



ساخت تراشه‌ی ریزشاره‌ی T شکل در پلی‌مر پلی‌متیل متاآکریلات از طریق کندگی و جوش لیزری

سارا صفائی^۱، هدیه پاکیان*^۲، حسین امیری^۲، محمود ملاباشی^۱

۱. گروه اتمی مولکولی، دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، صندوق پستی: ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، تهران - ایران
۲. پژوهشکده‌ی فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳-۱۴۳۹۹۵۱۱، تهران - ایران

چکیده: تراشه‌های ریزشاره کاربردهای زیادی در صنایع مختلف به ویژه پزشکی و تصویرگیری هسته‌ای دارند. در فرایند تصویرگیری، زیست‌مولکول‌های نشان‌دار شده با رادیوایزوتوپ‌ها به عنوان عامل‌های وضوح تصویر برای تشخیص بیماری استفاده می‌شود. نشان‌دارسازی زیست‌مولکول‌ها با استفاده از رادیونوکلیدها از جمله‌ی کاربردهای مهم و اخیر تراشه‌های ریزشاره است. این مقاله ساخت تراشه‌ی ساده‌ی آزمایشگاهی حاوی ریزکانال سه بعدی T شکل روی پلی‌مر پلی‌متیل متاآکریلات (PMMA) را با استفاده از کندگی و جوش لیزری گزارش می‌کند. بدین منظور ابتدا با استفاده از کندگی لیزری ریزکانال‌های دوبعدی با ابعاد و کیفیت متفاوت روی سطح پلی‌مر ایجاد شد. به منظور دست‌یابی به بهترین نسبت ابعادی برای ریزکانال اثر پارامترهای ماشین‌کاری از جمله سرعت پایش، نرخ تکرار و شاریدگی روی ابعاد و کیفیت کانال‌ها مورد بررسی قرار گرفته و شرایط بهینه برای ایجاد کانال مورد بررسی قرار گرفت. ریزکانال دو بعدی T شکل با استفاده از شرایط بهینه‌ی به دست آمده، روی سطح پلی‌مری با ابعاد ۱cm×۱cm×۰.۵cm ایجاد شد. پلی‌مر حاوی ریزکانال‌های دوبعدی T شکل با لایه‌ی دیگری از پلی‌مر پلی‌متیل متاآکریلات توسط لیزر جوش داده شد. ریزکانال‌های دوبعدی روی سطح پلی‌مر با استفاده از لیزرهای تپی CO₂ و هارمونیک دوم لیزر Nd:YAG ایجاد و برای اتصال از لیزر CO₂ تپی و پیوسته استفاده شد.

کلیدواژه‌ها: پلی‌مر پلی‌متیل متاآکریلات، تراشه‌ی ریزشاره، کندگی لیزری، جوش لیزری

Fabrication of a T Shape Microfluidic Chip on PMMA by Laser Ablation and Welding

S. Safaei¹, H. Pazokian*², H. Amiri², M. Mollabashi¹

1. Atomic and Molecular Group, Department of Physics, Iran University of Science and Technology, P.O.Box: 16846-13114, Tehran - Iran
2. Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14399511-13, Tehran-Iran

Abstract: Microfluidic chips are commonly used in many industrial and nuclear medicine applications. The biomolecules are labeled with radio nucleoids for increasing the image resolution in nuclear imaging. Labeling of biomolecules with radio nucleoids is an important subject in recent applications of the microfluidic chips. In this paper fabrication of a T-shape microfluidic chip on Polymethylmethacrylate (PMMA) polymer was investigated. The effect of the experimental parameters such as scanning velocity, pulse repetition rate, and laser fluences on the dimensions and the quality of the microchannels were investigated. A two-dimensional T-shape microchannel was fabricated on a PMMA sheet of 1cm×1cm×0.5cm, under the optimum experimental conditions. A polymer sheet with 2D-microchannels was welded to another PMMA sheet with laser welding for the formation of a 3-dimensional microfluidic chip. Two-dimensional microchannels were fabricated with CO₂ and second harmonic of Nd:YAG lasers, both in pulsed mode of operation. Continues and pulse CO₂ lasers were both used for welding and formation of three-dimensional microchannels.

