مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ٤۱۶-٤۲۰

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱٤ آبان ۱۳۹٤

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی فرآیند سوراخ‌کاری لیزری شیشه به روش اجزاء محدود و انتخاب توزیع گوسین لیزر مناسب

احسان گل چین بیدگلی[۱*]، محمود مرادی[۲]، سلمان شمسایی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر
۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر
۳- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
ملایر، صندوق‌پستی ۹۵۸۶۳ - ۶۵۷۱۹ ، ehsan.golchin@stu.malayeru.ac.ir

چکیده

امروزه یکی از نیازهای اساسی صنعت، ایجاد سوراخ هایی در ابعاد میکرون است. از این رو لیزر، یک ابزار بسیار مفید و کارآمد در این زمینه خواهد بود. سوراخ‌کاری لیزری نیز همانند سایر فرآیندهای صنعتی نیازمند پیش بینی و شبیه‌سازی است تا بتوان از عیوب احتمالی و خسارت های ناشی از آن جلوگیری کرد. در این تحقیق، مطالعه روی ماده GG17 glass (یک نوع شیشیه خاص) به ضخامت ۱۰ میلی متر انجام شده است. در مقاله پیش رو از روش اجزاء محدود و بطور خاص از نرم‌افزار Abaqus جهت شبیه سازی این فرآیند انجام شده است. جهت صحت‌سنجی، نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج حاصل از یک فرآیند آزمایشگاهی مقایسه شده است. لیزر مورد استفاده از نوع CO_2 با خروجی پیوسته و توان ۱۳۲۵ وات و طول موج ۱۰۶۰ نانومتر بوده است. نرم‌افزارهای اجزاء محدود به تنهایی قابلیت شبیه‌سازی لیزر را ندارند. از این رو منبع حرارتی (لیزر) بوسیله کدنویسی شبیه‌سازی شده اند. در این مقاله از سه نوع توزیع گوسین جهت شبیه‌سازی لیزر استفاده شده است. مهم ترین خروجی شبیه‌سازی، عمق سوراخ است که با استفاده از آن می‌توان به سرعت سوراخ‌کاری نیز دست یافت. این نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته اند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که نتایج دو مورد از شبیه‌سازی ها با نتایج آزمایشگاهی تطابق معناداری دارد. بنابراین توزیع گوسین مناسب برای شبیه‌سازی فرآیند سوراخ‌کاری لیزری بدست آمد.

کلید واژگان: سوراخ‌کاری لیزری ، شبیه‌سازی ، اجزاء محدود، شیشه

Laser drilling simulation of glass by using finite element method and selecting the suitable Gaussian distribution

Ehsan Golchin[1*],Mahmoud Moradi[1],Salman Shamsaei[2]

1. Department of Mechanical engineering, Malayer University, Malayer, Iran
2. Department of Mechanical engineering, Khajeh Nasir Toosi University of technology, Tehran, Iran
P.O.B. 65719-95863, Malayer, Iran, ehsan.golchin@stu.malayeru.ac.ir

ABSTRACT

One of the basic industry requirements is creating the holes in micron sizes. The laser is a very useful tool for this purpose. Laser drilling (like other industrial process) needs simulation to avoid possible problems. This study is conducted on 10mm thick GG17 glass. In this paper, the finite element method (ABAQUS software) used for the simulation. For verification, the simulation results and experimental results were compared. The laser employed in this work was a continuous wave Co2 laser with output power of 1325 w and 1060 nm wavelength. Finite element softwares do not have the ability to simulate the laser heat source. Therefore heat source of laser is coded. Three types of Gaussian distribution have been used to simulate the laser heat source. The most important result of simulation is depth of holes, whereby the drilling speed is achieved. These results and experimental results were compared. Results of two simulation methods are consistent with experimental results. Then the suitable Gaussian distribution for laser drilling simulation was selected.

Keywords: Finite Element, Glass, Laser drilling, Simulation.

۱- مقدمه

امروزه بدلیل تولید قطعات با شکل‌های پیچیده با اندازه های غیرمعمول، نیاز به مهندسی پیشرفته مواد بیش از پیش احساس می‌شود. از روش‌های تولید نوین می‌توان به روش‌های تخلیه الکتریکی، ماشین کاری با اشعه الکترون، ماشین‌کاری بوسیله پلاسما، ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، ماشین‌کاری اولتراسونیک، ماشین‌کاری بوسیله جت و ماشین‌کاری لیزری اشاره کرد [۱].

