

Proizvodne karakteristike frakturiranih bušotina i rizici od procesa frakturiranja u nekonvencionalnim ležištima nafte i plina

Pejovski, Aleksandra

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:206581>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**



Repository / Repozitorij:

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



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

**PROIZVODNE KARAKTERISTIKE FRAKTURIRANIH BUŠOTINA I
RIZICI OD PROCESA FRAKTURIRANJA U
NEKONVENCIONALNIM LEŽIŠTIMA NAFTE I PLINA**

Diplomski rad

Aleksandra Pejovski

N4399

Zagreb, 2024

**PROIZVODNE KARAKTERISTIKE FRAKTURIRANIH BUŠOTINA I
RIZICI OD PROCESA FRAKTURIRANJA U
NEKONVENCIONALNIM LEŽIŠTIMA NAFTE I PLINA**

Aleksandra Pejovski

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Karakteristike nekonvencionalnih ležišta očituju se prvenstveno u maloj šupljikavosti i slaboj propusnosti stijene, koja je u plinskim ležištima niža od 0,1 mD ($0,1E-15$ m²), dok se naftna ležišta kategoriziraju nekonvencionalnima ukoliko je propusnost niža od 1 mD ($1E-15$ m²). Ključni pokazatelj proizvodnih mogućnosti bušotina u ovim ležištima je protok do bušotine, koji osim o propusnosti i šupljikavosti, uglavnom ovisi i o efektivnoj debljini, početnom tlaku te o karakteristikama pornih kanala. Prognoziiranje proizvodnje ugljikovodika iz ovakvih ležišta temelji se na proizvodnim modelima za pritjecanje fluida iz ležišta u bušotinu kroz vertikalnu pukotinu ili kroz horizontalnu bušotinu, koji se analogno primjenjuju na višestruko frakturirane horizontalne bušotine. Kod ovih tipova stimuliranih bušotina dolazi do različitih oblika protoka, kao što su rani i kasni radijalni, rani i kasni linearni, bilinearni i pseudo-radijalni protok za koja postoje rješenja za tlak u bušotini, temeljem kojih se mogu odrediti proizvodne karakteristike bušotine, odnosno softverski postaviti proizvodni modeli za prognoziiranje proizvodnje. Uspješnost procesa hidrauličkog frakturiranja, kao precizne stimulacijske aktivnosti koja je ograničena na djelovanje fluida u iniciranju i napredovanju pukotine u ležišnoj stijeni, utječe na proizvodne mogućnosti bušotine, jer one ovise i o konačnoj visini i poluduljini pukotine. Stoga se u naftno-plinskom inženjerstvu posebna pažnja posvećuje motrenju napredovanja pukotine. Iako je porast interesa javnosti za frakturiranje u nekim državama rezultirao značajnim strahom i nerazumijevanjem onoga što se događa u podzemlju, svi podaci ukazuju da frakturiranje u adekvatno konstruiranim bušotinama nije prijetnja prodiranju pukotine u podzemne vode i da ostali rizici općenito nemaju značajniji utjecaj na onečišćenje okoliša.

Ključne riječi: hidrauličko frakturiranje, nekonvencionalna ležišta, proizvodni modeli

Diplomski rad sadrži: 37 stranica, 20 slika i 22 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentorica: Izv. prof. dr. sc. Sonja Koščak Kolin, RGNF

Ocjenjivači: Izv. prof. dr. sc. Sonja Koščak Kolin, RGNF
Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić, RGNF
Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić, RGNF

PRODUCTION CHARACTERISTICS OF FRACTURED WELLS AND
RISKS FROM THE FRACTURING PROCESS IN
UNCONVENTIONAL OIL AND GAS RESERVOIRS
Aleksandra Pejovski

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The characteristics of unconventional reservoirs are manifested primarily in low porosity and low rock permeability, which in gas reservoirs is lower than 0.1 mD ($0.1\text{E}-15\text{ m}^2$), while oil reservoirs are categorized as unconventional if the permeability is lower than 1 mD ($1\text{E}-15\text{ m}^2$). The key indicator of the production possibilities of wells in these reservoirs is the flow to the well, which, in addition to permeability and porosity, mainly depends on effective thickness, initial pressure and the characteristics of pore channels. Hydrocarbon production forecasting from such reservoirs is based on production models for the flow of fluid from the reservoir into the well through a vertical fracture or through a horizontal well, which are analogously applied to multiple fractured horizontal wells. With these types of stimulated wells, different forms of flow occur, such as early and late radial, early and late linear, bilinear and pseudo-radial flow, for which there are solutions for pressure in the well, based on which the production characteristics of the well can be determined, i.e. software set up production models for production forecasting. The success of the hydraulic fracturing process, as a precise stimulation activity that is limited to the action of the fluid in the initiation and progression of the fracture in the reservoir rock, affects the production possibilities of the well, because they also depend on the final height and half-length of the fracture. Therefore, in oil and gas engineering, special attention is paid to monitoring the progress of the fracture. Although the increase in public interest in fracturing in some countries has resulted in significant fear and misunderstanding of what is happening underground, all data indicate that fracturing in adequately constructed wells is not a threat to fracture penetration into groundwater and that other risks generally do not have a significant impact on environmental pollution.

Keywords: hydraulic fracturing, unconventional reservoirs, production models

Thesis contains: 37 pages, 20 figures and 22 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Associate Professor Sonja Koščak Kolin, PhD, RGNF

Reviewers: Associate Professor Sonja Koščak Kolin, PhD, RGNF
Associate Professor Vladislav Brkić, PhD, RGNF
Associate Professor Borivoje Pašić, PhD, RGNF

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	II
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH JEDINICA.....	III
POPIS KORIŠTENIH KRATICA.....	V
1. UVOD	1
2. HIDRAULIČKO FRAKTURIRANJE U BUŠOTINAMA NEKONVENCIONALNIH LEŽIŠTA	3
2.1. Proces hidrauličkog frakturiranja.....	6
2.1.1. Projektiranje frakturiranja i uporaba kemikalija.....	6
2.1.2. Utiskivanje i povrat fluida za frakturiranje.....	10
2.1.3. Motrenje rasta pukotine (frakture).....	11
2.2. Utjecaji na okoliš kod procesa hidrauličkog frakturiranja.....	14
3. PROIZVODNI MODELI U BUŠOTINAMA NEKONVENCIONALNIH LEŽIŠTA.....	16
3.1. Model protoka kroz horizontalnu bušotinu.....	16
3.2. Model protoka kroz vertikalnu pukotinu.....	22
3.3. Model protoka kroz višestruko frakturiranu horizontalnu bušotinu.....	25
4. DISKUSIJA.....	33
5.ZAKLJUČAK.....	35
6. LITERATURA.....	36

POPIS SLIKA

Slika 1-1. Trokut resursa	2
Slika 2-1. Prikaz rezervi plina u ležištima šejlova prema EIA	3
Slika 2-2. Nekonvencionalna ležišta šejlova i pješčenjaka murske, savske i dravske depresije	4
Slika 2-3. Rast visine frakture	5
Slika 2-4. Geometrija pukotine, PKN (Perkins-Kern-Nordgren) model	7
Slika 2-5. Utjecaj in-situ naprezanja na orijentaciju i protezanje hidraulički stvorene pukotine	12
Slika 3-1. Model horizontalne bušotine	17
Slika 3-2. Bezdimezionalni tlak u središtu horizontalne bušotine, smještene u vertikalnom središtu neograničenog ležišta	18
Slika 3-3. Rani radijalni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom	19
Slika 3-4. Rani linearni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom	20
Slika 3-5. Kasni radijalni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom	21
Slika 3-6. Vertikalna pukotina s bušotinom u središtu	23
Slika 3-7. Model protjecanja fluida kroz pukotinu	23
Slika 3-8. Tipske krivulje za frakturiranu bušotinu u neograničenom ležištu, s konstantnim protokom na unutarnjoj granici ležišta	24
Slika 3-9. Odnos bezdimezionalnog efektivnog radijusa bušotine i bezdimezionalne vodljivosti vertikalne frakture	25
Slika 3-10. Oblici protoka višestruko frakturirane horizontalne bušotine.....	26
Slika 3-11. Bezdimezionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimezionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu poprečnom pukotinom	27
Slika 3-12. Bezdimezionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimezionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu s više poprečnih pukotina osrednje vodljivosti	30
Slika 3-13. Bezdimezionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimezionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu s više poprečnih pukotina velike vodljivosti	30
Slika 3-14. Bezdimezionalni efektivni radijus u funkciji bezdimezionalne duljine horizontalne bušotine presječene s više poprečnih pukotina	32

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH JEDINICA

- A (m^2) - površina prostiranja ležišta
- B (m^3/m^3) - obujamski koeficijent
- C_{fD} (-) - bezdimenzionalna vodljivost pukotine
- c_f (Pa^{-1}) - stlačivost ležišne stijene
- g (m/s^2) - gravitacija
- h (m) - efektivna debljina ležišta
- h_D (-) - bezdimenzionalna debljina ležišta
- h_f (m) - visina pukotine
- k (m^2) - apsolutna propusnost ležišne stijene
- k_f (m^2) - propusnost hidraulički stvorene pukotine
- k_H (m^2) - horizontalna propusnost ležišne stijene
- k_s (m^2) - promijenjena propusnost stijene u pribušotinskoj zoni
- k_V (m^2) - vertikalna propusnost ležišne stijene
- k_z (m^2) - propusnost ležišne stijene u smjeru osi z
- k_x (m^2) - propusnost ležišne stijene u smjeru osi x
- k_y (m^2) - propusnost ležišne stijene u smjeru osi y
- L (m) - duljina horizontalne bušotine
- N (-) - broj pukotina uzduž horizontalnog kanala bušotine
- p (Pa) - tlak
- p_D (-) - bezdimenzionalni tlak
- p_e (Pa) - tlak na radijusu (granici) crpljenja bušotine
- p_{fD} (-) - bezdimenzionalni tlak u pukotini
- p_i (Pa) - početni ležišni tlak
- p_{rD} (-) - bezdimenzionalni tlak u ležištu
- q (m^3/s) - obujamski protok (trenutačna proizvodnja)
- r (m) - radijus
- r_D (-) - bezdimenzionalni radijus
- r_e (m) - radijus crpljenja bušotine, radijus vanjske granice ležišta
- r_{eD} (-) - bezdimenzionalni radijus crpljenja bušotine
- r_e (m) - radijus crpljenja bušotine, radijus vanjske granice ležišta
- r_f (m) - radijus poprječne pukotine kružnog oblika
- r_w (m) - radijus bušotine, radijus unutarnje granice ležišta

r_{wD} (-) - bezdimenzionalni radijus bušotine

r'_w (m) - efektivni radijus bušotine

s (-) - skin faktor zbog promijenjene propusnosti u pribušotinskoj zoni

s_z (-) - skin faktor zbog nepotpunog raskrivanja ležišta horizontalnom XXI

T (K) - temperatura

t_D (-) - bezdimenzionalno vrijeme

t_{Dxf} (-) - bezdimenzionalno vrijeme u funkciji duljine pukotine

w (m) - širina pukotine

x_f (m) - poluduljina pukotine

Z (-) - faktor odstupanja realnog plina od idealnog, Z faktor

ϕ (dio) - efektivna šupljikavost ležišne stijene

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

Oznaka	Opis
AAPG	engl. American Association of Petroleum Geologists
EPA	engl. Environmental Protection Agency
HB	engl. horizontalna bušotina
SAD	Sjedinjene Američke Države
SPE	engl. Society of Petroleum Engineers
VFHB	engl. višestruko frakturirana horizontalna bušotina
WPC	engl. World Petroleum Congress

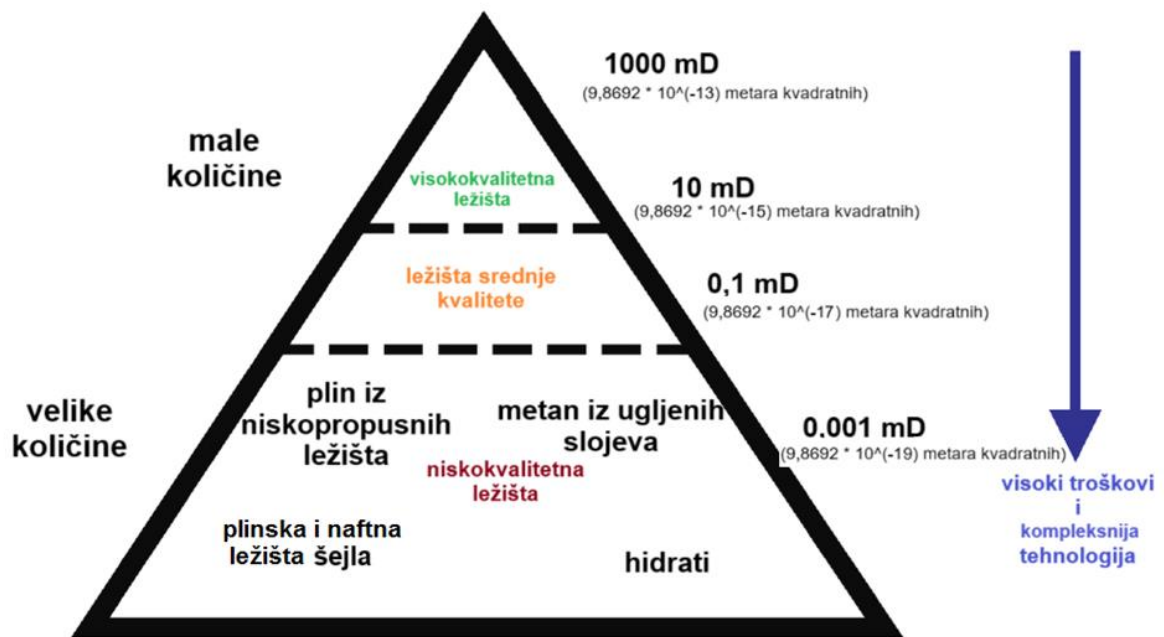
1. UVOD

Nekonvencionalna ležišta ugljikovodika imaju ključnu ulogu u globalnom energetske sektoru, osobito u kontekstu energetske sigurnosti, poticanja ekonomskog rasta i opskrbe plinom tijekom energetske tranzicije (Shell Technology, 2000). Iako istraživanje i proizvodnja ugljikovodika iz ovih ležišta zahtijevaju veća ulaganja u odnosu na konvencionalna ležišta, proizvodnja iz tih ležišta na globalnoj razini se povećava zbog rastuće potražnje za energentima i iscrpljivanja konvencionalnih rezervi. Postoje mnogi tehnološki izazovi za razvoj nekonvencionalnih ležišta koji ovise o složenim geološkim, petrofizikalnim i hidrodinamičkim svojstvima stijena. Stoga su u svijetu trenutno aktualna istraživanja u području projektiranja bušotina koje se izrađuju unutar takvih ležišta što uključuje hidraulički frakturirane, horizontalne, višestruko frakturirane horizontalne (u nastavku „stimulirane bušotine“) i multilateralne bušotine. Razvijaju se i novi fluidi za hidrauličko frakturiranje kao što su nanofluidi, uvode se poboljšanja u tehnologiji izrade i u opremanju dugih horizontalnih kanala bušotine, a nadograđuju se i specifični programi za modeliranje i ispitivanje proizvodnog sustava bušotine.

