نشریه‌ی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره ششم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۱ تا ۹

مدلسازی یکپارچه IPM جهت بررسی روش‌های کنترل ذرات سازندی در مخازن نفتی

محمدمهدی کربلا[۱]؛ حمیدرضا نجاتی[۲*]، سید امین موسوی[۳]، حمید سلطانیان[۴]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ؛ بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار؛ بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- استادیار؛ بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان
۴- استادیار؛ بخش تکنولوژی حفاری و تکمیل چاه، پژوهشگاه صنعت نفت

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۰؛ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰

چکیده

یکی از چالش‌های تولید نفت از مخازن و لایه‌های ماسه‌سنگی، تولید ذرات سازندی یا ماسه است. تولید ماسه به معنی حرکت ذرات سازند به سمت چاه می‌باشد. این پدیده زمانی به وقوع می‌پیوندد که دیواره چاه یا کانال‌های مشبک-کاری شده، استحکام کافی در مقابل افت فشار و برهم خوردن تنش‌های برجا را نداشته باشند. مهم‌ترین اثرات تولید ماسه، کاهش تولید نفت و استهلاک تجهیزات است که برای جلوگیری از تولید این ذرات از ابزارهای درون چاهی استفاده می‌شود. همواره مسئله مورد بررسی این است که با تولید ماسه، بهترین نرخ تولید نفت در کدام مدل کنترل-کننده بدست می‌آید. بررسی انواع کنترل‌کننده‌ها همواره مورد نیاز صنعت چاه می باشد. هر یک از کنترل‌کننده‌ها می‌توانند نقش‌های متفاوتی را ایفا کنند، که با توجه به پارامترهای تاثیرگذار، باید بهینه‌ترین مدل کنترل‌کننده را مورد استفاده قرارداد. این مقاله با استفاده از مدل یکپارچه ipm، اثر روش‌های مختلف کنترل تولید ماسه، در بلند-مدت بر روی میزان تولید و درآمد یک میدان نفتی واقع در جنوب ایران را بررسی کرده است. با استفاده از این مدل به بررسی انواع کنترل‌کننده‌ها پرداخته ایم. با کم کردن هزینه‌های تولید آب از مجموع درآمدهای نفت و گاز، بیشترین درآمد طی ۴۰ سال در مدل توری از پیش پک شده بدست آمده است.

واژگان کلیدی **پیشگیری از تولید ذرات سازندی، توزیع اندازه ذرات، مدل یکپارچه، تولید تجمعی نفت و گاز**

۱- مقدمه

همراه با تولید هیدروکربن از مخزن، برخی اوقات ذرات جامد همراه با سیال مخزن به درون چاه وارد می‌شود. این محصول جانبی همراه استخراج هیدروکربن، تولید ذرات سازندی نامیده می‌شود [۱]. تولید ذرات سازندی یا اصطلاحاً تولید ماسه[1] بخش جدایی‌ناپذیر از فرآیند استخراج هیدروکربن خصوصاً از میادین نفت و گازی با مقاومت سازند نسبتاً پایین است (کمتر از psi ۱۰۰۰) [۲]. البته هر چند که میزان تحکیم سنگ مخزن در فرآیند تولید ماسه نقش اساسی دارد، اما این پدیده حتی ممکن است که در سازندهای با مقاومت بالا و درجه سیمان‌شدگی مناسب ذرات نیز رخ دهد [۳]. از منظر پدیدارشناختی، تولید ماسه در چاه‌های نفت و گاز در اثر افزایش جریان سیال از یک مقدار آستانه‌ای، متاثر از عوامل مختلفی مانند مقاومت مکانیکی سنگ مخزن، حالت تنش و نحوه تکمیل چاه می‌باشد. مقدار ذرات تولیدی می‌تواند در حد چند گرم در هر متر مکعب سیال مخزن تا مقادیر قابل توجهی در مدت زمان کوتاه متغیر باشد [۱].

پیامدهای منفی تولید ذرات سازندی می‌تواند سبب کاهش تولید هیدروکربن از چاه و حتی توقف آن شود. تولید ماسه منجر به

[1] Sand Production

*نویسنده مسئول: دانشیار دانشگاه تربیت مدرس
پست الکترونیک: **h.nejati@modares.ac.ir**

افزایش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. یکی از مهم‌ترین مسائل مرتبط با تولید ماسه، پدیده خوردگی تجهیزات فلزی به‌کار رفته در سیستم تکمیل چاه، لوله‌ها، پمپ‌ها، شیرآلات، دریچه‌ها و ... در هر دو قسمت درون‌چاهی و تجیهزات سطحی است که در درازمدت سبب آسیب شدید به تجهیزات شده و خطر نشت هیدروکربن را به دلیل از بین رفتن یکپارچگی چاه در پی خواهد داشت و تمیز کردن خط تولید از ماسه‌های تولید شده نیاز به کار مضاعف دارد [۴]. علاوه بر این، ذرات ماسه تولید شده آغشته به نفت بر اساس قوانین زیست‌محیطی به عنوان زباله‌های خطرناک شناخته می‌شود و دفن اصولی آن پرهزینه است [۵]. هم‌چنین تولید ماسه، سبب مشکلات ژئومکانیکی مانند آسیب سازندی و ناپایداری کیسینگ چاه می‌شود. در اثر تولید ماسه به واسطه تجمع و آرایش ذرات جامد در مسیرهای جریان سیال، ترآوایی سنگ کاهش می‌یابد [۶].

مشکلات تولید ذرات سازندی از دهه‌های ۵۰ و ۶۰ میلادی بعد از پشت سر گذاشتن نیمه اول عمر بسیاری از مخازن، بیشتر از قبل مورد توجه سرمایه‌گذاران و مهندس‌های نفت و گاز قرار گرفت. تحقیقات نشان داده است که در حدود ۵۰ درصد از چاه‌های موجود نیاز به کنترل و مدیریت تولید ماسه در طول عمر خود را دارند [۴]. مدیریت و کنترل تولید ذرات سازندی، روش‌ها و مدل‌های پیش‌بینی تولید ماسه از دهه ۷۰ میلادی توسط افراد مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۷-۱۳].

