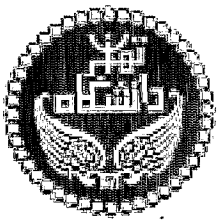
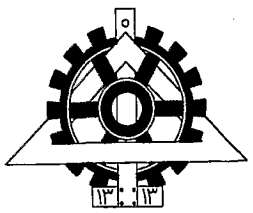
١٠١٤٩

۸۷/۱/۱۰۲۸۱۵
۸۷/۱۱/۱۲





دانشگاه تهران

دانشکده فنی

مدلسازی تولید شن با استفاده از روش اجزاء محدود

نگارش:

امراله علیزاده

استاد راهنما:

دکتر علی وطنی

رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته
مهندسی نفت (مخازن هیدرو کربوری)

دانشکده مهندسی شیمی

۱۳۸۷ /۸/ ۳۱۱۵

خرداد ۱۳۸۷

۱۰۱۵۱۶

بنام خـدا

دانشـگاه تهـران

پـردیس دانشـکده هـای فـنی

دانشـکده مهندسـی شـیمی

گواهـی دفـاع از پایـان نامـه کارشناسـی ارشـد

هیـات داوران پایـان نامـه کارشناسـی ارشـد آقـای امرالـه علـیزاده بـه شـماره دانشـجویی ۸۱۰۴۸۴۰۱۲ در رشـته شـیمی-مخـازن‌هیـدروکربوری بـا عنـوان بررسـی و شـبیه سـازی پدیـده تولیـد شـن بـه روش اتمانهـای محـدود را در تـاریخ ۱۳۸۷/۰۴/۲۹

به عـدد | به حـروف

۱۹	نوزده

ودرجه: عالی | ارزیـابی شـد.

ردیف	مشخصات هیـات داوران	نـام و نـام خـانوادگی	مرتبـه دانشـگاهی	دانشـگاه یـا موسسـه	امضاء
۱	استادراهنما اول داخلی	دکتر علی وطنی	دانشیار	دانشکده مهندسی شیمی	
۲	استادمشاور اول خارجی	سید مهدی رضوی			
۳	استاد مدعو اول داخلی	دکتر پیمان پورافشاری	استادیار	استیتو مهندسی نفت	
۴	استاد مدعو دوم خارجی	دکتر وحید تقی خانی	دانشیار	دانشگاه صنعتی شریف	
۵	نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر حسین بهمنیار	دانشیار	دانشکده مهندسی شیمی	

تـذکر: ایـن برگـه پـس از تکمیـل توسـط هیـات داوران در نخسـتین صـفحه پایـان نامـه درج مـی گـردد.

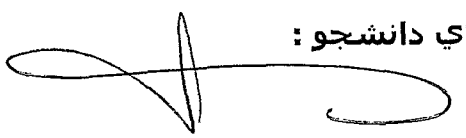
تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب ..احسان...علیزاده..... تائید مي كنم كه مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل كار پژوهشي اینجانب است و به دستاوردهاي پژوهشي دیگران كه در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه قبلاً براي احراز هیچ مدرك هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

كلیه حقوق مادي و معنوي این اثر متعلق به دانشكده فني دانشگاه تهران مي باشد.

نام و نام خانوادگي دانشجو : احسان علیزاده

امضاي دانشجو :



دانشگاه تهران

دانشکده فنی دانشگاه تهران

مدلسازی تولید شن با استفاده از روش اجزاء محدود

نگارش:

امراله علیزاده

استاد راهنما:

آقای دکتر علی وطنی

استاد مشاور:

آقای مهندس سید مهدی رضوی

رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته
مهندسی نفت (مخازن هیدرو کربوری)

خرداد ۱۳۸۷

موضوع:

مدلسازی تولید شن با استفاده از روش اجزاء محدود

توسط:

امراله علیزاده

پایان نامه:

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی نفت (مخازن هیدروکربوری)

از این پایان نامه در تاریخ در مقابل

هیئت داوران دفاع به عمل آمده و مورد تصویب قرار گرفت.

محل امضاء

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده:

مدیر گروه آموزشی:

استاد راهنما:

استاد مشاور:

داور مدعو:

داور داخلی:

چکیده

تولید شن یکی از پدیده های رایج در صنعت نفت است که هر ساله رفع یا جلوگیری از تولید آن هزینه های هنگفتی بر این صنعت تحمیل می کند. در ده سالهٔ اخیر پیشرفتهای چشمگیری برای درک مکانیزم تولید شن انجام شده است اما مکانیزم حقیقی تولید شن هنوز شناخته شده نیست و مدلهای موجود که تولید شن را پیش بینی می کنند کاملا توسعه یافته نیستند، به همین دلیل کاربرد این مدلها یا نرم افزارها بسیار محدود است. هدف اصلی در این پروژه بدست آوردن مدلی می باشد که باعث درک بهتر مکانیزم تولید شن شده و نهایتا نتایج بدست آمده با آنچه از طریق آزمایشگاه بدست آمده است مقایسه خواهد شد. به کمک نتایج حاصل از این پروژه می توان میزان تولید شن و نحوهٔ پراکندگی حفرهٔ ناشی از تولید شن را بعنوان تابعی از تنش وارد شده و تولید نفت حدس زده و آن را تحلیل نمود.

