

مقاله پژوهشی

## بهینه سازی مشبک کاری چاه های نفتی بر اساس تنش ناهمسانگرد و مدل ژئومکانیکی

احمد رضا خدایاری<sup>۱</sup>؛ احسان طاهری<sup>۲\*</sup>؛ کامران گشتاسبی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکترای تخصصی؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ایران

۲. استادیار؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ایران

۳. استاد؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg/2022.33140.1160

### چکیده

پس از حفر چاه و برای دستیابی به ماده نفتی از سازند حفاری شده با توجه به اطلاعات موجود و دریافت شده از تصویرگرا، نقاطی که احتمال وجود ماده نفتی در آن ها بیشتر است، مشخص می گردد. در مرحله بعد در نقاط مشخص شده مشبک کاری می شود. مشبک کاری لایه بهره دهی فرآیندی بسیار مهم و تاثیر گذار در عملیات تکمیل چاه خواهد بود. در واقع می توان گفت که پس از حفر چاه، مشبک کاری کلید اصلی دستیابی به نفت در مخازن هیدروکربنی است. در این پژوهش ابتدا به معرفی انواع روش های مشبک کاری و فرآیند های مربوط به تکمیل چاه پرداخته شده است. سپس بر اساس داده های اولیه مربوط به یکی از سازند های جنوب غربی کشور عزیزمان ایران، مدل سازی سه بعدی به وسیله نرم افزار *Flac3D* برای تعیین جهت بهینه مشبک کاری و تولید بیشتر انجام شده است. برنامه استاتیکی-دینامیکی *Flac3D* آنالیز سریع و پیوسته لاگرانژی را به وسیله روش تفاضل محدود یا همان *FDM* انجام می دهد. در این مدل سازی از مدل رفتاری *Strain softening/hardening* استفاده شده است. در راه دستیابی به تولید بیشتر ماده نفتی، مقدار تولیدی ماسه یا همان *Sand production* با بررسی زون های پلاستیک تشکیل شده و میزان جابه جایی نقاط مختلف چاه در محیطی با آنیزوتروپی تنش تجزیه و تحلیل شده است. نتایج نشان می دهد که زاویه بهینه مشبک کاری در جهت تنش افقی مینیمم یعنی همان  $\sigma_{H1}$  بوده و در این زاویه مقدار جابه جایی ابتدا و انتهای مناطق مشبک کاری شده بسیار کمتر از حالات دیگر بوده است. البته از تاثیر چگالی مشبک کاری در یک نقطه نیز نمی توان صرف نظر نمود.

### واژگان کلیدی

مشبک کاری، آنیزوتروپی تنش، *Flac3D*، تولید ماسه، *strain softening/hardening*

### ۱. پیش گفتار

برسد [۲]. تولید ماسه در حین تولید هیدروکربن یکی از مهمترین نگرانی های بسیاری از شرکت های فعال است، زیرا این مشکل محدودیت های عملیاتی زیادی ایجاد می کند [۳]. هجوم ماسه به داخل چاه ممکن است به مشکلات مختلفی از جمله فرسایش دریچه ها، فرسایش خطوط لوله و وجود ماسه در نفت تولیدی منجر شود. علاوه بر ضرر اقتصادی به دلیل محدودیت های تولید، فرسایش ناگهانی تجهیزات تولید در چاه های گاز با فشار بالا نیز یک خطر اصلی است. پیش بینی تولید بالقوه ماسه نقشی اساسی در طراحی تکمیل و برنامه ریزی تولید دارد [۴]. امروزه طراحی مشبک کاری

مشبک کاری به عنوان مهم ترین عملیات تکمیل چاه به طور گسترده ای برای ایجاد جریان بین ساختمان مخزن و چاه مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. مهم ترین بخش در تکمیل چاه، مشبک کاری لایه بهره ده است. تکمیل چاه توسط مشبک کاری نقشی حساس در تولید هیدروکربن دارد. به طور کلی این عمل به این معنی است که بین لایه تولید کننده و داخل چاه ارتباط برقرار شود که به این منظور بایستی لوله جداری، سیمان پشت لوله و بخشی از سازند سوراخ شود تا نفت و گاز از سازند به درون چاه و سرانجام به سطح زمین

طبیعی در محور Shooting) بیشتر و بهتر کنترل می‌شود تا تنش در جهت نفوذ [۱].

ژیاثور ونگ و همکاران (۲۰۱۸)، مقاله‌ای با موضوع مدل هیدرومکانیکی فرسایش ماسه برای شبیه سازی تولید ماسه انجام دادند. آن‌ها برای شبیه سازی واقعی تولید ماسه با در نظر گرفتن کوپل بین شکست مکانیکی و فرسایش هیدرومکانیکی سنگ از روش المان محدود استفاده نمودند. آن‌ها بیان داشتند که آزمایشات مدل ممکن است برای بررسی مکانیسم‌های فیزیکی تولید ماسه و ارزیابی تأثیر نسبی پارامترهای عملیاتی مختلف استفاده شود. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که در اصل تولید ماسه با کرنش پلاستیک و سرعت سیال در اطراف چاه کنترل می‌شود. بقیه پارامترها از جمله افت، تنش برجا و جهت گیری مشبک کاری نیز در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت [۹].

ژاو و ژینژو و همکاران (۲۰۱۷)، مقاله‌ای با موضوع شبیه‌سازی عددی شکستگی چندمرحله‌ای و بهینه‌سازی مشبک کاری در یک چاه افقی را انجام دادند. آن‌ها با هدف تجزیه و تحلیل مسائل مربوط به رشد غیریکنواخت شکستگی‌های هیدرولیکی متعدد ناشی از سایه تنش، یک مدل عددی با در نظر گرفتن الاستو-هیدرودینامیک، تداخل تنش و توزیع جریان به شکستگی‌های مختلف ارائه دادند. بر اساس این مدل، آنها اثر اصطکاک مشبک کاری، فاصله گروه حفره‌ها، مدول یانگ سنگ و گرانی سیال شکستگی بر رشد چندین شکستگی را بررسی نمودند. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که رشد شکستگی هیدرولیک با اصطکاک مشبک کاری نسبتاً یکنواخت است. کاهش فاصله مشبک کاری خوشه‌ای، افزایش مدول یانگ یا ویسکوزیته سیال باعث کاهش برخی از عرض شکستگی‌ها و توزیع جریان ناهموار به این شکستگی‌ها می‌شود، در نتیجه رشد غیریکنواخت شکستگی‌های متعدد را تشدید می‌کند. پارامترهای مشبک کاری یک چاه افقی با روش پیشنهادی آن‌ها در این مقاله محاسبه شده است، نتایج شبیه‌سازی و عملکرد شکستگی واقعی نشان داد که پارامترهای مشبک کاری بهینه می‌توانند به طور مؤثری رشد یکنواخت شکستگی‌ها را حفظ کنند [۱۰].

امین جوانمردی (۱۳۹۵)، شمسی پایان نامه ای با عنوان

به‌عنوان جزئی از مرحله تکمیلی است که خود متأثر از شرایط مخزن، ویژگی‌های سازند و شرایط چاه مورد نظر می‌باشد. از آغاز آزمایش‌های مربوط به چاه به‌منظور ارزیابی مخزن تا مراحل تکمیلی، مشبک کاری، مکمل اکتشاف و حفاری به‌منظور تولید نفت و گاز، تولید درازمدت چاه و نیز بازیافت کارآمد هیدروکربن می‌باشد [۵]. بهینه‌سازی پارامترهای مشبک کاری در بخش‌های تقسیم شده در فواصل افقی به همگن سازی جریان ورودی از مخزن کمک می‌کند و بنابراین برای افزایش بازیابی نفت از اهمیت بالایی برخوردار است [۶]. انتخاب صحیح در جهت‌گیری عملیات مشبک کاری در چاه‌ها می‌تواند ریسک شروع به ماسه شدن را کاهش دهد [۷].

فان هوا ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)، مقاله‌ای با موضوع بهینه‌سازی جهت پیشروی مشبک کاری برای کاهش فشار شروع شکستگی از چاه انحرافی انجام دادند. آن‌ها بیان داشتند که توزیع تنش کلی در اطراف سوراخ تونل با توجه به تأثیر پوشش، محفظه تونل و نفوذ سیالات به‌منظور توسعه روش بهینه‌سازی جهت مشبک کاری (OPT1) برای شکست هیدرولیکی چاه محفظه انحرافی، به‌دست آمده است. آن‌ها از مدل‌های منتشرشده و نتایج میدانی برای تأیید منطقی بودن مدل ارائه‌شده استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که مسیر چاه و جهت مشبک کاری به علت وجود توده‌ای در میدان تنش برجا، تأثیر قابل توجهی در فشار شروع شکستگی (FIP<sup>2</sup>) دارد. بزرگی نسبی فشار عمودی، حداکثر فشار افقی و حداقل فشار افقی تأثیر معنی‌داری بر FIP و تأثیری جزئی در جهت بهینه مشبک کاری دارد [۸].

پیمان نوروزی، علیرضا باغبانان و همکاران (۲۰۱۸)، مقاله‌ای با موضوع تأثیر کوپل<sup>۳</sup> تنش مشبک کاری سه‌محوره بر مکانیسم شکستگی و سرعت موج صوتی سنگ‌آهک انجام دادند. آن‌ها از یک دستگاه مشبک کاری سه‌محوره به‌منظور بررسی تأثیر تنش برجا ناهمسانگرد بر عمق نفوذ و الگوی شکست سازندهای آهکی استفاده کردند. با استفاده از روش Taguchi و ANOVA تعدادی تست بهینه‌شده برای تعیین اثر متقابل ترکیب متفاوت تنش‌های برجای اعمال شده بر عمق نفوذ استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که عمق نفوذ اندازه‌گیری شده توسط تنش‌های خارج از صفحه (تنش

نفوذپذیری کم را بکار می‌گیرد. در نتیجه، مشخصات جریان ورودی یکدست و ایده‌آل هستند [۶].

جکوئیز هاگورت (۲۰۰۷)، مقاله‌ای با عنوان مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی بهره‌وری چاه مشبک‌کاری شده انجام داد. سنگ بنای اساسی مدل یک راه‌حل تحلیلی برای جریان دارسی تک فاز به یک شبکه در یک محیط متخلخل نیمه بی‌نهایت بوده است. ایشان این راه‌حل را برای توصیف جریان به یک چاه با آرایه‌هایی بافاصله منظم از شبکه‌های مساوی در امتداد دیواره چاه گسترش داد. نتیجه نهایی فرمولی برای سطح مشبک‌کاری شده مانند تابعی از طول و شعاع مشبک‌کاری شده، تراکم شات، مراحل مشبک‌کاری، ناهمسانگردی نفوذپذیری، آسیب مشبک‌کاری و آسیب سازند است. نتایج مدل در مقایسه منصفانه تقریباً خوبی با شبیه‌سازی‌های عددی قبلی جریان قرار گرفته‌اند. این مدل می‌تواند به راحتی در یک برنامه صفحه گسترده استاندارد پیاده‌سازی شود. این مدل نشان داده است که این روش (مدل نیمه‌تحلیلی برای تکمیل مشبک‌کاری) ناهمسانگردی نفوذپذیری را به درستی محاسبه نمی‌کند، که منجر به خوش‌بینی بیش‌ازحد در بهره‌وری، به‌ویژه در حضور آسیب مشبک‌کاری و سازند می‌شود [۱۳].

