0,50		
Propusne stijene s mjestimice povećanim udjelom gline/silta	0,25			Modeliranje termijske zrelosti na tek nekoliko lokacija	0,25		0,25		
Izolatorske stijene nisu određene	0,05			Izvor podataka nije određen	0,05		0,05		

## **7.7. Modifikacija POS-a za slučajeve kada se iz pješčenjačkih ležišta pridobiva sekundarnim metodama, primjer za Savsku depresiju**

Većina ležišta naftno-plinskih polja u Savskoj depresiji su u sekundarnoj fazi pridobivanja. Podržavanje ležišnoga tlaka se ostvaruje utiskivanjem slojne vode. U postojećoj strukturi POS-a (npr. MALVIĆ, 2003; MALVIĆ & RUSAN, 2009; REŽIĆ & VARENINA, 2017) pod kategorijom „OČUVANJE UGLJIKOVODIKA“ postoje 2 potkategorije: tlak ležišta i slojna voda. Crpljenje ugljikovodika iz ležišta zrelih naftnih polja je obilježeno visokim udjelom slojne vode (vezane i nevezane) u pridobivenoj kapljevini. Pod pojmom kapljevina podrazumijeva se mješavina vode, nafte i otopljenoga naftnoga plina. Troškovi pridobivanja iz zavodnjenih ležišta ugljikovodika opisani su u radovima IVŠINOVIĆ & DEKANIĆ (2015), IVŠINOVIĆ (2017) i IVŠINOVIĆ (2018a) i ekonomski je isplativo pridobivanje ugljikovodika u slučajevima kada je postotak vode u kapljevini veći od 90 %.

Ako je vrijednost geološkoga POS-a relativno mala, sukladno time i vrijednost modificiranoga POS-a za utiskivanje slojne vode neće značajno odstupati. Potkategorija „SLOJNA VODA“ (**slika 2-14**) je primjenjiva u slučaju određivanja novootkrivenih ležišta. Tijekom pridobivanja ugljikovodika potkategorija „SLOJNA VODA“ je suvišna i ne opisuje slučaj prodora utisnute slojne vode u pridobivnu bušotinu, tj. efikasnost zavodnjavanja ležišta. Sukladno modificiranom POS-u može se izračunati vjerojatnost zavodnjavanja cijeloga ležišta, a također, na razini hidrodinamičkih jedinica, može se izračunati vjerojatnost širenja vodne zone oko utisne bušotine. Kako bi se vrjednovao utjecaj utiskivanja slojne vode na pridobivanje iz ležišta, potrebno je uvesti novu potkategoriju „Utiskivanje slojne vode“ umjesto stare potkategorije „Slojna voda“. Predložena modifikacija „OČUVANJE UGLJIKOVODIKA“ je prikazana u **tablici 7-7**.

**Tablica 7-7. Modifikacija POS-a unutar kategorije „OČUVANJE UGLJIKOVODIKA“ (žuto obojeno napravljena modifikacija, prekríženo prijašnja podjela) za ležišta s primijenjenim sekundarnim metodama pridobivanja.**

OČUVANJE UGLJIKOVODIKA			
Tlak ležišta		p (dij. jed.)	
Veći od hidrostatickoga		1	
Približno hidrostaticki		0,75	
Manji od hidrostatickoga		0,5	
-		0,25	
-		0,05	
Slojna voda		Utiskivanje slojne vode	
p (dij. jed.)		p (dij. jed.)	
Miran akvifer ležišnih voda	1	Povećavanje kapljevine na svim bušotina (>95 %)	1
Aktivan akvifer ležišnih voda	0,75	Povećavanje kapljevine na 75-95 % bušotina	0,75
Slojne vode se infiltriraju u ležište iz susjednih stijena	0,5	Povećavanje kapljevine na 50-75 % bušotina	0,5
Akvifer je infiltriran vodom s površine	0,25	Povećavanje kapljevine na 25-50 % bušotina	0,25
-	0,05	Nema odziva u povećanju kapljevine	0,05

Prema predloženoj modifikaciji u **tablici 7-7** potkategorija utiskivanje slojne vode se dijeli na povećanje kapljevine kod: a) >95 % bušotina, b) 75 - 95 % bušotina, c) 50 - 75 % bušotina, d) 25 - 50 % bušotina i e) nema odaziva. Potkategorije su odabrane sukladno uspješnosti povećanja količine kapljevine u pridobivnim bušotinama.

U strukturi POS-a potrebno je izostaviti kategorije „MATIČNE STIJENE“ i „MIGRACIJA“ jer ležišta su u pridobivanju te su informacije poznate i elaborirane. U **tablici 7-8** prikazana je modificirana struktura POS-a za ležišta na kojima su primijenjene sekundarne metode pridobivanja za donjopontska ležišta zapadnoga dijela Savske depresije.



**Tablica 7-8. Modificirana struktura POS-a za naftno-plinska donjopontska ležišta polja sa sekundarnim načinom pridobivanja ugljikovodika zapadnoga dijela Savske depresije**

ZAMKA		LEŽIŠTE		OČUVANJE UGLJKOVODIKA	
Strukturalna zamka	p	Vrste ležišta	p	Tlak ležišta	p
Antiklinala i paleouzdignuće povezano sa starijim stijinama.	1,00	Pješčenjak, čist i znatnoga lateralnoga prostiranja; Pz podina predstavljena granitom, gnajksom, gabrom; Dolomiti sa sekundarnom šupljikavošću; Algalni grebeni ispunjeni sa značajnom sekundarnom šupljikavošću, razvijenom zbog okršavanja ili izloženosti (pod)površinskim procesima trošenja.	1,00	Veći od hidrostatickoga	1,00
Rasjednuta antiklinala	0,75	Pješčenjak, bogat siltom ili glinom; Stijene Pz i Mz podine sa sekundarnom šupljikavosti, maloga pružanja; Algalni grebeni ispunjeni s fragmentima skeleta s muljem i marinskim cementom.	0,75	Približno hidrostaticki	0,75
Strukturalni nos zatvoren rasjedom	0,50	Pješčenjak koji uključuje značajan udjel čestica gline/silta, maloga prostiranja.	0,50	Manji od hidrostatickoga	0,50
Svaka "pozitivna" rasjednuta strukturalna čije granice nisu točno određene	0,25	Stijene Pz i Mz podine, uključujući nisku sekundarnu šupljikavost i relativno malo prostiranje.	0,25		0,25
Strukturalni sklop nije određen	0,05	Vrsta ležišta nije određena	0,05		0,05
Stratigrafska ili kombinirana	p	Vrijednosti šupljikavosti	p	Utiskivanje slojne vode	p
Algalni greben	1,00	Primarna šupljikavost (>15 %); Sekundarna šupljikavost (>5 %).	1,00	Povećavanje kapljevine na svim bušotina (>95 %)	1,00
Pješčenjak koji isklinjava	0,75	Primarna šupljikavost (5-15 %); Sekundarna šupljikavost (1-5 %).	0,75	Povećavanje kapljevine na 75-95 % bušotina	0,75
Sedimenti izmijenjeni dijagenozom	0,50	Primarna šupljikavost (<10 %); Propusnost ( $1 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	0,50	Povećavanje kapljevine na 50-75 % bušotina	0,50
Nagla promjena petrofizikalnih svojstava (zbog gline, promjena facijesa)	0,25	Sekundarna šupljikavost (>1 %)	0,25	Povećavanje kapljevine na 25-50 % bušotina	0,25
Stratigrafski sklop nije određen	0,05	Vrijednosti šupljikavosti nisu određene	0,05	Nema odziva u povećanju kapljevine	0,05
Kvaliteta izolatorskih stijena	p				
Regionalno dokazane izolatorske stijene	1,00				
Stijene bez ležišnih svojstava	0,75				
Stijene propusna za plin ("gubitak plina")	0,50				
Propusne stijene s mjestimice povećanim udjelom gline/silta	0,25				
Izolatorske stijene nisu određene	0,05				

Vrijednosti potkategorija modificiranoga POS-a s obzirom na izračunati POS za zapadni dio Savske depresije u prethodnom poglavlju su iste u kategorijama „ZAMKA“ (p(z)=0,75) i „LEŽIŠTE“ (p(m)=1,0). Vrijednosti kategorija „MATIČNE STIJENE“ i „MIGRACIJA“ su izostavljene što čini razliku u vrijednosti POS-a. Vrijednost kategorije

„OČUVANJE UGLJIKOVODIKA“ je nepromijenjena i iznosi 0,75. Potkategorija „Utiskivanje slojne vode“ rezultirala je u modificiranom POS-u za sekundarne metode pridobivanja s vjerojatnošću 1,0, jer na poljima „A“ (slike 5-15 i 5-16) i „B“ (slike 6-13 i 6-14) odaziv kapljevine je u više od 95 % bušotina. **Izraz 2.28** je modificiran **izrazom 7.6** za polja s primijenjenim sekundarnim metodama pridobivanja:

$$POS = p(z) \cdot p(l) \cdot p(oCH) \quad (7.6)$$

gdje su:

*POS* – geološka vjerojatnost (rizik),

*p* – vjerojatnost geološkoga događaja,

*p(z)* – vjerojatnost postojanja zamke,

*p(l)* – vjerojatnost s obzirom za ležište,

*p(oCH)* – vjerojatnost s obzirom na očuvanje ugljikovodika.

Sukladno modificiranom **izrazu 7.6** vrijednost POS-a za ležišta istraživanih polja „A“ i „B“ u zapadnom dijelu Savske depresije iznosi 0,5625. Vrijednost modificiranoga POS-a je veća od izračunatoga regionalnoga POS-a, a razlog je izostavljanje kategorije „MATIČNE STIJENE“ čija je vjerojatnost 0,75. Vjerojatnost modificiranoga POS-a u praksi znači da je 56,25 % vjerojatnost kako će utisnute količine slojne vode rezultirati odazivom u povećanju kapljevine u pridobivnim bušotinama. Vrijednost modificiranoga POS-a je jedan od ulaznih podataka prilikom projektiranja zavodnjavanja ležišta. Djelotvornost zavodnjavanja ležišta je u izravnoj ovisnosti o lokalnom geološkom modelu i heterogenosti ležišta.

## 8. RIZIČNO NEUTRALNA VRIJEDNOST MOGUĆIH OTKRIĆA

Projekti s ciljem istraživanja ugljikovodika na postojećim ili novim lokacijama je vrlo rizična aktivnost tvrtki čija je osnovna djelatnost istraživanje i pridobivanje ugljikovodika. Obilježje istraživačkih projekata je precjenjivanje novčane vrijednosti rezervi ugljikovodika u slučaju neuvažavanja mogućeg rizika u projektu. Kako bi se izbjegao takav slučaj potrebno je izračunati rizično neutralnu vrijednost (RNV). Prva primjena izračuna RNV na području HPBS-a načinjena je na primjeru Bjelovarske subdepresije (RUSAN & MALVIĆ, 2009). Primjenom metode RNV-a i POS-a za područje Bjelovarske subdepresije dobiveni su ekonomski i geološki pokazatelji za mogući održivi razvoj istraživanja ugljikovodika na tom području, te su postavljeni standardi za takvu analizu na ostalim dijelovima HPBS-a.

Rizično prilagođena vrijednost izvedena je iz funkcije korisnosti s obzirom na razinu ulaganja i razinu prihvatljivoga rizika. Izvedena vrijednost ovisi o veličini ulaganja, razini rizika te dobiti investitora, a **izraz 8.1** za rizično prilagođenu vrijednost je:

$$RAV = -\frac{1}{r(u)} \cdot \ln \left[ POS \cdot e^{-r(u)(R-C)} + (1-POS) \cdot e^{r(u) \cdot C} \right] \quad (8.1)$$

gdje su:

*RAV* - rizično prilagođena vrijednost,

*R* - ukupna dobit (milijuna USD),

*C* - trošak (milijuna USD),

*POS* - geološka izglednost (dij. jed.),

*e* - matematička konstanta, Eulerov broj,

*r(u)* - prva aproksimacija funkcije korisnosti.

Rizično nesklona funkcija (rtc) je vrijednost koja se uobičajeno uzima 1/5 i 1/6 od ukupnoga godišnjeg proračuna za istraživanje ugljikovodika (MALVIĆ & RUSAN, 2009). Neto sadašnja vrijednost je vrijednost dobivena diskontiranjem razlike prihoda i ulaganja za svaku godinu kroz promatrano razdoblje. Pri izračunu neto sadašnje vrijednosti pretpostavlja se fiksna diskontna stopa umanjena za vrijednost uloženoga kapitala, a **izraz 8.2** glasi:

$$NPV = \frac{NT}{(1+i)^k} \quad (8.2)$$

gdje su:

*NPV* - neto sadašnja vrijednost potencijalnih rezervi,

*NT* - novčani tok (USD),

*i* - diskontna stopa,

*k* - broj godina.

Očekivana monetarna vrijednost je dobit koju ulagač ostvaruje ulaganjem u istraživačke projekte, a **izraz 8.3** glasi:

$$EMV = NPV \cdot (1 - POS) \quad (8.3)$$

gdje su:

*EMV* - očekivana monetarna vrijednost (USD),

*NPV* - neto sadašnja vrijednost potencijalnih rezervi,

*POS* - geološka izglednost (dij. jed.).

Prva aproksimacija funkcije korisnosti je godišnje ulaganje tvrtke u istraživanje i razradbu određenoga područja, a računa se prema **izrazu 8.4**:

$$r(u) = \frac{1}{GU} \quad (8.4)$$

gdje su:

*GU* - godišnja ulaganja (milijuna \$),

*r(u)* - prva aproksimacija funkcije korisnosti.

Rizično neutralni dolari se izračunavaju iz eksponencijalne funkcije koja se umanjuje s obzirom na rizik, a **izraz 8.5** za pretvaranje stvarnih dolara u rizično neutralne dolare je:

$$U(x) = rtc \cdot \left( 1 - e^{\frac{-NPV}{rtc}} \right) \quad (8.5)$$

gdje su:

$U$  - korisne jedinica u milijunima neutralnih RN\$,

$NPV$  - neto sadašnja vrijednost potencijalnih rezervi,

$e$  - matematička konstanta, Eulerov broj,

$rtc$  - rizično nesklona funkcija.

Očekivane jedinice korisnosti su prilagođene vrijednosti uvažavajući geološku vjerojatnost, a očekivane jedinice korisnosti se računaju prema **izrazu 8.6**:

$$EU = U(x) \cdot POS - RAV \cdot (1 - POS) \quad (8.6)$$

gdje su:

$EU$  - očekivane jedinice korisnosti,

$U$  - korisne jedinica u milijunima rizično neutralnih dolara (RN\$),

$POS$  - geološka izglednost (dij. jed.),

$RAV$  - rizično prilagođena vrijednost.

