

مطالعه تأثیر میزان تداخل اتصال اینسرت در عملکرد سرمته حفاری درون چاهی

رضا سعیدی^۱، محمدحسین صادقی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران rezasaeedi83@gmail.com

۲. استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران sadeghim@modares.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۸/۳/۱۷ - پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۲۴)

چکیده

روش حفاری ضربه‌ای درون چاهی برای حفاری در شرایط متوسط تا سخت زمین‌شناسی روش قابل اعتمادی است. با توجه به نیاز کشور به انواع سرمته در صنایع مختلف، با گسترش دانش و تولید آن‌ها می‌توان واردات گسترده‌ی این محصولات را محدود کرد. در این پژوهش برخورد سرمته-سنگ با در نظر گرفتن برهم‌کنش دکمه تنگستن کارباید (bottom)-بدنه و تنش‌های پسماند حاصل از انطباق تداخلی آن‌ها برای تعیین تلرانس مناسب برای اتصال دکمه (insert) در بدنه سرمته مطالعه شد. این تلرانس که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در جدا شدن دکمه‌ها و در نتیجه عمر سرمته است در حالت تک‌دکمه (single-insert) با زوایه‌های برخورد مختلف و همچنین برای نمونه کامل سرمته 3.5 اینچ با تعداد 13 دکمه به صورت ضربه‌ای-چرخشی شبیه‌سازی شد. بدین منظور ابتدا خواص مکانیکی نمونه‌های استاندارد از جنس فولاد DIN1.6580 که برای ساخت بدنه سرمته استفاده می‌شود، از طریق آزمایش‌های تجربی به دست آمد. سپس به منظور صحت‌سنجی و نیز به دست آوردن اندازه شبکه (Mesh size) مناسب، نتایج شبیه‌سازی اتصال تداخلی با روش تحلیلی مقایسه شد. نتایج نشان داد که میزان تداخل و سرعت و زاویه برخورد تأثیر زیادی در تنش‌ها و نیروهای فرآیند دارند. در تداخل 1.2% تنش در بدنه سرمته تقریباً به استحکام نهایی آن می‌رسد. در حالت 0.9% و 0.6% مقداری کرنش پلاستیک نیز در بدنه ایجاد خواهد شد. حفاری در شرایط کاری واقعی با سرمته‌ی ساخته شده براساس نتایج کاملاً موفقیت‌آمیز بود. نتایج این مطالعه در انتخاب میزان تداخل دکمه-سرمته در فرآیند ساخت آن کمک شایانی می‌کند.

کلمات کلیدی

سرمته حفاری DTH، انطباق تداخلی، تنش پسماند، استوانه جدار ضخیم، مدل دراگر-پراگر توسعه یافته

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱-مقدمه

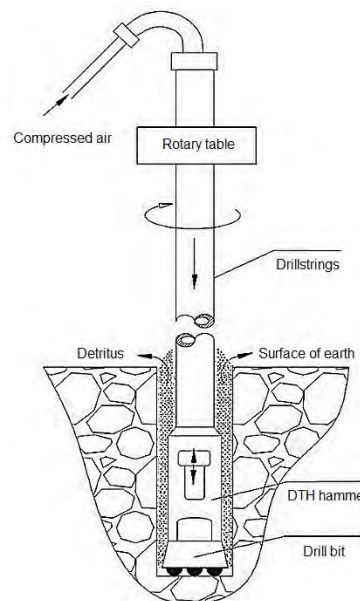
تک دکمه را نشان داد و ثابت کرد که این آزمایش می‌تواند فرآیند حفر سنگ توسط سرمته PDC را با بررسی دقیق‌تر اثرات پارامترهای مختلف و با دقت بالایی شبیه‌سازی کند [1].

نقی خانی و علی محمدی (۱۳۹۰) از روش سطوح پاسخ (RSM) برای تخصیص تیرانس بهینه استفاده کردند. یکی از مسائل مهم و پیچیده در طراحی قطعات و محصولات به خصوص در صنایع حساس و دقیق، انتخاب مقدار بهینه تیرانس برای اجزای تشکیل دهنده است. به‌طور معمول، مهندسان طراحی تمایل دارند تیرانس‌ها را بسته در نظر گیرند تا محصول از لحاظ عملکردی و قابلیت اطمینان در سطح بالایی قرار گیرد و این درحالی است که مهندسان ساخت تمایل دارند از تیرانس‌های باز استفاده کنند تا فرآیند تولید راحت‌تر، ارزان‌تر و عملی‌تر باشد. در این حالت مهمترین مساله مطالعه توازن بین دو مقوله‌ی تیرانس و سایر عوامل متأثر از آن از قبیل کیفیت و هزینه تولید است. در این مطالعه با استفاده از روش سطوح پاسخ (RSM) تیرانس بهینه برای یک مساله مشخص بررسی شد [2].

نورثروپ (1987) روش‌های مختلفی را که برای اتصال تنگستن کاربرد به فولاد استفاده می‌شوند مورد مطالعه قرار داد و علت استفاده از هر روش در کاربرد خاص آن را شرح داد. دکمه‌های استوانه‌ای از فلز سخت با تیرانس‌های بسیار دقیق سنگ زده می‌شوند و با فشار، به‌صورت انطباق تداخلی به بدنه سرمته اتصال داده می‌شوند. این روش نگهداشتن دکمه در بدنه سرمته، تنش‌های حاصل از لحیم‌کاری و دیگر نواقص در ارتباط با لحیم‌کاری و مواد لحیم را از بین می‌برد [7].

ژانگ و همکاران (2000) انطباق فشاری را با استفاده از روش المان محدود طراحی کردند. مطالعات انطباق فشاری اتصالات دنده-چرخ نشان داد که روش طراحی سنتی براساس تئوری استوانه‌ای جدارضخیم محدودیت‌هایی دارد. استفاده از روش المان محدود برای تجزیه و تحلیل تنش سه‌بعدی اتصالات فشاری نتایج کامل‌تر و دقیق‌تری نسبت به روش‌های سنتی ارائه می‌دهد. روش طراحی بهبودیافته با بهره‌گیری از دو ضریب ایمنی (Safety factors) یک رویکرد جدید برای ارزیابی کیفیت انطباق فشاری فراهم می‌آورد. روش مونتاژ انتخابی (Selective assembly method) همراه با روش مبتنی بر روش اجزای محدود برای طراحی انطباق فشاری، روشی مؤثر برای رسیدن به اتصالات فشاری قابل اطمینان‌تر و مونتاژ دقیق‌تر با هزینه تولید پایین‌تر فراهم می‌کند [8]. سن و آکساکال (2004) تجزیه و تحلیل تنش اتصال تداخلی سیستم محور-تویی (Shaft-Hub) تحت شرایط انتقال حرارت گذرا را انجام دادند.

فرآیند حفاری چکشی پنوماتیک درون چاهی (DTH) یک روش حفاری ضربه‌ای چرخشی است که به‌طور گسترده در معادن، اکتشاف، حفاری چاه آب، احداث جاده‌ها و سایر عملیات حفاری در سراسر جهان استفاده می‌شود. در حفاری ضربه‌ای، سنگ با ضربه‌های متناوب شکسته شده و چرخش سرمته استفاده می‌شود تا دکمه در هر زمان در موقعیت‌های جدید روی سنگ ضربه وارد کند (شکل 1) [3]. شکست (از کار افتادگی) سرمته به‌طور عمده از درآمدن دکمه، شکستگی دکمه و سایش آن ایجاد می‌شود [4]. دکمه‌های جدا شده به‌طور عمده دکمه‌های محیطی روی سطح شیب‌دار انتهای سرمته هستند که دلایل اصلی آن ساییده شدن بدنه سرمته و تغییر شکل حفره‌های دکمه است [6].