Primijena horizontalnog bušenja i višestrukog frakturiranja horizontalnih bušotina omogućuju iskorištavanje velikog potencijala nekonvencionalnih ležišta nafte i plina širom svijeta, jer proizvodnja ugljikovodika iz ovih ležišta bez napretka u tehnologiji izrade bušotina ne bi bila moguća s obzirom na njihova složena svojstva. Rizik za okoliš od postupka hidrauličkog frakturiranja, neovisno o tomu radi li se o vertikalnim ili horizontalnim bušotinama, može se pojaviti počevši s transportom materijala za provedbu postupka, a završava s priključenjem bušotine na proizvodni sustav. Kod ovih utjecaja na okoliš tijekom frakturiranja se pretpostavlja da je bušotina korektno konstruirana, tako da su sva potencijalno proizvodna ležišta pouzdano izolirana iza zaštitnih cijevi i cementnog kamena. Opravdanje za ovu pretpostavku je to što je većina frakturiranja prva veća stimulacija bušotine i zbiva se neposredno nakon opremanja nove bušotine. Iako se za mnoge bušotinske probleme tijekom razrade nekonvencionalnih ležišta okrivljuje frakturiranje, samo su iznimni problemi stvarni i vrijedni rasprave u namjeri da se definira granice rizika frakturiranja (Košćak Kolin i Čikeš, 2015).

SAD su imale ključnu ulogu u razvoju nekonvencionalnih ležišta zbog povećane proizvodnje i očekivanog rasta razrade vlastitih ležišta s obzirom na to da su jedna od

vodećih regija s rezervama nafte i plina u ovim ležištima. Prema tzv. 'trokutu resursa' (Masters, 1979), najkvalitetnija (najčišća) nalazišta zauzimaju vršni, najmanji dio trokuta (Slika 1-1). Općenito, kako kvaliteta resursa opada, tako njegova veličina raste. No, za iskorištavanje takvih velikih, a manje kvalitetnih nalazišta, potrebna je viša cijena konačnog proizvoda i poboljšana tehnologija. Također, otkrivanje takvih ležišta zahtijeva drukčiji pristup. Dok je za otkrivanje malih, kvalitetnih ležišta dostatna primjena konvencionalnih metoda (seizmika, geologija), manje kvalitetna ležišta zahtijevaju dodatni inženjering, a ona najveća i najnekvalitetnija i znanstveno-istraživački rad (Čikeš, 1995).



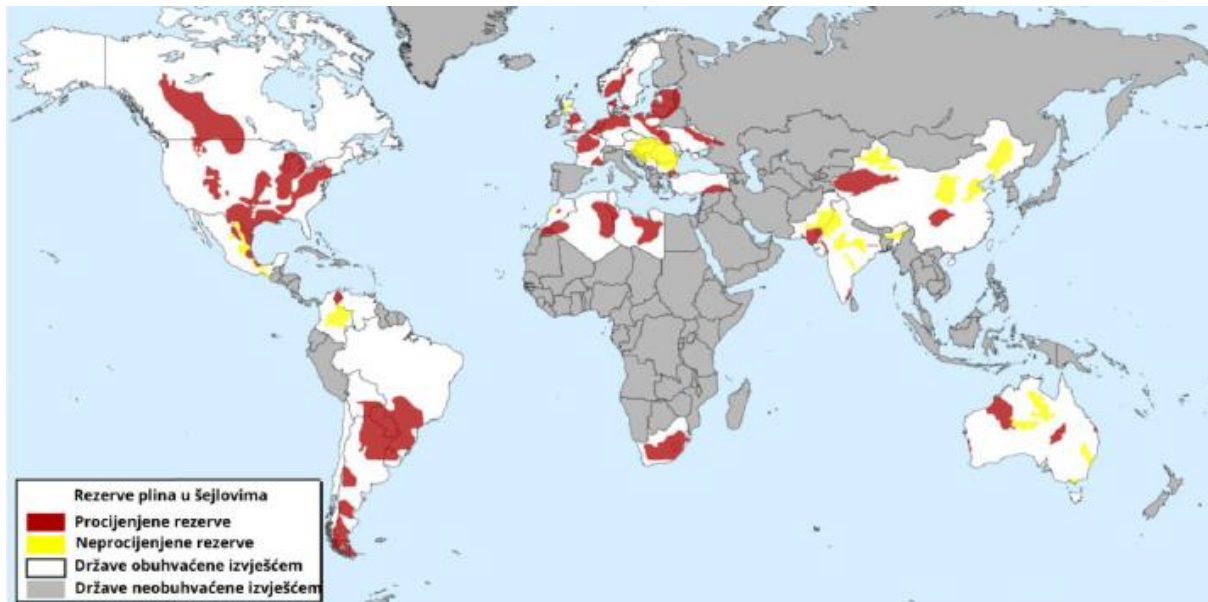
Slika 1-1. Trokut resursa (preuređeno prema Masters, 1979)

Rezerve nekonvencionalnih ležišta nafte i plina imaju distribuciju sličnu trokutu resursa. Kako kvaliteta ležišta opada, odnosno kako se propusnost i šupljikavost smanjuju, količina zarobljenih ugljikovodika raste, pa je razvoj novih tehnologija u svrhu povećanja njihovih proizvodnih mogućnosti i dalje aktualan.

2. HIDRAULIČKO FRAKTURIRANJE U BUŠOTINAMA NEKONVENCIONALNIH LEŽIŠTA

Nekonvencionalna ležišta nafte i plina mogu se kategorizirati u nekoliko skupina, prema fizikalnim karakteristikama stijena i fluida. To su: slabo propusna ležišta, ležišta nafte i plina u šejlovima, ležišta viskozne nafte, plin (metan) u ugljenim slojevima i plinski hidrati. Krovne naftne udruge u svijetu (SPE (engl. *Society of Petroleum Engineers*), AAPG (engl. *American Association of Petroleum Geologists*), WPC (engl. *World Petroleum Congress*) i dr.) prihvatile su zajedničku definiciju nekonvencionalnih ležišta, koja glasi da naftu i plin iz ovakvih ležišta nije moguće crpiti pri ekonomičnom protoku niti u ekonomičnim količinama, ako se bušotinu ne stimulira hidrauličkim frakturiranjem, horizontalnom ili višestruko frakturiranim bušotinama, kako bi se povećala kontaktna površina između ležišta i bušotine (SPE-PRMS, 2007, Koščak Kolin, 2018).

Nekonvencionalna ležišta su otkrivena u mnogim područjima, a najintenzivnije se istražuju u SAD-u i Kanadi, ali i u Kini, Rusiji i Australiji, gdje plin iz ležišta šejlova i pješčenjaka značajno sudjeluje u proizvodnji (Slika 2-1) (Dong et al., 2013).



Slika 2-1: Prikaz rezervi plina u ležištima šejlova prema EIA (engl. Energy Information Administration) (EIA report World Shale Gas Resources, 2013)

U Hrvatskoj su istražnim radovima u područjima savske, dravske i murske depresije utvrđena ležišta prirodnog plina nekonvencionalnih karakteristika, koja obuhvaćaju četiri

šejla i sedam pješčenjaka, označenih narančastim i žutim točkama na karti (Slika 2-2) (Malvić, 2015).



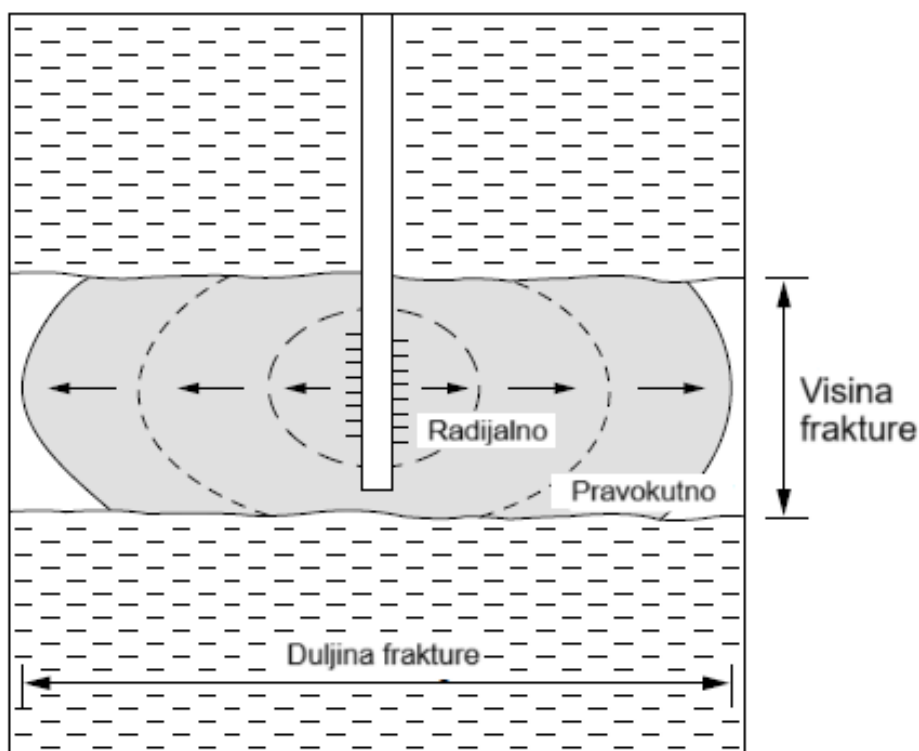
Slika 2-2: Nekonvencionalna ležišta šejlova i pješčenjaka murske, savske i dravske depresije (Malvić, 2015)

Iako je hidrauličko frakturiranje razvijena tehnologija koja se koristi već više od 70 godina u naftnom inženjerstvu, njegova raširena uporaba u proizvodnji plina iz ležišta ugljena i iz lapora potakla je rasprave o potrebi odgovarajućeg nadzora u svrhu zaštite podzemnih i površinskih voda (Arthur et al., 2011). Od prvog hidrauličkog frakturiranja 1948. godine do danas, izvedeni su milijuni frakturiranja širom svijeta.

Porast interesa javnosti za ovu tehnologiju u nekim je državama rezultirao značajnim strahom i nerazumijevanjem onoga što se događa u podzemlju, posebno radi korištenja velike količine vode. Međutim, naftno inženjerstvo je proučavalo problem rasta pukotine po visini desetljećima, pri čemu se posebna pažnja posvećivala motrenju napredovanja pukotine. Svi dobiveni podaci u tipičnim ležištima nafte i plina su pokazali da hidrauličko frakturiranje nije prijetnja prodiranju pukotine u podzemne vode i njihovom onečišćenju ili bilo kakvom drugom poremećaju podzemnih voda (Shell Technology, 2000).

U inženjerskom smislu, frakturiranje podrazumijeva preciznu stimulacijsku aktivnost, ograničenu na djelovanje fluida u iniciranju i napredovanju pukotine u ležišnoj stijeni. Unatoč tomu, za velik dio javnosti, frakturiranje predstavlja gotovo svaku fazu u procesu izrade bušotina, od bušenja do proizvodnje.

S tim u vezi potrebno je predočiti fizičku udaljenost između ležišta pitke vode, koja su sva unutar prvih 300 metara od površine Zemlje, i ležišta nafte i plina, koja su na dubinama najčešće od nekoliko tisuća metara. Visina pukotine, predviđena računalnim modelima i potvrđena mikroseizmičkim praćenjem tijekom frakturiranja, te mjerenjima poslije frakturiranja, ukazuju na najveći vertikalni rast pukotine do 100 metara. Poznato je da je u većini ležišta rast visine pukotine (frakture) ograničen vertikalnim barijerama, tj. pokrovnim i podinskim stijenama, te gubitkom fluida u propusne stijene (Slika 2-3). Visina pukotine, ograničena ovim barijerama, jednostavno ne može značajno rasti, niti doseći ležišta s pitkom vodom frakturiranja (Koščak Kolin i Čikeš, 2015).



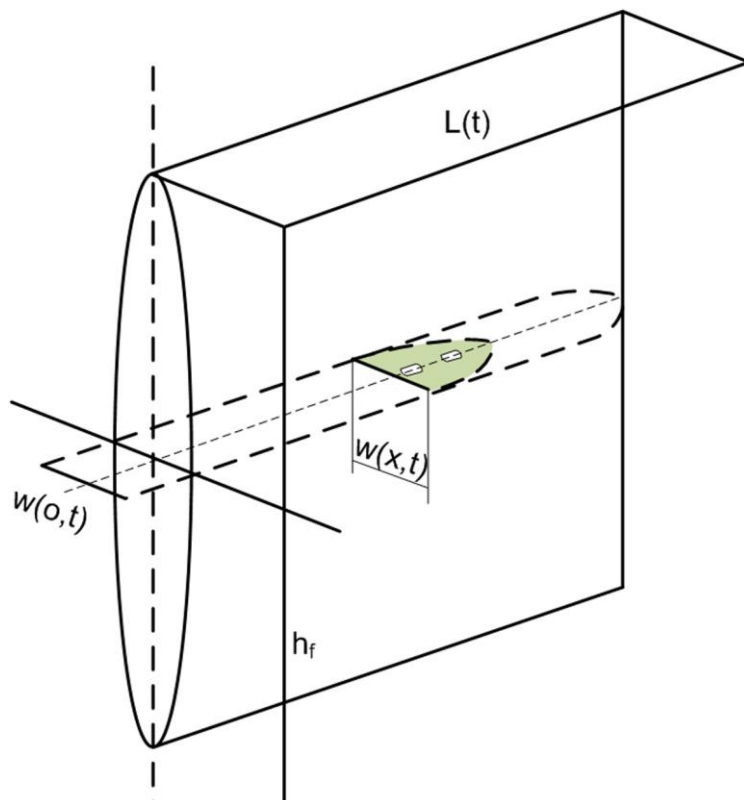
Slika 2-3: Rast visine frakture (Shell Technology, 2000)

Iako je proces frakturiranja više od tisuću metara udaljen od ležišta pitke vode, metan se pojavljuje u izvorima pitke vode, no to onečišćenje je prouzročeno nekim drugim prirodnim i ljudskim čimbenicima. Dio uzroka je prirodni nastanak biogenog metana koji se formira tijekom plitkog raspadanja organskih tvari, te prirodno curenje termogenog metana tj. plina nastalog duboko u Zemlji, a koji posebno u područjima s površinskim izdancima lapora i ugljena izlazi na površinu već milijunima godina. Povećan sadržaj metana u vodocrpilištima može dolaziti i iz nepropisno izrađenih naftnih ili plinskih bušotina u blizini. Takve starije bušotine datiraju prije početka razvoja hidrauličkog frakturiranja i većina ih je starija od postojanja propisa za konstrukciju bušotine. Dublja ležišta su pri većim tlakovima, pa može doći do prodora plina prema plićim ležištima, ako ih se ne izolira kvalitetnim cementiranjem zaštitnih cijevi, u kojima je niži tlak. Ova vrsta curenja metana je većinom malog obujma, a može se uočiti odmah nakon bušenja, što znači da može početi prije nego što je bušotina frakturirana.

