

## Ultrasonic Assisted Enhanced Oil Recovery Process: Numerical Analysis

Sayed Mahdi Aghaei, Faramarz Nasirzade, Arezou Jafari\*, Davood  
Khoozan, Hamed Namdar

Petroleum Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat  
Modares University, Tehran, Iran

### Abstract

**Research topic:** One of the new methods in the process of increasing oil recovery from hydrocarbon reservoirs is the method of using ultrasonic waves. In this research, using ultrasonic waves and their application in a large-scale sample tank, their effect on increasing oil extraction by the numerical method is investigated.

**Research Method:** The modeling process has been performed using MATLAB software in this research. First, by determining the porous environment, the amount of pressure increases due to ultrasonic waves due to solving the sound equations (Helmholtz) by MATLAB k-waves toolbox is investigated. Finally, considering the cumulative production at a specific time from the production well and determining the oil recovery from the reservoir in the presence of a wave, to examine the effect of well location parameters and its distance from the wave generation source, wave production starts time, wave application methods (Pulsed and continuous), is performed at an optimal frequency and power.

**Main results:** According to the modeling results, the closer the wave start time is to the first days of production, the higher the oil recovery rate; So that by starting the application of ultrasonic wave under the power of 5 kW and frequency of 20 kHz simultaneously with the production of well oil from the first day, oil recovery compared to oil recovery in the case of starting the wave from the fifty and ninety days, respectively 4/5% and 8% more. Oil recovery is 1.8% higher if the wave is applied continuously to the reservoir at a given time than when pulsed at the same time. The modeling results show that the shorter the distance between the wave source and the production well, the lower the pressure drop in the reservoir area and the higher the oil recovery. According to the results, if the source of wave production is located at a distance of 200 feet from the production well, it will increase by 7.1% compared to the distance of 1800 feet from the oil recovery well.

### key words

Enhanced oil recovery

Ultrasonic waves

Simulation and modeling

Cumulative rate

Pressure change

\*To whom correspondence should be addressed:  
ajafari@modares.ac.ir

## بررسی فرایند ازدیاد برداشت نفت با استفاده از امواج فراصوت: تحلیل عددی

سید مهدی آقائی، فرامرز نصیرزاده، آرزو جعفری\*، داود خوزان، حامد نامدار

گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### چکیده

**موضوع تحقیق:** یکی از روش‌های نوین در فرایندهای افزایش بازیافت نفت از مخازن هیدروکربوری، به‌کارگیری امواج فراصوت است. در این تحقیق با استفاده از امواج فراصوت و اعمال آن در یک مخزن نمونه مقیاس بزرگ، به بررسی اثر آن در ازدیاد برداشت نفت به روش عددی پرداخته شده است.

**روش تحقیق:** در این تحقیق فرایند مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شده است. ابتدا با تعیین محیط متخلخل میزان افزایش فشار حاصل از موج فراصوت با توجه به حل معادلات صوت (هلمهولتز) توسط جعبه ابزار  $k$ -waves متلب بررسی شده و سپس با تعیین مخزن نمونه و حل معادلات حاکم بر مخزن میزان تغییرات فشار حاصل از جریان سیال در حضور چاه تولیدی به بررسی اثر موج فراصوت در ازدیاد برداشت نفت پرداخته می‌شود. در نهایت با توجه به تولید تجمعی در زمان مشخص از چاه تولیدی و تعیین بازیافت نفت از مخزن در حضور موج، به بررسی اثر پارامترهای موقعیت مکانی چاه و فاصله آن از منبع تولید موج، زمان شروع تولید موج، شیوه‌ای اعمال موج (پالسی و پیوسته)، در فرکانس و توان بهینه پرداخته می‌شود.

**نتایج اصلی:** با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی، هرچقدر زمان شروع اعمال موج به روزهای اول تولید نزدیک‌تر باشد، میزان بازیافت نفت نیز بیشتر می‌شود؛ به گونه‌ای که با شروع اعمال موج فراصوت تحت توان ۵ کیلووات و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز هم‌زمان با تولید نفت چاه از روز اول، بازیافت نفت نسبت به بازیافت نفت در حالتی که شروع اعمال موج از روزهای پنجاه و نود باشد، به ترتیب  $4/5\%$  و  $8\%$  بیشتر شده است. بازیافت نفت در صورتی که موج در زمان مشخص به‌صورت پیوسته به مخزن اعمال شود به میزان  $1/8\%$  نسبت به حالتی که در همان زمان به‌صورت پالسی اعمال شود، بیشتر است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که هرچقدر فاصله منبع تولید موج با چاه تولیدی کمتر باشد، افت فشار محدوده چاه کمتر شده و بازیافت نفت افزایش می‌یابد. به‌طوری که طبق نتایج اگر منبع تولید موج در فاصله ۲۰۰ فوتی از چاه تولیدی قرار گرفته باشد، نسبت به فاصله ۱۸۰۰ فوتی از چاه بازیافت نفت  $7/1\%$  افزایش می‌یابد.

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته‌ای  
سال ششم، شماره ۴، نسخه ۱  
زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۸۲-۶۹

### کلمات کلیدی

ازدیاد برداشت  
امواج فراصوت  
شبیه‌سازی و مدل‌سازی  
دبی تجمعی  
تغییرات فشار

\*مسئول مکاتبات:

ajafari@modares.ac.ir

## ۱ مقدمه

با توجه به نیاز روز افزون به انرژی و کاهش منابع نفت سبک موجود، امروزه توجه‌ها به سمت تولید از مخازن نفت سنگین جلب شده است. به دلیل گرانی و چگالی بالای نفت این مخازن، تولید از آن‌ها مستلزم استفاده از روش‌های زیاد برداشت حرارتی است. اما روش‌های حرارتی موجود برای تولید از اینگونه مخازن با چالش‌های فنی از جمله وابستگی شدید به آب و سوخت، عمق سازند، نحوه پیاده‌سازی و همچنین محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی روبرو هستند. بنابراین امروزه روش‌های موثرتر و دوستدار محیط‌زیست مانند اعمال امواج الکترومغناطیسی (Electromagnetic) و فراصوت (Ultrasonic) برای کاهش گرانی و افزایش تولید از اینگونه مخازن پیشنهاد شده است [۱]. ایده استفاده از امواج اولین بار با ثبت اختراع ریچچی با استفاده از روش گرمایش الکتریکی برای افزایش تولید نفت سنگین با استفاده از گرمایش تابشی آغاز شد [۲]. عمده مطالعات صورت گرفته در رابطه با کاربرد امواج فراصوت برای ازدیاد برداشت نفت عموماً به صورت آزمایشگاهی و در مقیاس میکرو انجام و مطالعات محدودی به صورت عددی در این زمینه صورت گرفته است. از جمله موحسین و همکاران [۳] تأثیر امواج فراصوت را بر روی افزایش دمای مخزن و چندین سیال مختلف توسط نرم‌افزار کامسول مورد بررسی قرار دادند. پرز و همکاران [۴] با هدف انگیزش چاه تولیدی نفت، به کمک روش المان محدود به بررسی تأثیر دامنه تولید امواج و همچنین تعداد منبع‌های تولید موج فراصوت و فاصله آن‌ها از یکدیگر پرداختند. عثمان و همکاران [۵] با استفاده از جعبه ابزار MSRT به بررسی اثر امواج فراصوت بر روی دبی نفت و تغییر شکل دیواره فضای متخلخل پرداخته و افزایش دبی و فشار و دما را در نتایج خود مشاهده کردند. علاوه بر این هان و دانگ [۶] تأثیر موج فراصوت را بر میزان تغییرات اشباع نفت در محیط اشباع از آب و نفت بررسی کردند. آن‌ها با بررسی تأثیر موج بر روی تغییرات اندازه ذرات سیال، کاهش اشباع نفت در محیط متخلخل را نشان دادند.