یکی از اساسی‌ترین نیازهای امروزه صنعت، ایجاد سوراخ‌هایی با قطرو عمق کم با دقت در ابعاد میکرون و خطای کم (مانند پره‌های توربین) می‌باشد که با روش های سنتی رایج، قابل اجرا نخواهد بود. در ماشین‌کاری های لیزری اکثرا از لیزرهای Co_2 و Nd:YAG استفاده می‌شودکه در صنایع جوش‌کاری، سوراخ کاری، برش، شیار زنی و فرزکاری کاربرد دارند که هر کدام دارای مواد دور ریز متفاوتی هستند [۲]. ماشین‌کاری به‌وسیله لیزر امروزه در حال گسترش است. به‌صورتی که لیزر می‌تواند با ابزارهای سنتی نیز ترکیب شده و بازدهی آن‌ها را بیشتر کند [۳].

عامل ایجاد سوراخ در سوراخ‌کاری لیزری، یک شار حرارتی بسیار قوی است. این شار حرارتی باعث تغییر دمای بسیار شدید در جسم خواهد شد. هنگامی که دمای ماده از دمای نقطه تبخیر عبور می‌کند ذرات جسم جدا شده و سوراخ ایجاد می شود. اهمیت مدل کردن و شبیه‌سازی در طی چند دهه‌ی اخیر بسیار افزایش یافته است. شبیه‌سازی امروزه به عنوان ابزار مهمی برای توسعه‌ی فرآیندهای تولید شناخته شده است. کاربرد روش‌های شبیه-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

E. Golchin, M. Moradi, S. Shamsaei, Laser drilling simulation of glass by using finite element method and selecting the suitable Gaussian distribution, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 416-420, 2015 (in Persian فارسی)

سازی در صنایع مهم مثل صنایع هسته‌ای و صنایع هوائی و غیره که در آن‌ها سلامت قطعات تولید شده از اهمیت بالائی برخوردار است، دارای مزایای زیادی می‌باشد [۴]. پس هرگونه خطا در محاسبه پارامترهایی مانند قدرت لیزر، شعاع پرتو لیزر، زمان روشنی پالس و عرض پالس موجب انهدام ماده و ضررهای اقتصادی زیادی به همراه خواهد داشت. لذا یکی ازمواردی که می تواند به این امر کمک کند، شبیه‌سازی سورخ‌کاری لیزری است. شبیه‌سازی، در پیش‌بینی خروجی‌های فرآیند که اصلی ترین آن‌ها عمق و قطر سوراخ می باشد نقش مهمی ایفا خواهد کرد. از دیگر مواردی که می‌توان بوسیله شبیه سازی پیش‌بینی گردند محاسبه تاریخچه گرمایی و تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند سوراخ‌کاری لیزری خواهد بود.

