

بررسی تغییرات تنش‌های حرارتی و مکانیکی ایجاد شده ناشی از سوراخ‌کاری سنگ با لیزر در فشارهای جانبی بالا با روش اجزاء محدود

عبداله دینی^۱، مرتضی احمدی^{۲*}، کامران گشتاسبی^۳

۱- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت: مرداد ۱۳۹۴، پذیرش: دی ۱۳۹۵)

چکیده

مدل کردن و شبیه‌سازی اثر پارامترها روی رفتار سنگ در طی چند دهه اخیر افزایش یافته است. امروزه شبیه‌سازی ابزار مهمی برای تحلیل‌هایی است که در شرایط آزمایشگاهی امکان انجام آن میسر نیست. از علل اصلی استفاده از مدلسازی عددی سوراخ‌کاری با لیزر می‌توان به عدم دسترسی به فشارهای جانبی بالاتر از شرایط آزمایشگاهی موجود، بالا رفتن هزینه‌های سوراخ‌کاری با قطر زیاد، عدم امکان تفکیک تنش و کرنش‌های مکانیکی و حرارتی از هم، ناشی از لیزر در آزمایشگاه و همچنین بررسی اثرات ثانویه لیزرکاری در سنگ اشاره کرد. در این تحقیق، از روش المان محدود برای بررسی تنش‌های حرارتی و مکانیکی ناشی از سوراخ‌کاری با لیزر *ND:YAG* در نمونه سنگ‌های مخازن هیدروکربوری استفاده شده است. برای این منظور از نرم افزار آباکوس (*ABAQUS*) برای تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی استفاده شد. یک مغزه سنگ مدلسازی شد و خصوصیات حرارتی سنگ مخزن از قبیل هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی و چگالی به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شد. پس از اعمال نرخ حفاری و مدلسازی لیزرکاری بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی و انطباق خروجی مدل با این آزمون‌ها، اثر فشارهای جانبی بالا روی لیزر سنگ مطالعه شد. نتایج نشان داد مدل عددی به کار گرفته شده تطابق خوبی با شرایط واقعی دارد. در اطراف سوراخ ایجاد شده، تنش حرارتی ناشی از لیزرکاری نسبت به تنش‌های مکانیکی ناشی از فشار جانبی کمتر است و توزیع تمرکز تنش در آن ارتباط زیادی با مقدار فشار در برگیرنده‌ی نمونه سنگ دارد.

کلید واژه‌ها

برش سنگ، لیزرکاری در سنگ، تنش حرارتی و مکانیکی، روش المان محدود نرم‌افزار آباکوس

ارجاع به این مقاله:

دینی، ع.، احمدی، م.، گشتاسبی، ک.، (۱۳۹۵)، بررسی تغییرات تنش‌های حرارتی و مکانیکی ایجاد شده ناشی از سوراخ‌کاری سنگ با لیزر در فشارهای جانبی بالا با روش اجزاء محدود، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶(۱۲)، ۴۷-۵۵.

۱- مقدمه

بررسی قرار گرفت [۵]. آنها به منظور دسترسی به شرایط فشار در ته چاه و نزدیک شدن به شرایط واقعی در مخازن هیدروکربوری، اقدام به انجام آزمایش در شرایط فشار جانبی بالا کردند. به همین منظور در فشارهای صفر، ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۳۷ مگاپاسکال اقدام به انجام آزمایش شد. تحقیق آنها تنها شامل بررسی تأثیر فشار جانبی و حالت‌های مختلف اشباع در مقدار انرژی ویژه و نرخ نفوذ بوده و در آن بررسی توزیع حرارت و تنش‌های مکانیکی و حرارتی ناشی از لیزر مطالعه نشد چرا که در آزمون‌های آزمایشگاهی انجام این بررسی امکان‌پذیر نیست.

از اینرو در این پژوهش از روش المان محدود برای بررسی تأثیر فشار جانبی در تنش‌های حرارتی و مکانیکی ناشی از سوراخکاری با لیزر *ND:YAG* در نمونه سنگ‌های مخازن هیدروکربوری استفاده شده است.

۲- تئوری تحلیل و مدل‌سازی عددی

به منظور درک روند انجام محاسبات و آشنایی با تئوری مدل‌سازی عددی در روش المان محدود، فرمولاسیون و تئوری تحلیل تنش‌های مکانیکی و حرارتی المان محدود در زیر آورده شده است.

