

Application of Geostatistics in Geological Data Analysis

by Tomislav Malvić



176

At the beginning of 2009, the book *Application of geostatistics in geological data analysis* was published. The author is Dr. Tomislav Malvić, graduate engineer of geology, research associate recently elected to this position at the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering (FMGPE), University of Zagreb. This is the very first book from this field in Croatian geology, and the second one about geostatistics in Croatia. The book contains 101 pages, with the main text, foreword, epilogue, small dictionary, index and list of references. The book is divided into 13 chapters as follows: 1. *Introduction*; 2. *Basic statistical procedures*; 3. *Variogram*; 4. *Variogram analysis of data at distances in kilometres*; 5. *Variogram analysis at distances in meters and centimetres*; 6. *Theory of geostatistical estimation (kriging/cokriging/simulations)*; 7. *Examples of interpolation and simulation using geostatistics*; 8. *Seismic data as secondary variable*; 9. *Examples of stochastic simulation applications*; 10. *Epilogue*; 11. *Dictionary*; 12. *Index*; 13. *References*. The book includes 55 figures (many of them in colour), 13 tables and 34 formulae.

The book was published by INA-Oil Industry Plc. The Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

(University of Zagreb) offered great help in preparation and the reviewing process. The Senate of the University of Zagreb made a decision to accept the book as a university handbook (*Manualia universitatis studiorum Zagrabensis*). The book's ISBN is 978-953-7049-45-4. It was reviewed by Dr. Josipa Velić, full professor at FMGPE; Dr. Esad Prohić, full professor at the Faculty of Natural Sciences, University of Zagreb; Dr. Kosta Urumović, full professor at FMGPE; Dr. Zoran Peh, Research Scientist at the Croatian Geological Survey. Proof-reading was done by Dr. Ivana Matas Ivanković. The book is professional and scientific work from the field of applied geostatistics in geology (but can also be used in other geosciences). Target audience for this valuable book are mostly (1) students of FMGPE involved in undergraduate subjects Geostatistics and Subsurface Mapping and the doctoral course Geostatistics of the study of geology; (2) scientists, professors and lecturers of FMGPE and other faculties where geostatistics is taught; (3) engineers of geology at INA-Oil industry Plc., E&P of Oil and Gas, mostly at the Department of Geology and Reservoir Management and (4) everyone interested in application of geostatistics in different geosciences.

A brief word about the author and history of his involvement, usage and development of geostatistics in general and in Croatia. After working as a specialist for geostatistics in INA-Naftapljin for two years and work on dissertation in which he start applying geomathematical methods, Dr. Tomislav Malvić found great difference in level and number of professional publications dedicated to statistics-geostatistics-geomathematics in the world and in Croatia. In petroleum companies all over the world as well as universities that have chairs for petroleum disciplines, geostatistics is a standard tool used for hydrocarbon reservoir characterization, i.e. for estimation of different subsurface values.

Malvić decided to write this handbook because he was aware of a professional interest and need for a book which could offer the basics of geostatistical methods and techniques to Croatian engineers.

However, he firmly followed the basic division of geostatistical methods into three groups: (1) methods for spatial analysis (variogram), (2) interpolation methods (kriging and cokriging) and (3) stochastic simulations (conditional sequential Gaussian simulation). He tried in a simple, clear and applicable way to introduce readers to purposes of described methods and make them able to use it in everyday practice. He succeeded in the best possible way, and he merits special recognition and thanks for it.

We can use this review for a brief introduction of the history of the term *geostatistics*. It originates from Prof. George Mathéron and his associates from the school in Fontainebleau (France). They used this term to describe methods applied to estimate ore concentration, first for gold ore and later for other mineral ores. The usage of geostatistics and statistics in exploration and development of hydrocarbon reservoirs are very closely related because geostatistics is based on some basic statistical values. In the handbook, after two introductory chapters, the adjective *statistical* is used scarcely because it was assumed as an integral part of geostatistical method basics.

