

Utvrdjivanje zona prodora utisnutog CO₂ u ležište Weyburn u Saskatchewanu prema promjenama seizmičkih parametara

A. W. Araman, M. Hoffman i T.L. Davis

STRUČNI ČLANAK

Na Weyburn ležištu, unutar Williston bazena (sl. 1.) u JI Saskatchewanu, prije osam godina izveden je projekt poboljšanog pridobivanja nafte (EOR) utiskivanjem CO₂ radi postizanja maksimalnog iscrpka iz glavnog karbonatnog ležišta, Midale slojeva. Dosad je iz Weyburn polja proizvedeno 335 milijuna barela nafte, a prema procjeni sadrži još 1,4 milijardi barela OOIP.⁵ U članku je pokazano da analiza seizmičkih podataka, snimljenih tijekom dužih vremenskih perioda i uz primjenu višekomponentnih snimaka, omogućuje uspješno praćenje napretka utiskivanja CO₂ na temelju uočavanja promjena u ležišnim svojstvima poput poroznosti, raspodjele fluida i gustoće pukotina. Poznavanje ovih promjena izravno utječe na način izvedbe EOR projekta te time i na postizanje optimalne razrade ležišta. Analiza postignutih mjerenja P i S valova tijekom dužeg perioda pokazala su sljedeće:

1. U Midale ležištu uočeno je istjecanje CO₂ prema dolje na zapadnom dijelu istraživanog područja. Stoga se preporuča odgovarajući pomak susjedne utisne bušotine.
2. Na cijelom području polja snimke P-valova u različitim vremenima pokazuju da se CO₂ zadržava uz pukotine orijentacije SZ-JI, definirane na temelju interpretacije S-valova snimljenih tijekom 2000.

Ključne riječi: analiza seizmičkih komponenti, analiza promjene seizmičkih karakteristika, istjecanje CO₂, seizmička snimanja EOR

Uvod

Ograničeni podaci o podzemnim i ležišnim uvjetima učinili su planirani EOR problematičnim. Neočekivane nepravilnosti unutar ležišta utječu na prostornu raspodjelu utisnute vode i CO₂. Stalno praćenje promjena EOR projekta u vremenu i prostoru nužno je kako bi se pravovremeno postiglo pravilno postavljanje utisnih i proizvodnih bušotina, a radi postizanja optimalnog iscrpka. Snimanje seizmičkih podataka tijekom dužeg vremenskog intervala te primjena višekomponentnih mjerenja, pokazalo se uspješnom metodom u praćenju promjena fizikalnih svojstava ležišta i raspodjeli CO₂ tijekom izvedbe EOR projekta u Weyburn polju.

Glavna proizvodna jedinica u Weyburn polju je Midale ležište u Mississippian Charles formaciji (sl. 2.). Midale slojevi nalaze se na dubini između 1 300 i 1 500 m i sastoje se od gornje Marly (laporovite) i donje Vuggy (raspucale) zone. Dosad je iz Weyburn polja dobiveno 335 milijuna barela nafte a preostale se rezerve procjenjuju na 1,4 milijardi barela OOIP.⁵ (sl. 3.)

Svrha ovog članka je procjena uspješnosti planiranog EOR projekta na Weyburn polju primjenom 3D seizmičkog snimanja P-valova i podataka višekomponentnih seizmičkih snimanja.

Povijest proizvodnje na Weyburn polju

Weyburn polje otkriveno je 1954. i bilo je u primarnoj proizvodnji oko deset godina. Tijekom 1964. obavljeno je vodeno utiskivanje te postignuta maksimalna proizvodnja 1965. od 46,000 barela na dan (sl. 3.). Voda se uglavnom utiskivala kroz gornju Vuggy jedinicu zahvaljujući njezinoj raspuknutosti, zaobilazeći pritom naftu smještenu u donjem dijelu Marly jedinice. U 1991.

počelo se s horizontalnim utiskivanjem čime je postignuto istiskivanje nafte u Marly jedinici na koju nije utjecalo ranije izvedeno vodeno utiskivanje.⁵