۲-۱- تحلیل تنش حرارتی و مکانیکی

نرم افزار آباکوس بر پایه روش المان محدود است و در آن، معادله تنش‌های حرارتی ناشی به گرمایش پالس لیزر را می‌توان از طریق روابط تنش- کرنش به دست آورد. با فرض اینکه هیچ تنش مکانیکی خارجی در سطح نمونه نباشد، روابط تنش حرارتی در مختصات استوانه‌ای عبارت است از [۳، ۶]:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r \times \nu (\sigma_\theta + \sigma_z)] + \alpha_T T \quad (1)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta \times \nu (\sigma_r + \sigma_z)] + \alpha_T T \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z \times \nu (\sigma_r + \sigma_\theta)] + \alpha_T T \quad (3)$$

که در آن E ، ν و α_T به ترتیب مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و ضریب انبساط گرمایی سنگ است. اگر تابع تنش حرارتی به صورت زیر تعریف شود:

$$\sigma_r = \frac{\phi}{r} \quad (4)$$

روش عددی و شبیه‌سازی عددی در مهندسی سنگ بسیار افزایش یافته است. امروزه شبیه‌سازی ابزار مهمی برای آزمون‌هایی است که در شرایط آزمایشگاهی امکان انجام روی سنگ میسر است. سوراخکاری با لیزر روی سنگ بدون فشار جانبی بصورت محوری امکان‌پذیر است. از علل اصلی استفاده از روش عددی در سوراخکاری با لیزر می‌توان به عدم دسترسی به فشارهای جانبی بالاتر از شرایط آزمایشگاهی، بالا رفتن هزینه‌های سوراخکاری با قطر زیاد، امکان بررسی تغییرات تنش و کرنش‌های مکانیکی و حرارتی هم‌زمان ناشی از لیزرکاری اشاره نمود. از اینرو مدل‌سازی عددی برای تحلیل کامل تنش‌های حرارتی و مکانیکی ناشی از سوراخکاری با لیزر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و راه را برای بررسی‌های دقیق‌تر هموار نموده است.

ژیو ژا و همکاران در سال ۲۰۰۴ سوراخکاری با لیزر را به صورت دو بعدی مدل‌سازی کردند و بیشتر تاثیرات شیمیایی و میکروسکوپی سنگ را مورد بررسی قرار دادند [۱]. در سال ۲۰۱۰ پژوهشی توسط ییلباس و همکاران در زمینه برش لیزری در لبه‌های تیز و توسعه‌ی تنش حرارتی در قسمت برش مورد بررسی قرار گرفت [۲]. در این تحقیق، روش المان محدود و نرم‌افزار *ANSYS* برای پیش‌بینی دما و تنش استفاده شد. در سال ۲۰۱۱ ییلباس و همکاران پژوهش دیگری در زمینه تحلیل تنش ناشی از برش لیزر در ورقه آلیاژ کولار (فیبر مصنوعی) انجام دادند [۲]. در این بررسی، برش لیزری ورقه کولار انجام شد و زمینه تنش‌های حرارتی در منطقه برش با استفاده از کد المان محدود و نرم‌افزار آباکوس پیش‌بینی شد و این پیش‌بینی دما از طریق داده‌های ترموکوپل تأیید شد. همچنین ییلباس و همکاران در سال ۲۰۱۱ تنش‌های حرارتی ناشی از حفر سوراخ توسط لیزر در فلز برونز را بررسی کردند [۴]. در این پژوهش، ایجاد سوراخ برنز با استفاده از لیزر انجام شد و تنش حرارتی ایجاد شده در مقطع سوراخ با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار *ABAQUS* مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۲۰۱۱ اثر فشار جانبی در سوراخکاری ناشی از لیزر در نمونه سنگ مخزن چاه‌های نفتی توسط احمدی و همکاران مورد

$$\sigma_r^* = \frac{1}{r^{*2}} \int_{g^*}^r T^* r^* dr^* \quad (12)$$

$$\sigma_\theta^* = \frac{1}{r^{*2}} \int_{g^*}^r T^* r^* dr^* \times T^* r^{*2} \quad (13)$$

$$\sigma_z^* = T^* \quad (14)$$

و رابطه‌ی تنش معادل عبارت است از [۳]:

$$\sigma_e^* = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_r^* \times \sigma_\theta^*)^2 + (\sigma_r^* \times \sigma_z^*)^2 + (\sigma_\theta^* \times \sigma_z^*)^2]} \quad (15)$$

قانون هوک برای تنش و کرنش الاستیک به صورت زیر

است:

$$\{\Delta\sigma\} = [D] \{\Delta\varepsilon^{el}\} \quad (16)$$

که در آن $[D]$ ثابت الاستیک وابسته به دما، مدول الاستیسیته E و نسبت پواسون ν است. بردار کرنش کل نیز برابر است با:

$$\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon^{el}\} + \{\Delta\varepsilon^{th}\} + \{\Delta\varepsilon^{pl}\} \quad (17)$$

که در آن $\{\Delta\varepsilon^{el}\}$ بردار کرنش الاستیک، $\{\Delta\varepsilon^{th}\}$ بردار کرنش حرارتی و $\{\Delta\varepsilon^{pl}\}$ بردار کرنش پلاستیک است. مقدار $\{\Delta\varepsilon^{pl}\}$ به مقادیر حرارت ΔT که از آنالیز حرارتی محاسبه می‌شود، وابسته است. در نرم افزار آباکوس، می‌توان با تعریف ضریب انبساط حرارتی (α) برای هر نوع جسم جامد همگن، تحلیل‌های حرارت و جابجایی وابسته به زمان را محاسبه نمود [۸].

