

مدل سازی فیزیکی و عددی تاثیر اندازه گراول پک بر تولید ماسه در چاه‌های نفت با طراحی و ساخت دستگاه

رضا شیرین‌آبادی^{۱*}، پرویز معارف‌وند^۲، کامران گشتاسبی^۲ و کاوه آهنگری^۴

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن و متالوژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی معدن دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۱۸

چکیده

در این تحقیق با طراحی و ساخت دستگاه و مدل‌سازی عددی، تولید ماسه و عملکرد گراول پک شبیه‌سازی شد. با این دستگاه و مدل عددی می‌توان سنگ‌های مختلف را همراه با سیال‌های گوناگون، تحت تنش‌های متفاوت جهت شبیه‌سازی تولید ماسه و ارزیابی عملکرد گراول پک آزمایش نمود. در این مطالعه از ماسه با دانه‌بندی مشخص، از شن با چند اندازه متفاوت و همچنین آب جهت شبیه‌سازی تولید ماسه و گراول پک در فشارهای متفاوت، استفاده شد. برای ساخت مدل عددی از نرم‌افزار PFC^{3D} استفاده شد. در مدل عددی از ماسه با اندازه ۰/۲۲ تا ۱/۱ mm و از شن با اندازه‌های ۳/۵ تا ۴/۷۶ mm، ۴/۷۶ تا ۹ mm، ۹ تا ۱۲/۶ mm و ۱۲/۶ تا ۱۶/۸ mm و در مدل فیزیکی از شن با اندازه‌های ۹ تا ۴/۷۶ mm و ۱۹ تا ۳/۵ mm استفاده شد. مدل عددی در حالت بدون گراول پک با دستگاه شبیه‌ساز کالیبره شد. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد که در مدل عددی با گراول پک اندازه ۳/۵ تا ۴/۷۶ mm تولید ماسه کمترین مقدار را داشت و در مدل فیزیکی با گراول پک اندازه ۹ تا ۴/۷۶ mm تولید ماسه کمتر و دبی خروجی سیال بیشتر بود.

کلمات کلیدی: تولید ماسه، مدل‌سازی آزمایشگاهی، نرم‌افزار PFC^{3D}، چاه نفت، گراول پک

مقدمه

پدیده می‌تواند از خسارات و هزینه‌های هنگفت جلوگیری نماید.

برای تولید هیدروکربور، فشار سیال در چاه پایین‌تر از فشار مخزن نگه داشته می‌شود. بنابراین بر اثر گرادیان فشار، هیدروکربور به سمت چاه جریان می‌یابد. در طول زمان تولید هیدروکربور، فاکتورهای بسیاری پدیده تولید ماسه را کنترل می‌کنند. از میان آنها جریان سیال و تغییر تنش محیط اطراف

تولید ماسه می‌تواند خسارات و هزینه‌های بسیار زیادی بر شرکت‌های نفتی اعمال نماید و در بعضی از مواقع باعث از بین رفتن چاه شود. لذا بررسی مکانیزم و مدل‌سازی تولید ماسه و پیش‌بینی این

*مسئول مکاتبات
r_shirinabadi@azad.ac.ir

آدرس الکترونیکی

برای یک مخزن نفتی با ماسه‌های سست، چارلز پیشنهاد می‌کند که نرخ جریان بحرانی سیال (Q_c) برای جدا سازی ذرات پیرامون چاه می‌تواند از رابطه (۱) محاسبه شود.

$$Q_c = \frac{3\pi R_w k h \sigma'_{\theta\theta} \tan \phi}{\mu d_p} \quad (1)$$

که R_w شعاع چاه، k تراوایی سازند، h ضخامت سازند، $\sigma'_{\theta\theta}$ تنش مماسی موثر محیط چاه، ϕ زاویه اصطکاک داخلی ذرات، μ ویسکوزیته دینامیک سیال و d_p قطر ذرات می‌باشد.

پالمر و وزیری بین سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۳ یک سری از آزمایشات سانتریفیوژی را با فرض وجود یک لایه مستحکم مناسب بالای یک مخزن نفتی سست را به انجام رساندند و نتایج شش آزمایش را گزارش کردند. آن‌ها از یک سانتریفیوژ برای شبیه‌سازی تنش روباره مخزن استفاده کردند. پالمر و همکاران در سال ۲۰۰۰ رفتار لایه‌های ماسه‌سنگی سست پیرامون یک چاه که در زیر یک لایه مستحکم مناسب قرار گرفته است را بررسی کرده‌اند [۹].

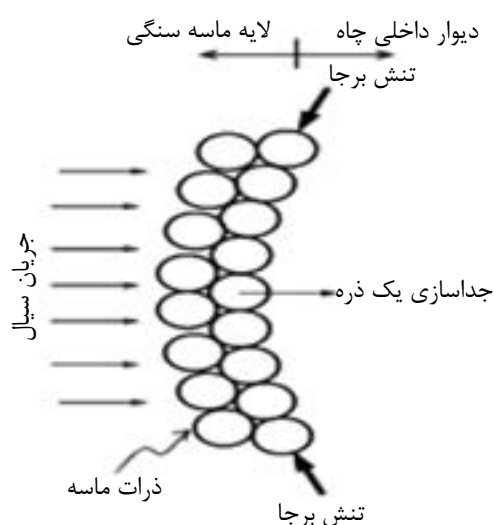
وان دن هوک و همکاران در سال ۲۰۰۰ وابستگی اندازه حفرات را با شیوه شکست حفره مورد بررسی و مباحثه قرار دادند [۱۰].

آزمایش‌ها و پژوهش‌های قبلی بر این باور بودند که در مقیاس چاه، خواص مواد سازند در پیرامون یک چاه، نحوه شکست همراه با تولید را تعیین می‌کنند. در سازندهای ماسه‌سنگی مستحکم و یا با استحکام کم (برای مثال در آزمایش پالمر در سال ۲۰۰۰)، ممکن است بر اثر تولید ذرات جامد، نوارهای برشی با تراوایی بالا پیرامون سوراخ‌کاری‌ها شکل بگیرند. در مقابل در سازندهای ماسه‌سنگی ضعیف (به طور مثال در آزمایش وزیری در سال ۲۰۰۳) حداقل در زمانی که یک لایه با کیفیت بالای لایه ماسه‌سنگی وجود داشته باشد، حفرات خالی پیرامون یک چاه شکل می‌گیرند [۱۱ و ۱۲].

