

Model geotermalnog ležišta u istražnoj fazi

Geothermal reservoir model in the exploration phase

mr. sc. Željka Sladović, dipl. ing. geol.
GeoDa Consulting d.o.o.
zeljka@geoda.hr

Zoran Mikić, dipl.ing.elec.
GeoDa Consulting d.o.o.
zoran@geoda.hr



Ključne riječi: geotermalno ležište, simulacija proizvodnje, Though2, geološki model, karakter rasjeda, debljina ležišta

Key words: geothermal reservoir, simulation, production, injection, geological modelling, fault character, reservoir thickness



Sažetak

Simulacija geotermalnih rezervoara u fazi prije proizvodnje ili u ranoj fazi proizvodnje odnosi se na predviđanje ponašanja ležišta te se koristi pri dizajniranju odnosa proizvodnih i utisnih bušotina na polju. U sklopu projekta testiran je utjecaj različitih faktora na distribuciju temperature u ležištu pri proizvodnji i utiskivanju: geološkog rješenja, karaktera rasjeda, poroznosti, permeabiliteta i količine CO₂. Modeliranje ležišta napravljeno je pomoću software-a Though2.

Osnovni ulazni podaci za simulaciju bila su tri različita geološka modela napravljena temeljem podataka četiri bušotine i rijetke mreže seizmičkih podataka. Vrste stijena su pojednostavljene te su izdvojeni tipovi R1 koji se odnose na krovinske i podinske stijene, nepropusne dijelove ležišta i nepropusne rasjede, propusni dio dolomitnog ležišta je označen kao tip stijene R2, dok su

propusni rasjedi određeni kao R3. Proizvodnja po bušotini nije se mijenjala u realizacijama, a model je testiran sa različitom distribucijom utisnih količina po bušotini u vremenskom periodu od 20 godina.

Ustanovljeno je u kojoj mjeri stupanj reljefa krovine utječe na promjene temperature u ležištu. Rasjed koji se pruža između proizvodne i utisne bušotine nije utjecao na promjenu temperature koliko se očekivalo dok je bio okarakteriziran kao propusni. Kada mu je karakter promijenjen u nepropusni ubrzao je promjene temperature, jer se ponašao kao 'zid' koji usmjerava tok. Vertikalne i lateralne promjene efektivnih debljina su najutjecajni od strukturno geoloških faktora na distribuciju topline u ležištu.

Ležište je određeno kao ležište sa sekundarnim porozitetom sa utjecajem pukotina više od 70%. Propusnosti su određene temeljem analize jezgara i testiranja bušotina. Uključene su u model kao permx, permy i permz posebno za matriks i pukotine. Nakon testiranja različitih realizacija oblik elipsoida permx/permy se istaknuo kao glavni faktor koji utječe na prohlađivanje područja proizvodnih bušotina.

Simulacija geotermalnih ležišta pomoću Though2 softwarea omogućila je ispitivanje različitih geološko proizvodnih modela polja te je usmjerila daljnje analize koje mogu pomoći da se izbjegne smanjenje temperature na proizvodnim bušotinama.

Abstract

Geothermal reservoir simulation in the pre-production phase or early stage of production phase refers to predicting the behaviour of reservoir and it is helpful in the field design. Within the project the influence of different factors on temperature distribution were tested: geological setting, fault characters, porosity, permeability and CO₂ quantity. The modelling was performed with *Thought2* software.

The main inputs for simulation were three geological models that were built around the four wells based on rare grid of seismic data. Rock types were simplified to impermeable R1 for the top, base and impermeable parts of reservoir and impermeable faults, R2 - fractured dolomites and R3-permeable fault. Production quantities per well were the same for all the cases and models were tested with different injection distribution per well for the period of 20 years.

Simulation showed the level of the temperature decreasing due to greater relief indentation between wells. The faults that strike between injection and production wells don't effect on temperature changes as it was expected when they were determined as permeable. When the one was determined as impermeable an acceleration of temperature changes occurred as it behaved as the 'wall' that directed the flow. Vertical and lateral changes of effective thickness are the major structural geology factor for the temperature distribution.

The reservoir is determined as double porosity, fractured reservoir with the influence of fractures greater than 70%. The permeability was determined based on the testing and core analyses, and incorporated in models as *permx*, *permy* and *permz* for matrix and fractures. After testing several solutions, the *permx*/*permy* ellipsoid shape turned out to be the main factor that leads to cooling the production wells area.