پرندوش و همکاران [۵] پژوهشی تحت عنوان نگرشی بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی ماشین‌کاری لیزری انجام دادند که به بررسی معادلات جذب انرژی لیزر جهت حذف مواد در فرآیندهای لیزری و چگونگی حذف مواد در فرآیندهای سوراخ‌کاری، برش‌کاری، تراش‌کاری و فرزکاری پرداخته‌اند و درنهایت مدل‌های شبکه های عصبی و سیستم‌های فازی برای فرآیندهای لیزری ارائه نموده اند. گنش و همکاران [۱] تحقیقی تحت عنوان مدلی برای سوراخ‌کاری لیزری انجام دادند که درآن به ارائه معادلات میدانی جریان سیال و انتقال حرارت پرداخته شده است. سپس ۱۲ مورد شبیه‌سازی صورت گرفته است که در آن‌ها چگالی توان، زمان روشنی پالس، زمان تاخیر پالس تغییر یافته است و نتایج آن‌ها ارائه شده است. اوتو و همکاران [۶] پژوهشی تحت عنوان پیش بسوی یک مدل عددی عمومی برای فرآیندهای لیزری انجام داده اند که ابتدا به نحوه توزیع لیزر روی سطح قطعه‌کار پرداخته شده است. سپس به شبیه‌سازی فرآیندهای جوش‌کاری، لحیم‌کاری، سوراخ‌کاری، برش‌کاری و فرم‌دهی پرداخته شده است و در مورد نحوه حذف یا تغییر شکل ماده در طی فرآیند بحث شده است. ژانگ و همکاران [۷] تحقیقی با نام مدل‌سازی و شبیه‌سازی سوراخ‌کاری لیزری با لیزر پالس بلند انجام داده‌اند که به بیان معادلات میدانی و سپس به شبیه‌سازی پرداخته شده است ونتایج سوراخکاری در زمان های مختلف ارائه شده است. سپس به رابطه بین چگالی قدرت و سرعت خروج مواد پرداخته شده است و دریافته‌اند که رابطه مستقیمی بین این دو برقرار است. همچنین به رابطه بین سرعت سوراخ‌کاری و طول پالس پرداخته شده و بیان شده است که بین آن ها رابطه عکس وجود دارد. یان و همکاران [۸] پژوهشی با عنوان مطالعه آزمایشگاهی و عددی سوراخ‌کاری لیزری چندپالسی آلومینیوم انجام دادند. بعد از شبیه‌سازی سوراخ‌کاری لیزری، مقایسه قطر ورودی و قطر خروجی برای توان‌ها و پالس های مختلف برای حالت های شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی انجام شده است که در نهایت ثابت می‌شود که مدل شبیه‌سازی شده، قطر ورودی و خروجی کمتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند. هانون و همکاران [۹] پژوهشی با نام تحقیق آزمایشگاهی و تئوری سوراخ کاری سرامیک آلومینیوم انجام شده است که سوراخ‌کاری بوسیله لیزر Nd:YAG انجام شده است. براساس نتایج این تحقیق ثابت می‌شود که از توان ۴ کیلووات تا ۷کیلووات عمق سورخ ها در حالت واقعی کمتر از حالت شبیه‌سازی شده می باشد و از توان ۷ کیلووات تا ۱۰ کیلووات داده ها تقریبا برهم منطق هستند. کولینس و همکاران [۱۰] پژوهشی با عنوان یک مدل ساده برای سوراخ‌کاری لیزری انجام دادند که به بیان معادلات انتقال حرارت و مکانیکی حاکم بر فرآیند پرداخته شده است. ژانگ و همکاران [۱۱] تحقیقی باعنوان مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی دینامیک سوراخ کلیدی در طی فرآیند سوراخ‌کاری لیزری انجام داده اند که به مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی بوسیله نرم‌افزار انسیس و نتایج آزمایشگاهی سورخ‌کاری لیزری بر روی شیشه پرداخته شده است. لیزر مورد استفاده در این تحقیق از نوع Co_2 بوده است. در مورد عمق سوراخ در زمان‌های مختلف می‌توان گفت که نتایج یکسان می‌باشد. در مورد سرعت سوراخ‌کاری طی۲۰ میلی‌ثانیه اول، نتایج با یکدیگر هم‌خوانی دارند اما از زمان ۲۰ تا ۶۰ ثانیه نتایج با یکدیگر اختلاف دارند.

در این پژوهش سه نوع شبیه‌سازی با توزیع‌های گوسین مختلف انجام شده است و نتایج با یک فرآیند آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. برای هر نوع شبیه‌سازی با توزیع گوسین مورد نظر ۱۲ مرتبه در تنظیمات متفاوت اجرا صورت پذیرفت. سپس پارامتر عمق سوراخ به‌عنوان خروجی فرآیند، انتخاب و روی آن بحث شده است. با استفاده از عمق سوراخ و زمان سوراخ‌کاری، پارامتر سرعت سوراخ‌کاری نیز بدست آمد که مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت نیز یک توزیع گوسین به‌عنوان توزیع برتر انتخاب می‌شود که می‌تواند برای سایر شبیه‌سازی ها نیز کاربرد داشته باشد.

۲ – جزئیات ماده

جهت انجام فرآیند آزمایشگاهی و شبیه سازی از ماده GG17 glass (یک برند شیشه مربوط به کشور چین) به ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است که خواص مکانیکی و حرارتی آن در جدول شماره ۱ آمده است. در جدول شماره ۱، ρ دانسیته، T_m دمای نقطه ذوب و T_v دمای نقطه تبخیر می‌باشد.

۳ – شرح آزمایش

تحقیقات آزمایشگاهی در مرجع شماره [۱۱] صورت پذیرفته است که در آن آزمایش‌ها لیزر مورد استفاده از نوع CO_2 با خروجی پیوسته و توان ۱۳۲۵ وات و طول موج ۱۰۶۰ نانومتر بوده است. مشخصات دستگاه لیزر مورد استفاده در جدول ۲ آمده است. ضمنا از گازآرگون هم بعنوان گاز محافظ استفاده شده است. به طورکلی ۱۲ مورد آزمایش انجام شده است که در کلیه فرآیندها مقدار توان ثابت و برابر ۱۳۲۵ وات بوده است. پارامتر متغیر در آزمایش ها، زمان سوراخ‌کاری بوده است که در آزمایش اول برابر ۵ میلی‌ثانیه و با افزایش ۵ میلی‌ثانیه‌ای در آزمایش های بعدی، در آزمایش آخر به ۶۰ میلی‌ثانیه رسیده است.