The beginning of (geo)statistics is related to the beginning of the "recent reservoir characterization" period in the early 1980s. There was a need for new and improved methods of characterization as a result of very simplified pictures of the underground which were used in petroleum industry. Shortcomings were especially reflected in descriptions of reservoirs in inter-well areas. In such parts, interpolated values very often did not confirm results obtained with new wells, e.g. recovery was less than predicted. Furthermore, the complexity of natural processes and their results indicates geostatistics and especially statistics as disciplines that 'make order' in different measurements and datasets, and show possible rules through values like standard deviation, variance, mean value, variogram, etc. It is why petroleum geologists and engineers started looking at other, auxiliary disciplines, mainly statistics and geostatistics, as tools to improve models and

Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka

Tomislav Malvić

Početkom 2009. godine iz tiska je izašla knjiga *Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka* autora dr. sc. Tomislava Malvića, dipl. ing. geol., znanstvenoga suradnika nedavno izabranoga u to zvanje na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu (RGNF) Sveučilišta u Zagrebu. To je prva knjiga iz toga područja u hrvatskoj geologiji, a druga geostatistike kod nas. Knjiga sadrži 101 stranicu, uz glavni tekst i predgovor, pogovor, tumač pojmova, kazalo i popis literature. Sadržaj knjige podijeljen je na 13 poglavlja i to redom: 1. Uvod; 2. Osnovne statističke procedure; 3. Variogram; 4. Variogramska analiza podataka na kilometarskim udaljenostima; 5. Variogramska analiza na metarskim i centimetarskim udaljenostima; 6. Teorija geostatističke procjene (kriging/kokriging/simulacije); 7. Primjeri interpolacije i simulacije geostatistikom; 8. Seizmički podatak kao sekundarna varijabla; 9. Primjeri upotrebe stohastičkih simulacija; 10. Pogovor; 11. Tumač pojmova; 12. Kazalo; 13. Literatura. Knjiga sadrži 55 slika (djelomice u boji), 13 tablica te 34 formule.

Nakladnik knjige je INA-Industrija nafte d.d., a pomoć kod pripreme i recenzija pružio je Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu. Odlukom Senata Sveučilišta u Zagrebu knjiga je odobrena kao sveučilišni priručnik (*Manuscripta universitatis studiorum Zagrabensis*). ISBN knjige je 978-953-7049-45-4. Recenzenti su bili: dr. sc. Josipa Velić, redovita profesorica RGNF-a; dr. sc. Esad Prohić, redoviti profesor Prirodoslovno-matematičkoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, dr. sc. Kosta Urumović, redoviti profesor RGNF-a i dr. sc. Zoran Peh, viši znanstveni suradnik Hrvatskoga geološkoga instituta. Tekst je lektorirala dr. sc. Ivana Matas Ivanković.

Knjiga jest stručno-znanstveno djelo iz primjene geostatistike u geologiji (a može poslužiti za analize i u drugim geoznanostima). Korisnici kojima je ta vrijedna i nezaobilazna knjiga namijenjena su prvenstveno: (1) studenti RGNF-a i to na dodiplomskim kolegijima Geostatistike i Dubinskoga kartiranja te ponovno iz kolegija Geostatistika na doktorskom studiju geologije; (2) znanstvenici i nastavnici RGNF-a te drugih fakulteta na kojima se

predaje geostatistika; (3) inženjeri geologije u INA-Industrija nafte d.d., SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina, prvenstveno u Sektoru za razradu te Sektoru za istraživanje i (4) svi oni koji se bave geostatistikom u okviru različitih geoznanosti.

A sada nešto o autoru i povijesti njegova bavljenja, uporabe i razvijanja geostatističkih metoda općenito i u nas. Nakon dvije godine rada u INA-Naftaplina na poslovima specijalista za geostatistiku te prethodnog rada na disertaciji dr. sc. Tomislav Malvić tijekom kojih je započeo primjenjivati najčešće geostatističke metode, uvidio je da postoji velika razlika u razini i broju stručnih publikacija koje se bave statistikom-geostatistikom-geomatematikom u svijetu i u Hrvatskoj. U naftnim kompanijama diljem svijeta i na većini sveučilišta koja imaju katedre za naftu i plin, geostatistika je standardni alat upotrebljavan za karakterizaciju ležišta ugljikovodika, odnosno za procjenu različitih vrijednosti u podzemlju.

Odlučio se na pisanje toga priručnika jer je bio uvjeren kako postoji stručni interes i praktična potreba za djelom koje će hrvatskim inženjerima geologije približiti osnovne geostatističke metode i tehnike. Pritom se držao temeljne podjele geostatističkih metoda u tri skupine: (1) metode za prostornu analizu (variogram), (2) interpolacijske metode (krigiranje i kokrigiranje) te (3) stohastičke simulacije (uvjetne Gaussove sekvencijske simulacije). Pritom je nastojao na jednostavan, razumljiv i primjenjiv način čitatelja uputiti u namjenu opisanih metoda te ih stanovito osposobiti za njihovu primjenu u svakodnevnoj praksi. U tome je svakako uspio na najbolji mogući način. Na tome posebno priznanje i zahvala.