در ابتدا مکانیک تولید سنگ یا شن و چگونگی مدل کردن آن مرورشده است. مکانیک تولید شن از مفاهیم مکانیک سنگ و جریان چند فازی قابل استنتاج است. بعد از آن، بر اساس روشهای مدلسازی که درکارهای قبلی انجام شده و به آن اشاره شده است، مسیر حرکت تعیین و در ادامهٔ آن یک مدل هیدرودینامیکی- مکانیک سنگی ارائه شده است. این مدل با استفاده از قانون بقای جرم که روی سنگ، سیال و مخلوط سنگ و سیال نوشته شده بدست آمده و در آن شن ها، خرده های سنگ هستند که در اثر فرآیند خوردگی از سنگ مخزن جدا می شوند. در این میان مکانیک سنگ نیز بصورت خودبخودی وارد معادلات خواهد شد، چرا که این مفهوم در ذات تغییر شکل نهفته است. واضح است که قوانین مهمی چون قانون Darcy، قانونهای خوردگی یا قانون Mohr-Coulombدر این قسمت به کارگرفته شده اند. در نهایت حل عددی معادلات بدست آمده ارائه شده است که از روش اجزاء محدود که در هم آمیخته با روش نیوتن- رافسون است استفاده شده و صحت آن با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی سنجیده شده است. برای بسط بیشتر موضوع مثالهایی آورده شده اند که دارای فیزیکی بسیار نزدیک به واقعیت هستند و نتایج آنها بسیار رضایت بخش می باشند و تا حد زیادی تئوریهای موجود در مورد مکانیزمهای تولید شن را تایید می کنند.

تقدیر و تشکر

درابتدا وظیفه خود می دانم که از والدین گرامی ام که تا رساندن من به این مرحله رنج بیشماری را متحمل شده اند و هرگز از یاری رساندن و تشویق من لحظه ای فروگذار نکرده اند با کمال خضوع، نهایت سپاس را بجای آورم. در ادامه لازم می دانم با ذکر زحمات و راهنمایی های صمیمانه اساتید راهنما و مشاورم ، جناب آقای دکتر علی وطنی و مهندس مهدی رضوی ، از آنان کمال تشکر را داشته باشم که اگر آنان چراغ راه من نمی شدند رسیدن به سرمنزل مقصود هرگز میسر نمی شد. در پایان، از کلیه اساتید ممتحن و دوستانی که با نظرات، راهنمایی ها و کمک خود مرا در هرچه بهتر انجام دادن این پروژه یاری رساندند قدردانی می نمایم.

فهرست مطالب

۱ *فصل اول : مقدمه* ۱
۱-۱ مقدمه ۲
۱-۲ مواردی که در این پروژه مورد بحث قرارخواهدگرفت ۲
۱-۳ ساختار پایان نامه ۳
۲ *فصل دوم : مروری برکارهای گذشته* ٤
۲-۱ مقدمه ٥
۲-۲ فیزیک تولید شن ٦
۲-۲-۱ *دینامیک تولید شن در مقیاس میکروسکوپی* ۷
۲-۲-۲ *اثرات جریان چند فازی* ۷
۲-۲-۳ *تغییرات تنش در هنگام تولید شن* ۸
۲-۳ انواع فیزیک تولید شن ۹
۲-۳-۱ *گسترش حفره ای* ۹
۲-۳-۲ *حفره کرمی شکل* ۱۰
۲-۳-۳ *گسترش شبکه ای حفره ها* ۱۱
۲-۴ مدلهای تولید شن ۱۲
۲-۴-۱ *روشهای مهندسی یا مفهومی* ۱۳
۲-۴-۲ *روشهای پیوسته* ۱٤
۲-۴-۳ *روشهای ناپیوسته* ۱۷
۲-۵ خلاصه و جمع بندی فصل دوم ۱۹
۳ *فصل سوم : مدل تولید شن در یک سنگ تخریب شده* ۲۱
۳-۱ پیش زمینه ها ۲۲
۳-۱-۱ *روش تک فاز پیوسته* ۲۲
۳-۱-۲ *روش چند فاز پیوسته* ۲۳
۳-۲ فرضیات و تعاریف اولیه ۲۳
۳-۳ مدل ریاضی پیشنهادی ۲۵
۳-۳-۱ *قانون بقاء جرم* ۲۷
۳-۳-۲ *تعادل و تجزیه تنش* ۲۹
۳-۴ قوانین ترکیبی ۳۰
۳-۴-۱ *قوانین ترکیبی برای تشکیل جرم* ۳۱
۳-۴-۲ *قوانین ترکیبی برای جریان سیال* ۳۳
۳-۴-۳ *قوانین ترکیبی برای محیط متخلخل* ۳٤
۳-۵ شرایط اولیه و مرزی ۳۸
۳-۶ جمع بندی فصل سوم ۳۹
٤ *فصل چهارم : حل عددی از طریق روش گالرکین* ٤۰
٤-۱ مقدمه ٤۰