وانگ و دوسو (۱۹۹۶)، مقاله‌ای با موضوع پتانسیل تولید ماسه نزدیک چاه مشبک‌کاری شده مایل انجام دادند. آن‌ها بیان داشتند که انتخاب صحیح جهت گیری مشبک‌کاری در چاه‌ها می‌تواند ریسک ایجاد ماسه را کاهش دهد یا احتمال تولید بالای ماسه را افزایش دهد. آن‌ها از یک رویکرد ساده برای این روش ارزیابی، بر اساس تنش‌های ایجاد شده در اطراف حفره‌های مشبک‌کاری شده در یک چاه نگهداری شده استفاده نمودند. اثر جهت‌گیری مشبک‌کاری به عنوان اولین عامل موثر نشان داده شده است. بنابراین، همراه با فاکتورهای دیگر مانند میزان کشش و اندازه و چگالی بار، چنین روشی باید در ارزیابی ماسه گنجانده شود [۷].

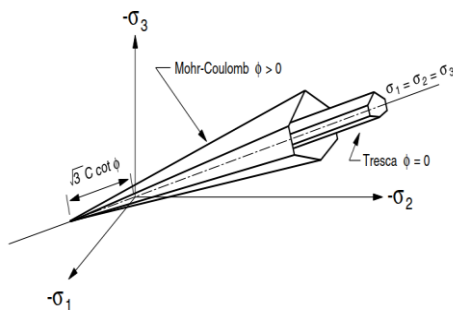
هزیم عباس و همکاران (۱۹۹۴)، مقاله‌ای با موضوع دید مکانیک سنگی به مشبک‌کاری جهت‌دار انجام دادند. آن‌ها بیان داشتند که مشبک‌کاری جهت‌دار می‌تواند راه‌حلی برای شروع یک شکستگی گسترده در چاه‌های عمودی و منحرف باشد. همچنین می‌توان از مشبک‌کاری‌های جهت‌دار برای ایجاد تونل‌های پایدار در سازه‌های ضعیف تلفیقی استفاده کرد

مدل‌سازی تاثیر آرایش و سایز مشبک‌کاری در تولید ماسه انجام داد. او ابتدا مدل‌های قبلی مختلف توزیع تنش حول دیواره چاه را مشخص نمود و سپس با بهبود مدل‌های قبلی و ایجاد یک مدل جدید، مدل‌سازی تنش حول دیواره چاه را انجام داد. اثرات فیزیکی مختلف بر شکست سیمان و تولید ماسه بررسی شدند و در انتها با بررسی نمودارهای به دست آمده برای شکست سیمان و همچنین تولید ماسه جهت مناسب برای مشبک‌کاری با حداقل میزان تولید ماسه مشخص شد. ایشان بیان داشت که تولید ماسه در چاه‌های نفتی یکی از مشکلات عمده این صنعت برای تولید نفت و گاز می‌باشد که باعث بوجود آمدن هزینه‌های زیادی هنگام حفاری و تولید از چاه می‌شود. آسیب‌های تجهیزات درون چاهی و همچنین هزینه‌های تصفیه ثانویه نفت و گاز از جمله این هزینه‌ها می‌باشند [۱۱].

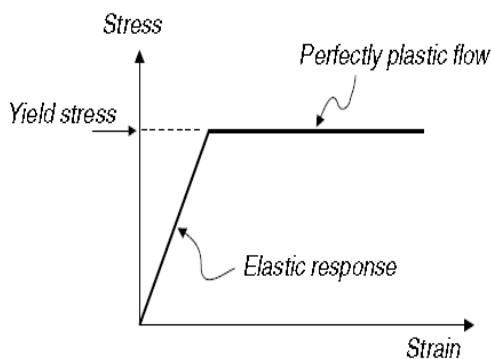
ژائو ژو و همکاران (۲۰۱۲)، مقاله‌ای با عنوان مدل بهینه‌سازی مشبک‌کاری دارای تراکم متغیر قطعه‌ای برای چاه‌های افقی در مخازن ناهمگن به چاپ رساندند. آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی مشبک‌کاری چگالی متغیر سه فاز سه‌بعدی برای چاه‌های افقی با کوپل پالایش سیال مخزن، در نزدیکی ورودی چاه و جریان مجرای چاه بر اساس شبیه‌سازی عددی مخزن را ساختند. تأثیرات ۸ عامل بر تراکم مشبک‌کاری و مشخصات جریان، گرانروی سیال، قطر پوشش و زبری دیواره لوله در کاهش فشار چاه، برای مشبک‌کاری با چگالی متغیر قطعه‌ای از چاه‌های افقی را تجزیه و تحلیل نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که فاصله مشبک‌کاری نشده، ناهمگنی نفوذپذیری و ناهمگنی ضخامت لایه نفتی اثرات مهمی بر روی مشبک‌کاری با چگالی متغیر قطعه‌ای دارد. فاصله مشبک‌کاری شده ممکن است بر مشخصات جریان تأثیر بگذارد [۱۲].

ژانگ ژیمینگ و همکاران (۲۰۱۰)، مقاله‌ای با موضوع بهینه‌سازی توزیع مشبک‌کاری برای چاه‌های افقی بر اساس الگوریتم‌های ژنتیک را انجام دادند. آن‌ها یک مدل جریان مخزن چاه (*couple reservoir-wellbore*) بر اساس تئوری کنترل جریان ورودی را بررسی کردند. برای حل مدل از الگوریتم‌های ژنتیکی استفاده نمودند زیرا عملکردهای گسسته از نظر بین‌المللی برتری دارند. آن‌ها بیان داشتند که استراتژی مشبک‌کاری بهینه‌شده، یک مشبک‌کاری با تراکم پایین در فواصل نفوذپذیری زیاد و مشبک‌کاری با تراکم زیاد در فواصل

است و بلافاصله بعد از مقاومت حداکثر، تنش در یک سطح ثابت می‌ماند و پیوسته کرنش افزایش می‌یابد. معروف ترین مدل رفتاری الاستوپلاستیک، مدل موهر-کلمب است که در بیشتر تحلیل‌های عددی از آن استفاده می‌شود. این مدل رفتاری براساس معیار شکست موهر-کلمب توسعه یافته است. در رفتار پلاستیک کامل<sup>۵</sup> سطح تسلیم و ظرفیت باربری با افزایش کرنش پلاستیک ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. رفتار پلاستیک کامل به همراه منحنی تنش-کرنش آن در شرایط بارگذاری تک محوره در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱. مدل رفتاری موهر کلمب و ترسکا



شکل ۲. رفتار پلاستیک کامل سنگ‌ها

به طور معمول فرض می‌شود رفتار سنگ تا سطح تنش تسلیم، الاستیک است. در رفتار پلاستیک کامل بعد از وقوع تسلیم، در سطح تنش و ظرفیت باربری تغییری رخ نمی‌دهد. اما رفتار بعد از مقاومت حداکثر<sup>۶</sup> بسیاری از سنگ‌ها پلاستیک کامل

چرا که با جلوگیری از سست شدن دانه‌های ماسه از تولید آن ممانعت خواهد کرد. در این مقاله نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی مربوط به مشبک کاری جهت‌دار برای شکستگی هیدرولیکی ارائه شده است. همچنین در مورد استفاده از مشبک کاری جهت‌دار برای کنترل ماسه بحث شده است. آزمایش‌هایی به منظور تعیین تأثیر جهت‌گیری مشبک کاری در چاه‌های عمودی و افقی در رفتار شکست هیدرولیکی انجام گردیده [۱۴].

## ۲. مشخصات میدان مورد مطالعه

میدان نفتی مورد مطالعه در نزدیکی مرز جنوبی ناحیه لرستان و در فاصله ۱۸۰ کیلومتری شمال غربی اهواز بین میدان نفتی دانان و پایدار قرار دارد. طاق‌دیس مورد مطالعه دارای ابعاد ۴.۵ \* ۲۸.۵ کیلومتر در قسمت مرکزی می‌باشد. در سطح زمین ساختمان میدان مورد مطالعه به صورت یک طاق‌دیس تک شیب است که به طرف شمال شرقی شیب دارد و بخش جنوب غربی آن به وسیله گسل تراستی محدود شده است. ستبرای سازند آسماری در این میدان در حدود ۳۰۰ متر و بر اساس تحقیق انجام شده سن آن میوسن پیشین است. لازم به ذکر است که آهک‌های سازند آسماری در اکثر میادین نفتی دستخوش پدیده دولومیتی شدن گردیده است. منطقه مورد مطالعه علاوه بر دارا بودن سازند آسماری در بعضی از بخش‌ها از سازند Asmary-Sandstone نیز بهره‌مند می‌باشد.

## ۳. مدل رفتاری مورد استفاده

مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک دو بخش دارند. در بخش پیش از مقاومت حداکثر، رفتار تنش-کرنش به صورت الاستیک خطی است و بعد از مقاومت حداکثر، رفتار تنش-کرنش در مدل موهر-کلمب به صورت پلاستیک کامل<sup>۴</sup> است. تفاوت مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک با مدل الاستیک قابلیت مدل‌سازی شکست مواد در این مدل‌ها می‌باشد. یکی از پرکاربردترین مدل‌های رفتاری در زمینه مهندسی سنگ، مدل رفتاری موهر-کلمب است.

در این مدل قبل از مقاومت حداکثر، رفتار کاملاً الاستیک

6 post-peak

4 perfect plastic  
5 perfect plastic

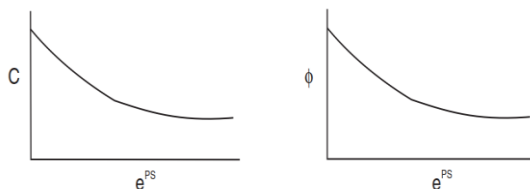
نی‌باشد [۱۵].

قانون سخت شونده‌گی / نرم شونده‌گی نحوه تغییرات سطح تسلیم با افزایش کرنش پلاستیک را در ماده نشان می‌دهد. چنانچه بیان شد سنگ‌ها در فشارهای محصورکننده کم تا متوسط معمولاً رفتار نرم شونده خواهند داشت. در رفتار نرم شونده‌گی، سطح (رویه) تسلیم با افزایش کرنش پلاستیک منقبض می‌شود. بعد از مقاومت حداکثر در فشارهای محصورکننده کم و متوسط، ظرفیت تحمل بار سنگ‌ها به تدریج کاهش می‌یابد و مقاومت سنگ از وضعیت حداکثر به حالت باقیمانده می‌رسد. از این رو بررسی رفتار نرم شونده‌گی در تحلیل رفتار توده سنگ ضروری است. رفتار کرنش نرم شونده‌گی می‌تواند به صورت شکننده یا شکل‌پذیر باشد. هوک و براون در سال ۱۹۹۷ میلادی براساس تجارب و آزمایش‌های گسترده در مهندسی سنگ رفتار معمول سنگ پس از شکست را کرنش نرم شونده‌گی می‌دانند. رفتار پس از شکست سنگ‌های نرم، شکل‌پذیر و سنگ‌های خیلی سخت، شکننده می‌باشد. برخی از محققین رفتارهای شکل‌پذیر و شکننده را حالات خاصی از رفتار عمومی کرنش نرم شونده‌گی می‌دانند [۱۶].