Odgovarajući ekvivalenti su promjenjiva vrijednost koja opisuje korisnost glede moguće dobiti s obzirom na ulaganje, a **izraz 8.7** je:

$$CE = -rtc \cdot \ln\left(1 - \frac{EU}{rtc}\right) \quad (8.7)$$

gdje su:

$CE$  - odgovarajući novčani ekvivalenti u milijunima rizično neutralnih dolara (RN\$),

$rtc$  - rizično nesklona funkcija,

$EU$  - očekivane jedinice korisnosti.

### 8.1. Izračun rizično neutralne vrijednosti za buduće istraživanje u prostoru zapadnoga dijela Savske depresije, na primjeru dokazanih rezervi u poljima „A“ i „B“

Primjer na prostoru polja „A“ (**prilog 3**) i „B“ (**prilog 5**) tj. zapadnom dijelu Savske depresije (**prilozi 7 i 8**) je donjopontsko pješčenjačko ležište (formacija Ivanić Kloštar) koji imaju ukupne geološke rezerve nafte od 556 000 m<sup>3</sup>. Predviđeni iscrpak je pretpostavljen na 30 % (eruptivno pridobivanje i pridobivanje uz pomoć dubinske sisaljke). Prosječna cijena nafte je uzeta 390 \$/m<sup>3</sup> koja je formirana u veljači 2019. godine. Prihodi od prodaje ugljikovodika su ostvareni tijekom 10, 15 ili 20 godina pridobivanja. Troškovi izrade dvije okomite bušotine (jedna istraživačka i jedna potvrдна) su 6,6·10<sup>6</sup> dolara. Buduća neto vrijednost pridobivenih količina ugljikovodika koja služi za izračun neutralne vrijednosti iznosi 59,0·10<sup>6</sup> dolara. U **tablici 8-1** su izračunate vrijednosti od **izraza 8.1** do **izraza 8.7**.

**Tablica 8-1.** Izračunate rizično neutralne vrijednosti novčanoga rizika za više scenarija za zapadni dio Savske depresije

Period pridobivanja (godina)	10	15	20
Diskontna stopa (%)	10	10	10
Neto sadašnja vrijednost (10 <sup>6</sup> \$)	22,74	14,12	8,77
Geološka izglednost (POS)	0,42	0,42	0,42
Očekivana monetarna vrijednost (10 <sup>6</sup> \$)	13,19	8,19	5,09
CAPEX za istraživanje (10 <sup>6</sup> \$)	50	50	50
Rizično nesklona funkcija	10	10	10
Korisne jedinice (10 <sup>6</sup> \$)	8,97	7,56	5,84
Prva aproksimacija funkcije korisnosti	0,02	0,02	0,02
Troškovi izradbe bušotine (10 <sup>6</sup> \$)	6,61	6,61	6,61
Rizično prilagođena vrijednost (\$)	5,87	2,75	0,65
Očekivane jedinice korisnosti (\$)	0,35	1,57	2,07
Odgovarajući ekvivalenti (RN\$)	0,36	1,71	2,32

Proračun je napravljen za tri slučaja pridobivanja: 10 godina, 15 godina i 20 godina; uz diskontnu stopu od 10 % godišnje. Rizično nesklona funkcija je izračunata kao 1/5 od CAPEX (engl. *Capital expenses*, skr. CAPEX) ulaganja u istraživanje i iznosi 10·10<sup>6</sup> dolara.

Prva aproksimacija funkcije korisnosti za ulaganje istraživanje i prema MALVIĆ & RUSAN (2009) za vrijednost godišnjeg ulaganja u istraživanje od 50 milijuna dolara za područje Bjelovarske subdepresije te iznosi 0,02. Zbog sličnosti prostora Bjelovarske subdepresije i zapadnoga dijela Savske depresije u slučaju izračuna (RNV) će se koristiti ista vrijednost prve aproksimacije funkcije korisnosti od 0,02. Kako bi se osigurao očekivani iscrpak od 30 % potreban je duži period pridobivanja, pa će se vrijednosti za 10 i 15 godina pridobivanja uzeti za usporedbu podataka (**tablica 8-1**). Za ležište veličine 556 000 m<sup>3</sup>, vrijednost POS-a od 0,42 za zapadni dio Savske depresije i vrijeme pridobivanja od 20 godina očekivana monetarna vrijednost je 8,77·10<sup>6</sup> dolara. Vrijednost od 2,32·10<sup>6</sup> dolara odgovarajućih ekvivalenata je investicijski maksimum u istraživanom području zapadnoga dijela Savske depresije (**slika 4-1**) s obzirom na godišnji proračun tvrtke za istraživanje ugljikovodika od 50·10<sup>6</sup> dolara uz rizično prilagođenu vrijednost od 42,4 %.

## **8.2. Izračun rizično neutralne vrijednosti za prostor polja „A“ i „B“ uz primjenu prilagođenoga POS-a**

Polja „A“ i „B“ imaju zajednički sustav odvajanja slojne vode od kapljevine, dok za utiskivanje slojne vode u ležište koriste pojedinačni utisni sustav. Pojedinačni utisni sustav podrazumijeva da je svaka bušotina opremljena utisnom opremom i pomoću nje utiskuje odvojenu slojnu vodu u ležište. Metodologija izračuna troškova odvajanja i utiskivanja slojne vode za područje HPBS-a obrađena je u radu IVŠINOVIĆ & DEKANIĆ (2015). Troškovi odvajanja slojne vode na istraživanim poljima obrađeni su u radu IVŠINOVIĆ (2018a) te iznose od 0,68 do 1,37 USD/m<sup>3</sup>. Troškovi utiskivanja slojne vode za pojedinačni utisni sustav (IVŠINOVIĆ, 2017) iznose 8,68 ± 2,00 HRK/m<sup>3</sup>. Troškovi su izračunati na razini ležišta „L“ polja „A“ i ležišta „K“ na polju „B“. Troškovima je dodano i tekuće održavanje opreme. Prilikom izračuna odgovarajućih ekvivalenata korišteni su **izrazi od 8.1 do 8.7**. Promatrano razdoblje zavodnjavanja je deset godina (**slike 5-15 i 6-13**), dok je odaziv u iscrpku ugljikovodika podijeljen na tri razreda: 0,5, 1 i 2 %. Diskontna stopa u sva tri slučaja iznosi 10 %. Godišnja kapitalna ulaganja u pridobivanje ugljikovodika su 35 milijuna dolara. Prosječna cijena nafte je uzeta 390 \$/m<sup>3</sup>, a koja je formirana u veljači 2019. godine. Primijenjeni POS sukladno modificiranom **izrazu 7.2** je 0,5625. Rizično nesklona funkcija je 1/5 od ukupnih godišnjih kapitalnih ulaganja i za oba polja iznosi 7. U **tablici 8-2** prikazana je izračunata rizično neutralna vrijednost novčanoga rizika za ležište „L“ i ležište „K“.

**Tablica 8-2. Izračunate rizično neutralne vrijednosti novčanoga rizika za više scenarija za ležište „L“, polje „A“ i ležište „K“, polje „B“**

Opis:	Ležište „L“			Ležište „K“		
	10	10	10	10	10	10
Period pridobivanja (godina)	10	10	10	10	10	10
Diskontna stopa (%)	10	10	10	10	10	10
Neto sadašnja vrijednost ( $10^6$ \$)	1,50	4,98	10,11	1,12	2,39	4,92
Geološka izglednost (POS)	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Očekivana monetarna vrijednost ( $10^6$ \$)	0,66	2,18	4,42	0,49	1,04	2,15
CAPEX za održavanje pridobivanja ( $10^6$ \$)	35	35	35	35	35	35
Rizično nesklona funkcija	7	7	7	7	7	7
Korisne jedinice ( $10^6$ \$)	1,34	3,56	5,34	1,03	2,02	3,54
Prva aproksimacija funkcije korisnosti	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Troškovi pridobivanja ugljikovodika ( $10^6$ \$)	0,58	0,78	1,17	0,45	0,51	0,64
Rizično prilagođena vrijednost (\$)	0,26	2,03	4,46	0,12	0,78	2,07
Očekivane jedinice korisnosti (\$)	0,64	1,11	1,05	0,52	0,79	1,08
Odgovarajući ekvivalenti (RN\$)	0,68	1,21	1,15	0,55	0,84	1,17

Neto sadašnja vrijednost je rasla u oba slučaja sukladno povećanju kapljevine, a time i povećanju konačnoga iscrpka nafte za navedena ležišta. Neto sadašnja vrijednost je najveća za oba slučaja kada je odziv u iscrpku 2 %, te za ležište „L“ iznosi  $10,11 \cdot 10^6$  dolara, dok za ležište „K“ iznosi  $4,92 \cdot 10^6$  dolara. To je očekivan rezultat s obzirom na povećanje pridobivenih količina ugljikovodika, a posljedično time i prihoda. Očekivana monetarna vrijednost je najveća u slučaju povećanja iscrpka i iznosi  $4,42 \cdot 10^6$  dolara (ležište „L“) i  $2,15 \cdot 10^6$  dolara (ležište „K“). Također, korisne jedinice su najpovoljnije u trećem slučaju i iznose  $5,34 \cdot 10^6$  dolara za ležište „L“ i  $3,54 \cdot 10^6$  dolara za ležište „K“.

Vrijednost od  $1,21 \cdot 10^6$  dolara odgovarajućih ekvivalenata za ležište „L“ pri povećanju iscrpka od 1 % je investicijski maksimum u istraživanom području s obzirom na godišnji proračun tvrtke za održavanje pridobivanja ugljikovodika od  $35 \cdot 10^6$  dolara uz rizično prilagođenu vrijednost od 55,5 %. Za ležište „K“ pri povećanju iscrpka od 2 % dobiva se  $1,17 \cdot 10^6$  dolara odgovarajućih ekvivalenata za investicijski maksimum u održavanje pridobivanja ugljikovodika od  $35 \cdot 10^6$  dolara za rizično prilagođenu vrijednost od 54,4 %.



## 9. RASPRAVA O GLAVNIM PREDNOSTIMA I NEDOSTATCIMA UPORABLJENIH METODA I DOBIVENIH REZULTATA

Prijašnja istraživanja miocenskih ležišta ugljikovodika u Savskoj depresiji su različito odredila veličinu ulaznoga skupa za različite vrste varijabli tj. izmjerenih točaka. Prema MALVIĆ (2012b) i MESIĆ KIŠ & MALVIĆ (2014) minimalni broj podataka za primjenu metode krigiranja je 20 ili više „čvrstih“ podataka, što je ujedno granica za mali ulazni skup podataka. Također, NOVAK ZELENKA et al. (2013) i HUSANOVIĆ & MALVIĆ (2014) odredili su skup ulaznih podataka od 15 dovoljnim za primjenu metoda inverzne udaljenosti i najbližeg susjedstva za HPBS-a. Primjena metode inverzne udaljenosti na ležištima polja Beničanci i Stari Gradac (MALVIĆ & ĐUREKOVIĆ 2003; SMOLJANOVIĆ & MALVIĆ 2005; MALVIĆ 2008c), a oba polja se nalaze unutar Dravske depresije. Metoda najbližeg susjedstva je primijenjena na ležištima polja Kloštar (BALIĆ et al. 2008) u Savskoj depresiji. SHAHBEIK et al. (2014) su primijenili metodu inverzne udaljenosti u slučaju rudnika željeza Dardevey (Iran) i napravili usporedbu su metodom običnoga krigiranja, dok je istu analizu (AFZAL, 2018) primijenio na slučaju rudnika ugljena u istočnom Parvadehu (Iran). BUHNIA et al. (2016) su primijenili metodu inverzne udaljenosti i izračunali vrijednost krosvalidacije za dubinu tla na bloku Medinipur (Indija). KAMIŃSKA & GRZYWNA (2014) su primijenili metodu IU na 15 podataka razine podzemnih voda u mjestu Sosnowica (Poljska). HOFSTRA et al. (2008) su upotrijebili izračun krosvalidacije za šest metoda za klimatske podatke Europe. BABAK & CLAYTON (2008) su usporedili metodu IU s jednostavnim i običnim krigiranjem za 3, 6, 12 i 24 podataka. Ovi navedeni primjeri prezentiraju primjene interpolacijskih metoda sa sličnom problematikom u dubinskogeološkim kartiranjima.

U ovome istraživanju su primijenjene metode inverzne udaljenosti, najbližeg susjedstva i prirodnoga susjedstva za ležišta „L“ i „K“ koja se nalaze u zapadnom dijelu Savske depresije. Karte dobivene metodom inverzne udaljenosti (IU) pokazuju jasnu prijelaznu zonu, posebno za varijablu utisnih količina. Na takve zone mogu utjecati rasjedi, kao npr. promjenu distribucije propusnosti za ležište „L“ (**slika 5-5**, rasjedi C,D, skupina F), ili u ležištu „K“ (**slika 6-5**, rasjed A). Slična situacija može se opaziti za utisne volumene na **slici 5-5**. Rezultati interpolacije za ležište „K“ (**slika 6-5**, IU, volumeni) jasno pokazuju efekte izražene lokalne vrijednosti (kružno, engl. *bull-eyes* ili elipsoidno, engl. *butterfly*). Takve pojave su posljedica malog ulaznog skupa podataka i trebaju se pažljivo interpretirati,

ne prihvatiti ili ponovno interpolirati (MALVIĆ et al., 2019b). Nedostatak metode inverzne udaljenosti je linearno skaliranje u prijelaznoj zoni između dvije izmjerene točke. Dubinskogeološki gledano takav slučaj bi bio moguć u homogenim ležištima, ali u stvarnosti ona su izotropna, češće anizotropna i vrlo često rasjednuta.

Metoda najbližeg susjedstva (NS) rezultira kartama s poligonima tj. zonama. To omogućuje brzi pregled širenja vodne fronte, ali u slučajevima kada su nepropusne rasjedne zone (npr. rasjedi C, D, skupina F, IU **slika 5-5**). Postoje i slučajevi kada dobiveni poligoni prelaze rasjedne zone (rasjed A, NS, **slika 6-5**), što za posljedicu ima dvosmislenu interpretaciju, pogotovo u slučajevima nepoznavanja propusnosti rasjeda. Sljedeći nedostatak metode NS je nepostojanje prijelazne zone između pojedinih bušotina što predstavlja problem u slučajevima maloga broja bušotina/poligona (volumeni, **slika 6-5**). Poligonalna metoda eliminira efekt izražene lokalne vrijednosti, ali može pomoći pri interpretaciji utjecaja rasjeda. Rasjed A (**slika 6-5**) utječe na distribuciju propusnosti, tj. on je stariji nego samo ležište, ali rasjed A nije odredio širenje vodne fronte kao što je moguće pretpostaviti s kartama interpoliranim najbližim i prirodnim susjedstvom. Sličan slučaj može se vidjeti na **slici 5-5** (rasjedi C, D, skupina F; ID, NS), gdje se većina granica poligona propusnosti djelomično određeno, ali se ne određuju čvrste granice utisnutih volumena.