۴-۲ حل به روش المان محدود ٤٢
۴-۳ مثال های عددی ٤٧
۴-۳-۱ *مثال یک بعدی* ٤٧
۴-۳-۲ *تولید شن در اطراف چاه* ٥٢
۴-۳-۳ *تولید شن در اطراف یک چاه سوراخکاری شده* ٥٨
۴-۴ نتیجه گیری فصل چهارم ٦٤
٥ *فصل پنجم : بحث و نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد برای ادامه کار* ٦٥
۵-۱ نتیجه گیری کلی ٦٦
۵-۲ پیشنهاد برای ادامه کار در آینده ٦٧
مراجع ٦٨
ضمیمه الف: بدست آوردن قانون دارسی از قانون بقاء اندازه حرکت ٧١
ضمیمه ب: نحوه بدست آوردن عناصر ماتریس ژاکوبی ٧٣
ضمیمه ج: شکل توابع F و f و Q ٧٧

فهرست شکل ها

شکل ۲-۱ : مکانیزم تولید شن در چاه ٦
شکل ۲-۲: CT Scan از یک حفره کرمی شکل ایجاد شده در توده سنگی متراکم ۱۱
شکل ۲-۳: شبکه حفره های کرمی شکل در اطراف چاه ۱۲
شکل ۳-۱ : المان پایه یا نماینده که در حد چند صد یا چند هزار فضای حفروی است ۲۳
شکل ۳-۲: نحوه تقسیم بندی المان پایه به سه فاز مجزا ۲٤
شکل ۳- ۳: نظریه جابجایی رینولدز ۲٥
شکل ۳- ۴: رابطه میان ضریب تخریب λ و تنش برشی پلاستیک γ_p ۳۲
شکل ۴- ۱: مخزن یک بعدی مش بندی شده ٤۸
شکل ۴- ۲: غلظت شن در محیط سیال در طول زمان و در چاه $(x = ۰)$ ٤۹
شکل ۴- ۳: تاریخچه تخلخل در چاه $(x = ۰)$ ٥۰
شکل ۴- ۴: میزان تولید شن و دبی تولیدی در چاه $(x = ۰)$ ٥۱
شکل ۴- ۵: توزیع تخلخل درطول مخزن در زمانهای مختلف ٥۲
شکل ۴- ۶: المان بندی در اطراف چاه ٥۳
شکل ۴- ۷: توزیع فشار در اطراف چاه در $t = ۱$ Day ٥٤
شکل ۴- ۸: غلظت شن معلق در سیال و توزیع آن در زمان $t = ۰,۳٥$ Day ٥٥
شکل ۴- ۹: توزیع تخلخل در اطراف چاه در زمان $t = ۰,۳٥$ Day ٥٥
شکل ۴- ۱۰: غلظت شن و توزیع آن در اطراف چاه در زمان $t = ۰,٥۹$ Day ٥٦
شکل ۴- ۱۱: توزیع تخلخل در اطراف چاه در زمان $t = ۰,٥۹$ Day ٥۷
شکل ۴- ۱۲: غلظت شن و توزیع آن در اطراف چاه در زمان $t = ۱$ Day ٥۷
شکل ۴- ۱۳: توزیع تخلخل در اطراف چاه در زمان $t = ۱$ Day ٥۸
شکل ۴- ۱۴: المان بندی اطراف چاهی که سوراخکاری شده است ٥۹
شکل ۴- ۱٥: توزیع تخلخل در مخزن در زمان $t = ۰,۳$ Day ٦۰
شکل ۴- ۱۶: توزیع تخلخل در مخزن در زمان $t = ۱,۶$ Day ٦۰
شکل ۴- ۱۷: توزیع تخلخل در اطراف چاه در زمان $t = ۰,۸$ Day ٦۱
شکل ۴-۱۸: توزیع تخلخل در اطراف چاه در زمان $t = ۱,۶$ Day ٦۲
شکل ۴- ۱۹: توزیع فشار در اطراف چاه در زمان $t = ۱,۶$ Day ٦۳
شکل ۴- ۲۰: توزیع شار سیال در اطراف چاه در زمان $t = ۱,۶$ Day ٦۳

فصل اول : مقدمه

۱-۱ مقدمه

فیزیک تولید شن بصورت کاملاً روشن تجزیه و تحلیل نشده است درحالی که نرخ تولید معمولاً به عواملی مانند حرکت شن، مکانیزم گاز محلول و از بین رفتن اثر پوسته ای در اطراف مربوط می باشد. سالها این باور رایج بود که عدم تولید شن به معنی تولید کم می باشد. البته امروزه چنین باوری وجود ندارد، چرا که تکنسین ها و مهندسین قادر هستند تا با روشهای بهینهٔ طبیعی یا مصنوعی تولید مقرون به صرفه ای را انجام دهند. با این وجود تخمین میزان تولیدشن،موضوعی بسیارحیاتی است چراکه امروزه افراد از برنامه های تولیدی بسیار فشرده ای تبعیت می کنند که باعث می شود کوچکترین نکات نیز اهمیت داشته باشند.