شکل ۱- نمونه سیستم حفاری پنوماتیک DTH [3].

نجفی ثانی و برادران سید (۱۳۹۱) فرآیند طراحی و توسعه سرمته‌های PDC را مطالعه کردند. این مطالعه به‌صورت تجربی انجام شد و در آن از طریق آزمایش‌های تک‌دکمه‌ای که با تجهیزات (Set up) طراحی شده برای این منظور انجام شد اثر عمق برش، جنس سنگ، زوایای مختلف شیب پستی، اثر سرعت برشی، سایش و عمق برش بر نیروهای تراشکاری سنگ بررسی شد. همچنین انرژی تشکیل تراشه و نحوه‌ی شکل‌گیری آن، اندازه‌گیری ضریب اصطکاک بین سنگ و لایه PDC، اندازه‌گیری توان لازم برای تراش سنگ و نیز توان حرارتی تولید شده در فرآیند تراشکاری سنگ به‌دست آمد. برای ایجاد حرکت چرخشی و تراش سنگ در این آزمایش‌ها از دستگاه تراش انیورسال استفاده شد. این پروژه امکان‌پذیر بودن آزمایش

متغیرهای آسیب جدا برای تنش کششی و فشاری بود. در نمونه‌های مطالعه عددی، این روش با شبیه‌سازی‌های آزمون دیسک برزلی دینامیکی و شبیه‌سازی نفوذ دینامیکی روی سنگ گرانیت صحت‌سنجی شد. شبیه‌سازی‌های متعدد متوالی یک سرمته تجاری با ۷ دگمه نشان داد که این رویکرد قادر به پیش‌بینی نرخ نفوذ (ROP) بود [13].

در پژوهش حاضر، ابتدا خواص مکانیکی نمونه‌های استاندارد از جنس ماده بدنه سرمته از طریق آزمایش‌های تجربی بدست آمد. سپس مدل شبیه‌سازی اتصال تداخلی میله-توپ، به منظور صحت‌سنجی و به دست آوردن اندازه مش مناسب با روش تحلیلی لامه (Lamé analytical method) که معادلات آن در ادامه بیان می‌شود؛ مقایسه و اعتبارسنجی شد. این مطالعه با تمرکز روی تنش‌های سرمته، تأثیر تنش‌های پسماند حاصل از اتصال تداخلی دکمه و بدنه‌ی سرمته را در نظر می‌گیرد. از سوی دیگر، تأثیر ضربه و چرخش در فرآیند پیچیده حفاری و نیز سرعت و زاویه برخورد را روی این تنش‌ها بررسی می‌کند که با توجه به پیشینه‌ی پژوهش ارائه شده، این امر تاکنون انجام نشده است. همچنین با در نظر گرفتن یک سرمته درون‌چاهی واقعی با تعداد 13 دکمه، تأثیر تنش پسماند حاصل از اتصال و نقش دکمه‌های مجاور بر تنش‌های بدنه‌ی سرمته نیز بررسی شد.

۲- معادلات حاکم

برای اینکه دکمه‌ها به هنگام حفاری از سوراخ محل اتصال خود خارج نشوند، انطباق بین دکمه و سوراخ بدنه‌ی سرمته از نوع فشاری است. هنگامی که یک قطعه استوانه‌ای توسط انطباق انقباضی یا فشاری بر دیگری مونتاژ می‌شود، فشار تماسی بین دو قطعه ایجاد می‌شود. تنش در انطباق فشاری را می‌توان با در نظر گرفتن محور [میله] به عنوان یک استوانه با فشار خارجی یکنواخت و توپی [سوراخ] به عنوان یک استوانه با فشار داخلی یکنواخت به دست آورد. از آنجا که در هر دو قطر تفرانس وجود خواهد داشت، حداکثر و حداقل فشار را می‌توان با استفاده از حداکثر و حداقل تداخل به دست آورد [5].

در شکل 2 اتصال تداخلی دو استوانه جدارضخیم با میزان تداخل کل $\delta_1 + \delta_2$ و فشار سطح تماس p نشان داده شده است. براساس معادلات لامه مقدار تداخل قطری مورد نیاز برای به دست آوردن فشار تماسی مشخص از رابطه ۱ به دست می‌آید [5]:

به طور کلی محاسبات تنش در طراحی اتصال تداخلی با استفاده از معادلات متعارف انجام می‌شود. چنانچه قطعات رفتار الاستیک-پلاستیک از خود نشان دهند فرآیند پیچیده‌تر می‌شود. در این مطالعه، تماس بین توپی نصب شده روی محور توپر با استفاده از روش المان محدود مدل شد. مواد محور و توپی، کرنش سخت شونده فرض شدند و به دلیل تقارن تنها یک چهارم مجموعه مدل‌سازی شد [9]. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) یک مدل تحلیلی اتصال تداخلی برای فرآیند پرچکاری الکترومغناطیسی با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر مختلف ارائه کردند. در این مدل توزیع تنش پسماند و همچنین تغییر شکل الاستیک و پلاستیک پرچ و ورق‌ها پیش‌بینی شد. مدل تحلیلی ارائه شده توسط آزمایش‌های تجربی فرآیند پرچ الکترومغناطیسی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم T6-6082 و پرچ آلیاژ آلومینیوم A102 صحت‌گذاری شد [10].

چیانگ و الیاس (2008) روش اجزای محدود سه‌بعدی را برای شبیه‌سازی فرآیند حفاری ضربه‌ای استفاده کردند. روش تجزیه و تحلیل اجزای محدود اجازه می‌دهد تا به شبیه‌سازی ضربه‌ای در مسائل تنش و کرنش سه بعدی با در نظر گرفتن خواص خطی مواد و انتشار ترک بعد از شکست پرداخته شود. برای مدل‌سازی رفتار سنگ بعد از شکست از المان‌های ناهمسانگرد استفاده شد. بنابراین سنگ‌های سخت (گرانیت، گرانودیوریت، آندزیت، و غیره) در دامنه تنش تا حداکثر استحکام شکست می‌توانند الاستیک خطی، همسانگرد و همگن در نظر گرفته شوند [11]. در سال 2009، بو چانگن و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی، تنش‌های ضربه‌ای وارد شده بر سنگ، پیستون، سرمته و همچنین دکمه‌ها را بررسی کردند. در این تجزیه و تحلیل کلیه مواد الاستیک همسانگرد در نظر گرفته شد و تنش تداخلی بین دکمه و بدنه سرمته در نظر گرفته نشد [3]. فرانکا (2011) براساس مشاهدات آزمایشگاهی مدلی برای برهمکنش سرمته-سنگ برای حفاری چرخشی-ضربه‌ای ارائه داد. برخلاف حفاری ضربه‌ای این فرآیند یک حالت تلفیقی از حفاری است، چراکه وزن روی سرمته و سرعت زاویه‌ای هنوز همانند حفاری چرخشی معمولی بر روی سرمته عمل می‌کند. شباهت بین نتایج تجربی و پیش‌بینی‌های تحلیلی در رابطه با استفاده از این مدل به منظور بررسی پاسخ حفاری چرخشی-ضربه‌ای امیدوار کننده بود [12]. تیمو ساکسلا و همکاران (۲۰۱۸) یک روش متشکل از یک مدل ساختاری ارایه شده برای توصیف شکست سنگ و یک مدل برهمکنش سرمته-سنگ را توسعه و اعتبارسنجی کردند. این مدل ساختاری دارای بخش ویسکوپلاستیکی برای نشان دادن شرایط تنش منجر به شکست سنگ و یک مدل آسیب با

ترکیب Din 1.6580 (Strength Low Alloy Steel) می‌باشد. ترکیب شیمیایی فولاد تهیه شده در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد تهیه شده

C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni
0.31	0.26	0.53	0.014	2.0	0.36	1.9

۲-۳- آزمون کشش

نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8 با اندازه طول معیار (Gauge Length) 20 mm ساخته شد (شکل 3). در ضمن نمونه‌ها قبل از عملیات نهایی، ماشین‌کاری، وایرکات، سخت‌کاری و تمپر شدند که سختی آن‌ها به حدود ۴۹۲ ویکرز معادل حدود 50-49 راکول C رسید.



