

بررسی تأثیر نوع اشباع در تنش‌های حرارتی و مکانیکی ناشی از سوراخ کاری با لیزر در سنگ مخازن هیدروکربنی

عبداله دینی^۱، مرتضی احمدی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، abdollah.dini@gmail.com

۲- استاد گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، moahmadi@modares.ac.ir

(دریافت ۲۲ اردیبهشت ۱۳۹۲، پذیرش ۱۱ مرداد ۱۳۹۴)

چکیده

مشبک کاری با لیزر در استخراج هیدروکربورها در حال تحقیق می‌باشد. آزمایش‌های استفاده از لیزر در مشبک کاری می‌تواند به افزایش تراوایی سنگ مخزن به دلیل ایجاد شکستگی اشاره نمود. تعدادی از مخازن هیدروکربوری در ایران در سازندهای متشکل از لایه‌های آهکی می‌باشد. لذا نمونه مورد بررسی از آهک لایه‌های نفتی بوده است. بمنظور کامل کردن مطالعه در سنگ‌ها از یک نمونه گرانیته نیز استفاده شده است. در این تحقیق مدل المان محدود برای مدل سازی تأثیر نوع اشباع در تنش‌های حرارتی و مکانیکی ناشی از سوراخ کاری با لیزر *ND:YAG* در نمونه سنگ استفاده شده است. لذا نرم افزار آباکوس (*ABAQUS*) برای تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی انتخاب شده و در آن، خصوصیات حرارتی سنگ مخزن از قبیل هدایت حرارتی، چگالی و ظرفیت گرمایی در نظر گرفته شده اند. نتایج تحقیق مشخص نمود که در نمونه سنگ‌های آهک و گرانیته، بیشترین تغییرات حرارت در حالت اشباع از آب می‌باشد. در صورتیکه تنش ماکزیمم ایجاد شده در اثر لیزرکاری در حالت خشک بیشتر از حالت‌های اشباع است. تنش ایجاد شده در سنگ با حرارت و انرژی ویژه حفاری رابطه عکس دارد. همچنین سنگ آهک نسبت به گرانیته حساسیت بیشتری در برابر تغییرات حرارت از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

لیزرکاری، تنش حرارتی و مکانیکی، اشباع از آب و نفت، تحلیل عددی و آباکوس.

۱- مقدمه

می‌شود [۵]. همچنین روش المان محدود برای محاسبه میدان دما و مدل انتقال حرارت به کار گرفته شده است. با توجه به قانون فوریه، هدایت گرمایی را می‌توان به صورت معادله (۱-۲) تعریف نمود:

$$q = -k \frac{\partial t}{\partial n} = -k \nabla t \quad (1-2)$$

در این معادله q شار حرارت تولید شده و ∇ عملگر سه بعدی لاپلاس است. باین حال، در یک حالت دوبعدی مقادیر K_x و K_y رسانایی گرمایی به ترتیب در جهت‌های X و Y است. معادله حاکم بر انتقال حرارت رسانا را می‌توان توسط معادله پواسون به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2-2)$$

و انتقال حرارت رسانایی را از روی معادله لاپلاس می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3-2)$$

در نتیجه توزیع دمای ثابت در حالت دو بعدی را می‌توان با حل معادله لاپلاس (اگر K_x و K_y برابر با صفر باشد، $\nabla^2 T = 0$) با شرایط مرزی مناسب به دست آورد [۵].

در تحلیل‌های گرما، ضریب حرارت گرمایی با رسانایی وابسته به دما، انرژی درونی (شامل تأثیرات گرمای نهان) و شرایط مرزی انتقال و تابش گرما در نظر گرفته می‌شود. معادله انتقال گرمای فوریه برای فرآیند گرمایش لیزرکاری می‌تواند به صورت رابطه‌ی (۲) نوشته شود:

$$\rho \frac{DE}{Dt} = (\nabla(k\nabla T)) + S_0 \quad (4-2)$$

که در آن E بازده انرژی بر واحد جرم، k ضریب هدایت حرارتی و S_0 منبع گرمایی یا همان پرتوی لیزر است. همچنین شرایط مرزی تابش و انتقال گرما به عنوان سطح آزاد در نظر گرفته شده است.