برای پیشبرد اهداف لازم است تا یک ابزارکمی در دسترس باشد تا بتواند زمان تولید شن، میزان آن و نحوهٔ تأثیرگذاری آن برتولید نفت را تخمین بزند. اما واضح است که دستیابی به چنین ابزاری بدون درک مفاهیم تولید شن به عنوان تابعی از زمان، تنشهای درجا و القاء شده، نرخ تولید نفت و تغییرات در تخلخل و استحکام مخزن در نواحی مختلف امکانپذیر نمی باشد. بصورت کلی چنین مسئله ای می تواند در برگیرندهٔ علومی مانند جریان چند فازی، گاز محلول در نفت، محلی سازی تنشها و... باشد. بدین صورت واضح می شود که بررسی مسئله تولید شن و نحوهٔ برخورد با آن نیازمند مطالعات و تحقیقات گسترده ای می باشد که در این پروژه سعی می شود حتی الامکان قسمتهایی از آن مورد تحلیل قرارگیرد.

۱-۲ مواردی که در این پروژه مورد بحث قرار خواهدگرفت

در ده سالهٔ اخیر پیشرفتهای چشمگیری برای درک مکانیزم تولید شن انجام شده است اما مکانیزم حقیقی تولید شن هنوز شناخته شده نیست و مدلهای موجود که تولیدشن را پیش بینی می کنند کاملاً توسعه یافته نیستند، به همین دلیل کاربرد این مدلها یا نرم افزارها بسیار محدود است. در نتیجه ، هدف اصلی در این پروژه بدست آوردن مدلی می باشد که باعث درک بهتر مکانیزم تولید شن می شود و نهایتاً نتایج بدست آمده با آنچه از طریق آزمایشگاه بدست آمده نیز مقایسه شده است. نتیجهٔ این پروژه کمک خواهد کرد تا بتوان میزان تولید شن و نحوهٔ پراکندگی حفرهٔ ناشی از تولید شن را بعنوان تابعی از تنش وارد شده و تولید نفت حدس زده و آن را تحلیل نمود. برای میل به چنین هدفی، این پروژه بر روی مفاهیم وگامهای زیر متمرکز شده است :

- تعیین و درک فیزیکی و مکانیکی فرآیند تولید شن که به سازند و توسعهٔ حفرهٔ ناشی از تولید شن مرتبط است ، با مروری بر تحقیقات گذشته و تحلیل داده های آزمایشگاهی موجود.
- پیشنهاد یک مدل مکانیک سنگی و هیدرودینامیکی بصورت همزمان که بر پایهٔ چگونگی تخریب سنگ از نظر مکانیکی درکنار اثرات جریانی باشد.

- پیشنهاد یک حل عددی غیر نوسانی که بر نوسانات حاصل از حل معادلات موجود غلبه کند. این نوسان در پاسخهای عددی ناشی از وجود جملات بزرگ گرادیانی و غیرخطی بودن شدید معادلات موجود است.
- بررسی و امتحان حل بدست آمده برای پیش بینی تولید شن و همچنین ارزیابی نحوهٔ پیش بینی آن در عملکرد چاه.

۱-۳ ساختار پایان نامه

همانطوری که گفته شد هدف اصلی این پروژه مدلسازی تولید شن و مکانیک پنهان شده در پشت آن است. بعلت پیچیدگی این موضوع سعی شده است تا تمرکز اصلی پروژه روی مفاهیم هیدرودینامیکی و مکانیک سنگی تولید شن باشد.

در فصل دوم مکانیک تولید سنگ یا شن و چگونگی مدل کردن آن مرورشده است. مکانیک تولید شن از مفاهیم مکانیک سنگ و جریان چند فازی قابل استنتاج است. بعد از آن، بر اساس روشهای مدلسازی که درکارهای قبلی انجام شده و به آن اشاره شده است، مسیر اصلی در این پروژه تعیین خواهد شد. در ادامهٔ آن و در فصل سوم یک مدل هیدرودینامیکی- مکانیک سنگی ارائه شده است. این مدل با استفاده از قانون بقای جرم که روی سنگ، سیال و مخلوط سنگ و سیال نوشته شده است بدست می آید و در آن شن ها، خرده های سنگ هستند که در اثر فرآیند خوردگی از سنگ مخزن جدا می شوند. در این میان مکانیک سنگ نیز بصورت خودبخودی وارد معادلات شده است، چرا که این مفهوم در ذات تغییر شکل نهفته است. واضح است که قوانین مهمی چون قانون Darcy ، قانونهای خوردگی یا قانون Mohr-Coulomb در این قسمت به کمک ما خواهند آمد.