شکل ۳- نمونه‌های آزمون کشش

برای به‌دست آوردن منحنی تنش- کرنش، آزمون‌های کشش روی نمونه‌های آماده شده، با استفاده از ماشین Instron8502 انجام شد. این فرآیند در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل ۴- آزمون‌های کشش با استفاده از دستگاه Instron8502

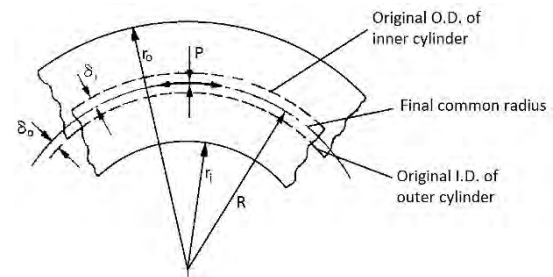
همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است نمونه گسیخته شده شکستی تقریباً ترد با اندکی گلوئی شدگی دارد.

$$I = 2(\delta_o + \delta_i) = 2p \cdot R \left[\frac{1}{E_o} \left(\frac{r_o^2 + R^2}{r_o^2 - R^2} + \theta_o \right) + \frac{1}{E_i} \left(\frac{R^2 + r_i^2}{R^2 - r_i^2} + \theta_i \right) \right] = 2p \cdot R \left(\frac{\epsilon_o}{E_o} + \frac{\epsilon_i}{E_i} \right) \quad (1)$$

که در آن δ_o تغییر در شعاع عضو بیرونی و δ_i تغییر در شعاع عضو درونی است. R شعاع اسمی سطح تماس و E و θ مدول الاستیک و نسبت پواسون، با اندیس 0 و i به ترتیب برای عضو بیرونی (توپ) و عضو داخلی (محور) هستند. تنش شعاعی، σ_r در واقع فشار تماس است، که اگر معادله فوق مجدداً مرتب شود به صورت تابعی از تداخل به شکل رابطه ۲ ارائه می‌شود:

$$p = \sigma_r = f(I) = \frac{I}{2R \left(\frac{\epsilon_o}{E_o} + \frac{\epsilon_i}{E_i} \right)} \quad (2)$$

هنگامی که پارامترهای طراحی انتخاب شدند، چون c ، E و d ثابت هستند فشار تماس رابطه خطی با تداخل خواهد داشت.



شکل ۲- اتصال تداخلی دو استوانه جدار ضخیم با میزان تداخل

$$[14] \delta_o + \delta_i$$

بدین ترتیب تنش مماسی σ_t نیز با استفاده از فشار p قابل محاسبه است. تنش مماسی عضو داخلی در سطح تماس با شعاع R برابر است با:

$$(\sigma_t)_i = -p \frac{R^2 + r_i^2}{R^2 - r_i^2} \quad (3)$$

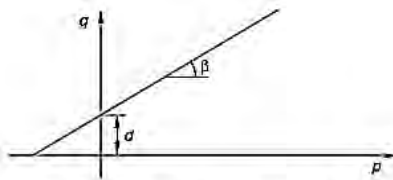
و برای عضو بیرونی:

$$(\sigma_t)_o = p \frac{r_o^2 + R^2}{r_o^2 - R^2} \quad (4)$$

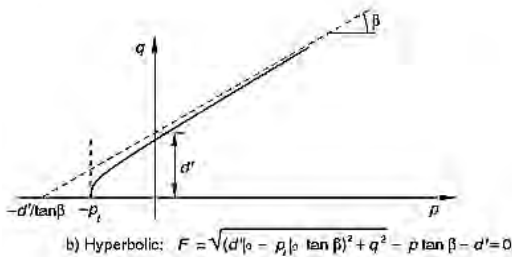
۳- مدل رفتاری مواد

۳-۱- ماده بدنه سرمته

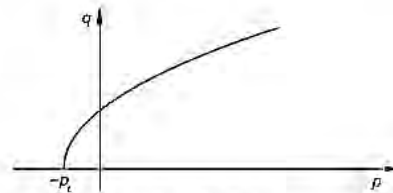
برای به‌دست آوردن خواص مکانیکی ماده بدنه سرمته که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد ماده مورد نظر تهیه شد و ترکیب شیمیایی آن با استفاده از روش طیف‌سنجی (Spectrometry) به‌دست آمد. ماده در نظر گرفته شده برای ساخت بدنه سرمته، فولاد کم آلیاژ استحکام بالا (High



a) Linear Drucker-Prager: $F = q - p \tan \beta - a = 0$



b) Hyperbolic: $F = \sqrt{(d'[\alpha - p] \tan \beta)^2 + q^2} - p \tan \beta - d' = 0$



c) Exponent form: $F = aq^b - p - p_t = 0$

شکل ۷- مدل دراگر-پراگر توسعه یافته [15].

۳-۴- ماده دکمه

خواص و پارامترهای مرتبط با دکمه سرمته نیز با استفاده از پارامترهای معرفی شده در مراجع انتخاب شد [20-21]. در جدول 3 خواص مکانیکی دکمه استفاده شده برای شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است.

جدول ۳- خواص دکمه تنگستن کاربرد استفاده شده

چگالی (gr/mm ³)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب انبساط حرارتی (um/mK)
14.5	0.22	588	5

۳-۵- ماده پیستون

پیستون با ضربات متوالی به سرمته منجر به نفوذ آن در سنگ می‌شود. ماده پیستون همانند بدنه سرمته از فولاد 1.6580 است. چکش مورد استفاده در این پژوهش، چکش هالکوپ 90 با پیستون به وزن حدود 3.5 کیلوگرم است.

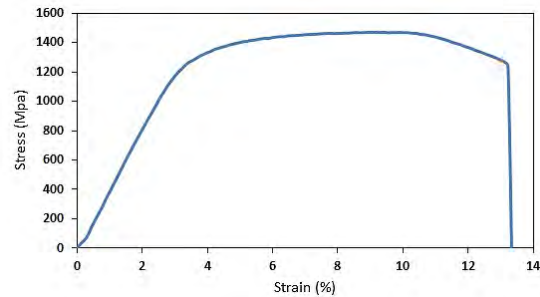
۳-۶- پارامترهای فرآیند

متغیرهای فرآیندی که بررسی خواهند شد، تلانسان انطباق دکمه و حفره سرمته، زاویه برخورد و جنس سنگ است. دامنه تغییرات متغیرهای مورد نظر در جدول 4 نشان داده شده است.



شکل ۵- نمونه کشش گسیخته شده

نتیجه آزمون کشش به صورت منحنی تنش-کرنش در شکل 6 آمده است. تنش تسلیم ماده حدود 1200 Mpa و استحکام نهایی 1430 Mpa به دست آمد. این منحنی به عنوان ورودی ماده بدنه سرمته در شبیه‌سازی‌ها اعمال شد.