ترونول و همکاران مدیریت یک مخزن تولیدکننده ماسه را با توجه به افت فشار حاصله از کنترل‌کننده‌ها و تحلیل ریسک با در نظر گرفتن ایمنی و بهینه‌سازی تولید بررسی نمودند [۱۴]. نورمن با بررسی تعدادی از میادین نفت و گاز استفاده از فناوری نوین تکمیل چاه با استفاده از روش شکاف و پک کردن[۲] را با دیگر کنترل‌کننده-های ذرات سازندی مقایسه نموده است و با توجه به افت فشار بسیارکم این روش، آن را بهترین گزینه برای استفاده در میادین نفت و گاز پیشنهاد کرده است [۱۵]. سمساری و همکاران یک مدل عددی یکپارچه را برای تخمین رخداد تولید ماسه و ارزیابی عملکرد سیستم کنترل ماسه توسعه داده‌اند [۱۶]. نانا و همکاران در یکی از میادین نیجریه مطالعه‌ای بر میزان بهره‌وری چاه‌ها با توجه به انواع مختلف کنترل‌کننده‌های ذرات سازندی داشته‌اند و در هر روش بیشینه تولید و میزان بازگشت سرمایه را بررسی نمودند [۱۷]. بن محمود و همکاران [۱۸] انتخاب فناوری مناسب برای کنترل تولید ماسه در مخازن هیدروکربوی را متاثر از پارامترهای مختلف مخزن معرفی کرده‌اند. در نتیجه آن‌ها، انتخاب بهترین گزینه کنترلی را به صورت سیستماتیک مورد مطالعه قرار داده‌اند. در نتیجه مطالعه انجام شده توسط بن محمود و همکاران، انتخاب بهترین فناوری برای کنترل تولید ماسه متاثر از اطلاعات جامع از شرایط مخزن و چاه، و عمر تولید چاه شناخته شده است. لذا اهمیت هزینه‌کرد در بخش مطالعات پایه و مهندسی در این زمینه بسیار قابل توجه ذکر شده است.

مدیریت تولید ماسه یک رویکرد یکپارچه و پیچیده است که شامل تکنولوژی‌های زیاد بوده و عمده تحقیقات در این زمین در حوزه مهندسی مخزن، تکنولوژی‌های تکمیل چاه و فرازآوری مصنوعی[۳] است [۱۹]. مطالعات انجام شده پیشین نشان می‌دهند که در بررسی کنترل‌کننده‌های ذرات سازندی، معمولاً پارامترهای فنی و مهندسی مورد مطالعه قرار می‌گیرند و معیارهای اقتصادی و میزان تولید نفت در بلند مدت کمتر بررسی می‌شوند. ناگفته نماند که مطالعات مهندسی نیز گاهاً با نقصان‌هایی همراه بوده و این موضوع سبب عدم قطعیت‌هایی می‌شود که در نتیجه آن انتخاب روش و گزینه مناسب مدیریت و کنترل ماسه تحت شعاع قرار می‌گیرد. در این مطالعه اثر روش‌های مختلف کنترل ذرات سازندی بر میزان تولید نفت و گاز و درآمد یک میدان نفتی کربناته واقع در جنوب ایران در بلند مدت در قالب یک مدل یکپارچه مطالعه می‌شود. مدل تولید یکپارچه برای شبیه‌سازی کامل سیستم فرآیند تولید نفت یا گاز شامل مخزن، چاه‌ها و شبکه سطحی تاسیسات است.

۲- روش‌های پیشگیری از تولید ذرات سازندی

تاکنون روش‌های بسیاری جهت کنترل ماسه در مخازن نفت و گاز ارائه شده است. شرکت‌های بهره‌برداری بر اساس تجارب میدانی و بررسی مزایا و معایب، روش مناسب را جهت کنترل ماسه انتخاب می‌کنند. انتخاب روش کنترل ماسه به شرایط چاه، مخزن، شیوه‌ی عملیات، امکانات موجود و ملاحظات اقتصادی نیز بستگی دارد [۱۴]. روش‌های کنترل تولید ماسه را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم نمود که شامل روش‌های تعمیر و نگهداری، روش‌های شیمیایی و روش‌های مکانیکی است [۲۰]. امروزه استفاده از روش‌های مکانیکی، برای کنترل تولید ذرات سازندی بسیار مرسوم است که در ادامه به آن پرداخته شده است. تاثیر نیروی هیدرودینامیک جریان سیال وارده بر ذرات سازندی در پدیده تولید ماسه به عنوان یک عامل مهم شناخته شده است. کاهش این نیرو یک روش ساده برای کنترل تولید ماسه در چاه می‌باشد. برای این منظور افزایش سطح مقطع مؤثر سبب کاهش سرعت سیال و در نتیجه کاهش اثر نیروی هیدرودینامیک وارد بر ذرات سازندی می‌گردد [۲۱].

[2] Frac-Pack

[3] Artificial Lift

۱-۲- کنترل مکانیکی

در روش‌های کنترل مکانیکی، برای جلوگیری از تولید ماسه، از لوله‌های مشبک، توری‌های قابل انبساط یا گراول‌پک در محل عبور چاه از سازند تولید هیدروکربن استفاده می‌شود. در نتیجه فقط سیال است که می‌تواند از منافذ عبور کرده و ذرات سازندی نمی‌توانند عبور کنند. روش‌های مکانیکی به طور کلی به دو روش منجر به کنترل ماسه می‌شوند؛ یک روش با استفاده از یک پوشش یا مش بدون فیلتر و روش دیگر استفاده از آسترهای مشبک است [۲۲].