Tijekom 2000. primijenjen je EOR program od strane ENCANA (sl. 4.) koji se sastojao u istovremenom, ali odvojenom utiskivanju vode i CO₂ (SSWG). (sl.5.) Zahvaljujući ovom projektu procijenjeno je da je radni vijek polja produžen za 20 godina uz porast od 30 posto barela pridobive nafte.⁵

Seizmičko snimanje EOR-a

U ovoj studiji korišteni su podaci 3D seizmičkih snimanja obavljenih tijekom 2000. te 3D snimanja P-valova tijekom 2002. godine. Analiza razlika srednjih (RMS) amplituda između ovih dvaju mjerenja, 2000. i 2002., omogućila je uočavanje prostorne distribucije utisnutog CO₂.⁷

U studiji su korišteni i podaci o S-valovima snimljeni 2000. radi određivanja brzina unutar Midale ležišta. Na temelju razlika u brzinama širenja S₁ i S₂ valova uočena je brzinska anizotropija koja je posljedica rasporeda pukotina u ležištu.

Geologija polja

Glavna proizvodna jedinica u polju su Midale slojevi u Mississippian Charles formaciji. Midale slojevi nalaze se na dubini između 1 300 i 1 500 m. Čine ih tri jedinice: (1) Frobisher evaporiti, (2) Midale Vuggy, i (3) Midale Marly. Te jedinice su karakteristične za karbonatnu sekvenciju, koja oplićava prema gore, formiranu u aridnoj priobalnoj platformnoj taložnoj sredini.

Taloženje Midale slojeva počelo je nakon pomaka intrakratonskog morskog prolaza i oplićavanja područja

studije. Nakon ovog pomaka dolazi do tonjenja platforme i početka taloženja platformnih karbonata (Midale slojevi).¹² Midale Marly slojeve, intertidalno/lagunalni facijes, čini doloston čija tekstura varira između mudstonea i wackestonea. Marly jedinica ima prosječnu poroznost od 26 posto (u rasponu od 20% do 37%) i prosječnu propusnost od 10 mD (od 0,1 - 150 mD).¹⁴ (sl. 6.)

Midale Vuggy jedinica može se podijeliti u plitkomorski i priobalni facijes. Vuggy plitkomorski facijes čine packstone do grainstone srednje poroznosti od 15 posto (u rasponu od 10-21 posto) čija je srednja propusnost 50 mD (od 1 - 500 mD). Vuggy priobalni facijes sastoji se od mudstonea do packstonea sa srednjom poroznošću od 10 (od 2-15 %) i srednjom propusnošću od 3 mD (od 0,01 - 20 mD).¹⁴ (sl. 6.)

Matična stijena za Midale slojeve je podinski Bakken šejl. Nafta se formirala unutar Williston bazena u blizini Nassen antiklinale uz maksimum generiranja tijekom krede.¹² Kolektori su skoro potpuno smješteni u stratigrafskim zamkama u kojima prevladavaju isklinjenja poroznih i propusnih slojeva na krovinskoj Mississippianskoj diskordanciji. Lokalne promjene facijesa i stratigrafski pokrovi u neposrednoj podini diskordancije također mogu poslužiti kao zamke.¹²

Analiza promjene seizmičkih karakteristika tijekom vremena u Midale slojevima

Na temelju snimanja P-valova tijekom 2000. i 2003. označeno je pet glavnih horizonata.⁴ Ovih pet horizonata prikazano je na sl. 7. gdje su prikazani nailasci P-valova snimljeni 2000. godine. Tu su najzanimljiviji refleksi od mississippianske diskordancije i Bakkena jer oni ograničavaju dva ležišta čija se svojstva analiziraju. Snimak reflektiranih longitudinalnih seizmičkih valova prikazan je na sl. 7. Reflektirani nailasci zauzimaju širok frekvencijski pojas (do 150 Hz na gornjoj granici) i ne pokazuju značajnije strukturno povijanje.