فصل چهارم به حل عددی معادلات بدست آمده پرداخته است و توسط روش اجزاء محدود که در هم آمیخته با روش نیوتن- رافسون است به حل معادلات بدست آمده درفصل قبلی پرداخته شده است و درادامه اثرات پارامترهای مختلف مخزن روی این روش حل بررسی خواهیم کرد. یکی از نکات مهم که رفع نوسان موجود در حل عددی این معادلات است. این نوسان که در روشهای حل معمول وجود دارد ناشی از وجود ترم هدایت بزرگ در معادلات است که با ایجاد ناهمسانی شدید درتراوایی سنگ مخزن تشدید هم می شود.

فصل دوم : مروری بر کارهای گذشته

در سال ۱۹۹۲ shaughnessy ، Penberthy گزارش کردند که قریب به ٪۷۰ نفت و گاز موجود در جهان در مخازن سنگی غیر یکپارچه وجود دارند. این نوع مخازن می توانند مخازن نفت سنگین یا سبک را شامل شوند که در حین تولید شن نفت هم تولید می کنند[۱]. تولید شن که در اثر نیروی چسبندگی سیال درحین تولید پدید می آید به عنوان یک پدیدهٔ موثر در افزایش بهره دهی چاه شناخته می شود. چندین بار در مخازن مختلف مانند مخازن نفت سنگین Alberta گزارش شده است که پس از تولید شن، بهره دهی چاه چند برابر شده است و مقدار نفت بدون شن تا ٪۴۴ افزایش پیدا کرده است[۲،۳]. اما درعین حال خروج مقدار متنابهی شن از درون چاه باعث بوجود آمدن مشکلاتی نظیر عدم ثبات دیوارهٔ چاه ، تخریب ابزار آلات و مشکلات محیطی دیگری می شود که برطرف کردن آنها پرخرج می باشد. بنابراین درک مکانیزم تولید شن برای یافتن راهی که منجر به تولید بیشینه نفت، همراه با کمترین تولید شن باشد، ضروری به نظر می رسد.