The modelling of geothermal reservoir with *Thought2* software enable investigation of different field designs and directing further analyses in order to avoid temperature decreasing during the geothermal field production.

1. Uvod

Modeli geotermalnih rezervoara izrađuju se s ciljem dobivanja različitih informacija o geotermalnom ležištu, kao što su: vrijeme ekonomske eksploatacije ležišta, raspored novih bušotina koje su potrebne za održavanje proizvodnje, reakcija geotermalnog sistema na različite količine pridobivanja, kako dizajnirati ležište

za optimiziranje utiskivanja fluida te kako temeljni geotermalni parametri reagiraju na proizvodnju.

Neophodno je modelirati ležište u proizvodnoj fazi kada je moguća kalibracija ispravnosti modela s već realiziranom proizvodnjom, no niz je prednosti u modeliranju ležišta u istražnoj i pred proizvodnoj fazi.

U istražnoj fazi simulacija geotermalnog rezervoara odnosi se na predviđanje ponašanja rezervoara te je bez obzira na kvantitativnu i kvalitativnu ograničenost podataka vrlo vrijedan alat u dizajniranju polja.

Ograničenost podataka odnosi se vrlo često na njihovu različitu starost, činjenicu da mjerenja u bušotinama nisu napravljena ciljano za geotermalna ležišta, nedefiniranu ili povijesno višeznačno definiranu strukturu, nepotpunu karakterizaciju pojedinih elemenata strukture, no prije svega ne postojanje proizvodnih testiranja dužeg trajanja.

Usprkos ograničenjima, preliminarni, indikativni modeli daju više informacija od jednodimenzionalnih izračuna (napr. *Stored heat calculations*). Također predstavljaju bazu za nadogradnje u ranoj proizvodnoj i proizvodnoj fazi.

Ograničenja modela u istražnoj fazi moguće je svesti na minimum kroz postavljanje geološkog koncepta temeljenog integracijom svih postojećih podataka na regionalnoj razini i razini rezervoara, reobradom geofizičkih podataka, a posebno dodatnim geofizičkim analizama uz ponovnu analizu karotažnih dijagrama.

2. Primjer modeliranja u ranoj fazi

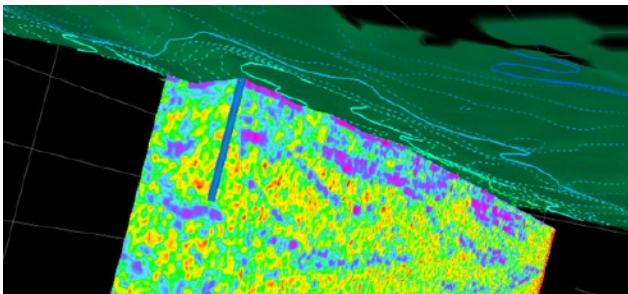
Glavni cilj modeliranja u rezervoara u pred proizvodnoj fazi bilo je testiranje utjecaja različitih faktora na distribuciju temperature tijekom 15 godina proizvodnje. Na području je izbušena jedna bušotina, koja je probušila 200 m rezervoara, no samo 50 m je prekriveno karotažnim mjerenjima, te je prisutna nesigurnost glede njegove debljine.

Rezervoar geotermalne vode je visoko propustan rezervoar frakturiranog dolomita. Dolomiti su tradicionalno dobro frakturiran rezervoar na području Hrvatske, pogodni su za primjenu metoda obrade sloja, velikih su debljina i predstavljaju prvorazredan rezervoar geotermalne vode.

Područje je prekriveno mrežom 2D podataka različite starosti. U sklopu projekta izrađena je reobrada podataka s parametrima ciljano podešenim na nivo rezervoara i područje eksploatacijskog polja.

Podaci su interpretirani, izrađene su analize seizmičkih atributa, analize frakturnog sistema

temeljem seizmičkih podataka (Slika 1.), kao i inverzije akustičnih impedancija.