شکل ۶- منحنی تنش-کرنش فولاد 6580

۳-۳- ماده سنگ

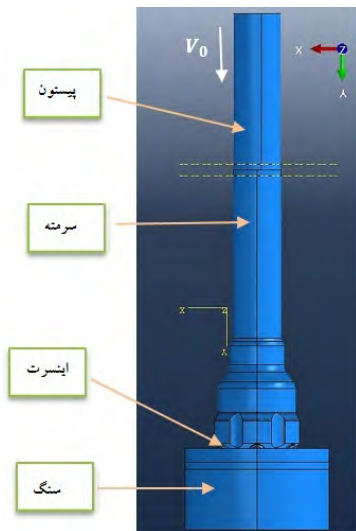
برای ماده سنگ، مدل دراگر-پراگر توسعه یافته استفاده شد. مدل دراگر-پراگر توسعه یافته برای مدل‌سازی موادی مانند خاک و سنگ که تنش سیلان وابسته به فشار از خود نشان می‌دهند به کار می‌رود (استحکام ماده با افزایش فشار بیشتر می‌شود). حالات خطی، هایپربولیک و نمایی در صفحه $q-p$ برای این مدل در شکل 7 نشان داده شده است.

جنس سنگ مورد مطالعه ماسه‌سنگ (Sandstone) با پارامترهای معرفی شده در پژوهش آورد و همکاران [16] و سنگ گرانیت (Granite) و سنگ آهک (Limestone) با پارامترهای معرفی شده در دیگر پژوهش‌ها به شرح جدول 2 استفاده شد [17-19].

جدول ۲- پارامترها اعمال شده برای ماده سنگ

پارامتر سنگ	مدول الاستیسیته (GPa)	C (چسبندگی) (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی	استحکام فشاری (MPa)
ماسه‌سنگ	6.1	8	44	36.8
سنگ آهک	22.9	20	40	65
گرانیت	65.9	66.4	50	260.3

این فرآیند با توجه به پیچیدگی شکل هندسی، برای بدنه سرمته از المان هرمی با حداقل ابعاد 0.4 و حداکثر 10 میلی متر (طبق اطلاعات به دست آمده از حالت تک دکمه) استفاده شد. در نواحی با تنش های بالا و همچنین سطوح تماس، از المان های کوچک تر استفاده شد. تعداد المان ها برای هر یک از قطعات در جدول 5 ارائه شده است.



شکل ۸- مدل هندسی فرآیند

جدول ۵- تعداد المان ها برای هر یک از قطعات

سنگ	دکمه (هر کدام)	سرمته	پیستون
44904	9968	282732	2819

۴-۳- صحت سنجی شبیه سازی ها

اتصال تداخلی بین-تویی با ابعاد نزدیک به ابعاد مدل سرمته، شبیه سازی و نتایج تنش در سطح مشترک و قطر بیرونی تویی با نتایج روش تحلیلی لامه که پیشتر در بخش معادلات حاکم توضیح داده شد مقایسه شد. در شکل 9 (الف) نتایج شبیه سازی بیان شده با ابعاد و پارامترهای ارائه شده در شکل 9 (ب) آمده است.

نتایج شبیه سازی و روش تحلیلی یاد شده در جدول 6 نشان داده شده است. در این جدول تنش فون-میزز است. همان-طور که مشاهده می شود نتایج شبیه سازی انجام شده تطابق خوبی با نتایج روش تحلیلی دارد. شایان ذکر است که در روش تحلیلی با توجه به پیش فرض های مسئله، تنش در کل سطح تماس ثابت در نظر گرفته می شود در حالی که در لبه های تویی تنش مقداری کمتر از مرکز آن است. در نتیجه برای اجتناب از خطا، مقادیر بیان شده با فاصله اندکی از لبه ها گزارش شده است.

دامنه تغییرات براساس نوع سرمته مورد مطالعه و همچنین بررسی های انجام شده به منظور ارزیابی تأثیر آن ها انتخاب شده است.

جدول ۴- دامنه تغییرات متغیرهای فرآیند

پارامتر	جنس سنگ	زاویه برخورد	تداخل
دامنه تغییرات	ماسه سنگ، سنگ آهک و گرانیت	0، 22 و 42 درجه	0.3، 0.6 و 0.9 و 1.2 درصد

۴- شبیه سازی برخورد سرمته /سنگ

۴-۱- حالت تک دکمه

با توجه به این که در حفاری درون چاهی، ضربه و چرخش به طور همزمان وجود دارد، در نتیجه بررسی اثر چرخش ضروری است. سرعت برخورد پیستون 10 متر بر ثانیه و سرعت چرخشی سرمته 100 دور در دقیقه به عنوان شرایط اولیه (Initial Conditions) شبیه سازی ها در نظر گرفته شد. با توجه به این که سنگ در پایین چاه توسط بستر آن احاطه شده و ابعاد سازند در مقایسه با ابعاد سرمته بسیار بزرگ تر است بنابراین جابجایی صفحات بیرونی مدل سنگ با اعمال شرایط مرزی (Boundary Conditions) محدود شد. شبیه سازی ها به صورت دینامیکی و با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس (Abaqus 6.14) انجام شد.

مدل در نظر گرفته شده مربوط به ابتدای فرآیند حفاری و تنها در بازه زمانی معادل یک ضربه از فرآیند است. در نتیجه از تأثیر دما در فرآیند صرف نظر شده است.

انطباق فشاری بین بدنه سرمته و دکمه با استفاده از قسمت اتصال تداخلی (Interference Fit) نرم افزار آباکوس شبیه سازی شد. در این نوع تحلیل ابتدا تداخل در مدل اولیه در نظر گرفته می شود. سپس در هر مرحله محاسباتی (Increment) با جابجا کردن گره ها، تداخل، حذف و کرنش و تنش ایجاد شده در فرآیند اعمال می شود. برای انتخاب اندازه شبکه [مش] مناسب از مقایسه نتایج تنش در روش تحلیلی لامه برای استوانه جدار ضخیم کمک گرفته شد.

۴-۲- سرمته DTH

پس از شبیه سازی حالت تک دکمه و بررسی نتایج، در این مرحله هدف شبیه سازی کل فرآیند با سرمته کامل 3.5 اینچ و با اعمال ضربه توسط پیستون و همچنین چرخش سرمته است. مدل هندسی این فرآیند در شکل 8 نشان داده شده است. در

توجه به مدارک موجود، ابعاد پیستون، اتصالات چکش (مدول- Spline) و شبیه‌سازی‌ها و بررسی‌های انجام‌شده انتخاب و نقشه‌های فنی تهیه شد.

مراحل ساخت شامل تراشکاری، سوراخکاری مسیر هوا و محل اینسرت‌ها، دنده‌زنی و شیپ‌زنی است. پس از ماشینکاری‌ها، عملیات حرارتی لازم برای دستیابی به استحکام و سختی مطلوب انجام شد و اینسرت‌های تنگستن کارباید به تعداد ۱۳ عدد در حفره‌های سرمته جاسازی شد. شکل ۱۰ تصویر سرمته ساخته شده قبل و بعد از اتصال اینسرت‌ها را نشان می‌دهد.