۲-۲- مدل‌سازی عددی

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، برای انجام مدل‌سازی سوراخ‌کاری با لیزر از نرم‌افزار آباکوس به دلیل امکانات و قابلیت‌هایی که دارد، استفاده شده است. از جمله قابلیت‌های آباکوس می‌توان به سادگی کار با آن به دلیل داشتن محیط گرافیکی کاربر پسند، تعریف آسان پارامترهای حرارتی و مکانیکی مواد مختلف، اعمال نرخ حفاری بدون نیاز به کدنویسی‌های وقت‌گیر که در اغلب برنامه‌های دیگر صورت می‌گیرد، داشتن کتابخانه‌ی کاملی از مش‌بندی‌های موردنیاز بر حسب نوع تحلیل، توانایی این نرم‌افزار در تحلیل تنش، کرنش و توزیع حرارت لیزرکاری و نمایش خروجی مدل‌سازی بصورت گرافیکی با دیگرام‌ها و اشکال قابل فهم‌تر اشاره کرد.

۲-۳- هندسه مدل و نوع مش‌بندی المان‌ها

با توجه به اینکه نمونه تحت بارگذاری با تقارن محوری است، هندسه مدل به صورت اکسی‌متریک یا تقارن

$$\sigma_\theta = \frac{d\varphi}{dr} \quad (5)$$

که φ تابع تنش است. در حالت کرنش صفحه‌ای، کرنش در محور Z برابر با صفر بوده و تنش براساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود، لذا:

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) \times \alpha_T E T \quad (6)$$

رابطه سازگاری برای حالت اکسی‌متریک^۱ به صورت زیر است [۷]:

$$r \left(\frac{d\varepsilon_\theta}{dr} \right) + \varepsilon_\theta \times \varepsilon_r = 0 \quad (7)$$

با جایگزینی روابط (۲) تا (۶) در رابطه (۷)، رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} \times \frac{\varphi}{r^2} = \frac{\alpha_T E}{1 \times \nu} \frac{dT}{dr} \quad (8)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۸)، رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$\varphi = \left(\frac{\alpha_T E}{1 \times \nu} \right) \frac{1}{r} \int_g^r T r dr + \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r} \quad (9)$$

با قرار دادن $\sigma_r = \frac{\varphi}{r}$ در رابطه (۹)، رابطه (۱۰) حاصل می‌شود:

$$\sigma_r = \left(\frac{\alpha_T E}{1 \times \nu} \right) \frac{1}{r^2} \int_g^r T r dr + \frac{C_1}{2} + \frac{C_2}{r^2} \quad (10)$$

شرایط مرزی و در سطح تماس جامد-مایع برای σ_r به صورت زیر است:

$$r = g \rightarrow \sigma_r = 0$$

$$r = \infty \rightarrow \sigma_r = 0$$

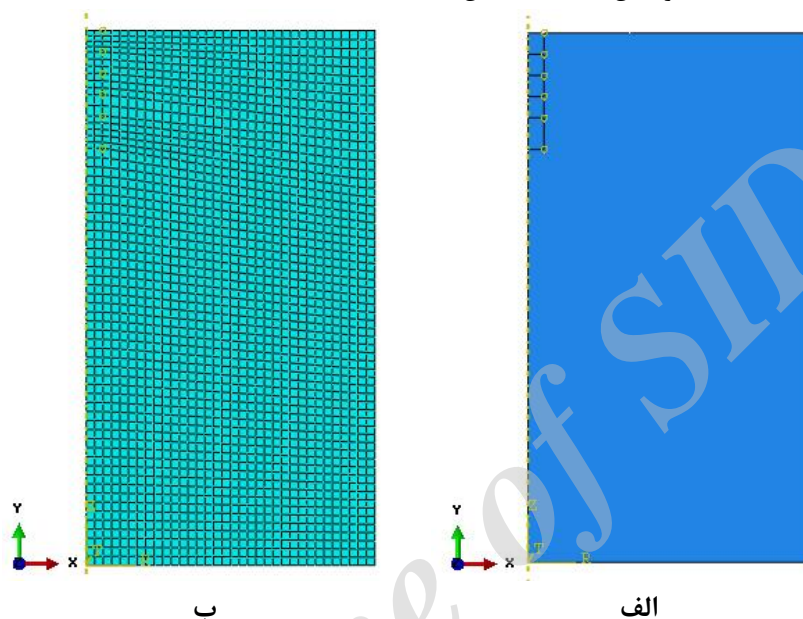
با قرار دادن شرایط مرزی در معادله ۶، ضرایب C_1 و C_2 صفر شده و معادله‌ی تنش معادل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma^* = \sigma \left(\frac{1 \times \nu}{\alpha_T E} \right) \left[\frac{k_0 \delta}{I_0 (1 \times r_f)} \right] \quad (11)$$