بنابراین شرایط مرزی در سطحی که پرتوی لیزر تابیده شده است، عبارت است از:

$$S_0 = I_0 \delta e^{-\delta z} (1-r_f) e^{-((2(x-r)\sin\omega t + 2(y-r)\cos\omega t)/2a)} \quad (5-2)$$

که در آن h ضریب انتقال حرارتی ناشی از انتقال حرارت طبیعی، T_s و T_{amb} به ترتیب دمای سطحی و دمای پیرامون آن، ε قابلیت انتشار و σ ثابت استفان بولتزمن است. در ابتدا

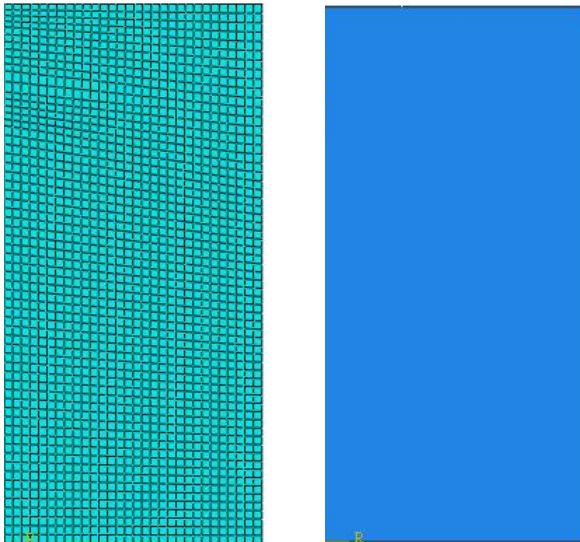
تحقیقات در زمینه مشبک‌کاری با لیزر از سال ۱۹۶۰ آغاز شده و تاکنون نیز ادامه دارد. از جمله مزایای استفاده از لیزر در مشبک‌کاری می‌توان به افزایش تراوایی سنگ مخزن به دلیل ایجاد شکستگی‌ها اشاره کرد [۱]. شبیه‌سازی ابزاری کارآمد برای تحلیل‌هایی است که انجام آن در شرایط آزمایشگاهی امکان‌پذیر نیست. از علل اصلی استفاده از مدل‌سازی عددی سوراخ‌کاری با لیزر، می‌توان به عدم دسترسی به فشارهای جانبی بالا در شرایط آزمایشگاهی، بالا رفتن هزینه‌های سوراخ‌کاری با قطر زیاد و همچنین اهمیت اثرات ثانویه لیزرکاری در سنگ اشاره کرد. بنابراین روش مدل‌سازی عددی برای تحلیل صحیح تنش‌های حرارتی و مکانیکی ناشی از سوراخ‌کاری با لیزر بسیار مهم است و راه را برای بررسی‌های دقیق‌تر اثرات ثانویه لیزرکاری هموار کرده است. ییلباس^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۱ تنش‌های حرارتی ناشی از حفر سوراخ توسط لیزر در فلز برونز را بررسی کردند [۲]. در این تحقیق، 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* بررسی شد. در سال ۲۰۱۱ ییلباس و همکاران تحقیق دیگری در زمینه تحلیل تنش ناشی از برش لیزر در ورقه آلیاژ کولار (فیبر مصنوعی) انجام دادند [۳]. 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. در سال ۲۰۱۱ تحقیقی در زمینه اثر نوع اشباع از آب و نفت خام در نمونه سنگ مخزن چاه‌های نفتی اهواز و یک نمونه سنگ گرانیته توسط احمدی و همکاران انجام شد [۴]. در این تحقیق دو نمونه سنگ مخزن در سه حالت خشک، اشباع از آب و اشباع از نفت آماده و بررسی شد. نتایج آن‌ها نشان داد که نوع اشباع در شرایط یکسان لیزرکاری، بر روی عمل سوراخ‌کاری و مقدار پارامتر انرژی ویژه تأثیرگذار است. به عبارت دیگر نمونه‌های اشباع نیاز به انرژی بیشتری برای سوراخ‌کاری نسبت به نمونه خشک دارند.