علاوه بر امواج فراصوت، از امواج الکترومغناطیس که قدمتی بیشتر دارد نیز استفاده می‌شود، اکثر تحقیقات در مورد گرمایش الکترومغناطیسی برای ازدیاد برداشت از مخازن نفت، بر اساس شبیه‌سازی و مدل‌سازی در اواسط دهه ۱۹۷۰ صورت گرفته است. ابناتی [۷] مدلی ریاضی برای ارزیابی توزیع دما و سایر اثرات فیزیکی ناشی از تابش انرژی امواج الکترومغناطیس (EM) را به مخزن نفت پیشنهاد کرد. او مدل‌های ریاضی را برای توزیع درجه حرارت حالت‌های پایدار، دمای گذرا-جریان ثابت، دمای گذرا بدون جریان و دمای گذرا شدت جریان افزایشی توسعه داده است. وی همچنین اظهار داشت که با توجه به توان مصرفی نسبتاً متوسط (۲۰ کیلو وات)، ممکن است بر اساس ضریب جذب، میزان افزایش انرژی بین ۵۰ تا ۳۰۰ درصد باشد. مطالعات او نشان داد که تحریکات حرارتی چاه‌های نفتی توسط گرمایش تابشی، در سرعت جریان و همچنین خصوصیات توزیع دما اهمیت زیادی دارد. فیزیک گرمایش الکترومغناطیسی و کاربرد احتمالی آن برای بازیافت نفت نیز توسط ساهنی و همکاران ارائه شده است [۸]. آن‌ها

مدل عددی برای انتقال حرارت به مخازن نفت سنگین را از طریق این امواج ارائه کردند و گرمایش مقاومتی با فرکانس پایین (اهمی) و گرمایش الکترومغناطیسی با فرکانس بالاتر (فرکانس ماکروویوی) را با هم مقایسه کردند. سپس آن‌ها پیش گرمایش مخزن با جریان فرکانس پایین با استفاده از دو الکتروود افقی قبل از تزریق بخار را مدل‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پیش گرمایش الکتریکی به‌طور قابل توجهی سرعت تولید اولیه و تولید نفت جمعی را نسبت به موارد غیرپیش گرم‌کننده افزایش می‌دهد. اینو [۹] با استفاده از توزیع و پخش ذرات ژل با مقیاس میکرو در آب را برای بررسی میرایی (جذب موج) امواج فراصوت و کاهش دمای آن نشان دادند. طبق نتایج آن‌ها، هرچقدر میرایی موج فراصوت کمتر باشد گسترش افزایش دما کمتر شده ولی شدت آن در اطراف منبع موج کاهش نمی‌یابد. روش‌های حرارتی متداول در ازدیاد برداشت نفت با توجه به مکانیزم‌های آن همچون روش‌های سوزاندن نفت و تزریق بخار آب نسبت به روش فراصوت با صرف هزینه بیشتری همراه است. در روش سوزاندن نفت مخزن به‌منظور ازدیاد برداشت نفت علاوه بر سوختن بخشی از نفت موجود و ایجاد دوده، باعث تغییرات شدید ساختار سنگ مخزن شده و در طولانی‌مدت قابلیت تخلخل‌پذیری سنگ مخزن کاهش می‌یابد؛ در صورتی که در روش فراصوت هیچگونه تغییرات شدیدی در ساختار سنگ به‌وجود نخواهد آمد [۱۰] و همچنین این روش در هر نوع از شرایط مخزن با هرگونه مشخصات سنگ مخزن (تخلخل و تراوایی ...) کاربرد دارد [۱۱]. یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های روش فراصوت، قابلیت کنترل لحظه‌ای این روش در عملیات ازدیاد برداشت نفت است. به‌طوری که با کنترل شرایط منبع از سطح می‌توان تغییرات مدنظر را در تابش موج با توجه به شرایط لحظه‌ای چاه و مخزن تعیین کرد. در روش حرارتی بیشترین تأثیر این روش تغییرات دمای سیال درون مخزن مدنظر خواهد بود. در صورتی که در روش فراصوت علاوه بر تغییرات دمای حاصل از تابش موج، تغییرات فشار محسوسی درون مخزن برای تثبیت فشار مخزن ایجاد خواهد شد. با توجه به اینکه موج فراصوت موجی مکانیکی است، تغییرات ایجاد شده در مخزن از جمله تغییر ساختار سنگ یا تغییرات فشار و دما، متفاوت از تغییرات شیمیایی حاصل از روش حرارتی است؛ بر همین اساس استفاده از نانوذرات هم‌زمان با روش فراصوت در بسیاری از موارد تأثیر بسزایی در عملیات ازدیاد برداشت خواهد داشت [۱۲]. با توجه به اینکه در زمینه عملیاتی کردن استفاده از امواج فراصوت در مقیاس بزرگ اطلاعات محدود بوده و اکثر مطالعات در مقیاس میکرو صورت گرفته است، بنابراین در این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی این فرایند، به بررسی امکان‌سنجی عملیاتی کردن استفاده از امواج فراصوت در مقیاس بزرگ پرداخته شده و اثر پارامترهای مختلفی از جمله زمان شروع تابش موج، فاصله مکانی منبع موج تا چاه تولیدی و نحوه اعمال موج مورد بررسی قرار می‌گیرد. موج اعمال شده به مخزن باعث تغییرات دما و فشار در مخزن می‌شود. در این تحقیق به بررسی تغییرات فشار حاصل از موج اعمالی پرداخته شده است، چراکه اثر دما در مقیاس آزمایشگاهی برخلاف اثر فشار قابل اندازه‌گیری بوده و برای بررسی اثر فشار مستلزم شبیه‌سازی عددی خواهد بود، لذا در این تحقیق اثر فشار مورد بررسی قرار گرفته است.

به دست آمده است.

## ۲-۱-۲ شرایط اولیه و مرزی

مخزن مورد شبیه‌سازی به صورت مرز بسته از هر طرف و در فشار اولیه ۶۰۰۰ psi و به صورت تک‌فاز قرار دارد. چاه تولیدی با فشار ته‌چاهی ثابت ۵۰۰۰ psi و زمان کل شبیه‌سازی ۱۰۰ روز است. بنابراین، حالت‌های مختلف نحوه اعمال موج فراصوت به مخزن، مدت زمان اعمال موج متفاوت خواهد بود. ولی به طور کلی، زمان کل شبیه‌سازی اعمال موج با توجه به کم بودن زمان کل شبیه‌سازی مخزن از ۱۰ روز تجاوز نمی‌کند. گام زمانی شبیه‌سازی مخزن یک روز تعیین شده است که مدت زمان اعمال موج به طور متوسط ۱۲-۲ ساعت در هر روز با توجه به توان و فرکانس ورودی به منبع موج، اعمال می‌شود. به عبارت دیگر برای همگام‌سازی معادلات موج و حاکم بر مخزن، گام زمانی در شبیه‌سازی در نهایت با توجه به اندازه گریدها یک روز در نظر گرفته شده است.

## ۲ نظری

### ۱-۲ شبیه‌سازی فرایند

همان‌طور که بیان شد، شبیه‌سازی این فرایند به وسیله حل عددی معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است، که از دو بخش کلی شبیه‌سازی مخزن نمونه و اعمال موج درون مخزن تشکیل شده است. در نهایت با ادغام این دو بخش، به بررسی بازیافت نهایی با توجه به تأثیر پارامترهای مختلف پرداخته می‌شود.

### ۱-۱-۲ مخزن نمونه بدون چاه تولیدی

مخزن مورد نظر برای شبیه‌سازی، مخزن مستطیل‌شکلی به ابعاد ۲۰۰۰ در ۴۰۰ فوت با مشخصات درج شده در جدول ۱ بوده و در مرحله اول به منظور اعمال موج مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مخزن مورد نظر با هدف اعمال موج در ابتدا با قرارگیری چاه تولیدی که در وسط مخزن قرار گرفته است، مش بندی شده و پس از آنالیز تعیین گام زمانی شبیه‌سازی، زمان کل شبیه‌سازی ۱۰۰ روز و گام زمانی یک روز جهت ادامه روند شبیه‌سازی تعیین شده است. گام زمانی در معادلات موج مستقل از گام زمانی معادلات حاکم بر مخزن است و برای تعیین گام زمانی پایدار (Stable Time) برای

جدول ۱ مشخصات اولیه مخزن جهت شبیه‌سازی

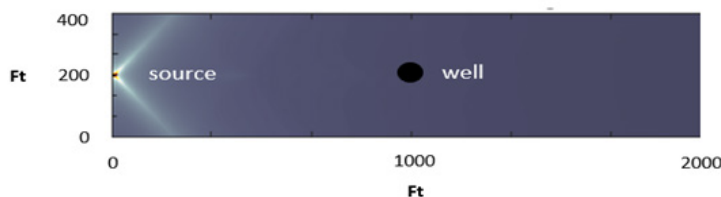
Table 1. Initial characteristics of the reservoir for simulation

parameter	Porosity	Permeability	Initial pressure	Formation volume factor	Initial temperature	API
value	18%	100 md	6000 psi	1 bbl/STB	190 F	20o
parameter	Reservoir dimension	Mesh	Mesh size	Total time	Time step	Oil in place
value	2000×400 (ft)	500×100 (ft)	4 × 4 (ft)	100 days	1 day	2.4043 × 10 <sup>6</sup> STB

## ۲-۱-۳ مخزن به همراه چاه تولیدی

با توجه به شرایط مرزی گفته شده، چاه تحت فشار ثابت ۵۰۰۰ psi در دو حالت بدون حضور موج و در حضور موج تولید کرده و دبی جمع‌ی آن گزارش می‌شود. طبق معادله ۱، بازیافت نفت محاسبه شده و برای حالت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

$$\text{Recovery Factor} = \frac{N_p}{\text{OILP}} \times \%100 \quad (1)$$



شکل ۱ طرح‌واره مخزن با موقعیت‌های قرارگیری چاه و منبع تولید موج

Figure 1. Schematic of the reservoir with the locations of the well and the source of wave

دو حالت از دو مرحله جدا با تحلیل پایداری اندازه گریدها استفاده شده است.