از دیگر مدل‌های رفتاری پیشرفته مورد استفاده در این تحلیل عددی مدل رفتاری نرم شونده‌گی / سخت شونده‌گی<sup>۷</sup> است که می‌تواند رفتار پس از مقاومت حداکثر سنگ‌ها را نیز در نظر گیرد.

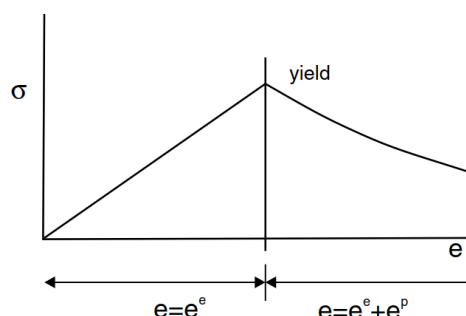
زمینه‌های کاربردی این مدل رفتاری می‌توان به مطالعه رفتار بعد از شکست سنگ در پروژه‌های شامل ریزش و شکست پیشرونده اشاره نمود.

در مدل رفتاری نرم شونده‌گی / سخت شونده‌گی، منحنی تنش کرنش تا نقطه تسلیم خطی است در این محدوده کرنش تنها متشکل از کرنش الاستیک است. بعد از تسلیم، کرنش کل  $(\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p)$  متشکل از کرنش الاستیک و پلاستیک است. در مدل رفتاری نرم شونده‌گی / سخت شونده‌گی، کاربر تغییرات چسبندگی، زاویه اصطکاک، اتساع و مقاومت کششی را به صورت تابعی از کرنش پلاستیک  $(\epsilon^p)$  مشخص می‌کند. تفاوت این مدل با مدل‌های قبلی این است که پس از شروع بازه پلاستیک احتمال نرم یا سخت شدن چسبندگی، اصطکاک، اتساع و مقاومت کششی امکان‌پذیر است. در مدل Mohr-Coulomb، فرض می‌شود که این خصوصیات ثابت هستند. در این مدل کاربر می‌تواند چسبندگی، اصطکاک و اتساع را به صورت تکه‌های خطی، قطعه‌ای از یک پارامتر سخت شونده‌گی سنجش کرنش برشی پلاستیک تعریف کند. این مدل برای استحکام کششی نیز می‌تواند از نظر پارامتر سخت شدن دیگری که کرنش کششی پلاستیک را اندازه‌گیری می‌کند، معرفی نماید [۱۷]. این توابع در واقع در نرم‌افزار به صورت توابع چند خطی تعریف می‌شوند.



شکل ۴. نمونه‌ای از تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک با کرنش پلاستیک

رفتارهای سخت شونده‌گی و نرم شونده‌گی برای چسبندگی، زاویه اصطکاک و اتساع براساس کرنش پلاستیک می‌تواند با استفاده از جدول تعریف شود. هر جدول شامل دو جزء است یک جزء مربوط به پارامتر مورد نظر و جزء دیگری مربوط به کرنش پلاستیک است. فرض می‌شود که آن پارامتر به صورت خطی بین دو پارامتر پشت سرهم تغییر می‌کند. نرم شونده‌گی پارامتر مقاومت کششی نیز به همین ترتیب می‌تواند در نظر



شکل ۳. رفتار کرنش نرم شونده‌گی

در بین مدل‌های رفتاری این مدل شباهت بیشتری به رفتار تنش-کرنش واقعی سنگ دارد، یعنی بعد از مقاومت حداکثر، افت تنش را نشان می‌دهد و میزان تحمل و ظرفیت باربری تنش نمونه با افزایش کرنش پلاستیک کاهش می‌یابد. از

<sup>7</sup> Strain softening/Hardening

گرفته شود.

### ۱.۳ تحلیل توامان هیدرومکانیکی

در علوم زمین، اصطلاح کوپل هیدرومکانیکی به تعامل فیزیکی بین فرآیندهای هیدرولیکی و مکانیکی اشاره دارد. فعل و انفعالات کوپل هیدرومکانیکی در محیط‌های زمین‌شناسی معمول است (به عنوان مثال، خاک و سنگ) زیرا چنین محیط‌هایی حاوی منافذ و شکستگی است که می‌تواند به وسیله سیال پر شده و تغییر شکل یابد. به طور کلی، محیط متخلخل یا شکستگی سنگ اشباع شده از سیال می‌تواند در نتیجه تغییر بار خارجی یا تغییر فشار سیال منافذ داخلی تغییر شکل دهد (شکل ۴-۲). افزایش بار خارجی فشاری (یا تنش) به این معنی است که محیط متخلخل به طور کلی هم به حجم کمتری و هم به منافذ کمتری فشرده می‌شود. اگر بار خارجی به سرعت اعمال شود، کاهش حجم منافذ تمایل به فشرده سازی سیال منافذ و در نتیجه افزایش فشار سیال منافذ دارد، زیرا سیال فرصتی برای فرار ندارد که این مفهوم کوپل هیدرومکانیکی زهکشی نشده است. از طرف دیگر، اگر بار خارجی به آهستگی اعمال شود، سیال وقت دارد تا از حجم فشرده سازی خارج شود، در این صورت فشار سیال تقریباً هیچ افزایشی نشان نمی‌دهد که این موضوع مفهوم کوپل هیدرومکانیکی زهکشی شده است. به همین ترتیب، کاهش فشار سیال یا جرم سیال می‌تواند باعث کاهش فضای متخلخل، همراه با کاهش حجم و روزنه منافذ شود [۱۸].

### ۲.۳ الگوهای مختلف نرم شوندگی

#### ۱.۲.۳ نرم شوندگی همزمان چسبندگی و زاویه اصطکاک

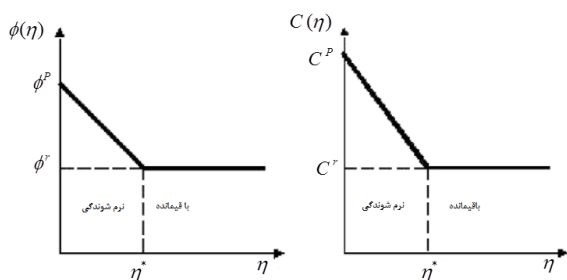
#### اصطکاک

معیارهای شکست مرسوم توده سنگ معمولاً براساس یکی از دو معیار موهر-کولمب و هوک-براون می‌باشند. در نرم افزارهای *FLAC*، *FLAC3D* و *UDEC* می‌توان این دو معیار را با رفتار نرم شوندگی / سخت شوندگی استفاده نمود، بدینصورت که پارامترهای مقاومتی شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک به طور همزمان به صورت کاهشی بسیج شوند. در مدل کرنش نرم شوندگی فرض می‌شود که دو پارامتر مقاومتی بطور همزمان بسیج شده و در محدوده باقیمانده به کمترین مقدار خود می‌رسد. در مدل‌های نرم شونده انتقال تدریجی از معیار شکست اوج به معیار شکست باقیمانده تحت کنترل

پارامتر نرم شوندگی ( $\eta = \gamma^p$ ) رخ می‌دهد. در شرایط رفتار الاستیک سنگ مقدار پارامتر نرم شوندگی برابر با صفر می‌باشد. رفتار نرم شونده در شرایطی رخ می‌دهد که مقدار پارامتر نرم شوندگی برابر با  $(0 < \eta < \eta^*)$  باشد. نرخ کاهش مقاومت با شیب ناحیه نرم شوندگی یا مدول افت ( $M$ ) نشان داده می‌شود. در این مدل رفتاری نرم شوندگی، پارامترهای مقاومتی به صورت تابعی از پارامتر نرم شوندگی کنترل و کاهش خواهد یافت. در مدل نرم شوندگی کرنش، پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بوسیله توابع دوخطی نسبت به پارامتر نرم شوندگی ( $\eta$ ) توصیف می‌شوند. این توابع از مقدار پیک ( $\mu^p$ ) با افزایش ( $\eta$ ) به صورت خطی کاهش می‌یابند تا در مقدار بحرانی پارامتر نرم شوندگی ( $\eta^*$ ) به مقدار باقیمانده برسند. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مقادیر پارامتر نرم شوندگی بیشتر از مقدار بحرانی، برابر با مقدار باقیمانده هستند. براین اساس فرم کلی این توابع بصورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۱۹].

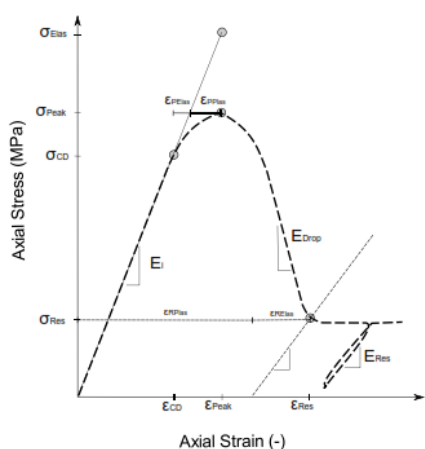
$$(1) \quad \begin{cases} \mu^p - (\mu^p - \mu^r) * \frac{\eta}{\eta^*} & \& 0 < \eta < \eta^* \\ \mu^r & \& \eta \geq \eta^* \end{cases}$$

در شکل (۵) نمودار تغییرات پارامترهای مقاومتی براساس مدل رفتاری نرم شوندگی، نشان داده شده است [۱۹].



شکل ۵. تغییرات پارامترهای مقاومتی براساس پارامتر نرم شوندگی

در نرم افزارهای عددی همچون *FLAC* و *UDEC* معمولاً می‌توان از مدل رفتاری نرم شوندگی استفاده نمود و رفتار پسا شکست سنگ‌ها را با استفاده از این نوع مدل‌های نرم شونده در نظر گرفت. برای لحاظ رفتار نرم شوندگی معمولاً



شکل ۷. طرح جداسازی اجزای الاستیک و پلاستیک کرنش که در آزمایش سه محوری اعمال شده بر روی نمونه سنگ بدست آمده است

مارتین و همکاران (۱۹۹۷ و ۱۹۹۹)، بیان کردند که داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که پارامترها، مانند اجزای مقاومت، پس از رسیدن به کرنش الاستیک و حداکثر تنش محوری تفاوت می‌کنند.

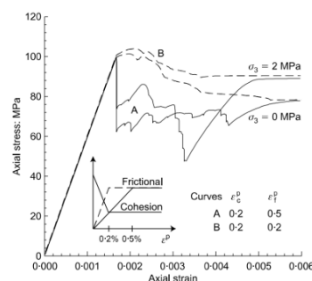
مارتین و همکاران (۱۹۹۹)، بیان کردند که، برای شرایط دست نخورده در نمونه‌های سنگی یا توده‌های سنگ سخت مانند سنگ بدون آسیب، بدون شکستگی مداوم یا در نمونه‌های دارای رگه کامل، حداکثر تنش بستگی به چسبندگی دارد، و زاویه اصطکاک به عنوان یک مقدار ثابت کم فرض می‌شود، که هر دو مستقل از محدودیت تنش هستند. در شکل (۸) و (۹)، اثرات توسعه کرنش پلاستیک بر تغییرات ویژگی‌های مقاومت *Mohr-Coulomb* (اصطکاک، چسبندگی و اتساع)، ارائه شده است، در حالی که کرنش پلاستیک نشان‌دهنده آسیب تجمعی درون نمونه است.

