

Utjecaj zvučnih valova na protočna svojstva stijena i fluida

Jantolek, Matko

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:169:504279>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**UTJECAJ ZVUČNIH VALOVA NA PROTOČNA SVOJSTVA
STIJENA I FLUIDA**

Završni rad

Matko Jantolek

N4313

Zagreb, 2022.

UTJECAJ ZVUČNIH VALOVA NA PROTOČNA SVOJSTVA STIJENA I FLUIDA
MATKO JANTOLEK

Završni rad izrađen: Sveučilište u Zagreb
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Zvučni i seizmički valovi u naftnoj industriji se koriste za istraživanje i procjenu prilikom seizmičkih i karotažnih geofizičkih mjerenja, za određivanje stratigrafske slike ležišta. Također se zvučni valovi koriste u mnogim drugim situacijama u industriji kada je potrebno ukloniti ili detektirati različita oštećenja, te kao posredna metoda detektiranja promjena u procesu. U ovom završnom radu istražena je literatura u kojoj su se autori bavili proučavanjem utjecaja zvučnih valova na geološka i fizikalna svojstva stijena, ali i interakcijom stijena i fluida, tj. načinom na koji valovi mogu mobilizirati pojedinu fazu, poput zaostale nafte, i povećati proizvodnju.

Ključne riječi: stimulacija valova , povećano pridobivanje nafte, zaostala nafta, viskoznosti, intenzitet vala, amplituda vala, frekvencija vala, povećano pridobivanje nafte

Završni rad sadrži: 20 stranica, 11 slika i 12 referenci

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNF-a

Ocjenjivači: dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNF-a
dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNF-a
dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a

Datum obrane: 15.09.2022., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA	II
1. UVOD	1
2. TEORIJSKI TEMELJI I PREGLED RELEVANTNE LITERATURE	2
3. ZAKLJUČAK.....	18
4. POPIS LITERATURE.....	19

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Shema strujanja kapljica kroz horizontalni kanal sa suženjem pod statičkim gradijentom tlaka	2
Slika 2-2. Mehanizam mobilizacije.....	4
Slika 2-3. Odnos temperature i tlaka rosišta	7
Slika 2-4. Učinak stimulacije valovima na relativnu propusnost voda/nafta na uzorcima jezgre niske propusnosti	10
Slika 2-5. Učinak stimulacije valovima na relativnu propusnost voda/nafta na uzorcima jezgre visoke propusnosti	10
Slika 2-6. Utjecaj zvučnih valova na visoko i nisko propusne uzorke.....	11
Slika 2-7. Usporedba ponašanja vode i parafina s frekvencijom, intenzitetom i udaljenošću od izvora ultrazvuka	13
Slika 2-8. Usporedba ponašanja vode i kerozina s frekvencijom, intenzitetom i udaljenošću od izvora ultrazvuka	14
Slika 2-9. Prikaz utjecaja viskoznosti na iscrpak nafte kroz 15 minuta.....	15
Slika 2-10. Utjecaj viskoznosti na iscrpak nafte sa i bez primjene ultravalova za kerozin	16
Slika 2-11. Utjecaj viskoznosti na iscrpak nafte sa i bez primjene ultravalova za parafin.....	16

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

(Δp_c) - razlika unutarnjeg kapilarnog tlaka, Pa

(Δp_0) - gradijent vanjskog tlaka, Pa

Q – protok, kg/m³

k - koeficijent permeabilnosti, m² (ili mD)

A - površina poprečnog presjeka, m²

ΔH - razlika visina dviju točaka, m

ΔL - udaljenost između dvije točke, m

p_{osc} - inercijska sila na fluid, N

ρ_f - gustoća fluida, kg/m³

a_0 - amplituda ubrzanja zida, m/s²

r^2 - radijus pornog kanala (m)

μ - dinamička viskoznost (Pas)

Δp_{sw} - gradijent statičkog tlaka, Pa

Δp_{ow} - granica mobilizacije, Pa

k_s - propusnost oštećene zone, m²

k – propusnost ležišta, m²

s – skin faktor

1. UVOD

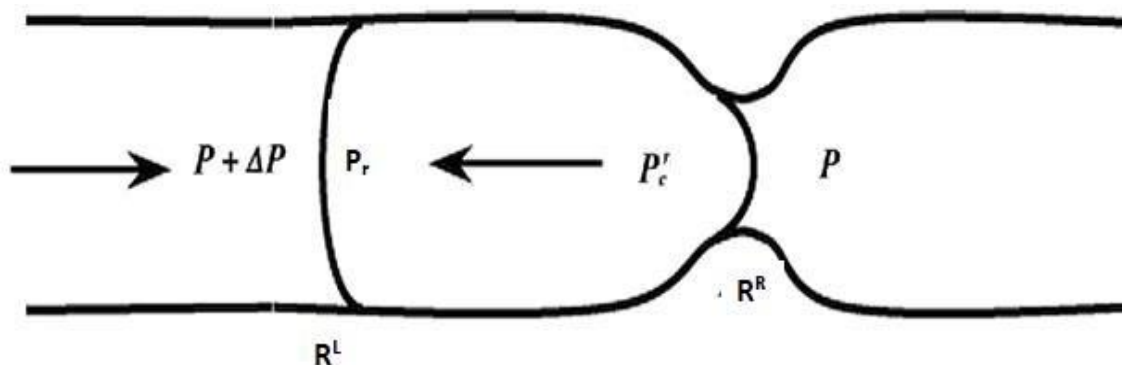
Nakon primjene primarnih tehnika eksploatacija nafte iz ležišta, oko 60% ukupne količine nafte ostaje zarobljeno zbog geoloških i fizičkih faktora (Amro et al., 2007). Glavni razlozi tomu su kapilarne sile te heterogenost u ležišnim stijinama. Tercijarne metode (metode povećanog pridobivanja nafte) koriste se u svrhu pridobivanja zaostale nafte u ležištu, do koje se ne može doći pomoću primarnih i sekundarnih metoda pridobivanja nafte. Neke od važnijih metoda povećanog pridobivanja su: injektiranje pare, injektiranje plina, injektiranje polimera i kemijsko injektiranje. Ariadji (2005) navodi kako svaka od tih metoda zahtjeva velika kapitalna ulaganja te predstavlja potencijalni rizik. Ciljevi tercijarnih metoda pridobivanja su:

- smanjivanje međufazne napetosti između nafte i vode, što vodi ka smanjenju kapilarnog tlaka
- smanjenje omjera mobilnosti nafte i vode
- ubrizgavanje kemijskih otapala

Trenutno ne postoji metoda iscrpka nafte koja je univerzalna te se može koristiti za svaki tip ležišta, stoga se razmatraju i istražuju nove metode koje bi smanjile potencijalni rizik primjene. Jedna od tih metoda je i metoda primjene zvučnih/ultrazvučnih valova sa ciljem omogućavanja konstantnog izvora energije pomoću kojeg se stvaraju hidrodinamički valovi u bušotini za istiskivanje zarobljene nafte sa određene udaljenosti. Vibracije nastale u ležištu pomoću ultrazvučnih valova potiču proizvodnju na način da utječu na kapilarne sile, adheziju između fluida i stijena i omogućuju koalescenciju nafte. Također, generiranje elastičnih valova u ležištu može uzrokovati ubrzanje postupka gravitacijskog odvajanja nafte, vode i plina.