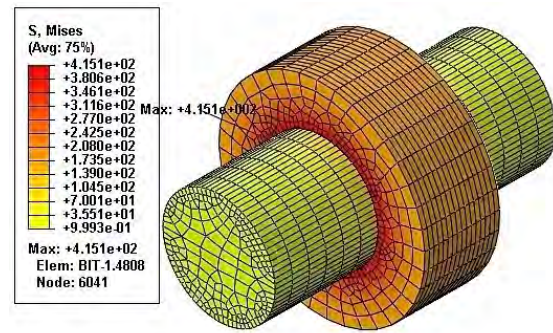


شکل ۱۰- سرمته ساخته شده: سمت چپ، قبل و سمت راست، بعد از اتصال اینسرت‌ها

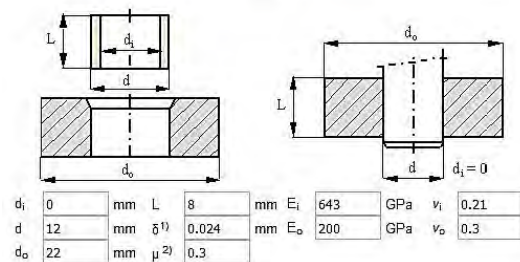
سرمته ساخته شده، در یکی از سایت‌های حفاری در تهران و در شرایط کاری واقعی آزمایش شد. آزمایش‌های حفاری در شرایط سخت در محیطی با ترکیبی از بتن مسلح و خاک و سنگ انجام. شرایط و پارامترهای آزمایش‌ها در جدول ۷ آورده شده است. طبق گزارشات ژئوتکنیکی سایت مورد نظر که جمعاً در ۵ نقطه حفاری (نمونه‌برداری) صورت گرفته بود، با توجه به احتمال تغییرات جنس و ضخامت لایه‌های خاک در نقاط مختلف زمین، ممکن است جنس و ضخامت خاک در محل‌های حفاری نشده با آنچه در محل‌های حفاری شده مشاهده گردیده، متفاوت باشد. این مطلب در حفاری‌های انجام‌شده برای تست سرمته مشاهده شد و در قسمت‌های مختلف، همانطور که از مواد خرد شده خروجی مشخص بود در برخی نقاط، حفاری بر روی تخته سنگ‌های بزرگ با جنس‌های مختلف انجام می‌شد.

جدول ۷- شرایط و پارامترهای تست‌های عملکردی سرمته

مدول الاستیسیته kgf/cm ²	استحکام فشاری سازند kgf/cm ²	ضریب چسبندگی kgf/cm ²	سرعت چرخشی	فشار باد
۳۰۰-۵۰۰	۳	۰/۰۸	۷۰ دور در دقیقه	۱۰ بار



(الف)



(ب)

شکل ۹- نتایج تنش اتصال تداخلی نمونه بین-تویی (الف) شبیه‌سازی و (ب) پارامترهای فرآیند

جدول ۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و روش تحلیلی لامه

فشار p	σ _r	σ _t	σ _e	
167.17	روش تحلیلی (pin)	-167.17	167.17	
	روش تحلیلی (hub)	-167.17	308.77	418.21
168.5	شبیه‌سازی (pin)	-168.5	168.5	
	شبیه‌سازی (hub)	-167.4	305.26	415.1

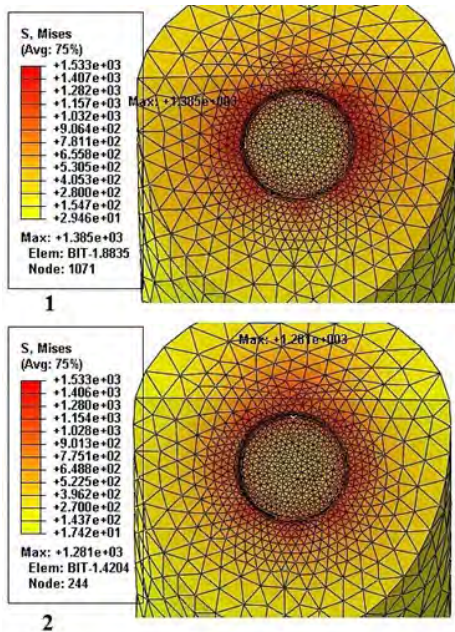
در این بررسی اندازه شبکه تا جایی کوچک‌تر شد که خطای نتایج شبیه‌سازی کمتر از ۱٪ شود. همچنین نتایج نشان‌دهنده دقت روش انتخاب شده بود. زمان شبیه‌سازی نیز در مقایسه با روش انبساط و انقباض حرارتی تویی (روشی که معمولاً برای شبیه‌سازی اتصال‌های تداخلی [پرسی] و به‌دست آوردن تنش پسماند فشاری استفاده می‌شود) به میزان قابل-توجهی کاهش می‌یابد.

۵- ساخت سرمته

در ادامه، سرمته درون‌چاهی ۳.۵ اینچ براساس نتایج و بازه تolerانس به‌دست آمده، طراحی و ساخته شد. ماده بدنه (فولاد ۶۵۸۰) از طریق تأمین‌کننده‌ای که مواد مورد نظر برای آزمایش‌ها خریداری شده بود تهیه شد. با توجه به حداکثر قطر سرمته، قطر شمش اولیه ۹۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ابعاد با

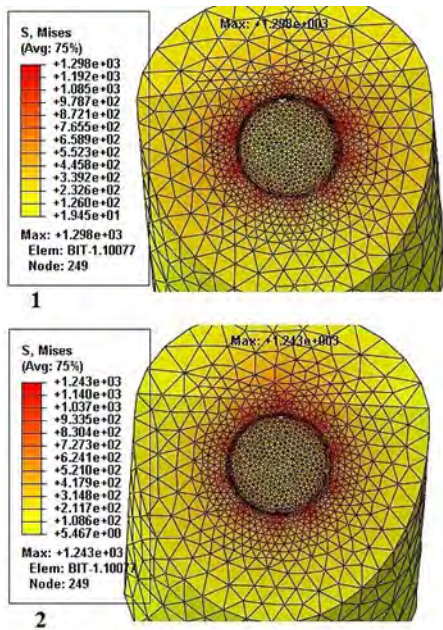
نتایج و بحث

نمای برش خورده نحوه برخورد سرمته (در حالت تک- دکمه) به زاویه تمایل 42 درجه که بحرانی ترین حالت آن است با تداخل 0.9 درصد برای سنگ گرانیت در شکل 11 نشان داده شده است.

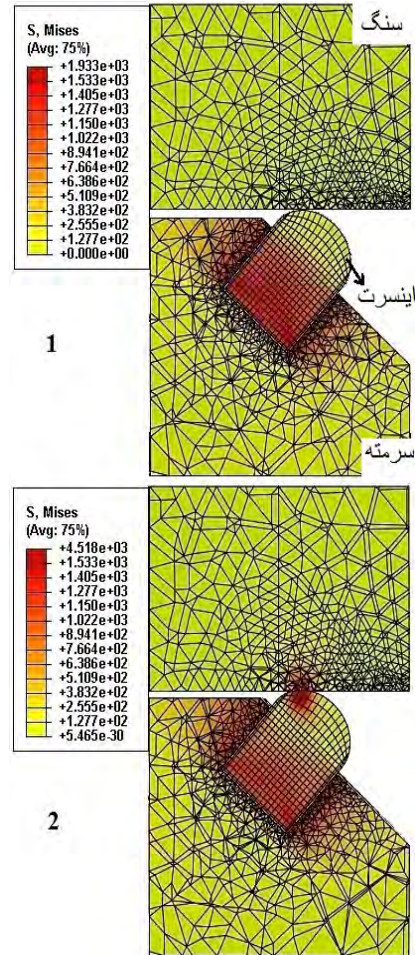


شکل ۱۲- تنش در سرمته: (۱) ابتدای فرآیند (۲) در زمان حداکثر نیرو (t=0.004s)

روند برخورد سرمته/سنگ در تداخل‌های مختلف مشابه حالت بالا است. تنش ایجاد شده در نقطه برخورد همانند حالت 0.9% بوده ولی تنش‌های بدنه سرمته تغییر می‌کند. این تنش‌ها برای حالت 0.6% در شکل 13 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش‌ها کمتر است و با پیشرفت فرآیند تغییر چندانی در توزیع تنش اتفاق نمی‌افتد و محل حداکثر تنش نیز تغییر نمی‌کند.