Keywords: PMMA Polymer, Microfluidic Chip, Laser Ablation, Laser Welding

*Email: h_pazokian@iust.ac.ir



۱. مقدمه

ساخت تراشه‌ی ریزشاره در سال ۱۹۷۰ در دانشگاه استنفورد شروع شد [۱]. این تراشه شامل شیارهایی بود که با استفاده از فرایند فتولیتوگرافی و سونش^(۱) مرطوب در اسید روی سیلیسیم ایجاد شده و برای کروماتوگرافی گازی^(۲) (بررسی و جداسازی مواد فرار بدون تجزیه‌ی آن‌ها) مورد استفاده قرار گرفت. آزمایشگاه‌های مانز^(۳)، هاریسون^(۴)، رامسی^(۵) و ماتیس^(۶) از جمله‌ی اولین آزمایشگاه‌هایی بودند که روی ساخت تراشه‌های ریزشاره برای تجزیه‌ی محلول‌های آبی مطالعه کردند [۲-۵]. ساخت نازل چاپ گرهای جوهرافشان توسط شرکت IBM در آمریکا اولین موفقیت فن‌آوری سیستم‌های ریزالکترومکانیکی به حساب می‌آید [۶].

امروزه تراشه‌های ریزشاره کاربردهای مهمی در صنعت و پزشکی دارند. یکی از کاربردهای مهم این تراشه‌ها به عنوان ریزرآکتوری است که برای تصویرگیری هسته‌ای در طب مدرن شامل آنکولوژی، شناخت بیماری‌های قلبی، هماتولوژی و غیره بسیار ضروری است. برای تشخیص منطقه‌های عفونی و یا منطقه‌های سرطانی از روش‌های هسته‌ای و اغلب از سیستم‌های تصویرگیری مثل دوربین گاما، مقطع‌نگاری کامپیوتری تک‌فوتونی (SPECT) و مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون (PET) استفاده می‌شود. در فرایند تصویرگیری با این سیستم‌ها می‌توان از زیست‌مولکول‌های نشان‌دار شده توسط رادیویزوتوپ‌ها به عنوان عامل‌های وضوح تصویر برای تشخیص بیماری استفاده نمود و در فرایندهای درمانی نیز تحت عنوان پرتوایمن درمانی امر درمان را انجام داد [۷]. از آنجایی که محلول رادیویزوتوپ عموماً در مقادیر کمی در دسترس است (جهت کاهش خطرهای تابش پرتوزا برای داروساز)، به دلیل ناتوانی در کار کردن با حجم‌های کوچک واکنش‌گر، در فرایندهای متداول این مواد به حجم‌های بزرگ‌تر رقیق می‌شود. بنابراین برای جبران کاهش سرعت واکنش به دلیل رقیق‌سازی رادیویزوتوپ در نشان‌دارسازی، زیست‌مولکول ۱۰ تا ۱۰۰ برابر بیش‌تر اضافه می‌گردد. استفاده از مقدار زیاد زیست‌مولکول مستلزم انجام فرایند کروماتوگرافی است که این امر زمان‌بر و پرهزینه است. عدم انجام کروماتوگرافی (که معمولاً برای کاربردهای بالینی انجام نمی‌شود) باعث می‌شود که تعداد زیادی از مولکول‌ها نشان‌دار نشده و در نتیجه نسبت علامت به نوفه و کیفیت تصویر کاهش یابد. رادیوداروها به طور کلی شامل یک رادیونوکلید مفید

تشخیصی و درمانی هستند که به یک مولکول حامل متصل می‌شوند.

نشان‌دارسازی زیست‌مولکول‌ها عمدتاً به دو روش مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود.