دهانه چاه، اساسی‌ترین می‌باشند [۱].

جریان هیدروکربور همچنین نیروی هیدرودینامیکی (تراوش) را روی سازند ایجاد می‌کند. اگر نیروی هیدرودینامیکی بیشتر از نیروی مقاوم سازند (مثل سیمان شدگی، نیروی اصطکاک بین ذرات و یا نیروی موئینگی) باشد، ذرات می‌توانند به خارج از سازند حرکت کنند [۶-۲]. اثر هیدرودینامیک جریان سیال و تغییر تنش محیطی وابسته به هم هستند. برای مثال تغییر در تنش محیطی می‌تواند به سازند، آسیب محلی وارد نماید. متعاقباً - حرکت ذرات می‌تواند باعث افزایش در تخلخل و منجر به تغییر سرعت محلی و در نتیجه آسیب بیشتر به سازند شود [۷]. اگر سرعت جریان سیال در یک چاه برای انتقال ذرات جامد تولیدی کافی نباشد، ذرات در چاه انباشته می‌شوند. انباشتگی ممکن است انقطاع کامل تولید نفت را منجر شود [۸].

در اثر تولید نفت، ذرات جامد پیرامون دهانه چاه، در معرض جریان سیال هستند شکل (۱) به خوبی این اتفاق را به تصویر کشیده است. به این دلیل که لایه ماسه‌ای سست است، اگر نیروی هیدرودینامیک جریان سیال بیشتر از مقاومت اصطکاکی ناشی از تنش‌های برجا باشند، ذرات ماسه می‌توانند از سازند جدا شوند [۲].



شکل ۱ پایداری ذرات ماسه پیرامون یک چاه تحت تاثیر جریان سیال و تنش‌های برجا [۳].

1. Seepage

2. Distinct Element Method (DEM)

این قابلیت وجود دارد که تعداد و اندازه سوراخ‌های اطراف چاه را تغییر داد و می‌توان از گراول پک با اندازه‌های مختلف استفاده نمود. لذا این دستگاه، توانمندی مدل‌سازی فیزیکی تولید ماسه و گراول پک در حالت‌های مختلف را دارد. تصویر و شماتیک دستگاه در شکل‌های (۲ و ۳) آورده شده است. اجزای اصلی این شبیه‌ساز مخزن در جدول ۱ آمده است. دستگاه ساخته شده با مقیاس ۱/۱۰ ساخته شده است. لوله تولید دستگاه دارای قطر ۲/۵ cm است که معادل با چاه با قطر ۲۵ cm است. لازم به ذکر است که لوله تولید دستگاه قابل تعویض است و می‌توان از لوله تولید با سوراخ کاری‌های متفاوت استفاده کرد.

هدف از ساخت این دستگاه، مدل‌سازی یک مخزن نفتی در یک سازند لایه‌ای ماسه‌سنگی می‌باشد که زیر یک لایه نفوذناپذیر قرار گرفته است.

روش کار دستگاه اینگونه است که ماسه خشک به داخل محفظه ریخته می‌شود سپس صفحه فولادی (پیستون) روی محفظه قرار می‌گیرد. اگر نیاز به استفاده از گراول پک باشد، می‌توان قبل از ریختن ماسه در داخل محفظه، گراول پک را دور تا دور لوله جداری قرار داد. پس از آن، جک هیدرولیکی روی صفحه فولادی قرار گرفته و بسته می‌شود. این جک، توان اعمال فشار تا حد ۶۰۰ bar را دارد. حال با روشن نمودن پمپ، سیال با فشار مورد نظر به داخل محفظه تزریق می‌شود. پس از اشباع شدن ماسه درون محفظه، سیال به همراه ماسه وارد لوله جداری می‌شود. با اندازه‌گیری وزن سیال، ماسه و زمان انجام آزمایش، می‌توان نرخ تولید ماسه و سیال در حالت‌های مختلف را اندازه‌گیری نمود.

برای انجام شبیه‌سازی، از ماسه با مشخصات جدول ۲، شن با دو اندازه ۹ تا ۴/۷۶ mm و ۱۹ تا ۹/۲۵ mm، به عنوان گراول پک و آب به عنوان سیال با فشار ۲ تا ۴ bar استفاده شد. شکل (۴) ماسه و گراول پک (۴ الف) و عدسی‌های ایجاد شده در اطراف چاه بدون گراول (۴ ب) را نشان می‌دهد.

تولید ماسه یک فرآیند پیوسته و دینامیک است که در مقیاس میکروسکوپی اتفاق می‌افتد و سنگ ناپیوسته می‌شود. بنابراین روش ناپیوسته برای شبیه‌سازی ذرات جدا شده از ماتریکس سنگ مناسب است. Cundall اولین بار روش المان مجزا (DEM)^۱ را معرفی نمود [۱۳]. O'Conner et al. کاربرد روش المان مجزا را جهت بررسی مکانیزم تولید ماسه در هنگام استحصال نفت، معرفی نمود [۱۴]. Jensen and Preece ترکیب 3D DEM با روش المان محدود را جهت بررسی پتانسیل ماسه‌دهی، ارائه نمودند [۱۵]. Li et al. از کد تجاری DEM با نام PFC2D برای شبیه‌سازی آزمایش‌های سیلندر سوراخ با جریان سیال، جهت مطالعه تولید ماسه استفاده نمود [۱۶]. Cheung جهت شبیه‌سازی آزمایش سوراخ کاری به منظور بررسی مساله تولید ماسه، از 3D DEM استفاده کرد [۱۷]. Zhou et al. DEM همراه با محاسبات دینامیکی سیال را جهت بررسی مکانیزم تولید ماسه، به کار گرفت [۱۸].