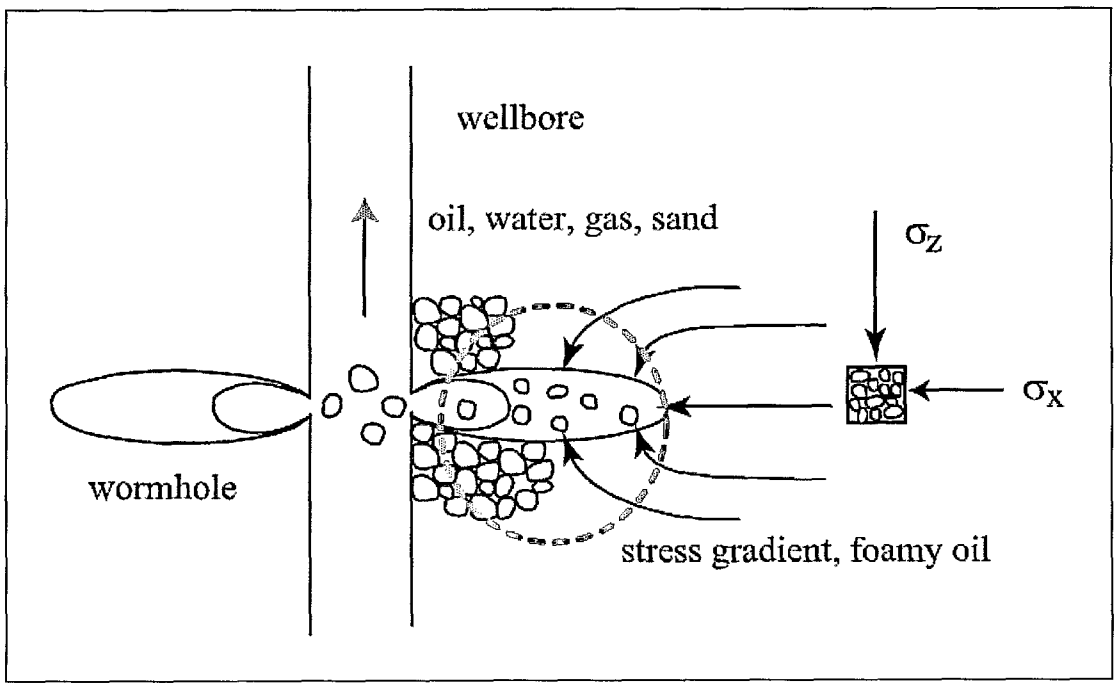
۲-۱ مقدمه

تولید شن یک فرآیند خوردگی مانند است که در اطراف نوک سوراخکاریهای درون سنگ مخزن و در اثر حرکت سیال به همراه تغییرات تنشی موجود پدیدار می شود. معمولاً بصورت تئوری این پدیده باعث افزایش بهره برداری از نفت یا گاز موجود می شود که به دلیل کاهش اثر پوسته ای می باشد. در سال ۱۹۹۳ Dusseault نشان داد که جریان $(\frac{m}{D}^3)$ ۱۵-۵ (با ٪ ۳-۱شن) یا جریان $(\frac{m}{D}^3)$ ۱۲-۵ (با ٪۱۴- ۶ شن) به حدود $(\frac{m}{D}^3)$ ۲- ۰ کاهش خواهد یافت، اگر جریان تولید شن درآنها متوقف شود [۳]. در جای دیگر Poon و همکارانش نشان دادند که تراوایی موثر بعد از تولید شن و بستن چاه در یک تست Build-up سه برابر خواهد شد[۴].

اما درکنار مزایای قید شده در بالا ، معایب زیادی هم نظیر عدم پایداری دیواره چاه ، خوردگی لوله ها، گرفتگی لوله ها و وسایل سرچاهی ، ازمدارخارج شدن لوله ها در عملیات ، نشست زمین و مشکلات محیط زیستی ناشی از انباشته کردن شنها در سطح زمین در اثر تولید شن حاصل می شود. این سری مشکلات موجود ، در سال صدها میلیون دلار هزینه را به صنعت نفت تحمیل می کند. در برخی از چاهها، تولید شن ممکن است باعث تعلیق چاه شود بخصوص هنگامی که حفره های کرم مانند ایجاد شده خود را به آبده برسانند. به همین دلیل نیاز است تا مکانیزم تولید شن را شناخت و با مدیریت این مشکل و طراحی روشهای بهینه تولید که بوسیلهٔ آن بتوان میزان تولید شن را کنترل کرد بر آن غلبه کرد. اگر بصورت کلی بخواهیم این مسئله را بررسی کنیم ، علم تولید شن شامل علومی مانند جریان چند فازی، جریان کف آلود نفت، پایداری دیوارهٔ چاه ، تنش های محلی و شناخت آنها و چگونگی رفتارحفره های خالی و تراوایی آنها می شود.

۲-۲ فیزیک تولید شن

تولید شن زمانی اتفاق می افتد که نیروهای وارده بر یک ذرهٔ سنگ از طریق سیال بیشتر از نیروی پیوستگی بین آن ذرهٔ سنگ و کل سنگ باشد. در این حالت ذرهٔ سنگ از آن جدا شده و همراه سیال وارد چاه می شود. این تولید سنگ ریزه ها یا همان شنها ممکن است باعث بسته شدن ته چاه، تخریب پمپ ها و لوله ها و غیره شود. تولید شن باعث ایجاد حفره هایی در اطراف چاه هم می شود که این حفره ها دیواره چاه را ناپایدار می کنند و ممکن است نهایتاً باعث تخریب دیواره چاه به درون آن شود. این فرآیند در شکل ۲-۱ نشان داده شده است :



شکل ۲-1 : مکانیزم تولید شن در چاه

برای تحلیل بهتر این فرآیند Morita و همکارانش تولید شن را به چند قسمت مجزا که در درون مخزن یا چاه اتفاق می افتد تقسیم کرده است[2]. ابتدا یک حالت گذرای کوچکی وجود دارد که طی آن دانه شن تحت کوچکترین تنشی از روی دیواره کنده می شود. در این حالت دیواره سنگی از حرکت شن جلوگیری می کند و بعنوان یک حمایت کننده آن را جذب کند. اما با افزایش گرادیان فشاری، مقدار بیشتری از ذرات کنده خواهند شد و دیوارهٔ حفره پایداری خود را از دست می دهد.
در مرحلهٔ بعدی که حفره به اندازه کافی بزرگ می شود، میزان تولید شن دوباره کم می شود. اما این آخرین مرحله نمی باشد و امکان دارد تولید شن دوباره بازگشت کرده و دو مرحلهٔ قبلی را دوباره تکرار کند که این موضوع بستگی زیادی به تغییرات گرادیان فشاری دارد.

در سال۲۰۰۲ Vaziri و همکارانش تولید شن را به دو قسمت فشار القاء شدهٔ ابتدائی و فشار القاء شدهٔ انتهایی تقسیم کردند[۵]. در قسمت اول تولید شن در اوایل تولید و بخاطر گرادیان فشار شدیدی است که در ابتدای تولید به سیال وارد می شود. در اثر نیروهای کششی و چسبندگی موجود بین سنگ و سیال، سیال به آن اندازه نیرو وارد می کند که ذرهٔ سنگ را جدا کند و بر نیروهای مقاومتی آن غلبه کند. حالت دوم و انتهایی هنگامی اتفاق می افتد که تولید آب داشته باشیم. واضح است که آب علاوه بر سست کردن پیوند های بین سنگی با تغییر شدید در نیروهای مویینگی باعث افزایش نیروهای وارد بر ذرهٔ سنگی شده و آن را به حرکت درمی آورد.