۲- تحلیل تنش حرارتی و مکانیکی

در روش تحلیل عددی مشکل هدایت حرارت در حالت پایا^۲ که شامل پیدا کردن درجه حرارت در هر نقطه در داخل یک جسم جامد است، با تعریف شرایط مرزی رفع می‌شود. قانون فوریه و معادله لاپلاس برای محاسبه معادلات میدان دما تحت شرایط مرزی مناسب در مختصات دکارتی دو بعدی بررسی

یعنی قبل از سوراخ کاری با لیزر فرض می شود که مقادیر دمای سطحی و دمای پیرامون آن برابر است [۶].

نرم افزار آباکوس با استفاده از روابط فوق قادر به محاسبه تنش مکانیکی- حرارتی ناشی از لیزرکاری در سنگ است [۷]. در این تحقیق به بررسی تأثیر حالت های مختلف اشباع در مقدار انرژی ویژه و نرخ نفوذ به صورت عددی بوده، زیرا در آزمون های آزمایشگاهی انجام این موضوع امکان پذیر نیست. از مدل المان محدود برای شبیه سازی تأثیر حالت های مختلف اشباع در تنش های حرارتی و مکانیکی ناشی از سوراخ کاری با لیزر *ND:YAG* در نمونه سنگ های مخازن هیدروکربوری استفاده شده تا تأثیر حالت اشباع سنگ در تنش مکانیکی-حرارتی ارزیابی شود. بنابراین از این نرم افزار برای موضوع تحقیق استفاده شده است.



ب

الف

شکل ۱- الف) هندسه مدل و بخش هایی که بایستی سوراخ شود،
ب) نوع مش بندی مدل در نرم افزار آباکوس.

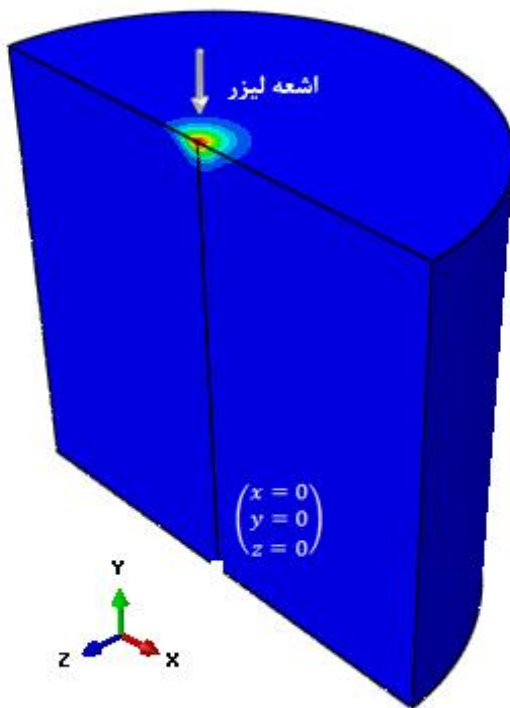
۳- مدل سازی المان محدود

۳-۱- هندسه مدل و نوع مش بندی المان ها

مدل سازی تنش های حرارتی و مکانیکی ناشی از لیزرکاری با نرم افزار آباکوس انجام گرفت. با توجه به اینکه نمونه تحت بارگذاری با تقارن محوری است، هندسه مدل به صورت اکسیسمتریک^۵ یا تقارن محوری ایجاد شد. ابعاد نمونه ها به صورت استوانه ای با قطر ۵۴ و ارتفاع ۵۰ میلی متر ساخته شد. همچنین ابعادی از نمونه که برای انجام عمل سوراخ شدن بایستی حفر شود، در قسمت ایجاد جزء بندی به اجزا کوچک تری تقسیم شد. هندسه مدل و بخش هایی از مدل که باید سوراخ شود در شکل ۱-الف نشان داده شده است.