چاه تولیدی در وسط مخزن از هر طرف قرار دارد که در این حالت فاصله چاه تا منبع تولید موج در جهت X، ۱۰۰۰ فوت است (شکل ۱). در حالت اول برای بررسی اثر موج در مخزن که چاه تولیدی ندارد، منبع تولید موج با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز (kHz) و توان ۵ کیلووات (kW) به صورت تک‌نقطه‌ای در سمت چپ مخزن و در فاصله ۲۰۰ فوتی از عرض مخزن قرار می‌گیرد. برای تعیین گام زمانی در این مرحله برای پایداری زمان و نتایج، پس از تحلیل سازگاری اندازه گرید و زمان، اندازه هر گرید ۴×۴ فوت در دو بعد

حالت تولید بدون اعمال موج و در حضور موج و میزان افزایش بازیافت نفت به دست خواهد آمد.

## ۲-۲ معادلات حاکم

### ۱-۲-۲ معادلات موج فراصوت

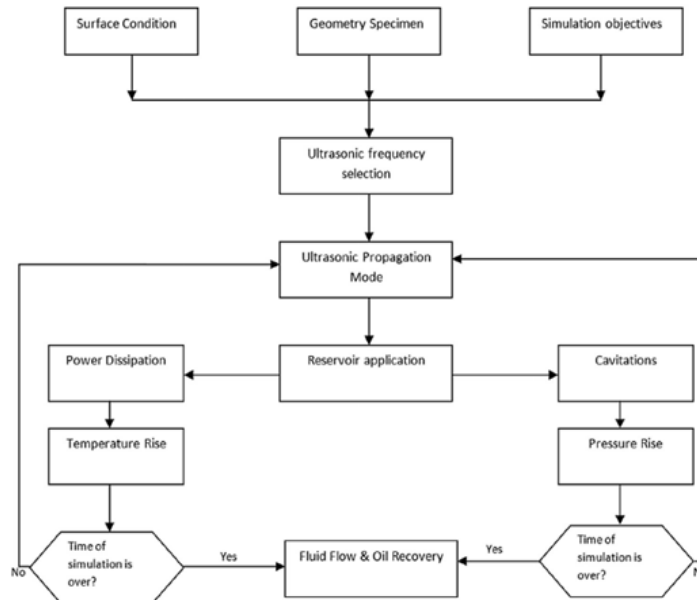
هنگامی که موج صوتی از محیط فشرده عبور می کند، نوسانات پویایی در فشار، چگالی، دما، سرعت ذرات و غیره وجود دارد. غالباً در صوت، معادلات پایستگی جرم، حرکت و انرژی درون محیط با هم در یک معادله موج واحد ترکیب می شوند که معادله دیفرانسیل جزئی درجه دو با متغیر صوتی است (اغلب فشار صوتی). به عنوان مثال، در حالت کلاسیک موج صوتی کوچک با دامنه کوچک از طریق محیط سیال همگن و بدون اتلاف پخش می شود. برای به دست آوردن توزیع فشار در توده سیال مخزن، باید معادله موج صوتی ایجاد شده در جریان سیال حل شود. حل معادله موج صوتی، پیشروی موج صوتی را در سیال مشخص

در معادله فوق،  $N_p$  نشان دهنده دبی جمععی و OIIP نشان دهنده حجم نفت در جای مخزن است.

در حالت اول زمانی که موجی در مخزن اعمال نمی شود، مخزن در مدت ۱۰۰ روز تولید کرده و در انتها دبی جمععی آن به دست آمده است. در حالت دوم، مخزن در حضور موج شروع به تولید کرده و در انتهای زمان شبیه سازی پس از به دست آمدن دبی جمععی، میزان افزایش بازیافت نفت طبق معادله ۲ به دست خواهد آمد.

$$\text{Increase Recovery} = \frac{N_{\text{Pultrasound}} - N_p}{\text{OIIP}} \quad (2)$$

با توجه به تعیین هدف شبیه سازی، روند شبیه سازی برای تعیین افزایش بازیافت نفت طبق الگوی زیر انجام می شود (شکل ۲). طبق این الگو و



شکل ۲. فلوجارت مورد استفاده در شبیه سازی فرایند  
Figure 2. The used flowchart in simulation of the process.

می کند. معادله موج صوتی به فرم معادله دیفرانسیل جزئی درجه دوم است که از ادغام سه معادله پایداری تکانه، پایداری جرم و چگالی به دست می آید. این معادله تابعیت فشار صوتی (Acoustic pressure) را با مکان و زمان توصیف می کند [۱۳].

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p \quad (3) \text{ پایداری تکانه}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \nabla \cdot u \quad (4) \text{ پایداری جرم}$$

جدول ۱، پس از تعیین مشخصات اولیه مخزن و موج فراصوت و اعمال شرایط مرزی در آن به بررسی اثر گسترش موج فراصوت از منبع موج به سمت چاه پرداخته می شود. در ادامه پس از تعیین افزایش فشار ایجاد شده توسط موج اعمالی، میزان افزایش بازیافت نفت با توجه به دبی جمععی به دست آمده، مورد بررسی قرار می گیرد. الگوی زیر از دو مرحله تشکیل می شود، مرحله اول پیاده سازی موج در مخزن برای بررسی سازگاری زمان و اندازه گرید با توجه به مشخصات مدل که در نهایت با تعیین گام زمانی میزان گسترش موج در مخزن بررسی می شود. مرحله دوم تأثیر گسترش موج در مخزن همراه با چاه تولیدی مورد بررسی قرار گرفته و دبی جمععی در دو

### ۲-۲-۲ معادلات حاکم بر مخزن

معادله جریان سیال در مخزن با استفاده از معادلات پایستگی جرم، معادله مومنوم (قانون دارسی) و معادله حالت به دست می‌آید. با در نظر گرفتن سه معادله گفته شده و ادغام آن‌ها، معادله فشار جریان سیال به دست خواهد آمد. (معادله ۱۲)

$$\vec{u} = -\frac{\vec{k}}{\mu} \nabla(p - \rho g z) \quad (11) \quad \text{قانون دارسی}$$

$$\nabla \cdot \left( \frac{\beta_c A_x}{B} \vec{u} \right) + \sum_i q_{iw} + \sum Q_n = \frac{v_b}{\alpha_c} \frac{d}{dt} \left( \frac{\phi}{B} \right) \quad (12)$$

در معادلات بالا  $\beta_c$  و  $\alpha_c$  ثوابت،  $A_x$  مساحت گرید،  $q_{iw}$  دبی چاه،  $Q_n$  دبی شرایط مرزی وارد شده،  $v_b$  حجم گرید،  $B$  ضریب حجمی نفت،  $k$  تراوایی مطلق و  $\mu$  گرانیوی سیال هستند. با بسط معادله ۱۲ و جایگذاری معادله ۱۱ در آن، معادله کلی به شکل زیر به دست خواهد آمد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \beta_c \frac{k_x A_x}{\mu B} \left( \frac{\partial p}{\partial x} - \gamma \frac{\partial z}{\partial x} \right) \Delta x \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \beta_c \frac{k_y A_y}{\mu B} \left( \frac{\partial p}{\partial y} - \gamma \frac{\partial z}{\partial y} \right) \Delta y \right] + \sum_i q_{iw} + \sum Q_n = \frac{v_b}{\alpha_c} \frac{d}{dt} \left( \frac{\phi}{B} \right) \quad (13)$$