2. TEORIJSKI TEMELJI I PREGLED RELEVANTNE LITERATURE

Iassonov i Beresnev (2008) istraživali su mogućnost povećanja mobilnosti ugljikovodika u šupljikavoj sredini djelovanjem akustičnih valova i vibracija. Istraživanje se temeljilo na detaljnoj analizi mobilizacije fluida na pornoj razini, pri čemu su ključni parametri na koje se utječe valovima i vibracijama: morfologija (oblik) pora, međupovršinska napetost te kapilarni tlak. Model koji je promatran obuhvaćao je kanale s porama različitog promjera konvergentne/divergentne geometrije, u kojem je organska faza zarobljena kao kontinuirana mrlja koja zauzima nekoliko susjednih pora. Takve morfološke karakteristike pora tipične su za konsolidirana ležišta kakva se proučavaju i istražuju za eksploataciju ugljikovodika. Na slici 2-1. prikazan je najjednostavniji model kanala sa suženjem i pripadajućim tlakovima koji se pojavljuju.



Slika 2-1. Shema strujanja kapljica kroz horizontalni kanal sa suženjem pod statičkim gradijentom tlaka (prema Li et al., 2005)

Tipičan mehanizam koji određuje ponašanje ovakvog sustava jest odnos adhezijskih svojstava i međupovršinskih napetosti fluida u porama te veličine i oblika pora. Taj odnos obuhvaćen je svojstvom močivosti, tj. predstavlja silu kapilarnog zarobljavanja disperzne faze u malim porama (pore su najčešće mjerljive u mikrometrima). Na unutarnjoj strani meniskusa stvara se višak kapilarnog tlaka zbog zaostajanja naftne faze (nekontinuirana faza) koja prolazi od većeg promjera u manji. Time se stvara razlika unutarnjeg kapilarnog

tlaka (Δp_c) koji se opire vanjskom gradijentu. Kako se kapljica približava najmanjem radijusu suženja, tako se i sama razlika kapilarnog tlaka povećava. Prije nego razlika kapilarnog tlaka dosegne maksimalnu vrijednost, kapljica će ostati zaglavljena u slučaju da razlika tlaka (Δp_c) dosegne veličinu jednaku statičkom gradijentu vanjskog tlaka (Iassonov i Beresnev., 2008). U tom slučaju, protok nafte kroz porozni medij slijedi Darcyjev zakon:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (2-1)$$

Gdje su:

Q – protok, $\frac{kg}{m^3}$

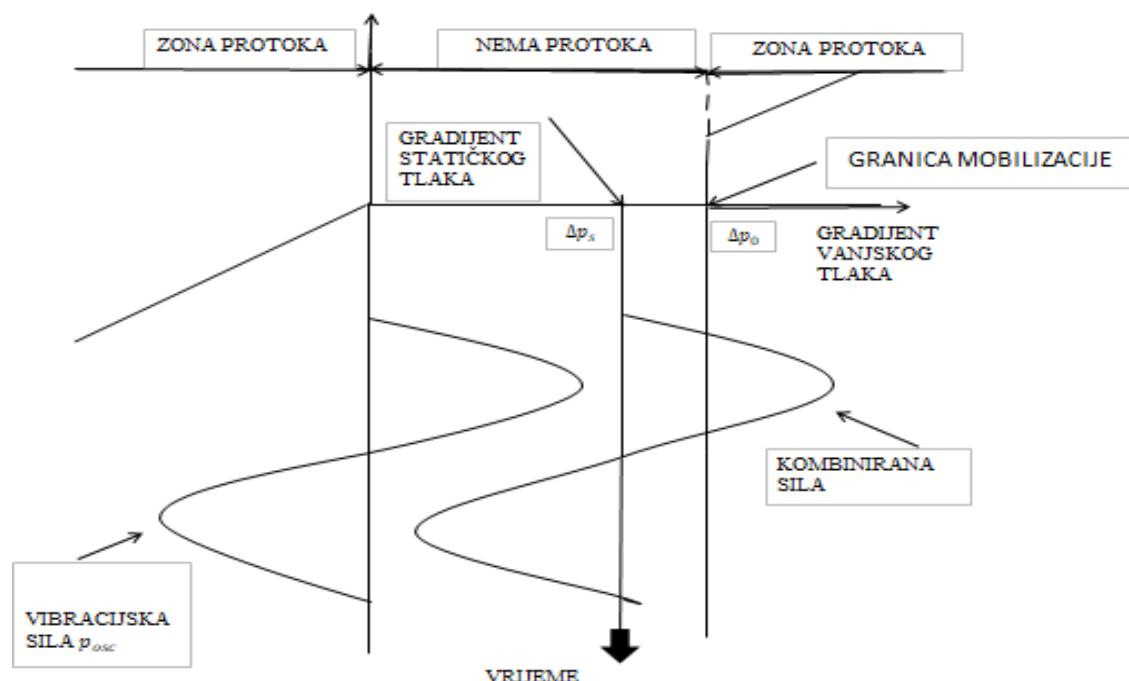
k - koeficijent permeabilnosti, m^2 (ili mD),

A - površina poprečnog presjeka, m^2 ,

ΔH - razlika visina dviju točaka, m ,

ΔL - udaljenost između dviju točaka, m .

Na slici 2-2. prikazan je način kako dolazi do mobilizacije zarobljenog ganglija. On zapravo predstavlja brzinu protoka kao funkciju kombiniranog statičkog tlaka i vibracijske sile.



Slika 2-2. Mehanizam mobilizacije (preuređeno od Li et al., 2005)

Ukoliko vrijednost vanjskog gradijenta tlaka u cilindričnom kanalu ne prelazi granicu mobilizacije te se primjenjuju uzdužne vibracije stijenke paralelne s osi pora, smatra se kako je taj pokret vibracija zapravo jednak dodanoj inercijskoj sili na konstantan gradijent.

$$p_{osc} = \rho_f \cdot a_0 \quad (2-2)$$

Gdje su:

p_{osc} - inercijska sila na fluid, N,

ρ_f - gustoća fluida, kg/m^3 ,

a_0 - amplituda ubrzanja zida, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

U tom je slučaju ukupna kombinirana sila na fluid jednaka zbroju vanjskog gradijenta tlaka i oscilacijske (inercijske) sile. Akceleracija amplitude vibracije mora biti dovoljno velika kako bi ukupna kombinirana sila u svom ciklusu dosegla granicu mobilizacije. Kada u pozitivnom djelu ciklusa vibracije, vrijednost kombinirane sile prijeđe granicu mobilizacije, dolazi do trenutnog pokretanja fluida kroz suženje (Li et al., 2005). Nakon

nekoliko ciklusa u segmentu pora kontinuirani fluid postaje pokretljiv. Prilikom negativnog djela ciklusa vibracije ponovno dolazi do zarobljavanja fluida.

Tijekom perioda mobilizacije, ako glavni meniskus fluida prelazi preko najuže točke u suženju, količina kapilarne sile počinje se drastično smanjivati. Rezultat toga je ubrzavanje mrlje ka izlasku iz suženja. Period vibracije mora biti dovoljno dugačak, iz razloga što glavni meniskus mora doći do grla suženja. Pozicija (pomak) djelomično zarobljenog fluida kroz period vibracije ovisi o količini vremena koju fluid provede u fazi pokretanja. Akceleracija amplitude obrnuto je proporcionalna frekvenciji vibracije. Kod značajno velikih frekvencija, učinak će biti nedjelotvoran zbog vremena odaziva ganglija tj. izoliranog zasićenja fluidom (tzv. viskozno-difuzijsko vrijeme) koje postaje preveliko u odnosu na period vibracije. Viskozno-difuzijsko vrijeme predstavlja vrijeme unutar kojeg fluid reagira na djelovanje sile:

$$r = \frac{\rho_f \cdot r^2}{\mu} \quad (2-3)$$

Gdje su:

r_{vd} - viskozno-difuzijsko vrijeme (s),

ρ_f - gustoća fluida ($\frac{kg}{m^3}$),

r^2 - radijus pornog kanala (m),

μ - dinamička viskoznost (Pas).