بعد از ساخت هندسه ی مدل باید نوع المان و مش بندی انتخاب شود. با توجه به مش سنجی های صورت گرفته به این نتیجه رسیده شد که بهترین نوع مش برای مدل های تقارن محوری، استفاده از المان های مستطیلی چهار گره ای است. از این رو مدل به ۲۱۴۲ المان از نوع *CAX4T* تقسیم شد. در شکل ۱-ب نمایی از نوع مش بندی مدل نشان داده شده است. همچنین در شکل ۲ نمایی از هندسه مدل، محل اثابت اشعه لیزر و محل مختصات نقطه مبدأ نمایش داده شده است.

مشخصات لیزر بکار رفته در مدل در جدول ۱ ارائه شده است. از آنجاکه در این تحقیق بررسی اثرات ثانویه لیزرکاری مدنظر بوده، برای مدل کردن لیزرکاری، مقدار نرخ حفاری از آزمایشات احمدی و همکاران [۴] در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- نمایی از هندسه نمونه مدل و محل فرضی اشعه لیزر.

جدول ۱- مشخصات لیزر بکار رفته در مدل [۷]

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

۳-۲- خصوصیات مواد

تعدادی از مخازن هیدروکربوری در ایران در سازندهای متشکل از لایه‌های آهکی است بنابراین نمونه مورد بررسی از آهک لایه‌های نفتی بوده است. به منظور کامل کردن مطالعه در سنگ‌ها از یک نمونه گرانیته نیز استفاده شده است. پس از ایجاد هندسه مدل، خصوصیات مکانیکی و حرارتی دو نمونه سنگ آهک و گرانیته در نرم‌افزار تعریف شد. انتخاب خصوصیات مواد تأثیر زیادی بر روی صحت مدل اجزا محدود دارد. خصوصیات مکانیکی مورد نیاز برای نمونه سنگ آهک و گرانیته در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها [۱].

پارامتر	سنگ آهک	گرانیته
مدول الاستیسیته (Pa)	۱۶۵۹	۵۵۵۹
نسبت پواسون (ν)	۰/۲۵	۰/۲
چگالی (Kg/m^3)	۲۲۵۰	۲۶۶۰

تأثیر نوع اشباع دو نمونه سنگ از نفت و آب بررسی شده است، بنابراین با داشتن پارامترهای حرارتی آب و نفت اشباع، پارامترهای حرارتی سنگ آهک و گرانیته در حالات اشباع، محاسبه گردید که در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای حرارتی سنگ آهک

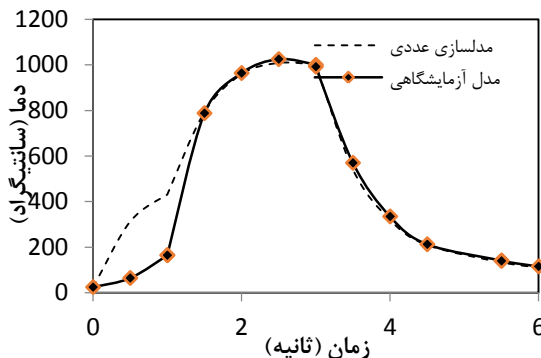
پارامتر حرارتی	خشک	اشباع از آب	اشباع از نفت
ضریب انبساط حرارتی (m/m K)	8×10^{-6}	$1/4 \times 10^{-5}$	$3/4 \times 10^{-5}$
ظرفیت گرمایی ویژه (J/Kg K)	۹۰۸	۸۷۷	۸۷۲
ضریب انتقال حرارت (W/m K)	۱/۲۱	۱/۲۷	۱/۲۳
چگالی (Kg/m^3)	۲۲۲۵	۲۲۴۵	۲۲۴۲