عموماً مشاهده مستقیم تولید ماسه در یک میدان نفتی مشکل می‌باشد. تجربیات آزمایشگاهی راهی جایگزین برای بررسی این پدیده می‌باشد [۱۹]. بر این اساس، این مطالعه بر آنست تا به کمک دو روش مدل‌سازی فیزیکی و عددی افق جدیدی از فشار روباره روی لایه ماسه سنگی و نیز فشار خروجی سیال در هنگام تولید ماسه و نیز جنس ماسه را بگشاید. در این راستا برای مطالعات آزمایشگاهی، دستگاهی جهت مدل‌سازی فیزیکی تولید ماسه و گراول پک ساخته شد (دستگاه ساخته شده دارای گواهی ثبت اختراع است) و برای مدل‌سازی عددی نیز از نرم‌افزار PFC3D استفاده شد.

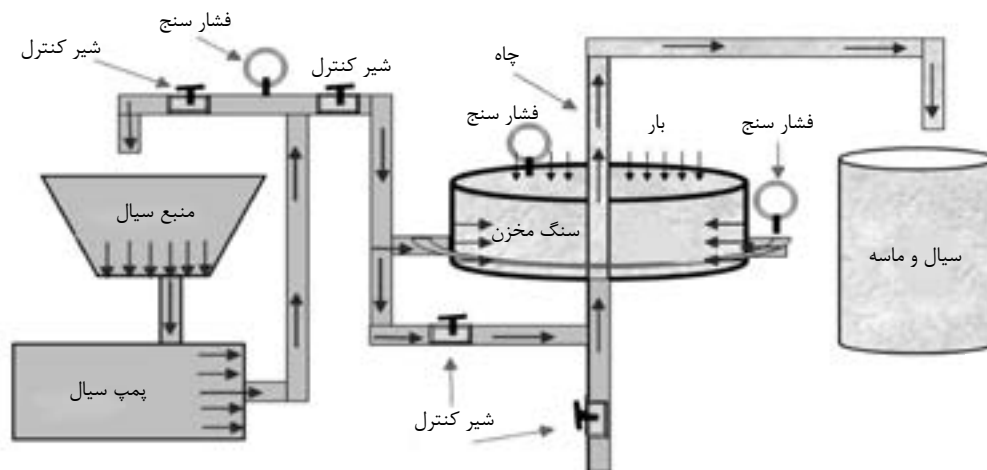
مدل‌سازی فیزیکی تولید ماسه و گراول پک

دستگاه طراحی شده در این تحقیق می‌تواند سنگ و یا ذرات مختلف ماسه را به همراه جریان سیال‌های مختلف تحت تنش‌های متفاوت را جهت پیش‌بینی تولید ماسه در چاه نفت، شبیه‌سازی نماید. البته

1. Distinct Element Method (DEM)



شکل ۲ تصویر دستگاه شبیه‌ساز مخزن.



شکل ۳ شماتیک دستگاه شبیه‌ساز مخزن.

جدول ۱- اجزای اصلی دستگاه شبیه‌ساز

مشخصات	نام قطعه
از جنس فولاد با قطر داخلی ۳۵/۶ cm، قطر خارجی ۴۰/۶ cm و ارتفاع ۲۰ cm	محفظه سیلندری شکل
از جنس فولاد با قطر ۳۵/۵ cm و ضخامت ۱/۵ cm	درپوش سیلندر (پیستون)
قطر داخلی ۲/۵ cm و قطر خارجی ۳/۵ cm	لوله جداری
۶۰۰ bar	چک هیدرولیکی
۴ bar	پمپ تزریق سیال
۴۰ lit	مخزن سیال
۴ عدد و برای کنترل فشارهای تزریق و روباره	فشارسنج
۵ عدد جهت کنترل فشار و جریان	شیرهای کنترل

جدول ۲ خصوصیات فیزیکی ماسه و سیال مورد استفاده در دستگاه و مدل PFC^{3D}.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
نوع ماده	ماسه ریز	شعاع ذرات	mm (۰/۲۲-۱)
نوع کانی	کوارتز	تعداد ذرات در مدل PFC ^{3D}	۳۰۰۰۰
رنگ ذرات	سفید	تخلخل اولیه	۰/۲۶
شکل دانه	کروی	سختی نرمال ذرات (k_N)	۲/۷e۴ N/m
سختی طبق جدول موس	۷	سختی برشی ذرات (k_S)	۲/۷e۴ N/m
وزن مخصوص	۲/۶۵	نسبت پواسون	۰/۲۵
چگالی حداقل	۱/۴۲ g/cm ³	سختی نرمال دیوار (k_{NW})	۳/۷e۴ N/m
چگالی حداکثر	۱/۷۵ g/cm ³	سختی برشی دیوار (k_{SW})	۳/۷e۴ N/m
مدول الاستیسیته	۳۰۰۰۰ kN/m ²	نوع سیال	آب
چسبندگی	۰ kN/m ²	دانسیته سیال	۱ g/cm ³
ضریب چسبندگی ذرات	۰/۵	ویسکوزیته دینامیک سیال	۱ cP



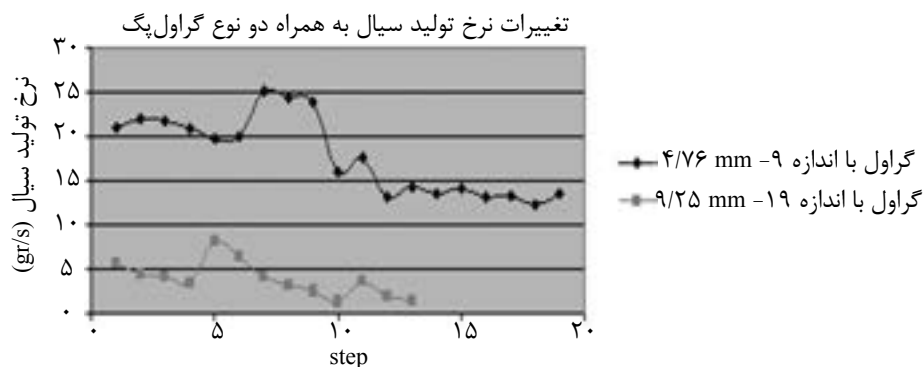
شکل ۴ الف) تصویر ماسه و گراول پک اطراف چاه و ب) تصویر عدسی‌های ایجاد شده در اطراف چاه بدون گراول.