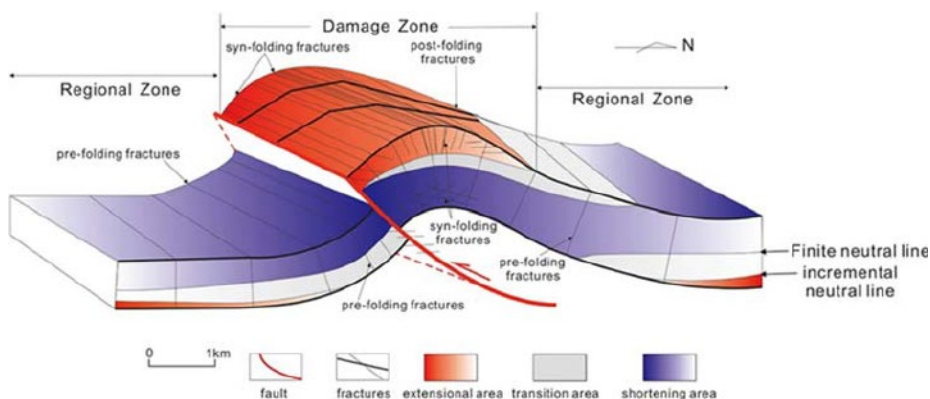


Slika 1. Analiza frakturnog Sistema temeljem 2D seizmičkih podataka

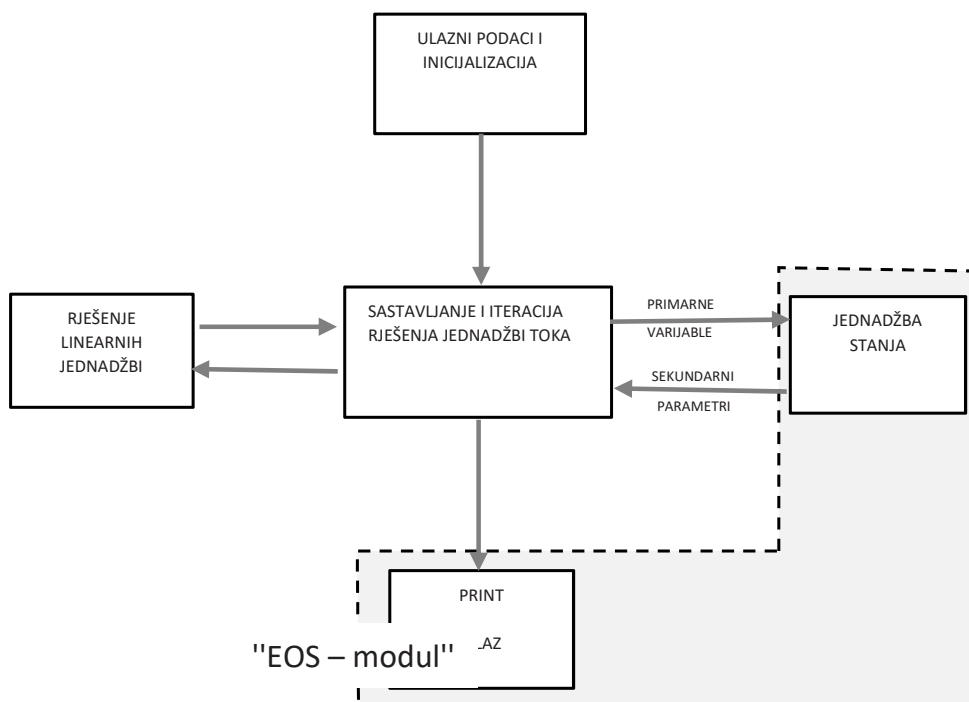
Strukturalna interpretacija i analiza geofizičkih podataka je indicirala postojanje tektonskog modela gdje geneza strukturne forme utječe na raspored, karakter, dužinu i međusoban odnos rasjeda i posljedično fraktura u ležištu.

Temelj modela je utvrđivanje tipova stijena (engl. Rock types). Iako je moguće dijeljenje dolomitne serije na niz podtipova za potrebe modeliranja pojednostavljeno su opisani kao:

- Nepropusni dolomiti (RT1) – krovina, podina i nepropusni dio rezervoara, realizacija kada su rasjedi karakterizirani kao nepropusni;



Slika 2. Raspored fraktura u sistemu (prema JONG, L. et oth (2018) The model of fracture development in the faulted folds)



Slika 3. EOS modul u simulaciji

- Polupropusni dolomiti (RT2) dijelovi rezervoara temeljem analize seizmike i usporedbom sa karotažnim dijagramima manje poroznosti kako primarne tako i sekundarne;
- Frakturirani dolomiti (RT3);
- Propusni rasjedi (RT4);
- Debljina rezervoara razlikuje se u realizacijama;
- Rasjedi su karakterizirani kao propusni u jednom setu realizacija, nepropusni u drugom;
- Distribucija fraktura je modelirana kao pravilna, gdje su postavljene zone rezervoara kao posljedica rasjedanja uzrokovanog navlačenjem u jednoj realizaciji te nepravilna mreža fraktura u drugoj realizaciji;

Propusnost je određena iz analiza jezgara, dobivena testiranjima te su modelirane granične vrijednosti.