جدول ۴- پارامترهای حرارتی گرانیته

پارامتر حرارتی	خشک	اشباع از آب	اشباع از نفت
ضریب انبساط حرارتی (m/m K)	$7/9 \times 10^{-6}$	5×10^{-5}	$2/2 \times 10^{-5}$
ظرفیت گرمایی ویژه (J/Kg K)	۸۰۰	۷۸۳	۷۸۳
ضریب انتقال حرارت (W/m K)	۳/۳۲	۳/۴	۳/۳۷
چگالی (Kg/m^3)	۲۶۶۰	۲۶۶۴	۲۶۶۳

۴- بحث و بررسی

برای بررسی و صحت سنجی توزیع حرارت ناشی از لیزرکاری در نرم‌افزار آباکوس با توزیع حرارت در شرایط واقعی، گرمای ۱۲۰۰ درجه به نمونه اعمال شده و داده‌های به دست آمده آن با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. مقایسه توزیع حرارت لیزرکاری در مدل عددی و شرایط آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی گاهان و همکاران [۹] وجود دارد.



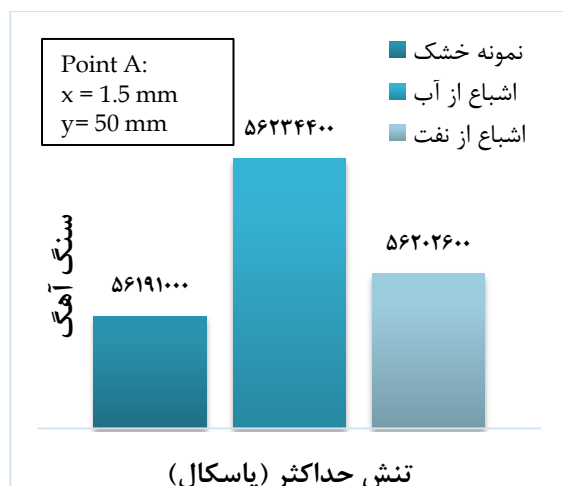
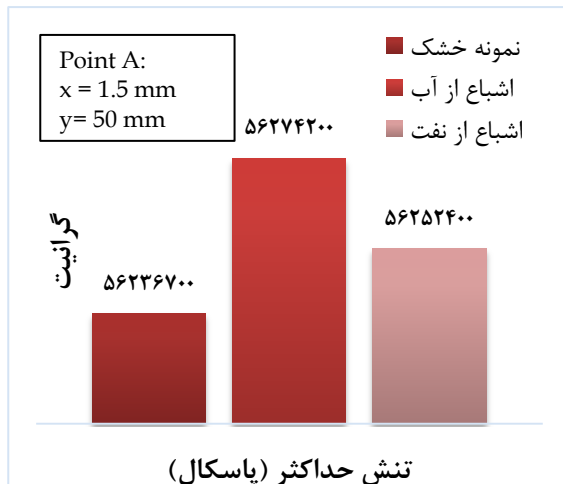
شکل ۳- مقایسه توزیع حرارت لیزرکاری در مدل عددی و شرایط آزمایشگاهی برای نمونه سنگ آهک.

اثر اشباع در نمونه‌های سنگ آهک و گرانیته بر روی انرژی ویژه‌ی حفاری به صورت آزمایشگاهی توسط احمدی و همکاران انجام شده است [۴]. نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که به ترتیب برای لیزرکاری در نمونه‌های اشباع از آب، اشباع از نفت و خشک نیاز به انرژی ویژه‌ی بیشتری وجود دارد. در شکل ۴ تأثیر حالت اشباع برای نمونه‌های سنگ آهک و گرانیته در واحد زمان نشان داده شده است.