Najveći utjecaj na pokretanje fluida ima intenzitet vala, koji dosežući određenu vrijednost potiče mobilizaciju fluida. Sam intenzitet vala ovisi o omjeru amplitude akceleracije i frekvencije vibracije. Kako akceleracija amplitude raste, nakon određene granice će pokretljivost ganglija stagnirati zbog negativnog djela ciklusa vibracije koji uzrokuju velike segmente negativnog djela krivulje protoka. U tom slučaju, sustav će slijediti Darcyjev zakon za protok kroz porozni medij. Za konstantnu frekvenciju efekt će rasti povećavanjem akceleracije amplitude, čime se ujedno povećava i amplituda inercijske sile na fluid.

Minimalna amplituda potrebna za iniciranje pokretanja mrlje ovisi o izrazu:

$$\Delta p_{sw} + p_{osc} > \Delta p_{ow}$$

Gdje su:

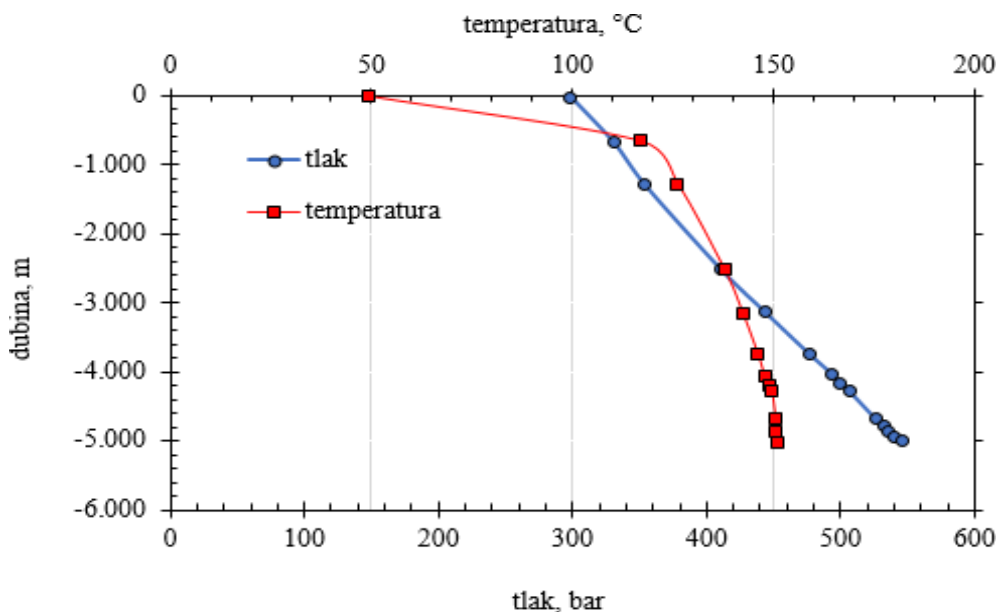
Δp_{sw} - gradijent statičkog tlaka, Pa,

p_{osc} - inercijska sila na fluid, N,

Δp_{ow} - granica mobilizacije, Pa.

Zaključeno je kako se pomoću vibracija može povećati iscrpak ugljikovodika i općenito potaknuti mobilizacija naftnih mrlja unutar pornih kanala različitog promjera. Za svaku naftnu mrlju postoji minimalna amplituda potrebna za pokretanje. Za danu amplitudu, frekvencija vala mora biti u određenim granicama te ukoliko se ista prijeđe, mobilizacija je nemoguća. Izračunima je pokazano kako je za model tipične naftonosne formacije potrebno omogućiti minimalnu vrijednost amplitude od $10 \frac{m}{s^2}$ te frekvencije 10Hz za vidljiv napredak u brzini protoka te mobilizaciji nafte. Vrijednost ove frekvencije ujedno je i optimalna te ukoliko ona nije osigurana ne može se utjecati na protok. Ta veličina vibracije smatra se niskofrekventna. Najveći porast šupljikavosti, smanjenje zasićenosti zaostale nafte te krajnja točka relativne propusnosti mogu se dobiti upotrebom upravo spomenute frekvencije. Nažalost, trenutnim tehnološkim razvitkom niskofrekventna stimulacija naftnih ležišta velikog volumena nije moguća. Međutim, to se ne odnosi na plitke akvifere u kojima seizmički izvori sa površine mogu osigurati potrebnu količinu energije elastičnog vala. Smatra se kako metoda stimulacije ležišta pomoću vibracija može povećati šupljikavost do 15.3% i apsolutnu propusnost do 2.2%. Također stimulacija pomoću vibracija može smanjiti zasićenost zaostale nafte do 53.6%, smanjiti zasićenost vodom do 25% te povećati krajnju točku relativne propusnosti nafte do 73%. Paiaman i Nourani (2012) istraživali su utjecaj kratkotrajne te povremene vibracije u šupljikavoj sredini, tj. kako vibracija utječe na uklanjanje oštećenja propusnosti u blizini bušotina te učinak koji daje na povećanje proizvodnosti nafte bušotine. Bili su potaknuti ranijim slučajevima kada bi nastali potresi te bi se u neposrednoj blizini bušotine povećao iscrpak nafte. Jedan od takvih slučajeva dogodio se 27. kolovoza 2008. godine u Marunskom polju na granici današnjeg Iraka i Irana. Po veličini ono je drugo naftno polje u Iranu, nakon polja Ahvaz. Unutar polja nalazi se Khami ležište koje je plinsko kondenzatno ležište te ujedno i

najdublje ležište u Iranu. Na području ležišta Khami nalaze se tri bušotine koje su promatrane, udaljene od epicentra 217 km. Magnituda potresa iznosila je 5,7 po Mercallijevoj ljestvici, a hipocentar se nalazio na dubini od 10 km. Analiza se temeljila na dinamičkom tlaku na ušću bušotine, promjeru ušća bušotine i omjeru plina i kapljevine. Slika 2-3. prikazuje dvije krivulje koje predstavljaju promjenu tlaka i temperature u ovisnosti o dubini.



Slika 2-3. Odnos temperature i tlaka rosišta (preuređeno od Paiaman i Nourani, 2012)

Na slici 2-3 može se uočiti linearni odnos temperature i tlaka rosišta. Za tlakove iznad tlaka rosišta fluid je u jednofaznom plinovitom stanju, dok se za vrijednosti ispod tlaka rosišta uz plin pojavljuje retrogradni kondenzat. U šupljikavoj sredini, ako je zasićenje kapljevino malo (i nije kontinuirano), faza je nepomična zbog kapilarnog zarobljavanja. Međutim, za zasićenja veća od kritičnih, kapljevina postaje pokretljiva i struji. U slučaju da dođe do porasta zasićenja tekuće faze u šupljikavom mediju u blizini bušotine, ono predstavlja dodatan pad tlaka, a samim time i oštećenje formacija. Porastom oštećenja formacija raste vrijednost skin faktora. Razlog tomu je što se prolaskom tekuće faze u šupljikavu sredinu smanjuje dostupno područje protjecanja plina, pritom smanjujući njenu propusnost (Paiaman i Nourani., 2012). Što je veća vrijednost skin faktora, manja je

proizvodnja. Skin je bezdimenzionalni parametar koji karakterizira stanje pribušotinske zone bušotine.