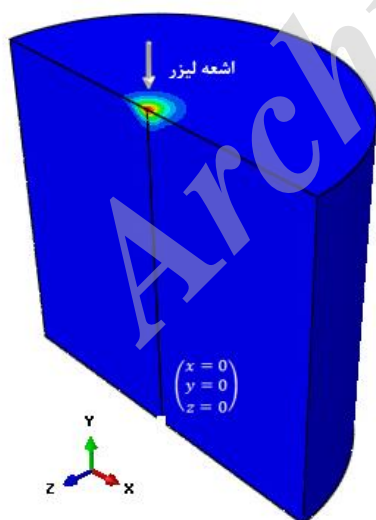
که در آن، k_0 ضریب رسانایی، δ عمق جذب، r_f ضریب انتقال و I_0 ماکزیمم توان لیزر است. برای ساده‌سازی محاسبات از روابط ستاره (*) دار استفاده شده است. به این ترتیب که با اعمال ضرایبی در هر کدام از پارامترها، آن پارامتر بی‌بعد می‌شود. در واقع علائم ستاره‌دار بیانگر حالت معادل تنش است. در نهایت تنش حرارتی با معادلات زیر محاسبه می‌شود:

از نوع CAX4T تقسیم شد. در شکل (۱-ب) نمایی از نوع مش‌بندی مدل ارائه شده است.

همچنین در شکل ۲ نمایی از هندسه نمونه مدل و محل فرضی اشعه لیزر و هم چنین مختصات نقطه مبدأ در آن برای بیان مختصات نقاط مورد نظر در تحلیل‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۱: الف) هندسه مدل و بخش‌هایی که بایستی سوراخ شود، ب) نوع مش‌بندی مدل در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۲: نمایی از هندسه نمونه مدل و محل اعمال اشعه لیزر

محوری ایجاد شد. ابعاد نمونه‌ها به صورت استوانه‌ای با قطر ۵۴ و ارتفاع ۵۰ میلیمتر ساخته شد. مدل و بخش‌هایی از مدل که باید سوراخ شود در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. پس از ساخت هندسه‌ی مدل نوع المان‌ها انتخاب می‌شود.

با توجه به مش‌سنجی‌های صورت گرفته، از المان‌های مستطیلی چهار گره‌ای استفاده شده و مدل به ۲۱۴۲ المان

مشخصات نوع لیزر مدلسازی شده، در جدول ۱ ارائه شده است. از آنجا که در این تحقیق اثرات ثانویه لیزرکاری مدنظر بوده، برای مدل کردن نیروی لیزر، مقدار نرخ حفاری در نظر گرفته شده است.

۲-۴- خصوصیات مواد

انتخاب خصوصیات مواد تأثیر زیادی بر روی صحت مدل عددی دارد. خصوصیات مکانیکی مورد نیاز برای نمونه سنگ آهک و گرانیت در جدول ۲ ارائه شده است.

همچنین پارامترهای حرارتی سنگ آهک و گرانیت در جدول ۳ ارائه شده است. داده‌های مربوط به پارامترهای ضریب انبساط حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال حرارت از طریق آزمایش‌های فیزیکی تعیین مشخصات حرارتی مواد به دست آمده است.

جدول ۱: مشخصات لیزر در تحلیل عددی [۹]

فرکانس (HZ)	طول موج (nm)	عرض پالس (ms)	گاز دمنده	فشار گاز (بار)
۳۰	۱۰۶۴	۲	نیتروژن	۳

جدول ۲: خصوصیات ژئومکانیکی نمونه‌ها [۹]

پارامتر	سنگ آهک	گرانیت
مدول الاستیسیته (Pa)	۱۶e۹	۵۵e۹
ضریب پواسون (ν)	۰/۲۵	۰/۳
چگالی (Kg/m ³)	۲۲۲۵	۲۶۶۰

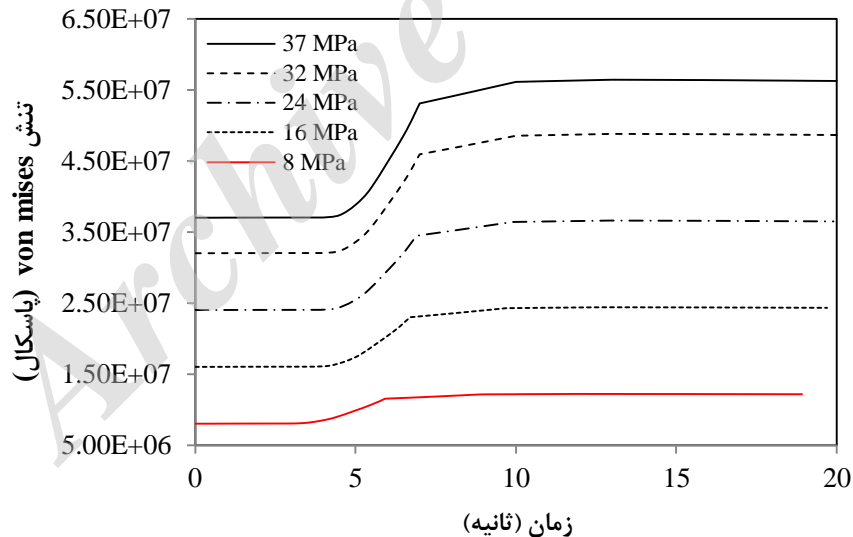
جدول ۳: پارامترهای حرارتی سنگ آهک و گرانیت