Iskoristimo prikaz knjige i za kratko upoznavanje povijesti izraza *geostatistika*. Termin potječe od prof. Georgesa Mathérona i njegovih suradnika sa škole Fontainebleau (Francuska). Tim pojmom opisali su metode za rješavanje pitanja procjene koncentracije prvo zlata, a zatim i drugih vrsta mineralnih sirovina. Upotreba geostatistike i statistike u istraživanju i razradi ležišta ugljikovodika usko su povezane jer se geostatistika temelji na

nekim osnovnim statističkim vrijednostima. U tekstu priručnika, nakon dva uvodna poglavlja, pridjev *statistički* uglavnom će autor izostaviti jer se podrazumijeva da je ona sastavni dio osnove geostatističkih metoda.

Početak upotrebe (geo)statistike vezan je uz početak razdoblja "suvremene karakterizacije ležišta" početkom 80-ih godina prošloga stoljeća. Potreba za novim i poboljšanim metodama karakterizacije pojavila se kao rezultat prilično pojednostavljenih slika podzemlja koje su se upotrebljavale u naftnoj industriji. Nedostaci su posebno bili izraženi kod opisanja ležišnih značajki između bušotina. U tom dijelu interpolirane vrijednosti često nisu bile potvrđene rezultatima iz novih bušotina, pa je primjerice iscrpak ležišta bio manji od predviđenoga. I dalje, složenost prirodnih procesa i njihovih rezultata upućuje na geostatistiku i posebno statistiku kao discipline koje "uvode red" u različita mjerenja i skupove podataka, iskazujući eventualna pravila kroz veličine poput standardne devijacije, varijance, srednje vrijednosti, variograma itsl. Zbog toga su se naftni geolozi i naftni inženjeri okrenuli drugim pomoćnim disciplinama, u prvom redu statistici i geostatistici, kao alatima kojima su nastojali i uspjeli poboljšati svoje modele te ih uklopiti u ležišne studije. S gledišta geostatistike takav geološki model može biti unaprijeđen u detaljan objektni model (*object-based model*) kojim je opisana građa i sastav ležišta, odnosno taložnih tijela i/ili u model distribucije ležišnih parametara, poglavito poroznosti, permeabilnosti i zasićenja fluidima.

Tako raznolika primjena posljedica je razvoja geostatistike kroz tri smjera, ovisno o školi i zemlji gdje je prakticirana. Prvi je naglašavao važnost objektnog modeliranja za rasprostiranje ležišnih facijesa, a posebno je prakticiran u Norveškoj. Američka škola (Stanford) težište je stavila na razvoj i upotrebu različitih vrsta indikatorskih i sekvencijskih simulacija. Treća struja potekla je iz francuskog IFP-a, gdje su upotrebljavane tehnike temeljene na krnjim slučajnim funkcijama (*truncated random functions*). Sva tri pristupa tijekom desetljeća međusobno su se znatno približila, često predstavljajući alternativne

incorporate in reservoir studies. From the viewpoint of geostatistics, such a geological model can be improved to a detailed object-based model, which describes geological settings of a reservoir, i.e. depositional bodies and/or in reservoir parameter distribution model, especially porosity, permeability and fluid saturation.

Such diverse application resulted from development of geostatistics in three ways, depending on school and country where it is practiced. The first emphasised the importance of object modelling of reservoir facies distribution, especially in Norway. The American school (Stanford) put emphasis on development and usage of different types of indicator and sequential simulations. The third group developed from France IFP, where techniques were based on truncated random functions. Through decades, the three approaches became similar to each other, often representing alternative approaches for the same input dataset (seismic, petrophysical and log measurements, facies expressed by indicators, etc.).