2.1. Proces hidrauličkog frakturiranja

2.1.1. Projektiranje frakturiranja i uporaba kemikalija

Projekt hidrauličkog frakturiranja normalno se izrađuje s pomoću računala, a njime se definira obujam i protok fluida za frakturiranje, masu i koncentraciju podupirača, te druge čimbenike nužne za postizanje određenih dimenzija pukotine (Economides i Nolte, 2000). Tipična geometrija pukotine (visina, h_f , širina, w , i dužina, L) prikazana je na Slici 2-4.



Slika 2-4: Geometrija pukotine, PKN (Perkins-Kern-Nordgren) model (Economides i Nolte, 2000)

Cilj je projektirati pukotinu koja će ostati u naftonosnoj, odnosno plinonosnoj zoni, ostvariti maksimalni kontakt između bušotine i ležišta i postići maksimalni protok ugljikovodika uz minimalan udio ležišne vode.

Osim već spomenutih mogućih nedostataka u konstrukciji bušotine, u potencijalne izvore onečišćenja spadaju u transport i skladištenje slatke ili slane vode za frakturiranje, kao i kemikalija i opreme. Uporabom spremnika s dvostrukim stijenkama može se smanjiti rizik izlivanja kemikalija, ili, kad je to moguće, uporabom suhih aditiva. Curenja i izlivanja iz spremnika kreću se u rasponu od manje od nekoliko litara tijekom spajanja površinskih vodova, do vrlo rijetkog istjecanja pune cisterne (20 m³) ili vrlo malo vjerojatnog istjecanja punog spremnika (80 m³) za frakturiranje. Miješanje i utiskivanje fluida povećava rizik od istjecanja i prelijevanja, najprije kod postrojenja za dodavanje kemikalija, kod dodavanja podupirača u miješalicu te prije ulaska u visokotlačne crpke za utiskivanje u bušotinu.

Kemikalije, ili preciznije rečeno, izostavljanje njihovog točnog kemijskog identiteta, vjerojatno je prouzročilo najviše napada u tzv. "anti-frakturnoj" literaturi, iako se relativno mala količina kemikalija koristi u frakturiranju, a to opet nisu "otrovne kemikalije", kao što se često pogrešno navodi u javnosti. Nezavisne laboratorijske analize izvora površinskih voda koje se koriste za frakturiranje pokazuju koncentraciju raznih kemikalija u tragovima, i to ispod dopuštenih granica koje je propisala Agencija za zaštitu okoliša (EPA, engl. *Environmental Protection Agency*). Ovdje je važno naglasiti da one ne potječu od procesa frakturiranja nego dolaze iz poljoprivrednih izvora (herbicidi, pesticidi, fungicidi, itd.) te se na taj način prenose u dotoke podzemnih voda. Te vrste kemikalija nađene su u izvorima za opskrbu pitkom vodom u gotovo svim područjima, neovisno o tomu postoje li kakve aktivnosti naftne industrije ili ne. Neke kemikalije kao što su benzen, toluen, ksilen i etilbenzen, te diesel ulje, fluorouglik, itd., uklonjeni su iz frakturiranja zbog predostrožnosti ili zbog propisa donesenih na temelju straha od eventualnog onečišćenja zaliha pitke vode fluidima za frakturiranje.

Osnovni fluid za frakturiranje na vodenoj osnovi mogu činiti sljedeće komponente:

- Voda – oko 98 % do 99 % ukupnog obujma fluida – najčešće slatka voda (saliniteta <500 mg/kg), ali sve je veći udio obrađene proizvedene vode iz naftnih i plinskih ležišta.
- Podupirač (propant) – oko 1 % do 2 % ukupnog obujma – obično kvarcni pijesak ili keramička zrnca nošena u pukotinu fluidom za frakturiranje, kako bi ju se zadržala otvorenom kad se hidraulički tlak otpusti.
- Dodatak za smanjenje trenja – oko 0,025 % ukupnog obujma – nekiseli oblik poliakrilamida koji se inače koristi kao apsorber u dječjim pelenama i kao flokulant u pripravi pitke vode. Smanjuje gubitak tlaka zbog trenja fluida za frakturiranje tijekom utiskivanja u bušotinu velikim protokom, čime se smanjuje potrebnu hidrauličku snagu.
- Biocidi – oko 0,005 % do 0,05 % ukupnog obujma – obično biocidi glutaraldehida (često antimikrobno sredstvo koje se koristi u bolnicama, pa čak i u mjesnim sustavima za obradu vode) ili kvaternarni amin (dezinficijens pitke vode, a čest je i u kožnim antisepticima koji se mogu naći u slobodnoj prodaji). Koriste se u kontroli rasta nekih vrsta mikroba koji mogu razgraditi gelirane fluide za frakturiranje, ili, u iznimnim slučajevima, mogu izazvati problem generiranja kiselog plina (H₂S) u spremniku.

- Površinski aktivne tvari, koje smanjuju površinsku ili međupovršinsku napetost fluida, razbijaju ili sprječavaju nastanak emulzija, a koriste se u koncentraciji 0,5 do 2 litre po jednom kubičnom metru fluida za frakturiranje.

- Gelirajuća sredstva kao što su polimeri guara i celuloze nisu česti dodatci u slabo viskoznim fluidima za frakturiranje na bazi vode, ali se mogu koristiti u tzv. hibridnom frakturiranju, koje koristi negeliranu vodu da inicira pukotinu i geliranu vodu da nosi podupirač. Ova gelirajuća sredstva su česti dodatci hrani, ne razgrađuju se u otrove i ne smatraju se opasnima.

- Inhibitori kamenca – rijetko korišteni, ovisno o karakteristikama lapora, sprječavaju taloženje minerala u obliku kamenaca.

- Klorovodična (solna) kiselina - sredstvo koje se koristi u plivačkim bazenima, može se koristiti u nekim slučajevima za smanjenje tlaka iniciranja pukotine.

- Inhibitori korozije - jedan od nekoliko organskih spojeva koji mogu biti toksični, koriste se u koncentraciji od 0,2 % do 0,5 % samo u kiselini (ukupni obujam inhibitora po jednom frakturiranju je 30 do 40 litara i to samo ako se koristi kiselina).

Kemikalije koje se vraćaju iz bušotine nakon frakturiranja u povratnom fluidu su samo dio (obično 20 % ili manje za kemikalije i oko 40 % za polimere) od onoga što je utisnuto u bušotinu. Polimeri se brzo razgrađuju pri ležišnoj temperaturi, biocidi se troše na organski materijal i degradiraju, površinski aktivne tvari se adsorbiraju na površinama stijene, a inhibitori kamenca se talože i polako vraćaju u količini od 10 do 15 mg/kg tijekom nekoliko mjeseci. S obzirom na to da su navedene kemikalije odabrane na temelju minimalnog štetnog utjecaja (niska ili nikakva toksičnost, potpuna biorazgradivost i sl.), može se zaključiti da je utjecaj dodanih kemikalija u slučaju izlivanja povratne vode vrlo nizak. Fluide koji se vraćaju iz ležišta najbolje je iskoristiti za održavanje tlaka u naftnim ležištima. Osim toga, odlaganje ovih fluida u dubokim bušotinama također je moguće, ali postoji i mogućnost da ih se ponovno koristi za frakturiranje. Površinsko puštanje bilo koje vode visokog saliniteta s udjelom kemikalija iznad dopuštenih granica nije dobra alternativa navedenom korištenju na naftnom polju ili zbrinjavanju te vode.

Ako čestice propanta (podupirača) prodru kroz stijenske pukotine pod tlakom zatvaranja, propusnost ležišne stijene se može značajno smanjiti, što može predstavljati

dodatan problem upravo u nekonvencionalnim ležištima, gdje se problem nastoji riješiti uvođenjem sofisticiranijih fluida s većom koncentracijom pijeska (Shell Technology, 2000).

2.1.2. Utiskivanje i povrat fluida za frakturiranje

Ovisno o dizajnu i cilju frakturiranja, faza utiskivanja fluida za frakturiranje može trajati od 20 minuta do oko 6 sati. Jedino u rijetkim slučajevima gdje nema prirodne barijere iznad gornje granice ležišta, rast pukotine po visini može dosegnuti do stotinu metara iznad proizvodnog sloja. Vjerojatnije je da će pukotina brzo biti ograničena jednom od mnogobrojnih barijera i iznad i ispod ležišta (Slika 2-3). Budući da je gubitak fluida proporcionalan porastu kontaktne površine ležišne stijene s fluidom, pukotina je limitirana rastućim gubitkom fluida za frakturiranje u propusne slojeve. Daljnje napredovanje pukotine po visini prema gore, jednostavno je nemoguće, s obzirom na ograničenja nametnuta prirodnim barijerama, gubitkom fluida i prirodnim naprezanjima u ležišnoj stijeni, te u pokrovnim i podinskim stijenama.

Ograničenja rasta visine pukotine u horizontalnim bušotinama također se prati mikro seizmičkim mjerenjima. Takvim mjerenjima također je utvrđeno da energija oslobođena pucanjem stijene tijekom utiskivanja fluida ima magnitudu oko sto tisuća puta manju od magnitude najmanjeg potresa koji se može osjetiti (magnituda ~ 3,0). Vjerojatnost stvaranja potresa umjerene magnitude (veće od 5), kao posljedice frakturiranja u ležištima nepoznatog sustava rasjeda, ekstremno je mala, što se lako može potvrditi 3D seizmičkim mjerenjima. Hidrauličkim frakturiranjem se jedino može prouzročiti malo klizanje rasjeda, odnosno vrlo malo podrhtavanje tla, koje je znatno ispod tzv. praga ljudskog "osjeta".

U pravilno projektiranim i izrađenim bušotinama frakturiranje je aktivnost najnižeg rizika u cijelom procesu od izrade do opremanja bušotina, što se posebno odnosi na bušotine dublje od 600 metara. Državni nadzor može odrediti minimalnu dubinu na kojoj je frakturiranje sigurno, temeljem poznavanja lokalnih geoloških opasnosti, kao što su rasjedi i krš, te temeljem iskustva stečenog lokalnim frakturiranjima. Time se također može ograničiti vrsta, obujam i protok fluida za frakturiranje. Ako bušotina nije konstruirana prema važećoj zakonskoj regulativi, moguća je komunikacija kroz necementirani prstenasti

prostor između zaštitnih cijevi i stijenki bušotine, što predstavlja rizik od onečišćenja pri frakturiranju.

Povrat utisnutog fluida provodi se radi čišćenja ležišta od utisnutog fluida za frakturiranje te radi pokretanja proizvodnje plina. Količina vraćenog fluida ovisi o svojstvima ležišta i o količini vode koju je stijena adsorbirala i apsorbirala. Zasićenje vodom tj. količina vode u stijeni ovisi o sastavu i obliku minerala kao što su gline. Ako minerali ležišne stijene nemaju dovoljno vode u svojoj strukturi, oni će vezati i držati vodu iz bilo kojeg dostupnog izvora dok minerali ne postignu razinu zasićenja vezanom ili intersticijalnom vodom. Voda vezana na ovaj način može se tijekom geološkog vremena ponovno isušiti isparavanjem, ali ne očekuje se da će postati pokretljiva tijekom proizvodnog vijeka bušotine. Voda uklonjena dehidracijom neće nositi kemikalije, već će one ostati vezane u stijeni (Woodroof et al., 2003).

Tijekom prva dva do tri tjedna nakon frakturiranja povrat fluida za frakturiranje može iznositi od 0,5 do čak 1 m³/min u prvih nekoliko sati, što često opada na 150 m³/dan u roku od 24 sata, a zatim se brzo smanjuje na manje od 50 m³/dan do kraja drugog ili trećeg tjedna. Nakon toga slijedi postupno smanjenje na nekoliko stotina litara dnevno, što može trajati nekoliko tjedana. Općenito, do pojave metana ne dolazi tijekom povrata vode. Uobičajeno je da dotok vode brzo padne nakon što počne proizvodnja plina, pa se tada bušotinu može priključiti na proizvodni sustav.

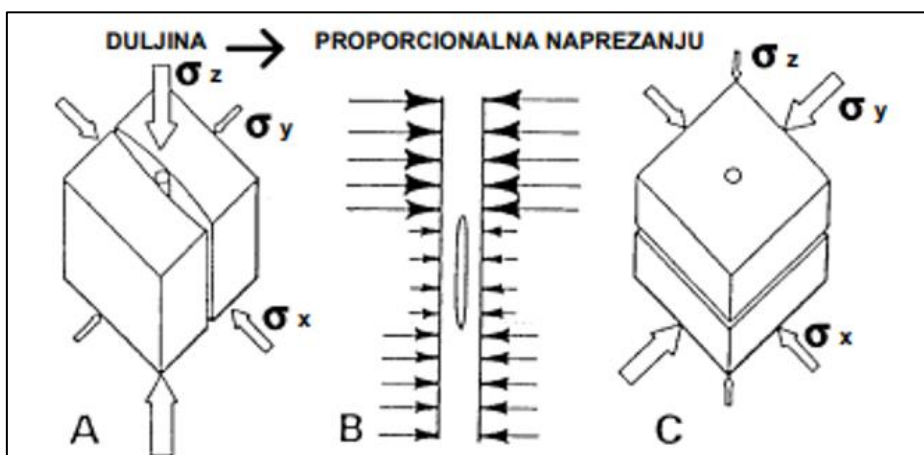
2.1.3. Motrenje rasta pukotine (frakture)

Pukotina koja se razvija u stijeni tijekom hidrauličkog frakturiranja je uska, širine 2 do 3 mm. Ona raste i po duljini (lateralno) i po visini (vertikalno) s blagim širenjem, dok ne naiđe na granicu (barijeru) ili dok se ne postigne dostatan gubitak fluida u bočne pukotine i propusni dio ležišta da se zaustavi njezin rast (Slika 2-3). Čak i pri protoku od 16 metara kubičnih u minuti, sekundarne pukotine i propusni slojevi će brzo apsorbirati dovoljno fluida iz glavne pukotine čime će se ograničiti njezin daljnji rast i po visini i po duljini.