٤ – شبیه‌سازی

فرضیاتی که در این شبیه‌سازی لحاظ گردیده است به شرح زیر می‌باشد:

۱- مقطع پرتو لیزر و سوراخ، بصورت دایروی هستند، لذا شبیه‌سازی بصورت دو بعدی و متقارن محوری انجام می‌شود که دلیل آن در قسمت‌های بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- بدلیل تغییر دمای شدید در طول فرآیند، لازم است که خواص حرارتی ماده بصورت متناسب با دما در نظر گرفته شوند.

۳- در این شبیه‌سازی از تولید پلاسما و انتقال حرارت در حوضچه مذاب صرف نظر شده است.

۴- ماده بصورت همگن و یکنواخت در نظر گرفته می‌شود.

۵- از تولید شوک‌های حرارتی و اعوجاج در طی فرآیند صرف‌نظر می‌شود.

۶-از شبیه‌سازی گاز محافظ صرف‌نظر شده است.

۷- جهت شبیه‌سازی منابع حرارتی از سه نوع توزیع گوسین استفاده شده است که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

نمای کلی فرآیند سوراخ‌کاری لیزر در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.

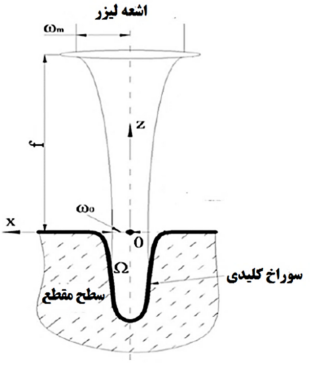
جدول ۱ مشخصات مکانیکی و حرارتی ماده

ρ= 2230 (kg/m³) , Tm=1093 k , Tv=1768 k

گرمای ویژه (J/kg/k)	دما (k)	ضریب انتقال حرارت (w/m/k)	دما (k)
۷۱۷	۲۷۳	۱/۰۸۶۸	۳۴۳
۸۰۷/۴	۳۷۳	۱/۱۶۵۸	۴۳۳
۸۷۷/۳	۴۷۳	۱/۲۷۰۳	۴۹۳
۹۳۳/۱	۵۷۳	۱/۳۳۷۶	۵۳۳
۹۷۸/۵	۶۷۳	۱/۶۵۱۱	۶۷۱
۱۰۱۶/۳	۷۷۳	۱/۷۹۲۸	۷۱۸
۱۰۴۸/۲	۸۷۳	۱/۹۷۲۷	۷۶۸
۱۰۷۵/۵	۹۷۳	۲/۳۳۹۶	۸۹۶
۱۰۹۹/۲	۱۰۷۳	۲/۵۶۰۳	۹۷۳
۱۱۱۹/۸	۱۱۷۳	۲/۸۴۶	۱۰۷۳
۱۱۳۸	۱۲۷۳	۳/۱۳۳	۱۱۷۳
۱۱۵۴/۱	۱۳۷۳	۳/۴۸۶	۱۲۷۳
۱۱۶۸/۶	۱۴۷۳	۳/۷۰۶	۱۳۷۳
۱۱۸۱/۹	۱۵۷۳	۳/۹۹۳	۱۴۷۳
		۴/۲۸۰	۱۵۷۳

جدول ۲ مشخصات لیزر مورد استفاده

نوع / مقدار	نوع پارامتر
CO_2	نوع لیزر
پیوسته	حالت موج
۱۳۲۵ وات	توان
۳۰ میلی متر	قطر پرتو در محل لنز
۰/۵ میلی متر	قطر پرتو در نقطه کانونی
۱۷۸ میلی متر	فاصله کانونی
۱۰۶۰ نانومتر	طول موج
۱/۰۵	M^2
آرگون	گار محافظ



شکل ۱ نمای کلی فرآیند سوراخ‌کاری لیزری [۱۱]

یکی از اصلی‌ترین موارد در شبیه‌سازی فرآیندهای لیزری، شبیه‌سازی منبع حرارتی می باشد. در محیط گرافیکی نرم‌افزارهای اجزاء محدود، قابلیت شبیه‌سازی منبع حرارتی وجود ندارد، لذا ناچار به کدنویسی منبع حرارتی هستیم. در این مطالعه از نرم‌افزار آباکوس[1] استفاده شده است. یکی از زیر-مجموعه‌های این نرم‌افزار، سابروتین دی-فلاکس[2] می‌باشد که جهت شبیه-سازی منابع حرارتی غیریکنواخت کاربرد دارد که در این مقاله از آن استفاده شده است. این کدنویسی به زبان فرترن انجام می شود.

از نزدیک‌ترین روابط ریاضی، جهت شبیه‌سازی شارحرارتی لیزر، توزیع گوسین می‌باشد. در این مقاله از سه نوع توزیع گوسین مختلف جهت شبیه‌سازی استفاده شده است که با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. این سه توزیع در ادامه آمده اند.