برای بررسی تأثیر نوع اشباع نمونه‌ها بر روی تنش‌های مکانیکی و حرارتی ناشی از لیزر، پارامترهای حرارتی در حالت‌های خشک، اشباع از آب و اشباع از نفت در مدل عددی تعریف شد. در شکل ۵ تنش حداکثر در حالت‌های خشک، اشباع از آب و اشباع از نفت برای سنگ آهک و گرانیته نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تنش ماکزیمم ناشی از لیزرکاری در حالت خشک بیشترین مقدار و در حالت اشباع از آب کمترین مقدار را دارد. با مقایسه داده‌های حاصل از کارهای آزمایشگاهی و مدل عددی می‌توان به این نتیجه رسید که مقدار تنش ایجاد شده در فرآیند سوراخکاری لیزری با مقدار انرژی ویژه‌ی حفاری رابطه عکس دارد. یعنی با افزایش انرژی ویژه، تنش حرارتی و مکانیکی در سنگ کاهش می‌یابد.

مقدار تنش‌های مکانیکی در اطراف سوراخ نسبت به

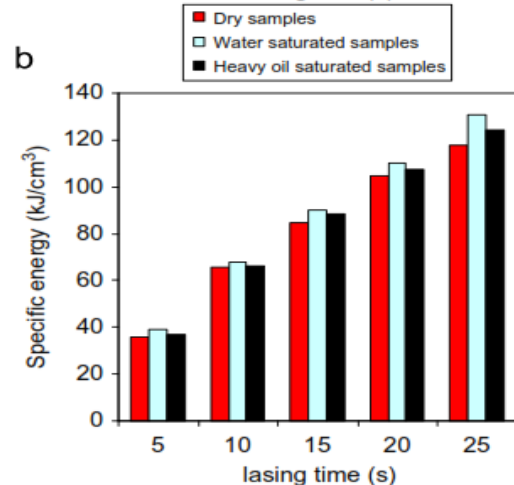
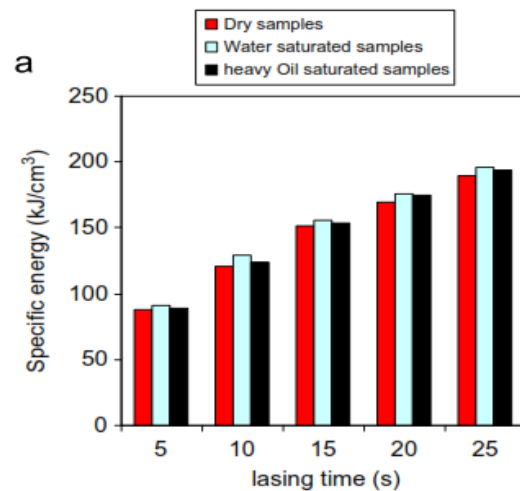
حفاری، می‌توان به این نتیجه رسید که حرارت ناشی از لیزرکاری با انرژی ویژه رابطه‌ای مستقیم دارد. یعنی با افزایش حرارت، انرژی ویژه افزایش می‌یابد. حال با مقایسه‌ی دمای حداکثر در دو نوع نمونه‌سنگ، مشاهده می‌شود که اختلاف دما در حالت اشباع و خشک در سنگ‌آهک تقریباً برابر با ۸ درجه و در نمونه‌سنگ گرانیت ۴ درجه است. این نشان‌دهنده‌ی این است که سنگ‌آهک به دلیل تخلخل بالاتر نسبتبه گرانیت، حساسیت بیشتری به اشباع شدن دارد.