که در معادله بالا  $\gamma = g\rho$  نشان‌دهنده گرانش ویژه است. با حل معادله ۱۳ به روش ضمنی (implicit) که فشار و پارامترهای وابسته به آن به صورت ضمنی حل می‌شوند، فرم آن با توجه به رابطه حالت، به صورت زیر تبدیل خواهد شد. (معادله ۱۵)

$$c = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (14) \quad \text{رابطه حالت}$$

$$\sum T_{ln}^{m+1} [(p_l^{m+1} - p_n^{m+1}) - \gamma_{ln}^m (z_l - z_n)] + \sum q_{ln}^{m+1} + q_n^{m+1} = \frac{V_b \phi_n (c + c_0)}{\alpha_c B \Delta t} [p_n^{m+1} - p_n^m] \quad (15)$$

که  $\phi_c$  نشان‌دهنده تراکم‌پذیری سنگ،  $c$  تراکم‌پذیری سیال،  $z$  ارتفاع،  $m$  گام زمانی فعلی،  $m+1$  زمان درگام بعدی و  $l, n$  نشان‌دهنده شماره گرید هستند. در معادله ۱۵،  $T$  نشان‌دهنده انتقال‌پذیری سیال بین گریدها است که رابطه آن به صورت زیر به دست می‌آید (معادله ۱۶)

$$T_d = \beta_c \frac{k_d A_d}{\mu B \Delta d} \quad (16)$$

که  $d=x, y$  نشان‌دهنده جهت انتقال سیال است. پس از بررسی اثر موج فشار صوتی در مخزن طبق معادله ۸، حال نتایج به دست آمده از فشار صوتی و تبدیل آن به فشار مخزنی در قالب شرط مرزی داخلی

$$p = c_0^2 \rho \quad (5) \quad \text{رابطه چگالی}$$

در معادلات بالا  $u$  سرعت صوت (Acoustic velocity) حرکت ذره،  $\rho$  چگالی محیط،  $p$  فشار صوت،  $\rho$  چگالی متعادل و  $c$  سرعت صوت همسانگرد (isotropic) است. پس از ادغام سه معادله گفته شده، معادله دیفرانسل درجه دوم به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

با در نظر گرفتن رابطه هارمونیک (Harmonic) فشار صوتی نسبت به زمان معادله  $\gamma$  و طبق معادله بالا، فشار صوتی نسبت به مکان معادله  $\lambda$  که به معادله هلمهولتز مشهور است، به دست خواهد آمد.

$$p(r, t) = p(r) e^{i\omega t} \quad (7)$$

$$\nabla \left( \frac{1}{\rho} \nabla p \right) - \frac{\omega^2}{\rho c^2} p = 0 \quad (8)$$

در معادلات بالا  $\omega = 2\pi f$  فرکانس زاویه‌ای،  $f$  فرکانس موج صوتی و  $c$  نشان‌دهنده سرعت انتشار موج در محیط مورد نظر است. سرعت صوت به خواص فیزیکی محیط وابسته است که برای هر محیط طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (9)$$

که  $E$  ضریب سختی مدل است. با توجه به محیط مخزن که موج در آن منتشر می‌شود، ترکیبی از سنگ و سیال است، به منظور تعیین چگالی محیط، معادله زیر به کار برده شده است [۱۴]

$$\rho = \frac{\phi}{100} \times \rho_{fluid} + \left(1 - \frac{\phi}{100}\right) \times \rho_{grain} \quad (10)$$

در معادله بالا  $\phi$  نشان‌دهنده تخلخل،  $\rho_{fluid}$  چگالی سیال مخزن و  $\rho_{grain}$  چگالی سنگ مخزن هستند. با حل معادله هلمهولتز معادله ۸، توزیع فشار در دامنه محاسباتی به دست می‌آید که برای حل این معادله از جعبه ابزار  $k$ -waves متلب استفاده شده است.

وارد معادله ۱۵ شده و در نهایت به بررسی اثر موج در ازیاد برداشت نفت پرداخته می‌شود.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی اثر پخش موج فراصوت در مخزن

در ابتدا با استفاده از محیط مدل شده، به بررسی پخش موج فراصوت و محاسبه فشار صوتی حاصل از پخش شدن آن پرداخته می‌شود. در دو حالت فشار صوتی مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول خروجی منبع تولید موج فراصوت به صورت سینوسی در نظر گرفته شده است و در حال دوم منبع، موج پالسی تولید می‌کند. با توجه به تفاوت دو معادله دیفرانسیل جریان سیال در محیط متخلخل و هلمهولتز که در نهایت باید در محیط یکسان حل شوند، ابتدا باید وابستگی اندازه‌گیری تعیین شود تا برای هر دو معادله همخوانی داشته باشد. محیط شبیه‌سازی شامل گریدبندی است که از مستطیل‌هایی با طول و عرض بسیار کوچک‌تر از طول موج فراصوت تولیدی تشکیل شده‌اند. با توجه به معادلات موج و حل معادله هلمهولتز انتشار موج صوت در محیط بر حسب فاصله از منبع تولید موج به صورت زیر خواهد بود:

$$p(x, t) = \frac{A \times \text{Re}[e^{i(\omega t - kx)}] e^{-ax}}{\sqrt{x}} \quad (17)$$

در معادله بالا  $a$  ضریب تضعیف موج فراصوت در محیط،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای و  $k$  عدد موج است. غالباً، محیط صوتی ناهمگن است و در نتیجه، سرعت صدا و تراکم محیط از لحاظ مکانی متفاوت است. در این حالت، معادلات حاکم باید شامل برخی اصلاحات اضافی باشد. به همین ترتیب، همزمان با انتشار موج صوتی، عموماً موج مقداری از انرژی صوتی را در اثر حرارت تصادفی و در نتیجه جذب صوتی از دست می‌دهد. هنگامی که پارامترهای جذب تعریف می‌شوند، معادلات این محیط را به عنوان مایع جاذب صدا در نظر می‌گیرند که در آن جذب از قانون توان فرکانس پیروی می‌کند که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۵].

$$a = a_0 \omega^\gamma \quad (18)$$

در معادلات بالا  $\alpha$  و  $\gamma$  به ترتیب عامل و نمای قانون توان فرکانس هستند. در صورتی که محیط صرفاً مایع باشد، دیگر سرعت موج عرضی وجود نخواهد داشت و فقط سرعت موج طولی آورده می‌شود. بنابراین اگر محیط شبیه‌سازی ناهمگون باشد و از سنگ و نفت تشکیل شده باشد، موج فراصوت هنگام عبور از مایع به جامد علاوه بر مولفه طولی، مولفه‌ای عرضی هم

خواهد داشت؛ و برعکس هنگام عبور از محیط جامد به مایع، دیگر مولفه عرضی نخواهد داشت و صرفاً مولفه طولی خواهد داشت. برای محیط‌های ناهمگون، هنگامی که به مرز هر کدام از محیط‌ها برسیم، باید معادله پیوستگی برای سرعت و فشار حل شوند. دقت به مولفه‌های طولی و عرضی موج در این حالت بسیار اهمیت دارد. هنگامی که موج از محیطی به محیط دیگر می‌رسد، بخشی از موج در مرز دو محیط بازتاب شده و بخش دیگر آن عبور می‌کند. مقدار ضریب بازتاب و عبور در این حالت دقیقاً مطابق قانون اسنلز محاسبه می‌شود. با توجه به این که در دو طرف مرز شدت نیروها یکسان است، می‌توان این‌طور در نظر گرفت که مجموع ضرایب عبور برابر با ضرایب بازتاب باشد. معادلات زیر بیانگر ضرایب بازتاب و عبور برای دو محیط مجزا هستند، زیرا درون مخزن به دلیل ترکیب سنگ و سیال در هر لحظه تغییر محیط از جامد به مایع یا برعکس وجود دارد.

$$T = \frac{2 \times z_2 \cos \theta_i}{z_2 \cos \theta_i + z_1 \cos \theta_T} \quad (19)$$

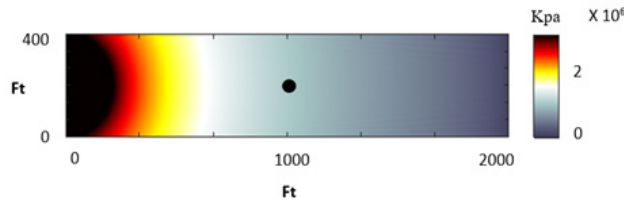
$$R = \frac{z_2 \cos \theta_i - z_1 \cos \theta_T}{z_2 \cos \theta_i + z_1 \cos \theta_T} \quad (20)$$

در معادلات بالا  $T$ ،  $r$  و  $i$  به ترتیب مربوط به حالت بازتاب، عبور و ورودی است. همچنین  $R$  و  $T$  به ترتیب ضریب بازتاب و عبور از مرز دو محیط است، هنگامی که موج از محیط اول وارد محیط دوم می‌شود.