Model je izrađen pomoću TOUGH2 software-a. TOUGH2 je osnovni simulator za neizotermalni višefazni tok u frakturiranim poroznim rezervoarima. Statički modeli kao temelj simulacije su postavljeni u Petrasim programu.

Primijenjena jednadžba stanja (engl. equation of State (EOS)) bila je EOS₂, jednofazni uvjeti sa definiranim tlakom (P), temperaturom (T) i parcijalnim tlakom otopljenog CO₂ u vodi.

EOS2 (Slika 3.) je nadograđena verzija modula (O'Sullivan et al.,1985) za opisivanje fluida u plinom bogatih geotermalnim rezervoarima, koji mogu sadržati CO₂ u dijelu mase u količinama od nekoliko pa do više od 80%.

Trenutno je jedna bušotina izbušena na budućem geotermalnom polju. Pretpostavka je buduća proizvodnja sa dvije proizvodne i dvije utisne bušotine. Optimalan raspored bušotina određen je interpretacijom geoloških i geofizičkih podataka.

Proizvodnja bušotina je 100 l/s, količina je određena temeljem analiza nakon desetodnevnog proizvodnog

testiranja i nepromjenjiva je u svim realizacijama. Količina CO₂ varira od 10 do 35 m³/m³. Model je testiran sa različitim distribucijama količina u utisnim bušotinama za period od 15 godina.

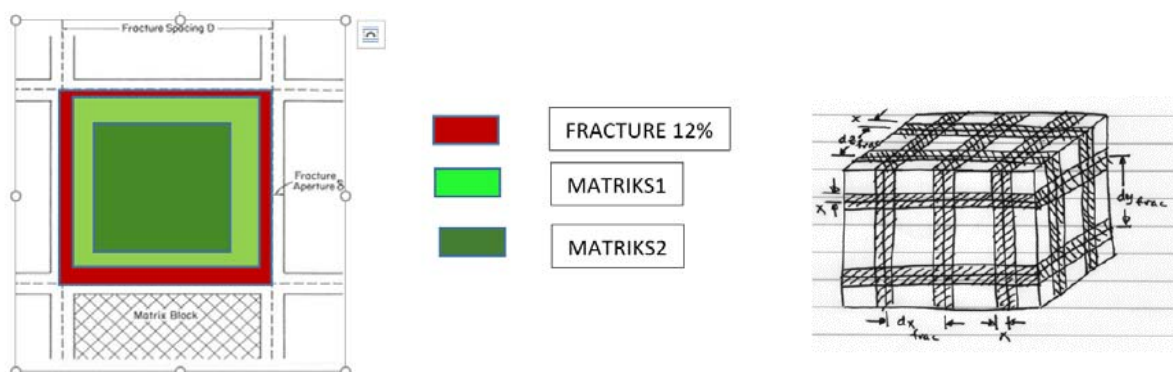
Specifičnost TOUGH2 je korištenje MINC metode (engl »Multiple INteracting Continua«) za aproksimiranje modeliranja toka fluida i topline u frakturiranim poroznim medijima. Glavna pretpostavka je postojanje rezervoara gdje matriks iako može biti i veće poroznosti je manjeg permeabiliteta, dok su frakture bez obzira na poroznost vrlo permeabilan medij.

Citirano: Metoda je primjenjiva u procesima gdje postoji znatna izmjena fluida, topline ili kemijskih elemenata između fraktura i nefrakturirane stijene.

Parametar koji je najosjetljiviji za određivanje i ima najveći utjecaj na model je distribucija fraktura u x,y i z smjeru. Dok je vertikalnu udaljenost fraktura moguće odrediti iz log krivulja, pogotovo ako postoji dip log, koreliranih sa pojavama gubitaka isplake tijekom bušenja, prostorni odnos fraktura moguće je odrediti ili temeljem analize geofizičkih podataka ili temeljem ispravno postavljenog tektonskog modela.