Karte srednjih (RMS) amplituda načinjene su za različite intervale ispod mississippianske diskordancije, kako bi se odredilo svojstva protoka CO₂ u istraživanom prostoru. Prodor CO₂ u formaciju mijenja svojstva stijena. CO₂ je jako gust i kompresibilan fluid. Njegova nazočnost rezultira razlikama u seizmičkim amplitudama prije i nakon utiskivanja CO₂. Karte koje pokazuju promjene srednje (RMS) amplitude P-valova između snimanja obavljenih 2000. i 2002., izražene u postocima srednje (RMS) amplitude, konstruirane su pomoću jednadžbe 1.¹⁷

$$\text{Time - Lapse} = \frac{RMS_{p-wave} 2002 - RMS_{p-wave} 2000}{RMS_{p-wave} 2000} \quad (1)$$

Na sl.8 prikazana je razlika od 14 posto duž smjera utisnih bušotina unutar vremenskog prozora širine 5 ms u podini mississippianske diskordancije. To znači da se CO₂ širi unutar Midale slojeva paralelno orijentaciji utisnih bušotina. Osim toga uočava se povećanje tijekom duž južne u usporedbi sa sjevernom bušotinom.

Sljedeći korak bilo je rastavljanje Midale sloja u vremenske intervale od 2 ms (to je najmanji interval koji još dopušta kvaliteta interpretiranih horizonata) kako bi se mogla pratiti dubina prodiranja CO₂ unutar formacije. Slike 9 do 13 pokazuju da se CO₂ proširio u Midale

slojevima do dubine od 13 ms ispod mississippianske diskordancije. CO₂ se širio duž utisnih bušotina. To dokazuje da je jako propusni matriks u Midale slojevima smješten duž smjera JZ-SI.

Na sl. 13. prikazana je tranzicijska zona unutar koje se stalno nalazi CO₂. Ona se proteže unutar vremenskog intervala između 13 i 15 ms ispod mississippianske diskordancije. Srednja (RMS) vrijednost razlika amplituda karakteristična je za mnoga područja premda ne pokazuje neki izraženiji trend. Neposredno ispod ovog intervala ona pada na nulu. To znači da ispod tog intervala nema prodora CO₂. Ovo područje spada u Frobisher evaporite (sl. 3.). Frobisher slojevi su na vremenskom prikazu debeli te je srednja (RMS) razlika amplituda jednaka nuli unutar intervala od 30 ms. Ona je jednaka nuli i na cijelom vremenskom intervalu između 15 i 45 ms ispod mississippianske diskordancije. Na sl. 14, 15 i 16 prikazana su tri intervala debljine 3 ms u kojima je srednja (RMS) razlika amplituda jednaka nuli. Stoga je razumno zaključiti da CO₂ ne prodire dublje u formaciju koja je pokrivena nepropusnom Frobisher formacijom.

Sl. 16. je različita jer se na njoj uočava 20-postotna anomalija u razlici srednjih (RMS) amplituda na tri područja u blizini utisnih bušotina: jedno veliko u kojem se CO₂ zadržava zapadno od sjeverne bušotine i dva manja u blizini južne bušotine. Pritom je glavno pitanje kako je CO₂ «iscurio» iz Midale ležišta ograničenog na vremenski interval od 5 ms i stigao u sloj smješten na 30 ms ispod Midale slojeva?

Kako bi se odgovorilo na to pitanje pažljivo je proučena karta srednje (RMS) amplitude za Vuggy zonu izdvojena iz podataka o P-valovima snimljenih 2000. (sl. 17.). Za Vuggy zonu karakteristične su srednje do male amplitude osim na SZ dijelu područja na kojem su registrirane vrlo velike vrijednosti amplituda. Izrazito velike amplitude su prisutne tamo gdje su istaloženi priobalni sedimenti, a vrlo male amplitude tamo gdje se nalaze evaporiti. Sukladno tome, CO₂ nije mogao «iscuriti» ondje gdje su se nalazili evaporiti, nego jedino tamo gdje su postojale pukotine u priobalnim sedimentima na SZ dijelu područja. Taj dio jedini je dio istraživanog područja na kojem postoje značajni priobalni sedimenti i gdje je CO₂ mogao «iscuriti». Tanak, 5 ms debeo interval, u kojem se CO₂ zadržavao, vjerojatno je Kinsbey pješčenjak (sl. 2.) u čijoj se krovini nalaze Winslow evaporiti Frobisher slojeva, a u podini Gainsborough evaporiti Alaida slojeva. Na sl. 18. uspoređene su karta srednjih (RMS) amplituda u Vuggy formaciji Midale slojeva i karta razlika amplituda P-valova, snimljenih u različitim vremenima, unutar intervala između 45-50 ms ispod mississippianske diskordancije, što odgovara Kinsbey pješčenjaku u koji je CO₂ istjecao kroz pukotine u priobalnim sedimentima. Obje karte se dobro slažu i potvrđuju zaključak da je CO₂ «curio» kroz pukotine prema dolje.