در شبیه‌سازی اول از رابطه (۱) استفاده شده است [۱۱].

$$I(r,z) = \frac{2AP}{\pi\omega(z)^2}\exp\left(-2\frac{r^2}{\omega(z)^2}\right)$$
$$\omega(z) = \omega_0\sqrt{1+\left(\frac{z\omega_m}{f\omega_0}\right)^2} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) مقدار P توان لیزر، A ضریب جذب، ω_m مقدار شعاع در موقعیت لنز، ω_0 شعاع نقطه کانونی، r فاصله شعاعی از محور لیزر، z فاصله عمودی از نقطه کانونی لیزر و f فاصله کانونی لیزر می باشد.

در دومین شبیه‌سازی از رابطه (۲) استفاده شده است [۱۲].

$$Q_{in} = \frac{2AP}{\pi R^2}\exp\left(-2\frac{r^2}{R^2}\right)$$
$$R = \frac{d}{2}\left[1+\left(4\,\frac{M^2\,L\,(z+f)}{\pi d^2}\right)\right] \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) مقدار A ضریب جذب، P توان لیزر، R شعاع موثر لیزر، r شعاع پرتو لیزر، L طول موج لیزر، d قطر پرتو لیزر و f فاصله کانونی لنز خواهد بود.

در شبیه سازی سوم هم رابطه (۳) مورد استفاده قرار گرفته است [۷].

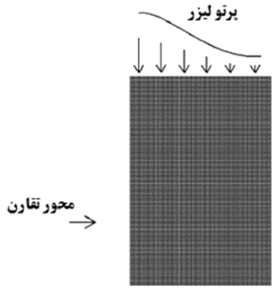
$$q(r) = \frac{\eta Q}{\pi r_q^2}\exp\left(-\frac{r^2}{r_q^2}\right) \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) مقدار Q توان لیزر، rq شعاع پرتو لیزر، r فاصله شعاعی از محور پرتو لیزر و A مقدار ضریب جذب است.

در فرآیند سوراخ‌کاری لیزری مقطع لیزر و سوراخ دایروی هستند لذا جهت شبیه‌سازی این فرآیند از هر دو مدل ۳ بعدی و ۲ بعدی می‌توان استفاده کرد که هر کدام دارای مزیت های خاص خود هستند. اما مهم‌ترین مزیت مدل ۲ بعدی به ۳ بعدی کاهش المان‌ها، کاهش زمان حل مساله و کاهش هزینه‌ها است که در این مقاله هم از مدل دوبعدی متقارن محوری استفاده شده است.

فلاکس حرارتی مورد نیاز جهت سوراخ‌کاری به سطح بالایی مدل اعمال می شود. شکل شماره ۲ نحوه اعمال شار حرارتی به مدل را نشان می دهد.

در مدل ۲ بعدی متقارن محوری، ابعاد برابر ۱۰ میلی‌متر (ضخامت) در ۴ میلی‌متر انتخاب شده‌اند. نوع المان استفاده شده از نوع DCAX4 بوده که یک المان ۴ گره‌ای و بصورت متقارن محوری و جهت تحلیل‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲ مدل دو بعدی متقارن محوری و اعمال شار حرارتی

1. Abaqus

2. Dflux Subroutine

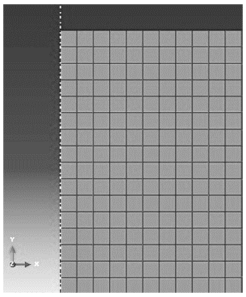
یکی دیگر از مهم‌ترین مباحثی که مطرح می‌باشد، مساله مرگ المان است. مرگ المان در این شبیه‌سازی بدان معنا است که المان‌هایی که دمایشان از دمای تبخیر بیشتر شده باید حذف شوند. مساله مرگ المان نیز در محیط گرافیکی نرم‌افزار قابل اعمال نبوده و باید از قابلیت ماکرونویسی نرم‌افزار استفاده کنیم. ماکرونویسی، نوشتن دستورات نرم‌افزاری بصورت دستی است. این قابلیت، در مسائل خاص و حالاتی که محیط گرافیکی توانایی اعمال یک دستور را ندارد، کاربرد دارد. از مهم‌ترین کاربردهای ماکرونویسی می‌توان به ایجاد تولد و مرگ المان اشاره کرد.

شکل شماره ۳ نمونه مش‌بندی شده را نشان می‌دهد. نمونه بصورت متقارن محوری است.