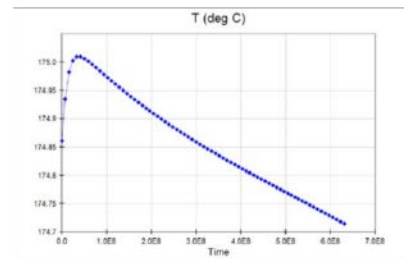
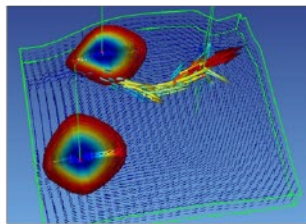
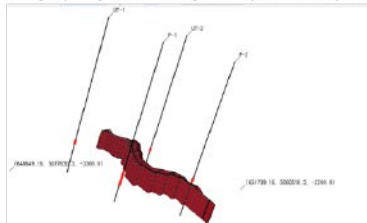
U slučaju prekrivenosti područja 3D seizmikom moguće je primijeniti niz metoda za određivanje fraktura iznad seizmičke rezolucije, no temeljem podataka 2D seizmike mogućnosti su ograničene te je razvijena specifična metoda za određivanje udaljenosti fraktura temeljem reobradene 2D seizmike.

Određuje se distribucija fraktura u svim smjerovima iznad seizmičke rezolucije, a tada se kalibriranjem na bušotinske podatke postavlja proporcionalna mreža koja može biti i ispod rezolucije seizmike. Tako su u modelu napravljane dvije realizacije – za postojanje fraktura ispod rezolucije seizmike 5-8-14 u x y z smjeru, dok je razmak fraktura na nivou seizmičke rezolucije 40 - 65 -110.

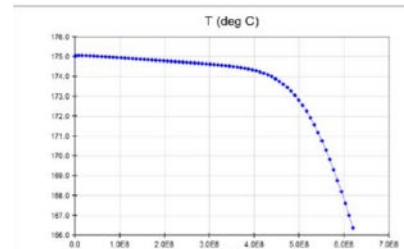
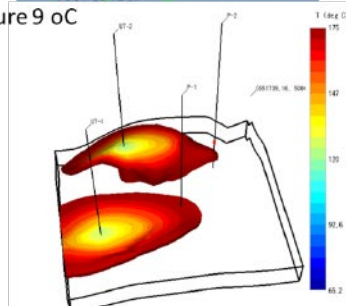
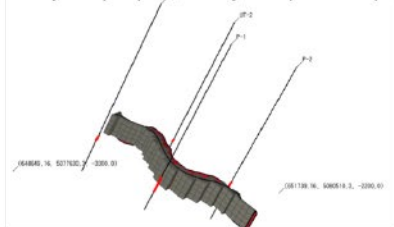


Slika 4 Princip MINC odnosa fraktura i matriksa

Realizacija propusan rasjed– pad temperature 0.3 oC



Realizacija nepropusan rasjed– pad temperature 9 oC



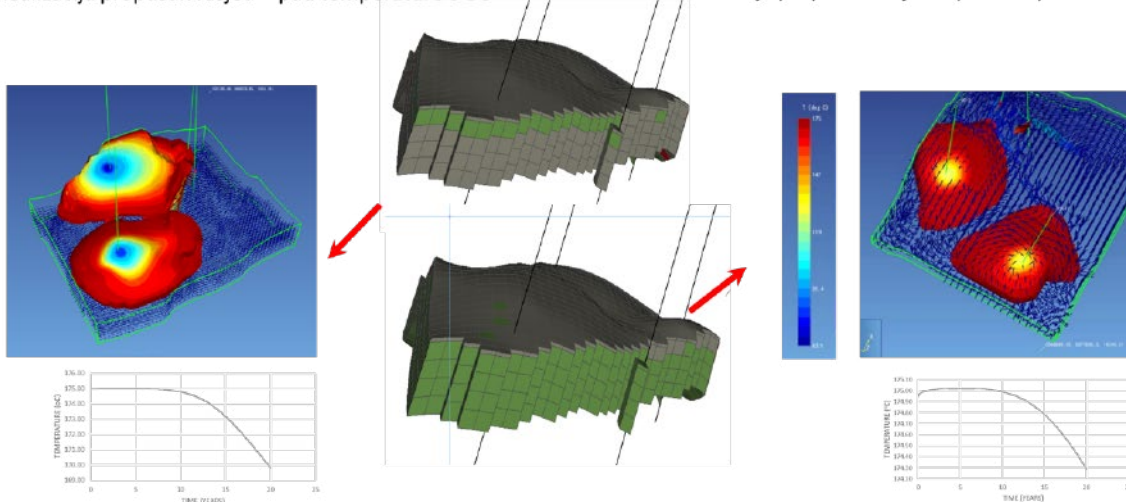
Slika 5. Rezultat simulacije za različite karaktere rasjeda