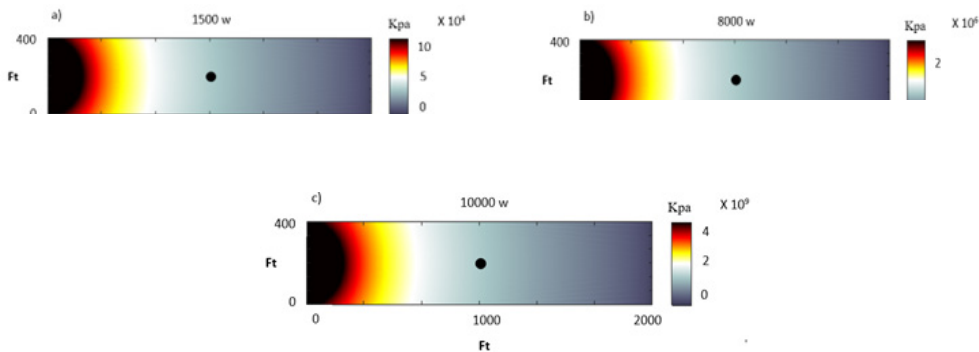
#### ۳-۱-۲ گسترش موج فشاری از منبع موج در مخزن

همان‌طور که در بخش ۲ گفته شد، محیط شبیه‌سازی، مخزنی به شکل مستطیل است (شکل ۱). در این مخزن، چاه در وسط مخزن و منبع تولید موج در سمت چپ مخزن قرار دارند. در ابتدا منبع تولید موج با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان ۵ کیلووات شروع به تولید کرده و سبب افزایش فشار در محدوده شعاع گسترش می‌شود. در این حالت بیشترین فشار ایجاد شده در محدوده اطراف منبع تولید موج حدود  $3 \times 10^6$  کیلوپاسکال (kPa) است. همان‌طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، توزیع فشار و گسترش آن تا محدوده ۴۰۰ فوت است. گسترش موج وابسته به دو پارامتر عامل و نمای قانون توان فرکانس است که مقادیر آن به ترتیب ۳ دسی‌بل برمگاهرتز بر متر ((db/(m·MHz)) و ۱/۵ است.

همین روند برای سه حالت توان ۸، ۱۰ و ۱/۵ کیلووات تحت فرکانس ثابت ۲۰ کیلوهرتز انجام گرفته است (شکل ۴). در این سه حالت همان‌طور



شکل ۳ توزیع فشار صوتی در مخزن با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان ۵ کیلووات  
Figure 3. Sonic Pressure distribution in the reservoir with frequency of 20 kHz and power of 5 Kw.

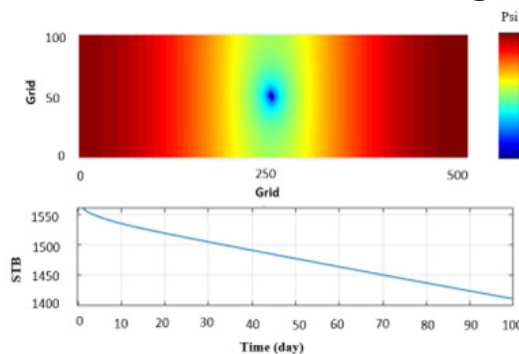


شکل ۴ توزیع فشار حاصل از موج فشاری با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز برای توان‌های: الف) ۱۵۰۰ وات، ب) ۸۰۰۰ وات و ج) ۱۰۰۰۰ وات  
Figure 4 Pressure distribution resulting from a pressure wave in reservoir with frequency of 20 kHz and powers of: a) 1500w b) 8000w c) 10000w

موج فشاری حاصل از تابش موج، همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، در سه حالت تقریباً در محدوده طولی قرار دارند. دلیل این امر با توجه به اینکه توان ورودی متفاوت است، مستقل بودن گسترش موج از پارامترهای توان و فرکانس است؛ چراکه دو پارامتر عامل و نمای قانون توان فرکانس در این سه حالت یکسان بوده و باعث یکسان شدن طول گسترش موج در سه حالت شده است. با توجه به اینکه موج فراصوت نوعی موج مکانیکی بوده و الگوی گسترش کروی است، برای ایجاد تمرکز موج در جهت مخزن و به طرف چاه تولیدی، لایه‌ای در مرزهای مخزن شبیه‌سازی شده تعریف می‌شود که موج اعمال شده در صورت برخورد با مرزهای مخزن از آن عبور یا بازتاب نکند. به این لایه، لایه انطباق کامل (PML) گفته می‌شود. به‌منظور

که مشخص است، هرچقدر توان ورودی بیشتر باشد، فشار صوتی ایجادشده در محدوده گسترش موج بیشتر است. به‌دلیل محدودیت ایجاد توان بالا برای ابزارهای تولید موج، معمولاً توان بهینه‌ای در این فرایند در محدوده ۵-۱۰ کیلووات در بازه زمانی بین ۲-۸ ساعت در روز است.

با توجه به شکل ۴، توان ورودی منبع در یک فرکانس، رابطه مستقیم با فشار دارد. هرچقدر توان ورودی بیشتر باشد، فشار در محدوده گسترش و در منبع موج بیشتر خواهد شد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، در توان  $10^4$  کیلووات فشار حداکثری ایجادشده در منبع حدود  $4 \times 10^9$  کیلوپاسکال است در حالی که در توان ۸ کیلووات این فشار به  $3 \times 10^8$  کیلوپاسکال و در توان ۱/۵ کیلووات به  $10^4 \times 10^5$  کیلوپاسکال می‌رسد. گسترش



شکل ۵ تغییرات فشار مخزن و دبی چاه تولیدی بدون اعمال موج فراصوت  
Figure 5 Reservoir pressure distribution and flow rate of the production well without applying ultrasonic waves

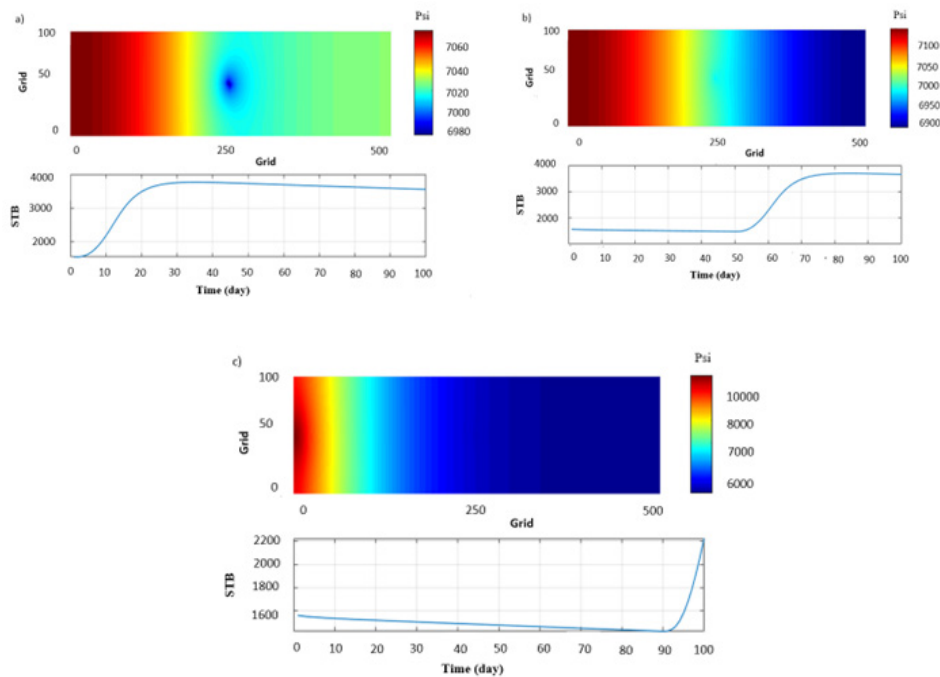


فشار شده و به‌مرور از دبی تولیدی کاسته می‌شود. برای انجام عملیات ازدیاد برداشت به روش اعمال موج فراصوت در زمان مناسب، به بررسی اثر زمان شروع فرایند اعمال موج با هدف جلوگیری از افت فشار بیشتر در مخزن پرداخته می‌شود. در این بخش به بررسی سه زمان روز اول، پنجاهم و نودم از شروع شبیه‌سازی موج فراصوت پرداخته شده است. به عبارت دیگر چاه از روز اول تا انتهای شبیه‌سازی تولید کرده و موج در سه مقطع زمانی مختلف شروع به تابش می‌کند. در این سه حالت، مدت زمان اعمال موج یکسان و ۱۰ روز پیوسته است.