شکل ۱۳- توزیع تنش در سرمته با تداخل 0.6 درصد: (۱) ابتدای فرآیند (۲) در زمان حداکثر نیرو (t=0.004s)

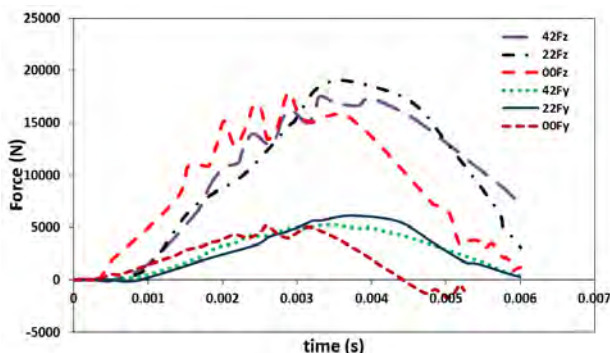


شکل ۱۱- نمای برش خورده‌ی برخورد سرمته/سنگ: زاویه 42 درجه و تداخل (0.9%) ابتدای فرآیند (۲) پس از برخورد (حداکثر نیرو)

توزیع تنش در سرمته نیز در شکل 12 آمده است. تنش در ابتدای فرآیند در اطراف سوراخ سرمته به دلیل هندسه نامتقارن آن ناهمگن است و در نواحی با ضخامت کمتر، بیشتر است. با پیشرفت فرآیند، برخلاف انتظار، تنش افزایش نیافته و توزیع تنش یکنواخت‌تر می‌شود. علت این امر این است که با توجه به جهت چرخش سرمته، پس از اینکه برخورد رخ می‌دهد تنش به نواحی با ضخامت بیشتر منتقل شده و از بار ناحیه نازک و لبه‌های سوراخ کاسته می‌شود.

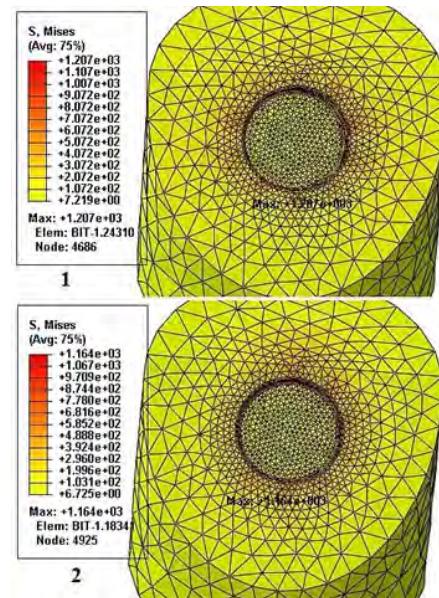
به‌طور کلی برای حالت زاویه ۴۲ درجه، تنش در ابتدای فرآیند در اطراف سوراخ‌ها به‌دلیل هندسه نامتقارن بدنه سرمه، ناهمگن است و در نواحی با ضخامت کمتر، بیشتر است (به-دلیل کرنش بیشتر). با پیشرفت فرآیند، برخلاف انتظار، تغییرات (افزایش) زیادی در مقادیر تنش مشاهده نمی‌شود. علت این امر این است که مقادیر تنش‌های حاصل از انطباق داخلی، بالا هستند و تنش حاصل از برخورد که در تعداد ۱۳ اینسرت و سطح جانبی نسبتاً بزرگ آن‌ها تقسیم می‌شود چشمگیر نیست. در مقادیر تداخل کمتر، با وجود اینکه اندازه تنش‌ها به دلیل میزان تداخل، کمتر است؛ در اثر نیروی حاصل از ضربه و چرخش، توزیع تنش تاحدودی غیریکنواخت‌تر شده و اختلاف حداکثر و حداقل تنش در بدنه سرمه بیشتر می‌شود. برای حالت زاویه ۲۲ درجه، روند دقیقاً مشابه حالت ۴۲ درجه است با این تفاوت که اندازه تنش‌ها و غیریکنواختی آن کمتر است که نشان دهنده بحرانی‌تر بودن حالت ۴۲ درجه است. برای بررسی بیشتر فرآیند نیروهای وارده به سرمه در حین برخورد به‌دست آمد. در شکل ۱۶ نیروهای عمودی و جانبی در تداخل وابسته نیست و همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروی جانبی که با در نظر گرفتن حرکت چرخشی به‌وجود آمده است قابل توجه بوده (حدود ۲۵ الی ۳۰ درصد نیروی عمودی) و تنش‌های برشی نیز ایجاد می‌کند و در نتیجه در نرخ نفوذ و سرعت حفاری تأثیرگذار خواهد بود. این موضوع برای اولین بار در این مقاله بررسی شده است.

نیروهای عمودی حاصل از برخورد اگرچه اختلاف کمی دارند ولی برای حالت ۲۲ درجه بیشترین است. از طرفی برای حالت ۴۲ درجه، شیب ابتدای فرآیند (نرخ افزایش نیرو) و نوسانات آن بیشتر است. علت این امر شکست سنگ است که به‌دلیل متعامد بودن برخورد در حالت ۴۲ درجه، شکست زودتر اتفاق افتاده و انرژی ضربه زودتر اتلاف می‌شود و نیروها کاهش می‌یابند.



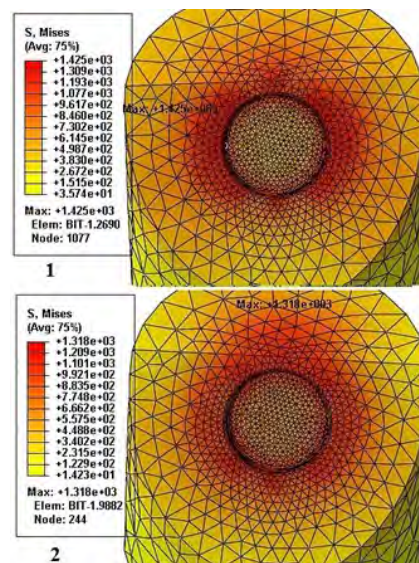
شکل ۱۶- نیروهای وارده به سرمه در زمان برخورد

شکل ۱۴ توزیع تنش در سرمه را برای حالت تداخل ۰.۳٪ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با وجود اینکه اندازه تنش‌ها به دلیل میزان تداخل کمتر نسبت به دو حالت قبل کمتر است ولی در اثر نیروی حاصل از ضربه و چرخش، توزیع تنش غیریکنواخت‌تر می‌شود.