در شکل (۸) هنگامی که پارامتر کرنش پلاستیک از جزء اصطکاک جابجا شده پیشی بگیرد، قدرت پس از پیک در نمونه سنگ دست نخورده به دست می‌آید. برای تنش‌های محدودکننده زیاد، مقدار خرابی باقی مانده پارامترهای مجموعه داده اولیه را قطع کرده و حتی از آنها پیشی می‌گیرد. در شکل (۹) مقدار مقاومت پوش شکست برای معیار شکست *Mohr-Coulomb* به صورت سطح هشت وجهی برای تنش‌های سه بعدی نمایش داده شده است، در حالی که مقادیر

کاربر با استفاده از جداولی چگونگی کاهش پارامترهای مقاومتی همچون چسبندگی، زاویه اصطکاک، مقاومت کششی و اتساع را مشخص می‌سازد. یکی از چالش‌ها در برابر استفاده از مدل‌های رفتاری نرم شونده چگونگی تعیین جداول کاهش پارامترهای مقاومتی در نرم افزارهای عددی است. اگر زون پلاستیک در سنگ ایجاد شود، مدل‌های الاستو پلاستیک کامل معمولاً نمی‌توانند معرف رفتار واقعی توده سنگ باشند، مگر آنکه کیفیت توده سنگ ضعیف باشد. برای سایر انواع توده سنگ مدل‌های رفتاری کرنش نرم شونده و الاستیک شکننده می‌توانند معرف خوبی از رفتار توده سنگ باشند [۲۰].

### ۲.۲.۳ مدل کاهش چسبندگی - افزایش اصطکاک (CWFS)

بسیج کردن قدرت در سنگ‌های دست نخورده در مقیاس آزمایشگاهی برای چندین مورد سنگ سخت مشاهده شده است. شکل (۶) و (۷) رابطه کرنش پلاستیک با آسیب را در حین فرآیند خرابی نشان می‌دهد. طرحی از رفتار سنگ‌های دست نخورده که توسط تست‌های آزمایشگاهی ایجاد شده است در شکل (۶) نشان داده شده است. در شکل (۷) بسیج شدن پارامترهای قدرت غیر همزمان از نظر کرنش پلاستیک ارائه شده است. یکی از مهم‌ترین پارامترها در آزمایشات سنگی دست نخورده، حداکثر تنشی است که برای شکست کوتاه مدت به طور گسترده به عنوان تنش حداکثر و برای شکست طولانی مدت به عنوان تنش آسیب ترک شناخته می‌شود. رفتار پس از اوج را می‌توان در شکل (۷) با یک افت مدول تا رسیدن به وضعیت باقی مانده یا کاملاً بسیج شده مشخص کرد. هنگامی که نمونه می‌شکند، مدول الاستیک نیز به حالت بسیج شده تنزل می‌یابد.



شکل ۶. تأثیر تکامل آسیب در آزمایش سه محوری سنگ دست نخورده و ارتباط آن با کرنش پلاستیک

اصطکاک (مقادیر پس از پیک یا باقی‌مانده) هستند. برای حالت در انتقال و حالت باقیمانده یا شرایط کاملاً جابجا شده، جهت محاسبه مقاومت سنگ برای هر نوع سنگ به عنوان مجموعه داده، پارامترهای مقاومتی منحصر به فرد با استفاده از معادله (۲) استفاده کرد:

$$\sigma_1 = \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi(\varepsilon_p)}{2}\right) \cdot \sigma_3 + 2 \cdot C(\varepsilon_p) \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi(\varepsilon_p)}{2}\right) \quad (2)$$

جایی که  $\sigma_1$  تنش اصلی بزرگتر است،  $\sigma_3$  تنش اصلی کوچکتر (سه محوری)،  $\phi(\varepsilon_p)$  زاویه اصطکاک معادل نمونه سنگ از نظر تنسور کرنش پلاستیک و  $C(\varepsilon_p)$  مقاومت چسبندگی معادل نمونه سنگ از نظر نمودار کرنش پلاستیک است.

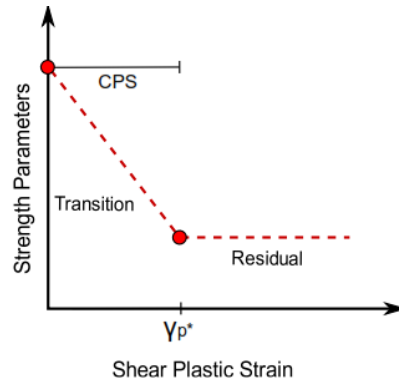
بخاطر روند آسیب پیشرونده در نمونه سنگ سخت، خواص استحکام از کاهش مقاومت چسبندگی تا افزایش جزء اصطکاک هنگامی که مقاومت چسبندگی به طور کامل به حرکت در می‌آید، تغییر می‌کنند. اگر نمونه سنگ خراب شود یا به طور کامل آسیب ببیند، مقادیر باقی‌مانده برای اصطکاک و پارامترهای انسجام به دست می‌آیند. زاویه اصطکاک از یک مقدار کوچک به مقادیر معمولاً شناخته شده تغییر می‌کند، در حالی که مقاومت چسبندگی از حداکثر مقدار شروع می‌شود و به حداقل مقدار کاهش می‌یابد. تنوع پارامتر قدرت ممکن است بر اساس طیف وسیعی از جابجایی پارامترها بیان شود. برای این منظور، معمولاً یک پارامتر کرنش پلاستیک برشی به صورت معادله (۳) تعریف می‌شود.

$$\gamma^p = \varepsilon_1^p - \varepsilon_3^p \quad (3)$$

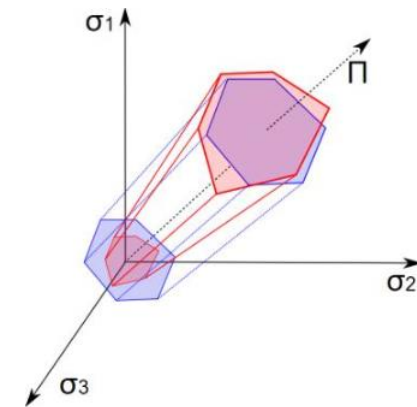
جایی که  $\varepsilon_1^p$  حداکثر کرنش پلاستیک برای نمونه آزمایشگاهی است. در آزمایشات سه‌محوری، در مورد کرنش محوری و  $\varepsilon_3^p$  حداقل کرنش پلاستیک برای نمونه آزمایشگاهی است. در آزمایشات سه‌محوری، در مورد کرنش افقی اعمال می‌شود.

برخی از نویسندگان کاربرد مدل تغییر پارامترهای مقاومت را برای مسائل سنگ دست نخورده و حجم سنگ در سنگ شناسی‌های مختلف مورد مطالعه قرار داده‌اند. پارامترهای مقاومتی معمولاً با فرض رفتار مولفه‌های اصطکاک و چسبندگی، به عنوان مثال، مقادیر ثابت یا پایین اصطکاک

اولیه در شرایط با فشار محوری پایین کاهش می‌یابند، مقدار مقاومت پوش شکست در شرایط با فشار محوری زیاد، افزایش می‌یابد. در نهایت، مولفه اتساع در مجموعه داده با استفاده از توزیع پواسن استفاده می‌گردد.



شکل ۸. تغییر پارامترهای مقاومتی به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک (پارامتر کرنش پلاستیکی بحرانی (CPS) <sup>۸</sup>، تعریف شده به عنوان تفاوت کرنش پلاستیکی برشی که نمونه سنگ به طور کامل در آن جابجا شده است)

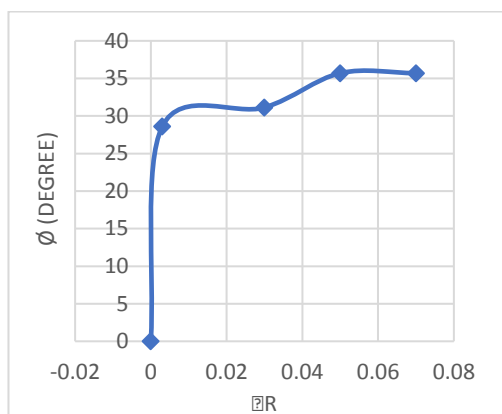


شکل ۹. تغییر پارامترهای مقاومتی به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک

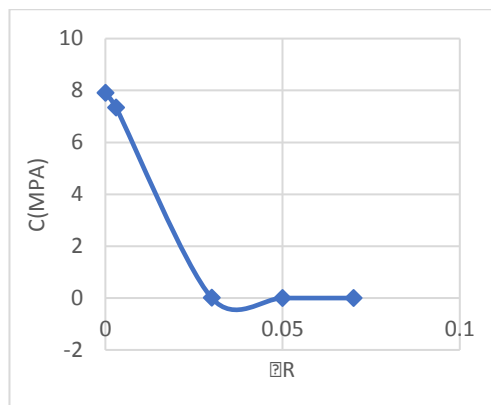
در شکل (۹) تغییرات مقادیر پوش شکست برای مورد تنش میدان سه‌بعدی نمایش داده شده است. رنگ آبی، مقادیر پوش شکست برای وضعیت اولیه (مقادیر پیک) و رنگ قرمز، مقادیر پوش شکست پس از کاهش چسبندگی و افزایش زاویه

<sup>8</sup> Critical Plastic Strain





شکل ۱۰. نمودار مربوط به جدول زاویه اصطکاک



۱۱. نمودار مربوط به جدول چسبندگی

#### ۴. داده ها و محاسبات اولیه

بر اساس داده‌های دریافتی در میدان مورد مطالعه و با در نظر گرفتن مدل رفتاری مورد استفاده در نرم‌افزار *Flac3D* ابتدا به معرفی داده‌ها در جدول (۲) پرداخته شده و سپس داده‌های مورد نیاز برای مدل رفتاری مورد استفاده، محاسبه گردیده است.

اولیه و همچنین مقاومت چسبندگی باقی مانده برابر صفر بدست آمده اند. حتی در برخی موارد این پارامترها بر اساس یک تنش محدود کننده خاص تعریف شده اند، همانطور که توسط رناتی و مارتین (۲۰۱۸)، مانند اجزای باقی‌مانده برای موارد تنش محدود کننده کم و زیاد فرض شده است. در نتیجه، برای به دست آوردن این داده‌ها و اینکه چگونه این پارامترهای قدرت از نظر خصوصیات اولیه متفاوت هستند، معیار واحدی وجود ندارد [۲۱].

#### ۳.۱.۳ جزئیات مدل رفتاری استفاده شده

برای بررسی مدل رفتاری مورد استفاده و بهره‌گیری از آن نیاز به محاسبه جداول چسبندگی و زاویه اصطکاک<sup>۹</sup> است. این جداول با توجه به فرمول ارائه شده در مقاله نوری و همکاران (۲۰۰۶)، قابل محاسبه است [۲۲]. فرمول (۴) تا (۶) معروف به فرمول ورمر و دی بورست بوده است که برای محاسبه جداول چسبندگی و زاویه اصطکاک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\sin \phi^* = 2 \sqrt{\frac{(\varepsilon^{-p} \varepsilon^f)}{\varepsilon^{-p} + \varepsilon^f}} \sin \phi \quad (3)$$

$$\text{when } \varepsilon^{-p} > \varepsilon^f \rightarrow \sin \phi^* = \sin \phi \quad (4)$$

$$c^* = c \exp \left[ - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon^c} \right)^{-p} \right] \quad (5)$$

جایی که  $\varepsilon^c$  و  $\varepsilon^f$  مقادیر ثابتی هستند و  $\varepsilon^{-p}$  پارامتر مربوط به سخت‌شوندگی برشی است.