Važna razlika metode prirodnoga susjedstva (PS) naprema ostalim metodama je nekorištenje ekstrapolacije, tj. interpolacija se odvija unutar graničnih točaka (**slika 5-5** i **slika 6-5**). Unutar interpolacijskoga područja interpolira se prijelazna zona, isto kao metodom IU. Općenito metoda nije primjenjiva za podatke manje od 5 točaka, zato jer algoritam uzrokuje malu površinu u kojoj se računa procjena (interpolacija).

Ukupni utisni volumeni slojne vode, a s time neizravno kretanje vodne fronte, najbolje se uočavaju na kartama interpoliranim IU metodom (**slika 5-5** i **slika 6-5**). Poligonalna metoda u slučaju dviju točaka nije primjenjiva što se može vidjeti na **slici 6-5** (drugi red, NS, volumeni) gdje su dvije susjedne bušotine J-166 i J-173 odvojene linijom, koja nije moguća u stvarnom izotropnom pješčenjačkom ležištu na udaljenosti manjoj od 400 m. Temeljem povijesnih podataka o pridobivanju, prijelazna zona između dvije bušotine je određena razlikom u utisnim volumenima od 50 000 m<sup>3</sup>. Za navedene primjere sve karte su nastale interpoliranjem s malim ulaznim skupom podataka. Takvim skupom se smatra onaj s manje od 20 „čvrstih“ podataka (rijetko do 50 podataka, kada je izraženo grupiranje), a na kojima se ne može primijeniti naprednija metoda krigiranja zbog nemogućnosti dobivanja pouzdanoga variogramskoga modela.

Mali ulazni skup podataka, u dijelu ovdje prikazanih analiza, je podijeljen u tri razreda: (a) 1-5, (b) 6-10 i (c) 11-19 podataka (npr. MALVIĆ et al. 2019b). Razred (a) se ne može analizirati metodom prirodnoga susjedstva, jer nije moguće izračunati krosvalidaciju i interpolirana površina je znatna manja nego što je istraživana površina. Za razred (b) sve tri metode (inverzne udaljenosti, prirodnoga i najbližeg susjedstva) daju rezultate kao i za razred (c). Glavni kriterij odabira je vrijednost krosvalidacije. U svim slučajevima metoda inverzne udaljenosti (**tablice 6-5 i 5-5**) je najprihvatljivija. Međutim, ova metoda nekad stvara unutar prijelazne zone efekt izražene lokalne vrijednosti. Primjena analiziranih metoda za mali ulazni skup podataka je dana sumarno u **tablici 9-1**.

**Tablica 9-1.** Preporučene metode za mali ulazni skup podataka

Broj podataka	Primijenjena interpolacijska metoda		
	Inverzne udaljenosti	Najbližega susjedstva	Prirodnoga susjedstva
1-5	Da	Da	Ne
6-10	Da	Da	Da
11-19	Da	Da	Da

Analizirana ležišta „L“ (polje „A“) i ležište „K“ (polje „B“) mogu se interpolirati metodom inverzne udaljenosti za volumene ili površine manje od 20 „čvrstih“ točaka. Ako dobivene karte s metodom IU imaju veliki broj izraženih lokalnih vrijednosti, preporuča se i interpolacija metodom najbližeg susjedstva.

Metoda krigiranja ima dugu povijest primjene na području HPBS-a. MALVIĆ (2008a) zaključuje kako je metoda krigiranja najprimjernija metoda za kartiranje šupljikavosti Savske depresije, temeljem rezultata kartiranja pješčenjaka Savske depresije i iznosima krosvalidacije. MALVIĆ & BASTAIĆ (2008) su za podatke ležišta polja Stari Gradec-Barcs Nygat (Dravska depresija) primijenili prvi put metodu ponovljenoga uzorkovanja za dobivanje pouzdanih variogramskih modela za ležišne varijable. Za hrvatski dio PBS-a MALVIĆ & BALIĆ (2009) su opisali najčešće primijenjene metode krigiranja (jednostavni, obični i indikatorski) te odredili Lagrangeovu vrijednost za izračun algoritma običnoga krigiranja. Kriterije za odabir između metoda krigiranja, kokrigiranja i stohastike je opisao MALVIĆ (2008b) za područje HPBS-a. Primjena geostatistike na detaljnom

geološkom modelu ležišta polja Kloštar Ivanić je obrađen u radu NOVAK ZELENIKA (2012), kao primjer tipskoga taložnoga modela gornjomiocenskih ležišta u Savskoj depresiji. NOVAK MAVAR (2015) je primijenila metode običnoga krigiranja, indikatorskoga krigiranja i stohastike u svrhu određivanja skladišnoga kapaciteta CO<sub>2</sub> u ležišta polja Ivanić.

Postoje brojni radovi koji obrađuju geostatističku i geomatematičku teoriju te primjenu u praksi. Na primjer, autori GRINGARTEN & DEUTSH (1999) su predložili proceduru od dva koraka za interpretaciju variograma za modele ležišta ugljikovodika, vezanu uz varijable litofacijesa, šupljikavosti itd. Zaključno u radu je prikazana ukupna varijanca analiziranih varijabli podijeljena u dvije regionalne varijance. Isti autori (GRINGARTEN & DEUTSH, 2001) su dokazali čvrstu ovisnost između pouzdanosti variogramskoga i taložnoga modela ležišta. Posebno je naglašen utjecaj geološke anizotropije kao odraza taložnoga okoliša. AL-MUHAFAR (2018) je opisao metodu koja povezuje podatke jezgara bušotina i podatak iz karotažnih dijagrama za određivanje propusnosti ležišta. Obično krigiranje i kokrigiranje je primijenjeno na više ulaznih podataka facijesa i pješčenjaka na polju South Rumaila (Irak). Propusnost je interpolirana koristeći podatke o šupljikavosti ležišta i obično krigiranje. Nakon toga napravljena je variogramska analiza propusnosti jezgara i šupljikavosti. Rezultati su provjereni krosvalidacijom i vizualnim pregledom dobivenih rezultata. Svi ovi prethodno opisani radovi su analizirani sa svrhom rješavanja maloga ulaznoga skupa podataka, karakterističnih za većinu struktura u Savskoj depresiji.

U oba analizirana ležišta rezultati izvornoga variograma vrlo su nesigurni, s velikim oscilacijama i malim brojem parova podataka. Posljedično, linearni model je jedini prihvatljiv teorijski model. Međutim, veći broj podataka je dobiven uporabom ponovljenoga uzorkovanja. Rezultati su novi variogrami koji se mogu aproksimirati pouzdanijim i matematičkim naprednijim eksponencijalnim ili Gaussovim modelom. Karte dobivene krigiranjem uz pomoć metode ponovljenoga uzorkovanja pouzdanije su provjerene i ocijenjene na sljedeći način:

- a) vizualno (karte bez izražene lokalne vrijednosti, engl. *bull-eyes* ili *butterflies*, su primjerene),
- b) brojčano, koristeći vrijednost krosvalidacije.

Efekt izražene lokalne vrijednosti ukazuje na proturječje između podataka i prostornoga kontinuiranoga modela. Takva proturječja su rezultat algoritma koji omogućava postojanje dvije konturne crte iste vrijednosti na istoj točki ili struktura, poglavito antiklinala

ili sinklinala, čija su krila predstavljena iznimno velikim brojem stratoizohipsi, što zbog fizike stijena u prirodi nije moguće (dolazi do pucanja i rasjedanja). Vjerojatnost takvoga događaja je gotovo nikakva. Ova dva efekta (oba su slična, „bull-eyes“ (kružni) i „butterfly“ (elipsoidni) ukazuju na pogrešku u primijenjenom algoritmu zbog maloga ulaznoga skupa podataka (doseg variograma). Zbirno rezultati dati u **tablici 9-2** ukazuju na sljedeće:

- Kada je eksperimentalni variogram opisan s velikim nesigurnostima, preporučuje se uporaba metode ponovljenoga uzorkovanja s ponovljenom variogramskom analizom i primjenom metode običnoga krigiranja.
- Svaku kartu dobivena prvobitnim podacima ili nakon primjene metode ponovljenoga uzorkovanja potrebno je vizualno provjeriti. Ako postoji jedan ili više pojava izražene lokalne vrijednosti dobivena karta treba se odbaciti.
- Ako su obadvije karte (prvobitna i ona nakon metode ponovljenoga uzorkovanja) vizualno i geološki prihvatljive, odabir se temelji na vrijednosti krosvalidacije.
- Za mali skup ulaznih podataka (manji od 15) preporuča se primjena metode inverzne udaljenosti te usporedba s kartom dobivenom metodom običnoga krigiranja.

**Tablica 9-2.** Usporedba vrijednosti krosvalidacije za karte dobivene običnim krigiranjem iz prvobitnoga variograma i nakon primjene metode ponovljenoga uzorkovanja

<b>POLJE/LEŽIŠTE</b>	<b>IZVORNI VARIOGRAM</b>	<b>VARIOGRAM NAKON METODE PONOVLJENOGA UZORKOVANJA</b>	<b>PREPORUKE</b>
„A“/“L“	0,000676 (linearan)	0,000420 (ekspencijalan)	Karta dobivena s krigiranjem s izvornim variogramom ili metodom inverzne udaljenosti. Efekt izraženih lokalnih vrijednosti eliminirana kartu dobivenu metodom ponovljenoga uzorkovanja.
„B“/“K1“	0,001320 (linearan)	0,000970 (Gauss)	Karta dobivena s primjenom metode ponovljenoga uzorkovanja.

Prvi izračun geološke izglednosti (POS) u HBPS za područje Bjelovarske subdepresije je izračunao MALVIĆ (2003) za pješčenjake Poljana te je iznio 0,57. Za isto područje autori MALVIĆ & RUSAN (2007; 2009) izračunavaju regionalni POS koji iznosi za gornjomiocenske pješčenjake 0,13, a za temeljne stijene i miocenske breče 0,28. LUTGER et al. (2005) su upotrijebili POS za nova istraživanja plinskih polja na području Nizozemske. SALELEH et al. (2007) su primijenili metodu izračuna POS-a na primjeru istraživačkoga prostora u južnom Meksiku. Stohastički pristup u determinističkom izračunu POS-a je teoretski obradio i primijenio na primjeru prostora Dravske depresije autor MALVIĆ (2009b). Autori VRBANAC et al. (2010) su izračunali POS za područje zapadnoga dijela Savske depresije za formaciju Ivanić-Grad. Primjenu izračuna POS-a na slabo propusnim neogenskim litofacijesima u sjevernoj Hrvatskoj su izračunali autori MALVIĆ et al. (2014). Modifikaciju POS-a u svrhu kapaciteta skladištenja CO<sub>2</sub> u sjevernoj Hrvatskoj (npr. NOVAK MAVAR, 2015; GAURINA-MEĐIMUREC & NOVAK MAVAR, 2017). Unaprjeđenje stohastičke metodologije pri izračunu POS-a su opisali i primijenili na prostoru Dravske depresije autori MALVIĆ & VELIĆ (2015). MALVIĆ et al. (2016) su odredili vrijednost POS-a u širem području ležišta plinskih polja Ivana i Ika (sjeverni Jadran). Autori REŽIĆ & VARENINA (2017) su izračunali POS za hrvatski dio Po depresije (sjeverni Jadran).

Metoda POS-a je deterministička metoda. Određivanje pojedinih kategorija i potkategorija unutar metodologije izračuna POS-a je vrlo zahtjevno i potrebno je argumentirano i pažljivo odrediti pojedine vrijednosti kategorije/potkategorije. U slučaju pogrješnoga odabira vjerojatnosti može doći do nesigurnosti izračuna pošto je vrijednost pojedinačna, a ne intervalna. Preciznost determinističkoga pristupa je u izravnoj ovisnosti o prikupljenim podacima s terena, zakonitostima između njih te prijašnjim objavljenim radovima o istraživanom prostoru. Argumentacija vrijednosti pojedinih kategorija/potkategorija vjerojatnosti je temelj kvalitetnoga odabira vrijednosti vjerojatnosti, jer se uklanjaju moguće nesigurnosti. Naravno, izračunati POS je rizična kategorija i olakšava shvaćanje rizika prilikom istraživanja mogućih novih rezervi ugljikovodika. Što se točnije odredi vrijednost POS-a u istraživačkim projektima, smanjuje se ukupni rizik prilikom ulaganja u te projekte. U razradbenim projektima metodu POS-a, prvotno oblikovanu za otkriće novih ležišta ugljikovodika, potrebno je prenamijeniti. To je učinjeno u potpoglavlju 8.2. Kod prilagođenoga POS-a smanjena je mogućnost pogrješke, a time rizika, jer su kategorije „MATIČNE STIJENE“ i „MIGRACIJA“ nepotrebne kod analize efikasnosti zavodnjavanja i predviđanja budućeg iscrpka. Uostalom, radi se o ležištima u kojima se pridobivaju ugljikovodici te istraživački rizik više ne postoji. Tu je prilagodba napravljena

unutar potkategorije „SLOJNA VODA“ koja je zamijenjena novom potkategorijom „UTISKIVANJE SLOJNE VODE“. Nova potkategorija je podijeljena s obzirom na odaziv kapljevine na pridobivnim bušotinama na: a) >95 % bušotina, b) 75 - 95 % bušotina, c) 50 - 75 % bušotina, d) 25 - 50 % bušotina i e) nema odaziva. Takva prilagodba POS-a je logična s obzirom na primjenu sekundarnih metoda pridobivanja u zapadnom dijelu Savske depresije. Uvođenjem nove potkategorije povećava se nesigurnost odabira prave vjerojatnosti za ovu potkategoriju. Stoga je analiziran prostor u kojem se ležišta zavodnjavaju, kako bi se pravilno odabrala vjerojatnost potkategorije. Analiza načinjena u poljima „A“ (ležište „L“) i „B“ (ležište „K“) u zapadnom dijelu Savske depresije je primjer takvoga pristupa prilikom utvrđivanja zavodnjavanja ležišta. Modifikacijom POS-a za ležišta gdje su primijenjene metode povećavanja iscrpka utiskivanjem slojne vode dobiva se egzaktan podatak o uspješnosti zavodnjavanja, a time i kvalitetan ulazni podatak pri ekonomskoj ocjeni razradbenih projekata.

Upravljanje rizikom je temeljna zadaća svake kompanije koja se bavi istraživanjem i pridobivanjem ugljikovodika. COZZOLINO (1977) je primijenio rizik za osnovne ekonomske izračune prilikom odluke za investicije u istraživanju i pridobivanju ugljikovodika. ROSE (1987) je prvi upotrijebio aproksimaciju funkcije korisnosti pri izračunu rizično prilagođene vrijednosti. MALVIĆ et al. (2007) su opisali proračun za izračun neutralne vrijednosti i primjenu algoritma u paketu JAVA™ za primjere u Dravskoj depresiji. MALVIĆ & RUSAN (2009) su primijenili POS i izračun rizično neutralne vrijednosti na primjeru Bjelovarske subdepresije za gornjomiocenska pješčenjačka ležišta. Relativno mali broj literaturnih navoda je naveden u takvim radovima, zbog tajnosti podataka tvrtki koja se bave pridobivanjem i istraživanjem ugljikovodika. Navedeni radovi uporabljeni su kao teorijska podloga za izračun rizično neutralne vrijednosti.