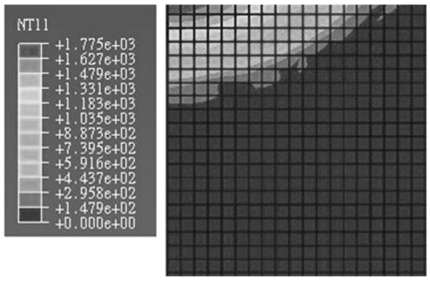
نکته بسیار مهمی که در مسائل اجزاء محدود مطرح است، اندازه المان‌ها می‌باشد. اندازه المان‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که زمان حل مساله به کمترین مقدار خود برسد و دقیق‌ترین جواب را بدهد. در این شبیه‌سازی نیز اندازه المان‌ها باید به‌گونه‌ای انتخاب می‌شدند که علاوه‌بر کم کردن زمان حل مساله، دما در کل المان یکسان باشد. به این دلیل که اگر المان‌ها بزرگ‌تر از مقدار بهینه باشند ممکن است دمای قسمتی از یک المان از نقطه تبخیر تجاوز کرده و دمای قسمتی کمتر از نقطه تبخیر باشد و محاسبه عمق سوراخ‌ها را با خطا مواجه سازد. روش آزمون و خطا روش مناسبی برای بدست آوردن اندازه بهینه المان‌ها است که در این مقاله هم از آن استفاده شده است. در شبیه‌سازی‌هایی که در این مقاله انجام شده است، ابعاد المان‌ها برابر ۰/۰۰۵ میلی‌متر می‌باشد. شکل شماره ۴ قسمتی از نمونه را نشان می‌دهد که تحت تاثیر فلاکس حرارتی می‌باشد و دمای نقاط مختلف نیز نشان داده شده است.

شکل شماره ۵، قسمتی از نمونه را بعد از اعمال مرگ المان نشان می‌دهد. المان هایی که دارای دمای بیشتر از نقطه تبخیر بودند، حذف شده‌اند.

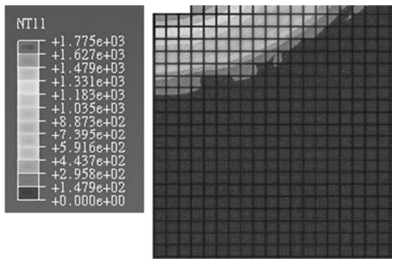
در شکل شماره ۶، تصویر دوران یافته مدل به میزان ۲۷۰ درجه پس از اعمال مرگ المان، نشان داده شده است. در این شکل عمق و قطر سوراخ به خوبی مشخص می باشد .



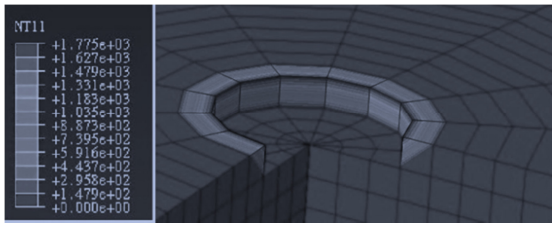
شکل ۳ مدل مش‌بندی شده



شکل ۴ مدل تحت بار حرارتی (پس از گذشت ۲ میلی ثانیه از زمان شروع فرآیند)



شکل ۵ مدل پس از اعمال مرگ المان



شکل ۶ مدل دوران یافته پس از اعمال مرگ المان (اندازه هر المان برابر ۰/۰۰۵ میلی‌متر می باشد)

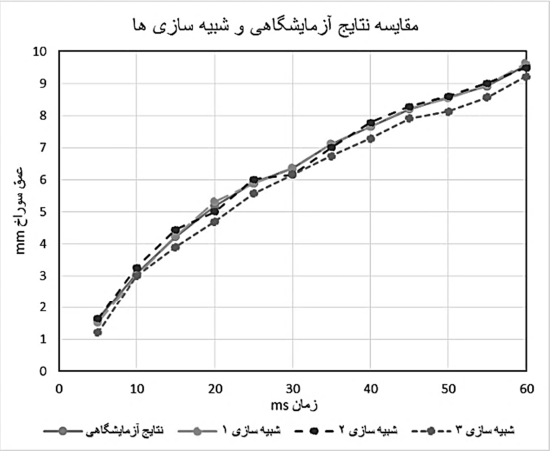
۵ – بحث در نتایج

در این شبیه‌سازی، عمق سوراخ به‌عنوان پارامتر خروجی انتخاب شده است. با توجه به عمق سوراخ و زمان سوراخ‌کاری می توان سرعت سوراخ‌کاری را نیز بعنوان یکی از پارامترهای مهم محاسبه کرد. در جدول ۳ و شکل های ۷ و ۸ خروجی های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی ها بایکدیگر مقایسه شده اند.