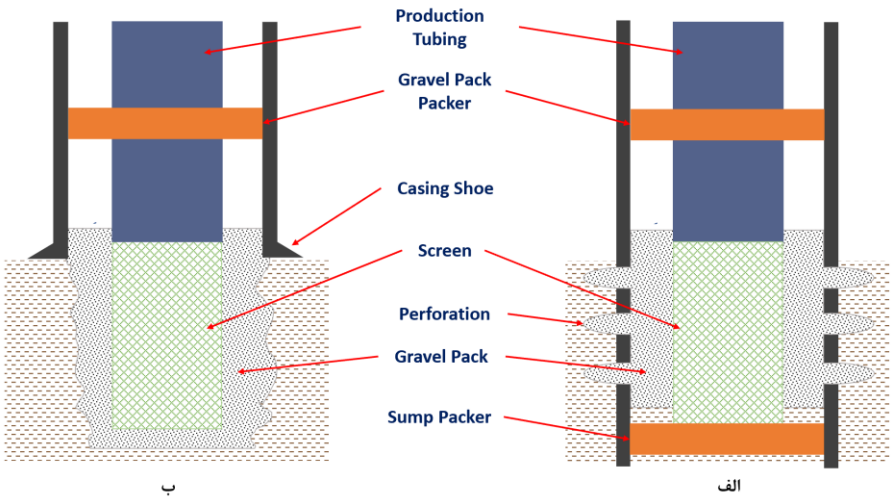
مسئله مهم در این روش‌ها این است که کنترل ماسه باعث کاهش تولید نشود. بنابراین در این زمینه تلاش‌های مستمری انجام شده که از جمله آن می‌توان به استفاده از لاینر شیاردار [۴]، گراول پک[۵]، توری از پیش پک شده[۶] و توری بافته شده[۷] اشاره نمود. همچنین در سال‌های اخیر، تکنولوژی توری‌های قابل انبساط به بازار ارائه شده است که نتایج درخشانی به همراه داشته است [۳, ۲۳]. مزیت اصلی استفاده از توری‌های منبسط شونده، چسبیدن کامل به جداره چاه و حذف ناحیه بین جداری[۸] است که در نتیجه آن حرکت ذرات را محدود می‌نماید [۲۴].

چهار روش عمومی کنترل مکانیکی ذرات سازندی که در این مقاله بررسی شده‌اند به صورت مختصر در ادامه تشریح می‌گردند.

۱-۱-۲- گراول پک

یکی از پرکاربردترین روش‌های کنترل ذرات تولیدی از سازند، گراول پک می‌باشد. گراول پک، نوعی فیلتر دانه‌ای (شنی) است که در فضای بین توری مرکزی و کیسینگ سوراخ‌کاری شده یا جداره بدون کیسینگ چاه قرار داده می‌شود. این روش برای جلوگیری از تولید ماسه طراحی شده است. جریان سیال از درون این فیلتر شنی باید به اندازه‌ی کافی کم بوده تا از تولید ماسه جلوگیری نماید و به اندازه‌ی کافی زیاد باشد که تولید چاه را کم نکند. این روش، یک روش نسبتاً گران‌قیمت کنترل ماسه بوده اما مؤثرترین روش توقف حرکت ماسه در عین تولید است. پیچیدگی عملیات تکمیل و کاهش قطر داخلی چاه مهمترین ایراد روش گراول پک، به‌حساب می‌آید. برای دستیابی به یک سیستم گراول پک مؤثر، اندازه ذارت شن، ضخامت فیلتر شنی و موقعیت قرارگیری مناسب لاینر به نحو مطلوب طراحی شود. انتخاب اندازه مناسب برای ذرات شن، توسط آنالیز سرندی ماسه (ذرات سازندی) معرف سازند بدست می‌آید [۱۶].

به طور کلی گراول پک به دو شکل در چاه‌ها تعبیه می‌گردد. در روش اول، گراول در لوله جداری و در داخل حفره‌های مشبک-کاری‌شده قرار می‌گیرند (گراول پک داخلی). در روش دوم فضای بین دیواره چاه و توری، توسط چال‌کن گسترش می‌یابد. ابزار چال‌کن طوری طراحی شده است که قطر بیشتری نسبت به قبل ایجاد کند [۱۶].

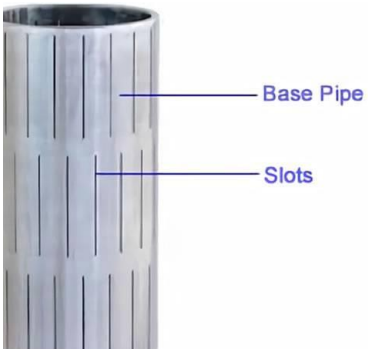


شکل ۱- الف) گراول‌پک نوع داخلی، ب) گراول‌پک نوع خارجی

[4] Slotted liner
[5] Gravel pack
[6] Pre-packed screen
[7] Woven screens
[8] Annulus

۲-۱-۲- لاینر شیاردار

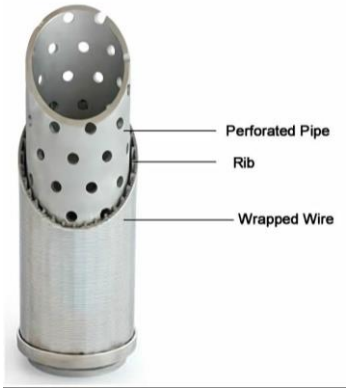
در این نوع کنترل‌کننده، لوله را پیش از وارد کردن در چاه شیار می‌دهند. طول، عرض و تعداد شیارهای روی لوله متغیرهای این نوع کنترل‌کننده هستند که اگر به شکل مناسبی طراحی شوند، نسبت به دیگر کنترل‌کننده‌ها کاربردی تر هستند (شکل ۲) [۲۵].