Odgovarajući ekvivalenti dobiveni su za istraživački POS prostora zapadnoga dijela Savske depresije, ali i za prilagođeni POS pješčenjačkih ležišta u sekundarnoj fazi pridobivanja, tj. na primjeru ležišta „L“ i „K“. Razdoblje koje je promatrano pri izračunu odgovarajućih ekvivalenata za vrijednost istraživačkoga POS-a je 10, 15 i 20 godina pridobivanja ugljikovodika iz ležišta. Proračun za istraživanja ugljikovodika u zapadnom dijelu Savske depresije je 50 milijuna dolara, što je u korelaciji s vrijednošću koju su za Bjelovarsku subdepresiju predložili MALVIĆ & RUSAN (2009), a koji je prostor volumenom neogena usporediv sa zapadnim dijelom Savske depresije. Najbolji slučaj je onaj čija je vrijednost odgovarajućih ekvivalenata najveća. U slučaju izračuna odgovarajućih ekvivalenata (**tablica 8-1**) za POS istraživačkoga prostora zapadnoga dijela Savske depresije,

uzeto je 20 godina pridobivanja ugljikovodika uz 2,32 milijuna rizično neutralnih dolara te očekivanu monetarnu vrijednost od 5,09 milijuna dolara. Istraživanje ugljikovodika u ovim uvjetima je isplativo s obzirom na očekivani rizik. Naravno, rizik se može smanjiti udruživanjem dviju ili više tvrtki, jer se tada ukupni rizik dijeli.

Izračun odgovarajućih ekvivalenata za rizik modificiranoga POS-a ležišta u sekundarnoj fazi pridobivanja je izračunat za razdoblje od deset godina pridobivanja ugljikovodika iz ležišta polja „A“ (slike 5-13, 5-14, 5-15 i 5-16) i „B“ (slike 6-13 i 6-14). Vrijednost kapitalnih ulaganja tijekom deset godina pridobivanja ugljikovodika je iznosila 35 milijuna kuna, a prema kriteriju vrijednosti odgovarajućih ekvivalenata prema **tablici 8-2** najpovoljniji slučaj za ležište „L“ je povećanje iscrpka ugljikovodika od 1 % za promatrano razdoblje, dok je za ležište „K“ povećanje iscrpka ugljikovodika 2 %. Prema rezultatima odgovarajućih ekvivalenata za ležište „L“ od 1,21 milijuna rizično neutralnih dolara i za ležište „K“ od 1,17 milijuna, te vrijednosti čini isplativim ulaganje tvrtki u daljnje pridobivanje iz ovih ležišta. Prema rezultatima izračuna neutralne vrijednosti za ležišta „A“ i „B“ može se zaključiti kako se takav izračun može primijeniti za sve strukture zapadnoga dijela Savske depresije. Tom metodologijom ekonomskoga izračuna određuje se rizik i donose daljnje poslovne odluke za nastavak pridobivanja iz istraživanoga prostora. Dobiveni rezultati i njihova ovisnost o metodama ukazuje na sljedeće:

1. Podatci o geološkim varijablama su dobiveni iz različitih izvora. Podatci o šupljikavosti ležišta „L“ i „K“ dobiveni su laboratorijskim mjerenjem i/ili interpretacijom karotažnih krivulja (mjerenje otpornosti, krivulje gustoće i neutronska karotaža; **tablice 5-2 i 6-2**). Propusnost ležišta „L“ i „K“ određena je laboratorijskim mjerenjima na jezgrama (**tablice 5-3 i 6-3**). Volumeni utisnute slojne vode dobiveni su iz pridobivnih količina polja „A“ ležište „L“ i polja „B“ i ležište „K“. Prikupljeni podatci o istraživanim ležištima „L“ i „K“ pripadaju malom skupu podataka (<20). Sukladno tome, statističke i geostatističke metode se moraju primjenjivati prilikom prostornoga prikaza istraživanih geoloških varijabli (šupljikavost, propusnost, utisnuti volumeni itd.).
2. Kako podatci nisu jednoznačni, jer ih je često malo (<20), problemi proizlaze i iz algoritama. Metoda najbližeg susjedstva daje karte s poligonima tj. zonama. Algoritam izračuna metode NS je poligon koji se aproksimira s točkom u središtu, a u slučaju promjene njena položaja unutar poligona zadržava istu vrijednost na približno istom području. Stoga primjena ove metode u kombinaciji s drugim interpolacijskim metodama može rezultirati rezultatima koji služe za brzi uvid u približno područje s velikom vjerojatnošću prikazane vrijednosti. Metoda inverzne udaljenosti između interpoliranih



vrijednosti okonturuje prijelaznu zonu, što je njezina glavna prednost u usporedbi s ostalim metodama za „male“ skupove. Nedostatak se može iskazati u prevelikim prijelaznim zonama, gdje linearnost prijelaza vjerojatno ne odgovara prirodi prave promjene istih. Također, njezin algoritam se najčešće rabi s pravilom da utjecaj podatka opada s kvadratom njegove udaljenosti od točke procjene. Teško je prihvatiti kako to uvijek dobro aproksimira prirodu promjene vrijednosti geoloških varijabli, čak i u pješčenjačkim ležištima, posebice onima s (taložnom) anizotropijom. Sljedeća metoda prirodnoga susjedstva interpolira unutar izmjerenih podataka, ali ne ekstrapolira van njih što je veliki nedostatak te metode ako se primjenjuje za skupove s malim brojem podataka. Na kraju, krigiranje je napredna interpolacijska metoda, koju je moguće je primijeniti na malom skupu podataka, ali uz oprez. Taj oprez iskazan je primjenom metode ponovljenoga uzorkovanja.

3. Za sve primijenjene interpolacijske metode u ovom istraživanju potrebno je zadovoljiti sljedeće kriterije odabira:
  - a) vizualne (karte bez izražene lokalne vrijednosti, engl. *bull-eyes* ili *butterflies*),
  - b) broječani na temelju vrijednosti krosvalidacije (najmanja vrijednost).
4. Izračunom POS-a u poljima „A“ i „B“, na primjeru ležišta formacije Kloštar Ivanić, dobiven je regionalni iznos POS-a za prostor zapadnoga dijela Savske depresije. Napravljena je prilagodba izračuna POS-a za ležišta u sekundarnoj fazi pridobivanja. Kako su pojedine kategorije i potkategorije POS-a deterministički određene, bila je potrebna sustavna analiza podataka o istraživanom prostoru. Time se smanjio rizik pogreške, a vrijednost POS-a točna i vjerodostojna.
5. Izračun rizično neutralne vrijednosti na primjeru istraživačkoga i prilagođenoga POS-a za područje zapadne Savske depresije ukazuje veliki utjecaj rizika na istraživanje i pridobivanje ugljikovodika. Rezultati su ukazali kako u istraživanom prostoru je moguće ocijeniti godišnji iznos za istraživanje i razradbu od 50 milijuna dolara dovoljnim za rad u zapadnom dijelu Savske depresije. On može biti i manji ako se udruže dvije ili više tvrtki u takvom pothvatu. Nadalje, u slučaju pridobivanja iz ležišta s primijenjenim sekundarnim metodama izračunata rizično neutralna vrijednost se ukazala pozitivnom čak i za manji iznos. Tada je potreban godišnji budžet za daljnju razradbu 35 milijuna dolara.

## 10. ZAKLJUČAK

Analizirana su dva ležišta naftno-plinskih polja „A“ i „B“ koja se nalaze u zapadnom dijelu Savske depresije. Odabrana polja „A“ i „B“ i ležišta „L“ i „K1“ predstavljaju tipске gornjomiocenske pješčenjake Savske depresije. U njima udio pješčanoga detritusa iznosi 50-72 %, a šupljikavost 14,5-23,9 % (polje „A“) i 21,7-31,5 % (polje „B“). Prostor je ograničen volumenom formacije Kloštar Ivanić te površinom zapadnoga dijela Savske depresije. Za polje „A“ (ležište „L“) i polje „B“ (ležište „K“/hidrodinamička jedinica „K1“) opisani su: a) strukturni odnosi u ležištu, b) podatci o granulometrijskom sastavu, šupljikavosti, zasićenju i propusnosti pješčenjačkih ležišta, c) strukturni odnosi hidrodinamičkih jedinica te njihov odraz u pridobivanju iz tih jedinica, d) variogramska analiza, primjena interpolacijskih metoda te metode ponovljenoga uzorkovanja, e) korelacija šupljikavosti i propusnosti ležišta i f) zavodnjavanje ležišta. Prilikom analize zavodnjavanja ležišta, a u cilju povećanja konačnoga iscrpka, uz analizu strukturnih geoloških karata, karata efektivnih debljina, podataka iz hidrodinamičkih mjerenja i karotažnih mjerenja, primjena geomatematičkih alata (interpolacijske metode, variogramska analiza, obično krigiranje, ponovljeno uzorkovanje) u analizi ležišta znatno je unaprijedila razumijevanje ležišta kroz dobivanje novih geoloških karata analiziranih varijabli. Rezultati omogućuju projektiranje koje u budućnosti može omogućiti veći ukupni iscrpak.

Metode inverzne udaljenosti, najbližeg i prirodnoga susjedstva su odabrane za mali ulazni skup podataka (<20) za varijable šupljikavost, propusnost i utisnuti volumen za donjopontska ležišta „L“ i „K“. Analizirane su rezultati s obzirom na vrijednost krosvalidacije i vizualnoga izgleda (karte bez izražene lokalne vrijednosti, engl. *bull-eyes* ili *butterflies*) dobivenih karata. Na osnovu toga napravljena je podjela maloga ulaznoga skupa brojeva na tri razreda skupa s preporukama primjene. Za mali broj podataka (>20) primjena metode najbližeg susjedstva i inverzne udaljenosti su primjenjive i međusobno se nadopunjuju, a sve ovisi o analiziranim geološkim varijablama (šupljikavost i propusnost). Metoda običnoga krigiranja je primijenjena za ulazni skup podataka veći od 20 i to nakon izradbe variograma metodom ponovljenoga uzorkovanja za šupljikavost ležišta „L“ i „K“.

Metoda ponovljenoga uzorkovanja je primijenjena za kartiranje šupljikavosti pješčenjačkih ležišta. Primjena te metode je povećala ulazni skup podataka za izračun variogramskoga modela za donjopontsko ležište „L“ s 158 parova podataka (**slika 5-7**) na 10 217 parova podataka (**slika 5-9**). Također se promijenio eksperimentalni variogramski

model u slučaju ležišta „L“ (iz linearnoga modela u eksponencijalni model, promjena dosega s 180 na 170) i „K“ (iz linearnoga modela u Gaussov model, promjena dosega sa 110 na 70). Dobivene interpolacijske karte metodom običnoga krigiranja zatim su prošle provjeru krosvalidacijom i vizualnim pregledom. Interpolirane karte dobivene nakon primjene metode ponovljenoga uzorkovanja imaju manju vrijednost krosvalidacije (ležište „L“ (0,00420); ležište „K“ (0,0009704)), što znači vizualno kvalitetnije karte od interpoliranih karata bez primjene metode ponovljenoga uzorkovanja (ležište „L“ (0,000676); ležište „K“ (0,00131)). Zbog zajedničkih geoloških karakteristika donjopontskih ležišta „L“ i „K“ s ostalim donjopontskim ležištima zapadnoga dijela Savske depresije unutar formacije Kloštar Ivanić, rezultati variogramskoga modeliranja mogu se primijeniti.

Izračun geološke izglednosti (engl. *Probability of Success*, skr. *POS*) je primijenjen na istraživačkom prostoru u kojem su smještene i naftno-plinska polja „A“ i „B“. Vrijednost istraživačkoga POS-a formacije Kloštar Ivanić za zapadni dio Savske depresije, tj. u širem prostoru struktura „A“ i „B“, iznosi 42,18 %. Očekivana veličina mogućih novih otkrića su geološke rezerve ugljikovodika od 500 000 m<sup>3</sup> (strukturne karte ležišta „L“ i „K“; strukturne karte u prilogima 7 i 8) što je manje od geoloških rezervi nafte HJ K1 od 750 000 m<sup>3</sup>. Za ležišta polja „A“ i „B“ načinjena je i prilagodba izračuna POS-a tijekom sekundarne faze pridobivanja ugljikovodika. Prilagodba metodologije izračuna POS-a za ležišta u sekundarnoj fazi pridobivanja napravljena je na način da su izostavljene kategorije „MATIČNE STIJENE“ i „MIGRACIJA“, a u kategoriji „OČUVANJE UGLJIKOVODIKA“ je zamjena podkategorija „SLOJNA VODA“ s „UTISKIVANJE SLOJNE VODE“. Izračunata prilagođena vrijednost za istraživana polja „A“ i „B“ u zapadnom dijelu Savske depresije iznosi 56,25 %.

Prilikom izračuna rizično neutralne novčane vrijednosti ulaganja za istraživački regionalni POS uzeta su tri slučaja pridobivanja ugljikovodika u vremenu od 10, 15 i 20 godina. Najveća vrijednost odgovarajućih novčanih ekvivalenata dobivena je u slučaju 20 godina pridobivanja i to  $2,32 \cdot 10^6$  dolara kao investicijski maksimum u istraživanom području zapadnoga dijela Savske depresije za otkriće ležišta s geološkim rezervama od 500 000 m<sup>3</sup> ugljikovodika. To podrazumijeva i kako će tvrtke raspolagati s budžetom za istraživanje ugljikovodika u cijelom zapadnom dijelu Savske depresije od 50 milijuna dolara. U slučaju podjele rizika između dviju ili više tvrtki, smanjuje se rizično neutralna vrijednost ulaganja svake od njih, ali i očekivana monetarna vrijednost se tada mora podijeliti.

Drugi izračun načinjen je uporabom rizično neutralne vrijednosti za ležišta u sekundarnoj fazi pridobivanja, uz primjenu prilagođenoga POS-a. Uzeta su tri slučaja i to povećanje iscrpka od 0,5, 1 i 2 %. Najpovoljniji slučaj, prema iznosu odgovarajućih novčanih ekvivalenata, za ležište „L“ je  $1,21 \cdot 10^6$  dolara, dok je za ležište „K“  $1,17 \cdot 10^6$  dolara. Te vrijednosti su ujedno godišnji investicijski maksimumi u navedenim ležištima, uz pretpostavku da tvrtka u cijelome prostoru zapadnog dijela Savske depresije za povećanje pridobivanje zavodnjavanjem godišnje izdvaja 35 milijuna dolara.