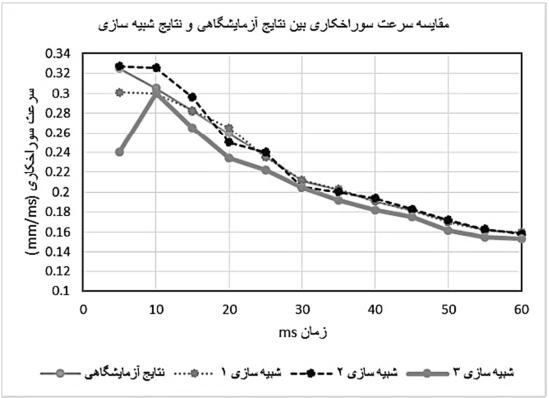
در شبیه‌سازی ۱ و ۲، عمق سوراخ‌ها در کلیه زمان‌ها به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است. در توزیع های گوسین این دو شبیه‌سازی، چگالی لیزر در جهات x و y متغیر بوده و در هر نقطه یک مقدار خاص اختیار می‌کند. با توجه به تطابق عمق سوراخ‌ها در این دو شبیه‌سازی و عمق سوراخ‌ها در حالت آزمایشگاهی، سرعت سوراخ‌کاری نیز در شبیه‌سازی‌های ۱ و ۲ بسیار به حالت آزمایشگاهی نزدیک است.

جدول ۳ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

شماره آزمایش	زمان سوراخ‌کاری (ms)	نتایج آزمایشگاهی		شبیه سازی ۱		شبیه سازی ۲		شبیه سازی ۳	
		عمق سوراخ (mm)	سرعت (mm/ms)	عمق سوراخ (mm)	سرعت (mm/ms)	عمق سوراخ (mm)	سرعت (mm/ms)	عمق سوراخ (mm)	سرعت (mm/ms)
۱	۵	۱/۶۲۴	۰/۳۲۴	۱/۵۰۵	۰/۳۰۱	۱/۶۳۵	۰/۳۲۷	۱/۲۰۰	۰/۲۴۰
۲	۱۰	۳/۰۵	۰/۳۰۵	۳/۰۰۰	۰/۳۰۰	۳/۲۵۵	۰/۳۲۵	۳/۰۰۰	۰/۳۰۰
۳	۱۵	۴/۲۳	۰/۲۸۲	۴/۲۵۰	۰/۲۸۳	۴/۴۴۵	۰/۲۹۶	۳/۸۹۵	۰/۲۶۵
۴	۲۰	۵/۱۸	۰/۲۵۹	۵/۳۰۵	۰/۲۶۵	۵/۰۰۰	۰/۲۵۰	۴/۶۸۵	۰/۲۳۴
۵	۲۵	۵/۹۰	۰/۲۳۶	۵/۸۸۵	۰/۲۳۵	۶/۰۰۵	۰/۲۴۰	۵/۵۶۰	۰/۲۲۲
۶	۳۰	۶/۳۵	۰/۲۱۱	۶/۳۶۵	۰/۲۳۲	۶/۱۵۵	۰/۲۰۵	۶/۱۵۵	۰/۲۰۵
۷	۳۵	۷/۱۰	۰/۲۰۲	۷/۱۱۵	۰/۲۰۳	۷/۰۰۰	۰/۲۰۰	۶/۷۳۵	۰/۱۹۲
۸	۴۰	۷/۶۵	۰/۱۹۱	۷/۶۵۰	۰/۱۹۱	۷/۷۷۵	۰/۱۹۴	۷/۲۸۵	۰/۱۸۲
۹	۴۵	۸/۲۰	۰/۱۸۲	۸/۲۱۵	۰/۱۸۲	۸/۲۷۵	۰/۱۸۳	۷/۹۰۰	۰/۱۷۵
۱۰	۵۰	۸/۵۶	۰/۱۷۱	۸/۵۳۵	۰/۱۷۱	۸/۶۰۰	۰/۱۷۲	۸/۱۲۰	۰/۱۶۲
۱۱	۵۵	۸/۹۲	۰/۱۶۲	۸/۹۴۵	۰/۱۶۲	۹/۰۰۵	۰/۱۶۳	۸/۵۶۰	۰/۱۵۵
۱۲	۶۰	۹/۵۵	۰/۱۵۹	۹/۶۲۵	۰/۱۶۰	۹/۴۹۰	۰/۱۵۸	۹/۲۱۵	۰/۱۵۳



شکل ۷ مقایسه عمق سوراخ های نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌ها با سه نوع توزیع متفاوت



شکل ۸ مقایسه سرعت سوراخ‌کاری نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌ها با سه نوع توزیع متفاوت

در شبیه‌سازی ۳، عمق سوراخ‌ها در همه حالات کمتر از نتایج آزمایشگاهی می باشد و به تابعیت از آن، سرعت سوراخ‌کاری نیز در همه حالات کمتر از حالات آزمایشگاهی است. علت این امر را می توان این دانست که توزیع گوسین به‌کار رفته در این شبیه‌سازی، یک بعدی بوده و مقدار چگالی لیزر فقط در راستای محور x متغیر بوده و در راستای y ثابت است.