پارامتر حرارتی	سنگ آهک	گرانیت
ضریب انبساط حرارتی (m/m K)	۸e-۶	۷/۹e-۶
ظرفیت گرمایی ویژه (J/Kg K)	۹۰۸	۸۰۰
ضریب انتقال حرارت (W/m K)	۱/۲۱	۳/۳۲
چگالی (Kg/m ³)	۲۲۲۵	۲۶۶۰

سنگ آهک استخراج و در نرم‌افزار آباکوس وارد شد. در شکل ۳ تنش‌های ایجاد شده در اطراف سوراخ ناشی از لیزرکاری تحت فشارهای محصور کننده ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۳۷ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش مقدار فشارهای جانبی، تنش ایجاد شده در اطراف سوراخ نیز افزایش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه وجود روند ثابتی در افزایش تنش متناسب با افزایش فشار جانبی است.

۳- تجزیه و تحلیل

برای بررسی تأثیر فشار جانبی مختلف و مقایسه با کار آزمایشگاهی قبلی، نمونه سنگ آهک تحت فشارهای ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۳۷ مگاپاسکال قرار گرفته و مدل‌سازی شد. برای انجام سوراخکاری سنگ با لیزر به صورت عددی، مقادیر نرخ حفاری از روی جداول اثر زمان لیزرکاری در نمونه



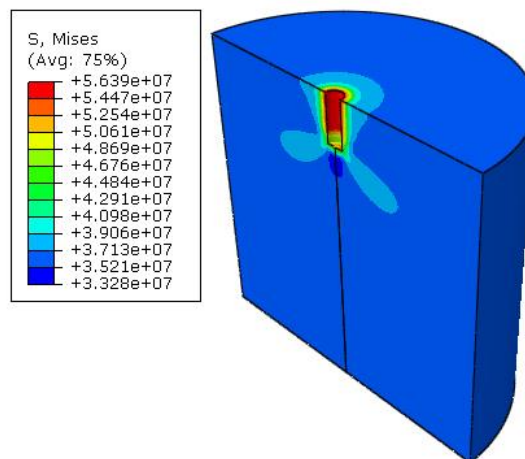
شکل ۳: نمودار تنش در واحد زمان تحت فشارهای جانبی مختلف برای نمونه سنگ آهک

حاصل از آن با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. مقایسه توزیع حرارت لیزرکاری در مدل عددی و شرایط آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی گاهان و همکاران [۱۰] وجود دارد.

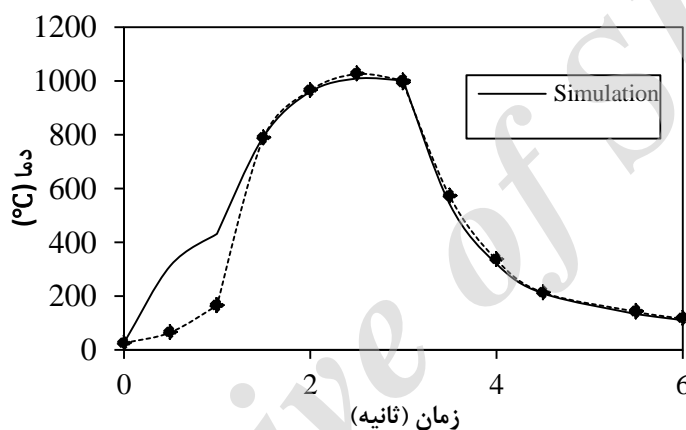
برای مثال در شکل ۴ توزیع تنش در اثر سوراخکاری با لیزر برای نمونه سنگ آهک در فشار جانبی ۳۷ مگاپاسکال نشان داده شده است.

برای بررسی و صحت‌سنجی توزیع حرارت ناشی از لیزرکاری در نرم‌افزار آباکوس با توزیع حرارت در شرایط واقعی، گرمای ۱۲۰۰ درجه به نمونه اعمال شده و داده‌های

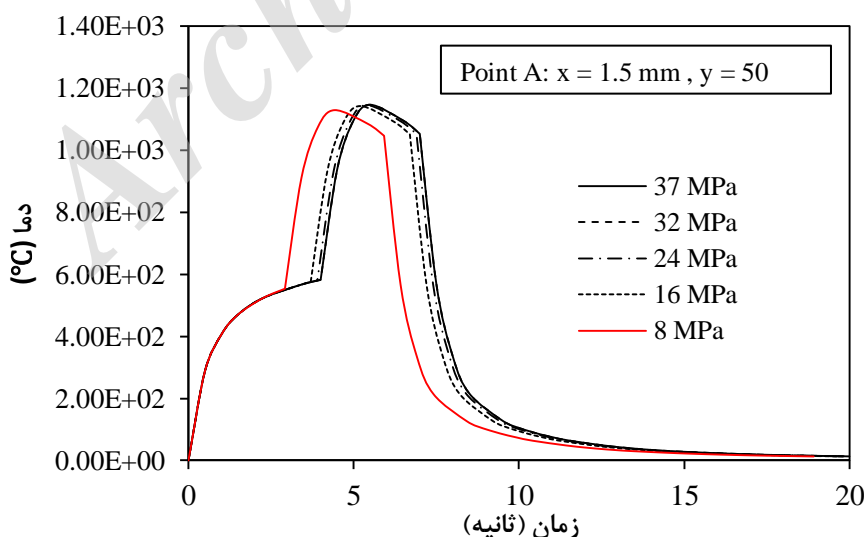
در شکل ۶ نمودار دما در واحد زمان تحت فشارهای محصور کننده ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۳۷ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، روند تغییرات دما نسبت به فشارهای جانبی مختلف تا حدودی ثابت است. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که توزیع حرارت در نمونه سنگ به تغییرات فشار جانبی حساسیت کمتری دارد. با اینکه در شکل ۶ تغییرات حرارت در واحد زمان تحت فشارهای جانبی مختلف نسبتاً ثابت به نظر می‌رسد، اما حداکثر دمای ناشی از لیزر تحت فشارهای دربرگیرنده مختلف، تفاوت دارد.