دو حالت نرخ تولید سیال با گذشت زمان کاهش می‌یابد و به نرخ ثابتی می‌رسد. اما نرخ تولید سیال در حالتی که اندازه گراول ۹ تا ۴/۷۶ mm می‌باشد بیشتر از حالتی است که اندازه گراول ۱۹ تا ۹/۲۵ mm باشد. لذا می‌توان پیشنهاد نمود که از لحاظ نرخ تولید سیال و جلوگیری از تولید ماسه، گراول با اندازه ۹ تا ۴/۷۶ mm مناسب‌تر است.

آزمون‌ها با مقادیر تنش روباره و فشار سیال متفاوت انجام شده‌اند. نتایج آزمایشات شبیه‌سازی تولید ماسه و ارزیابی عملکرد گراول پک در جدول ۳ و در شکل ۵ آورده شده است. مدل عددی در حالت بدون گراول پک با دستگاه شبیه‌ساز کالیبره شد. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد با جایگذاری گراول پک، نرخ تولید ماسه به شدت کاهش می‌یابد و به صفر می‌رسد. نمودار شکل ۵ نشان می‌دهد در هر

جدول ۳ نتایج آزمایشات انجام شده با دو نوع گراول پک.

اندازه گراول (mm)	نرخ تولید ماسه (gr/sce)	نرخ تولید سیال (gr/sec)	تعداد شکاف	قطر شکاف لوله (mm)	وزن + ماسه سیال خروجی (gr)	وزن سیال خالص خروجی (gr)	وزن ماسه خالص خروجی (gr)	فشار پیزومتر روی دستگاه (bar)	بار روی دستگاه (bar) پایان	بار روی دستگاه (bar) شروع	مدت زمان آزمایش ثانیه	ردیف
۴/۷۶-۹	۰/۲۲	۲۰/۸۳	۲	۳/۳	۱۲۶۳	۱۲۵۰	۱۳	۲	۱۷۳	۲۰۰	۶۰	۱
۴/۷۶-۹	.	۲۲/۰۲	۲	۳/۳	۱۳۲۱	۱۳۲۱	.	۲	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۲
۴/۷۶-۹	.	۲۱/۶۵	۲	۳/۳	۱۲۹۹	۱۲۹۹	.	۲	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۳
۴/۷۶-۹	.	۲۲/۸۲	۲	۳/۳	۱۲۴۹	۱۲۴۹	.	۲	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۴
۴/۷۶-۹	.	۱۹/۵۸	۲	۳/۳	۱۱۷۵	۱۱۷۵	.	۲	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۵
۴/۷۶-۹	.	۱۹/۸۷	۲	۳/۳	۱۱۹۲	۱۱۹۲	.	۲	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۶
۴/۷۶-۹	.	۲۵/۰۵	۲	۳/۳	۱۵۰۳	۱۵۰۳	.	۳	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۷
۴/۷۶-۹	.	۲۴/۴۷	۲	۳/۳	۱۴۶۵	۱۴۶۵	.	۳	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۸
۴/۷۶-۹	.	۲۳/۷۵	۲	۳/۳	۱۴۲۵	۱۴۲۵	.	۳/۳	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۹
۴/۷۶-۹	.	۱۵/۹۸	۲	۳/۳	۹۵۹	۹۵۹	.	۲	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۱۰
۴/۷۶-۹	.	۱۷/۵۵	۲	۳/۳	۱۰۵۳	۱۰۵۳	.	۲	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۱۱
۴/۷۶-۹	.	۱۳/۰۴	۲	۳/۳	۳۹۱۲	۳۹۱۲	.	۲	۲۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۱۲
۴/۷۶-۹	.	۱۴/۲۵	۲	۳/۳	۸۵۵	۸۵۵	.	۲	۳۰۰	۳۰۰	۶۰	۱۳
۴/۷۶-۹	.	۱۳/۴	۲	۳/۳	۸۰۴	۸۰۴	.	۲	۳۰۰	۳۰۰	۶۰	۱۴
۴/۷۶-۹	.	۱۴/۱۵	۲	۳/۳	۸۴۹	۸۴۹	.	۲	۴۰۰	۴۰۰	۶۰	۱۵
۴/۷۶-۹	.	۱۲/۹۳	۲	۳/۳	۷۷۶	۷۷۶	.	۲	۴۰۰	۴۰۰	۶۰	۱۶
۴/۷۶-۹	.	۱۳/۲۵	۲	۳/۳	۷۹۵	۷۹۵	.	۲	۴۰۰	۴۰۰	۶۰	۱۷
۴/۷۶-۹	.	۱۲/۲۷	۲	۳/۳	۷۳۳	۷۳۳	.	۲	۴۰۰	۴۰۰	۶۰	۱۸
۴/۷۶-۹	.	۱۳/۴۶	۲	۳/۳	۴۰۳۸	۴۰۳۸	.	۳/۳	۴۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۱۹
۹/۲۵-۱۹	.	۵/۶۳۳	۲	۳/۳	۳۳۸	۳۳۸	.	۴	۸۰	۲۰۰	۶۰	۲۰
۹/۲۵-۱۹	.	۴/۳	۲	۳/۳	۲۵۸	۲۵۸	.	۳/۳	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۲۱
۹/۲۵-۱۹	.	۴/۱۳۳	۲	۳/۳	۲۴۸	۲۴۸	.	۳/۳	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۲۲
۹/۲۵-۱۹	.	۳/۲۸۳	۲	۳/۳	۱۹۷	۱۹۷	.	۳/۳	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۲۳
۹/۲۵-۱۹	.	۸/۰۶۷	۲	۳/۳	۴۸۴	۴۸۴	.	۳/۳	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۲۴
۹/۲۵-۱۹	.	۶/۳۳۳	۲	۳/۳	۳۸۰	۳۸۰	.	۳/۳	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۲۵
۹/۲۵-۱۹	.	۴/۲	۲	۳/۳	۲۵۲	۲۵۲	.	۳/۳	۱۶۰	۲۰۰	۶۰	۲۶
۹/۲۵-۱۹	.	۳/۲	۲	۳/۳	۱۹۲	۱۹۲	.	۳/۳	۲۰۰	۲۰۰	۶۰	۲۷
۹/۲۵-۱۹	.	۲/۴۴۷	۲	۳/۳	۷۳۴	۷۳۴	.	۳/۳	۲۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۲۸
۹/۲۵-۱۹	.	۱/۱۵	۲	۳/۳	۱۰۳۵	۱۰۳۵	.	۳/۳	۲۰۰	۲۰۰	۹۰۰	۲۹
۹/۲۵-۱۹	.	۳/۵۷۷	۲	۳/۳	۱۰۷۳	۱۰۷۳	.	۴	۲۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۳۰
۹/۲۵-۱۹	.	۱/۷۹۳	۲	۳/۳	۵۳۸	۵۳۸	.	۴	۲۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۳۱
۹/۲۵-۱۹	.	۱/۵۱	۲	۳/۳	۴۵۳	۴۵۳	.	۴	۲۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۳۲
بدون گراول	۲۲/۳۰	۱۳/۵۸	۲	۳/۳	۱۵۴۳	۵۸۴	۹۵۹	۳	۱۵۰	۲۰۰	۴۳	۳۳
بدون گراول	۲۲/۸۹	۱۵/۶۵	۲	۳/۳	۱۴۶۵	۵۹۵	۸۷۰	۳	۱۵۰	۲۰۰	۳۸	۳۴