## 11. LITERATURA

### 11.1. Objavljeni radovi

1. Afzal, P. (2018): Comparing ordinary kriging and advanced inverse distance squared methods based on estimating coal deposits; case study: East-Parvadeh deposit, central Iran. *Journal of Mining & Environment*, 9, 3, 753-760.
2. Al-Mudhafar, W.J. (2018): Integrating Core Porosity and Well Logging Interpretations for Multivariate Permeability Modeling through Ordinary Kriging and Co-Kriging Algorithms. *Offshore Technology Conference*, Houston, TX, USA, 30 April–3 May 2018.
3. Andričević, R., Gotovac, H. & Ljubenković, I. (2006): *Geostatistika: umijeće prostorne analize*. Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 170 str.
4. Arlot, S. & Lerasle, M. (2016): Choice of  $V$  for  $V$ -Fold Cross-Validation in Least-Squares Density Estimation. *Journal of Machine Learning Research*, 17, 1-50.
5. Babak, O. & Clayton, V. D. (2008): Statistical approach to inverse distance interpolation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23, 543-553.
6. Bała, M., Jarzyna, J. & Mortimer, Z. (2012): Statistical analysis of petrophysical parameters of Middle Miocene rocks from the Polish Carpathian Foredeep. *Geological Quarterly*, 56, 4, 665–680.
7. 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, 27-35.
8. Barić, G. (1996): Organic Geochemistry in the Rationalization of Oil and Gas Exploration and Production, *Geologia Croatica*, 49/2, 191-195.
9. Benšić, M & Šuvak, N. (2013): *Primijenjena statistika*. Sveučilište J. J. Strossmayera, Odjel za matematiku, Osijek, 211 str.
10. Bertsekas, D.P. (1996): *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*. Athena Scientific, Belmont, 395 str.
11. Bhunia, G.S., Shit, P. K. & Maiti, R. (2016): Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17, 114–126.
12. Boissonnat, J-D. & Cazals, F. (2001): Natural neighbor coordinates of points on a surface. *Computational Geometry*, 19, 155–173.

13. Boškov-Štajner, Z. (1961): Abichi slojevi u dubokim bušotinama Hrvatske s naročitim osvrtom na pojavu vrste Paradačna Abichi (R. Hoernes). *Geol. vjesnik* 15, 403-409.
14. Boškov-Štajner Z. & Rešćec, T. (1961): Prilog poznavanju gornjopontskih naslaga u sjevernoj Hrvatskoj. *Geol. vjesnik* 15, 93-99.
15. Brod, I. O. (1945): Geological Terminology in Classification of Oil and Gas Accumulation, *AAPG Bulletin*, 29, 1738 – 1755.
16. Casteleyn L., Robion, P., Collin P-Y., Menéndez B., David C., Desaubliaux G., Fernandes N., Dreux R., Badiner G. & Brosse E., Rigollete, C. (2010): Interrelations of the petrophysical, sedimentological and microstructural properties of the Oolithe Blanche Formation (Bathonian, saline aquifer of the Paris Basin). *Sedimentary Geology*, 230, 3-4, 123-138.
17. Cao, R., Zee Ma, Y. & Gomez, E. (2014): Geostatistical applications in petroleum reservoir modelling. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114, 8, 625-629.
18. Cozzolin, J. M. (1977): A simplified utility framework for the analysis of financial risk. *Economics and Evaluation Symposium of the Society of Petroleum engineers*, Dallas, U.S.A., SPE no. 6359, February 21, 1977, s. 161.
19. Fiedler, F. R. (2003): Simple, Practical Method for Determining Station Weights Using Thiessen Polygons and Isohyetal Maps. *Journal of hydrologic engineering*, 8, 219-221.
20. Gaurina-Međimurec, N. & Novak Mavar, K. (2017): Depleted hydrocarbon reservoirs and CO<sub>2</sub> injection wells –CO<sub>2</sub> leakage assessment. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 32, 2, 15-26.
21. Gautheir, T.D. (2001): Detecting Trends Using Spearman's Rank Correlation Coefficient, *Environmental Forensics*, 2,4, 359-362.
22. Goodwin, L. D. & Leech, N. L. (2006): Understanding Correlation: Factors That Affect the Size of r. *The Journal of Experimental education*, 74, 3, 251-266.
23. Gringarten, E. & Deutsch, C.V. (1999): Methodology for Variogram Interpretation and Modeling for Improved Reservoir Characterization. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, TX, USA, 3–6 October 1999.
24. Gringarten, E. & Deutsch, C.V. (2001): Teacher's Aide Variogram Interpretation and Modeling. *Mathematical Geology*, 33, 507–534.

25. Güner B., Frankford, M. T. & Johnson, T. (2009): A Study of the Shapiro-Wilk Test for the Detection of Pulsed Sinusoidal Radio Frequency Interference. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1745-1751.
26. Han, D. & Bray M. (2006): Automated Thiessen polygon generation. *Water resources research*, 42, 1-5.
27. Hernitz, Z., Vrbanac, B., Pavlović, Z. & Bokor, N. (2002): On the exploration level of the Croatian part of the Pannonian Basin. *Nafta*, 53, 363-370.
28. Hinkle, D. E., Wiersma W. & Jurs, S.G. (2003): *Applied Statistics for the Behavioral Sciences* 5<sup>th</sup> edition. Houghton Mifflin, Boston, 756 str.
29. Hofstra, N., Haylock, M., New, M., Jones, P. & Frei, C. (2008): Comparison of six methods for the interpolation of daily European climate data. *Journal of geophysical research*, 113, 1-19.
30. Hölzel, M., Decker K., Zámolyi A., Strauss P. & Wagneich, M. (2010): Lower Miocene structural evolution of the central Vienna Basin (Austria). *Marine and Petroleum Geology*, 27, 3, 666-681.
31. Hölzel, M., Wagneich, M., Faber, R. & Strauss, P. (2008): Regional subsidence analysis in the Vienna Basin (Austria). *Austrian Journal of Earth Science*, 101, 88-98.
32. Husanović, E. & Malvić, T. (2014): Review of deterministic geostatistical mapping methods in Croatian hydrocarbon reservoirs and advantages of such approach. *Nafta*, 65, 57-63.
33. Ivančić, K., Trajanova, M., Stjepan Ćorić, S., Rožič, B. & Šmuc, A. (2018): Miocene paleogeography and biostratigraphy of the Slovenj Gradec Basin: a marine corridor between the Mediterranean and Central Paratethys. *Geologica Carpathica*, 69, 6, 528–544.
34. Ivšiniović, J. (2017): The analysis of water injection systems in sandstone hydrocarbon reservoirs, case study from the western part of the Sava Depression. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*, 32, 17-24.
35. Ivšiniović, J. (2018a): The cost analysis of the separation of produced formation water from the hydrocarbon reservoir using the example of the upper miocene sandstone deposits of the Sava Depression. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*, 33, 35-43.
36. Ivšiniović, J. (2018b): Deep mapping of hydrocarbon reservoirs in the case of a small number of data on the example of the Lower Pontian reservoirs of the western part of

- Sava Depression. Zbornik radova „2nd Croatian congress on geomathematics and geological terminology, 2018“/ Malvić, Tomislav; Velić, Josipa; Rajna Rajić (ur.). Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 59-65, 112 str.
37. Ivšinović, J. & Dekanić, I. (2015): The basics of model for marginal testing of costs for disposal of extracted formation water. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 30, 2, 85-99.
  38. Jenko, K., (1944): Stratigraphic and tectonic relations of Pliocene of southern slopes of Mt. Požeška and Kasonja Hill. Vjestnik Hrvatski državni geološki zavod i Hrvatski državni geološki muzej, 2–3, 85-159.
  39. Juffin, R. J. (1975): Lagrange Multiplier Method for Convex Programs. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America ,72,1778-1781.
  40. Liu, X., Ye, F., Liu, Y., Xie, X & Fan, J. (2015): Real-time forecasting method of urban air quality based on observation sites and Thiessen polygons. International journal on smart sensing and intelligent systems, 4, 2065-2082.
  41. Ly, S., Charles, C & Degré, A. (2011): Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium. Hydrology and Earth System Sciences, 15, 2259-2274.
  42. Lutgert, J., Mijnlieff, H. & Breunese, J. (2005): Predicting gas production from future gas discoveries in the Netherlands: quantity, location, timing, quality. 6th Petroleum Geology Conference: Northwest Europe & Global Perspectives, Dore, A. G.; Vining, B. A. (ur.) Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspective, Geological Society, London, U.K., 77–84.
  43. Kamińska, A. & Grzywna, A. (2014): Comparison of deterministic interpolation methods for the estimation of groundwater level. Journal of Ecological Engineering, 15, 4, 55–60.
  44. Kitikidou, K., Milios, E., & Lipiridis, I. (2014): Tree volume model estimates and nearest neighbor analysis in the stands of scots pine (*Pinus sylvestris* l.) in the central part of Rodope mountain. Šumarski list, 138, 573-582.
  45. Kranjec, V. & Blašković, I. (1976): Geology of the Jagma-Popovac-Paklenica area (western Slavonia, northern Croatia) as regards the occurrences of quartz-sands. Geol. vjesnik 29, 91–123.
  46. Krijgsman, W., Stoica, M., Vasiliev, I. & Popov, V.V. (2010): Rise and fall of the Paratethys Sea during the Messinian Salinity Crisis. Earth Planet Sci. Lett. 290, 183–191.



47. Malvić, T. (2003): Naftnogeološki odnosi i vjerojatnost pronalaska novih zaliha ugljikovodika u bjelovarskoj uleknini. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 123 str.
48. Malvić, T. (2008a): Izrada karte poroznosti krigiranjem u pješčenjačkim ležištima, primjer iz Savske depresije, Kartografija i geoinformacije, 7, 9, 12-19.
49. Malvić, T. (2008b): Kriging, cokriging or stochastic simulations, and the choice between deterministic or sequential approaches. *Geologia Croatica*, 61, 1, 37-47.
50. Malvić, T. (2008c): Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka. INA-Industrija nafte d.d., Zagreb, 103 str.
51. Malvić, T. (2009a): Geostatistics as a Group of Methods for Advanced Mapping of Geological Variables in Hydrocarbon Reservoirs. *Annual of the Croatian Academy of Engineering*, 12, 69-83.
52. Malvić, T. (2009b): Stohastički pristup u determinističkom izračunu geološkog rizika-teorija i primjer. *Nafta*, 60, 658-662.
53. Malvić T. (2012a): Review of Miocene shallow marine and lacustrine depositional environments in Northern Croatia. *Geological quarterly*, 56, 493-504.
54. Malvić, T. (2012b): History of geostatistical analyses performed in the Croatian part of the Pannonian Basin System. *Nafta*, 63, 223-235.
55. Malvić, T. (2018): Stochastics – advantages and uncertainties for subsurface geological mapping and volumetric or probability calculations. *Materials and Geoenvironment*, 65, 9-19.
56. Malvić, T. & Balić, D. (2009): Linearnost i Lagrangeov linearni multiplikator u jednadžbama običnoga kriginga. *Nafta*, 60, 31-43.
57. 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*, 138, 2, 165-174.
58. Malvić, T. & Cvetković, M. (2013): Lithostratigraphic units in the Drava Depression (Croatian and Hungarian parts) – a correlation. *Nafta*, 64, 1, 27-33.
59. 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.
60. Malvić, T. & Jović, G. (2012): Thickness maps of Neogene and Quaternary sediments in the Kloštar Field (Sava Depression, Croatia). *Journal of Maps*, 8, 3, 260-266.

61. Malvić, T. & Medunić, G. (2015): Statistika u geologiji. Rudarsko-geološko-naftni fakultet i Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 88 str.
62. Malvić, T. & Novak Zelenika, K. (2013): Hrvatski rječnik odabranih geostatističkih pojmova. Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin), 26, 1-9.
63. Malvić, T & Prskalo, S. (2008): Značenje amplitudnog atributa u predviđanju poroznosti - primjer iz Dravske depresije, Nafta, 59, 39-51.
64. Malvić, T. & Rusan, I. (2007): Potential hydrocarbon discoveries in Bjelovar Subdepression, Croatia. Search and Discovery, Article #10133, 1-6.
65. Malvić, T. & Rusan, I. (2009): Investment risk assessment of potential hydrocarbon discoveries in a mature basin. Case study from the Bjelovar Sub-Basin, Croatia. Oil, gas - European Magazine (Hamburg), 35, 67-72.
66. Malvić, T. & Velić, J. (2010): Relations between effective thickness, gas production and porosity in heterogeneous reservoirs: an example from the Molve Field, Croatian Pannonian Basin. Petroleum Geoscience, 16, 41–51.
67. Malvić, T. & Velić, J. (2011): Neogene Tectonics in Croatian Part of the Pannonian Basin and Reflectance in Hydrocarbon Accumulations. In: New Frontiers in Tectonic Research : At the Midst of Plate Convergence (ed. Schattner, U.), InTech, 215-238, Rijeka.
68. Malvić, T. & Velić, J. (2015): Stochastically improved methodology for probability of success (POS) calculation in hydrocarbon systems. RMZ-Materials and geoenvironment, 62, 149-155.
69. Malvić, T. & Vrbanac, B. (2013): Geomatemički pojmovnik. Math.e, 23, 7-47.
70. Malvić, T., Rusan, I. & Curi, M. (2007): Using of exponential function in risk assessment for investment in potential hydrocarbon discovery. Naftaplin-izvanredni broj, 27, 4, 33-42.
71. Malvić, T., Velić, J. & Cvetković, M. (2010): Database of geostatistical results from hydrocarbon reservoirs in the Sava and Drava depressions (SW part of Pannonian basin) – updated in 2009. Zbornik radova „14th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences“/ Organizing Committee (ur.), 14-14.
72. Malvić, T., Velić, J. & Peh, Z. (2005): Qualitative-quantitative analyses of depth and lithological composition influence on Lower Pontian sandstones porosity in the central part of Bjelovar sag (Croatia). Geologia Croatica, 58, 1, 73-85.