با توجه به داده‌های اولیه، مقادیر موجود جهت دستیابی به جداول چسبندگی و اصطکاک به شرح جدول (۱) است.

جدول ۱. جدول چسبندگی و زاویه اصطکاک

$\square r$	$\square c$	C (Mpa)	C* (Mpa)	$\phi$	$\phi^*$
0	0.011	7.91	7.91	35.7	0
0.003	0.011	7.91	7.343058	35.7	28.6
0.03	0.011	7.91	0.004658	35.7	31.13
0.05	0.011	7.91	8.43E-09	35.7	35.7
0.07	0.011	7.91	2.06E-17	35.7	35.7

<sup>9</sup> Table cohesion & friction

$$K_2 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (13)$$

نتایج حاصل شده بر اساس دیتاهای ورودی به شرح جدول (۳) می‌باشد.

جدول ۳. مقادیر محاسبه شده ورودی به نرم افزار

مقدار	پارامتر
۳۰.۱	Estatic (Gpa)
۳۸.۴۶	K(Gpa)
۱۰.۹۴	G(Gpa)
۷.۹۱	C(Mpa)
۳.۰۸	$\sigma_t$ (Mpa)
۸۸۷.۵	$\rho_{oil}$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )
۸۶.۳۱	$\sigma_v$ (Mpa)
۱۴۵.۸۷	$\sigma_H$ (Mpa)
۱۲۶.۸۸	$\sigma_h$ (Mpa)
۰.۰۶	Q (m <sup>3</sup> /s)

#### ۵. خصوصیات نرم افزار مورد استفاده

برنامه استاتیکی - دینامیکی *FLAC3D*<sup>۱۰</sup> آنالیز سریع و پیوسته لاگرانژی را به وسیله روش تفاضل محدود انجام می‌دهد. این برنامه اولین بار توسط کندل<sup>۱۱</sup> (۱۹۸۶)، جهت انجام برخی از تحلیل‌های مهندسی توسعه داده شد. نرم‌افزار *FLAC3D* یک برنامه تفاضل محدود صریح<sup>۱۲</sup> است که برای محاسبات مکانیک مهندسی استفاده می‌شود. دلیل استفاده از روش مبتنی بر Explicit در این مقاله این است که، نتایج در هر لحظه ( $x_{n+1}$ )، مستقیماً از نتایج در لحظه قبل از آن ( $x_n$ ) بدست می‌آید. بدین صورت که با در نظر گرفتن سرعت و شتاب المانها در لحظه n با جایگذاری در رابطه  $x_{n+1} = x_n + \Delta t_{n+1/2} \dot{x}_{n+1/2}$  می‌شود. سرعت گره‌ها و المان‌ها بطور پیوسته در حال تغییر است. لذا نتایج بدست آمده از این شیوه زمانی صحیح و پایدار خواهد بود که  $\Delta t$  در نظر گرفته شده به اندازه کافی کوچک باشد تا بتواند روند تغییر سرعت و شتاب در گره‌ها را دنبال کند. از همین جا مشخص است که در روش Explicit بازه‌های زمانی بسیار کوچک و تعداد آنها بسیار زیاد است. از

جدول ۲. داده‌های اولیه مورد نیاز

مقدار	پارامتر	ردیف
۱.۰۱۶	Well drainage radius (m)	۱
۱۰.۴۷	Well Radius (cm)	۲
۳۵۲۰	Drilling Depth (m)	۳
۷۰	Oil Bulk (m)	۴
۵٪	Porosity	۵
۲۷.۶	Density (API)	۶
۳۴۹۲	Casing Shoe Depth (m)	۷
۳۵۰۳-۳۵۲۰	Perforation Depth (m)	۸
۴۳	Dynamic Young Modulus (Gpa)	۹
۰.۳۷	Poissons Ratio	۱۰
۴۴	UCS (Mpa)	۱۱
۰.۵	Biot Coefficient	۱۲
۱.۶۹	Stress Concentration1	۱۳
۱.۴۷	Stress Concentration2	۱۴
۰.۶۳۵	Perforation Radius(cm)	۱۵
۲۵.۴	Perforation Length(cm)	۱۶
۱۰۰۰	Well pumping Rate per each surface (Gallon/min)	۱۷

بعد از جمع بندی پارامتر های ورودی با توجه به نیاز به محاسبه مدول یانگ استاتیکی، مدول بالک، مدول برشی، چسبندگی، مقاومت کششی، چگالی سیال نفتی و مقادیر تنش‌ها، معادلات مورد استفاده و در نهایت نتیجه محاسبات، به شرح زیر می‌باشد.

$$E_{static} = 0.7 E_{dynamic} \quad (4)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5)$$

$$G = \frac{E}{2 \times (1+\nu)} \quad (6)$$

$$C = \frac{UCS}{2 \times \tan(45 + \frac{\phi}{2})} \quad (7)$$

$$\sigma_t = 0.1 * UCS \quad (8)$$

$$API = \frac{141.5}{S.G} - 131.5 \quad (9)$$

$$S.G = \frac{Density\ of\ Fluid}{Density\ of\ standard\ Fluid} \quad (10)$$

$$\sigma_v = \int_0^D 10^{-3} \rho g z \, dz \quad (11)$$

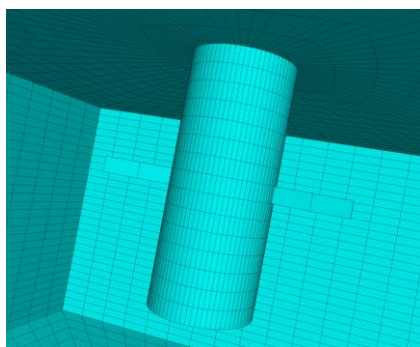
$$K_1 = \frac{\sigma_H}{\sigma_v} \quad (12)$$

<sup>12</sup> Explicit Finite Difference Program

<sup>10</sup> Fast Lagrangian Analysis Continuum

<sup>11</sup> Dr. Peter Cundall

شماره	تعداد سوراخ	محل قرار گیری سوراخ	نام اختصاری	جهت $\sigma_H$	جهت $\sigma_h$
۱	۴	چهار جهت اصلی	4-D	E-W	N-S
۲	۲	غرب و جنوب	W-S		
۳	۰	ندارد	Base (پایه)		
۴	۲	شرق و غرب	E-W		
۵	۲	شمال و جنوب	N-S		



شکل ۱۳. نمای داخلی مشبک کاری‌ها مدل مورد استفاده در این تحلیل دارای ابعاد به شرح جدول (۵) است.

جدول ۵. ابعاد مدل

ردیف	شرح	مقدار (cm)
۱	قطر چاه	۲۰.۹۵۵
۲	ارتفاع مدل سازی شده چاه	۵۰
۳	قطر مشبک کاری ها	۱.۲۷
۴	طول مشبک کاری ها	۲۵.۴
۵	ارتفاع مشبک کاری ها از کف چاه	۲۴.۳۶۵
۶	طول کلی مدل	۱۱۰
۷	عرض کلی مدل	۱۱۰
۸	ارتفاع مدل	۷۰
۹	عمق چاه	۳۵۱۹.۵ * ۱۰ <sup>-۸</sup>

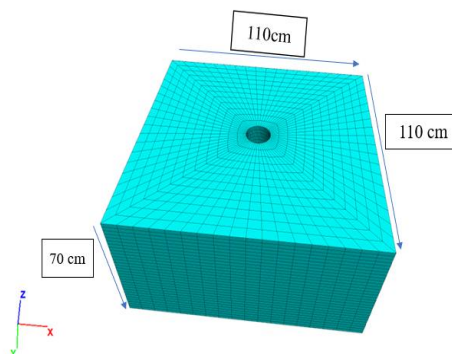
شرایط مرزی، هیدرولیکی و مکانیکی مدل به صورت زیر اعمال گردیده است.

آنجایی که روند حل، تغییرات سرعت و شتاب در گره ها را دنبال می کند، در مسائلی که در آنها محاسبه پارامترهایی از جنس موج همانند موج تنش اهمیت دارد، فقط می توان از روش Explicit استفاده کرد. البته همین امر باعث بروز noise در جوابها نیز هست. این نرم افزار قابلیت شبیه سازی رفتار سازه های بنا شده بر سنگ، و یا سایر مصالحی که برای رسیدن به حد تسلیم شکل خمیری به خود می گیرند را دارا می باشد. تشکیل نشدن ماتریس در کدهای محاسباتی این نرم افزار یکی از دلایلی است که می توان محاسبات وسیعی را بدون داشتن حافظه اضافی انجام داد. در ساختار برنامه، سختی محیط برای محاسبه و شناسایی گام های زمانی مورد نیاز معرفی می شود ولی دسترسی یافتن به مفهومی به عنوان ماتریس سختی یا ماتریس جرم امکان پذیر نیست. علاوه بر مدل های تعبیه شده در نرم افزار که امکان شبیه سازی رفتار غیرخطی مصالح را فراهم می کند، توسط کاربر امکان تعریف مدل رفتاری جدید برای استفاده در محیط نرم افزار وجود دارد [۲۲].

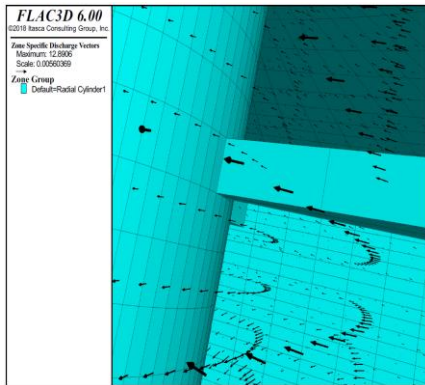
## ۶. نحوه مدل سازی، شرایط مرزی و هندسه

مدل های مورد استفاده به ۵ سناریو مختلف دسته بندی شده که نتایج مدل سازی در این ۵ سناریو مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. هدف نهایی این مدل سازی بررسی سناریو دارای کمترین تولید ماسه و در نهایت افزایش بازده تولید از چاه است. جدول (۴) مشخصات سناریوهای مختلف را نمایان می کند.

هندسه مدل در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در شکل (۱۳) مشبک کاری ها در داخل چاه نمایش داده شده است.