$k_s < k \ s > 0$ - oštećenje (smanjenje propusnosti)

$k_s = k \ s = 0$ - bez promjene propusnosti

$k_s > k \ s < 0$ - stimulacija (povećanje propusnosti)

Gdje su:

k_s - propusnost oštećene zone, m^2 ,

k - propusnost ležišta, m^2 ,

s - skin koeficijent.

Zaključili su kako je u slučaju 3 bliske bušotine došlo do različite reakcije na djelovanje prirodnih seizmičkih valova. Mjerenjima na bušotini A dokazan je porast proizvodnje nafte, dok je za druge dvije bušotine proizvodnja stagnirala. Razlog tomu je što je u bušotini tipa A, došlo do kondenzacije tekuće faze u šupljikavoj sredini u blizini bušotine. Na dnu perforiranog intervala bušotine A dinamički tlak manji je od tlaka rosišta, što indicira kondenzaciju. Kondenzacija uzrokuje oštećenje naslaga i povećava skin faktor te samim time smanjuje i proizvodnju bušotine (Agi et al., 2019). Ležišno inženjerskom terminologijom, dolazi do smanjenja efektivne propusnosti za plin zbog pojave kondenzata, a osim toga, dolazi i do blokade kanala pora kondenzatom koji je više redova veličine manje pokretljiv od plina (veća viskoznost, veća močivost i manja efektivna propusnost). Što intervali postaju plići razlika tlaka rosišta i dinamičkog tlaka postaje veća, što se manifestira kao veća proizvodnost na manjim dubinama. Ustanovljeno je da je učinak kojim seizmički valovi djeluju na uklanjanje oštećenja u blizini bušotine A glavni razlog drugačijeg odaziva samih bušotina. Upotrebom raznih tehnika stimulacije cilj je smanjenje skin faktora što doprinosi povećanoj proizvodnji.

Amro i suradnici (2007) istraživali su učinkovitost zvučnih valova na pokretanje zaostale nafte u ležištu. Ciljevi njihovog istraživanja bili su:

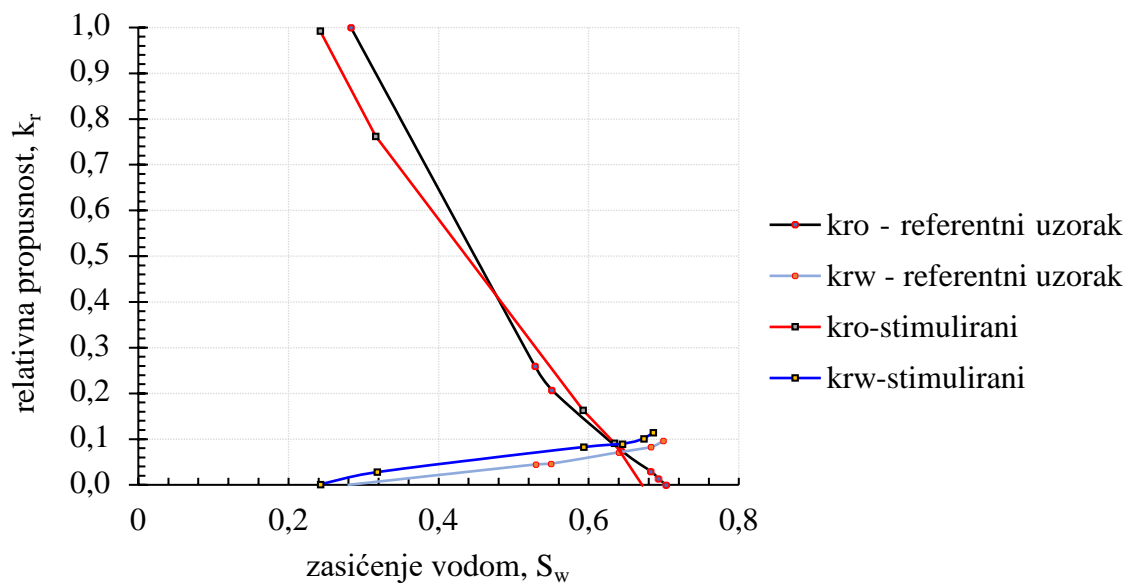
- proučiti praktičnost primjene zvučnih valova u svrhu povećanja mobilizacije nafte u ležištu;
- odrediti količinu istisnute nafte prilikom zavodnjavanja ležišta;

- pronaći glavne razloge koji dovode do dodatnog iscrpka nafte;
- uspoređivanje ove metode sa drugim nekonvencionalnim metodama.

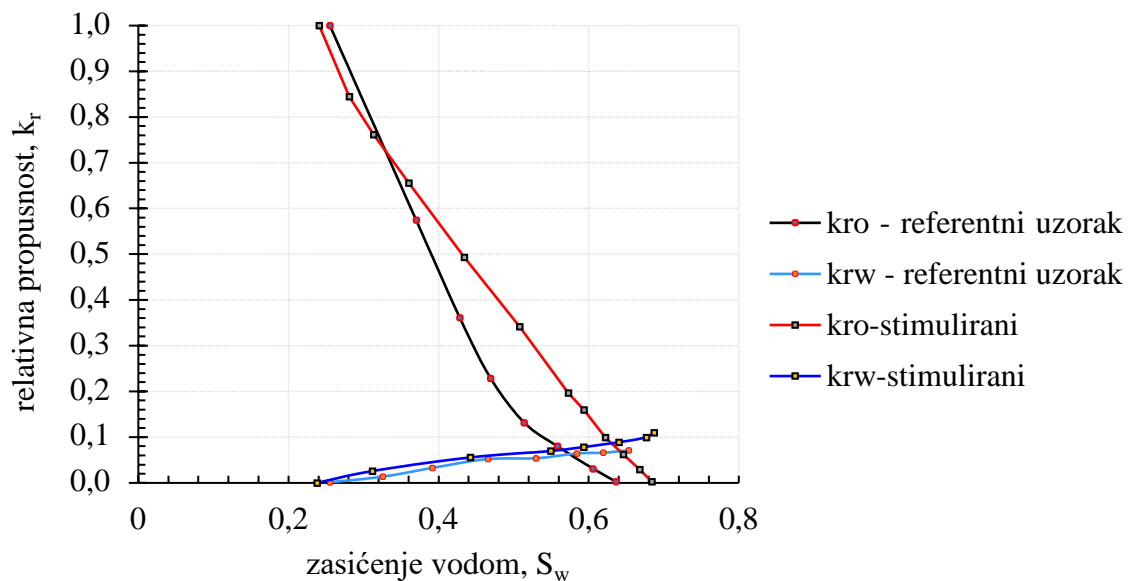
Vibracije koje su proizvedene ultrazvučnim valovima olakšavaju proizvodnju na način da djeluju na kapilarne tlakove, adheziju između stijena i fluida te potiču koalescenciju nafte. Generiranje elastičnih valova može doprinijeti gravitacijskom razdvajanju nafte, plina i vode. Istraživanje je provedeno u sljedećim koracima:

- (1) Uzorak stijene postavljen je na kućište te je na njega djelovano određenim tlakom,
- (2) Zatim su izmjereni porni volumen te šupljikavost,
- (3) Pomoću Darcy-eve jednadžbe određena je propusnost jezgre uz konstantnu brzinu utiskivanja,
- (4) Potom su uzorci zasićeni uzorkom nafte i soli (otopina NaCl i CaCl₂), dok nije došlo do zasićenja zaostale nafte,
- (5) Pomoću generatora započeta je stimulacija valova. Pri završetku, mjerene su relativne propusnosti za naftu i vodu,
- (6) Mjerenje zavodnjavanja je vršeno na dva načina, horizontalno i vertikalno.