73. Malvić, T., Velić, J. & Režić, M. (2016): Geological probability calculation of new gas discoveries in wider area of Ivana and Ika Gas Fields, Northern Adriatic, Croatia. *Materials and Geoenvironment*, 63, 3, 127-137.
74. Malvić, T., Ivšinović, J., Velić, J. & Rajić, R. (2019a): Kriging with a Small Number of Data Points Supported by Jack- Knifing, a Case Study in the Sava Depression (Northern Croatia). *Geosciences*, 36, 9, 1-24.
75. Malvić T., Ivšinović J., Velić J. & Rajić, R. (2019b): Interpolation of Small Datasets in the Sandstone Hydrocarbon Reservoirs, Case Study of the Sava Depression, Croatia. *Geosciences*, 9, 5, 201.
76. Malvić, T., Sučić, A., Cvetković, M., Resanović, F. & Velić, J. (2014): Low permeability Neogene lithofacies in Northern Croatia as potential unconventional hydrocarbon reservoirs. *Central European Journal of Geosciences*, 6, 2, 182-194.
77. Martinius, A. W. & Næss, A. (2005): Uncertainty analysis of fluvial outcrop data for stochastic reservoir modelling. *Petroleum Geoscience*, 11, 3, 203 - 214.
78. Mandić, O., Kurečić, T., Neubauer, T. A. & Harzhauser, M. (2015): Stratigraphic and palaeogeographic significance of lacustrine molluscs from the Pliocene *Viviparus* beds in Central Croatia. *Geologia Croatica*, 68, 179–207.
79. McIntosh, A. I. (2016): The Jackknife Estimation Method. ArXiv:1606.00497, Cornell University, 11 str.
80. Medved, I., Pribičević, B., Medak, D. & Kuzmanić, I. (2010): Usporedba metoda interpolacije batimetrijskih mjerenja za praćenje promjena volumena jezera. *Geodetski list*, 2, 71–86.
81. Mesić Kiš, I. (2016): Odabir interpolacijskog algoritma primjerenog za kartiranje naftno-plinskog polja Šandrovac. Simpozij studenata doktorskih studija PMF-a. Knjiga sažetaka / Primožič, Ines ; Hranilović, Dubravka (ur.), Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 64-64, 73 str.
82. Mesić Kiš, I. (2017): Kartiranje i reinterpretacija geološke povijesti Bjelovarske subdepresije univerzalnim krigiranjem te novi opći metodološki algoritmi za kartiranje sličnih prostora. Doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 182 str.
83. Mesić Kiš, I. & Malvić, T. (2014): Zonal estimation and interpolation as simultaneous approaches in the case of small input data set (Šandrovac field, northern

- Croatia). Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin), 29, 9-16.
84. Mukaka, M. M. (2012): Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research, *Malawi Medical Journal*, 24, 3, 69-71.
  85. Novak Mavar, K. (2015): Modeliranje površinskoga transporta i geološki aspekti skladištenja ugljikova dioksida u neogenska pješčenjačka ležišta Sjeverne Hrvatske na primjeru polja Ivanić. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 185 str.
  86. Novak Zelenika, K. (2012): Deterministički i stohastički geološki modeli gornjomiocenskih pješčenjačkih ležišta u naftno-plinskom polju Kloštar. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 190 str.
  87. Novak Zelenika, K. & Malvić, T. (2010): Procjena sekvencijskim Gausovim simulacijama ležišnih varijabli pješčenjačkog donjopontskog ležišta nafte, polje Kloštar, Savska depresija, Hrvatska, 4. hrvatski geološki kongres, Marija Horvat (ur.), Zagreb, 263-264.
  88. 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.
  89. Novak Zelenika, K. & Malvić, T. (2014): Utvrđivanje sekvencijskim indikatorskim metodama slabopropusnih litofacijesa kao vrste nekonvencionalnih ležišta ugljikovodika na primjeru polja Kloštar. Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin), 28, 23-38.
  90. Novak Zelenika, K., Malvić, T. & Geiger, J. (2010): Kartiranje gornjomiocenskih pješčenjačkih facijesa metodom indikatorskog kriginga. *Nafta*, 61, 5, 225-233.
  91. Novak Zelenika, K., Cvetković, M., Malvić, T., Velić, J. & Sremac J. (2013): Sequential Indicator Simulations maps of porosity, depth and thickness of Miocene clastic sediments in the Kloštar field, Northern Croatia. *Journal of Maps*, 9, 4, 550-557.
  92. Olivier, R. & Hanqiang, C. (2012): Nearest Neighbor Value Interpolation. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 3, 18-24.
  93. Ožegović, F. (1944): Prilog geologiji mlađeg tercijara na temelju podataka iz novih dubokih bušotina u Hrvatskoj. *Vjestnik Hrvatskog Geološkog zavoda i Geološkog muzeja*, 2-3.

94. Pavelić, D. & Kovačić, M. (2018): Sedimentology and stratigraphy of the Neogene rift-type North Croatian Basin (Pannonian Basin System, Croatia): A review. *Marine and petroleum geology*, 91, 455-469.
95. Peel, F. J. & Brooks, J. R. V. (2016): A practical guide to the use of success versus failure statistics in the estimation of prospect risk. *AAPG Bulletin*, 100, 2, 137–150.
96. Pecimotika, G., Krizmanić, K. & Rakarić, D. (2015): Palynological model of the Late Neogene sediments of eastern Slavonia (Croatia). *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*, 30, 25–37.
97. Petz, B. (1974): *Osnove statističke metode*. Izdavački zavod Jugoslavenske akademije, Zagreb, 311 str.
98. Pfaff, S. (2012): *Osnove statistike*, Element d.o.o., Zagreb, 144 str.
99. Popov, S. V., Shcherba, I. G., Ilyina, L. B., Nevesskaya, L. A., Paramonova, N. P., Sergej O. Khondkarian & S. O., Magyar, I. (2006): Late Miocene to Pliocene palaeogeography of the Paratethys and its relation to the Mediterranean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 238, 91–106.
100. Režić, M. & Varenina, A. (2017): A new freeware program for the Probability of Success calculation of new gas discoveries within the Croatian part of the Po depression. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*, 32, 49-55.
101. Rodríguez, J. D., Perez, A. & Lozano, J. A. (2010): Sensitivity Analysis of k-Fold Cross Validation in Prediction Error Estimation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 3, 32, 569-575.
102. Rose, P.R. (1987): Dealing with Risk and Uncertainty in Exploration: How can we improve?. *AAPG Bulletin*, 71, 1, 1-16.
103. Rose, P.R. (2007): Measuring what we think we have found: Advantages of probabilistic over deterministic methods for estimating oil and gas reserves and resources in exploration and production. *AAPG Bulletin*, 91, 1, 21–29.
104. Royden, L. H. (1988): Late Cenozoic tectonics of the Pannonian Basin System. *AAPG Memoirs*, 45, 27-48.
105. Russell, B., Hampson, D., Todorov, T. & Lines, L (2006): Combining geostatistics and multi-attribute transforms: a channel sand case study, blackfoot oilfield (Alberta). *Journal of Petroleum Geology*, 25, 1, 97-117.

106. Salleh, S. H., Rosales, E. & Flores-de la Mota, I. (2007): Influence of different probability based models on oil prospect exploration decision making: a case from southern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24, 3, 306-317.
107. Shao, J. (1992): Jackknifing in generalized linear models. *The Annals of Statistics*, 44, 673-686.
108. Shahbeik, S., Afzal, P., Moarefvand, P. & Qumarsy, M. (2014): Comparison between ordinary kriging (OK) and inverse distance weighted (IDW) based on estimation error. Case study: Dardevey iron ore deposit, NE Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 3693–3704.
109. Sheriza, M.R., Ainuddin, N.A., Hazandy, A.H. & Helmi Zulhaidi, M.S. (2011): Annual rainfall estimation based on two different methods. *Journal of environmental hydrology*, 19, 1-9.
110. 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.
111. Strauss, P., Harzhauser, M., Hinsch, R. & Wagneich, M. (2006): Sequence stratigraphy in a classic pull-apart basin (Neogene, Vienna Basin). A 3D seismic based integrated approach. *Geologica Carpathica*, 57, 3, 185-197.
112. Šimon, J. (1973): O nekim rezultatima regionalne korelacije litostratigrafskih jedinica u Jugozapadnom području Panonskog bazena. *Nafta*, 12, 623-630.
113. Šimon, J. (1980): Prilog stratigrafiji u taložnom sustavu pješćanih rezervoara Sava-grupe naslaga mlađeg tercijara u Panonskom bazenu sjeverne Hrvatske. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 66 str. + 82 priloga.
114. Špelić, M., Malvić, T., Saraf, V. & Zalović, M. (2016): Remapping of depth of e-log markers between Neogene basement and Lower/Upper Pannonian border in the Bjelovar Subdepression. *Journal of Maps*, 12, 1, 45-52.
115. Sremac, J. (1981): Neke nove i manje poznate vrste mekušaca Croatica-naslaga i Banatica-naslaga sjeverne Hrvatske. *Geol. vjesnik*, 33, 107-121.
116. Taylor, J.M.G. (1987): Kendall's and Spearman's Correlation Coefficients in the Presence of a Blocking Variable, *Biometrics*, 409-416.
117. Traversoni, L. (1994): Natural neighbour finite elements. *Transactions on Ecology and the Environment*, 8, 291-297.

118. Troskot-Čorbić, T., Velić, J. & Malvić, T. (2009): Comparison between the Middle Miocene and the Upper Miocene source rock formations in the Sava Depression (Pannonian Basin, Croatia). *Geologia Croatica*, 62, 2, 123-133.
119. Tsidaev, A. (2016): Parallel Algorithm for Natural Neighbor Interpolation. 2nd Ural Workshop on Parallel, Distributed, and Cloud Computing for Young Scientists. *Knjiga sažetaka/ Sozykin, A.; Akimova, E.; Ustalov, D. (ur.). Ural-PDC 2016, Yekaterinburg, Rusija, 78-83, 83 str.*
120. Vasiljević, R. (2009): Organska geokemija, značenje u procesu istraživanja ugljikovodika i demonstracija primjene na uzorcima iz bušotine Žutica – 1 zapad. *Nafta*, 60, 11, 603-609.
121. Velić, J. (1980): Geološka građa zapadnog dijela Savske depresije. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 136 str.
122. Velić, J. (2007): Geologija ležišta nafte i plina. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 342 str.
123. Velić, J., Malvić, T. & Cvetković, M. (2015): Geologija i istraživanje ležišta ugljikovodika. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 144 str.
124. Velić, J., Weisser M., Saftić, B., Vrbanac, B. & Ivković, Ž. (2002): Petroleum-geological characteristics and exploration level of the three Neogene depositional megacycles in the Croatian part of the Pannonian basin. *Nafta*, 53, 239-249.
125. Vrbanac B., Velić J. & Malvić T. (2010a): Deterministical calculation of probability of hydrocarbon saturated reservoirs in the Sava Depression, Croatia. 14th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences. Proceedings of IAMG 2010 / Organizing Committee (ur.). IAMG 2010, Budimpešta, Mađarska, 11 str.
126. Vrbanac B., Velić J. & Malvić T. (2010b): Sedimentation of deep-water turbidites in main and marginal basins in the SW part of the Pannonian Basin. *Geologia Carpathica*, 61, 55–69.
127. Wu, C. F. J. (1986): Jackknife, Bootstrap and Other Resampling Methods in Regression Analysis. *The Annals of Statistics*, 14, 1261-1295.

## 11.2. Stručna i arhivska izvješća

- \*1 *\*INA d.d., tehnička dokumentacija, elaborati o rezervama ugljikovodika eksploatacijskoga polja B. Sektor za Razradu polja, 2002., 149 str.*

\*2 \*\*INA d.d., tehnička dokumentacija, elaborati o rezervama ugljikovodika eksploatacijskoga polja A. Sektor za Razradu polja, 1992., 169 str.

### **11.3. Internetske poveznice**

[http://simora.hr/userfiles/file/Razv\\_strategije/ZRS/Analiza%20stanja\\_13.4.2016.pdf](http://simora.hr/userfiles/file/Razv_strategije/ZRS/Analiza%20stanja_13.4.2016.pdf) (29. travnja 2019.)

### **11.4. Popis korištenih programa**

Zahvala je upućena autorima programa SURFER 15.0.0 na popustu pri kupnji licencije za primjenu u istraživačkom radu.



## ŽIVOTOPIS

Josip Ivšinović rođen je 26. rujna 1987. godine u Mrkonjić Gradu (Bosna i Hercegovina). Osnovnu školu i Opću gimnaziju završio je u Gospiću. Po završetku Opće gimnazije Gospić, 2006. godine upisao je Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Godine 2009. završio je preddiplomski studij i stekao zvanje prvostupnika inženjera naftnog rudarstva. Diplomski studij Naftnog rudarstva smjer: Energetika završio je 2011. godine i stekao zvanje magistar inženjer naftnog rudarstva. Tijekom studija obnašao je funkcije: predsjednika Studentskog zbora RGNF-a, člana Senata Sveučilišta u Zagrebu, člana Vijeća tehničkog područja Sveučilišta u Zagrebu i člana Skupštine Studentskog zbora Sveučilišta u Zagrebu. Poslijediplomski doktorski studij na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu upisao je 2012. godine na smjeru Naftno rudarstvo, a 2016. godine, uz polaganje potrebnih razlikovnih ispita, prešao je na smjer Geologija (studijski savjetnik, te kasnije mentor prof. dr. sc. Tomislav Malvić).

Od 2013. godine je zaposlen je u tvrtki INA-Industrija nafte d.d., SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina, gdje trenutačno radi na mjestu stručnjaka za projekte u razradi polja. Kao autor i koautor objavio je šest znanstvenih radova te osam radova u sklopu različitih znanstveno-stručnih kongresa/skupova.

## **POPIS RADOVA KANDIDATA**

### **Znanstveni radovi u drugim časopisima:**

1. Malvić, T., Ivšinović, J., Velić, J., Rajić, R. (2019a): Kriging with a Small Number of Data Points Supported by Jack- Knifing, a Case Study in the Sava Depression (Northern Croatia). *Geosciences*, 36, 9, 1-24.
2. Malvić T., Ivšinović J., Velić J., Rajić R. (2019b): Interpolation of Small Datasets in the Sandstone Hydrocarbon Reservoirs, Case Study of the Sava Depression, Croatia. *Geosciences*, 9, 5, 201.
3. Ivšinović, J. (2018): The Cost Analysis of the Separation of Produced Formation Water from the Hydrocarbon Reservoir Using the Example of the Upper Miocene Sandstone Deposits of the Sava Depression. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 33, 1, 35-43.
4. Ivšinović, J., Pleteš, V., Marinić, M. (2018): Production of hydrocarbons from weakly consolidated sandstone reservoirs in the croatian part of the Pannonian basin system. *Mining of Mineral Deposits*, 12, 2, 116-121.
5. Ivšinović, J. (2017): The analysis of water injection systems in sandstone hydrocarbon reservoirs, case study from the western part of the Sava Depression. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*, 32, 17-24.
6. Ivšinović, J., Dekanić, I. (2015): The basics of model for marginal testing of costs for disposal of extracted formation water. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 30, 2, 85-99.

### **Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom:**

1. Ivšinović, J. (2018): Deep mapping of hydrocarbon reservoirs in the case of a small number of data on the example of the Lower Pontian reservoirs of the western part of Sava Depression. *Zbornik radova „2nd Croatian scientific congress on geomathematics and geological terminology, 2018“/ Malvić, Tomislav; Velić, Josipa; Rajna Rajić (ur.). Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 59-65, 112 str.*

### **Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom:**

1. Ivšinović, J. (2018): The relationship between sandstone depositional environment and water injection system, a case study from the Upper Miocene hydrocarbon reservoir in northern Croatia- *Zbornik radova „2nd Croatian scientific congress on geomathematics and geological terminology, 2018“/ Malvić, Tomislav ; Velić, Josipa ; Rajna, Rajić (ur.). Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 65-75, 112 str.*

- Ivšinić, J. (2016): Statistička obrada troškova odvajanja pridobivene slojne vode iz pješčenjačkih ležišta Savske depresije. Zbornik radova „Matematičke metode i nazivlje u geologiji 2016“ / Malvić, T. ; Velić, J. (ur.). Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 69-74, 100 str.