Kad pukotina raste u ravninskom obliku, kakav je obično u pješčenjacima i vapnencima, prilagođava se smjeru koji je određen naprezanjima u stijeni (Slika 2-5). Fraktura pritom slijedi tzv. smjer pukotine ili orijentaciju, koja je okomita na smjer

najmanjeg glavnog naprezanja u stijeni, tj. onog naprezanja koji je stvoren tektonskim i drugim prirodnim silama.

Jedan od najvažnijih parametara, koji utječu na geometriju, orijentaciju (vertikalno/horizontalno) i azimut hidraulički stvorene pukotine, jest in-situ naprezanje (napon), i to u ležišnim, pokrovnim i podinskim stijenama. Opće stanje naprezanja u podzemlju određeno je s tri glavne, međusobno okomite i nejednake komponente, σ_x , σ_y , σ_z , kao što je prikazano na Slici 2-5 (Čikeš, 1995).



Slika 2-5: Utjecaj in-situ naprezanja na orijentaciju i protezanje hidraulički stvorene pukotine (Čikeš, 1995)

Vertikalna komponenta, σ_z , predstavlja geostatički tlak, koji se može izračunati integriranjem obujamske mase pokrovnih stijena od površine Zemlje do dubine ležišne stijene, tj.

$$\sigma_z = \int_0^H \rho(h)gdh \quad (2-1)$$

Tipične vrijednosti vertikalnog naprezanja u sedimentnim bazenima kreću se u rasponu od 23 do 25 kPa/m. Pretpostavljajući linearnu elastičnost ležišnih stijena, horizontalne komponente naprezanja, σ_x , i σ_y , mogu se odrediti jednadžbama:

$$\sigma_x = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) (\sigma_z - p) + p + \sigma_{Ex} \quad (2-2)$$

$$\sigma_y = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) (\sigma_z - p) + p + \sigma_{Ey} \quad (2-3)$$

gdje je ν Poissonov koeficijent, p ležišni (porni) tlak, a σ_E naprezanje prouzročeno vanjskim utjecajima, kao što su tektonski poremećaji, termalni efekti itd.

Usljed naprezanja prouzročenog vanjskim silama, dvije horizontalne komponente naprezanja nisu jednake, no njih je nemoguće izračunati. Stoga se prema iskustvu uzima da na dubinama većim od 300-600 m, najmanje glavno naprezanje uvijek predstavlja jednu od horizontalnih komponenti. Hidraulički stvorena pukotina uvijek će se usmjeriti okomito na najmanje glavno naprezanje, odnosno u smjeru koji zahtijeva najmanji utrošak energije. Ako je najmanje glavno naprezanje jedna od horizontalnih komponenti, rezultirajuća hidraulički stvorena pukotina bit će u vertikalnoj ravnini, a tlak utiskivanja bit će manji od geostatičkog tlaka, σ_z .

Ukoliko je pak najmanja komponenta σ_z , pukotina će nastati u horizontalnoj ravnini a tlak utiskivanja bit će jednak ili veći od geostatičkog. S obzirom na činjenicu da bi ovo moglo biti ostvareno samo u plitkim bušotinama ili u područjima s vrlo aktivnom tektonskom kompresijom, takvi slučajevi predstavljaju iznimke, pa se i u literaturi i u industriji obično analizira samo vertikalna pukotina. Stoga će se razmatranja mogućih rizičnih utjecaja na okoliš odnose isključivo na vertikalnu pukotinu, bez obzira na njen azimut. Iz jednadžbi (2-2) i (2-3) slijedi da je veličina horizontalnog naprezanja funkcija mehaničkih svojstava ležišnih stijena, iskazanih preko Poissonovog koeficijenta.

Na dubinama većim od 600 metara, pukotine su vertikalne i mogu se protezati bočno (lateralno) nekoliko stotina metara od bušotine i obično rastu prema gore i dolje, dok ne dodirnu stijenu različite strukture, teksture i čvrstoće, koja zaustavlja taj rast (Slika 2-3). Ove stijene predstavljaju barijere daljnjem rastu pukotine prema gore ili dolje, a redovito se nalaze u svakom okruženju.

Kao drugi mehanizam koji utječe na zaustavljanje rasta pukotine smatra se gubitak fluida u ležišne stijene. Pod tlakom fluida za frakturiranje pukotina se povećava, što dodatno povećava kontaktnu površinu s ležištem. Kako fluid povećava kontaktnu površinu pukotine s ležištem ili otvara prirodne pukotine, sve veći dio fluida se gubi u ležište, što smanjuje količinu fluida potrebnu za daljnje napredovanje pukotine. S velikom kontaktnom površinom tisuća prirodnih pukotina, koje postoje u laporima, i s malom viskoznošću fluida za frakturiranje, ubrzano rastu gubitci fluida u ležište. To se brzo počinje podudarati s maksimalnim protokom utiskivanja, pa pukotina prestane rasti. Ovaj proces bilježi se

mikroseizmičkim praćenjem pukotine s vrlo brzim rastom na početku frakturiranja što se vrlo često smanjuje, skroz do izostanka rasta tijekom posljednjih 10 % procesa utiskivanja. Kontaktna površina koju stvara fluid za frakturiranje u proizvodnoj zoni prirodno raspucanog ležišta je izrazito velika i često obuhvaća nekoliko tisuća do sto tisuća četvornih metara u prirodno raspucanim laporima, i to u dosegu od nekoliko stotina metara od bušotine.

Primarne metode motrenja za utvrđivanje orijentacije pukotine, njene duljine, širine i visine, te rasporeda podupirača u njoj uključuju primjenu različitih tehnologija kao što je mikroseizmika, tiltmetri, radioaktivni i kemijski obilježivači, te druge tehnologije od kojih se većina koristi i tijekom istražnog bušenja i kod rane razrade ležišta.

Nekonvencionalna ležišta nafte i plina većinom se razrađuju višestruko frakturiranim horizontalnim bušotinama, pa je trenutni trend u industriji uniformno postavljanje bušotina s jednako raspoređenim i udaljenim frakturama duž bušotinskog kanala, a u daljnjoj fazi razvoja ovih ležišta očekuju se poboljšanja u postavljanju faza frakturiranja pri projektiranju horizontalnih bušotina (Alzahabi et al., 2019, Belyadi et al., 2017).

2.2. Utjecaji na okoliš kod procesa hidrauličkog frakturiranja

Utjecaji na okoliš odnose se na rizike koji se pri procesu hidrauličkog frakturiranja mogu desiti. Rizik se definira nesigurnošću ishoda akcije (Holton, 2004). Elementi rizika sastoje se od vjerojatnosti da štetan događaj može nastati i da se učestalost tog događaja može predvidjeti, i od težine (ili utjecaja) tog događaja. Vjerojatnost da se, primjerice, prolijevanje materijala za frakturiranje može dogoditi tijekom transporta do bušotine je jednostavno odrediti pomoću praćenja frekvencije nezgoda izlivanja goriva, prevrtanja kamiona i nekih kvarova opreme, gdje postoji pouzdana baza podataka. Međutim, potencijalno onečišćenje tijekom utiskivanja fluida za frakturiranje nije lako predvidjeti budući da je većina dokaza za stvarne slučajeve onečišćenja negativna, odnosno rijetko je zabilježena u dokumentaciji. To nažalost može stvarati značajnu neizvjesnost vezanu uz mogućnost bilježenja ili ne bilježenja utjecaja onečišćenja tijekom frakturiranja.

U analizi treba razdvojiti već spomenute rizike vezane uz konstrukciju bušotine od samih rizika u procesu hidrauličkog frakturiranja. Stoga se u obzir uzima rizik pri prijevozu

fluida za frakturiranje do bušotine, izvođenje frakturiranja, povrat fluida za frakturiranje iz bušotine prije početka proizvodnje plina i transport fluida za frakturiranje nakon povrata iz bušotine, odnosno njihovo zbrinjavanje. Varijance u lokalnim prijevoznim incidentima zahtijevaju lokalnu analizu rizika frakturiranja za svako mjesto izvođenja stimulacije, što znači da ne postoji opća analiza ovog rizika. Lokalne varijance u analizi rizika su: frekvencija prometnih nezgoda na cestama (od ruralnih do međudržavnih), incidenti povezani s previsokim tlakom kod konstrukcija bušotina, dubina ležišta povezana s rastom visine pukotine i prirodnim barijerama, presijecanje pukotina s drugim pukotinama na istoj dubini, i sl.

Iz navedenog slijedi da najprije treba razlučiti rizik povezan s konstrukcijom bušotine, od specifičnog rizika pri samom frakturiranju ležišne stijene. Vjerojatnost ikakvog kemijskog onečišćenja podzemnih ili površinskih izvora slatke vode specifičnim djelovanjem frakturiranja, primijenjenog u adekvatno konstruiranim bušotinama s dubinom proizvodnog ležišta većom od 600 metara, dokazano je manja od jedan na milijun frakturiranja, zbog samo-ograničavajuće prirode gubljenja fluida iz pukotine i brojnih barijera u svakoj sekvenci dubljih ležišta. Rast pukotine po visini u dubokim ležištima je svega stotinjak metara iznad ciljane zone ugljikovodika, ali tisuće metara ispod najdubljih ležišta slatke vode, što je dokumentirano bušotinskom mikroseizmikom, tiltmetrijom, radioaktivnim i kemijskim obilježivačima, bušotinskom karotažom i drugim metodama (Koščak Kolin i Čikeš, 2015). Slični zaključci vezani za rizične utjecaje na okoliš vrijede i za ostale tipove stimuliranih bušotina.

Od ostalih utjecaja na okoliš najveći ekološki izazov predstavlja adekvatno zbrinjavanje i obrada velike količine vode koja je neophodna kod postupka hidrauličkog frakturiranja, a za koju se u različitim zemljama donose sve strože zakonske regulative.

3. PROIZVODNI MODELI U BUŠOTINAMA NEKONVENCIONALNIH LEŽIŠTA

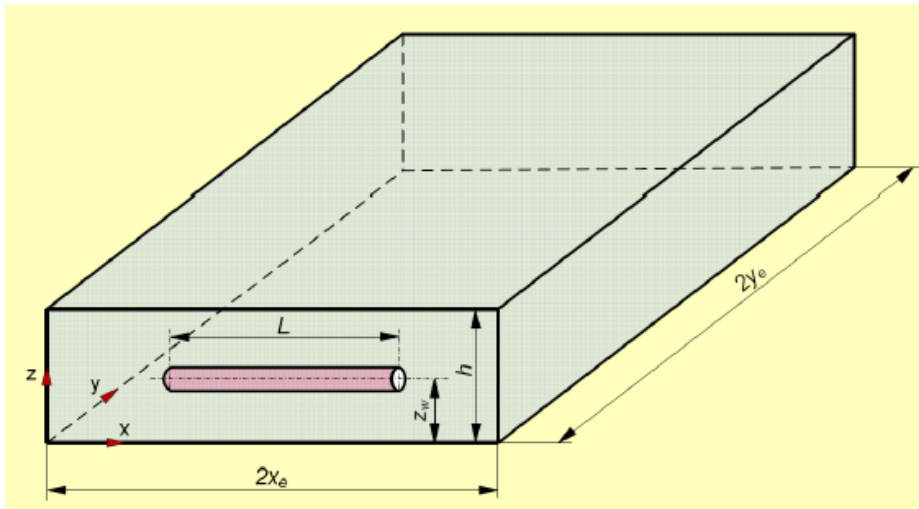
Slabo propusno ležište plina klasificirano je kao ležište čija je propusnost, k , niža od 0,1 mD ($0,1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 = 0,1 \times 10^{-15} \text{m}^2$), iako propusnost nije jedini pokazatelj ležišta koje se može karakterizirati kao slabo propusno, jer protok do bušotine ovisi i o ostalim ležišnim karakteristikama, poput efektivne debljine, h_e , početnog tlaka, p_i ili karakteristika pornih kanala, koje se očituju na krivuljama kapilarnog tlaka. Prognoziranje proizvodnje ugljikovodika iz ovakvih ležišta temelji se na proizvodnim modelima za pritjecanje fluida iz ležišta u bušotinu kroz vertikalnu pukotinu ili kroz horizontalnu bušotinu, koji se analogno primjenjuju na višestruko frakturirane horizontalne bušotine (Čikeš, 2015, Sierra et al., 2013). Za razliku od radijalnog oblika protoka u vertikalnoj bušotini, kod stimuliranih tipova bušotina dolazi do različitih oblika protoka (Economides i Nolte, 2000), temeljem kojih se izrađuju njihovi proizvodni modeli, opisani ukratko u nastavku.