The most used mapping methods (also applied in geological models) in Croatian petroleum geological practice are the *linear regression method*, *inverse distance* and *kriging/cokriging*, i.e. *stochastic simulations*. The method of *linear regression* does not take into account raw values, i.e. all measurements respects as the set of equivalent measurements approximated by a straight line. On contrary, *kriging* takes into account the spatial position of original data, i.e. it takes into account original and control data. It is interesting to compare methods of *cokriging* and *regression*. Both of them include usage of a secondary, independent variable, as help in predicting values of the primary (dependent) variable. The *inverse distance method* is one of the simplest interpolation methods (after the polygonal method), which also takes into account the spatial distribution of data. However, this method results in very weak prediction for much clustered data. Advantages of this method compared to kriging are reflected very rarely, i.e. in case of very small number of input data. *Simulations* are a special group of interpolation methods, based on kriging, which performs estimation, as well as determine uncertainties related to each estimated location. Their usage is often correlated to a later selection of several representative realizations, most often based on a statistical criterion, when results are expressed through a value interval.

Geostatistics has been applied in geological modelling in Croatian petroleum geological practice in 2002. Prior to it, estimation of petrophysical values and interpolation of different subsurface maps (contour map of depth and thickness) had been performed by mathematically simpler models which were most often a part of program packages *Openworks™* and *Geo-Graphix™* by the Landmark Company. In the first, experimental phase, the kriging theory was studied and several experimental predictions of porosity in reservoir of the Beničanci field were performed. The result of this phase was selection of geostatistics as the standard tool in the mentioned geological discipline. In 2003 and at the beginning of 2004, geostatistical studies were performed for porosity estimation for each lithofacies in the reservoirs located in fields of the deep part of the Drava depression – Molve, Kalinovac and Stari Gradac; there was also an aggregate geostatistical study of that area. During the period between 2004 and 2005, emphasis was put on acceptance and practical application of stochastic simulations in calculation of pore volume and hydrocarbon reserves in reservoirs. Such calculations were successfully applied in the fields Stari Gradac and Galovac-Pavljani. Generally, geostatistical porosity maps described inter-well areas better, while stochastic simulations indicated volumes, respecting range of input values.

Two additional important aspects can be emphasised, i.e. recognized in reading this handbook. The first is very nice and clear Croatian language used in the text, which is certainly a result of the author's effort. Second, Dr. Tomislav Malvić successfully adapted or translated numerous professional terms from literature to standard, Croatian language (e.g. nugget model = *model odstupanja*; nested variogram model = *ugnižežđeni variogramski model*). This is a very important, pioneer work, i.e. suggested Croatian expressions for some terms exclusively from the field of geostatistics. Moreover, the small dictionary, very carefully balanced as a part of the book, includes excellently defined 28 entries which are the most important in geostatistical reflections.

I strongly believe that present and future researchers, especially geologists of all profiles, are going to consult this handbook very often in their work. The abundance of data, clear design (which is very important for a good book) of graphics and numerical presentations and a lot of examples from Croatian practice make this

handbook a very valuable professional and scientific contribution. It can be applied in everyday engineering work very easily, in geology or petroleum engineering, but also in all other professions which at least slightly deal with rocks and accompanied fluids (e.g. physics, ecology, chemistry etc.).

In sum, conceptually and methodologically, this work is presented very clearly and corresponds to subjects Geostatistics and partially Subsurface Mapping. The author used relevant Croatian and world scientific and professional literature. It is reflected in the list of references, which includes 34 papers and books and 7 titles from the archive of the company where the author is employed. The handbook is partially an original handbook because there is currently no other work in Croatian that encompasses such numerous examples of successful geostatistical analysis from different oil and gas reservoirs from the Croatian part of the Pannonian basin, analysing different geological and petrophysical values. Their interpretations are also an important part of the handbook because they indicate possible uncertainties and how to handle them, especially from the point of good understanding of petroleum geology facts, especially geological framework. The numerous and detailed descriptions of analytical methods, accompanied with illustrations, offer the readers (students of undergraduate and postgraduate studies) excellent education and insight in the current status of geostatistical analysis in geology of oil and gas in Croatia. Respecting the fact there are no other books of similar content and quality in Croatia or are not from the field of petroleum geology, this work has additional value because it filled the emptiness in existing Croatian geological publications. Finally, the handbook is a valuable scientific and professional work that popularizes the field of exploration and production of oil and gas using contemporary geological and especially numerical tools.

About the author: Dr. Tomislav Malvić is employed at INA-Oil Industry Plc., E&P of Oil and Gas, Department of Geology and Reservoir Management, as the advisor of director. He also works as a guest lecturer at the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb, at the Department of Geology and Geological Engineering with the subjects Geology of reservoir fluids and Subsurface mapping. The author's address is Šubićeva 29, 10 000 Zagreb, tel. +385 1 459 2288, fax: +385 1 464 0860, e-mail: tomislav.malvic@ina.hr.