Analiza promjene seizmičkih amplituda tijekom vremena za Radcliffe slojeve u krovini Midale ležišta prikazana je na sl. 19. Unutar te formacije srednja (RMS) amplituda jednaka je nuli. Unutar formacije nije uočen CO₂ što znači da su Radcliffe slojevi dobre pokrovne stijene za Midale ležište.

Analiza većeg broja seizmičkih komponenti snimljenih u Midale ležištu

Nakon određivanja tijeka CO₂ bilo je potrebno odrediti orijentaciju pukotina u ležištu. U tom cilju analizirana je anizotropija izračunata prema podacima o S-valovima snimljena 2000.² Anizotropija je definirana vremenskom razlikom u nailascima S₁ i S₂ valova.² Ako bi se radilo o idealno izotropnoj sredini među tim nailascima, koji se šire horizontalno u dva međusobno okomita smjera, ne bi smjelo biti nikakve vremenske razlike. U suprotnom, ako se radi o anizotropnoj sredini, među vremenima njihovih nailazaka postojala bi razlika ovisna o brzinama širenja ovih dvaju valova. Postotak vremenske razlike u njihovim nailascima mjerilo je anizotropije.³

Na sl. 20. prikazani S₁ i S₂ valovi snimljeni tijekom 2000. Ovdje su zanimljiva dva horizonta: izrazito jasan Shaunavon horizont smješten na 270 ms iznad Midale ležišta i dublje smješten Bakken horizont. Prvi korak u određivanju anizotropnosti cijele formacije je analiza tih dvaju horizonata. To je postignuto oduzimanjem vremenske razlike u nailascima S₁ i S₂ valova na Bakken i Shaunavon horizonte i dijeljenjem te razlike razlikom u putovanju S₂ valova do oba horizonta. Pritom je za izračun anizotropije korištena opća jednadžba 2, dok su rezultati prikazani na sl. 21. Praktičan izračun obavljen je pomoću izraza 3.

$$\% \text{ Anizotropija} = 100 \times \frac{\Delta t_{s1} - \Delta t_{s2}}{\Delta t_{s2}} \quad (2)$$

$$\% \text{ Anizotropija} = 100 \times \frac{(B_{s1} - S_{s1}) - (B_{s2} - S_{s2})}{(B_{s2} - S_{s2})} \quad (3)$$

Ovdje su:

B_{S1} vrijeme nailaska S₁ transverzalnog vala na Bakken horizont

B_{S2} vrijeme nailaska S₂ transverzalnog vala na Bakken horizont

S_{S1} vrijeme nailaska S₁ transverzalnog vala na Shaunavon horizont

S_{S2} vrijeme nailaska S₂ transverzalnog vala na Shaunavon horizont

Vrlo velike razlike na rubovima karte rezultat su rubnih utjecaja. podaci o transverzalnim valovima, posebice na rubovima sadrže jake smetnje, što uvelike otežava njihovo označavanje. Ipak izgleda da se unutar cijelog Shaunavon-Bakken intervala mogu izdvojiti dva skupa anomalija: jedan orijentiran u smjeru JZ-SI, paralelan sa smjerom utisnih bušotina, dok je drugi okomit na njega pružanja JI-SZ. Anizotropija u pojedinim područjima dostiže vrijednost od 3,5%. Ona je izravno povezana s pukotinama. Prema tome, na području istraživanja uočavaju se dva međusobno okomita skupa pukotina. Skup pukotina okomit na položaj utisnih bušotina pokazuje da se smjer širenja CO₂ odvija duž lokacija utisnih bušotina.