شکل ۲- لاینر شیاردار

۳-۱-۲- توری بافته شده

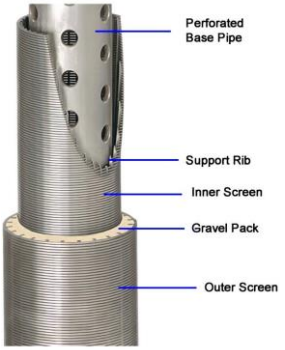
در این کنترل‌کننده، رشته سیم‌هایی به یکدیگر بافته می‌شوند و درنتیجه فضاهای کوچکی بین آنها ایجاد می‌شود که به سیال اجازه عبور می‌دهد ولی ذرات سازندی در پشت آنها تجمع می‌کنند و تولید نمی‌شوند (شکل ۳) [۲۵] این سیستم شامل یک لوله سوراخ‌دار مرکزی، میله‌های طولی و رشته سیم گوه‌ای‌شکل پیچیده شده حول آن که به صورت جوش نقطه‌ای متصل شده، می‌باشد. در برخی از طراحی‌ها، علیرغم نقش آن‌ها در ایجاد یک فاصله یکنواخت از لوله مرکزی، میله‌های طولی حذف می‌شوند. شکل گوه‌ای سیم باعث می‌شود که یا ذرات از روی سیم پل بزنند یا از آن عبور کنند و ماسه تولید شود. این سیستم سطح جریان پایینی دارد.



شکل ۳- توری بافته شده

۴-۱-۲- توری از پیش پک شده

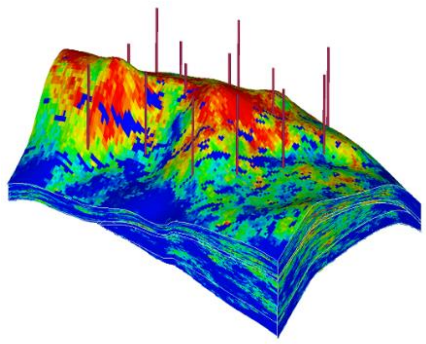
همانند توری‌های بافته شده، از رشته سیم‌هایی تشکیل شده‌اند، با این تفاوت که بین توری‌ها، گراول قرار می‌گیرد و گراول‌ها آغشته به نوعی رزین می‌شوند. این نوع از کنترل‌کننده‌ها قابلیت بهتری در جلوگیری از ورود ذرات سازندی دارند، اما از نظر هزینه مقرون به صرفه نیستند (شکل ۴) [۲۵]. در سیستم تکمیل توسط توری از پیش پک شده، رشته سیم بافته شده جلوی ذرات گراول را می‌گیرد و ذرات ریزتر توسط گراول‌پک تا حدود زیادی محدود می‌شوند.



شکل ۴- توری از پیش پک شده

۳- توصیف مدل مخزن مورد مطالعه

در این مقاله، به بررسی تولید ذرات سازندی یکی از مخازن جنوب غربی ایران پرداخته شده است که در شکل ۶ مخزن و چاه‌های آن مشاهده می‌شود. نفت این میدان از نوع نفت سبک با درجه API ۳۵ می‌باشد. از آن‌جا که سنگ مخزن این میدان از نوع کربناته است، نوع تولید این ذرات به شکل خردشدگی سنگ اطراف چاه است. هر ساله هزینه‌های فراوانی صرف بازیافت این ذرات می‌گردد و به دلیل آغشته بودن این ذرات به مواد نفتی و رها کردن آن‌ها، اثرات مخربی بر محیط زیست می‌گذارد. به غیر از مشکلات زیست‌محیطی نفت، نفت به همراه ذرات تولیدشده سازندی، معمولاً دارای مقداری مواد رادیواکتیو و اسید است. رها کردن این ذرات سازندی بر سطح زمین یا ریختن در دریاها سبب تلف شدن بسیاری از موجودات آن منطقه می‌شود. این میدان دارای ۲۰ چاه تولیدی است که ۱۸ عدد از این چاه‌ها دچار تولید ذرات سازندی به صورت خردشدگی سنگ اطراف دهانه چاه شده‌اند. جدول ۱ و جدول ۲ مشخصات چاه‌ها، مخزن و سیال تولیدی را به ترتیب نشان می‌دهند.



شکل ۵- مدل مخزن در نرم‌افزار شبیه‌ساز

جدول ۱-مشخصات چاه‌ها و مخزن شبیه‌سازی شده.

مشخصات	مقدار
قطر داخلی لوله مغزی	۳/۱*in*
عمق چاه تا بالای محل تولید ماسه	*ft* ۳۰۵۴/۵۴۸
دمای سرچاه	۸۶ *F*
سیال تولیدی	نفت
ضخامت لایه تولیدی	۱۰۰*Ft*- ۴۰۰
شعاع چاه	۰/۶*ft*

جدول ۲- مشخصات سیال و اطلاعات مخزن (اقتباس از شرکت ملی نفت ایران)

مشخصات	مقدار
فشار مخزن	۳۶۸۴/۳۹ *psi*
چگالی نفت	۳۵ *API*
چگالی گاز	۰/۶۸ *Sp. gravity*
ویسکوزیته نفت	۱/۶۹ *cp*
دمای مخزن	۲۴۳ ^{o}F
فشار نقطه حباب	۳۴۵۸/۶۸ *psi*
اثر پوسته‌ای[9]	۱۲-۰
تراوایی متوسط مخزن	۶۲ *mD*
سنگ مخزن	کربناته