Josipa Velić

mogućnosti za isti ulazni skup podataka (seizmiku, petrofizikalna i karotažna mjerenja, indikatorski izražene facijese i sl.).

Najčešće metode u upotrebi prigrdom kartiranja ili izradbe geoloških modela u našoj naftnogeološkoj praksi su *metoda linearne regresije*, *inverzne udaljenosti* te *krigiranja/kokrigiranja*, odnosno *stohastičke simulacije*. Metoda *linearne regresije* ne poštuje originalne vrijednosti, odnosno sva mjerenja svrstava u skup jednako-vrijednih mjerenja aproksimiranih pravcem. Suprotno tome, *krigiranje* uzima u obzir prostorni smještaj izvornih podataka, tj. poštuje izvorne kontrolne vrijednosti. Zanimljiva je usporedba metoda *kokrigiranja* i *regresije*. Obje uključuju upotrebu sekundarne, nezavisne varijable, kao ispomocu u predviđanju vrijednosti primarne (zavisne) varijable. *Metoda inverzne udaljenosti* jedna je od najjednostavnijih interpolacijskih metoda (poslije metode poligona) koja uzima u obzir i prostorni raspored podataka, no daje vrlo slabe procjene kod izrazito grupiranih podataka (tzv. klasteri). Njezina prednost pred krigiranjem može doći do izražaja samo iznimno, onda kada je ulazni skup izrazito malobrojan. *Simulacije* su posebna skupina interpolacijskih metoda, temeljenih na krigiranju, koje uz procjenu također određuju i nesigurnost vezanu uz svaku lokaciju na kojoj je procjena načinjena. Njihova upotreba često je povezana s kasnijim odabirom nekoliko reprezentativnih realizacija, najčešće prema statističkom kriteriju, te izračunavanja rezultata kroz interval vrijednosti.

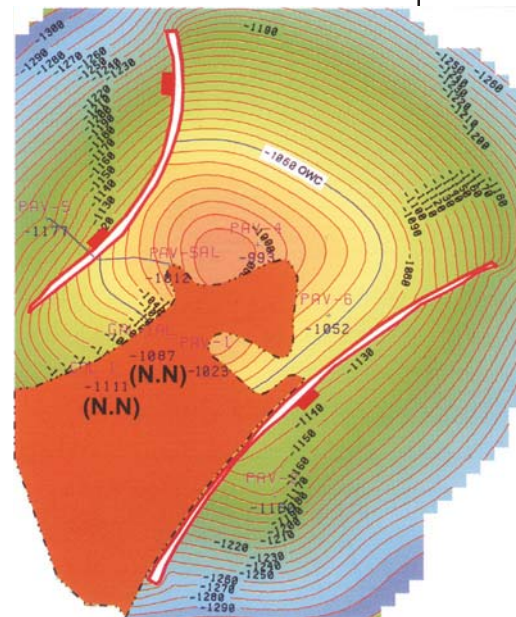
Povijest upotrebe geostatistike kod poslova izradbe geoloških modela u hrvatskoj naftnogeološkoj praksi počela je 2002. godine. Do 2002. procjene petrofizikalnih vrijednosti, te izradbe različitih karata dubina i debljina ležišta (karte stratozohipsi, izopaha i izohora) rađene su matematički jednostavnijim metodama koje su najčešće bile dijelom paketa *Openworks™* i *GeoGraphix™* tvrtke Landmark. U prvoj eksperimentalnoj fazi proučena je teorija krigiranja te načinjeno nekoliko eksperimentalnih procjena poroznosti za ležišta u polju Beničanci. Rezultat eksperimentalne faze bio je utvrđivanje geostatistike kao standardnog alata u već spomenutom području geologije. Tijekom 2003. i početkom 2004. načinjene su geostatističke studije za procjenu poroznosti po litofacijesima za ležišta u poljima dubokog dijela Dravske depresije – Molvama, Kalinovcu i Starome Gradecu, te zbirna geostatistička studija za to područje. U razdoblju 2004-2005. težište je

stavljeno na usvajanje i praktičnu primjenu stohastičkih simulacija za računanje pornog volumena i zaliha ugljikovodika u ležištima. Takvi proračuni uspješno su načinjeni za polja Stari Gradac i Galovac-Pavljani. Općenito, geostatističke karte poroznosti bolje su opisale međubuštinski prostor, a stohastičke simulacije iskazale volumene u intervalu vrijednosti.