در روش نشان‌دارسازی مستقیم، رادیونوکلید به طور مستقیم به درشت‌مولکول متصل می‌شود. این روش دارای پایداری کم‌تری است و کم‌تر مورد توجه قرار می‌گیرد. در روش نشان‌دارسازی غیرمستقیم، از عامل‌های کی‌لیت‌ساز به عنوان عامل واسطه بین رادیویزوتوپ و پپتید استفاده می‌شود. در روش غیرمستقیم با دو راهبرد می‌توان این کار را انجام داد. در راهبرد اول عامل کی‌لیت‌ساز ابتدا به رادیونوکلید وصل و سپس ترکیب حاصل به زیست‌مولکول متصل می‌شود؛ این روش به روش پیش‌نشان‌دارسازی معروف است. در راهبرد دوم ابتدا عامل کی‌لیت‌ساز به آنتی‌بادی وصل و سپس رادیونوکلید به سر دوم کی‌لیت‌ساز متصل می‌شود، این روش نیز به پس‌نشان‌دارسازی معروف است. روش‌های نشان‌دارسازی به ویژه روش‌های نشان‌دارسازی با استفاده از رادیونوکلیدها مستلزم دریافت دز زیاد و صرف وقت و هزینه‌ی زیاد است که این مشکل با استفاده از سیستم ریزرآکتور قابل حل خواهد بود.

یک سیستم ریزرآکتور از یک ریزتراشه‌ی حاوی کانال‌های به ابعاد از مرتبه‌ی چند صد میکرومتر ساخته می‌شود. تراشه‌ی ریزشاره یکی از اساسی‌ترین بخش‌های ریزرآکتور است. این تراشه اغلب در پلی‌مرها، شیشه و سیلیسیم ساخته می‌شود. روش‌های متفاوتی برای ساخت تراشه‌ی ریزشاره ارایه شده است که به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

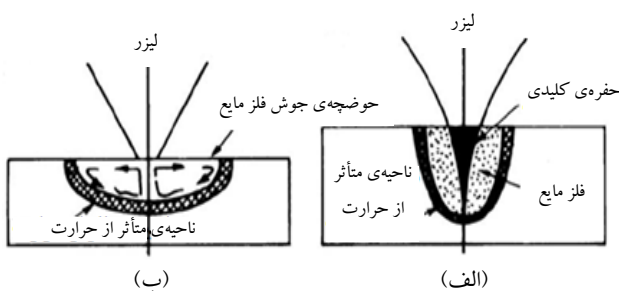
۱. روش‌های پردازش موازی که براساس لیتوگرافی است. این دسته شامل ریزماشین‌کاری شیشه و نیم‌رساناها با استفاده از فوتولیتوگرافی، لیتوگرافی نرم، کندگی لیزری با استفاده از لیزر UV و ماسک، منبت‌کاری و قالب‌گیری تزریقی میکرومتری است.

۲. روش‌های پردازش متوازی (جزء به جزء) که براساس ایجاد ریزکانال‌ها به طور مستقیم در نمونه است. این دسته شامل ایجاد کانال به طور مستقیم با استفاده از پرتوهای یونی و کندگی لیزری بدون ماسک است.

کندگی لیزری به دلیل امکان هدایت پرتو به صورت پویا و پارامترهای مختلف ماشین‌کاری انعطاف‌فرآوانی را برای ساختارهای ریزشاره فراهم می‌آورد. بنابراین علاوه بر نقشه‌ی