Isti postupak ponovljen je u uvjetima početnog zasićenja ležišta. Na slikama 2-4. i 2-5. prikazane su krivulje relativne propusnosti nafte i vode za referentni i stimulirani uzorak, koristeći jezgre niske i visoke propusnosti.



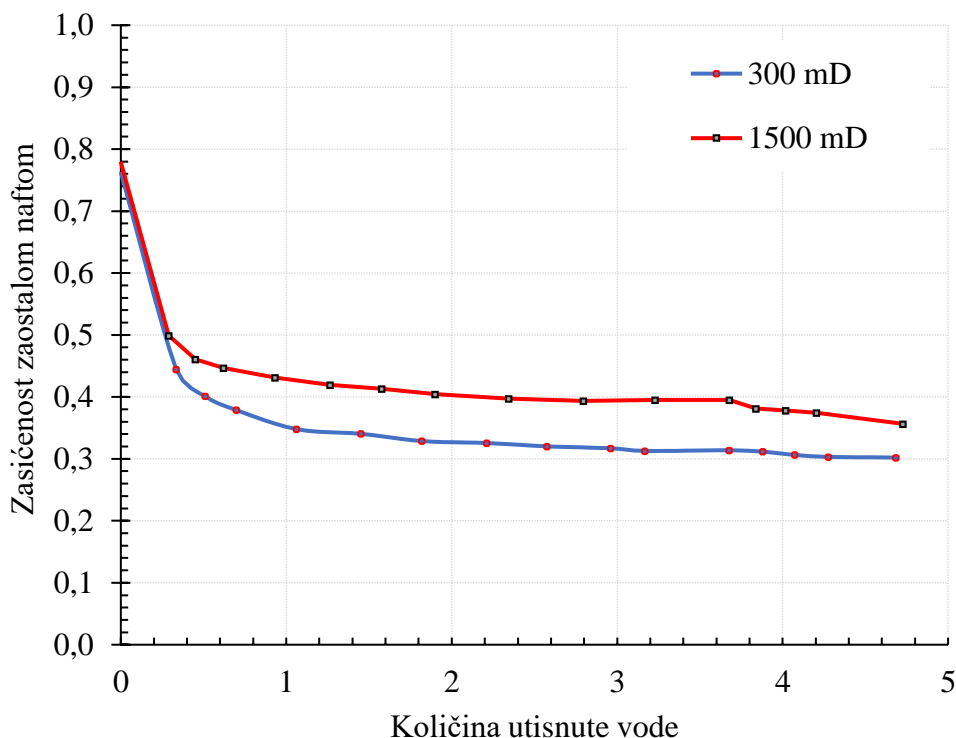
Slika 2-4. Učinak stimulacije valovima na relativnu propusnost voda/nafta na uzorcima jezgre niske propusnosti (digitalizirano prema podacima od Amro et al., 2007)



Slika 2-5. Učinak stimulacije valovima na relativnu propusnost voda/nafta na uzorcima jezgre visoke propusnosti (digitalizirano prema podacima od Amro, 2007)

Rezultati istraživanja pokazali su kako zvučni valovi povećavaju relativnu propusnost za naftu. Kod horizontalnog zavodnjavanja relativna propusnost za naftu je gotovo jednaka 1 te se značajno smanjuje upravo iz razloga što je nafta zamijenjena vodom, dok se relativna propusnost vode umjereno povećava. Također, značajno poboljšanje relativne propusnosti

za naftu utvrđuje se prilikom zasićenja vodom iznad 60% . Upravo je to karakteristika ležišta u kasnijim fazama proizvodnje. Utvrđeno je kako pod utjecajem zvučnih valova dolazi do većeg iscrpka nafte, ali i do ubrzanja prodora vode što se posebno tiče uzoraka visokih propusnosti. Na slici 2-6 prikazana je razlika djelovanja stimulacije valova na oporavak nafte u visoko i nisko propusnim jezgrama.



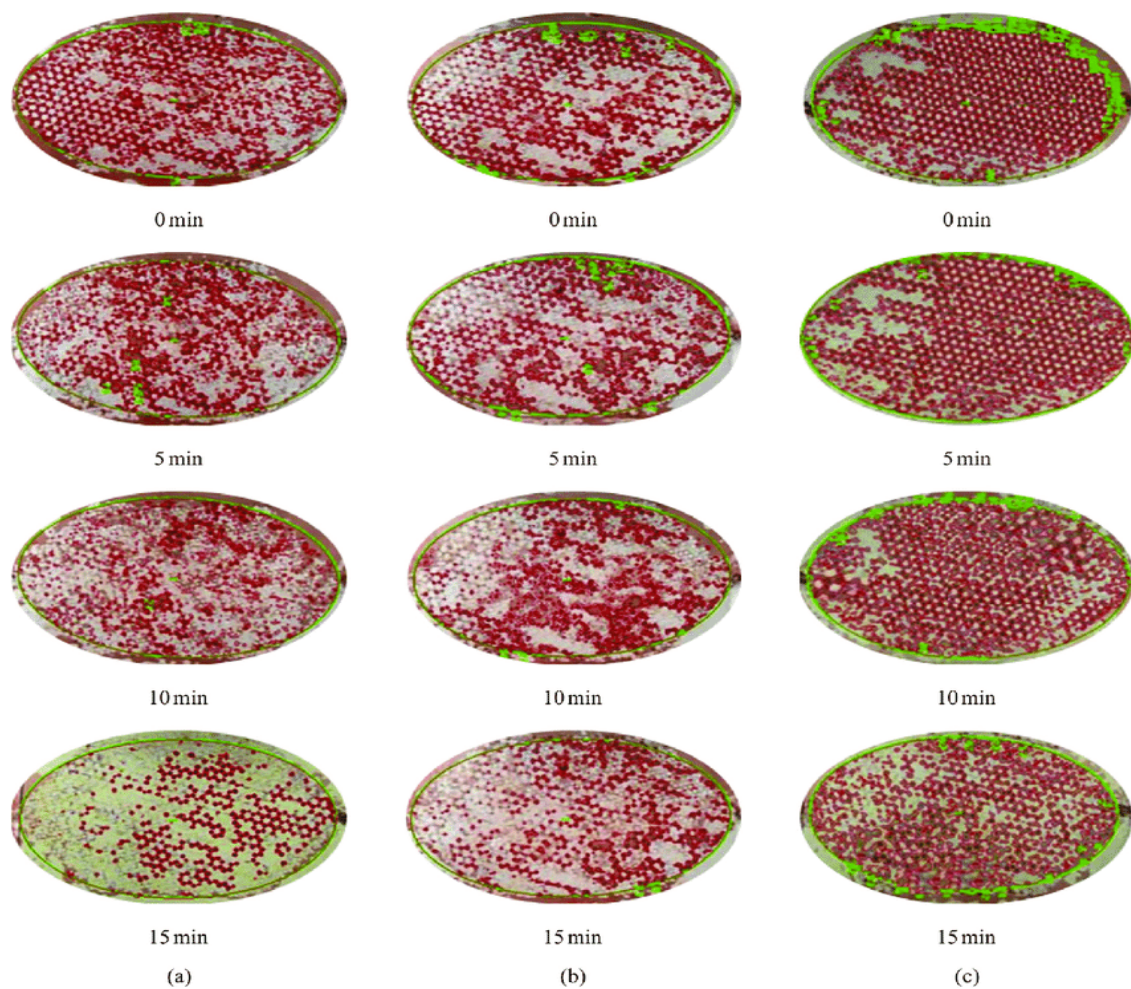
Slika 2-6. Utjecaj zvučnih valova na visoko i nisko propusne uzorke (digitalizirano prema podacima od Amro, 2007)