بالا بودن دقت شبیه‌سازی، این لایه در مدل قرار داده شده است تا اگر موج فشاری به مرزهای مخزن رسید، عبور یا بازتابی صورت نگیرد.

### ۲-۳ تغییرات فشار مخزن و دبی چاه تولیدی

پس از بررسی اثر اعمال موج فراصوت و میزان افزایش فشار در مخزن در حالتی که چاه، تولیدی ندارد. اکنون به بررسی تغییرات فشار مخزن در حالتی که چاه با فشار ثابت ۵۰۰۰ پام تولید می‌کند، پرداخته می‌شود. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، هرچقدر توان ورودی منبع موج بیشتر باشد، فشار موج ایجاد شده بیشتر خواهد بود، اما با در نظر گرفتن محدودیت ابزار تولید موج و زمان تابش در مقیاس عملیاتی،



شکل ۶ تغییرات فشار مخزن و دبی چاه برای سه حالت زمانی شروع موج: الف) روز یکم، ب) روز پنجاهم و ج) روز نودم  
Figure 6 Changes in reservoir pressure and well flow rate for three time states of wave onset: a) the first day b) the 50th day c) the 90th day

با توجه به شکل ۶ که تغییرات فشار مخزن و دبی لحظه‌ای چاه را در سه حالت مختلف از زمان شروع اعمال موج نشان می‌دهد، کم‌ترین میزان افت فشار در انتهای ۱۰۰ روز پس از اعمال موج در حالت روز یکم بوده است (شکل ۶ الف). در این حالت کم‌ترین فشار مخزن در محدوده ۶۹۸۰ پام پس از اعمال موج خواهد بود. در صورتی که در دو حالت پنجاهم و نودم، به ترتیب این مقدار به ۶۹۰۰ و ۶۰۰۰ پام می‌رسد (شکل ۶ ب-ج)). در حالتی که چاه در ابتدا شروع به تولید می‌کند، به دلیل بالا بودن فشار مخزن، توانایی مخزن برای تولید بیشتر است که به‌مرور پس از گذشت زمان و تولید از چاه، افت فشار صورت گرفته و مخزن توانایی خود را برای تولید از دست می‌دهد. طبق نتایج شکل ۶، اگر در زمان‌های اولیه تولید، عملیات اعمال موج صورت بگیرد، افت فشار کم‌تری با گذشت زمان

بهینه توان ورودی در محدوده‌های ۵-۸ کیلووات و زمان اعمال موج در روز بین ۲ تا ۸ ساعت خواهد بود. در این بخش به بررسی تغییرات فشار مخزن با چاه تولیدی در حالت‌های مختلف: زمان شروع تابش، نحوه تابش و فاصله منبع تا موج با توان مورد نظر ۵ کیلووات و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز پرداخته می‌شود. به‌منظور بررسی افزایش باز یافت نفت، در ابتدا حالتی را در نظر می‌گیریم که چاه بدون اعمال موج با فشار ثابت

۵۰۰۰ پام و در مدت ۱۰۰ روز تولید می‌کند. در این حالت فشار چاه به ۵۹۰۰ پام و دبی جمععی در انتهای ۱۰۰ روز  $10^5 \times 1/4$  بشکه استاندارد (STB) به‌دست می‌آید (شکل ۵).

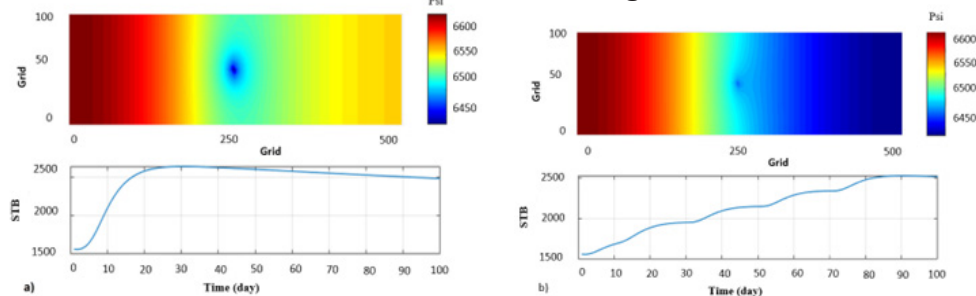
### ۳-۲-۱ زمان شروع اعمال موج

با تولید از چاه در گذر زمان، مخزن دچار افت

زمان شروع موج بر تولید تجمعی را نشان می‌دهد. اما موردی که باید به آن توجه کرد، تثبیت فشار با اعمال موج و همان‌طور محدودیت توان ورودی و مدت زمان اعمال موج از منبع به مخزن است. ابزارهای تولید موج با اتلاف انرژی زیادی همراه هستند، زیرا ابزار انتقال توان در سطح چاه و منبع تولید درون چاه قرار دارد. در نتیجه به دلیل اتلاف انرژی از سطح چاه تا انتهای چاه برای انتقال توان، تولید موج نهایی با تمام توان نخواهد بود و همین امر سبب کاهش مدت زمان تابش موج خواهد شد. در این بخش با در نظر گرفتن دو حالت پیوسته و پالسی، به بررسی تأثیر موج در این دو حالت پرداخته می‌شود. طبق شکل ۷، که تغییرات فشار و دبی لحظه‌ای چاه را برای دو حالت پیوسته و پالسی اعمال موج نشان می‌دهد، میزان دبی تجمعی در انتهای ۱۰۰ روز برای حالت پیوسته (شکل ۷ الف)،  $2/4 \times 10^5$  و برای حالت پالسی (شکل ۷ ب)،  $2/1 \times 10^5$  بشکه استاندارد است که در حالت پیوسته به میزان  $3 \times 10^4$  بشکه استاندارد بیشتر از حالت پالسی نفت تولید شده است. در حالت پیوسته طبق شکل ۷ الف)، موج اعمالی در ۵ روز متوالی از روز اول تا روز پنجم اعمال شده در حالی که در حالت پالسی (شکل ۷ ب) موج اعمالی در روزهای اول، دهم، بیستم، سیام، و چهارم به مدت یک روز که مجموعاً ۵ روز می‌شود، اعمال شده است. با توجه به اینکه میزان دبی تجمعی

در مخزن صورت خواهد گرفت و در پی آن بازیافت نفت و تولید بیشتری انجام خواهد شد. در حالتی که شروع اعمال موج از روز یکم و همزمان با تولید از چاه باشد، دبی تجمعی در انتهای ۱۰۰ روز  $3/4 \times 10^5$  بشکه استاندارد است، در حالی که در دو حالت پنجاهم و نودم به ترتیب این مقدار  $2/3 \times 10^5$  و  $1/5 \times 10^5$  بشکه استاندارد است. بنابراین حالت اول به ترتیب  $1/1 \times 10^5$  و  $1/9 \times 10^5$  بشکه استاندارد نسبت به دو حالت پنجاهم و نودم بیشتر تولید خواهد کرد.