۳. فرایند اتصال لیزری

استفاده از لیزر CO₂ برای اتصال پلی‌مرها (جوشکاری) از سال ۱۹۷۲ توسط رافلر، گارس [۸] آغاز شده است. وقتی پرتو لیزر به سطح ماده تابیده می‌شود انرژی جذب شده متناسب با چگالی توان لیزر باعث گرم شدن، ذوب و یا تبخیر ماده می‌شود. فرایند اتصال لیزری براساس ایجاد حوضچه‌ی جوش^(۹) در آن قسمت از سطح ماده است که با پرتو لیزر همپوشانی دارد. برای فرایند اتصال دو رویکرد وجود دارد که در شکل ۱ نشان داده شده است. یکی اتصال براساس هدایت گرمایی که در این رویکرد، در سطح حوضچه‌ی جوش هیچ شکستی رخ نمی‌دهد، انتقال انرژی به عمق ماده از طریق هدایت گرمایی انجام می‌پذیرد و دیگری اتصال براساس نفوذ عمیق است؛ این نوع اتصال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این رویکرد یک حفره‌ی اصلی در حوضچه‌ی جوش ایجاد می‌شود. هرگاه در فرایند اتصال از طریق هدایت گرمایی، شدت تابش لیزر یا زمان تابش دهی زیاد باشد به طوری که در حوضچه‌ی جوش مذاب، تبخیر از سطح ماده رخ دهد فرایند به فرایند جوشکاری نفوذ عمیق تبدیل می‌شود. فشار عقب راندن مواد مذاب ناشی از تبخیر، منجر به شکل‌گیری یک تورفتگی کوچک در حوضچه‌ی جوش می‌شود و تورفتگی به حفره‌ی اصلی تعمیم پیدا می‌کند. انرژی لیزری که به داخل حفره‌ی اصلی وارد می‌شود به علت جذب در پلوم پلاسما تضعیف می‌شود. انرژی لیزر درون حفره‌ی اصلی مکرراً بازتاب می‌یابد. بنابراین حفره‌ی اصلی نقش مهمی را در انتقال و توزیع انرژی لیزر به عمق ماده ایفا می‌کند. تبخیر از سطح در دیواره‌ی حفره‌ی اصلی در طی اتصال لیزری آنقدر ادامه می‌یابد تا کاواک باقی بماند. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد مقایسه‌ی بین پهنا و عمق جوش است، اگر پهنا جوش از عمق آن بیش تر باشد انرژی کافی برای اتصال بین فصل مشترک دو قطعه، منتقل نمی‌شود.



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از (الف) جوش کاری عمیق لیزری؛ (ب) جوش کاری براساس هدایت گرمایی [۸].

دوبعدی ریزکانال‌ها، عمق و شکل را به دقت می‌توان کنترل کرد. در این روش طراحی ریزساختار جدید به سرعت با تنظیم نقشه‌ی سه‌بعدی طراحی به کمک کامپیوتر^(۱۰) (CAD) طبق داده‌های جدید انجام می‌شود. این موضوع تکرار ساختارهای ریزشاره‌ی متفاوت را تسریع می‌کند. در این مقاله ساخت تراشه‌ی ریزشاره با استفاده از کندگی لیزری مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور تراشه‌ی ساده‌ی آزمایشگاهی T شکل با استفاده از کندگی و اتصال با لیزر CO₂ ساخته می‌شود.

۲. کندگی لیزری

نور کندگی به کندگی ماده از یک هدف با جذب مستقیم انرژی لیزر اطلاق می‌شود. در توان‌های بالا هنگامی که لیزر تپی روی نمونه کانونی می‌شود پلاسما نیز ایجاد می‌شود. وجود این پلاسما می‌تواند باعث توقف کندگی در چگالی خیلی بالا شود. برای لیزرهای تپی نانوئانه کندگی ماده و نیز پخش انرژی در حجم ماده در پهنای زمانی تپ (از مرتبه‌ی ns) اتفاق می‌افتد، هر چند در مورد لیزرهای با تپ‌های فوق کوتاه طول تپ کوتاه‌تر از زمان واهلش است و تمام فرایندهای واهلش به‌طور نوعی در زمان چند پیکوثانیه بعد از جذب لیزر اتفاق می‌افتند. بنابراین برای لیزرهای با طول تپ پیکوثانیه و یا کوتاه‌تر پخش گرما ضمن برهم‌کنش لیزر با ماده اصطلاحاً فریز می‌شود و انتقال انرژی ضربه‌مانند باعث کندگی می‌شود. برای لیزرهای تپی فمتوثانیه دو سازوکار رقابتی برای کندگی وجود دارد: انفجار کولنی (تخریب ملایم) و تبخیر گرمایی (کندگی قوی). انفجار کولنی در شدت‌های پایین لیزر یعنی نزدیک آستانه‌ی کندگی اتفاق می‌افتد. الکترون‌های برانگیخته از سطح هدف خارج و میدان الکتریکی ناشی از جدایی بار بین الکترون‌های خارج شده و اتم‌های قویاً یونیده شده در سطح نمونه ایجاد می‌شود که اثر بار فضایی نامیده می‌شود. جدایی بار زمانی اتفاق می‌افتد که انرژی جذب شده توسط الکترون‌ها از انرژی فرمی که مجموع انرژی بستگی (پیوندی) الکترون و تابع کار است بیش‌تر بوده و منجر به فرار الکترون‌ها از هدف شود. اگر انرژی الکترون بیش‌تر از انرژی پیوندی یون‌ها در شبکه باشد، میدان الکتریکی حاصل یون را از شبکه خارج کرده و منجر به کندگی اولین تک‌لایه (در حدود چند نانومتر) از شبکه در عمق پوست^(۸) می‌شود. در شدت‌های خیلی بالا در بعد از آستانه، کندگی انفجار فازی و به دنبال آن تبخیر گرمایی سطح ماده مهم‌ترین سازوکار برای کندگی ماده است.