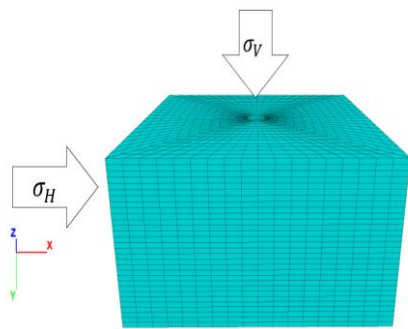


شکل ۱۲. شمای کلی از هندسه مدل  
جدول ۴. نحوه قرار گیری مشبک کاری در مدل سازی

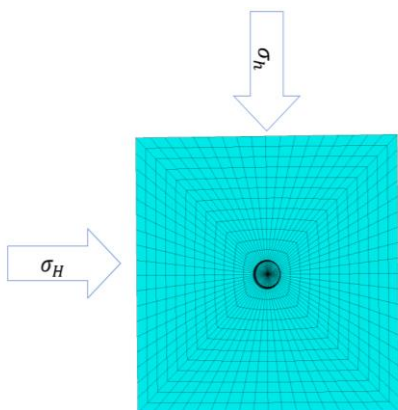


شکل ۱۵. نمایی از جهت گیری سیال در اطراف چاه

۴- در مدل سرباری به اندازه تنش قائم برجا به مقدار  $86.31 \text{ Mpa}$  اعمال شده است. شکل (۱۶) و (۱۷) نحوه بارگذاری بر روی محورهای مختلف مدل را مشخص نموده است.



شکل ۱۶. نحوه اعمال تنش ها بر روی چاه



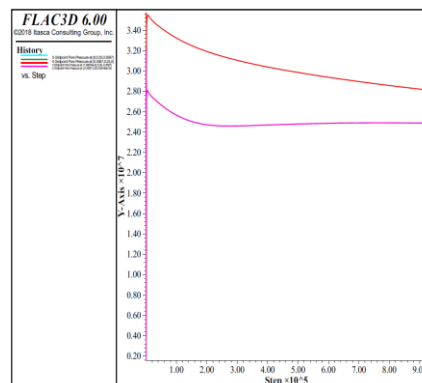
شکل ۱۷. نحوه اعمال تنش های افقی بر روی چاه

۱- شرایط مرزی مدل در کف و سقف مدل به صورت سرعت نرمال<sup>۱۳</sup> صفر در نظر گرفته شده است. در اطراف مدل تنش های برجا اعمال گردیده است. در سقف مدل علاوه بر در نظر گیری سرعت نرمال صفر، تنش قائم به عنوان سربار اعمال گردیده است.

۲- مقدار فشار منفذی اولیه 30 Mpa در نظر گرفته شده و در کل مدل اعمال شده است.

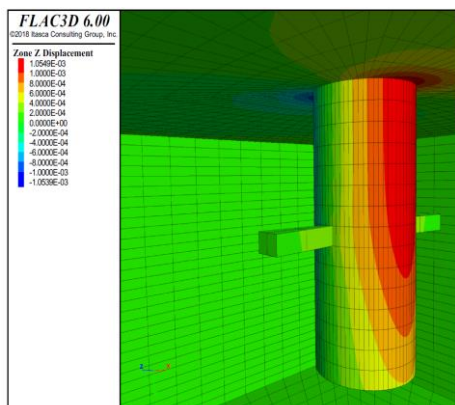
شکل (۱۴) نمایی از روند فشار منفذی در انتهای مشبکها در سناریو 4-D می باشد، لازم به ذکر است که به دلیل اعمال شرایط مکانیکی ابتدا فشار منفذی افزایش یافته و سپس کاهش می یابد تا به تعادل برسد، این شکل نشان دهنده فشار منفذی انتهای ۴ سوراخ است که به صورت دوتایی روی یکدیگر افتادند.

۳- این مدل به صورت دبی ثابت بوده و فشار در آن متغییر است. دبی ثابت اعمالی به مقدار  $6 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$  در نظر گرفته شده است. نحوه اعمال دبی و حرکت سیال به سمت چاه، مطابق شکل (۱۵) است.

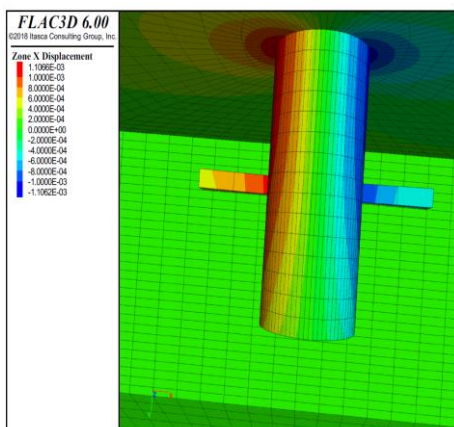


شکل ۱۴. روند اعمال فشار منفذی در حالت 4-D در انتهای پرفوریشن ها

<sup>13</sup> Velocity Normal



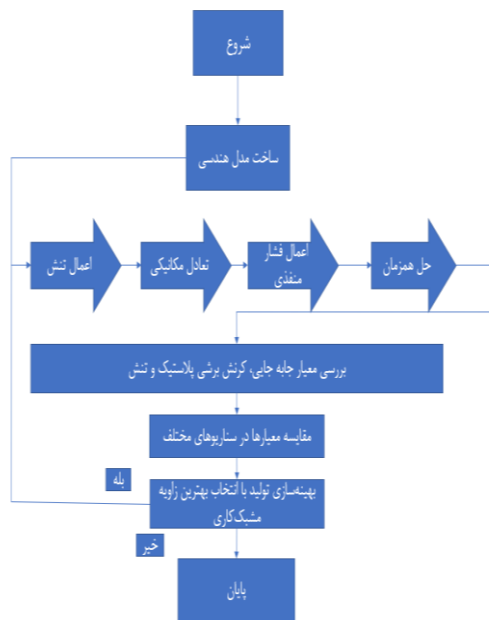
شکل ۱۹. جابه‌جایی راستای Z برای سناریو E-W اطراف مشبک



شکل ۲۰. جابه‌جایی راستای X برای سناریو E-W اطراف مشبک

مقادیر جا به جایی در سناریوهای مختلف با هم اختلاف کمی دارند. شکل (۲۱) نمودار مقایسه‌ای بین حداکثر مقدار جابه‌جایی در راستای Z را نشان می‌دهد. پس از بررسی شکل (۲۱) در می‌یابیم که، در جابه‌جایی راستای Z، بیشترین جا به جایی مربوط به سناریو 4-D بوده است که اختلاف بسیار اندکی با سناریوهای پایه، N-S و W-S دارد. مقدار نزدیک سناریو پایه با دیگر سناریو ها نشان دهنده متکی نبودن جا به جایی به احداث مشبک‌ها است. تنها سناریویی که مقدار جا به جایی راستای Z کمتری دارد سناریو E-W است که در جهت تنش افقی ماکزیمم و در راستای X حفر گردیده است. برای بررسی جامع تر نیاز است که مقادیر جابه‌جایی در دو راستای دیگر یعنی X و Y بررسی شوند. به دلیل برقراری

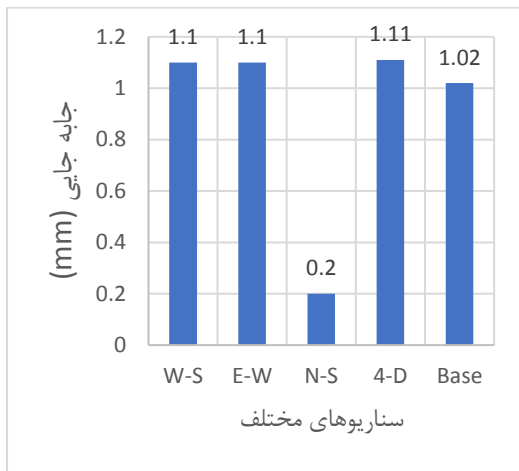
مراحل کلی شبیه‌سازی نرم افزار به صورت شکل (۱۸) است.



شکل ۱۸. مراحل کلی شبیه‌سازی در نرم افزار Flac3D

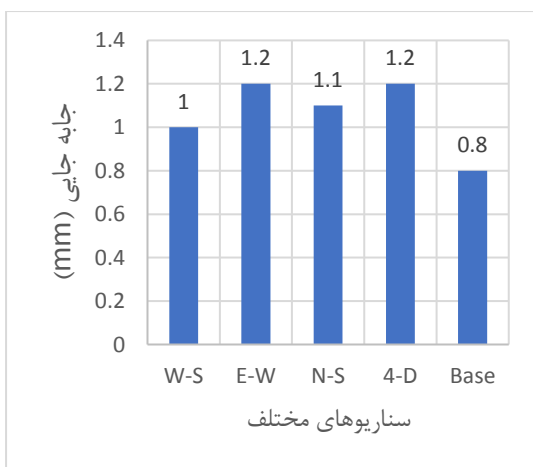
### ۱.۶ بررسی جابه‌جایی اطراف مشبک‌ها

جابه‌جایی و گسیختگی دو معیار مهم برای درک تأثیر محل به کارگیری مشبک‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه جهت‌گیری‌های مختلف نسبت به تنش حداکثر و تنش حداقل توده‌ی سنگ می‌تواند منجر به تولید کمتر یا بیشتر ماسه در فضای حفاری شده شود و از این طریق بازدهی نهایی را دستخوش تغییر کند، لذا لازم است بررسی شود که کدام یک از مدل‌ها کمترین جابه‌جایی را در محل اتصال مشبک به چاه و نیز در طول مشبک، از خود به جای می‌گذارد. شکل (۱۹) و (۲۰) شماتیکی از میزان جابه‌جایی حداکثر در دو راستای مختلف مربوط به سناریو E-W را نشان می‌دهد.



شکل ۲۲. مقایسه بین حداکثر جابه جایی راستای X

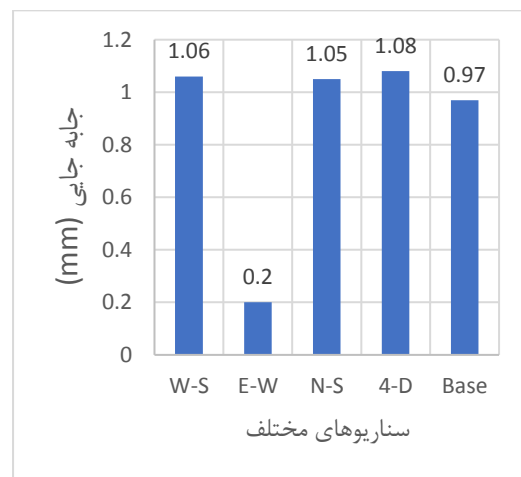
با بررسی شکل (۲۳) در می‌یابیم که میزان جابه جایی‌ها در دو سناریو E-W و 4-D بیشتر از سایرین بوده و حدود ۳۳٪ از مقدار جابه جایی سناریوی پایه بیشتر است. این بدان معنی است که گرچه در دو راستای X و Z در بررسی حداکثر مقدار جابه جایی‌ها تفاوت معنی داری با ۳ سناریو از ۴ سناریو دیگر وجود نداشت ولی جابه جایی تجمیعی دو سناریو حدود ۳۳٪ از سناریوی پایه بیشتر است. سناریو E-W با دو مشبک کاری مقدار جابه جایی مشابهی با سناریو 4-D با ۴ مشبک کاری را ثبت نموده است. این موضوع نشان دهنده تاثیر حفر در راستای تنش افقی حداکثر برای سناریو E-W، تاثیر حفر در ۴ راستا و همچنین چگالی مشبک کاری در افزایش جابه جایی در سناریو 4-D است.



شکل ۲۳. نمودار مقادیر جابه جایی کلی

فرض کرنش صفحه‌ای در راستای Y، جابه جایی در این راستا برابر صفر می‌باشد.