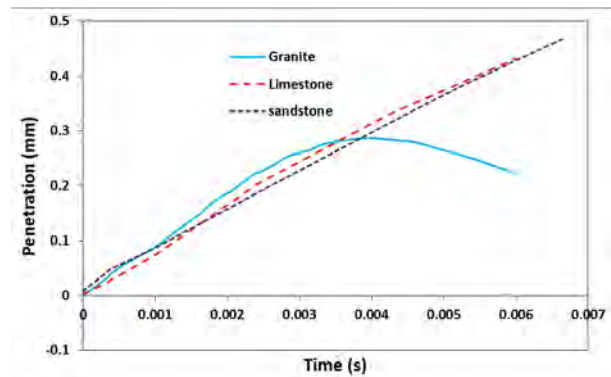
شکل ۱۴- توزیع تنش در سرمه با تداخل ۰.۳ درصد: (۱) ابتدای فرآیند (۲) در زمان حداکثر نیرو ($t=0.004s$)

در شکل ۱۵ توزیع تنش در سرمه با تداخل ۱.۲ درصد نشان داده شده است. در این حالت اندازه تنش از همان ابتدا تقریباً معادل حداکثر استحکام ماده است و در نتیجه احتمال ایجاد ترک و شکست در بدنه سرمه بشدت افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵- توزیع تنش در سرمه با تداخل ۱.۲ درصد: (۱) ابتدای فرآیند (۲) در زمان حداکثر نیرو ($t=0.004s$)

شکل 17 منحنی‌های جابجایی-زمان (نفوذ) سرمته در سنگ‌های مختلف را نشان می‌دهد. در حالت سنگ گرانیت با توجه به استحکام بالای سنگ ابتدا دکمه در سنگ نفوذ کرده سپس مقداری بازگشت به عقب دارد ولی در حالت‌های سنگ آهک و ماسه‌سنگ با توجه به استحکام پایین این مواد نفوذ در کل زمان فرآیند ادامه دارد که زمان برخورد طولانی‌تری ایجاد می‌کند.

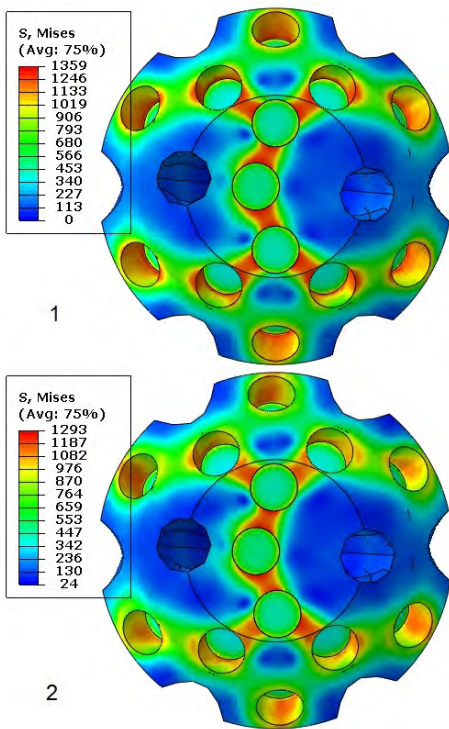


شکل 17- منحنی‌های جابجایی-زمان (نفوذ) در سنگ‌های مختلف

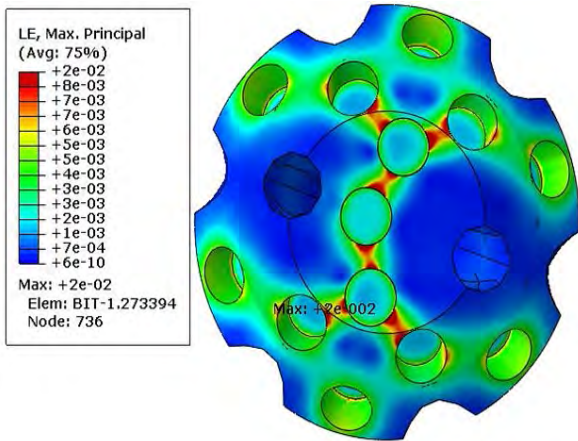
بدین ترتیب از نتایج شبیه‌سازی سرمته کامل، توزیع تنش در نواحی سوراخ‌ها و اطراف آن در سرمته حفاری 3.5 اینچ واقعی برای حالت تداخل 0.9 درصد مطابق شکل 18 بدست آمد. با توجه به وجود انطباق تداخلی و در نتیجه کرنش و تنش در نواحی تماس، مخصوصاً در نقاطی که دو سوراخ به هم نزدیک‌تر هستند، تنش حداکثر است. این مسئله به خوبی در اطراف سوراخ مرکزی قابل تشخیص است. همانطور که در حالت تک‌دکمه‌ای مشاهده گردید در اینجا نیز با شروع فرآیند، مقدار تنش اندکی کاهش می‌یابد.

اگرچه به دلیل بزرگ‌تر شدن ابعاد بدنه سرمته در حالت سرمته کامل، تنش در اکثر نقاط نسبت به حالت تک‌دکمه‌ای کاهش یافته است ولی به دلیل برهم‌نهی تنش‌های حاصل از اتصال دکمه‌های مختلف در مجاورت همدیگر، تنش‌های معادل در این نواحی بالاتر است. در نتیجه با در نظر گرفتن تأثیر دکمه‌های مجاور، میزان تداخل 0.6 الی 0.9 درصد بهترین توزیع تنش را ارائه می‌دهد. سرمته‌ای نیز که براساس نتایج به-دست آمده و تیرانس مذکور ساخته شد در تست‌های میدانی، عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داد.

در شکل 19 توزیع کرنش لگاریتمی (واقعی) در بدنه سرمته نشان داده شده است. کرنش‌ها در اطراف سوراخ‌ها ایجاد شده و در انتهای سوراخ‌ها و نیز در نواحی که سوراخ‌ها به همدیگر نزدیک‌ترند حداکثر است.



شکل 18- توزیع تنش در سرمته: (1) ابتدای فرآیند (2) در زمان حداکثر نیرو (t=0.004s)



شکل 19- توزیع کرنش لگاریتمی در بدنه سرمته

جابجایی‌ها در سرمته نیز در شکل 20 آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود با فاصله گرفتن از مرکز سرمته (افزایش شعاع) جابجایی‌ها بیشتر می‌شود. علت این امر چرخش سرمته است که در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. بیشترین جابجایی مربوط به حداکثر قطر سرمته و دکمه‌های محیطی آن می‌باشد که در عمل منجر به سایش بیشتر این دکمه‌ها و نیز نیروهای بزرگتر آن‌ها خواهد شد.