نکته دیگری که حائز اهمیت است، این است که عموماً عملیات ازدیاد برداشت زمانی به کار گرفته می‌شوند که مخزن به دوره کاهش رسیده و اساساً در این حالت هم کاهش دبی و هم افت فشار قابل توجهی در مخزن شکل گرفته است. بر همین اساس با استفاده از عملیات ازدیاد برداشت، از افت فشار بیشتر در مخزن جلوگیری می‌شود. طبق نتایج شکل ۶ (ج)، در حالت سوم یعنی اعمال امواج فراصوت در روز نودم، همان‌طور که مشخص است فشار افزایش یافته در منبع موج حدود ۱۰۰۰۰ پام بوده و حجم دبی لحظه‌ای تولید شده از چاه در این روز ۲۲۰۰ بشکه استاندارد بر روز است که در مقایسه با حالت عدم اعمال موج در مخزن که ۱۳۰۰ بشکه استاندارد بوده است، نزدیک به ۴۰ درصد افزایش دبی لحظه‌ای خواهیم داشت. با توجه به معادله ۱، بازیافت نفت بدون اعمال موج ۶/۱ درصد



شکل ۷ تغییرات فشار مخزن و دبی چاه برای نحوه اعمال موج به مدت ۵ روز در دو حالت: الف) پیوسته و ب) پالسی  
Figure 7 Changes in reservoir pressure and well flow rate for wave apply states with 5 days in two modes: a) continuous and b) pulsed

در حالت پیوسته بیشتر از حالت پالسی است، ولی دو عامل سبب می‌شود که در شرایط عملیاتی از حالت پالسی استفاده شود: ۱) افزایش تدریجی دبی لحظه‌ای و پایداری افزایش فشار مخزن و کاهش آسیب‌دیدگی ابزار سرچاهی به دلیل نبود افزایش ناگهانی دبی، ۲) افزایش طول عمر ابزارهای تولید موج صوتی به دلیل عمل نکردن پی‌درپی ابزار جهت تولید موج و کاهش اتلاف انرژی.

طبق نتایج شبیه‌سازی، میزان افزایش بازیافت نفت طبق معادله ۲، ۴ درصد برای حالت پیوسته و ۲/۷ درصد برای حالت پالسی به دست آمده است که نشان‌دهنده افزایش ۱/۳ درصدی بازیافت برای حالت

است. در این صورت طبق معادله ۲، افزایش بازیافت نفت در سه حالت زمان شروع اعمال موج در روز اول، پنجاهم و نودم به ترتیب ۸ درصد، ۳/۵ درصد و ۰/۱ درصد شده است. که نشان‌دهنده اختلاف زیاد افزایش بازیافت در حالت شروع از روز اول نسبت به دو حالت دیگر است. به عبارت دیگر در صورتی که در روز اول همراه با شروع تولید از مخزن، موج فراصوت اعمال شود بیشترین میزان بازیافت نفت را خواهیم داشت که با توجه به نتایج شکل ۶، میزان بازیافت نفت در این حالت در انتهای ۱۰۰ روز برابر ۱۴/۱ درصد خواهد بود.

### ۲-۲-۳ نحوه اعمال موج

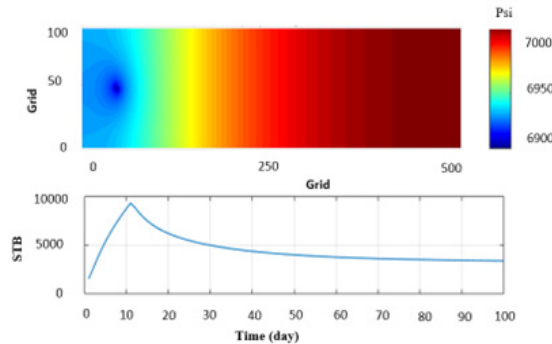
در بخش قبل و شکل ۶، نتایج به دست آمده اثر

همچنین طبق شکل ۹ که فاصله منبع تولید موج تا چاه تولیدی ۱۸۰۰ فوت است، میزان دبی جمعیتی در انتهای ۱۰۰ روز و با همان شرایط گفته شده برای شکل ۷،  $2/8 \times 10^5$  بشکه استاندارد بوده و بازیافت نفت در این حالت طبق معادله ۱،  $11/7$  درصد است. که در این صورت  $5/7$  درصد بیشتر از حالتی است که موجی در مخزن اعمال نشود. به طور کلی در حالتی که چاه به منبع نزدیک تر باشد، افزایش بازیافت قابل قبولی را ایجاد خواهد کرد که در این دو حالت شبیه سازی شده، درحالتی که فاصله منبع موج تا چاه ۲۰۰ فوت باشد

پیوسته به حالت پالسی است. ولی با توجه به طول عمر محدود ابزارهای تولید موج در مقیاس بزرگ تر و عملیاتی، به کاربردن روش پالسی به صرفه و مناسب تر خواهد بود.

### ۳-۲-۳ فاصله منبع موج تا چاه

از آنجا که برای به کاربردن موج فراصوت و عملیات ازدیاد برداشت با این روش نیاز به چاه برای قرارگیری ابزار تولید موج است، معمولاً از چاه های تزریقی که از قبل ایجاد شده است؛ استفاده می شود. یکی از پارامترهای موثر در تأثیرگذاری موج در مخزن، فاصله



شکل ۸ تغییرات فشار مخزن و دبی چاه در حالتی که چاه از منبع تولید موج ۲۰۰ فوت فاصله دارد  
Figure 8 Changes in reservoir pressure and well flow rate in the case that the well is 200 feet away from the source of wave generation

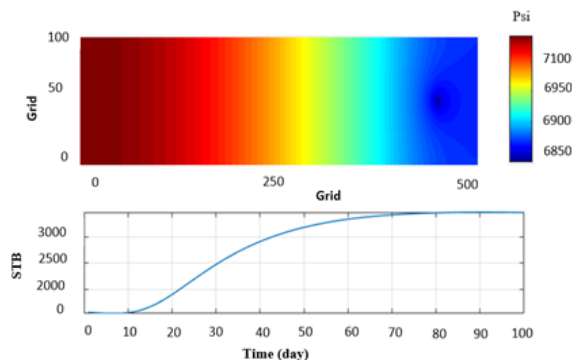
حدود ۷ درصد افزایش بازیافت نسبت به حالتی که این فاصله ۱۸۰۰ فوت باشد، خواهد داشت.

طبق نتایج به دست آمده در این بخش، هرچقدر فاصله منبع موج با چاه تولیدی بیشتر باشد به دلیل افزایش تأخیر زمان رسیدن موج فشاری به چاه، میزان دبی تولیدی کاهش می یابد.

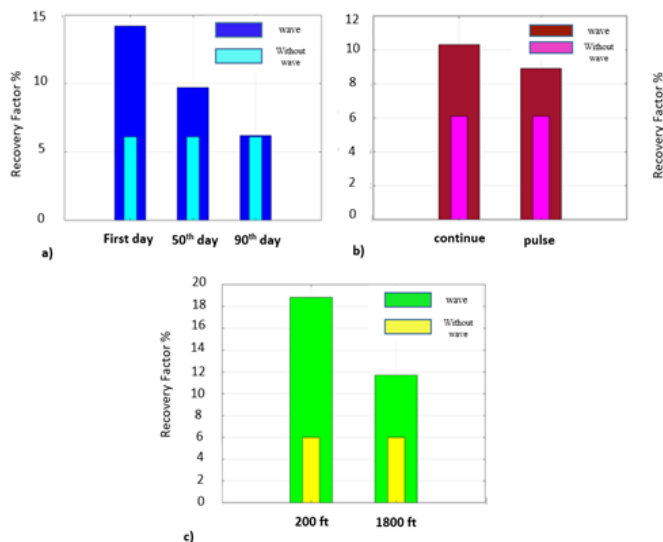
### ۳-۳ بهینه حالت های مختلف در بازیافت نفت

با توجه به هدف این تحقیق که بررسی میزان افزایش بازیافت نفت با استفاده از اعمال موج فراصوت در مخزن است، با استفاده از شبیه سازی مدل مخزنی و اعمال موج فراصوت در این مخزن، سه پارامتر موثر در میزان اثر موج در ازدیاد برداشت که شامل زمان

قرارگیری منبع تولید موج تا چاه تولیدی است. زیرا هرچه چاه به محدوده گسترش موج فشاری حاصل از موج فراصوت نزدیک تر باشد، افت فشار اطراف چاه کمتر شده و در پی آن با افزایش تولید همراه خواهد بود. طبق نتایج به دست آمده از شبیه سازی در شکل ۸، زمانی که چاه تولیدی از منبع تولید موج ۲۰۰ فوت فاصله داشته باشد، میزان دبی جمعیتی در انتهای ۱۰۰ روز تحت زمان ۱۰ روزه تولید موج به صورت پیوسته،  $4/5 \times 10^5$  بشکه خواهد شد که در این حالت طبق معادله ۱ میزان بازیافت نفت ۱۸ درصد خواهد شد. که در این صورت  $12/7$  درصد از حالتی که موجی اعمال نشود بیشتر خواهد بود.