REALIZACIJA DIO LEŽIŠTA NEPROPUSAN

REALIZACIJA DIO LEŽIŠTA PROPUSAN

Realizacija propusan rasjed– pad temperature 6 oC

Realizacija propusan rasjed– pad temperature 0.7 oC



Slika 6. Rezultat simulacije za različite debljine ležišta

Iz niza rezultata prikazati će se one s utjecajem karakterizacije rasjeda na ponašanje temperature u modelu tijekom 15 godina. Rasjedu približnog smjera I-Z, koji se pruža uz utisnu i proizvodnu bušotinu, u jednoj realizaciji pridodan je karakter propusnosti. Modeliranjem ponašanja ležišta ustanovljeno je da tijekom 15 godina ne dolazi do proboja hladnije vode u zonu proizvodne bušotine te se temperatura na proizvodnoj bušotini smanjila za 0.3°C.

Kada je rasjedu pridodan karakter nepropusnosti, dolazi do znatnog smanjivanja temperature tijekom

proizvodnog razdoblja – oko 6°C. Kada je smanjen postotak utisne količine na bušotini uz rasjed na odnos 40/60%, smanjen je i pad temperature na prihvatljivih 4%.

Debljina ležišta također je kritičan faktor za odnose temperature. U slučaju kada se dijelu ležišta neprekrivenog log krivuljama pridoda vrsta stijene RT1, dolazi do bržeg pothlađivanja u proizvodnim bušotinama, nego kada se interval pridoda vrsta stijena RT3.

3. Zaključak

Preliminarno ležišta se mogu modelirati u istražnoj ili pred proizvodnoj fazi s malom količinom podataka, indikativni su, moguće ih je koristiti i nadograđivati tijekom proizvodnje. Modeli su dobar temelj za testiranje kritičnih pokazatelja geotermalnog polja.

Izložena analiza je pokazala propusni rasjedi imaju manji efekt na temperature u proizvodnim bušotinama dok su nepropusni rasjedi barijere koje kanaliziraju injektiranu vodu.

Element koji izrazito utječe na pad temperature na proizvodnim bušotinama je efektivna debljina ležišta.

Literatura

1. AMYX J. W, BASS D. M., WHITING R. L.: Petroleum reservoir engineering, Mc Graw-Hill Book Comp. (1-511), New York, Toronto, London, 1960.
2. BARIĆ, G. (2002): Karakterizacija ugljikovodika u centralnom dijelu dravske depresije. INA-Naftaplin, Sektor za razradu-interno, Zagreb.
3. BARIŠIĆ M. , WEISSER M.: Nove spoznaje o strukturno-tektonskim i ležišnim odnosima plinsko- kondenzatnog polja Stari Gradac - Barcs Nyugat, Zbornik radova 1. hrvatskog geološkog kongresa (Opatija), I. (51-55), Zagreb, 1995.
4. BROWN A.: Seismic attributes and their classification,
5. CAMPBELL J. M.: GAS CONDITIONING AND PROCESSING, Third Edition, Published by Campbell Petroleum Series, Oklahoma, 1974.
6. GUITING, S.S. et. Oth (2017): Fracture zones constrained by neutral surfaces in a fault-related fold, Jurnal of Structural Geology, Volume 104,
7. JAMIČIĆ D.: O tangencijalnim kretanjima u području slavonskih planina, Nafta br. 34/12 (685-691), Zagreb, 1990.
8. JONG, L. et oth (2018) The model of fracture development in the faulted folds: The role of folding and faulting, Marine and Petroleum Geology, Volume 89
9. MAGARA K.: Compaction and fluid migration - practical petroleum geology (1-319), Amsterdam, 1978.
10. PRUESS, K. et oth. (1999): TOUGH2 USER'S GUIDE , VERSION 2.0 Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory University of California, Berkeley, California 94720
11. SHERIFF, R. E., (1973): Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics, Society of Exploration
12. Geophysicists, Tulsa, OK, p. 69.
13. SHERIFF, R. E., (1992): Basic petrophysics and geophysics, in Reservoir Geophysics, R. E. Sheriff, ed., Investigations in Geophysics No. 7, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, pp. 3749
14. TANER, M. T., (2001), Seismic attributes, CSEG Recorder, pp. 48-56, September Issue.
15. TANER, M. T.: ET OTH.(1979): Seismic attributes revisited
16. WYLLIE, M. R. J., GREGORY, A. R., AND GARDNER, L. W., (1956): Elastic waves in heterogeneous and porous media, Geophysics, 21, pp. 41