شکل ۴: توزیع تنش در اثر لیزرکاری برای نمونه سنگ آهک در فشار جانبی ۳۷ مگاپاسکال



شکل ۵: مقایسه توزیع حرارت لیزرکاری در مدل عددی و شرایط آزمایشگاهی برای نمونه سنگ آهک

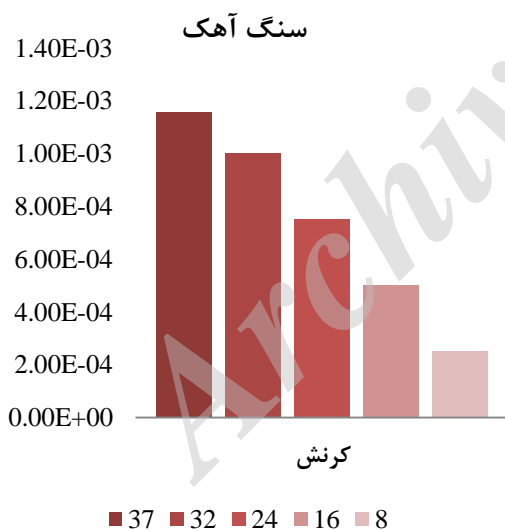
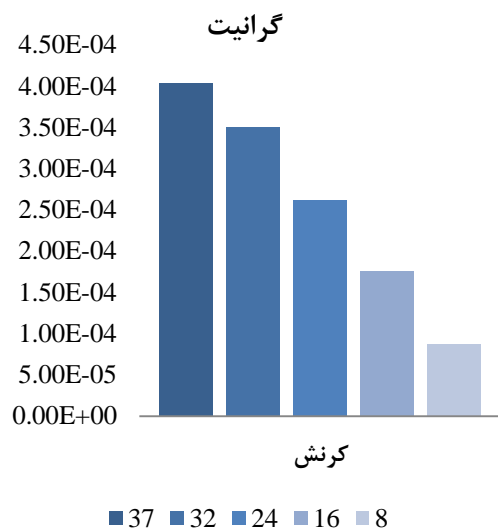


شکل ۶: نمودار حرارت در واحد زمان تحت فشارهای جانبی مختلف برای نمونه سنگ آهک

است. مطابق شکل با کاهش فشار جانبی، توزیع حرارت در نمونه‌های مختلف کاهش پیدا می‌کند. علت این امر در

در شکل ۷ نمودار دمای ماکزیمم نمونه‌های سنگ آهک و گرانیات تحت فشارهای جانبی مختلف نشان داده شده

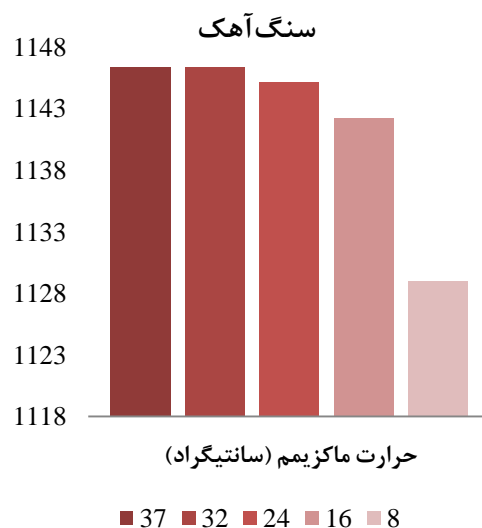
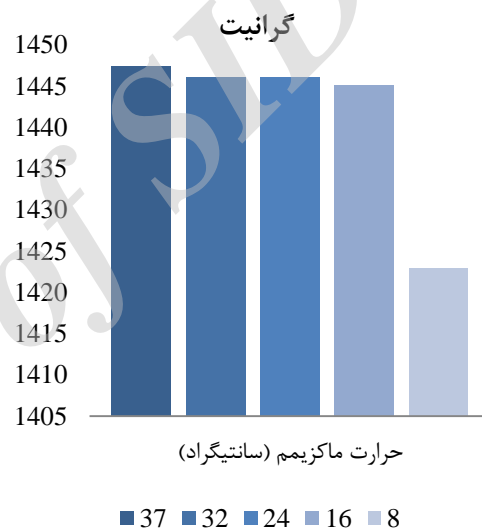
در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمودار کرنش و تنش‌های مکانیکی و حرارتی ایجاد شده در فشارهای جانبی مختلف نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، با افزایش مقادیر فشار در برگیرنده، مقدار تنش و کرنش در هر دو نمونه سنگ افزایش می‌یابد و این افزایش تنش و کرنش در نمونه‌ی سنگ آهک بیشتر از گرانیت است.