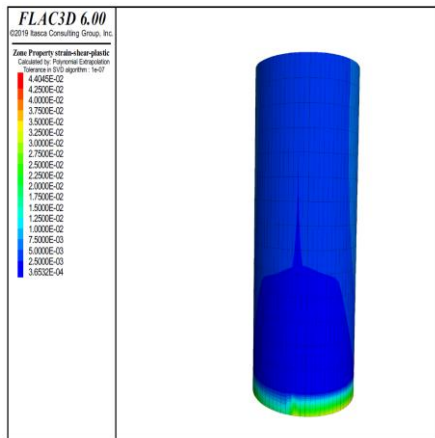
همانطور که از شکل (۲۲) نمایان است، همانند جابه جایی در راستای Z جابه جایی در راستای X نیز تغییر آنچنانی نسبت به سناریوی پایه (Base) ندارد و به نوع قرارگیری مشبک‌ها زیاد وابسته نیست. اما این موضوع باید بیان گردد که میزان جابه جایی‌های اعلام شده مقدار حداکثر بوده و این جابه جایی‌ها در دو طرف چاه یکی به صورت همگرا و در طرف دیگر چاه به صورت واگرا است، که این همگرایی و واگرایی در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) با رنگ‌های قرمز و آبی مشخص است. در بررسی جابه جایی راستای X کمترین میزان جابه جایی مربوط به سناریو N-S است که در جهت تنش افقی حداقل قرار گرفته است.



شکل ۲۱. مقایسه بین حداکثر جابه جایی راستای Z

## ۲.۶ بررسی زون‌های گسیخته شده اطراف مشبک‌ها

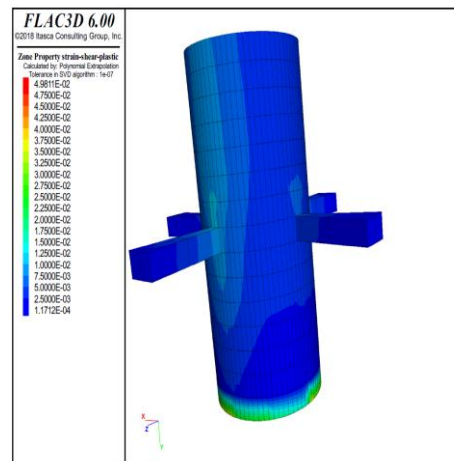
یکی از ویژگی‌های نرم‌افزار FLAC3D قابلیت بررسی وضعیت گسیختگی زون‌های مدل‌سازی شده است. این نرم‌افزار قادر است زون‌های با گسیختگی برشی، گسیختگی کششی و سایر موارد را بررسی کند. شکل‌های (۲۴) تا (۲۶) وضعیت گسیختگی چاه در سه سناریو متفاوت را نشان می‌دهد.



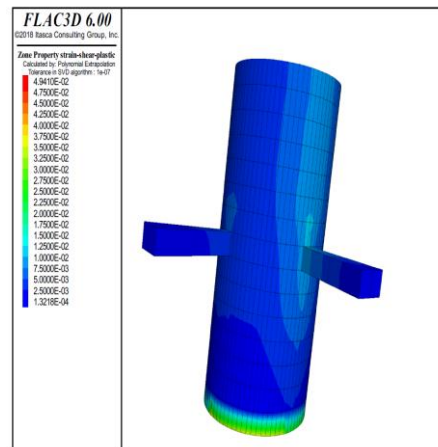
شکل ۲۶. بررسی کرنش برشی پلاستیک در اطراف مشبک و چاه در سناریو پایه

در شکل‌های بالا کانتور کرنش برشی پلاستیک در سناریوهای مختلف قابل مشاهده است. در شکل (۲۷) مقادیر این کرنش‌ها برای مقایسه در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که در همه سناریوها مقادیر کرنش برشی پلاستیک در نقاط بحرانی یعنی تقاطع مشبک‌ها و چاه، محاسبه شده است ولی در سناریو پایه به دلیل نبود مشبک این مقدار برابر صفر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که این سناریو با توجه به شکل (۲۶) دارای مقدار قابل توجهی کرنش نمی‌باشد و در این فاکتور متاثر از حضور مشبک‌ها است.

با بررسی شکل‌های (۲۴) الی (۲۶) می‌توان دریافت که در وهله‌ی اول بیشترین تمرکز کرنش‌های برشی در تمامی سناریوها در محل اتصال مشبک به چاه بوده است و به همین دلیل این نقاط به عنوان نقاط بحرانی معرفی شده‌اند. از سوی دیگر با بررسی نمودار کرنش برشی پلاستیک در سناریوهای مختلف در شکل (۲۷) می‌توان دریافت که بیشترین کرنش برشی به ترتیب مربوط به سناریوهای ۴-D و N-S بوده است. در ارتباط با مقدار بالای کرنش برشی پلاستیک نسبت به دیگر سناریوها به جز ۴-D می‌توان بیان نمود، زمانی که مشبک‌ها نسبت به یکدیگر زاویه‌ی ۱۸۰ درجه‌ای دارند و محل احداث اینها راستای تنش برجا حداقل می‌باشد، مقدار کرنش برشی پلاستیک (که بر روی معکب تنش‌ها نیز زاویه‌ی ۴۵ درجه‌ای با راستای تنش‌های اصلی دارد) به بالاترین حد خود رسیده و

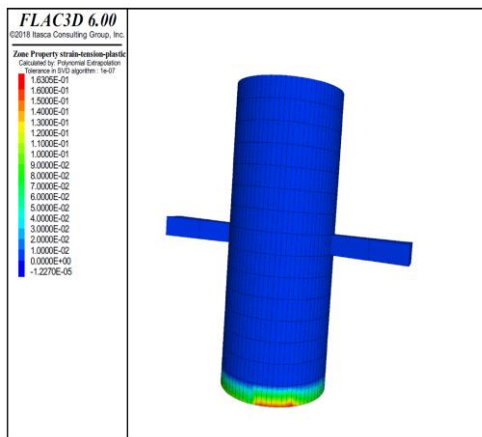


شکل ۲۴. بررسی کرنش برشی پلاستیک در اطراف مشبک و چاه در سناریو ۴-D



شکل ۲۵. بررسی کرنش برشی پلاستیک در اطراف مشبک و چاه در سناریو W-S

کمی متفاوت بوده است. به طوریکه بیشترین تمرکز تنش، نه در اطراف مشبک‌ها، بلکه در کف چاه مشاهده شده است. شکل (۲۸) نمونه‌ای از کانتور مربوط به کرنش کششی پلاستیک، مربوط به سناریو E-W را نشان می‌دهد.



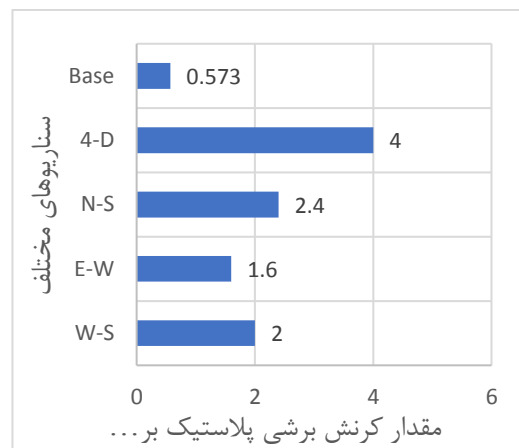
شکل ۲۸. بررسی کرنش کششی پلاستیک در اطراف مشبک و چاه در سناریو E-W

همانطور که از شکل (۲۸) مشخص است، بیشترین کرنش کششی در کف چاه رخ داده است و مقدار عددی نتایج در ۵ سناریو مدل‌سازی از اختلافی کم برخوردار است و به نظر می‌رسد علت این اختلاف را نیز می‌بایست در اضافه فشارهای موجود در این ناحیه (حاصل از فشار سیال درون توده‌ی سنگی) یا سایر فشارهای موجود در سازند بررسی کرد. برای بررسی بهتر این موضوع لازم است مقایسه‌ای بین فشار سیال منفذی در سناریوهای مختلف انجام شود که در بخش بعد به آن پرداخته خواهد شد.

### ۳.۶ بررسی و مقایسه تنش در سناریوهای مختلف

پس از بررسی وضعیت جابه جایی و گسیختگی های برشی و کششی در محل تقاطع چاه و مشبک، می بایست توزیع تنش در سناریوهای مختلف را نیز مورد بررسی قرار داد. شکل‌های (۲۹) و (۳۰) وضعیت تنش‌های اصلی رخ داده در اطراف چاه در دو سناریو مختلف را نشان می دهد.

مقدار ۲.۴٪ را از خود نشان می‌دهد. در سناریو 4-D بیشترین میزان کرنش برشی پلاستیک مشاهده شده است که این موضوع به دلیل چگالی مشبک کاری بالاتر از سناریوهای دیگر در این سناریو می‌باشد. اما در سه سناریو دیگر که یا مشبک‌ها نسبت به یکدیگر زاویه‌ی ۹۰ درجه دارند یا در جهت تنش افقی حداکثر می‌باشند، شاهد کاهش ۷٪ الی ۳۳٪ در مقدار حداکثر کرنش برشی پلاستیک هستیم. در واقع به نظر می‌رسد، قرار گرفتن مشبک‌ها در دو راستای مختلف یا قرار گیری در راستای تنش افقی حداکثر، باعث شکست مسیر تنش برشی حداکثر شده و از این طریق اجازه‌ی تمرکز تنش‌های برشی را گرفته و آسیب‌های وارده به سازند را به حداقل می‌رساند. کاهش کرنش برشی پلاستیک نیز به معنای تخریب کمتر دهانه‌ی مشبک و تولید ماسه‌ی کمتر می‌باشد.



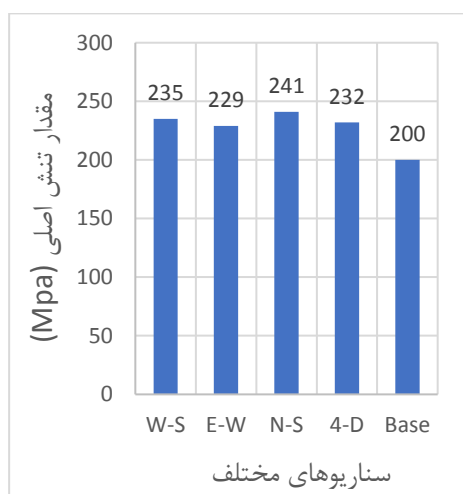
شکل ۲۷. نمودار کرنش برشی پلاستیک در سناریوهای مختلف

علاوه بر موارد ذکر شده با بررسی شکل (۲۷) می‌توان دریافت که چگالی مشبک‌کاری‌ها در یک تراز نیز در تشکیل زون برشی مؤثر بوده است. با بررسی شکل‌ها می‌توان دریافت که بیشترین تنش برشی و به تبع آن بیشترین کرنش برشی در سناریوهای 4-D و N-S بوده است. در واقع زمانی که تعداد پرفوریشن‌ها برابر دو عدد بوده و نسبت به یکدیگر زاویه‌ی ۱۸۰ درجه‌ای دارند و در جهت تنش افقی حداقل حفر می‌شوند، مقدار کرنش برشی پلاستیک بیشتری از خود نشان می‌دهند.