Druga vrsta izračuna anizotropije temelji se na analizi razlika između srednjih (RMS) amplituda S₁ i S₂ valova. Takav postupak pruža bolji uvid u anizotropna svojstva Midale ležišta. Izračun vrijednosti anizotropije obavljen je uz primjenu izraza 4, a dobiveni su rezultati prikazani na sl. 23.

$$\% \text{ Anizotropija} = 100 \times \frac{RMS_{S1} - RMS_{S2}}{RMS_{S2}} \quad (4)$$

Ovdje su:

RMS_{S1} srednja (RMS) amplituda izračunata iz podataka o transverzalnim S₁ valovima unutar ležišta (između 270 i 320 ms ispod Shaunavon horizonta)

RMS_{S2} srednja (RMS) amplituda izračunata iz podataka o transverzalnim S₂ valovima unutar ležišta (između 270 i 320 ms ispod Shaunavon horizonta)

Prema sl. 22. jasno se uočava opći anizotropni trend, a time i opći raspored pukotina u smjeru JZ-SI, paralelnom orijentaciji utisnih bušotina. To odgovara kretanju CO₂ duž utisnih bušotina. Vrijednosti amplituda izračunate prema izrazu 4 suviše su velike. Stoga je izračunat opći postotak razlika u anizotropičnosti (formula 5) koji pruža realnije podatke.

$$\% \text{ Anizotropija} = 100 \times \frac{RMS_{S1} - RMS_{S2}}{\frac{1}{2} \times (RMS_{S2} + RMS_{S2})} \quad (5)$$

Rezultati dobiveni prema izrazu 5 prikazani su na sl.23. Na opću orijentaciju pukotina paralelno položaju utisnih bušotina ukazuju anizotropičnosti koje dostižu vrijednosti i do 30 posto u uskim područjima paralelnim smjeru pružanja utisnih bušotina. Duž tih pukotina migrirao je CO₂. Nažalost, kao što je pokazano u prethodnom odsječku, CO₂ se nije zadržavao unutar planiranog područja, tj. u Midale formaciji, kako bi se povećala proizvodnja ugljikovodika, nego je «iscurio» u dublju formaciju. Zbog toga bi trebalo ponovno razmotriti položaj nekih utisnih bušotina, ali se ne bi smio mijenjati njihov opći raspored koji je optimalan za utiskivanje CO₂.

Zaključak

Analiza seizmičkih podataka snimljenih tijekom vremena pokazala je da se utisnuti CO₂ širi u Midale ležištu duž utisnih bušotina. Na temelju analize transverzalnih valova određen je smjer pukotina u Midale ležištu koji je paralelan rasporedu utisnih bušotina, čime se objašnjava i kretanje CO₂ u istom smjeru. Sljedeća istraživanja i razdvajanje intervala ispod Midale slojeva nakon analize podataka snimljenih u različitim vremenskim periodima pokazala su da je CO₂ istjecao u podinu Midale slojeva kroz pukotine u priobalnim sedimentima te se akumulirao u Kisbey pješčenjaku u čijoj je krovini pokrov od Winlaw evaporita Frobisher slojeva, a u podini Gainsborough evaporiti Alida slojeva. Smjer rasporeda utisnih bušotina idealan je (paralelan pukotinskom sustavu), premda je nužno posvetiti više pažnje lociranju pojedinih od njih kako bi se izbjegli gubitci CO₂.



Autori:

A. W. Araman, Colorado School of Mines, Department of Geo-physic, Golden Colorado. e-mail: aaraman@mines.edu

M. Hoffman, Colorado School of Mines, Department of Geology, Golden Colorado. e-mail: mahoffma@mines.edu

T. L. Davis, Colorado School of Mines, Department of Geophysic, Golden Colorado. e-mail: tdavis@mines.edu

UDK : 622.24.063.5 : 622.276/.279 : 553.98

622.24.63.5 rudarstvo, bušotine, iscrpljivanje ležišta
622.276/.279 pridobivanje nafte i plina
553.98 ležišta nafte i plina