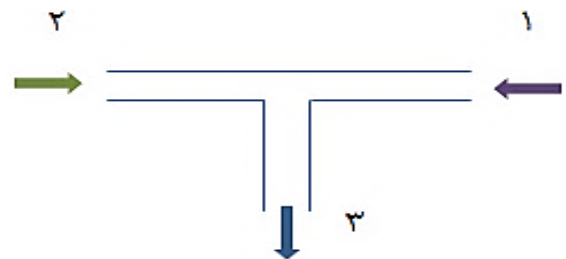


۴. پارامترهای تعیین ابعاد مناسب برای ریز کانال

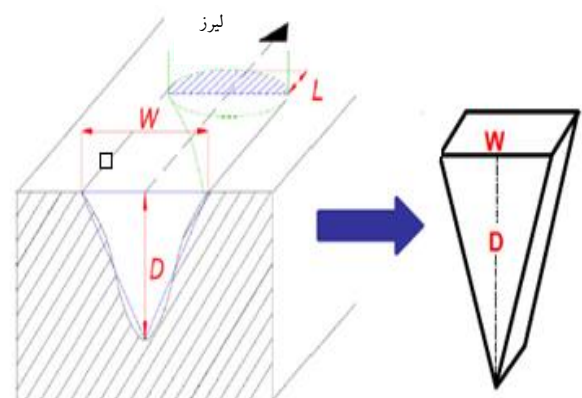
برای انتخاب مناسب‌ترین ابعاد ریز کانال باید نسبت ابعادی^(۱۰) آن را که همان نسبت عمق به پهنای کانال است بررسی کرد؛ هر قدر این نسبت کوچک‌تر باشد کیفیت انتقال سیال درون ریز کانال بهتر است. هنگام حرکت سیال درون ریز کانال باید فیزیک حرکت سیال هم مورد توجه قرار گیرد.

به عنوان مثال یک تراشه ساده‌ی آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۲ را می‌توان برای نشانه‌گذاری زیست‌ماده استفاده کرد. از ورودی ۱، مایع زیست‌سازگار و از ورودی ۲، مایع نشان‌دارکننده وارد تراشه شده و بعد از ترکیب شدن، از طریق خروجی ۳، زیست‌ماده‌ی نشان‌دار شده خارج می‌شود. طبق مطالعه‌های انجام شده توسط پژوهش‌گران، مناسب‌ترین ریز کانال برای کاربرد در تراشه‌ی آزمایشگاهی باید دارای نسبت ابعادی کم‌تر از ۰٫۳ باشد تا پراکندگی محوری کاهش یابد [۹]. با توجه به شکل ۳ نسبت ابعادی چنین داده می‌شود

$$A_r = \frac{W}{D} \quad (1)$$



شکل ۲. طرح‌واره‌ی یک تراشه‌ی آزمایشگاهی ساده‌ی T شکل.