Sa slike se može uočiti kako je za jezgre veće propusnosti manji iscrpak nafte u odnosu na jezgre manje propusnosti. Istraživanje je obavljeno i za nekonsolidirane uzorke čija je vlačna čvrstoća manja od 10.34 bar (150 psi), kako bi se utvrdio utjecaj generiranih valova na stabilnost uzorka. Utvrđeno je da dolazi do stabilnog pada tlaka za konstantan protok. Međutim, pošto je zavodnjavanje analizirano uz stimulaciju valovima, dolazi do stvaranja ili pokretanja postojećeg pijeska te otpora protjecanju same otopine, što je rezultat pada tlaka kroz uzorak. Posljedica tomu je kretanje zrna u šupljikavoj sredini nastalo zbog mehaničke energije stvorene zvučnim generatorima. Stoga se stimuliranje valovima u svrhu povećanog iscrpka nafte ne preporuča u nekonsolidiranim naslagama čija je vlačna

čvrstoća manja od 10.34 bar (150 psi). Usprkos stvaranju pijeska u prethodnom primjeru, kroz istraživanje nije pronađen nijedan utjecaj stimuliranja valova koji narušava svojstva samih stijena i fluida. Zbog toga se ova metoda ističe nad drugim metodama povećanog iscrpka, uz mogućnost primjene na velikom broju različitih tipova ležišta.

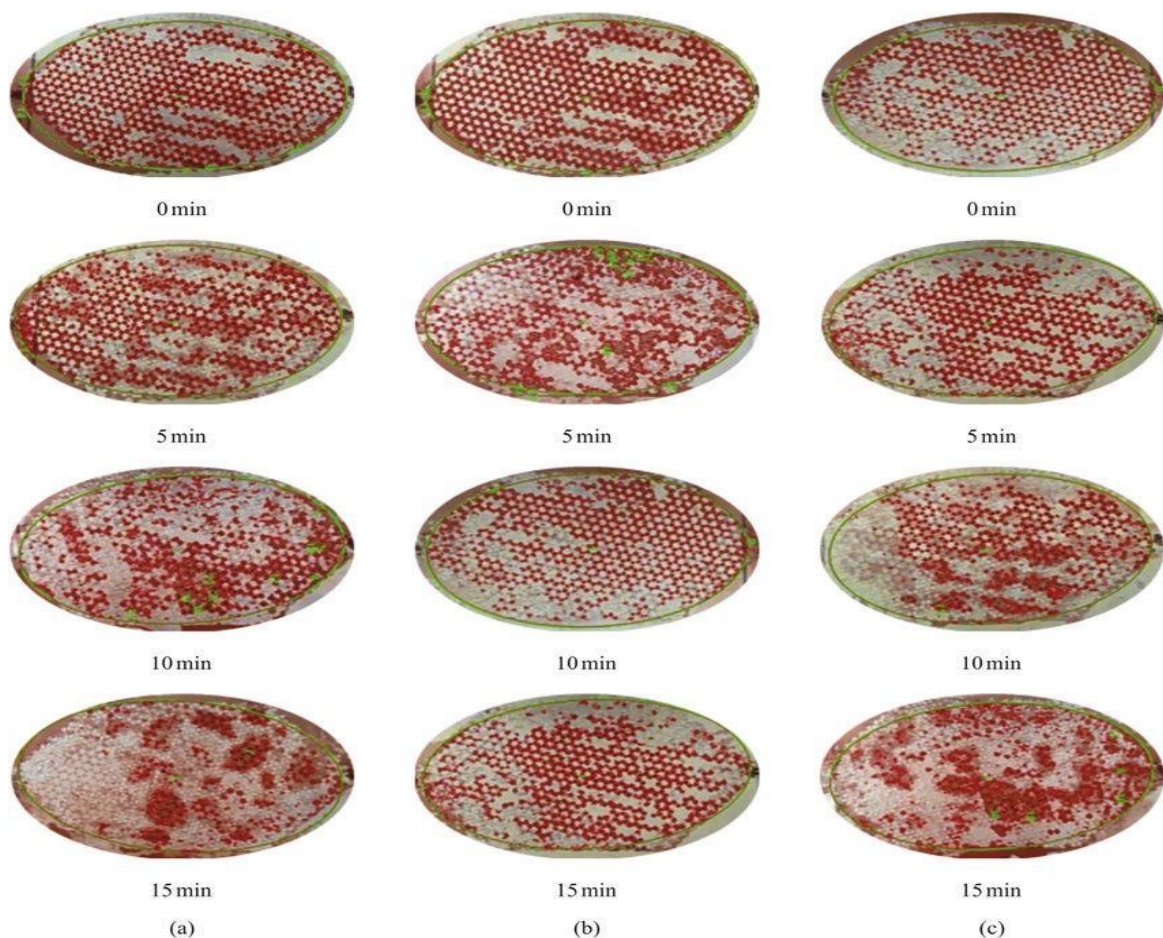
Agi et al., (2019) napravili su istraživanje kojem je cilj saznati kako neprekidno i povremeno (isprekidano) generiranje zvučnih valova djeluje na iscrpak nafte. Ispitivan je utjecaj kratkog te dugog izlaganja ultrazvuku te njegove posljedice. Testiran je način na koji viskoznost te intenzitet djeluju na povremeno i konstantno generiranje ultrazvuka. Uzorak je prvotno zasićen pomoću dvije otopine soli ($NaCl$, $CaCl_2$) te ostavljen 60 minuta. Potom je krenulo utiskivanje nafte sve dok na izlazu nije ostvaren jednofazni protok nafte. Korištena su dva tipa nafte, parafinska (teška nafta) i kerozin (laka nafta). Naposljetku je konstantnom brzinom utiskivana slana voda. Uzorak je tada bio pripremljen te je započelo generiranje ultrazvučnih valova. Isprekidano emitiranje uspostavljeno je nasumičnim paljenjem te gašenjem generatora. Ispitivanje je trajalo 60 minuta iz razloga što se stopa iscrpka nafte iznad 60 minuta značajno smanjivala, smanjujući pritom tehničku i ekonomsku učinkovitost.

Prvi test uspoređivao je miješanje nafte i vode bez prisutnosti te uz prisutnost ultrazvuka za uzorke različite viskoznosti. Na slikama 2-7. i 2-8. prikazana je komparacija vode sa parafinom i kerozinom određene frekvencije, intenziteta i udaljenosti od izvora, dobivena s (a) povremenim (b) kontinuiranim i (c) bez primjene ultrazvučnog zračenja.



Slika 2-7. Usporedba ponašanja vode i parafina s frekvencijom, intenzitetom i udaljenošću od izvora ultrazvuka. (Agi et al., 2019).