3.1. Model protoka kroz horizontalnu bušotinu

Kod protjecanja fluida u ležištu s horizontalnom bušotinom neustaljeno stanje protjecanja opisano je modelom neograničenog ležišta, prema kojem može doći do četiri različita oblika protoka: ranog radijalnog protoka, ranog linearnog, kasnog radijalnog i kasnog linearnog protoka. Matematički se ovo protjecanje opisuje modelom trodimenzionalnog linearnog protoka. Jednadžba difuzije za takav protok u anizotropnom ležištu ($k_x \neq k_y \neq k_z$) dana je jednadžbom (Matthews i Russel, 1967):

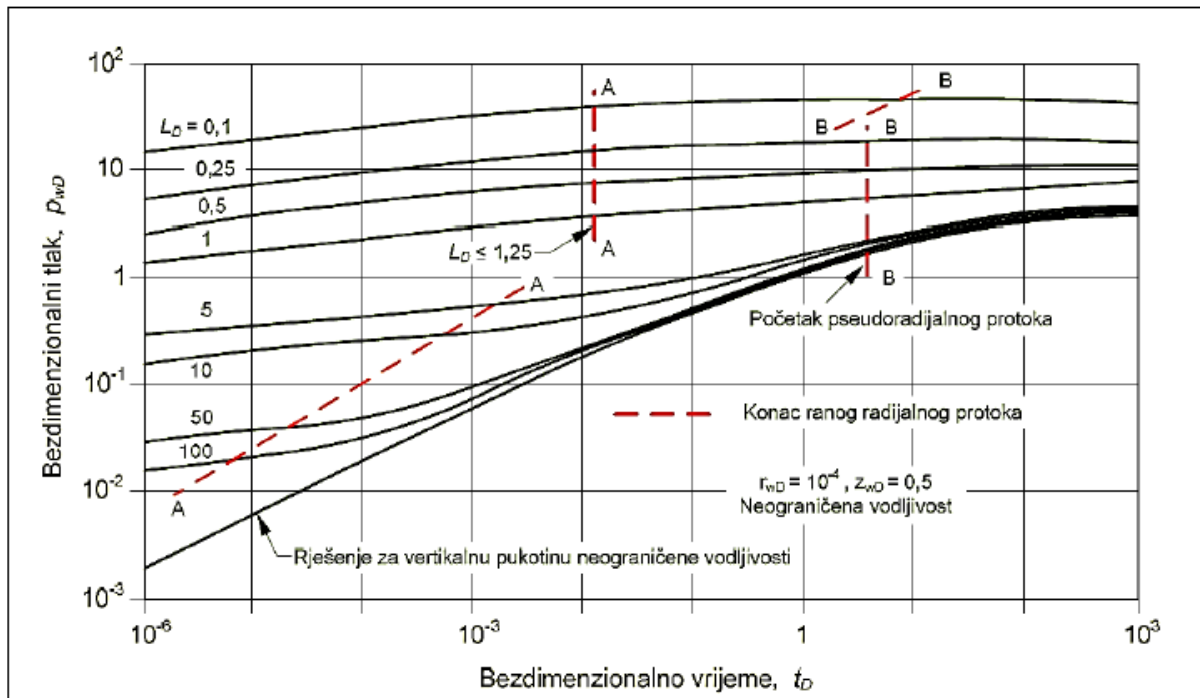
$$k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \phi \mu c_t \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3-1)$$

Na Slici 3-1 prikazan je trodimenzionalni model prilagođen ležištu s horizontalnom bušotinom. U ovom modelu horizontalni dio bušotine ima duljinu L i radijus r_w , izbušen je paralelno osi x , na udaljenosti z_w od dna ležišta, a njegovo središte je u ishodištu koordinatnog sustava ($x = 0, y = 0, z = 0$). Ležište je u obliku kvadra, debljine (visine) h , duljine $2y_e$ i širine $2x_e$, a vrijedi odnos $L < 2x_e$.



Slika 3-1: Model horizontalne bušotine (Koščak Kolin et al., 2013)

Jednadžba (3-1) riješena je za neograničeno ležište, koristeći rješenja razvijena za hidraulički frakturirane bušotine s pukotinom neograničene vodljivosti (engl. *infinite conductivity*) ili jednolikog strujanja (engl. *uniform flux*). Pritom su korištene definicije bezdimenzionalnih parametara, kao što su: bezdimenzionalni tlak, bezdimenzionalno vrijeme, bezdimenzionalna duljina horizontalne bušotine, bezdimenzionalne udaljenosti u smjeru osi x , u smjeru osi y i u smjeru osi z , te bezdimenzionalna vertikalna ekscentričnost bušotine. Osim za neke specifične slučajeve, analitičko rješenje se ne može iskazati poznatim funkcijama, pa su pojedina rješenja dana tablično i u obliku tipskih krivulja. Jedno od tih rješenja u obliku tipskih krivulja prikazano je na Slici 3-2, gdje je prikazan bezdimenzionalni tlak u središtu bušotine, na radijusu, r_w , za različite bezdimenzionalne duljine bušotine, L_D , dan u funkciji bezdimenzionalnog vremena, t_D . Krivulje se odnose na bušotinu u središtu ležišta ($z_{wD} = 0,5$) i za konstantan bezdimenzionalni radijus bušotine ($r_{wD} = 10E-4$).

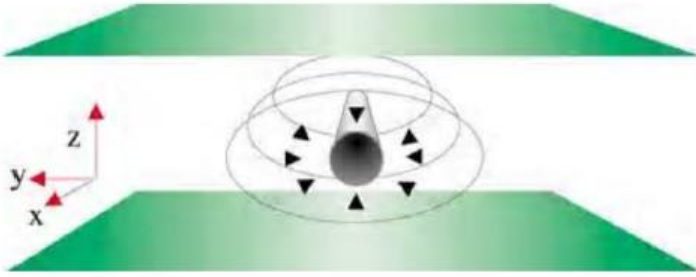


Slika 3-2: Bezdimezionalni tlak u središtu horizontalne bušotine, smještene u vertikalnom središtu neograničenog ležišta (Soliman et. al., 1990)

Rješenje sadrži neustaljeni i ustaljeni protok, a neustaljeni protok indicira moguće pojavljivanje četiri oblik protjecanja (Slika 3-2). Dakle, mogući su redom, rani radijalni protok, rani linearni, kasni pseudo-radijalni i kasni linearni protok, s pomoću kojih su definirana rješenja za izračun propusnosti stijene u proizvodnom i u testu porasta tlaka, analogno opisanoj proceduri za vertikalnu bušotinu (Koščak Kolin, 2018).

Rani radijalni protok se pojavljuje vrlo rano. Čim se bušotinu otvori za proizvodnju ili ju se zatvori za porast tlaka, oblik protjecanja oko bušotine je radijalan u vertikalnoj ravnini. Rani radijalni protok oko horizontalne bušotine sličan je protoku vertikalne bušotine u neograničenom ležištu (Slika 3-3). Drugim riječima, horizontalna bušotina se ponaša kao vertikalna u ležištu debljine jednake duljini horizontalne bušotine, tj. $h = L$.

Rani radijalni protok traje relativno kratko, osim ako je debljina ležišta razmjerno velika, odnosno, ako je horizontalni dio bušotine značajnije udaljen od gornje i donje granice. Međutim, tada radijalni protok može poremetiti obično zanemareni utjecaj gravitacije. Značajnije razlike vertikalne i horizontalne propusnosti također mogu iskriviti radijalne karakteristike ovog perioda protjecanja, mijenjajući oblik protjecanja u eliptični.



Slika 3-3: Rani radijalni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom (Houze et al., 2020)

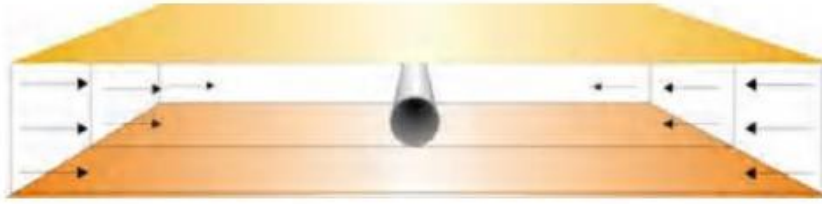
Uzevši da je $h = L$, dinamički tlak u horizontalnoj bušotini, koja proizvodi konstantnim protokom, za vrijeme ranog radijalnog protoka, dan je jednadžbom za radijalni protok vertikalne bušotine u neograničenom ležištu (Čikeš, 2015):

$$P_{wf}(t) = P_i - \frac{qB\mu}{2\pi L\sqrt{k_y k_V}} \left[\frac{1}{2} \left(\ln \frac{\sqrt{k_y k_V} t}{\phi \mu c_t r_w^2} + 0,80907 \right) + s \right] \quad (3-2)$$

Trajanje ranog radijalnog protoka određeno je vremenom potrebnim da se dosegne najbliža granica, što može biti gornja ili donja granica ležišta (krovina ili podina) ili, pak, vrh bušotine.

Rani linearni protok nastupa ako je horizontalni dio bušotine dostatno dug u usporedbi s debljinom ležišta, pa gornja i donja granica ležišta utječu na ponašanje tlaka, dok je utjecaj vrha bušotine zanemariv. Kod pojave linearnog protoka je glavna pada tlaka u horizontalnom smjeru, a fluid se giba linearno prema bušotini (Slika 3-4). Minimalni uvjet za postojanje ovog oblika protoka u ležištu s horizontalnom bušotinom, definiran je:

$$L \geq 3,33(h - z_w) \sqrt{\frac{k_y}{k_V}} \quad (3-3)$$



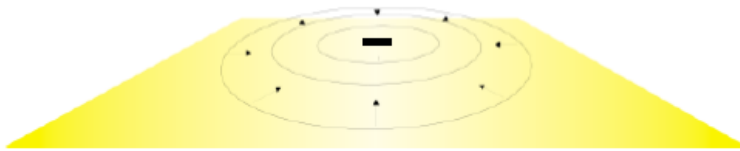
Slika 3-4: Rani linearni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom (Houze et al., 2020)

Rani linearni protok prema horizontalnoj bušotini sličan je protoku prema vertikalnoj pukotini neograničene vodljivosti, u neograničenom ležištu, ali s nepotpunom penetracijom po debljini ležišta. Drugim riječima, horizontalna bušotina se ponaša kao frakturirana vertikalna, s visinom pukotine manjom od debljine ležišta, tj. $h_f < h$. Razlika tlaka za vrijeme linearnog protoka glasi:

$$p_i - p_{wf}(t) = \frac{qB\mu}{2\pi k_H h} \sqrt{\frac{\pi k_H t}{\phi\mu c_t (L/2)^2}} \quad (3-4)$$

Početak linearnog protoka određen je vremenom dosezanja gornje i donje granice ležišta, a svršetak ranog linearnog protoka određuje vrijeme kod kojeg utjecaj vrha bušotine postaje značajan.

Kasni pseudo-radijalni protok se javlja kad se poremećaj tlaka u ležištu odmakne dostatno daleko od bušotine da se ona doima kao točka prema kojoj se ležišni fluid giba radijalno u horizontalnoj ravnini (Slika 3-5). Ovaj period je analogan pseudo-radijalnom protoku u vertikalnoj frakturiranoj bušotini. Slično, vrijeme postizanja ovog oblika protjecanja u slabo propusnim ležištima može biti vrlo dugo. Minimalni uvjet za uspostavljanje pseudo-radijalnog protoka u ležištu s horizontalnom bušotinom definiran je kao $L/2x_e < 0,45$.



Slika 3-5: Kasni radijalni protok u ležištu s horizontalnom bušotinom (Houze et al., 2020)

Razlika tlaka za vrijeme pseudo-radijalnog protoka u ležištu, nakon uvrštavanja definicija bezdimenzionalnih varijabli i dodatnog pada tlaka zbog skin efekta glasi:

$$p_i - p_{wf}(t) = \frac{qB\mu}{2\pi k_H h} 1,151 \left(\log t + \log \frac{k_H}{\phi\mu c_i L^2} + 1,822 \right) + \frac{qB\mu}{2\pi L \sqrt{k_y k_V}} (s + s_z) \quad (3-5)$$

Kraj ovog protoka je onda kad se očituje utjecaj jedne od lateralnih granica ležišta, tj. granica u smjeru osi x ili granica u smjeru osi y.

Kasni linearni protok se pojavljuje kad je ležište izduljeno u smjeru okomitom na horizontalnu bušotinu, tj. u y smjeru. Nakon dostatno dugog vremena proizvodnje, granice ležišta u vertikalnom smjeru i u smjeru horizontalne bušotine (x smjer) počinju djelovati, pa je protok u ova dva smjera u biti polu-ustaljen. Stoga je protok u smjeru okomitom na smjer bušotine linearan. Analogno ranom linearnom protoku, pad tlaka u ležištu je dan jednadžbom (3-6), s tim da L postaje $2x_e$, uzimajući u obzir dodatni pad tlaka zbog skin faktora gdje je pseudo skin, s_x , prouzročen nepotpunom penetracije bušotine po cijeloj širini ležišta ($L < 2x_e$):

$$p_i - p_{wf}(t) = \frac{qB}{2x_e h} \sqrt{\frac{\mu t}{\pi\phi c_i k_H}} + \frac{qB\mu}{4\pi x_e \sqrt{k_y k_V}} (s + s_z + s_x) \quad (3-6)$$

Oblici protoka koji se pojavljuju kod horizontalne bušotine, analogno se interpretiraju u analizi tlaka i kod frakturiranih i kod višestruko frakturiranih horizontalnih bušotina u konvencionalnim i nekonvencionalnim ležištima nafte i plina. To znači da se i u ova dva tipa stimuliranih bušotina najprije definiraju odgovarajuće jednadžbe difuzije, temeljem kojih se određuju jednadžbe za analizu tlaka svakog pojedinog oblika protoka. Iz tog razloga su proizvodni modeli frakturirane i višestruko frakturirane bušotine u nastavku izneseni ukratko.