۴- مدل یکپارچه

مدل یکپارچه مدلی است که مخزن، چاه و تأسیسات سرچاهی را به شکل پویا و پیوسته به یکدیگر مرتبط می‌کند. با اجماع داده‌ها، مدل-های مخزن، چاه و تأسیسات سطحی و سپس مرتبط کردن به یکدیگر، مدل یکپارچه به وجود می‌آید (شکل ۶). در مدل یکپارچه اثر هر متغیر بر کل مدل را می‌توان به نحوی کنترل نمود که توابع هدف مورد نظر مانند هزینه‌ها، تولید و غیره بهینه شوند [۲۶]. مجموعه ابزارهای نرم‌افزاری مدل تولید یکپارچه (*IPM*)[10] دارای چند نرم‌افزار شامل *PROSPER*، *GAP*، *RESOLVE* و ... می‌باشد که می‌توانند به طور همزمان اجرا شوند و قابلیت طراحی مدل‌های کامل مخزنی را فراهم می‌سازند. نرم‌افزار *PROSPER* برای شبیه-سازی مدل چاه و اعمال مدل‌های افزایش تولید، مانند: *gas lift* و مدل‌های کنترل‌کننده ذرات سازندی به‌کار گرفته می‌شود. در نرم‌افزار *GAP* پارامترهای تجهیزات سطح‌الارضی شامل جداکننده‌ها، کمپروسورها و خط لوله اعمال می‌گردد و در نهایت نرم‌افزار *RESOLVE* تمامی این اجزا را به همراه نرم‌افزار شبیه‌ساز مخزن *ECLIPSE* به صورت یکپارچه اجرا می‌نماید.

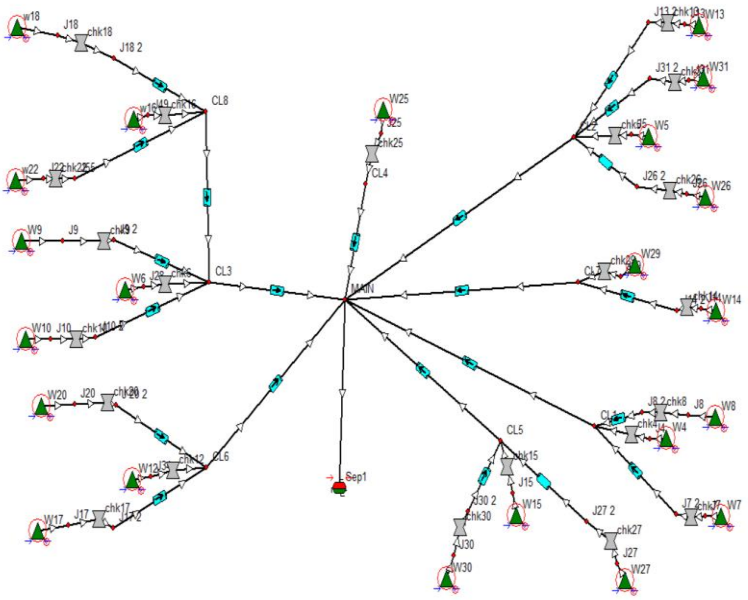
تغییرات هر جز از مجموعه مانند مخزن، چاه و تجهیزات سطح‌الارضی بر کل مدل اثر می‌گذارد؛ به گونه‌ای که فشار، دبی تولیدی و تک‌فازی یا چندفازی بودن مخزن، بر مقدار اثر پوسته‌ای هر یک از کنترل‌کننده‌های ذرات سازندی اثرگذار است. همچنین افت فشار ناشی از کنترل‌کننده‌ها بر نمودار رابطه عملکرد جریان (IPR) و در نهایت نقطه بهینه تولید، موثر است. کنترل‌کننده‌های ذرات سازندی با توجه به اثرگذاری بر میزان جریان ورودی نفت و گاز و ورود ذرات سازندی به جداکننده‌ها پارامترهای مهمی در طراحی جداکننده‌های نفت و گاز هستند [۲۷].

انواع روش‌های کنترل‌کننده ذرات تولیدی سازند در نرم‌افزار PROSPER اعمال می‌گردد که هر یک از این کنترل‌کننده‌ها از نظر شکل و نحوه کنترل متفاوت هستند. در همین رابطه متغیرهایی مانند اندازه گراول‌ها در گراول‌پک، عرض شکاف‌ها در آستر مشبک-کاری شده و غیره تاثیرگذار است. در نرم‌افزار مدل‌کننده چاه، محاسبات در سه بخش اساسی که شامل اطلاعات خواص سیال، رابطه عملکرد جریان[11] (IPR) و منحنی تحویل‌دهی عمودی[12] (VLP) است، انجام می‌گیرد. همچنین نرم‌افزار شبیه‌ساز مخزن ECLIPSE300 برای شبیه‌سازی مدل ترکیبی مخزن با توجه به اطلاعات جدول ۱ و ۲ استفاده شده است. برای مدل‌سازی چاه‌ها و تاسیسات سطح‌الارضی از شبیه‌ساز GAP استفاده شد. این نرم‌افزار، ابزاری قدرتمند در زمینه‌ی طراحی شبکه تولید، شبکه تزریق، بهینه-سازی تولید، تخصیص گاز در فرازآوری با گاز و در نهایت پیش‌بینی تولید می‌باشد. در نهایت برای اتصال مدل مخزن، چاه و تاسیسات سطح‌الارضی به یکدیگر، نرم‌افزار RESOLVE به کار گرفته شد.

۵- روش کار

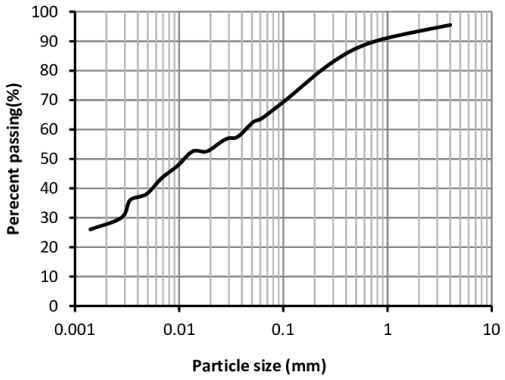
در این مقاله یک مدل یکپارچه شامل مخزن، چاه و تجهیزات سطح-الارضی ایجاد شد و سپس روش‌های کنترل مکانیکی ذرات سازندی شامل چهار روش مرسوم: توری از پیش پک شده، توری بافته شده، گراول‌پک و لاینر مشبک‌کاری شده، در یکی از مخازن کربناته ایران بررسی گردید. در این تحقیق، همانطور که از شکل ۷ مشخص است اندازه ذرات سازندی حدوداً دارای قطر ۳- ۰/۰۰۱۵ میلی‌متر می‌باشند. با توجه به این ابعاد، مدل‌های جلوگیری‌کننده از تولید ذرات سازندی طراحی شدند.