شکل ۵- نمودار ماکزیمم تنش ایجاد شده در نمونه های

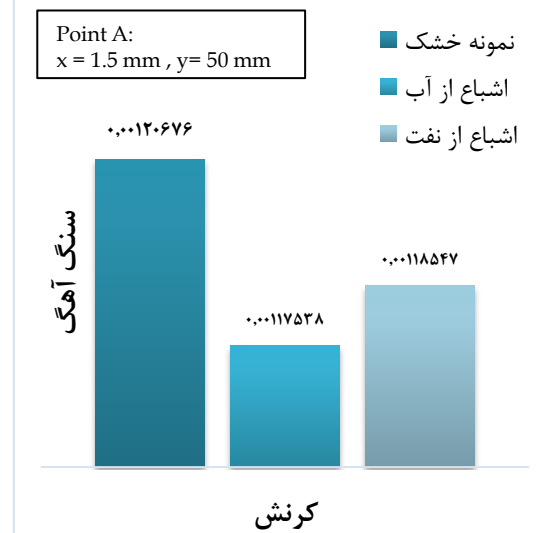
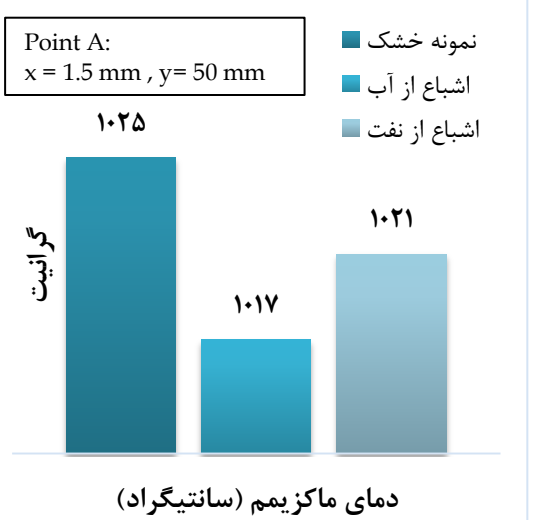
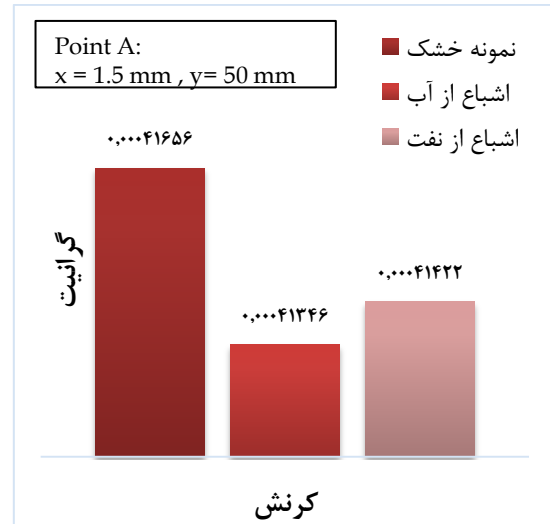
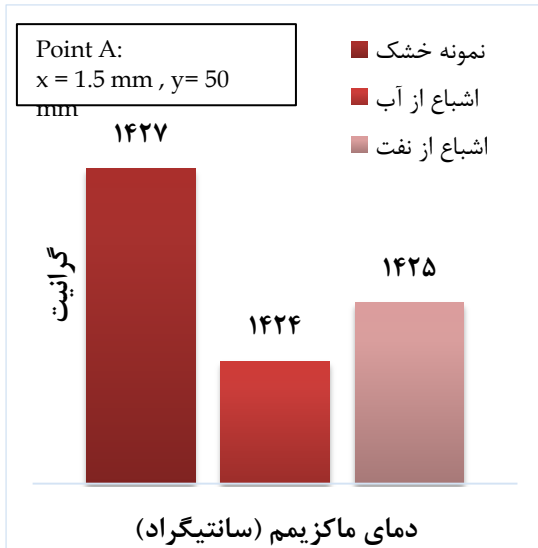
سنگ آهک و گرانیت در حالت های خشک، اشباع از آب و اشباع از نفت.