شکل ۵ تغییرات نرخ تولید سیال با دو اندازه مختلف گراول پگ.

شد. سرعت دیوارها صفر در نظر گرفته شدند. ذرات کروی و صلب هستند اما قابلیت همپوشانی دارند. توده سنگ اطراف چاه همگن، همسانگرد و به صورت مجموعه‌ای از ذرات ماسه در کنار هم فرض شده و توده سنگ قابلیت عبور سیال را دارد. خصوصیات فیزیکی ماسه و سیال مورد استفاده در دستگاه و مدل PFC^{3D} در جدول (۲) آورده شده است. لازم به ذکر است جهت شبیه‌سازی جریان سیال، اثر جریان سیال یعنی نیروی که سیال به ذرات وارد می‌نماید، به ذرات اعمال شد. مدل اول بدون گراول، مدل دوم با گراول اندازه ۳/۵ mm تا ۴/۷۶ mm، مدل سوم با گراول اندازه ۴/۷۶ mm تا ۹ mm، مدل چهارم با گراول اندازه ۹ mm تا ۱۲/۶ mm و مدل پنجم با گراول اندازه ۱۲/۶ mm تا ۱۶/۸ mm ساخته و حل شد. تصویر مدل‌های مختلف در شکل‌های (۶ تا ۱۰) آورده شده است. نتایج حاصل از مدل‌های عددی نشان می‌دهد که در یک زمان یکسان برای پنج مدل عددی و شرایط یکسان، بیشترین تولید ماسه در حالت بدون گراول و کمترین تولید ماسه در حالتی با گراول اندازه ۳/۵ mm تا ۴/۷۶ mm رخ داد. لذا می‌توان پیشنهاد نمود از لحاظ کنترل تولید ماسه، گراول با اندازه ۳/۵ mm تا ۴/۷۶ mm مناسب‌تر است.

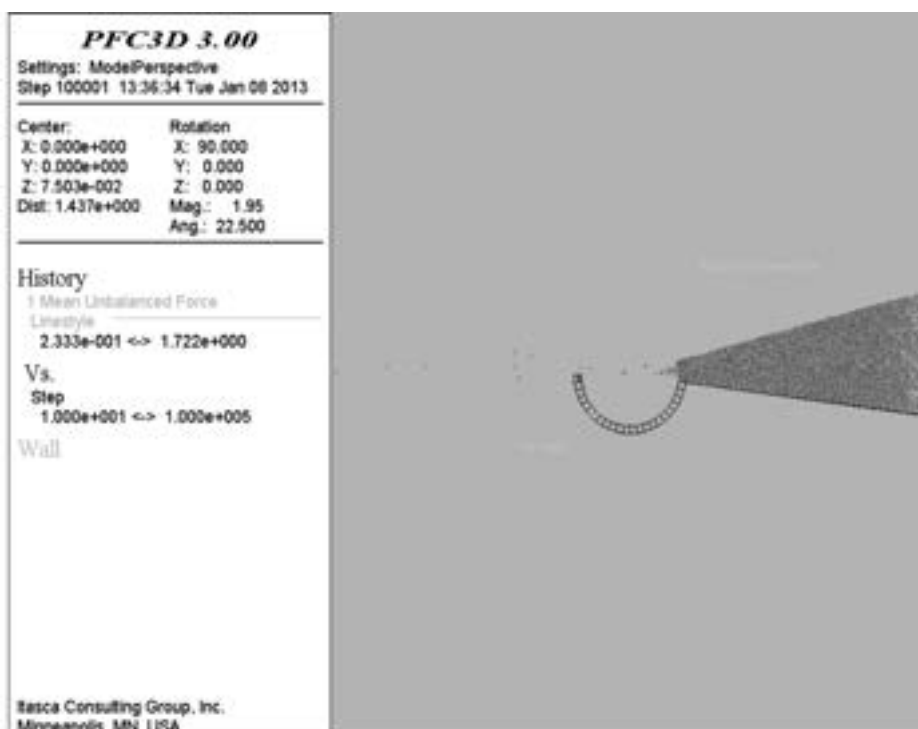
در حالتی که آزمایش بدون گراول پگ انجام می‌شود، تولید ماسه بسیار بیشتر از حالتی است که گراول پگ وجود دارد اما در حالت بدون گراول پگ همراه با تولید ماسه، بار روی دستگاه کاهش می‌یابد تا به مقدار صفر می‌رسد در صورتیکه زمانی که گراول پگ وجود دارد کاهش بار روی دستگاه مشاهده نمی‌شود.

مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار PFC^{3D}

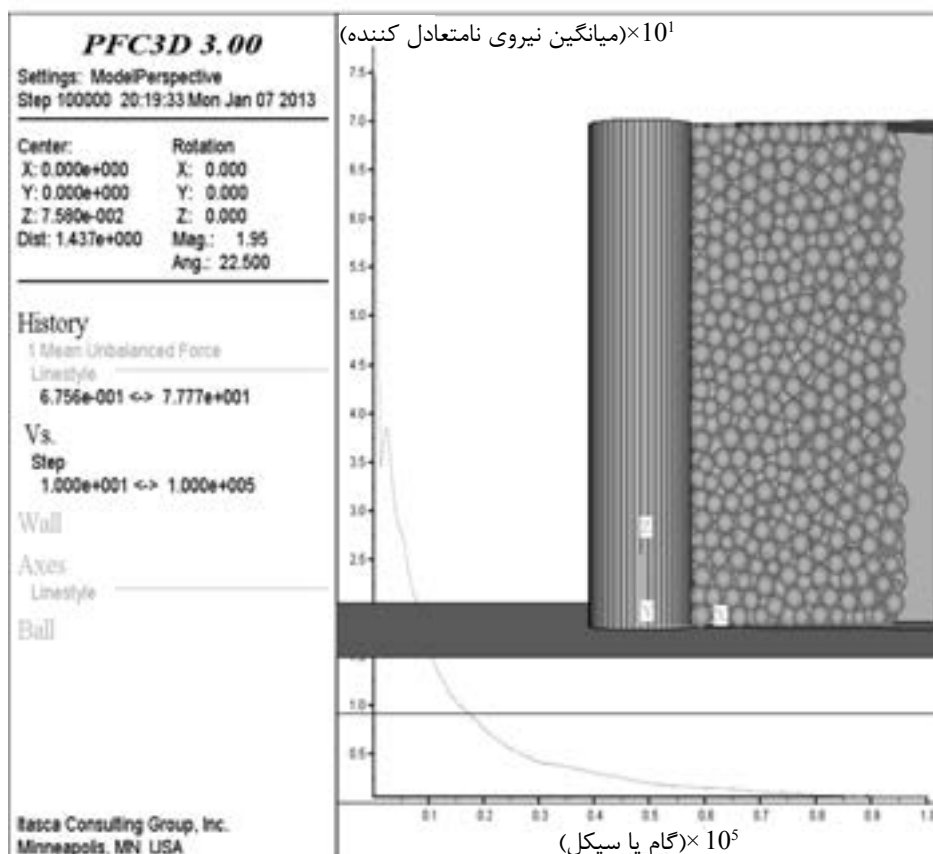
در این تحقیق برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار سه‌بعدی^۱ PFC که بر مبنای روش المان مجزا می‌باشد، استفاده شد. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی ذرات ماسه و مطالعه رفتار ماسه تحت بارهای مختلف بسیار مناسب می‌باشد.

روش المان مجزا با توجه به شبیه‌سازی عددی در مقیاس دانه‌ای، رفتار ذرات مجزای یک سیستم ناپیوسته مانند محیط متخلخل را مدل می‌کند. این روش نسبت به دیگر روش‌ها به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد. به منظور بررسی تاثیر اندازه گراول پگ بر تولید ماسه، پنج مدل با گراول‌های مختلف در محیط نرم‌افزار PFC^{3D} ساخته شد. یک قطاع با زاویه داخلی ۲۲/۵ درجه از مخزن ماسه تحت فشار و چاه مدل شد. در این مدل ۳۰۰۰۰ ذره با شعاع ۰/۲۲ mm تا ۱/۱ mm به عنوان سنگ مخزن ایجاد