#### **Sažeci u zbornicima skupova:**

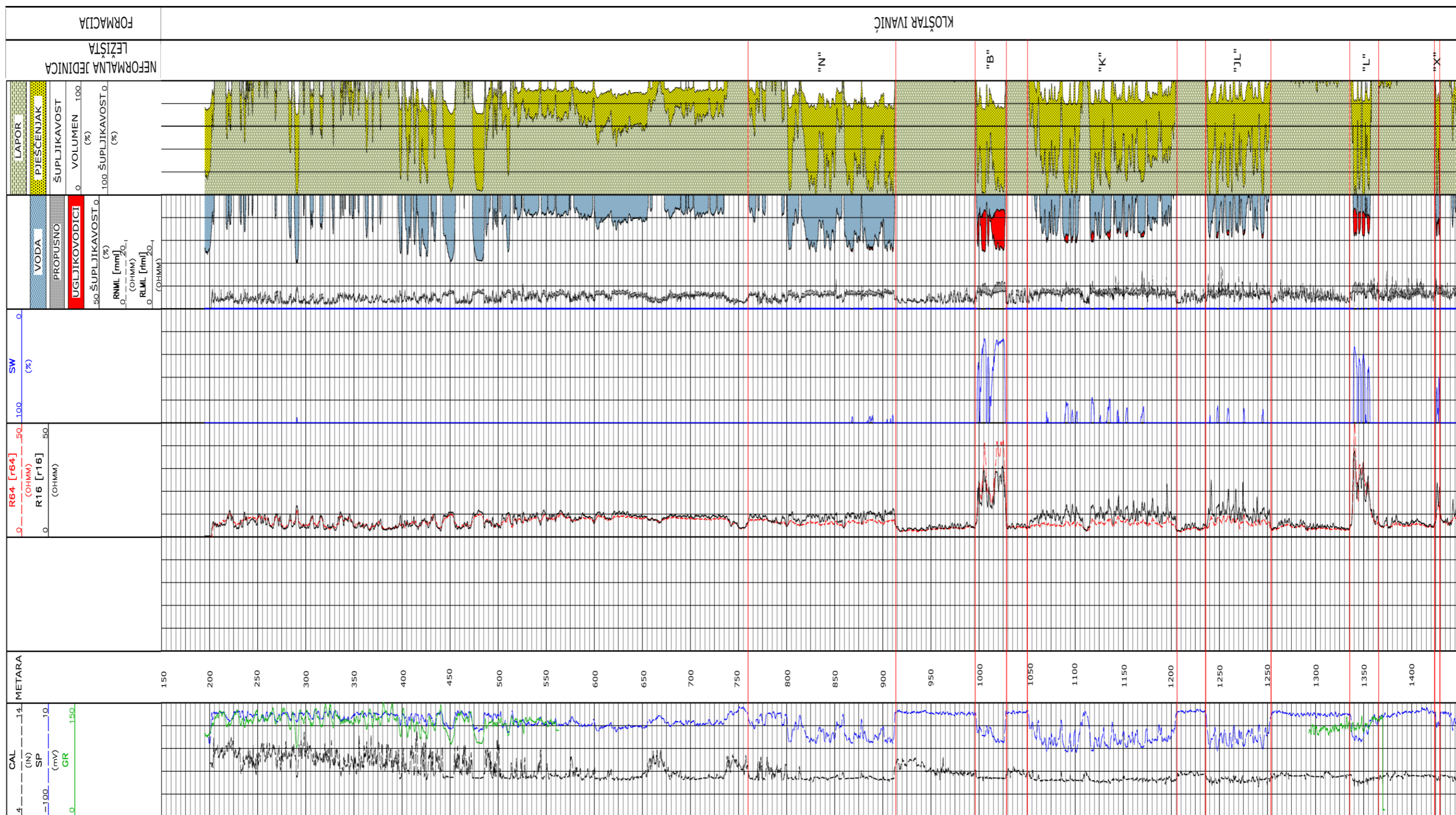
- Gospić-Miočev, D., Ivšinić, J., Bonjaj, Z. (2015): Tehno-ekonomska analiza zbrinjavanja slojne vode na proizvodnoj regiji Središnja Hrvatska/ Knjiga sažetaka „8. MEĐUNARODNA KONFERENCIJA I IZLOŽBA O NAFTNO PLINSKOM GOSPODARSTVU“/ Meandžija, Ivan; Zelić, Mirko (ur.). HUNIG, 179-180.
- Ivšinić, J., Bastalić, M., Pleteš, V. (2015): Tehnologija polimernog zavodnjavanja naftno- plinskih ležišta te mogućnost primjene na naftno-plinskom polju Kozarice. Knjiga sažetaka „8. MEĐUNARODNA KONFERENCIJA I IZLOŽBA O NAFTNO PLINSKOM GOSPODARSTVU“ / Meandžija, Ivan; Zelić, Mirko (ur.). HUNIG, 98-99.
- Orlović-Leko, P., Omanović, D., Ivšinić, J. (2011): Tragovi elemenata u atmosferskom taloženju u gradu Zagrebu. Knjiga sažetaka „Zaštita zraka 2011“ / Šega, Krešimir (ur.). Hrvatsko udruženje za zaštitu zraka, 61-61.

#### **Neobjavljena sudjelovanja na skupovima:**

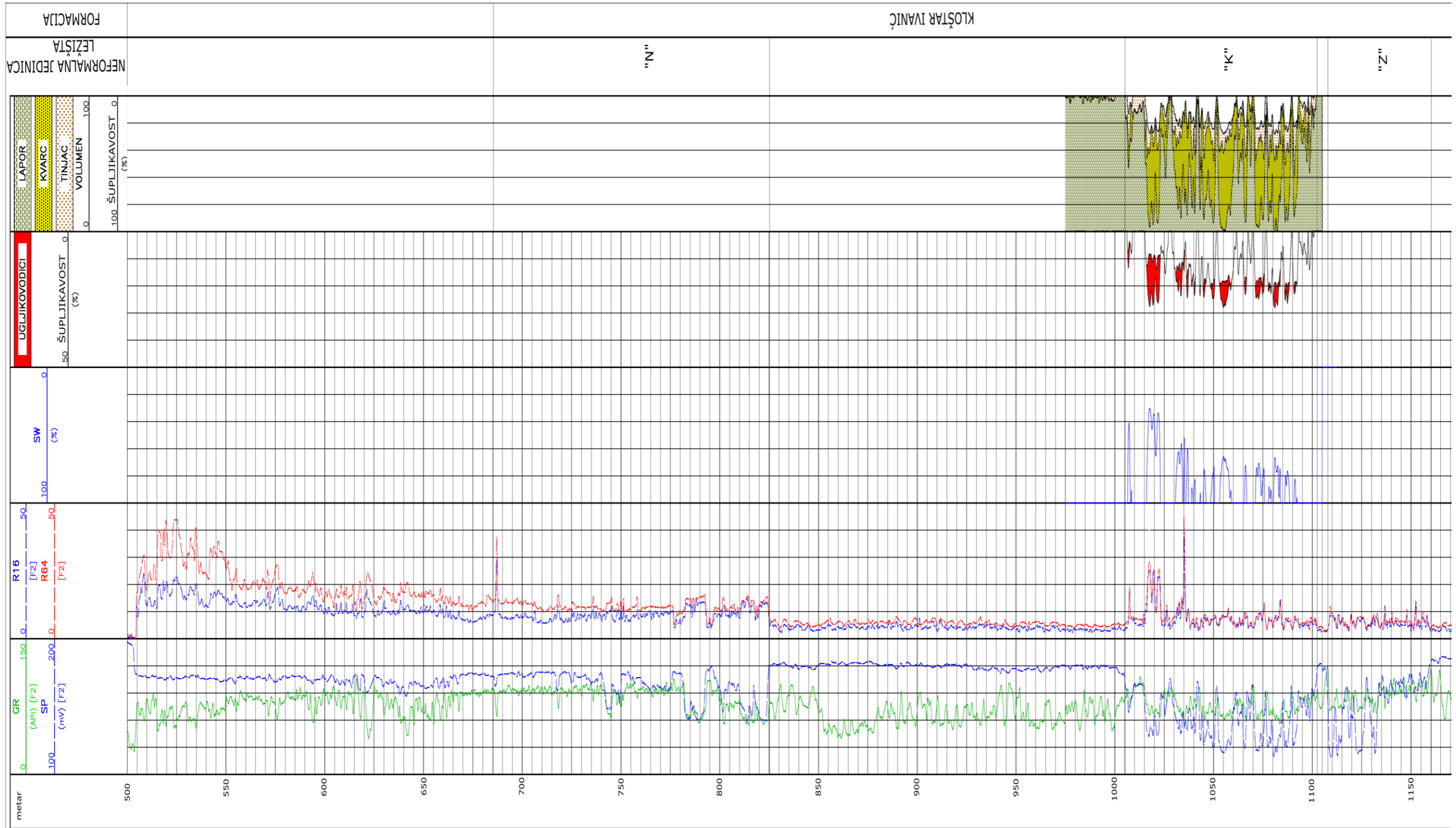
- Dedeić, D., Ivšinić, J., Marinić, M. (2017): Pametno polje opremljeno povremenim plinskim liftom (SGLF), primjena na naftnom polju Lipovljani. 9. međunarodna konferencija i izložba o naftno plinskom gospodarstvu, Šibenik, 3.10.2017.-4.10.2017., HUNIG.
- Pleteš, V., Palijan, Z., Ivšinić, J., Marinić, M. (2017): Primjena modificiranog pješčanog zasipa na nekonsolidiranim pješčenjačkim ležištima naftnog polja Jamarica. 9. međunarodna konferencija i izložba o naftno plinskom gospodarstvu, Šibenik, 3.10.2017.-4.10.2017., HUNIG.

# PRILOZI

## Prilog 1: Složeni geološki stup za ležište „L“ (iz:\*\*)

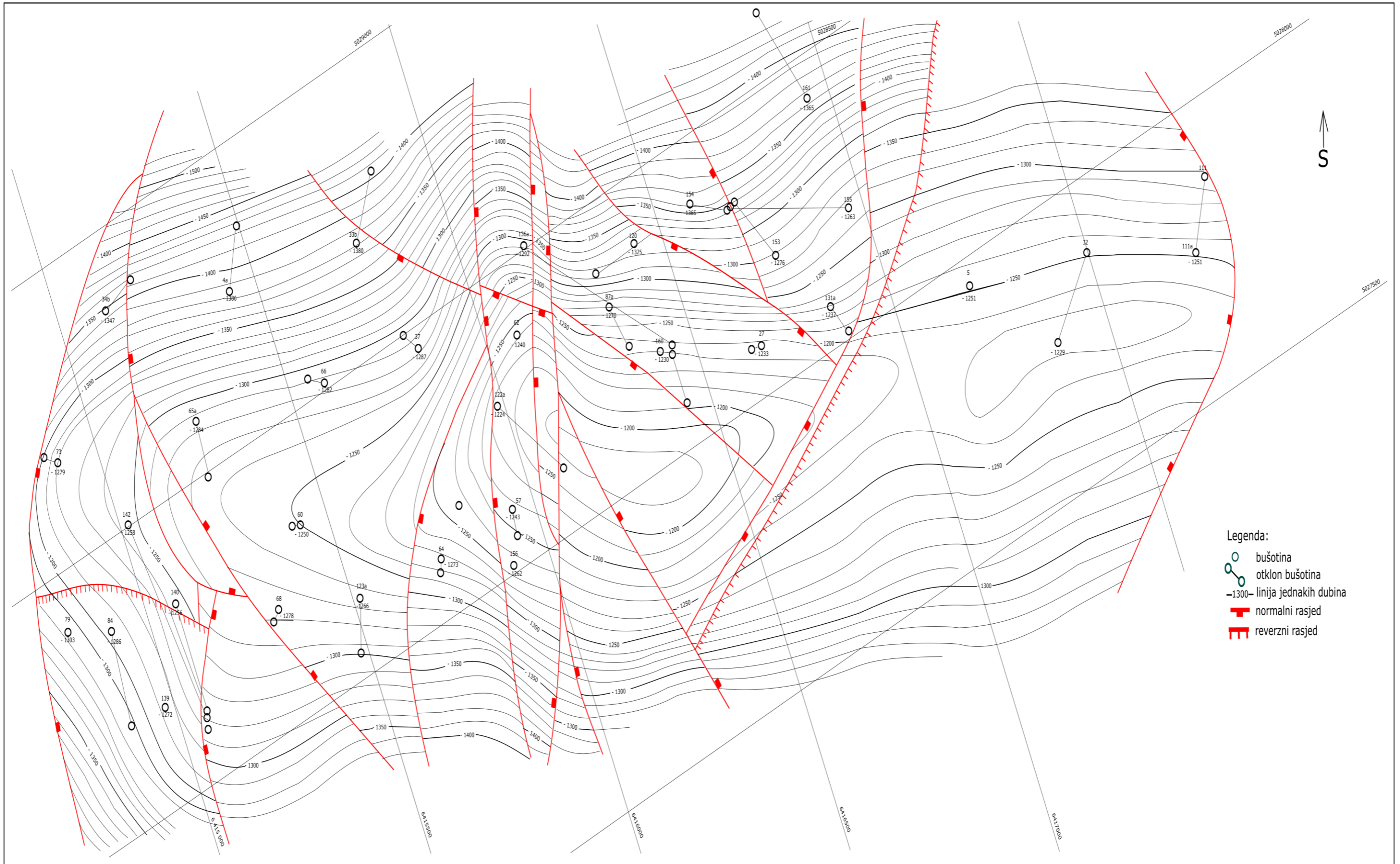


Prilog 2: Složeni geološki stup za ležište „K“ (iz:\*\*)