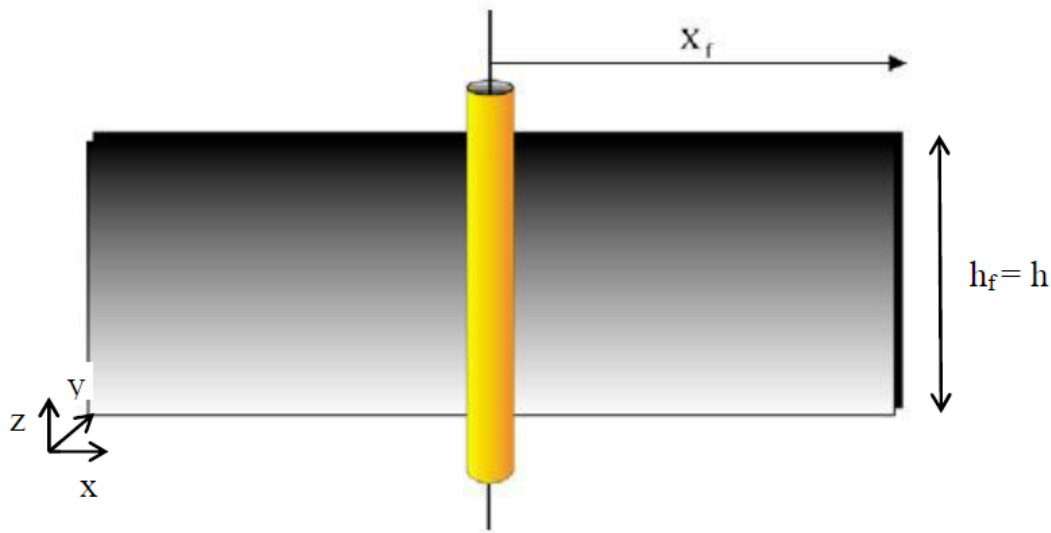
3.2. Model protoka kroz vertikalnu pukotinu

Ako je idealizirano homogeno i izotropno horizontalno ležište, presječeno vertikalnom pukotinom, tada se pritjecanje prema vertikalnoj bušotini, smještenoj u ishodištu pukotine može opisati jednadžbom difuzije za dvodimenzionalni linearni protok (protok kroz pukotinu) i jednadžbom difuzije za jednodimenzionalni linearni protok (protok u ležištu). Te dvije parcijalne diferencijalne jednadžbe međusobno su povezane rubnim uvjetima, a ovisno o definiciji početnih i rubnih uvjeta, postoje rješenja za konstantan protok na unutarnjoj granici ležišta i za konstantan tlak na unutarnjoj granici ležišta. Numerička rješenja dana su u obliku tipskih krivulja, dok su za pojedine vremenske segmente:

- linearni protok u pukotini
- bilinearni protok u pukotini
- linearni protok u ležištu
- pseudo-linearni protok u ležištu
- pseudo-radijalni protok u ležištu,

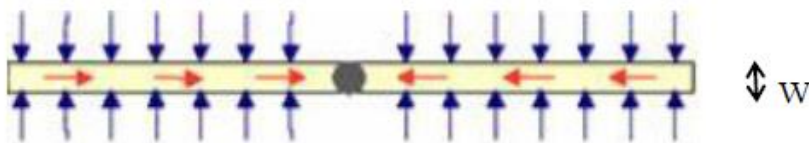
razvijena i približna analitička rješenja. Sva rješenja daju funkcionalnu ovisnost bezdimenzionalnog pada tlaka, odnosno bezdimenzionalne kumulativne proizvodnje o bezdimenzionalnom vremenu proizvodnje i bezdimenzionalnoj vodljivosti pukotine (Čikeš, 2015).

Primjer idealizirane vertikalne pukotine prikazan je na Slici 3-6, gdje se radi o izotropnom, homogenom, horizontalnom, vertikalno ograničenom, a lateralno neograničenom prikazu ležišta, uz pretpostavku da sadrži zanemarivo stlačiv fluid (tj. konstantne stlačivosti, c) i viskoznosti, μ . Šupljikavi medij ima propusnost, k , poroznost, ϕ , debljinu, h i početni ležišni tlak, p_i , a bušotinu presijeca simetrična, potpuno penetrirajuća vertikalna pukotina ($h_f = h$), poluduljine, x_f , širine, w , propusnosti, k_f , šupljikavosti, ϕ_f i ukupne stlačivosti, c_f . Svojstva ležišta i pukotine su neovisna o tlaku, a za protok se pretpostavlja da je Darcyjev, da su gradijenti tlaka mali, gravitacijski efekti te efekti močivosti i kapilarnih sila zanemarivi, te da fluid utječe u bušotinu samo kroz pukotinu. Protok fluida uz ove pretpostavke može biti opisan jednadžbom difuzije u dvije dimenzije, s tim da se sustav podijeli u dva protočna područja - pukotinu i ležište.



Slika 3-6. Vertikalna pukotina s bušotinom u središtu (Houze et al., 2020)

Pukotinu se može prikazati trodimenzionalnim linearnim modelom u kojem nema protoka u smjeru osi z , ali su dimenzije modela promijenjene tako da je $\Delta y = w$, $\Delta z = h$. Takav dvodimenzionalni protok prikazan je na Slici 3-7, gdje je bušotina predstavljena plohom, površine wh .

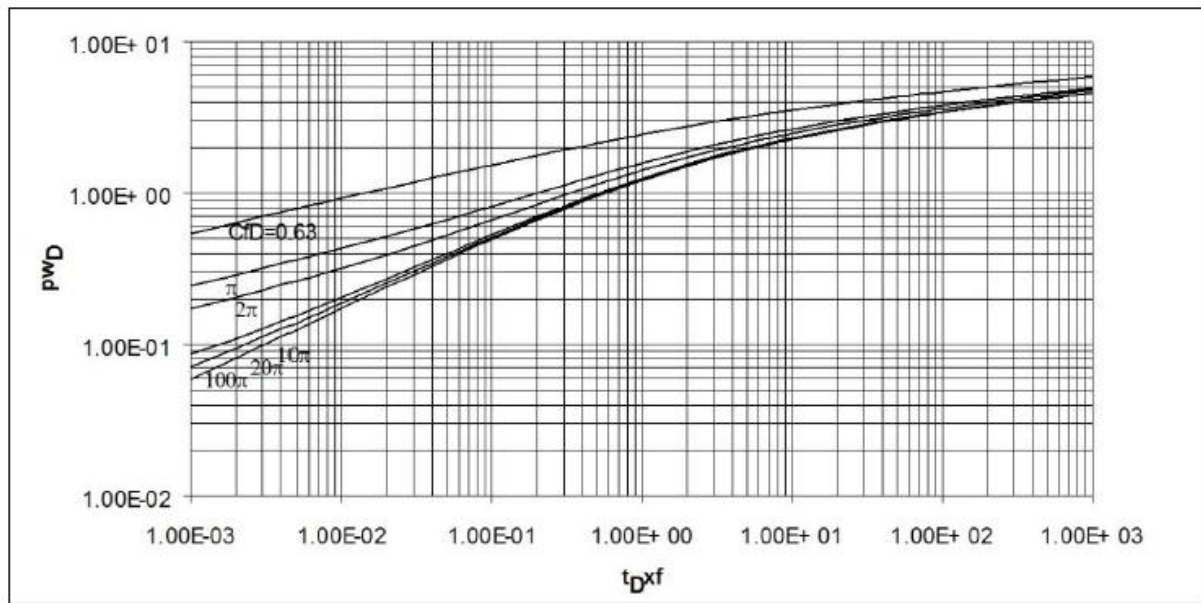


Slika 3-7. Model protjecanja fluida kroz pukotinu (Houze et al., 2020)

Maseni utok fluida u pukotinu u smjeru osi y odvija se kroz dvije stjenke pukotine, ukupne površine $2\Delta xh$, brzinom, v_y , dok je izlaz jednak nuli. Uvođenjem Darcyjevog zakona za protok u smjeru osi y (v_y), iz jednadžbe kontinuiteta za dvodimenzionalni linearni protok, slijedi jednadžba difuzije za protok kroz pukotinu (Economides i Nolte, 2000).

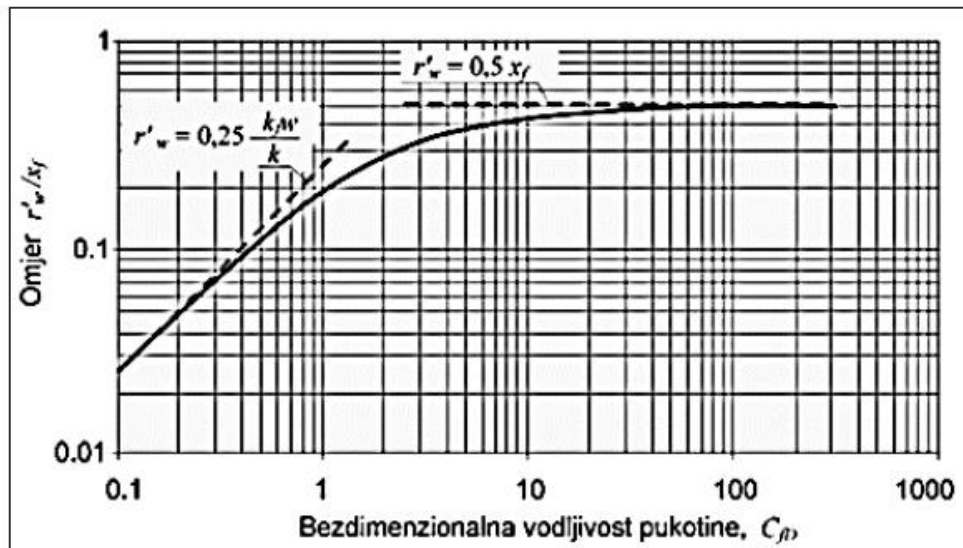
Jednodimenzionalni linearni model, u kojem fluid teče brzinom, v_y , okomito na pukotinu, predstavljenu plohom visine, h , i duljine, $2x_f$, opisuje protok fluida u ležištu. Dvije parcijalne diferencijalne jednadžbe međusobno su povezane početnim i rubnim uvjetima, a ovisno o njihovoj definiciji razvijena su dva rješenja, od kojih se u analizi testa porasta tlaka koristi model frakturirane bušotine s konstantnim protokom na unutarnjoj granici ležišta. U

tom modelu su za frakturiranu bušotinu u neograničenom ležištu, koja proizvodi konstantnim protokom, početni i rubni uvjeti definirani tako da je početni tlak u pukotini jednak ležišnom tlaku, da se utok u bušotinu odvija samo kroz pukotinu ukupne površine, $2wh$, prema Darcyjevom zakonu i da kroz vrh pukotine nema utoka u pukotinu. Dvije jednačbe difuzije riješene su semianalički za tlak u pukotini, p_{fD} , odnosno za tlak u bušotini, p_{wD} , koji je jednak tlaku u pukotini kod $x_D = 0$, a grafički prikaz rješenja dan je u obliku tipskih krivulja na Slici 3-8.



Slika 3-8. Tipске krivulje za frakturiranu bušotinu u neograničenom ležištu, s konstantnim protokom na unutarnjoj granici ležišta (Čikeš, 2015)

Matematički opis protoka iz ležišta u frakture svih vodljivosti se opisuje kao slučaj u kojem se nakon dovoljno dugog perioda bušotinu može opisati kao 'proširenu bušotinu' s efektivnim radijusom, koji se može odrediti prema jednačbama na Slici 3-9.



Slika 3-9. Odnos bezdimenzionalnog efektivnog radijusa bušotine i bezdimenzionalne vodljivosti vertikalne frakture (Košćak Kolin, 2018)

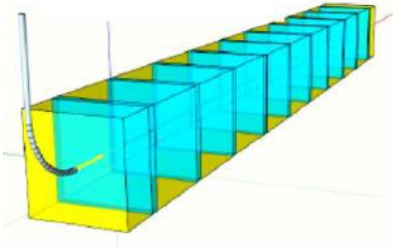
Drenažni radijus kod ovakvog protoka može se pretpostaviti da je jednak u svim horizontalnim smjerovima, tj. da se radi o pseudo-radijalnom protoku kao u slučaju vertikalne bušotine, što predstavlja dobru pretpostavku ukoliko je odnos dimenzije pukotine malen u odnosu na drenažni radijus. Što je veća vodljivost frakture, to kasnije dolazi do uspostavljanja ovakvog tipa protoka. Fizikalno, uspostava pseudo-radijalnog protoka znači kraj transformacije pravokutnog oblika crpljenja (linearni protok), preko eliptičnog (prijelazni oblik) u gotovo radijalni oblik. Površina crpljenja u biti ne postaje potpuno kružna, ali ju se za praktične svrhe takvom može smatrati. To znači da se jednadžbe izvedene za radijalni protok mogu koristiti za pseudo-radijalni protok, uz zanemarivu grešku.

3.3. Model protoka kroz višestruko frakturiranu horizontalnu bušotinu

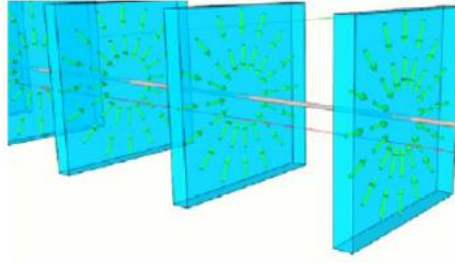
U svrhu poboljšanja proizvodnosti ležišta manje propusnosti, s nepovoljnom vertikalnom anizotropijom propusnosti, horizontalnu bušotinu se hidraulički frakturira. Ovisno o orijentaciji horizontalnog dijela bušotine u odnosu na orijentaciju minimalnog horizontalnog naprezanja u ležištu, hidraulički stvorena pukotina može nastati uzdužno ili poprečno u odnosu na bušotinu (Čikeš, 2015).

Poprečne frakture će nastati ako je horizontalni dio bušotine izbušen u smjeru minimalnog horizontalnog naprezanja, te će se rasprostirati u dizajniranom broju, uzduž osi bušotine, na njenim perforiranim dijelovima (Slika 3-10).