تنش‌های حرارتی بسیار بیشتر است و چون این تنش تحت تأثیر فشار جانبی است، بنابراین می‌توان اظهار داشت که تنش در هر دو نمونه سنگ بایستی نزدیک به هم باشد و تفاوت در کرنش ایجاد شده در دو نمونه سنگ خواهد بود. همان‌طور که شکل ۶ مشاهده می‌شود، مقدار کرنش در نمونه‌ی سنگ‌آهک بسیار بیشتر از گرانیت است و بالا بودن مقدار کرنش در سنگ‌آهک به خاطر ایجاد ترک و شکستگی در آن است.



شکل ۴- انرژی ویژه حفاری در واحد زمان برای نمونه‌های گرانیت (a) و سنگ‌آهک (b) در حالت‌های خشک، اشباع از آب و اشباع از نفت [۴].

در شکل ۷ حرارت حداکثر در هر سه حالت برای نمونه‌های سنگ‌آهک و گرانیت ارائه شده است. مطابق با شکل بیشترین درجه حرارت مربوط به حالت اشباع از آب و کمترین آن در حالت خشک است. علت این امر را می‌توان تفاوت در پارامترهای حرارتی سنگ در حالت‌های مختلف اشباع و مواد اشباع شده در آن دانست. با مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی اثر اشباع بر روی حرارت و نتایج آزمایشگاهی اثر اشباع بر روی انرژی ویژه



شکل ۷- نمودار ماکزیمم حرارت ایجاد شده در نمونه‌های گرانیت خشک، اشباع از آب و اشباع از نفت.

شکل ۶- نمودار کرنش ایجاد شده در نمونه‌های گرانیت خشک، اشباع از آب و اشباع از نفت.

۵- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی اثر لیزرکاری در سنگ برای بررسی اثر نوع اشباع در توزیع تنش حرارتی-مکانیکی و کرنش ناشی از آن انجام شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در نمونه سنگ‌های آهک و گرانیت، بیشترین تغییرات حرارت در حالت اشباع از آب و کمترین تغییرات حرارت برای نمونه‌ی سنگ خشک است. در صورتی‌که تنش ماکزیمم ایجاد شده در اثر لیزرکاری در حالت خشک بیشتر از حالت‌های اشباع است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی مطالعات قبلی، می‌توان نتیجه گرفت که تنش ایجاد شده در سنگ با حرارت و انرژی ویژه حفاری رابطه عکس دارد. همچنین سنگ‌آهک نسبت به گرانیت حساسیت بیشتری در برابر تغییرات حرارت از خود نشان می‌دهد و این به دلیل تفاوت در خصوصیات حرارتی دو نمونه سنگ است.

مراجع

[1] Erfan, M.R. "Evaluation of The possibility of using lasers to create fractures in the oil and gas reservoir rock for increase the productivity of oil wells", Thesis of the Degree of Master of Science (M.Sc.) in Rock Mechanics Engineering, Tarbiat Modares University, april 2010, in Persian.

[2] Yilbas, B. and I. Naqvi, " 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", 2003. 217(7): p. 977-991.

[3] Yilbas, B. and S. Akhtar, "Laser cutting of Kevlar laminates and thermal stress formed at cutting sections Optics and Lasers in Engineering", 2011.

[8] Ahmadi, M., et al., "The effect of confining pressure on specific energy in Nd: YAG laser perforating of rock. *Optics & Laser Technology*", 2012. 44(1): p. 57-62.

[9] Gahan, B.C. and S. Batarseh, Laser drilling: "drilling with the power of light, continuation of fundamental research and development", in DOE Annual Technical Progress Report, Cooperative Agreement No. DE-FC26-00NT409172006. Agreement No. DE-FC26-00NT409172006.

[4] Ahmadi, M., et al., "The effect of interaction time and saturation of rock on specific energy in ND: YAG laser perforating. *Optics & Laser Technology*", 2011. 43(1): p. 226-231.

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

[6] Yilbas, B. and I. "Naqvi, 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", 2003. 217(7): p. 977-991.

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

-
- 1 B.S. Yilbas
 - 2 steady state
 - 3 Laplace operator
 - 4 Stefan-Boltzmann
 - 5 Axisymmetric
 - 6 create partition