Ukazujem na još dva važna aspekta koja se mogu razabrati čitajući ovaj priručnik. Prvi jest da je tekst napisan lijepim i jasnim hrvatskim jezikom što je posve sigurno rezultat u svim okolnostima izraženoga mara i nastojanja autora dr. sc. T. Malvića. Drugo, uspio je brojne stručne termine iz svjetske literature prilagoditi normativu hrvatskoga jezika ili ih prevesti (model odstupanja = *nugget model*; ugniježđeni variogramski model = *nested variogram model*). Time je obavio i važan pionirski zadatak priručnika - predložiti hrvatske izraze za neke pojmove koji su vezani isključivo za geostatistiku. Nadalje, tumač pojmova, pažljivo i izbalansirano, kao bitna sastavnica knjige, sadrži izvrsno definiranih 28 natuknica koje su ujedno i najvažnije kod geostatističkoga promišljanja.

Uvjeren sam da će sadašnji i budući istraživači-prvenstveno geolozi svih usmjerenja, u svome radu često posezati za ovim priručnikom. Niz podataka, njihovi jasni, a i dopadljivi-dobro dizajnirani (što je također bitna sastavnica svih knjiga pa tako i ove) grafički i numerički prikazi te mnogobrojnost primjera iz hrvatske prakse čine djelo vrlo vrijednim stručnim i znanstvenim doprinosom, koje je lako primjenjivo u svakodnevnom inženjerskom poslu, kako geološkom tako i naftnogradarskom te u svim ostalim strukama koje makar samo djelomice zadiru u opise stijenskih masa i ponašanje fluida u njima (poput fizike, ekologije, kemije itd.).

I da sažmem: sadržajno i metodološki djelo je pisano vrlo jasno i odgovara sadržaju predmeta Geostatistika, a djelomice i predmetu Dubinsko kartiranje. Pri izradbi djela autor se služio relevantnom domaćom i svjetskom znanstvenom i stručnom literaturom, što se očituje u priloženom popisu literature koji obuhvaća 34 djela te 7 naslova probranih iz arhiva tvrtke u kojoj autor radi. Priručnik je po svom sadržaju djelomice izvorno djelo jer nigdje dosada u Hrvatskoj nisu u takvom opsegu na jednom mjestu dani brojni primjeri vrlo uspješne geostatističke obradbe više lokacija hrvatskih ležišta nafte i plina u Panonskome bazenu i to s aspekata različitih geoloških i petrofizikalnih vrijednosti.



179

Njihova interpretacija je također važan dio priručnika jer ukazuje na moguće dvojbe i načine njihova rješavanja, poglavito na osnovi dobrog poznavanja naftnogeoloških okolnosti - napose geološkoga sastava i građe. Mnogobrojni i detaljni opisi načina obradbe uz priložene ilustracije pružaju čitateljima-studentima diplomskih i doktorskih studija izvrsnu edukaciju i uvid u recentno stanje geostatističkih obradbi iz domene geologije nafte i plina u Hrvatskoj. S obzirom da druga djela sličnoga sadržaja i kakvoće u Hrvatskoj ne postoje ili se ne odnose na problematiku naftne geologije, ovo djelo dodatno dobiva na vrijednosti popunjavajući prazninu u postojećoj hrvatskoj svekolikoj geološkoj publicistici. I na kraju, uvjeren sam da je knjiga vrijedan znanstveni i stručni rad koji popularizira područje istraživanja i proizvodnje nafte i plina upotrebom suvremenih geoloških, i, poglavito, numeričkih alata.

O autoru: Dr. sc. Tomislav Malvić zaposlen je u INA-Industrija nafte d.d., SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina, u Sektoru za geologiju i upravljanje ležištima, kao savjetnik direktora Sektora. Godujući je predavač na Rudarsko-geološko-naftnome fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, u Zavodu za geologiju i geološko inženjerstvo na kolegijima Geologija ležišta fluida i Dubinsko kartiranje. Adresa autora: Šubićeva 29, 10 000 Zagreb, tel. 459 2288, faks 464 0860, e-pošta: tomislav.malvic@ina.hr

Josipa Velić