شکل ۹ تغییرات فشار مخزن و دبی چاه در حالتی که چاه از منبع تولید موج ۱۸۰۰ فوت فاصله دارد  
Figure 9 Changes in reservoir pressure and well flow rate in the case that the well is 1800 feet away from the source of wave generation



شکل ۱۰ نمودار میله ای بازیافت نفت برای حالت‌های: الف) زمان شروع اعمال موج، ب) نحوه اعمال موج و ج) فاصله منبع موج تا چاه  
Figure 10 Oil recovery bar chart for states: a) start time of wave apply b) wave apply state c) distance between well and wave source

در مخزن به گونه‌ای است که نفت قابلیت تولید اولیه خود را نداشته است و برای افزایش یا تثبیت فشار مخزن از این عملیات‌ها استفاده می‌شود. معمولاً با صرف هزینه زیادی صورت می‌پذیرند. عملیات تابش امواج فراصوت به مخزن برای بازیافت نفت روش جدیدی است که در دهه اخیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر همین اساس، ارزیابی این روش و بررسی پارامترهای موثر بر افزایش کارایی این عملیات مستعد تحقیقات بسیاری است. در این تحقیق با بررسی پارامترهای موثر شامل زمان شروع اعمال موج، نحوه اعمال موج و فاصله منبع تا چاه تولیدی، بازیافت نفت در مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج به‌دست آمده می‌توان موارد زیر را برشمرد:

- زمان شروع اعمال موج بشدت روی دبی لحظه‌ای در نهایت بازیافت نفت تأثیرگذار بوده و طبق نتایج به‌دست‌آمده، هرچه قدر زمان اعمال موج به زمان‌های اولیه تولید نفت از مخزن نزدیک‌تر باشد، بازیافت نفت افزایش می‌یابد.
- با توجه به اینکه تجهیزات اعمال موج دارای محدودیت زمانی تابش موج بوده و قادر به تابش موج در مدت زمان‌های طولانی نیستند، طبق نتایج، اعمال پالسی با پالس حداقل یک روز می‌تواند بهترین نتیجه را اعمال کند.
- در مخزن مقیاس بزرگ فاصله مکانی چاه از منبع تولید موج، می‌تواند مسئله‌ای اساسی باشد که طبق نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، هرچه قدر فاصله منبع تا چاه بیشتر باشد، به دلیل افزایش زمان تأخیر یا به عبارت دیگر افزایش زمان رسیدن موج فشاری حاصل از امواج به چاه، میزان افزایش بازیافت نفت کمتر خواهد بود.
- برای استفاده از موج فراصوت می‌توان از چاه

شروع اعمال موج، نحوه اعمال موج و فاصله منبع موج تا چاه تولیدی است، مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و با استفاده از معادله ۱۰ برای تعیین ضریب و افزایش بازیافت نفت، همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، سه نمودار میله‌ای که میزان بازیافت نفت را در دو حالت بدون اعمال موج و با اعمال موج در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد، بیشترین بازیافت در سه حالت مورد بررسی اعمال موج نسبت به عدم اعمال موج با توجه به شکل ۱۰ (الف)، ۱۴/۲ درصد که مربوط به زمان شروع موج در روز اول و هم‌زمان با تولید از چاه است. همچنین در شکل ۱۰ (ب)، میزان بازیافت ۱۰/۳ درصد که مربوط به پیوسته بودن نحوه اعمال موج و در شکل ۱۰ (ج)، میزان بازیافت ۱۸/۸ درصد که مربوط به فاصله ۲۰۰ فوت چاه تا منبع تولید موج است.

طبق نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، می‌توان این نتیجه را گرفت که اگر امواج فراصوت از روز اول و به‌صورت پیوسته و هم‌زمان با تولید از چاه اعمال شود و فاصله چاه تا منبع تولید موج به گونه‌ای باشد که نزدیک محدوده شعاع گسترش موج فراصوت قرار بگیرد، بیشترین بازیافت نفت را خواهیم داشت. البته این مورد حائز اهمیت است که اگرچه شعاع گسترش موج با توجه به محدودیت ابزارهای تولید موج تا شعاع زیادی قابل نفوذ نخواهد بود، ولی به دلیل افزایش فشار قابل توجه ایجاد شده در مخزن طبق نتایج این تحقیق، تأثیر زیادی در افزایش بازیافت نفت خواهد داشت.

#### ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهاد

عملیات‌های مختلف ازدیاد برداشت برای افزایش بازیافت نفت در مخازن، معمولاً زمانی که افت فشار

متروکه و تزریقی که از قبل در مخازن ایجاد شده‌اند، استفاده کرد و از این جهت امتیاز مناسبی در راستای کاهش هزینه برای زدن چاه جدید است.

در این تحقیق موج فشاری حاصل از اعمال موج فراصوت در مخزن مورد بررسی قرار گرفته است، در ادامه می‌توان موج دمای حاصل از موج فراصوت و انرژی ایجاد شده در مخزن را مورد بررسی قرار داد. معمولاً پارامترهای موثر منبع موج مانند فرکانس و توان ورودی تأثیر بسزایی در نتایج شبیه‌سازی خواهند داشت و از این حیث در ادامه تحقیقات باید مدنظر قرار بگیرد.

#### ۵. تقدیر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت مالی و معنوی بنیاد ملی نخبگان از هسته ۵۲۱۵۴۱ طرح شهید احمدی روشن در راستای انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

## مراجع

- [1] Rehman, M. M., & Meribout, M., Conventional Versus Electrically Enhanced Oil Recovery: A Review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2(4), 157-167, 2012.
- [2] Mullakaev MS., Abramov VO., Abramov AV., Development of Ultrasonic Equipment and Technology for Well Stimulation and Enhanced Oil Recovery, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 125:201-208, 2015.
- [3] Mohsin, M., & Meribout, M., An Extended Model for Ultrasonic-Based Enhanced Oil Recovery With Experimental Validation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 23, 413-423, 2015.
- [4] Pérez-Arancibia, C., Godoy, E., & Durán, M., Modeling and Simulation of An Acoustic Well Stimulation Method. *Wave Motion*, 77, 214-228, 2018.
- [5] Usman, H., Joseph, A. A., & Alhaji, D. I. S., Evaluating the Performance of Ultrasound Energy on Improved Oil Recovery Using MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST). *Journal of Petroleum and Gas Engineering*, 10(4), 85-100, 2019.
- [6] Yu, H., Tan, C., & Dong, F., Measurement of Oil Fraction in Oil-Water Dispersed Flow with Swept-Frequency Ultrasound Attenuation Method., *International Journal of Multiphase Flow*, 133, 103444, 2020.
- [7] Pierce, A. D., *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Springer, 2019.
- [8] Sahni, A., Kumar, M., & Knapp, R. B., Electromagnetic Heating Methods for Heavy Oil Reservoirs. In *SPE western regional meeting*, SPE-62550, 2000.
- [9] Inoue, T., Nonissue, T., Sugita, K., Nakanishi, H., Tran-Cong-Miyata, Q., Size Distribution and Elastic Properties of Thermo-Responsive Polymer Gel Microparticles in Suspension Probed by Ultrasonic Spectroscopy. *Ultrasonic* 82, 31-38, 2018.
- [11] Aghaei1, S. M., Hakakzadeh, S., Namdar, H., Jafari, A., Investigation of the Effect of Porosity and Permeability Parameters on Enhanced Oil Recovery from Hydrocarbon Reservoirs by Using Ultrasound Waves. The 17th Iranian national congress of chemical engineering, Mashahd, Iran, 2021. <https://civilica.com/doc/1378437/>
- [10] Cui, J., Zhang, Z., Liu, X., Liu, L., & Peng, J., Studies on Viscosity Reduction and Structural Change of Crude Oil Treated with Acoustic Cavitation. *Fuel*, 263, 116638, 2020.
- [12] XU, H. X., & PU, C. S., Experimental Study of Heavy Oil Underground Aquathermolysis Using Catalyst and Ultrasonic. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 39(8), 606-610, 2011.
- [13] Palaz, I., & Marfurt, K. J., *Carbonate Seismology*. Society of Exploration Geophysicists, 1997.
- [14] Brown, D. G., & Insana, M. F., Acoustic Scattering Theories Applied to Biological Tissues. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(4), 2406-2406, 1992.
- [15] Pierce, A. D., *Mathematical Theory of Wave Propagation*, Handbook of Acoustics. John Wiley & Sons, 21-37, 2007.