اما در خصوص بررسی نقاط گسیخته شده‌ی کششی نتایج



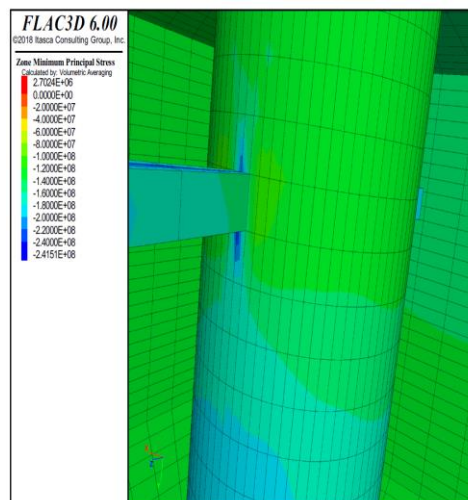
حفر شود تمرکز تنش حدود ۱۲ مگاپاسکال بیش از حالتی است که در راستای تنش افقی حداکثر حفر شود. مقدار تنش حداکثر در سناریو N-S در حدود ۱۷٪ بیشتر از سناریوی پایه بوده که نشان دهنده تاثیر مشبک‌ها در ایجاد تمرکز تنش مخصوصا در محل اتصال مشبک‌ها به چاه است. عواملی نظیر تمرکز تنش، گسیختگی زیاد و جابه جایی حاصله از مشبک‌ها در سناریوهای مختلف عامل کاهش تولید و افزایش تولید ماسه می‌باشند و بهینه سازی آن‌ها با تغییر جهت مشبک‌کاری، مقدار تولید ماسه را کاهش خواهد داد.



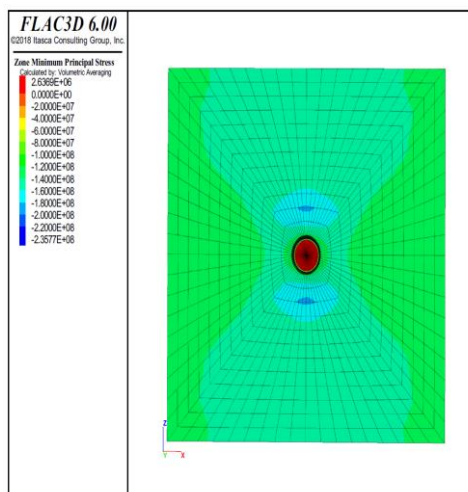
شکل ۳۱. بررسی میزان تنش در سناریوهای مختلف

## ۷. نتیجه گیری

نتایج این پژوهش در ۳ محور جابه جایی، گسیختگی برشی و تمرکز تنش‌های نقاط اتصال مشبک‌ها به چاه بررسی شده است. در جدول (۶) به بررسی جایگاه هر کدام از موارد تاثیر گذار در کاهش تولید نفت و افزایش تولید ماسه در ۳ محور اشاره شده پرداخته شده است. در جدول (۶) قابل مشاهده است که عوامل آسیب زنده به تولید نفت و افزایش دهنده مقدار ماسه تولیدی در شرایطی مختلف بررسی شده، در چه جایگاهی قرار می‌گیرند. در دو فاکتور از ۳ فاکتور معرفی شده سناریو 4-D بیشترین عامل در ایجاد ماسه و کاهش تولید را داشته است. پس از آن مشبک کاری در جهت تنش افقی حداقل، بیشترین مقدار آسیب به سازند را در پی دارد. بهترین جهت حفاری با توجه به جدول (۶) مشبک‌کاری به صورت سناریو W-S است این بدان معنی



شکل ۲۹. تنش در سناریو N-S در اطراف چاه



شکل ۳۰. تنش در سناریو W-S از نمای بالا

شکل (۳۱) نشان‌دهنده نمودار مقایسه تنش در سناریوهای مختلف است. همانطور که از بررسی شکل (۳۱) قابل مشاهده است، مقدار تمرکز تنش در سناریو N-S بیشتر از تمامی سناریوهای دیگر بوده است. پس از آن مقدار حداکثر تمرکز تنش مربوط به سناریو W-S و 4-D بوده است. کمترین مقدار تمرکز تنش متعلق به سناریو پایه می‌باشد و پس از آن سناریو E-W که در جهت تنش افقی حداکثر حفر شده کمترین مقدار را داراست. این بدان معناست که هرگاه زاویه بین دو مشبک ۱۸۰ درجه بوده و در جهت تنش افقی حداقل

سناریو W-S به دلیل وجود اختلاف زاویه ۹۰ درجه بین مشبک‌ها از کمترین میزان جابه جایی و تقریباً کمترین میزان کرنش برشی پلاستیک برخوردار بوده ولی به دلیل قرارگیری در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر و اختلاف زاویه ۹۰ درجه آن‌ها میزان تنش موثر بالاتری را داشته است. در کل با بررسی بقیه سناریوها و رتبه کسب شده توسط آن‌ها از نظر تولید ماسه کمترین مقدار را داشته و بهترین سناریو برای قرارگیری مشبک‌ها است.

حضور سناریوی پایه در رتبه آخر در تمامی بررسی‌های صورت گرفته نشان از تاثیر مشبک کاری جهت دار بر شرایط چاه و میزان تولید آن دارد.

است که کمترین میزان ماسه تولیدی و بیشترین مقدار تولید زمانی رخ می‌دهد که مشبک کاری‌ها دارای زاویه ۹۰ درجه با یکدیگر بوده و یکی از آن‌ها در جهت تنش افقی حداقل و دیگری در جهت تنش افقی حداکثر باشد. پس از این سناریو نیز سناریو E-W بهترین سناریو می‌باشد.

جدول ۶. مقایسه بین عوامل آسیب زنده در سناریوهای مختلف

ردیف	عامل موثر	سناریو های مختلف	جایگاه
۱	جابه جایی	W-S	۴
		E-W	۱
		N-S	۳
		4-D	۱
		Base	۵
۲	کرنش برشی پلاستیک	W-S	۳
		E-W	۴
		N-S	۲
		4-D	۱
		Base	۵
۳	تنش موثر	W-S	۲
		E-W	۴
		N-S	۱
		4-D	۳
		Base	۵

سناریو 4-D نشان دهنده تاثیر چگالی مشبک کاری بر تولید است. هرگاه چگالی مشبک کاری افزایش یابد مقدار جابه جایی‌ها در نقاط بحرانی افزایش می‌یابد و مقدار کرنش برشی پلاستیک نیز افزایش می‌یابد که این موضوع نشان دهنده افزایش میزان تولید ماسه و در نهایت کاهش تولید است.

در سناریو N-S میزان تنش موثر در نقاط بحرانی بیش از بقیه سناریوها است، اما در این سناریو مقدار جابه جایی به مراتب کمتری نسبت به سناریو 4-D مشاهده شده است. از نظر میزان کرنش برشی پلاستیک این سناریو در رتبه دوم بین تمامی سناریوها است و به همین دلیل از نظر تولید ماسه در رتبه دوم بین تمامی سناریوها قرار می‌گیرد.

## ۸. مراجع

- [1]. Norouzi, P., Baghbanan, A., & Hashemolhosseini, H. (2018). Effect of coupled triaxial stress-perforation on fracture mechanism and acoustic wave velocity of limestone. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 170, 409-421.
- [2]. جعفری زاده، س. خسروانین، ر & اقبال پور، ب. (۱۳۹۴). مشبک کاری و اهمیت انتخاب نوع آن. مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما.
- [3]. Morita, N., & Boyd, P. A. (1991, January). Typical sand production problems case studies and strategies for sand control. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [4]. Veeken, C. A. M., Davies, D. R., Kenter, C. J., & Kooijman, A. P. (1991, January). Sand production prediction review: developing an integrated approach. In *SPE annual technical conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [5]. پلاسید، ن. (۱۳۸۵). تعیین پارامترهای طراحی (شامل ابعاد و جهت) شبکه در چاه‌های نفت از دیدگاه ژئومکانیکی (همراه با مطالعه موردی). دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت.
- [6]. Wang, Z., Wei, J., Zhang, J., Gong, B., & Yan, H. (2010). Optimization of perforation distribution for horizontal wells based on genetic algorithms. *Petroleum Science*, 7(2), 232-238.
- [7]. Wang, Y., & Dusseault, M. B. (1996, January). Sand production potential near inclined perforated wellbores. In *Annual Technical Meeting*. Petroleum Society of Canada.
- [8]. Zeng, F., Peng, F., Zeng, B., Guo, J., Pati, S., Zhang, S., & Chen, Z. (2019). Perforation orientation optimization to reduce the fracture initiation pressure of a deviated cased hole. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 177, 829-840
- [9]. Li, X., Feng, Y., & Gray, K. E. (2018). A hydro-mechanical sand erosion model for sand production simulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 166, 208-224.
- [10]. Jinzhou, Z. H. A. O., Xiyu, C. H. E. N., Yongming, L. I., Bin, F., & Wenjun, X. (2017). Numerical simulation of multi-stage fracturing and optimization of perforation in a horizontal well. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1), 119-126.
- [11]. جوانمردی، الف. (۱۳۹۵). مدلسازی تاثیر آرایش و سایز مشبک کاری در تولید ماسه. دانشکده فنی دانشگاه آزاد اسلامی.
- [12]. Wei, P., Dechun, C., Zhang, Z., Jiang, L., Changheng, L. I., Xu, Z. H. A. O., & Bing, W. A. N. G. (2012). Segmentally variable density perforation optimization model for horizontal wells in heterogeneous reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 39(2), 230-238.
- [13]. Hagoort, J. (2007). An analytical model for predicting the productivity of perforated wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 56(4), 199-218.
- [14]. Abass, H. H., Brumley, J. L., & Venditto, J. J. (1994, January). Oriented perforations-a rock mechanics view. In *SPE annual technical conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [15]. Nouri-Ganbalani, A., Nouri-Ganbalani, G., & Hassanpanah, D. (2009). Effects of drought stress condition on the yield and yield components of advanced wheat genotypes in Ardabil, Iran. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(3/4), 228-234.

- [16]. قاسمی، الف. ثروتی، م. بهرامی، ش. رحیم زاده، ب. (۱۳۹۸). تحلیل ژئومتری گنبد‌های نمکی با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی نمونه مطالعه: گنبد‌های نمکی منطقه لار فارس. مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی.
- [17]. FLAC3D 6.0 Theory and Background.
- [18]. Rutqvist, J., & Stephansson, O. (2003). The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering. *Hydrogeology Journal*, 11(1), 7-40.
- [19]. Zhao, X. G., & Cai, M. (2010). A mobilized dilation angle model for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(3), 368-384.
- [20]. Alejano, L. R., Rodriguez-Dono, A., Alonso, E., & Manín, G. F. (2009). Ground reaction curves for tunnels excavated in different quality rock masses showing several types of post-failure behaviour. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(6), 689-705.
- [21]. Cabezas, R. E., & Vallejos, J. A. (2019, June). Analysis of the Mobilization of Strength Parameters in Brittle Intact Rock. In 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. OnePetro.
- [22]. Nouri, A., Vaziri, H., Kuru, E., & Islam, R. (2006). A comparison of two sanding criteria in physical and numerical modeling of sand production. *Journal of petroleum science and engineering*, 50(1), 5
- [23]. امری، ح. (۱۳۹۶). بررسی رفتار پی شمعی منفصل تحت بارهای استاتیکی. دانشگاه صنعتی اصفهان.