9 **Skin factor**
10 **Integrated Production Modeling**
11 Inflow performance relationship
12 Vertical Lift Performance



شکل ۶- مدل یکپارچه شامل چاه‌ها و تجهیزات سطح‌الارضی در نرم‌افزار GAP

بدین منظور آنالیز غربالگری (الک)[13] برای تعیین قطر دانه‌ها استفاده شده است. در این روش وزن نمونه‌های سازند که با هر سایز مشخص توری جدا شده‌اند با اندازه‌گیری وزن قبل و بعد از الک تعیین می‌شود. سپس درصد وزنی تجمعی عبوری هر نمونه در مقابل اندازه مش توری در مختصات نیمه لگاریتمی رسم می‌شود تا نمودار توزیع اندازه ذرات به‌دست آید. بر اساس نمودار توزیع اندازه ذرات سازند، قطر متوسطی از ابعاد الک که ۵۰ درصد ذرات از آن عبور می‌کنند با شاخص D_{50} معرفی می‌شود و این فرایند اساس طراحی کنترل‌کننده‌های ذرات سازندی است.



شکل ۷- توزیع اندازه ذرات (اقتباس شده از شرکت ملی نفت ایران)

[13] Sieve analysis

مشخصات مدل‌های طراحی‌شده کنترل‌کننده ذرات سازندی در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات مدل‌های طراحی شده کنترل ذرات سازندی (اقتباس شده از شرکت ملی نفت ایران)

روش	مدل	مقدار
گراول پک	اندازه مش	۳۰/۵۰
	تراوایی	۸۱D
	عمق نفوذ	۰/۴۶ft
	قطر داخلی لاینر	۲/۷۰۵in
	قطر خارجی لاینر	۲/۹۰۴in
لاینر مشبک‌کاری شده	ارتفاع شیار	۹in
	پهنای شیار	۰/۰۴۵in
	چگالی شیار	۱/۶ft
توری بافته شده	قطر داخلی توری	۲/۵۵۶in
	تراوایی خارجی	۹۰۰md
توری از پیش پک شده	قطر داخلی توری	۲/۱۲in
	قطر خارجی توری	۲/۲۴in
	تراوایی توری	۴۰۰۰md

در ادامه، چهار کنترل‌کننده ذرات سازندی با توجه به نیازها و اطلاعات چاه‌های این مخزن در نرم‌افزار مدل‌کننده چاه Prosper پیاده‌سازی شدند. سپس مدل چاه‌ها همراه با مدل مخزن و تجهیزات سطح‌الارضی در نرم‌افزار IPM به صورت یکپارچه درآمدند. در مدل مخزن، ۱۰ سال به عنوان تاریخچه تولید و ۳۰ سال به عنوان پیش-بینی در نظر گرفته شد. سناریوی تولید در طی ۱۰ سال اول طبق تاریخچه واقعی چاه‌ها تعریف گردیده است و در ادامه، ۳۰ سال به عنوان پیش‌بینی لحاظ شد.

۶- نتایج و بحث

مدل نهایی با توجه به تعبیه کنترل‌کننده‌های تولید ذرات سازندی در مدل یکپارچه شامل مخزن، چاه و تجهیزات سطح‌الارضی در درازمدت، طی ۴۰ سال شبیه‌سازی شد. قیمت نفت و گاز به ترتیب ۶۰ دلار برای هر بشکه نفت و ۴ دلار برای هر هزارفوت مکعب گاز تعیین شد و هزینه بازیافت هر بشکه آب نیز ۳ دلار درنظر گرفته شد. جدول ۴ میزان تولید نفت، گاز و آب حاصل از روش‌های مختلف طی زمان ۴۰ سال را نشان می‌دهد. همچنین

شکل‌های ۶، ۷ و ۸ به ترتیب میزان تولید تجمعی نفت، تولید تجمعی گاز و تولید تجمعی آب را طی ۴۰ سال را نشان می‌دهند.

جدول ۵ درآمد حاصله با توجه به مجموعدرآمدهای نفت و گاز و کم کردن هزینه‌های دفع آب از درآمد کلی را نشان می‌دهد.

جدول ۴- میزان تولید نفت، گاز و آب حاصل از روش‌های مختلف طی زمان ۴۰ سال

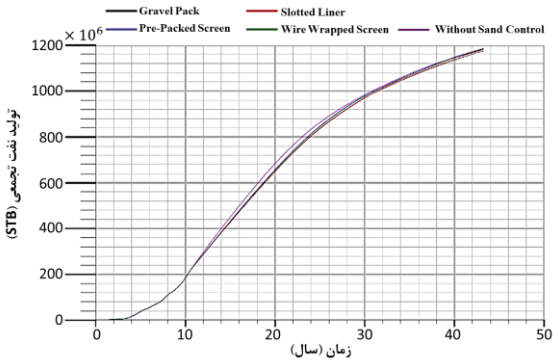
روش‌ها	نفت (بشکه)	گاز (MSCF[14])	آب (بشکه)
گراول پک	۸۰۰،۶۵۶،۲۶۵،۱	۵۰۰،۳۳۲،۴۵۵،۳	۸۴۲،۵۷۵،۱
توری از پیش پک شده	۸۰۰،۵۶۴،۲۵۴،۱	۹۰۰،۸۶۱،۴۹۶،۳	۵۸۹،۶۳۲،۱
لاینرمشبک‌کاری شده	۵۰۰،۴۵۹،۲۸۵،۱	۶۰۰،۷۸۸،۴۶۹،۳	۵۸۴،۴۷۱،۱
توری بافته شده	۷۰۰،۵۴۸،۲۸۴،۱	۹۰۰،۵۶۶،۴۳۶،۳	۶۴۷،۶۶۸،۱