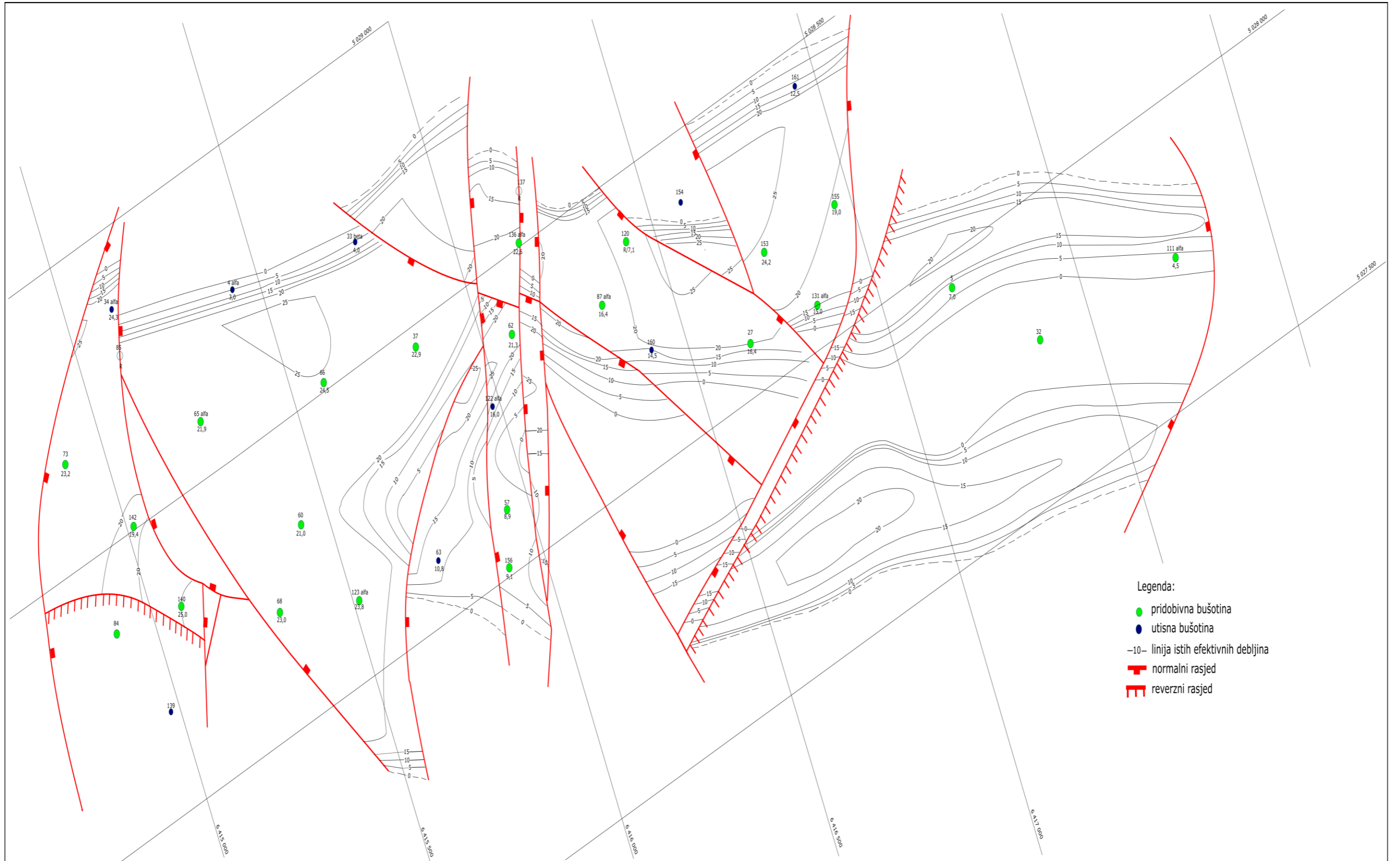




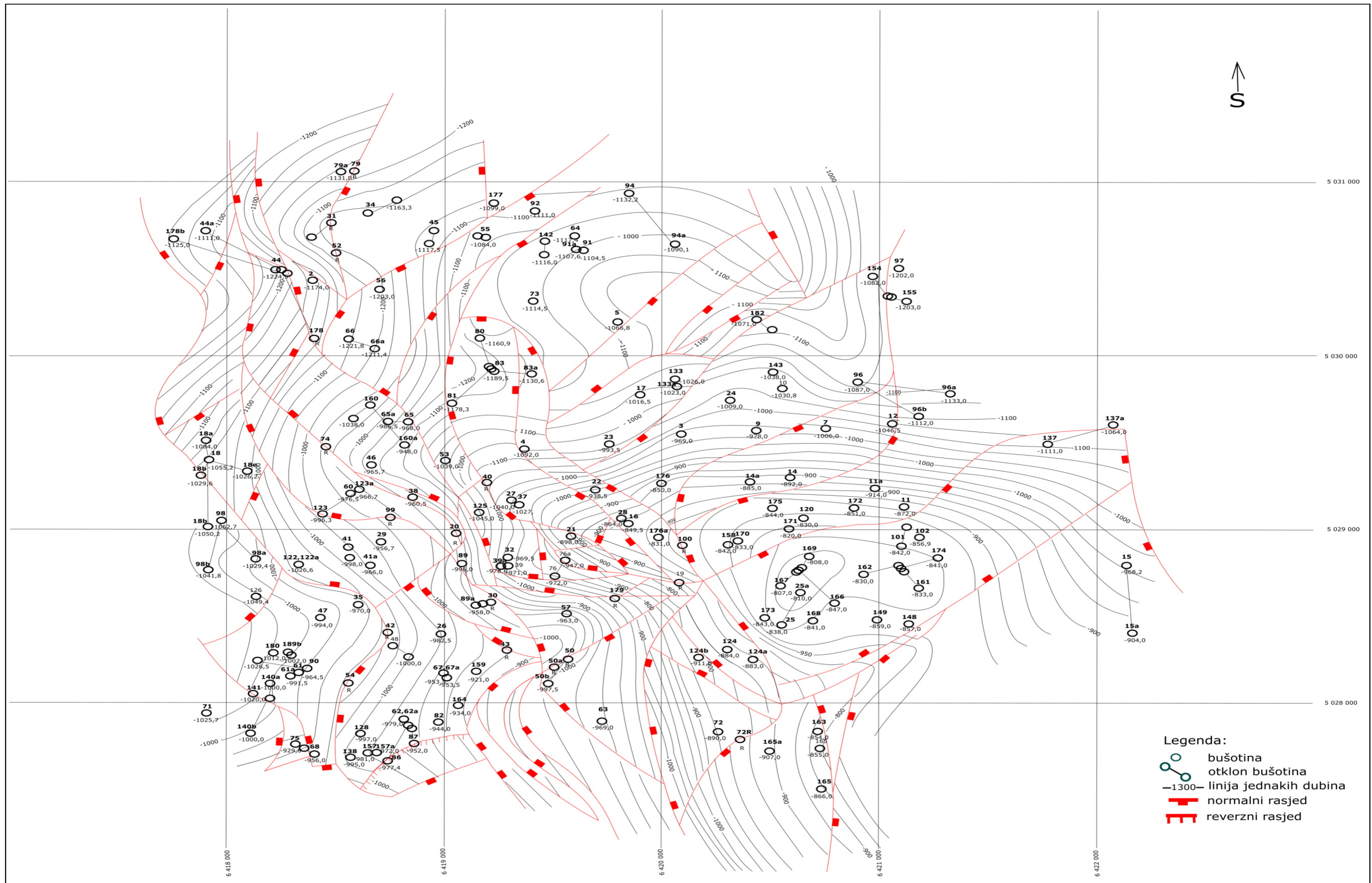
Prilog 3: Dio strukturne karte po krovini donjopontskoga ležišta „L“, naftno-plinskoga polja „A“ (iz:\*\*)



Prilog 4: Karta efektivnih debljina ležišta „L“ (iz:\*\*)

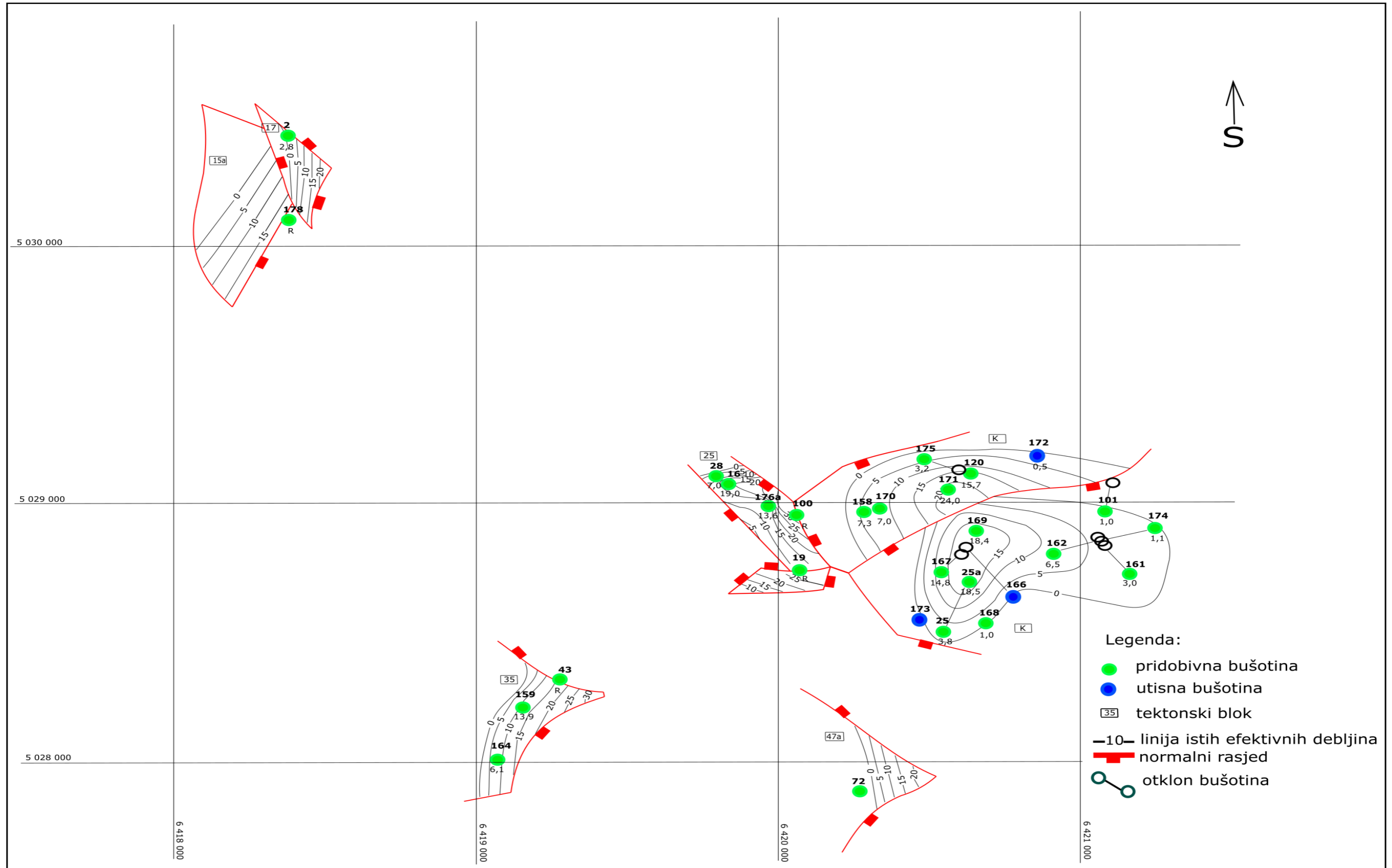


Prilog 5: Strukturna karta po krovini donjopontsoga ležišta „K“, naftno-plinskoga polja „B“ (iz:\*)



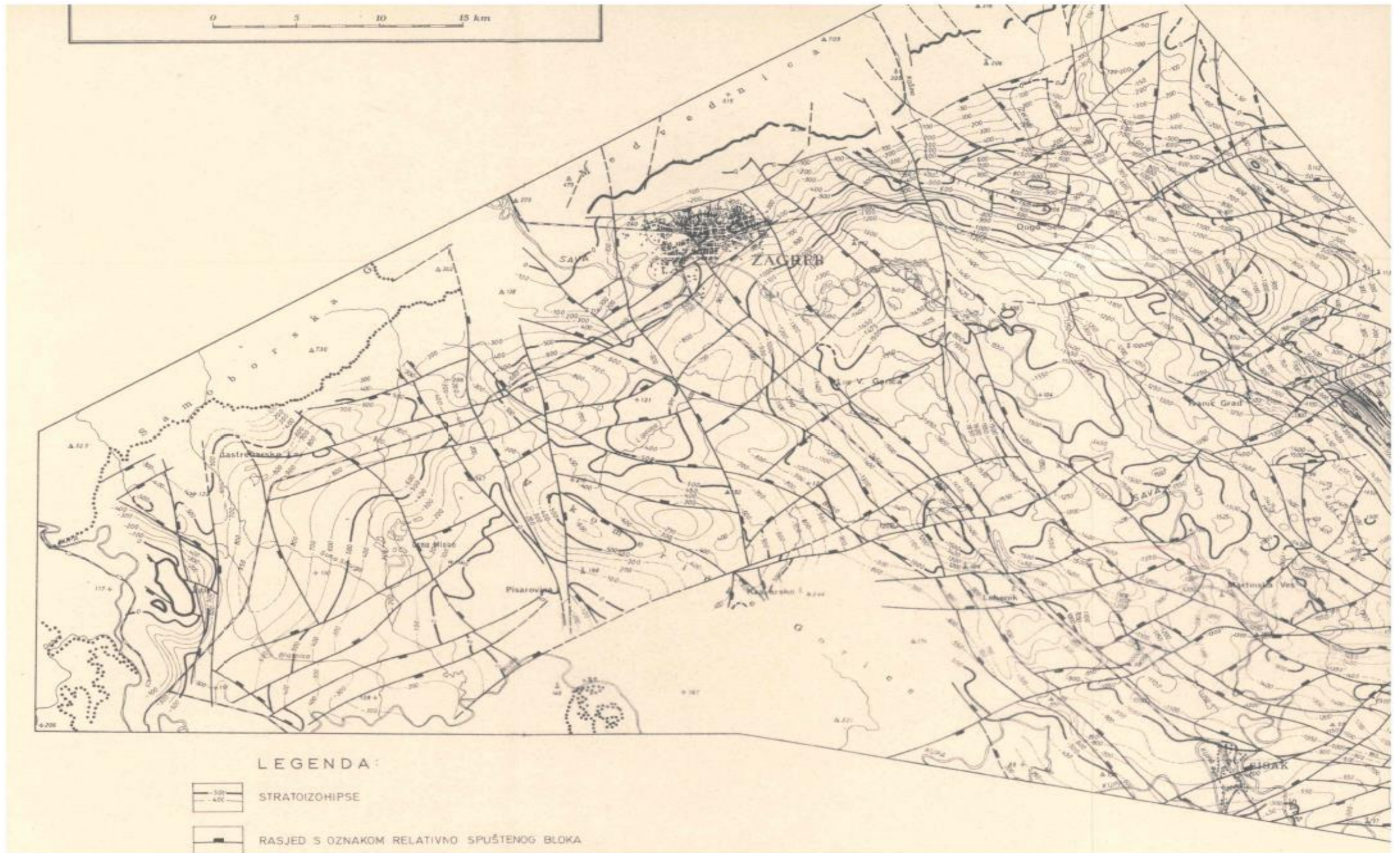


Prilog 6: Karta efektivnih debljina ležišta „K“ (iz:\*)





Prilog 7: Strukturna karta po plohi repera Z' za zapadni dio Savske depresije (VELIĆ, 1980)





Prilog 8: Strukturna karta po plohi repera R $\phi$  za zapadni dio Savske depresije (VELIĆ, 1980)