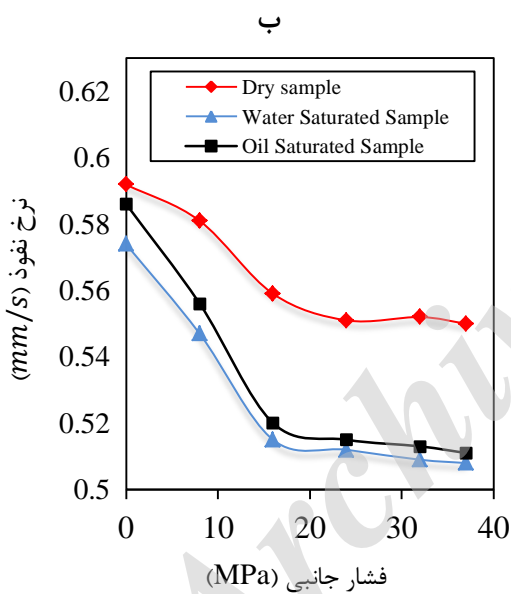
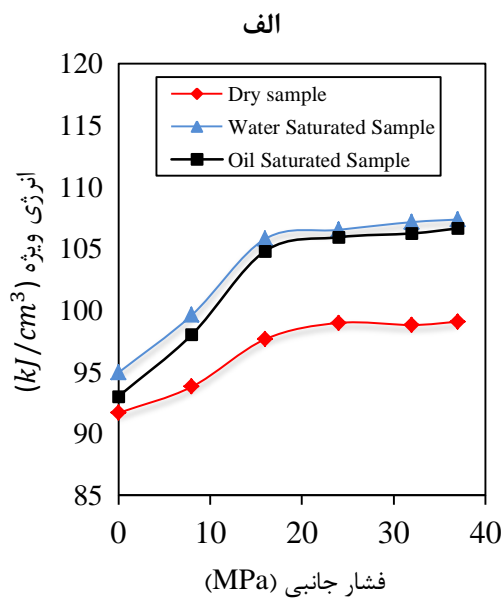
شکل ۷: نمودار کرنش ناشی از لیزر تحت فشارهای جانبی مختلف برای نمونه‌های سنگ آهک و گرانیت

در شکل ۱۰ نتایج آزمایشگاهی نمودار انرژی ویژه و نرخ حفاری در فشارهای جانبی مختلف برای نمونه سنگ آهک نشان داده شده است. به توجه به شکل می‌توان گفت برای هر سه حالت خشک، اشباع از آب و اشباع از نفت خام روند مشخصی قابل مشاهده است. به طوری که با افزایش فشار جانبی، افزایش انرژی ویژه مصرفی در ابتدای نمودار و

شرایط واقعی این است که با افزایش فشار، ذرات سنگ به هم چسبیده و نزدیک‌تر شده و در نرم‌افزار نیز هندسه مدل تحت فشار جانبی دچار جابجایی و کاهش حجم یافته و توزیع حرارت سریع‌تر انجام می‌گیرد. با توجه به شکل توزیع حرارت در فشار ۸ مگاپاسکال نسبت به فشارهای دیگر پایین‌تر است. علت آن را می‌توان چنین بیان کرد که توزیع حرارت در فشارهای پایین، کمتر است. همچنین حرارت ماکزیمم ایجاد شده در سنگ آهک ۱۱۴۶ درجه سانتیگراد و در گرانیت ۱۴۴۷ درجه شده است. علت این اختلاف دمایی، تفاوت در خصوصیات حرارتی دو نمونه سنگ است.



شکل ۶: نمودار حداکثر حرارت ناشی از لیزر تحت فشارهای جانبی مختلف برای نمونه‌های سنگ آهک و گرانیت

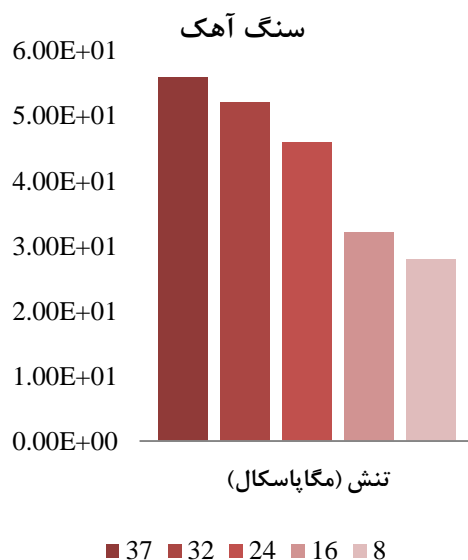
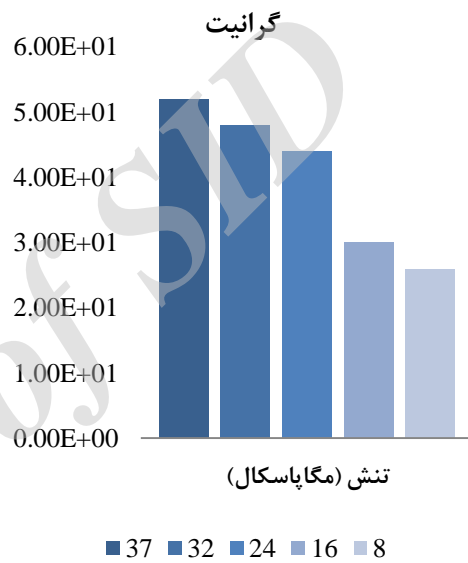