[14] Million Standard Cubic Feet

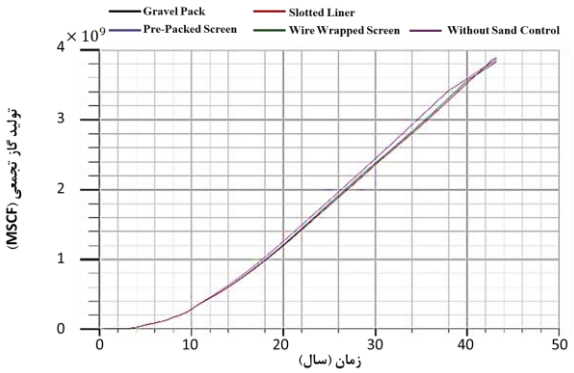
شکل‌های ۶، ۷ و ۸ به ترتیب میزان تولید تجمعی نفت، تولید تجمعی گاز و تولید تجمعی آب را طی ۴۰ سال را نشان می‌دهند.

جدول ۵- درآمد حاصله با توجه به مجموع درآمدهای نفت و گاز و کم کردن هزینه‌های دفع آب از درآمد کلی

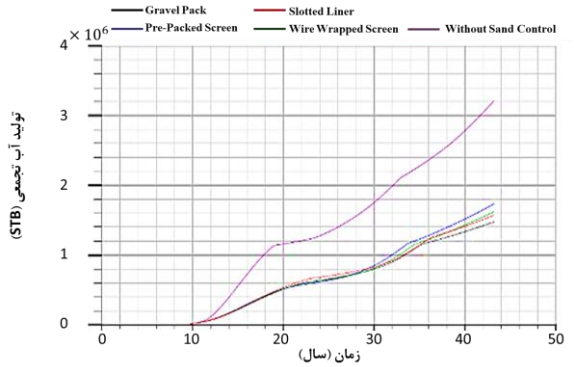
روش‌ها	نفت (میلیون بشکه)	گاز (MSCF)*۱۰۰	آب (بشکه)	درآمد نهایی (1000$)
گراول پک	۴۸۷،۷۰	۱۵۴،۵۴۵،۳۴۵	۶۲۶،۳۵۶،۴	۳۴۵،۳۴۵،۸۵
توری از پیش پک شده	۱۷۶،۷۱	۱۵۵،۴۵۳،۵۴۸	۵۴۵،۲۹۶،۵	۳۴۵،۴۵۶،۸۵
لاینر مشبک کاری شده	۸۰۶،۷۰	۱۵۴،۵۶۴،۵۸۷	۹۸۴،۸۴۶،۴	۳۴۵،۲۴۵،۸۵
توری بافته شده	۰۸۲،۷۱	۱۵۸،۷۲۱،۲۵۶	۵۴۱،۷۵۴،۴	۴۵۳،۴۵۳،۸۵



شکل۶- تولید تجمعی نفت بر حسب میلیون بشکه طی زمان ۴۰ سال



شکل۷- تولید تجمعی گاز بر حسب میلیون فوت مکعب طی زمان ۴۰ سال



شکل۸- تولید تجمعی آب بر حسب بشکه طی زمان ۴۰ سال

جدول ۶ اثر پوسته‌ای متوسط به وجود آمده ناشی از افت فشار کنترل‌کننده‌های ذرات سازندی را نشان می‌دهد.

جدول۶- اثر پوسته‌ای متوسط به وجود آمده ناشی از افت فشار کنترل‌کننده‌های ذرات سازندی

کنترل‌کننده ذرات	اثر پوسته‌ای *Skin*
گراول پک	۸/۴۸۶
لاینر مشبک‌کاری شده	۴/۲۸۴
توری بافته شده	۸/۸۴۲
توری از پیش پک شده	۴/۴۵۸

۷- نتیجه گیری

با توجه به اثرات مخرب ذرات سازندی، باید به نحوی از تولید این ذرات جلوگیری نمود. روش‌های متفاوتی برای تحقق این امر وجود دارند که هرکدام دارای معایب و مزایایی هستند. هر یک از این روش‌ها دارای افت فشاری متناسب با دبی و سرعت جریان هستند که بر میزان تولید نفت، گاز و آب در بلندمدت اثر گذارند. شکل ۶ نشان می‌دهد که میزان تولید تجمعی نفت طی ۴۰ سال در روش-های مختلف پیشگیری از تولید ذرات سازندی تفاوت زیادی نداشته است و تفاوتشان طبق جدول‌های ۴ و ۵ در حد چند صد میلیون دلار در مقایسه با ۸۶ میلیارد دلار است. همچنین در مدل بدون کنترل، در سال ۲۰ ام مقدار تولید از دیگر مدل‌ها بیشتر شده که علت آن افت فشار کمتر در نبود اثر پوسته‌ای کنترل‌کننده ذرات است. این تفاوت درآمد در بلندمدت شاید قابل توجه نباشد اما در کوتاه‌مدت و با توجه به هزینه‌های نصب هر یک از سیستم‌ها و بازگشت سرمایه می‌تواند اهمیت ویژه‌ای داشته باشد. همچنین در شکل ۷ مقدار تولید گاز در روش‌های مختلف تفاوت زیادی ندارد و روش بدون کنترل ذرات، تولید گاز بیشتری داشته است. مشاهده می‌شود در اواخر تولید، حدودا سال ۳۸ ام شیب نمودارهای تولید تجمعی گاز و نفت کاهش می‌یابد که می‌توان این گونه تفسیر کرد که نرخ تولید بیشتر گاز و نفت در مدل‌های بدون کنترل‌کننده ذرات در نهایت باعث افزایش سرعت افت فشار مخزن و کاهش تولید تجمعی می‌شود. در شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود که تولید تجمعی آب در مدل بدون کنترل‌کننده ذرات نسبت به چهار مدلی که دارای کنترل‌کننده هستند حدودا دو برابر بیشتر آب تولید کرده‌است. آب تولید شده نیاز به هزینه‌های بالای بازیافت دارد و همچنین به شدت بر محیط‌زیست اثرات جبران‌ناپذیر می‌گذارد. تولید آب بیشتر به شدت بر کاهش استحکام چاه موثر است و سبب تولید ذرات سازندی بیشتری می‌شود. همچنین مشخص است که ابزار توری از پیش پک شده بیشترین و گراول پک کمترین میزان تولید آب را داشته است. جدول ۶ اثر پوسته‌ای چهار مدل مورد نظر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده شد، میزان تولید تجمعی، ارتباط مستقیمی با اثر پوسته-ای ندارد و در این مدل مخزن، این استنتاج که اثر پوستی کمتر (حاصل از کنترل‌کننده ذرات) سبب تولید بیشتر نفت و گاز می‌شود صحیح نمی‌باشد.