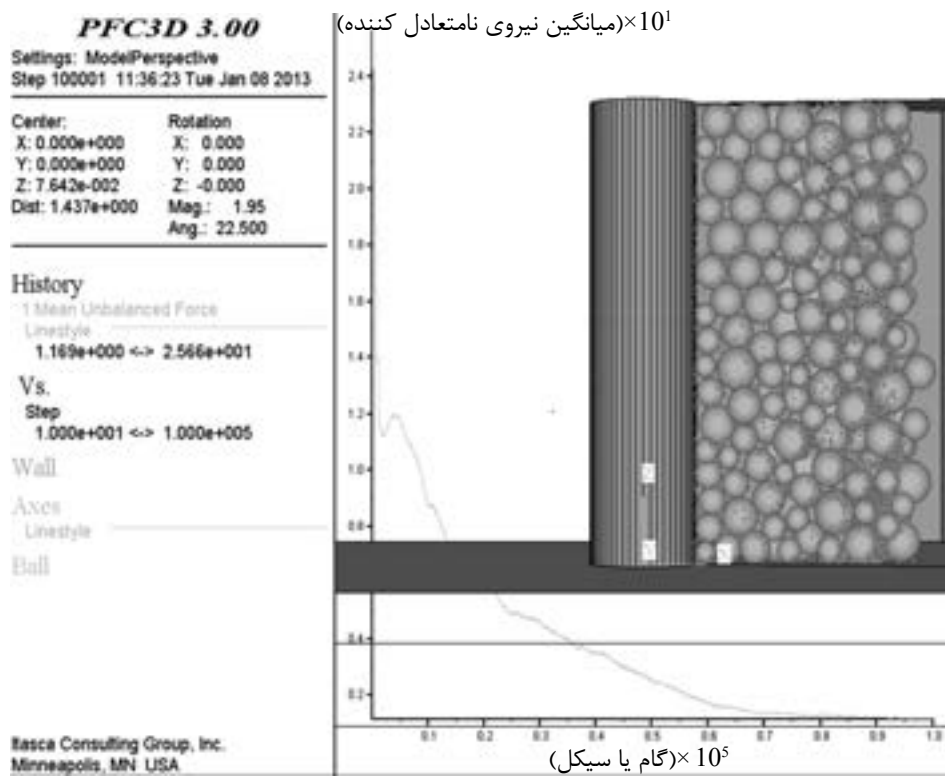
1. Particle Flow Code



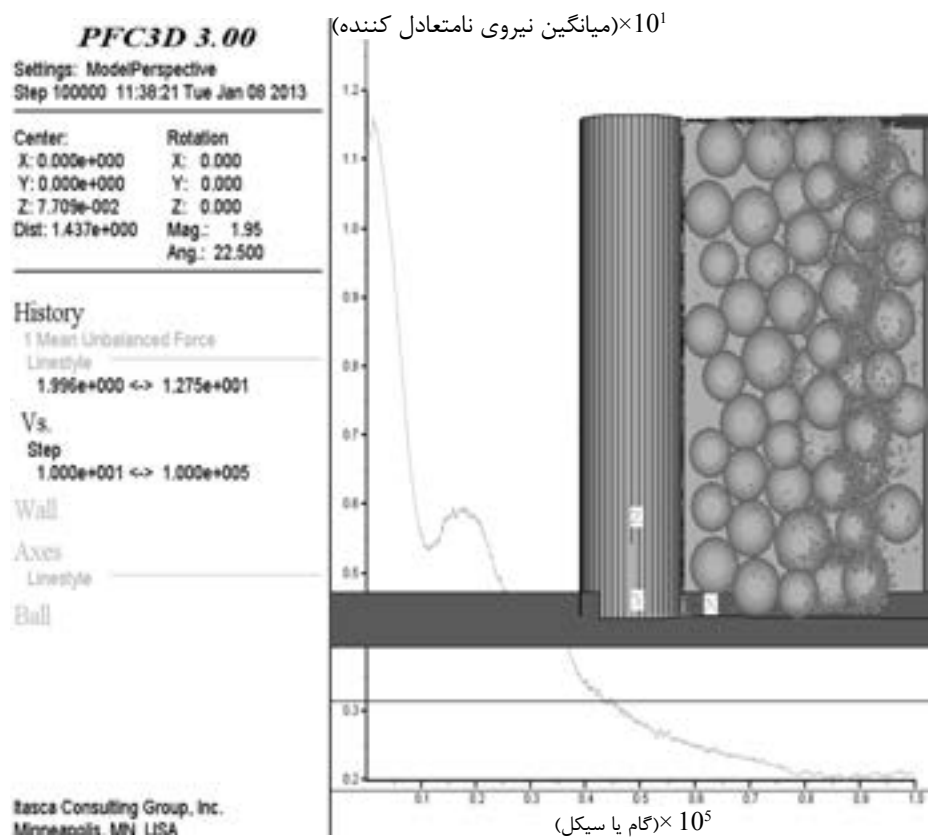
شکل ۶ یک قطاع مدل شده از مخزن و چاه بدون گراول پک (نما از بالا).



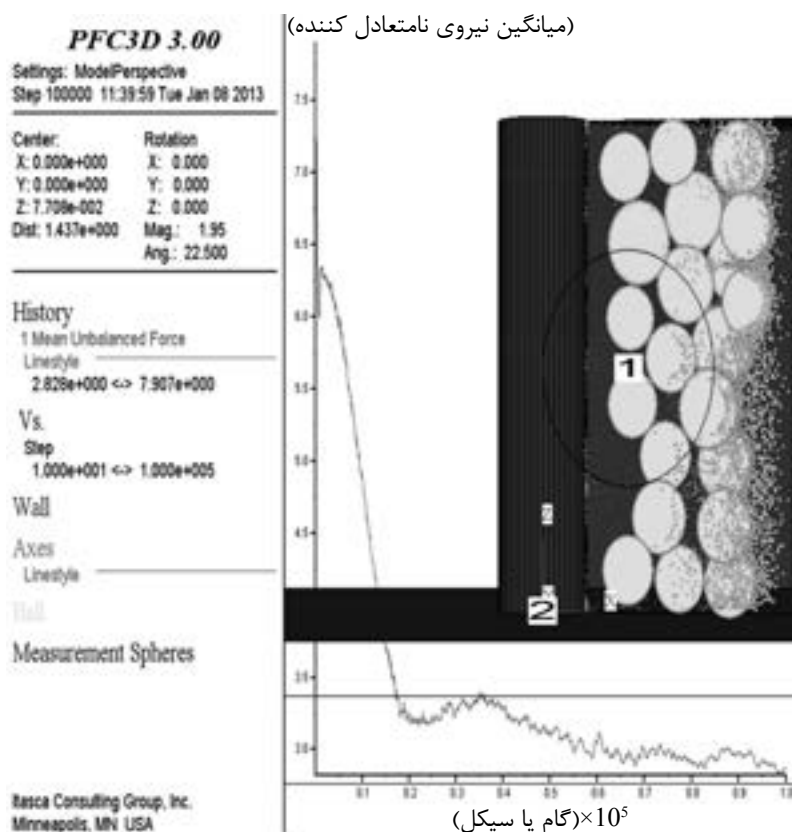
شکل ۷ یک قطاع مدل شده از مخزن و چاه با گراول اندازه ۳/۵ تا ۴/۷۶ mm (نما از جانب).



شکل ۸ یک قطاع مدل شده از مخزن و چاه با گراول اندازه ۴/۷۶ تا ۹ mm (نما از جانب).



شکل ۹ یک قطاع مدل شده از مخزن و چاه با گراول اندازه ۹ تا ۱۲/۶ mm (نما از جانب).



شکل ۱۰ یک قطاع مدل شده از مخزن و چاه با گراول اندازه ۱۲/۶ تا ۱۶/۸ mm (نما از جانب).