پس دوبعدی بودن رابطه لیزر، یک عامل بسیار مهم در توزیع صحیح چگالی لیزر می‌باشد که حتما در شبیه‌سازی‌های لیزری باید لحاظ گردد.

رابطه (۱) دربرگیرنده تمامی پارامترهای متغیر لیزر نبوده که یک نقطه ضعف مهم برای این رابطه محسوب می‌شود. به‌عنوان مثال این رابطه تابع طول موج نبوده و با تغییر طول موج دستگاه لیزر، تفاوتی در نتایج ایجاد نخواهد شد. ولی رابطه (۲) شامل تمامی پارامترهای متغیر لیزر بوده و می‌توان از آن در شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرآیند سوراخ‌کاری لیزری استفاده کرد.

۶- نتیجه‌گیری

۱- عمق سوراخ‌ها در شبیه‌سازی‌های ۱ و ۲ همخوانی نسبتا مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

۲- در شبیه‌سازی ۳ عمق سوراخ‌ها کمتر از حالات آزمایشگاهی است و می‌توان دلیل آن را ثابت بودن شعاع پرتو دانست. چرا که در عمق‌های پایین تر شعاع لیزر تفاوتی نمی‌کند.

۳- سرعت سوراخ‌کاری در شبیه‌سازی‌های ۱ و ۲ تا زمان ۳۰ میلی‌ثانیه دارای نوسان بوده و از زمان ۳۰ میلی‌ثانیه به بعد می‌توان گفت که با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد.

۴- سرعت سوراخ‌کاری در شبیه‌سازی ۳ در کلیه زمان‌ها پایین‌تر از نتایج آزمایشگاهی است.

۵- شعاع موثر لیزر در عمق‌های مختلف و تابعیت توزیع از تمامی پارامترهای لیزر، نقش بسیار مهمی در معادلات شبیه‌سازی ایفا می‌کنند. از این‌رو می توان از رابطه (۲) جهت شبیه‌سازی فرآیند سوراخ‌کاری لیزری استفاده کرد.

۷- مراجع

[1] Ram K. Ganesh, Wallase W. Bowley, Robert R. Bellantone, Yukap Hahn, A Model for Laser Hole Drilling in Metals, *Journal Of Computational Physics*, Vol. 125, pp. 161-176, 1996.

[2] Avanish Kumar Dubey, Vinod Yadava, Laser beam machining—A review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 6, pp. 609-628, 2008.

[3] Mahmoud Moradi, Majid Ghoreishi, Jan Frostevarg, AlexanderF. H.Kaplan, An investigation on stability of laser hybrid arc welding, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 51, pp. 135-145, 2011.

[4] A. Rahmani, M. Moradi, M.Ghoreishi, Evalution Of Temperature History in Laser-Tig Welding, in *The 2nd National Mechanical Engineering Confrence*, Shiraz, Iran, 2012. (in persian)

[5] Pedram Parandoush, Altab Hossain, A review of modeling and simulation of laser beam machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 85, pp. 135-145, 2014.

[6] Andreas Otto, Michael Schmidt, Towards a universal numerical simulation model for laser material processing, *Physics Procedia*, Vol. 5, Part A, pp. 35-46, 2010.

[7] Yiming Zhang, Zhonghua Shen, Xiaowu Ni, Modeling and simulation on long pulse laser drilling processing, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, pp. 429-437, 2014.

[8] Yinzhou Yan, Lingfei Ji, Yong Bao, Yijian Jiang, An experimental and numerical study on laser percussion drilling of thick-section alumina, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 6, pp. 1257-1270, 2012.

[9] M.M. Hanon, E. Akman, B. Genc Oztoprak, M. Gunes, Z.A. Taha, K.I. Hajim, E. Kacar, O. Gundogdu, A. Demir, Experimental and theoretical investigation of the drilling of alumina ceramic using Nd:YAG pulsed laser, *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, No. 4 , pp. 913-922, 2012.

[10] Jeb Collins, Pierre Gremaud, A simple model for laser drilling, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 81, No . 8, pp. 1541-1552, 2011.

[11] Yi Zhang, Shichun Li, Genyu Chen, Jyoti Mazumder, Experimental observation and simulation of keyhole dynamics during laser drilling, *Optics & Laser Technology*, Vol. 48, pp. 405-414, 2013.

[12] Sanjay Mishra, VinodYadava, Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of nickel-based superalloy sheet using Nd:YAG laser, *Optics and Lasers inEngineering*, Vol. 51 ,PP. 681-695, 2013.