۲-۲-۱ دینامیک تولید شن در مقیاس میکروسکوپی

تولید شن ممکن است در مقیاس چاه به نظر برسد، اما حقیقت این است که این فرآیند یک پدیده میکروسکوپی است و تنها برای یک ذره اتفاق می افتد و در مقیاس بزرگ و در اثر جمع شدن این ذرات است که مشکل تولید شن ظهور پیدا می کند. هنگامی که یک ذرهٔ شن یا همان ذرهٔ سنگ می خواهد از کل سنگ کنده شود، نیرویی که از طرف کلیهٔ ذرات همسایه به آن وارد می شود افزایش پیدا می کند چرا که بایستی برآیند نیروهای وارد بر آن صفر باشد تا ذره حرکتی نکند، در نتیجه نیرویی که از خارج به آن ذره وارد می شود میان ذرات همسایه آن تقسیم می شود. حال واضح است که اگر کشش وارد به این ذره از طرف سیال از حد تحمل ذرات همسایهٔ آن بیشتر شود، این ذره کنده شده و وارد سیال عبوری می شود. لذا اگر بتوان میزان این نیروهای بین ذره ای در سنگها را مورد تحلیل قرار داد، می توان میزان تولید شن را در شرایط مختلف تولید یا گرادیان فشار بدست آورد.

این نوع نگرش میکروسکوپی به موضوع اهمیت گرادیانهای فشاری محلی را چند برابر می کند، چرا که تولید شن خود بر میزان تخلخل و تراوایی محلی تأثیر دارد. این موضوع بیان می کند که ممکن است بر اساس گرادیان فشار کلی موجود در اطراف چاه، شرایط پایداری دیواره یا حفره ایجاد شده باشد، اما در عین حال تولید شن همچنان پا برجا باشد.

۲-۲-۲ اثرات جریان چند فازی

بعلت اینکه یکی از عوامل و شاید مهمترین عامل تولید شن، نیروی چسبندگی بین سنگ و سیال باشد، معمولاً لازم است تا نحوهٔ این تقابل مورد مطالعه قرار گیرد. بعنوان مثال یکی از مکانیزمهایی که علاوه بر تولید نفت و کمک به تولید آن بعنوان یک مکانیزم موثر باعث تولید شن نیز می شود در اینجا مورد بررسی قرار گرفته است.

مکانیزم گاز محلول در نفت یکی از مکانیزمهای شناخته شده در تولید نفت است. در این مکانیزم با افت فشار مخزن و رسیدن نفت به نزدیک نقطهٔ حباب، حبابهای گاز در سراسر نفت تشکیل می شوند که انبساط شدید آنها تا هنگامی که به هم پیوسته نشده اند و تشکیل فاز مستقلی را نداده اند بسیار مفید است و باعث تشدید تولید نفت می شود. در این حالت نفت یک حالت کف آلود بخود گرفته است و حبابهای بسیارکوچکی سرتاسر محیط مایع را پر کرده اند. حال هنگامی که این حبابها و مایع کف آلود به سمت چاه حرکت می کنند و تحت افت فشار بیشتر قرار می گیرند، افزایش سریع حجم این حبابها به دیواره ها که همان ذرات سنگ باشند فشار وارد می کند و در نتیجه آن تولید شن یا به عبارت دیگر کنده شدن ذرات سنگی افزایش پیدا می کند. این نوع تاثیرجریان کفی نفت بر میزان تولید شن توسط بسیاری از محققان درگذشته دیده شده است [۱۰-۶]. به هرحال اثرات متقابلی که سیالات در هنگام حرکت بر یکدیگر دارند و همچنین اثر حرکت مخلوطی از گاز و مایع، یا به عبارت دیگر چند سیال، بر دیواره سنگی مورد توجه و مطالعه بسیاری از محققین بوده است[۱۴-۱۱].

۲-۲-۳ *تغییرات تنش در هنگام تولید شن*

هنگامی که از سازندهای غیر یکپارچه تولید انجام می شود، دانه های شن سعی می کنند تا با تشکیل یک پل بر روی دهانهٔ سوراخ ورودی به چاه نیروی وارده از طرف سیال در حال حرکت را به دو تنش شعاعی و مماسی تجزیه کنند. با توجه به اینکه این ساختار گنبدی شکل از نظر استاتیکی پایدار است، این پدیده می تواند تا حد زیادی به کاهش تولید شن کمک کند، اما بر سر پایداری این ساختار اختلاف نظر وجود دارد و برخی بر این عقیده هستند که این ساختار همیشه پایدار است در حالی که دیگران بر این عقیده هستند که تنها در دبی های پایین یا در دبی های غیر متلاطم این ساختار پایدار است و در غیر از آن پایداری آن با افزایش دبی کم می شود[۱۶-۱۵]. نکته جالبی که بدست آمد این بود که شنهایی که بصورت صیقلی و صاف هستند و شکل کروی مانندی دارند هرگز تشکیل پل نمی دهند در حالی که ذرات شنی لبه دار و نوک تیز بسادگی در تشکیل پل در اطراف دهانه سوراخکاری شرکت می کنند.