نتیجه‌گیری

تا ۹/۲۵ mm باشد. لذا می‌توان پیشنهاد نمود که از لحاظ نرخ تولید سیال و جلوگیری از تولید ماسه، گراول با اندازه ۹ تا ۴/۷۶ mm مناسب‌تر است.

- در حالتی که آزمایش بدون گراول‌پک انجام می‌شود، تولید ماسه بسیار بیشتر از حالتی است که گراول‌پک وجود دارد اما در حالت بدون گراول‌پک همراه با تولید ماسه، بار روی دستگاه کاهش می‌یابد تا به مقدار صفر می‌رسد در صورتی که زمانی که گراول‌پک وجود دارد کاهش بار روی دستگاه مشاهده نمی‌شود.

- نتایج حاصل از مدل‌های عددی نشان می‌دهد که در یک زمان یکسان برای پنج مدل عددی و شرایط یکسان، بیشترین تولید ماسه در حالت بدون گراول و کمترین تولید ماسه در مدل با گراول اندازه ۳/۵ تا ۴/۷۶ mm رخ داد. لذا می‌توان پیشنهاد نمود از لحاظ کنترل تولید ماسه، گراول با اندازه ۳/۵ تا ۴/۷۶ mm مناسب‌تر است.

- با توجه به اینکه در آزمایشات از نرخ‌های جریان متفاوت برای تزریق سیال و نیز فشارهای متفاوت تنش روباره استفاده گردید، به خوبی روشن شد که نرخ تولیدی ماسه (و نیز سیال)، وابستگی شدیدی به این دو مقدار دارد.

- همانطور که در آزمایشات مشاهده گردید، بعد از متوقف کردن پمپ تزریق و اتمام هر آزمایش، پیرامون هر شکاف موجود در دیواره لوله جداری (شبه‌ساز چاه تولید) دو عدسی شکل می‌گیرد که نشان‌دهنده این است که ابتدا ماسه از پیرامون چاه تولید می‌گردد.

- نتایج آزمایشات نشان می‌دهد با جایگذاری گراول‌پک، نرخ تولید ماسه به شدت کاهش می‌یابد و به مقدار صفر می‌رسد.

- نتایج مدل‌سازی فیزیکی نشان می‌دهد که نرخ تولید سیال در حالتی که اندازه گراول ۹ تا ۴/۷۶ mm می‌باشد بیشتر از حالتی است که اندازه گراول ۱۹

مراجع

- [1]. Risnes R., Bratli R. K., and Horsrud P., "Sand stresses around a wellbore," SPEJ, Vol. 22, No. 6, pp. 883-898, 1982.
- [2]. Asgjan M. I., Cundall P. A, and Brady B. H. G., "Mechanical stability of propped hydraulic fractures: A numerical study," Journal of Petroleum Technology, pp. 203-208, 1995.
- [3]. Philip A. and Charlez P. A., *Rock Mechanics*, Vol. 2, Petroleum Application, Editions Technip, Paris, 1997.
- [4]. Bratli R. K. and Risnes R., "Stability and failure of sand arches," SPEJ, pp. 236-248, 1981.
- [5]. Morita N., Whitfill D. L., Fedde Ø. P., and Løvik T. H., "Parametric study of sand-production prediction: Analytical approach," SPE Production Engineering, Vol. 4, pp. 25-33, 1989.
- [6]. Vaziri H. H., Xiao Y., Islam R., and Nouri A., "Numerical modeling of seepage-induced sand production in oil and gas reservoirs," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 36, pp. 71-86, 2002, .
- [7]. Vardoulakis I., Stavropoulou M., and Papanastasiou P., "Hydro-mechanical aspects of the sand production problem," Transport in Porous Media, Vol. 22, pp. 225-244, 1996.
- [8]. Economides M. J., Watters L.T., and Dunn-Norman S., "Petroleum Well Construction," John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [9]. Palmer I. D., McLennan J. D., and Vaziri H. H., "Cavity-like completions in weak sands," SPE 58719, Proceedings of International Symposium on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, U.S.A, 2000.
- [10]. Van Den Hoek P. J., Hertogh G. M. M., Kooijman A. P., de Bree Ph., Kenter C. J., and Papamichos E., Dec. "A new concept of sand production prediction: theory and laboratory experiments," SPE Drilling and Completion, Vol. 15, No. 4, pp. 261-273, 2000.
- [11]. Vaziri H. H., Palmer I. D., McLennan L. and Islam R., "How can sand production yield a several-fold increase in productivity," Experimental and Field Data, 2000.
- [12]. Palmer I., Vaziri H., willson S., Moschovidis Z., Cameron J. and Ispas I., "Predicting and managing sand production: a new strategy", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, U.S.A., Oct. 5-8, 2003.
- [13]. Cundall P. A., "A computer model for simulating progressive large scale movement in blocky rock systems," in Proceedings of the Symposium International Society of Rock Mechanics, 1971.
- [14]. O'Connor R. M., Torczynski J. R., Preece D. S., Klosek J. T., and Williams J. R., "Discrete element modeling of sand production," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol. 34, No. 3-4, pp. 231.e1-231.e15, 1997.
- [15]. Jensen R. P. and Preece D. S., "Modeling of Sand Production with Darcy's Flow Coupled with Discrete Elements," OSTI, 2000.
- [16]. Papamichos L., Li E., and Cerasi P., "Investigation of sand production mechanisms using DEM with fluid flow," In Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics (Eurock '06), pp. 241-247, Liège, Belgium, May 2006.
- [17]. Cheung L. Y. G., "Micromechanics of Sand Production in Oil Wells," Ph.D. Thesis, Imperial College of London, 2010.
- [18]. Zhou Z. Y., Yu A. B., and Choi S. K., "Numerical simulation of the liquid-induced erosion in a weakly bonded sand assembly," Powder Technology, Vol. 211, No. 2-3, pp. 237-249, 2011.
- [19]. Tremblay B., Sedgwick G., and Forshner K., "Imaging of sand production in a horizontal sand pack by X-ray computed tomography," SPE formation Evaluation, pp. 94-98, 1996.