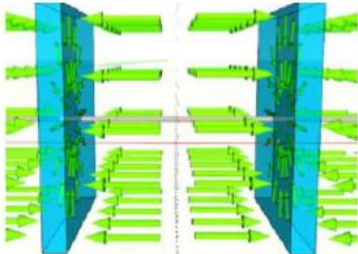
(a) Poprečne hidrauličke frakture



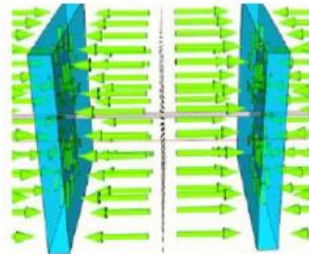
(b) Rani radijalni protok kroz frakture



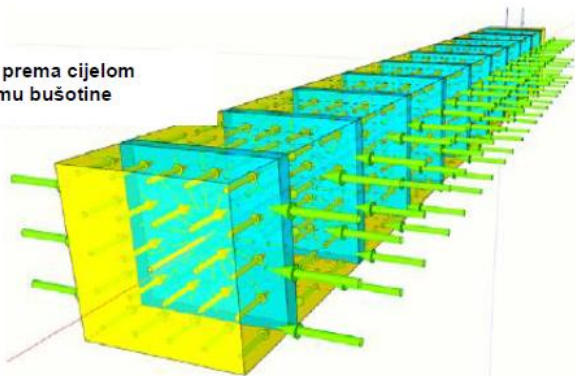
(c) Rani linearni protok kroz frakture



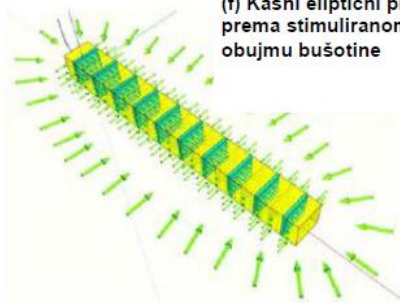
(d) Rani linearni protok prema frakturama s početkom utjecaja granice stimuliranog obujma



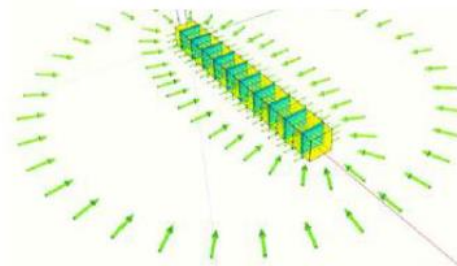
(e) Linearni protok prema cijelom stimuliranom obujmu bušotine



(f) Kasni eliptični protok prema stimuliranom obujmu bušotine



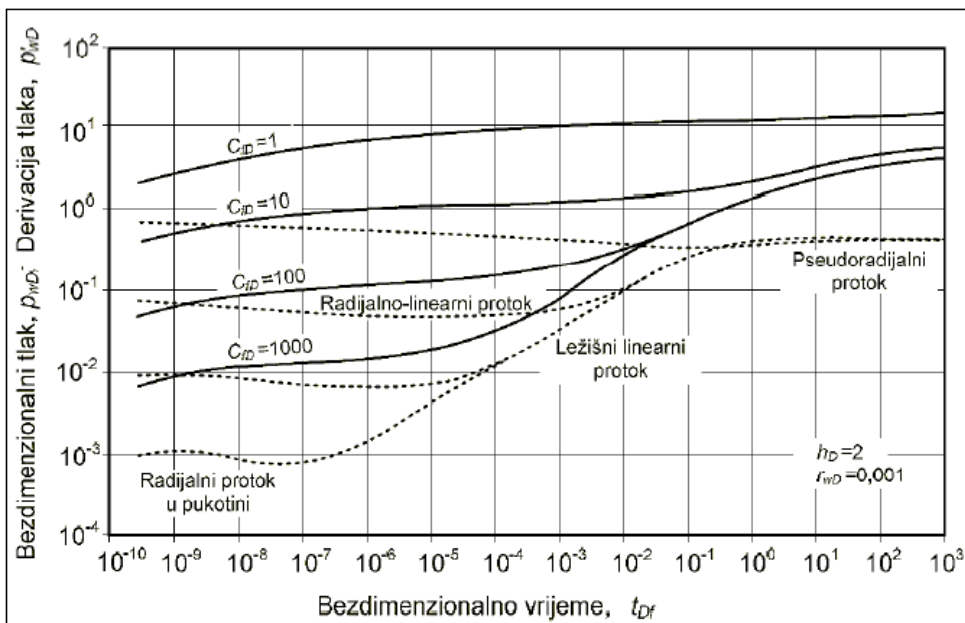
(g) Kasni pseudo-radijalni protok



Slika 3-10: Oblici protoka višestruko frakturirane horizontalne bušotine (Koščak Kolin, 2018)

U slučaju da je horizontalni dio bušotine izbušen okomito na smjer minimalnog horizontalnog naprezanja, stvorit će se jedna ili više uzdužnih pukotina, koje su paralelne s osi bušotine. U skladu s tim su razvijena i dva matematička modela frakturirane horizontalne bušotine: model horizontalne bušotine presječene poprečnom pukotinom i model horizontalne bušotine presječene uzdužnom pukotinom. U nastavku su opisane osnovne proizvodne karakteristike modela s jednom porečenom frakturom, koji se analogno primjenjuje na bušotinu s više fraktura.

Za izvode osnovnih jednadžbi pretpostavljeno je izotropno i neograničeno ležište u svim smjerovima. Analogno postupku za frakturiranu vertikalnu bušotinu izvedene su jednadžbe difuzije za protok u pukotini prema bušotini i za protok u ležištu prema pukotini. Za sustav poprečno frakturirane horizontalne bušotine u neograničenom ležištu, rješenja su dana grafički, u obliku tipskih krivulja, te analitički za pojedine oblike protjecanja. Log-log dijagram bezdimenzionalnog tlaka, i njegove derivacije po prirodnom logaritmu bezdimenzionalnog vremena, dan je na Slici 3-11, za vrijednosti bezdimenzionalne vodljivosti pukotine, C_{fD} , u rasponu od 1 do 1000. Bezdimenzionalni radijus bušotine je $r_{wD} = 0,001$ i bezdimenzionalna debljina ležišta $h_D = 2$.



Slika 3-11: Bezdimeenzionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimenzionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu poprečnom pukotinom (preuređeno prema Čikeš, 2015)

Na slici se može vidjeti da prijelazni period uključuje nekoliko oblika protoka. U početku se javlja radijalni protok u pukotini, koji je karakteriziran konstantnom derivacijom tlaka po prirodnom logaritmu vremena. Nakon toga sustav može pokazivati radijalno-linearni protok, također karakteriziran konstantnom derivacijom tlaka, ili ležišni linearni protok karakteriziran derivacijom tlaka koja pada na pravac nagiba 1/2. Ležišni linearni protok će se razviti samo za pukotine velike vodljivosti ($C_{fD} > 100$), a njegovo trajanje je proporcionalno bezdimenzionalnoj vodljivosti pukotine. Za vrijednosti C_{fD} manje od 100 redovito će se razviti radijalno-linearni protok. U svim slučajevima sustav će doseći period pseudo-radijalnog protoka, s konstantnom derivacijom tlaka jednakom 0,5, kod $t_{Df} = 3$.

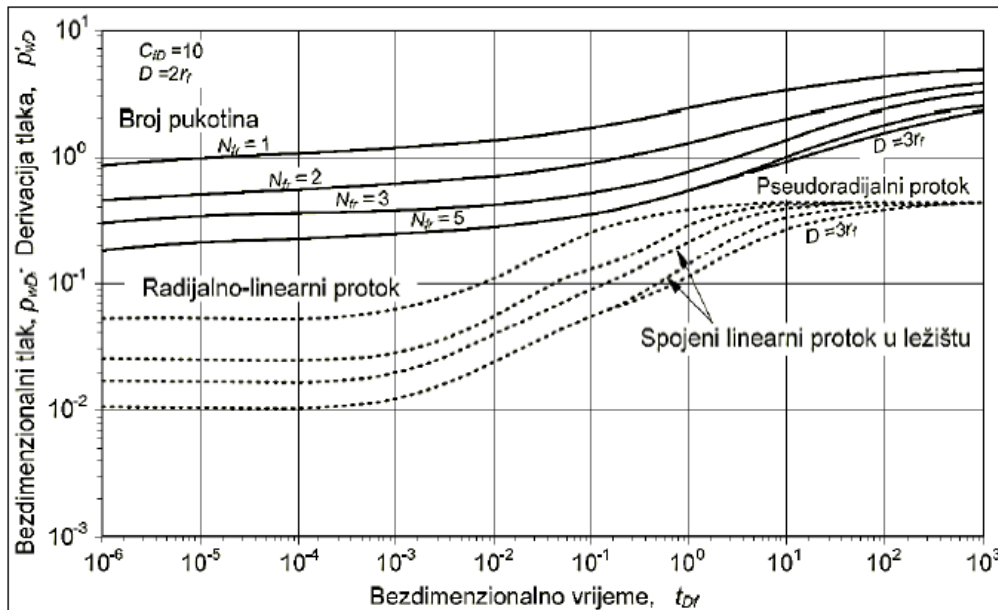
Radijalni protok u pukotini zbiva se kod vrlo malih vrijednosti bezdimenzionalnog vremena, koje korespondiraju s realnim vremenima manjim od nekoliko sekunda, dok je radijalno-linearni nazvan zato što se kod ovog oblika istodobno zbiva radijalni protok u pukotini prema bušotini i linearni protok u ležištu prema pukotini. Analogno slučaju frakturirane vertikalne bušotine, linearni protok u ležištu prema vertikalnoj pukotini opisan je modelom vertikalne pukotine neograničene vodljivosti). Tijekom pseudo-radijalnog protoka, ponašanje bezdimenzionalnog tlaka je slično rješenju za radijalni protok u homogenom ležištu, sa skin faktorom kao posljedicom utjecaja pukotine. I ovdje je uveden koncept efektivnog radijusa bušotine, r_w' , koji je definiran tako da uključuje skin faktor, s , zbog utjecaja pukotine, a u bezdimenzionalnom obliku glasi:

$$r'_{wD} = \frac{r'_w}{r_f} \tag{3-7}$$

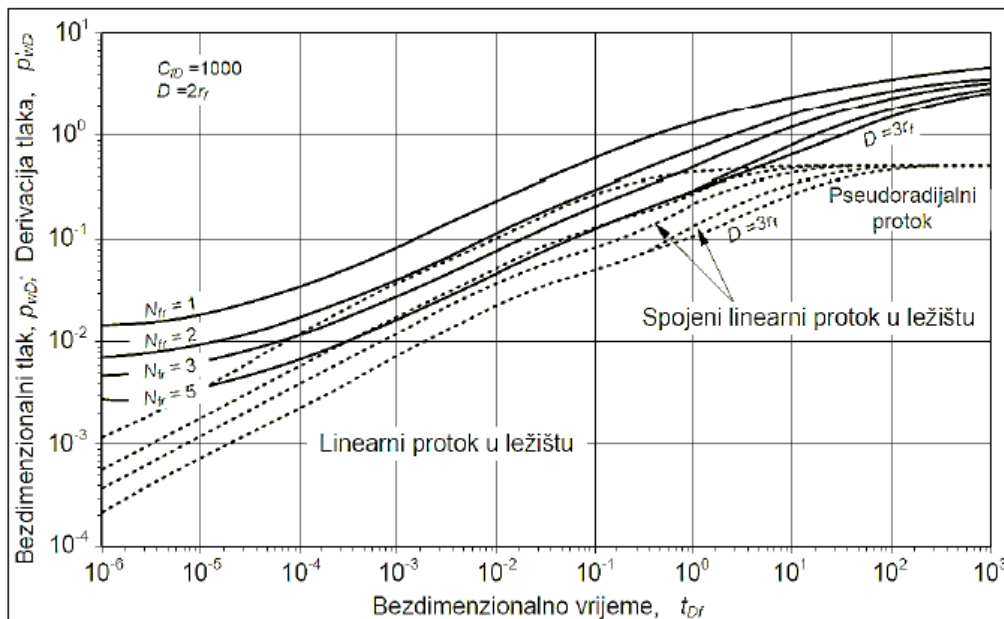
Bezdimenzionalni efektivni radijus bušotine, r'_{wD} , je funkcija bezdimenzionalne vodljivosti pukotine, C_{fD} , bezdimenzionalnog radijusa bušotine, r_{wD} , i bezdimenzionalne debljine ležišta, h_D . Zato se, tijekom pseudo-radijalnog protoka, frakturirana horizontalna bušotina ponaša kao nefrakturirana s bezdimenzionalnim efektivnim radijusom bušotine danim jednadžbom (3-7).

Efektivni radijus frakturirane horizontalne bušotine, r_w' , značajno ovisi o bezdimenzionalnoj vodljivosti pukotine, zbog ograničenog kontakta između bušotine i pukotine (Antolović i Čikeš, 2009).

Tijekom rane protočne faze, višestruko frakturirana horizontalna bušotina pokazuje iste protočne periode kao i jednostruko frakturirana bušotina. Osim ako pojedine pukotine nisu puno kraće od njihove međusobne udaljenosti, interferencija između pukotina će se zbiti prije nego što se razvije pseudo-radijalni protok oko svake pukotine. Prije nego što se dogodi interferencija, pojedinačne pukotine crpe samostalne dijelove ležišta i mogu se prikladno analizirati pretpostavljajući jednu pukotinu, s tim da se ukupni protok podijeli s brojem pukotina. Međutim, u višestruko frakturiranoj bušotini može se pojaviti i spojeni linearni protok u ležištu, karakteriziran linearnim protokom iz ležišta u skupinu pukotina. Takav sustav pukotina prouzročit će ponašanje tlaka u prijelaznom periodu slično onom velike uzdužne pukotine. U slučaju poprečnih pukotina, smjer protoka je različit tijekom linearnog protoka i tijekom spojenog linearnog protoka u ležištu, dok je u slučaju više uzdužnih pukotina, smjer protoka isti tijekom oba ova perioda. Ne dosegnu li se granice ležišta tijekom ova dva perioda, razvit će se pseudo-radijalni protok. Tijekom spojenog linearnog protoka u ležištu, kao i tijekom pseudo-radijalnog perioda, u analizi ponašanja tlaka koristi se ukupni protok bušotine. Opće ponašanje horizontalne bušotine presječene s nekoliko poprečnih pukotina ograničene vodljivosti ilustrirano je na Slikama 3-12 i 3-13. Log-log dijagram bezdimenzionalnog tlaka, p_{wD} , i njegove derivacije, p'_{wD} , prikazan je za bušotinu s jednom i više (2, 3 i 5) poprečnih pukotina. Bezdimenzionalni radijus bušotine je 0,001, a promjer pukotina je jednak debljini ležišta. Udaljenost između pukotina je identična promjeru pukotina ($D = 2r_f$), osim za bušotinu s pet pukotina, gdje je ilustriran učinak povećanja udaljenosti na $D = 3r_f$. Bezdimenzionalna vodljivost pukotina, C_{fD} , je 10, odnosno 1000, dok su ostali parametri isti u oba slučaja.