الف



ج

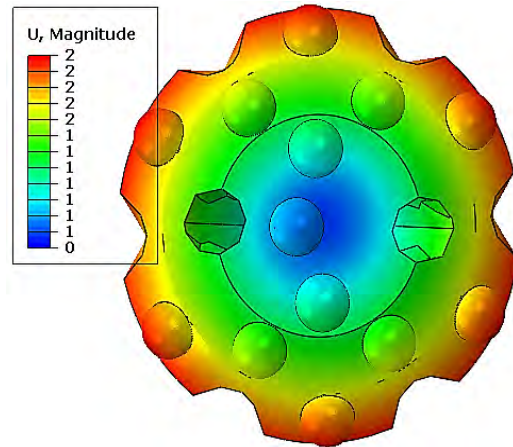


ب

شکل ۲۲- الف) شروع فرآیند حفاری، ب) سرتمه بعد از 30 و ج) بعد از 102 متر حفاری

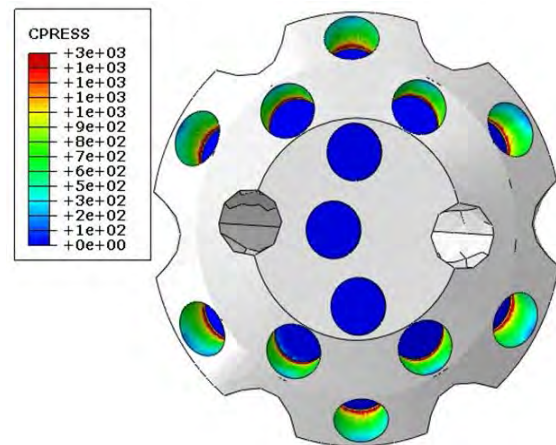
نتیجه گیری

مطالعه حاضر نشان داد که میزان تداخل، سرعت اولیه و زاویه برخورد تأثیر زیادی در تنش‌ها و نیروهای فرآیند دارند. سه زاویه برخورد صفر، 22 و 42 درجه مطالعه شد. در زاویه برخورد 42 درجه بدلیل نیروهای جانبی و ضخامت‌های کم بدنه، بیشترین تنش‌ها ایجاد می‌شود. از طرفی در نواحی اطراف سوراخ‌های نزدیک به هم نیز تنش‌های حداکثر شکل می‌گیرد. در حالت تداخل 1.2 درصد تنش در بدنه سرتمه تقریباً به استحکام نهایی آن می‌رسد و با کاهش تداخل، تنش‌ها کاهش و در نهایت در حالت 0.3 درصد، ماده تقریباً به‌طورکلی در ناحیه الاستیک قرار دارد. در حالت 0.9 درصد و 0.6 درصد مقداری کرنش پلاستیک نیز در بدنه ایجاد خواهد شد. در زمان برخورد توزیع تنش مخصوصاً در دو حالت اخیر یکنواخت‌تر می‌شود که دلیل آن توزیع تنش در سطح بیشتر و در نواحی با تنش پایین‌تر است. سرتمه درون‌چاهی ساخته شده براساس یافته‌های این پژوهش، عملکرد بسیار خوب و امیدوارکننده‌ای نشان داد. برای دستیابی به بهترین شرایط تنشی در سرتمه و جلوگیری از درآمدن دکمه‌ها و در نتیجه افزایش عمر آن میزان تداخل 0.6 الی 0.9 درصد پیشنهاد می‌شود.



شکل ۲۰- جابجایی‌ها در سرتمه

بررسی توزیع فشار تماسی (Contact Pressure) در دیواره‌های حفره‌های سرتمه (شکل 21) مشخص می‌کند که فشار تماسی حاصل از انطباق تداخلی در تمامی سوراخ‌ها تقریباً یکسان است (با تغییرات اندک نسبت به ضخامت) و در نتیجه تغییرات کرنش و تنش در نواحی اطراف سوراخ‌ها ناشی از تغییرات فشار تماسی نبوده و مربوط به اصل برهم‌نهی تنش‌ها است.



شکل ۲۱- فشار تماسی در دیواره‌های حفره‌ها (سطوح تماس)

درخصوص سرتمه ساخته شده نیز، شکل 22 (a) آغاز فرآیند حفاری با سرتمه مورد نظر را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها، 5 حلقه چاه به طول 6 متر در یک روز با نرخ نفوذ 0.5 m/min حفر شد. سپس 12 حلقه چاه 6 متری دیگر در یک روز دیگر حفاری شد. وضعیت سرتمه بعد از حدود 30 و 102 متر حفاری به ترتیب در شکل 22 (b) و (c) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حفاری با سرتمه فوق کاملاً موفقیت‌آمیز بوده و تنها سایش بسیار اندکی در دکمه‌ها مشاهده شد.

منابع

- Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, pp. 827–835.
- [13] Timo Saksala, Marion Fourmeau, Pascal-Alexandre Kane, and Mikko Hokka, 2018; "3D finite elements modelling of percussive rock drilling: Estimation of rate of penetration based on multiple impact simulations with a commercial drill bit", Computers and Geotechnics, 55–63.
- [14] E.J. HEARN, 1997; "Mechanics of Materials 1 (Third Edition)", pp. 215-253.
- [15] Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. 2013; "ABAQUS analysis user's manual help online", SIMULIA.
- [16] A. ORD, I. VARDOULAKIS, R. KAJEWSKI, 1991; "Shear Band Formation in Gosford Sandstone", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 28. No. 5, pp. 397-409.
- [17] Y.B. Lu, Q.M. Li, G.W. Ma, 2010; "Numerical investigation of the dynamic compressive strength of rocks based on split Hopkinson pressure bar tests", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 47, pp. 829–838.
- [18] G. Mauricio, 2014; "Soft rocks in Argentina", International Journal of Mining Science and Technology 24, pp. 883–892.
- [19] T. Saksala, M. Hokka, V. Kuokkala, J. Makinen, 2013; "Numerical modeling and experimentation of dynamic Brazilian disc test on Kuru granite", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 59, pp. 128–138.
- [20] J. Ma, N.H. Duong, S. Lei, 2015; "Numerical Investigation of the performance of microbump textured cutting tool in dry machining of AISI 1045 steel", Journal of Manufacturing Processes 19, pp. 194–204.
- [21] A. Nordgren, B.Z. Samani, R. M'Saoubi, 2014; "Experimental Study and Modelling of Plastic Deformation of Cemented Carbide Tools in Turning", Procedia CIRP 14, pp. 599–604.
- [۱] نجفی ثانی، حسن؛ برادران سید، ابوالفضل؛ ۱۳۹۱؛ «طراحی و توسعه سرمته‌های PDC»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- [۲] نقی خانی، مهدی؛ علی محمدی، حمیدرضا؛ ۱۳۹۰؛ «استفاده از طرح رویه پاسخ (RSM) در تخصیص بهینه ترانس»، فصلنامه علوم و فناوری فضایی، سال چهارم، شماره ۱-۲، ص ۶۱-۶۸.
- [3] B. Changgen; Q. Yegao; C. Zhiqiang; L. Baolin; 2009; "Numerical Simulation of Impact on Pneumatic DTH Hammer Percussive Drilling", Journal of Earth Science, Vol. 20, No. 5, pp. 868–878.
- [4] B. Ulrik; J. Staffan; 2008; "A new view of the deterioration and wear of WC/Co cemented carbide rock drill buttons", Wear, pp. 29–41.
- [5] Richard G; Budynas and J. Keith Nisbett; 2011; "Shigley's Mechanical Engineering Design", Ninth Edition", McGraw-Hill, New York.
- [6] Y. Fan; Z. Huang; D. Gao; Q. Li; 2011; "Experimental study of an Al₂O₃/WC-Co nanocomposite based on a failure analysis of hammer bit", Engineering Failure Analysis, pp. 1351-1358.
- [7] I. NORTHROP; 1987; "The joining of tungsten carbide hardmetal to steel", J. S. At. Inst. Min. Metall., vol. 87, no. 5, pp. 125-135.
- [8] Y. Zhang, B. McClain, X.D. Fang, 2000; "Design of interference fits via finite element method", International Journal of Mechanical Sciences 42, pp. 1835-1850.
- [9] S. Sen, B. Aksakal, 2004; "Stress analysis of interference fitted shaft–hub system under transient heat transfer conditions", Materials and Design 25, pp. 407–417.
- [10] Xu Zhang, Hao Jiang, Tong Luo, et al. 2019; "Theoretical and experimental investigation on interference fit in electromagnetic riveting", International Journal of Mechanical Sciences. Accepted manuscript.
- [11] L. E. Chiang, D. A. Elías, 2008; "A 3D FEM methodology for simulating the impact in rock-drilling hammers", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, pp. 701–711.
- [12] L.P. Franca, 2011; "A bit–rock interaction model for rotary–percussive drilling", International