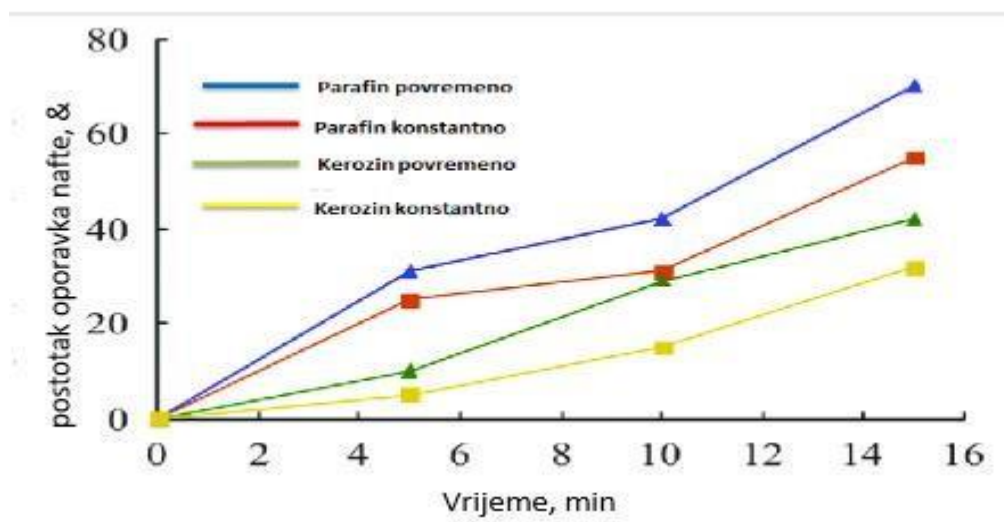
Na slikama 2-7. i 2-8., voda je prikazana u obliku bijele boje, a crvena boja predstavlja zaostalu naftu. Sa slika se može zaključiti kako se u slučaju parafina postiže najmanja količina zaostale nafte upravo uz naizmjeničnu prisutnost ultrazvuka, dok se najveća količina zaostale nafte nalazi u uzorku bez primjene ultrazvučnog zračenja. Razlog tomu je što za srednje viskozne nafte treba povremeno emitiranje visokog intenziteta kako bi se povećala proizvodnja nafte.



Slika 2-8. Usporedba ponašanja vode i kerozina s frekvencijom, intenzitetom i udaljenošću od izvora ultrazvuka. (Agi et al., 2019).

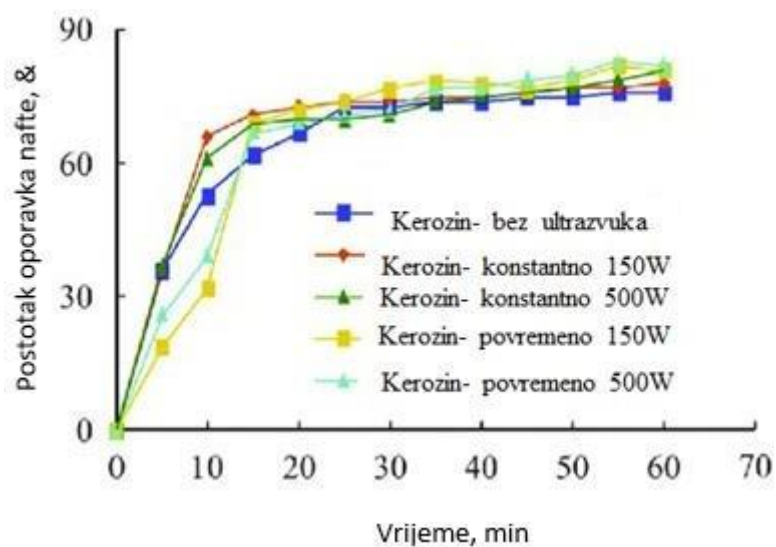
Sličan rezultat može se dobiti i za testiranje sa kerozinom (laka nafta). Najveći iscrpak nafte ponovno je bio uz primjenu povremenog emitiranja zračenja. Međutim, uz kontinuirano zračenje ultrazvučnih valova zaostaje veća količina lake nafte nego za slučaj bez stimulacije zračenja. To se događa jer je za lakše nafte dovoljno povremeno emitiranje valova niske frekvencije kako bi se povećala proizvodnja. Povremenim emitiranjem valova stvara se više emulzije koja prevladava nad demulzifikacijom. Najveća stopa iscrpka nafte zabilježena je u prvih 15 minuta testiranja. U tom se periodu stopa iscrpka nafte za kerozin i parafin najviše razlikuje. Unatoč tome, do kraja eksperimenta stopa se značajno smanjuje te dolazi do smanjenja razlike u postotku iscrpka zaostale nafte u slučaju kontinuiranog i povremenog emitiranja ultrazvučne radijacije. Pomoću zabilježenih trenutaka vidljivo je da je u prvih 15 minuta mikroemulzija (n/v) stabilnija zbog agitacije ultrazvuka, što dovodi do većeg iscrpka nafte. Daljnjim generiranjem ultrazvuka obujam mikroemulzija se više povećava za kratkotrajno generiranje naspram dugotrajnog generiranja ultrazvuka.

Na slici 2-9. testirani su uzorci parafina (viskozna nafta) i kerozina (lagana nafta) uz iste vrijednosti frekvencije i intenziteta ultrazvuka. Uzorak koji je sadržavao parafin pod naizmjeničnim djelovanjem ultrazvuka ponovno je imao najveći iscrpak nafte. Razlog tomu je granično trenje tijekom emitiranja valova koje povećava temperaturu fluida. Zbog razlike u brzinama vibracije fluida i krutog dijela uzorka dio zvučne energije pretvara se u toplinsku, što rezultira smanjenjem viskoznosti. Iz podataka se zaključuje kako je smanjenje viskoznosti pod utjecajem ultrazvuka veće za lakše nafte. Sukladno prethodnim istraživanjima smatra se da je glavni uzrok tome kavitacija koja je lako formirana u lakšim fluidima. U viskoznim fluidima valna funkcija mora savladati jake sile kohezije koje su izražene u težim fluidima, što onemogućuje stvaranje kavitacije.



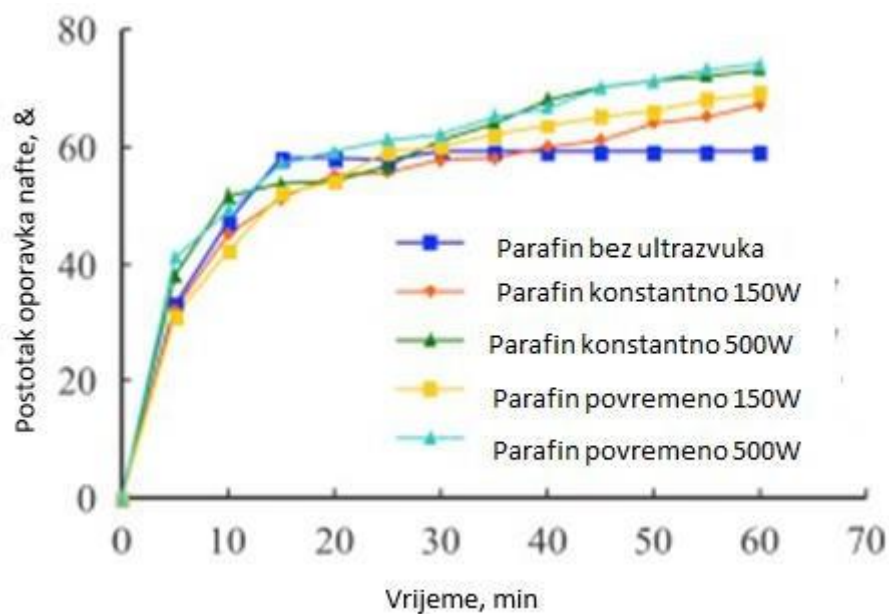
Slika 2-9. Prikaz utjecaja viskoznosti na iscrpak nafte kroz 15 minuta (preuređeno od Agi et al., 2019)