در ادامه چنین نتیجه گیری شد که این پلها تا هنگامی که تنش وارد به آنها به حد مشخصی برسد پایدار هستند و سپس درهم می شکنند اما درهمین تنش هم دوباره پل جدیدی حاصل خواهد شد که ساختار جدید پایداری بیشتر از قبل خواهد داشت، چرا که در تنش بالاتری تشکیل شده است.

در نهایت این نتیجه گیری حاصل شد که استحکام این پل و تشکیل آن به میزان کشش و تنش وارده ،فشار محیط و سیال، دبی تولیدی سیال و شکل دانه های شن بستگی دارد[۱۷] .تخریب این پلها به دو صورت ممکن است اتفاق بیفتد ، یکی بر اثر نیروی فشاری و فشرده سازی دانه های شن به یکدیگر و دوم براثر نیروی کششی بین سیال و دانه های شن. سیال دو نوع نیرو در اثر حرکت به دانه های شن سر راه خود وارد می کند، حالت اول این است که سیال دانه هایی که در مجاورت هم قرار دارند

را به هم بیشتر فشار می دهد و در این حالت بسته به جنس دانه های سنگ ممکن است آنها واکنشهایی نظیر ارتجاع یا خرد شدن نشان دهند و این عکس العملها ممکن است باعث لغزش دانه ها روی هم شود و از طرف دیگر ممکن است با خرد شدن آنها کل پل تخریب شود. درحالت دوم، حرکت سیال در مجاورت دانه های بیرونی پل باعث ایجاد یک نیروی کششی در آنها شده و ممکن است بتواند آنها را همراه خود کشیده و به داخل سیال ببرد و این زمینه سازی برای از بین رفتن پل تشکیل شده است[۱۹-۱۸] .در نتیجه می توان گفت که هر نوع مدلی که برای تولید شن پیشنهاد شود بایستی کلیه تنشهای موجود در اطراف چاه و مخزن را بتواند مدل کند.

۲-۳ انواع فیزیک تولید شن

فیزیک تولید شن هنوز بدرستی شناخته نشده است. تئوریها و فرضیات زیادی وجود دارند که بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی یا میدانی بدست آمده اند. بصورت ابتدایی، دو نوع فیزیک برای تولید شن و مدلسازی آن در نظر گرفته می شود. اول نوع حفره ای می باشد که محدود به اطراف چاه است و دوم نوع کرم مانند می باشد که در درون سازند پیشرفت می کند. اینکه تولید شن به کدام نوع فیزیک مربوط می باشد، بستگی به عوامل زیادی مانند گرادیان فشار سیال، مکانیزم گاز محلول موجود، عدم همسانی سنگ مخزن و غیره دارد. در ذیل به دو نوع فیزیک تولید شن اشاره خواهیم کرد :

۲-۳-۱ گسترش حفره ای

در سال ۱۹۹۸ Dusseault و همکارانش چنین عنوان کردند که گسترش حفره ای را می توان بصورت سه ناحیه استوانه ای هم مرکز بیان کرد. از سمت چاه این سه ناحیه عبارتند از : ناحیهٔ مخلوط مایع، ناحیهٔ خرد شدهٔ سنگی و ناحیه انتقالی[۲۰] . براساس تحقیقPalmer و همکارانش، کلیه حفرات ایجاد شده در اطراف چاه دارای شکل استوانه ای نیستند و این حفرات می توانند بصورت کروی، مخروطی یا بصورت صفحه ای باشند که این شکل گسترش ، بستگی به جنس سنگ پوشینه و سنگ مخزن دارد. از طرف دیگر کاهش سریع تولید شن به میزان ٪۵-۲ پس از گذشت یکسال از تولید نشان می دهد که شکل حفره بصورتی است که سریعاً خود را به شیب پایدار می رساند تا تولید شن و کنده شدن خرده سنگ از روی دیواره به حداقل برسد. چنین مفهومی نشان می دهد که شکل گسترش حفره مخروطی می باشد ، درعین حال باید درنظر داشت که وجود یک چنین ناحیه ای در اطراف چاه که در واقع محیطی خالی است و در آن خرده سنگها بصورت معلق درسیال هستند، باعث افزایش چشمگیر تخلخل در اطراف چاه می شود. این موضوع از طریق چاه پیمایی به اثبات رسیده است و مقدار تخلخل حدود ٪۴۶-۴۲ در پشت جداره گزارش شده است[۲۰].