۸- منبع‌ها

[1] Fjaer E. Petroleum related rock mechanics. 2nd ed ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier; 2008 2008. 514 p.
[2] Salama MM. Sand Production Management. Journal of Energy Resources Technology. 1999;122(1):29-33.
[3] Matanović D, Čikeš M, Moslavac B. Sand control in well construction and operation. Berlin: Springer; 2012 2012. 200 p.
[4] Subbiah SK, Samsuri A, Mohamad-Hussein A,

Jaafar MZ, Chen YR, Kumar RR. Root cause of sand production and methodologies for prediction. Petroleum. 2021;7(3):263-71.

[5] Swpu P. Sand production: A smart control framework for risk mitigation. Petroleum. 2020;6:1-13.

[6] Younessi A, Rasouli V, Wu B. The Effect of Stress Anisotropy On Sanding: An Experimental Study. 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium2012. p. ARMA-2012-374.

[7] Hall CD, Jr., Harrisberger WH. Stability of Sand Arches: A Key to Sand Control. Journal of Petroleum Technology. 1970;22(07):821-9.

[8] Ghalambor A, Hayatdavoudi A, Alcocer CF, Koliba RJ. Predicting Sand Production in U.S. Gulf Coast Gas Wells Producing Free Water. Journal of Petroleum Technology. 1989;41(12):1336-43.

[9] Bouts MN, Rijkeboer MM. Design of Horizontal Polymer Injectors Requiring Conformance and Sand Control. SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia2014. p. SPE-169722-MS.

[10] Veeken CAM, Davies DR, Kenter CJ, Kooijman AP. Sand Production Prediction Review: Developing an Integrated Approach. SPE Annual Technical Conference and Exhibition1991. p. SPE-22792-MS.

[11] Hu S, Wang L, Lou Y, Cao Y, Meng W, Zhang L. Laboratory Investigation on Optimum Selection of a Sand Control Method for an Interbedded Sandstone and Mudstone Reservoir. Geofluids. 2020;2020:8881967.

[12] Talaghat Mr, Bahmani AR. Sand Production Control in Sandstone Reservoirs Using a Modified Urea-formaldehyde Re. Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology. 2017;6(2):33-45.

[13] Morita N. Field and Laboratory Verification of Sand-Production Prediction Models. SPE Drilling & Completion. 1994;9(04):227-35.

[14] Tronvoll J, Dusseault M, Sanfilippo F, Santarelli F. The Tools of Sand Management. Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 2001.

[15] Norman D. Overview: Frac Pack (September 2002). Journal of Petroleum Technology. 2002;54(09):74-.

[16] Samsuri A, Sim S, Tan C. An Integrated Sand Control Method Evaluation. 2003.

[17] Nnanna E, Nwabueze V, Kooijman A. Twenty Years of Horizontal Sandface Completion in SPDC. SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition2013. p. SPE-167533-MS.

[18] Ben Mahmud H, Leong VH, Lestariono Y. Sand production: A smart control framework for risk mitigation. Petroleum. 2020;6(1):1-13.

[19] Zhou S, Sun F. Sand Production Management for Unconsolidated Sandstone Reservoirs. Wiley-Blackwell; 2016.

[20] Salehi-Moorkani R, Abbas Safian G, Mirzaei-Paiaman A. Successful Applications of Expandable Sand Screen in Persian Oil Fields, Part 1. SPE Production and Operations Conference and Exhibition2010. p. SPE-133364-MS.

[21] Zamani MA, Knez D. A New Mechanical-Hydrodynamic Safety Factor Index for Sand Production Prediction. Energies. 2021;14(11).

[22] Salahi A, Dehghan AN, Sheikhzakariaee SJ, Davarpanah A. Sand production control mechanisms during oil well production and construction. Petroleum Research. 2021;6(4):361-7.

[23] Innes GL, Morgan QP, Macarthur AR, Green A. Next Generation Expandable Completion Systems. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition2005. p. SPE-97281-MS.

[24] Metcalfe P, Whitelaw C. The Development of the First Expandable Sand Screen. Offshore Technology Conference1999. p. OTC-11032-MS.

[25] Bellarby J. Chapter 3 Sand Control. In: Bellarby J, editor. Developments in Petroleum Science. 56: Elsevier; 2009. p. 129-239.

[26] Hepguler G, Barua S, Bard W. Integration of a Field Surface and Production Network With a Reservoir Simulator. SPE Comp App. 1997;9:88–92.

[27] Litvak M, Hutchins L, Skinner R, Darlow B, Wood R, Kuest L. Prudhoe Bay E-Field Production Optimization System Based on Integrated Reservoir and Facility Simulation. 2002.