Posljednji u nizu testova bio je u svrhu spoznavanja utjecaja intenziteta vala na iscrpak nafte. Na slikama 2-10. i 2-11. prikazan je utjecaj koji viskoznost ostavlja na oporavak nafte uz različite vrijednosti intenziteta valova te uz primjenu povremenih i konstantnih ultrazvučnih valova



Slika 2-10. Utjecaj viskoznosti na iscrpak nafte sa i bez primjene ultravalova za uzorak zasićen kerozinom (preuređeno od Agi et al., 2019)

Najmanji postotak iscrpka za kerozin bio je u slučaju manjeg iznosa intenziteta uz neprekidni ultrazvuk, dok je najveći iscrpak zabilježen uz korištenje naizmjeničnog, jačeg intenziteta ultrazvuka.



Slika 2-11. Utjecaj viskoznosti na iscrpak nafte sa i bez primjene ultravalova za parafin (preuređeno od Agi et al., 2019)

U slučaju parafina ponovno je najveći iscrpak ostvario uzorak sa primjenom nasumičnog generiranja valova višeg intenziteta.

Zaključeno je da je iscrpak nafte u izravnoj vezi sa intenzitetom ultrazvučnih valova i to na način da se povećanjem intenziteta povećava iscrpak nafte. Također, kratkotrajno i povremeno generiranje ultrazvuka može oporaviti veću količinu nafte u odnosu na dugotrajno i kontinuirano generiranje ultravalova.

3. ZAKLJUČAK

Iako je posljednjih godina dosta pažnje i testiranja posvećeno upotrebi zvučnih valova kao potencijalna metoda povećanog iscrpka nafte, ta tehnika nije još usavršena i posve prihvaćena, stoga se koristi u ograničenim razmjerima, tj. još je u razvojnoj fazi. Metoda sama po sebi ima brojne prednosti nad ostalim konvencionalnim metodama iscrpka, kao što su:

- zamjenjuje se potreba za korištenjem kemijske stimulacije koja u povremenim slučajevima može negativno utjecati na ležišnu stijenu i fluid
- koristi se za bilo koje intervale uz preciznu stimulaciju bušotine
- koristi se za uklanjanje filtarskog kolača, posebno u horizontalnim bušotinama (pomoću namotanog tubinga sa ugrađenim generatorom ultravalova)
- stimulacija ultravalovima može biti provedena tijekom proizvodnje bušotine.

Utvrđeno je kako je primjena ultrazvuka učinkovita u ležištima niske propusnosti i šupljikavosti. Također, kratkotrajno te povremeno generiranje ultrazvuka može pridobiti veću količinu zaostale nafte od dugotrajnih i konstantnih ultravalova.

Pomoću raznih testova zaključeno je kako se metodom stimulacije upotrebom vibracija može povećati proizvodnost do 20%, bilo upotrebom bušotinskih alatki ili površinske vibracijske stimulacije. To je poprilično veliko povećanje proizvodnosti i upravo zbog toga se provode dodatna terenska istraživanja. Najveći problem ove metode je što su za stvaranje dovoljne energije pri dnu bušotine za ostvarivanje stimulacije i pokretanje fluida potrebne velike vrijednosti amplitude i frekvencije vibracije. Westermarck (2001) navodi kako su mnogi autori predlagali drugačije frekvencije stimulacije kao idealne. Ovisno o stajalištu, neki su smatrali kako je za stimulaciju ležišta najbolja frekvencija samog tog ležišta, dok su drugi vjerovali kako su ključni parametri za određivanje frekvencije određenog sloja veličina pora i zrna. Usprkos tomu što je s ekonomskog stajališta ova metoda dojmljiva, današnjim tehničkim mogućnostima komercijalna upotreba niskofrekventne stimulacije u svrhu povećanja proizvodnje još nije moguća.

4. POPIS LITERATURE

1. AMRO, M.M., AL-MOBARKY, M.A., AL-HOMADHI, E.S., 2007. Improved Oil Recovery by Application of Ultrasound Waves to Waterflooding. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 26(1) 1-7.
2. AGI, A., JUNIN, R., SYAMSUL, M.F., CHONG, A.S., GBADAMOSI, A., 2019. Intermittent and short duration ultrasound in a simulated porous medium. *Petroleum*, 5(1) 42-51.
3. ARIADJI, T., 2005. Effect of Vibration on Rock and Fluid Properties: On Seeking the Vibroseismic Technology Mechanisms. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition* 1-8.
4. IASSONOV, P.P., BERESNEV, I.A., 2008. Mobilization of Entrapped Organic Fluids by Elastic Waves and Vibrations. *SPE Journal*, 13(04) 465-473.
5. LI, W., VIGIL, R.D., BERESNEV, I.A., IASSONOV, P., EWING, R., 2005. Vibration-induced mobilization of trapped oil ganglia in porous media: Experimental validation of a capillary-physics mechanism. *Journal of Colloid and Interface Science*. 289(1) 193-199.
6. PAIAMAN, A.M., NOURANI M., 2012. Positive effect of earthquake waves on well productivity: Case study: Iranian carbonate gas condensate reservoir. *Scientia Iranica*. 19(6) 1601-1607.
7. WESTERMARK, R.V., BRETT, J.F., MALONEY D.R., 2001. Enhanced Oil Recovery with Downhole Vibration Stimulation. *SPE production and operations symposium* 1-13.

Web izvori:

8. IASSONOV, P.P., BERESNEV, I.A., 2008. Mobilization of Entrapped Organic Fluids by Elastic Waves and Vibrations. URL: <https://faculty.sites.iastate.edu/> (12.8.2022.)
9. PAIAMAN, A.M., NOURANI M., 2012. Positive effect of earthquake waves on well productivity: Case study: Iranian carbonate gas condensate reservoir. URL: <https://www.researchgate.net/> (17.8.2022.)

10. AMRO, M.M., AL-MOBARKY, M.A., AL-HOMADHI, E.S., 2007. Improved Oil Recovery by Application of Ultrasound Waves to Waterflooding. URL: <https://www.researchgate.net/> (22.8.2022.)
11. AGI, A., JUNIN, R., SYAMSUL, M.F., CHONG, A.S., GBADAMOSI, A., 2019. Intermittent and short duration ultrasound in a simulated porous medium. URL: <https://www.sciencedirect.com/> (27.8.2022.)
12. LI, W., VIGIL, R.D., BERESNEV, I.A., IASSONOV, P., EWING, R., 2005. Vibration-induced mobilization of trapped oil ganglia in porous media: Experimental validation of a capillary-physics mechanism. URL: <https://www.sciencedirect.com/> (30.8.2022.)

IZJAVA

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

Jantolek Matko

Matko Jantolek



KLASA: 602-01/22-01/179
URBROJ: 251-70-12-22-2
U Zagrebu, 12.09.2022.

Matko Jantolek, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/179, URBROJ: 251-70-12-22-1 od 12.09.2022. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

UTJECAJ ZVUČNIH VALOVA NA PROTOČNA SVOJSTVA STIJENA I FLUIDA

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof.dr.sc. Domagoj Vulin nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

Prof.dr.sc. Domagoj Vulin

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)



Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)