شکل ۱۰: الف- نمودار انرژی ویژه، ب- نرخ حفاری در فشارهای جانبی مختلف برای سنگ آهک [۵]

۴- نتیجه‌گیری

مدلسازی عددی اثر لیزر در نمونه سنگ آهک و گرانیت برای تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی ناشی انجام شد. نتایج مدلسازی نشان داد که تنش حرارتی ایجاد شده در اثر لیزرکاری نسبت به تنش‌های مکانیکی ناشی از فشار جانبی در اطراف سوراخ حفاری شده، بسیار کمتر است و توزیع تمرکز تنش در آن ارتباط زیادی با مقدار فشار دربرگیرنده‌ی نمونه سنگ دارد. مقایسه بین داده‌های

ثابت شدن این انرژی در سطح تقریباً ثابتی تا انتها ادامه می‌یابد. افزایش انرژی ویژه با افزایش فشار جانبی در فشارهای بین صفر تا ۱۶ مگاپاسکال اتفاق افتاده و پس از آن، انرژی ویژه مصرفی با شیب ملایم‌تری افزایش یافته است. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی عددی می‌توان مشاهده کرد که روند تغییرات حرارت و تنش‌های مکانیکی و حرارتی در مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی تغییرات انرژی ویژه و نرخ حفاری در فشارهای جانبی مختلف تطابق خوبی دارد.



شکل ۸: نمودار تنش ناشی از لیزر تحت فشارهای جانبی مختلف برای نمونه‌های سنگ آهک و گرانیت

perforating of rock. *Optics & Laser Technology*. 44(1): p. 57-62.

[10] Gahan, B.C. and S. Batarseh. Laser drilling: drilling with the power of light, continuation of fundamental research and development. DOE Annual Technical Progress Report, Cooperative Agreement No. DE-FC26-00NT40917, 2006.

حاصل از نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی عددی، نشان می‌دهد که توزیع حرارت و تنش‌های مکانیکی و حرارتی ناشی از لیزرکاری در فشارهای جانبی مختلف در روش المان محدود انطباق خوبی با شرایط آزمایش واقعی دارد و روش عددی توانایی شبیه‌سازی سوراخ‌کاری لیزری را در تنش‌های بالا که در آزمایشگاه امکان فراهم نیست، را دارد. همچنین استفاده از نرم افزار آباکوس به دلیل هزینه پایین، پاسخ سریع و قابلیت‌های بالا یک روش کارآمد برای تحلیل تنش‌های حرارتی و مکانیکی ناشی از سوراخ‌کاری با لیزر است.

مراجع

[1] Zhiyue Xu, Claude B. Reed, Ramona Graves, and Richard Parker. (2004). Rock perforation by pulsed Nd:YAG laser. *Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*.

[2] Yilbas, B., A. Arif, and B. Abdul Aleem (2010). Laser cutting of sharp edge: thermal stress analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(1): p. 10-19.

[3] Yilbas, B., S. Ahktar, and C. Chatwin (2011). Laser hole cutting into bronze: thermal stress analysis. *Optics & Laser Technology*. 43(7): p. 1119-1127.

[4] Yilbas, B. and I. Naqvi (2003). Laser heating including the phase change process and thermal stress generation in relation to drilling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 217(7): p. 977-991.

[5] Ahmadi, M., M.R.Erfan a, M.J.Torkamany b, Gh.A.Safian. (2011). The effect of interaction time and saturation of rock on specific energy in ND: YAG laser perforating. *Optics & Laser Technology*. 43(1): p. 226-231.

[6] Timenshenko, S.P.a.G., J. N. (1984). *Theory of Elasticity*. Vol. 3rd edition. p. 476-484 McGraw-Hill, Singapore.

[7] Paek, U.a.G., F. P. (1972). Thermal analysis of laser drilling. *IEEE J. Quantum Electronics*, 8, 112-119.

[8] ABAQUS Theory Manual, Version 6.2, ABAQUS Inc., Pawtucket, USA.

[9] Ahmadi, M., M.R.Erfan a, M.J.Torkamany b, J.Sabbaghzadeh. (2012). The effect of confining pressure on specific energy in Nd: YAG laser

THIS PAGE IS INTENTIONALLY LEFT BLANK

Archive of SID