Slika 3-12: Bezdimezionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimezionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu s više poprečnih pukotina osrednje vodljivosti (preuređeno prema Čikeš, 2015)



Slika 3-13: Bezdimezionalni tlak i njegova derivacija u funkciji bezdimezionalnog vremena za horizontalnu bušotinu presječenu s više poprečnih pukotina velike vodljivosti (preuređeno prema Čikeš, 2015)

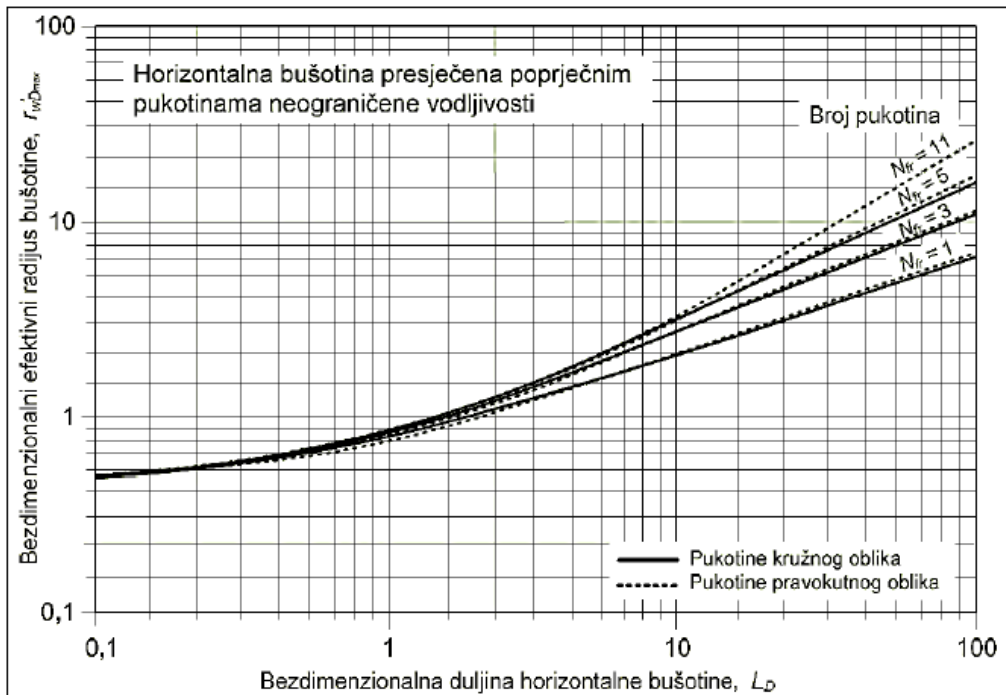
Tijekom radijalno-linearnog protoka u slučaju slabo vodljivih pukotina, te tijekom linearnog protoka u ležištu u slučaju dobro vodljivih pukotina, bezdimezionalni tlak je

proporcionalan broju pukotina. Pukotine crpe pojedine dijelove ležišta, pa je pad tlaka u višestruko frakturiranoj horizontalnoj bušotini s pet pukotina jednak upravo 1/5 pada tlaka ostvarenog u horizontalnoj bušotini s jednom pukotinom. Za višestruko frakturiranu horizontalnu bušotinu s najmanje tri pukotine, može se razviti spojeni linearni protok u ležištu. Također se vidi da se povećanjem udaljenosti između pukotina interferencija pukotina odgađa. U slučaju dugačke horizontalne bušotine s nekoliko pukotina, pseudo-radijalni protok se može razviti oko svake pukotine. Ipak, njegov početak je odgođen u dugim horizontalnim bušotinama s nekoliko pukotina. Taj početak ne uvjetuje broj pukotina nego udaljenost između dviju krajnjih pukotina. Za jednu pukotinu, pseudo-radijalni protok može početi za nekoliko sati ili dana, dok se u višestruko frakturiranoj bušotini pseudo-radijalni protok može javiti tek za nekoliko mjeseci ili čak za nekoliko godina.

Kao i za horizontalnu bušotinu presječenu s jednom poprečnom pukotinom, bezdimenzionalni efektivni radijus višestruko frakturirane horizontalne bušotine može se aproksimirati izrazom:

$$r'_{wD} = \frac{r'_{wDmax}}{e^{\frac{h_D}{2C_{fD}N} \left(\ln \frac{4Af}{e^{\gamma C_{Af} r_w^2}} \right)}} \quad (3-8)$$

gdje je, r'_{wDmax} , dan kao funkcija bezdimenzionalne duljine horizontalne bušotine, L_D , u dijagramu na Slici 3-14.



Slika 3-14: Bezdimezionalni efektivni radijus u funkciji bezdimezionalne duljine horizontalne bušotine presječene s više poprječnih pukotina (preuređeno prema Čikeš, 2015)

Za kratke horizontalne bušotine efektivni radijus bušotine je neovisan o broju pukotina. Horizontalni dio bušotine treba imati određenu duljinu da bi povećavanje broja pukotina bilo svrhovito. Na Slici 3-14 su također prikazane vrijednosti, za horizontalne bušotine presječene višestrukim pukotinama pravokutnog oblika. Primjećuje se samo mala razlika u krivuljama za pukotine kružnog i pravokutnog oblika. Vrijednosti, r'_{wDmax} , za horizontalnu bušotinu presječenu pravokutnim poprječnim pukotinama su neovisne o h_D . Zato se s pomoću dijagrama na Slici 3-14 može izračunati proizvodnost horizontalne bušotine presječene višestrukim pukotinama, ograničene vodljivosti, neovisno o obliku pukotine, ako pukotine prodiru cijelom debljinom ležišta.

4. DISKUSIJA

Nekonvencionalna ležišta nafte i plina većinom se razrađuju višestruko frakturiranim horizontalnim bušotinama (VFHB), jer se proizvodnost horizontalne bušotine (HB) poboljšava postavljanjem hidrauličkih fraktura, bez kojih bušotina ne bi proizvodila isplativim protok pri dostatno visokom dinamičkom tlakom (Čikeš, 2015).

Iz navedenog opisa proizvodnih modela slijedi da za njihovu primjenu najprije treba poznavati sve osnovne podatke o bušotini, ležištu i proizvodnom fluidu, kako bi se mogao odrediti očekivani protok bušotine, pri određenom dinamičkom tlaku. Pritom treba razlučiti da se njihovom pojednostavljenom primjenom ove osnovne proizvodne karakteristike mogu odrediti za određeno vrijeme od početka rada bušotine, dok se detaljna prognoza proizvodnje određuje putem istih modela ugrađenih u softvere. U proizvodnom inženjerstvu nafte i plina najpoznatiji je softver Prosper, koji dolazi kao dio programskog paketa IPM (Integrated Production Modeling), a vlasnik licence je tvrtka Petroleum Experts.

Usporedba proizvodnih mogućnosti jedne horizontalne i višestruko frakturirane horizontalne bušotine može se provesti temeljem pretpostavke da se i jedna i druga konstruiraju u istom ležištu, odnosno da su ulazni parametri jednaki. Ukoliko se primjerice radi o plinskoj bušotini u ležištu slabije propusnosti u iznosu od $k_H = 0,2E-15 \text{ m}^2$, primjenom opisanih rješenja slijedi da bi horizontalna bušotina frakturirana s jedanaest poprečnih pukotina tri mjeseca nakon početka proizvodnje imala protok od $110\,000 \text{ m}^3$ plina na dan, pri dinamičkom tlaku od oko 253 bar, dok bi ovaj tlak u horizontalnoj bušotini bio znatno nepovoljniji i iznosio bi oko 200 bar uz protok od $100\,000 \text{ m}^3$ na dan. Pritom se kod stvaranja poprečnih pukotina pretpostavljaju sljedeći parametri (Slika 3-10):

- Ukupan broj pukotina: $N_{fr} = 11$
- Razmak između pojedinih pukotina: $D = 80 \text{ m}$
- Radijus pukotina: $r_f = 5 \text{ m}$
- Širina pukotina: $w = 10 \text{ mm}$
- Propusnost pukotina: $k_f = 100 \text{ mm}^2$

Budući da je razmak između pukotina znatno veći od promjera pukotina, interferencija među pukotinama se neće zbiti prije nego što se razvije pseudoradikalni protok oko svake od njih. Od ostalih ulaznih parametara, važan je podatak o ukupnoj duljini horizontalnog dijela kanala bušotine koja iznosi 800 metara.

Osim toga, potencijalna horizontalna bušotina koju bi se izbušilo u istom ležištu ima sljedeće osnovne konstrukcijske parametre:

- Radijus bušotine: $r_w = 0,1$ m
- Bušotina je smještena u središtu ležišta (Slika 3-1): $\delta = 0$ (tj. $z_w = \frac{1}{2} h$)
- Odnos horizontalne i vertikalne propusnosti: $k_H/k_V = 5$
- Faktor oštećenja pribušotinske zone: $s_H = 5$
- Nema vodenog utoka u ležište

Daljnjom analizom proizvodnog modela za ovu hipotetsku VFHB slijedi da bi dinamički tlak uz istu proizvodnju nakon pola godine pao za samo nekoliko bara.

5. ZAKLJUČAK

Razvoj tehnologije hidrauličkog frakturiranja u eksploataciji nekonvencionalnih ležišta nafte i plina značajno je transformirao industriju nafte i plina, a od prvog hidrauličkog frakturiranja 1948. godine do danas je u bušotinama konvencionalnih i nekonvencionalnih ležišta izvedeno više milijuna frakturiranja širom svijeta.

S obzirom na to da se problem rasta pukotine po visini proučava desetljećima, svi podaci u tipičnim ležištima nafte i plina su pokazali da hidrauličko frakturiranje nije prijetnja prodiranju pukotine u podzemne vode i njihovom onečišćenju ili bilo kakvom drugom štetnom utjecaju na okoliš, pa je negativan odjek javnosti prema postupcima hidrauličkog frakturiranja potpuno neopravdan.

Razumijevanje in-situ stresa i dinamike protoka unutar fraktura ne samo da pomaže u povećanju iscrpka ležišta, već rješava i izazove poput kontroliranog rasta frakture, jer se motrenju rasta primjenom novih tehnologija pridaje posebna važnost.

Budući razvoj i primjena proizvodnih modela stimuliranih bušotina važna je za točnost prognoziranja njihovih proizvodnih mogućnosti, što u konačnici utječe i na uspješnu ekonomsku procjenu cjelukupnog proizvodnog ciklusa nekonvencionalnog ležišta.

6. LITERATURA

1. ALZAHABI, A., SOLIMAN, MOHAMED Y., 2019. *Optimization of hydraulic fracture stages and sequencing in unconventional formations*, Boca Raton, Florida
2. ANTOLOVIĆ, S., ČIKEŠ, M., 2009. *Proizvodnost frakturiranih i horizontalnih bušotina*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 21, Zagreb.
3. ARTHUR, J. D., HOCHHEISER, H. W., COUGHLIN, B. J. 2011. *State and Federal Regulation of Hydraulic Fracturing: A Comparative Analysis*. Paper SPE 140482 presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, TX, USA, January 24-26.
4. BELYADI, H., FATHI, E., BELYADI, F., 2017. *Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs: Theories, Operations, and Economic Analysis*, SAD
5. ČIKEŠ, M., 1995. *Mogućnost povećanja pridobivih zaliha ugljikovodika primjenom postupka hidrauličkog frakturiranja*, Distertacija. Rudarsko-geološko naftni fakultet, Zagreb
6. ČIKEŠ, M. 2015. *Proizvodno inženjerstvo nafte i plina*. RGN fakultet, 524 str., Zagreb.
7. DONG, Z., HOLDITCH, S. A., MC VAY, D. A. 2013. *Resource Evaluation for Shale Gas Reservoirs*. SPE Economics and Management, 5, 1, str. 5-16.
8. ECONOMIDES, M. J., NOLTE, G. N., 2000. *Reservoir Stimulation*. John Wiley & Sons, 3rd edition, 20 Chapters.
9. HOLTON, G. A. 2004. *Defining Risk*. Financial Analysts Journal, Vol. 60, No. 6 (November/December) 19-25.
10. HOUZE, O., VITURAT, D., FJAERE, O. S., 2020. *Dynamic Data Analysis v5.30*, KAPPA, 852 str.
11. KOŠČAK KOLIN, S. 2018. *Pouzdanost određivanja propusnosti slabo propusnih plinskih ležišta optimiranjem trajanja testa porasta tlaka*. Doktorska disertacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
12. KOŠČAK KOLIN, S., ČIKEŠ, M. 2015. *Risk Analysis in the Process of Hydraulic Fracturing*. U: KJOSROW-POUR, MEHDI (ur.): *Transportation systems and engineering: concepts, methodologies, tools and applications*, IGI Global, Hershey
13. KOŠČAK KOLIN, S., ČIKEŠ, M., BABIĆ, V. 2013. *Analiza testa porasta tlaka horizontalne bušotine*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 26, 1-27, Zagreb.

14. MALVIĆ, T. 2015. *Bjelovarska subdepresija kao prostor s konvencionalnim i nekonvencionalnim ležištima ugljikovodika te geotermalnom energijom*. Radovi Zavoda za znanstvenoistraživački i umjetnički rad u Bjelovaru, 9, 161-186.
15. MASTERS, J.A. 1979. *Deep Basin Gas Trap, Western Canada*. AAPG Bulletin, Vol. 63, No. 2
16. MATTHEWS, C. S., RUSSEL, D. G. 1967. *Pressure Buildup and Flow Tests in Wells. Monograph Volume 1, Henry L. Doherty Series*, Society of Petroleum Engineers of AIME, 167 str, New York.
17. SHELL TECHNOLOGY, 2000. *Hydraulic Fracturing, Stimulation Field Guidelines*, Rijswijk
18. SIERRA, L., MAYERHOFER, M., JIN, C. J. 2013. *Production Forecasting of Hydraulically Fractured Conventional Low-Permeability and Unconventional Reservoirs Linking the More Detailed Fracture and Reservoir Parameters*. Paper SPE 163833 presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4-6.2.2013., 1-21, The Woodlands.
19. SOLIMAN, M. Y., HUNT, J. L., EL RABAA, A. M. 1990. *Fracturing Aspects of Horizontal Wells*, Journal of Petroleum Technology, 42, 8, 966-973, Richardson.
20. SPE-PRMS 2007. *Petroleum Resources Management System*. Sponsored by: Society of Petroleum Engineers (SPE), American Association of Petroleum Geologists (AAPG), World Petroleum Council (WPC), Society of Petroleum Evaluation Engineers (SPEE).
21. WOODROOF, R. A., ASADI, M., WARREN, M. N. 2003. *Monitoring Fracturing Fluid Flowback and Optimizing Fluid Cleanup Using Frac Tracers*. Paper SPE 82221 presented at the SPE European Formation Damage Conference, The Hague, The Netherlands, May 13-14.

Internet izvori:

22. EIA report World Shale Gas Resources, 2013. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EIA_World_Shale_Gas_Map-en.svg#file (25.08.2024.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



Aleksandra Pejovski



KLASA: 602-01/24-01/171
URBROJ: 251-70-12-24-2
U Zagrebu, 26. 9. 2024.

Aleksandra Pejovski, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/171, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 24.09.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

PROIZVODNE KARAKTERISTIKE FRAKTURIRANIH BUŠOTINA I RIZICI OD PROCESA FRAKTURIRANJA U NEKONVENCIONALNIM LEŽIŠTIMA NAFTE I PLINA

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Izv. prof. dr. sc. Sonja Koščak Kolin nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Sonja Koščak
Kolin

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)