شکل ۳. تعریف هندسی نسبت ابعادی.

۱.۴ قطر هیدرولیکی

قطر هیدرولیکی طول مشخصه‌ای است که در کانال‌های باز یا مقطع‌های نامدور مطرح می‌شود. از این کمیت برای زمانی که سیال مورد نظر در مقطعی غیردایره‌ای در حرکت است استفاده می‌شود و با D_H نشان داده می‌شود. این کمیت چنین بیان می‌شود [۱۰]

$$D_H = \frac{4A}{p} \quad (2)$$

که در آن A سطح مقطع و p محیط مقطع کانال است. در یک ریز کانال هر قدر قطر هیدرولیکی بزرگ‌تر باشد گرانروی سیال کم‌تر است.

۵. پارامترهای اتصال لیزری

پارامترهای لیزری که برای اتصال در نظر گرفته می‌شود عبارت از (۱) پیوسته یا تپی بودن لیزر، (۲) اندازه‌ی لکه و نوع، (۳) طول موج، (۴) سرعت اتصال، (۵) موقعیت کانون و (۶) حد فاصله‌ی محل اتصال هستند.

۱.۵ اثر لیزر پیوسته

با داشتن توان لیزر می‌توان عمق و سرعت اتصال را تعیین کرد. به طور کلی عمق نفوذ جوش با افزایش توان لیزر زیاد می‌شود. بنابراین اگر توان لیزر زیاد باشد باید سرعت اتصال را افزایش داد. در لیزرهای پیوسته توان با سرعت اتصال نسبت مستقیم دارد [۱۱].

۲.۵ اثر لیزر تپی

هنگام استفاده از لیزرهای تپی باید عامل آهنگ تکرار تپ مدنظر باشد. در اتصال با لیزرهای تپی سرعت اتصال با توان لیزر نسبت مستقیم ندارد، بلکه عمق نفوذ تابعی از توان است [۱۲]. از این رو اگر توان قله‌ی پرتو تپی افزایش یابد عمق نفوذ زیاد می‌شود. توان بالا هم چنین منجر به اتصال مناسب برای ماده‌های با انعکاس بالا می‌شود، چون حفره‌ی اصلی^(۱۱) سریعاً تشکیل می‌شود و روند اتصال ادامه می‌یابد. یک مزیت دیگر اتصال با لیزر تپی این است که انرژی کم‌تری به قطعه‌ی کار منتقل می‌کند و این امر موجب کاهش اثرات حرارتی می‌شود. هم‌چنین به کمک لیزرهای تپی جریان ماده‌های ذوب شده در داخل حوضچه‌ی مذاب بهتر کنترل می‌شود و می‌توان تحت چنین شرایطی از تشکیل حباب در درون حوضچه جلوگیری کرد تا اتصال بازده بیش‌تری داشته باشد.

**۳.۵ اندازه‌ی لکه و نوع**

نوع مرتبه‌ی پایین مد مانند TEM₀₀ نسبت به نوع‌های مرتبه‌های بالاتر، دقیق‌تر کانونی می‌شوند و این عامل روی عمق و سرعت اتصال تأثیر چشمگیری دارد چرا که پرتویی که به طور دقیق کانونی شود توان بالایی دارد و این عامل باعث بالا رفتن سرعت اتصال می‌شود [۱۳].

۴.۵ طول موج

برای اتصال، عموماً از دو لیزر Nd-YAG با طول موج $1.06 \mu\text{m}$ و لیزر CO₂ با طول موج $10.6 \mu\text{m}$ استفاده می‌شود. به علت جذب بالای پرتو در درون حفره‌ی اصلی، عملکرد اتصال در طول موج‌های کوتاه و بلند اندکی متفاوت است. در جوشکاری با رسانندگی گرمایی محدود، بازتاب از سطح ماده حایز اهمیت است. هرچه بازتاب کم‌تر باشد انرژی بیش‌تری به ماده منتقل می‌شود. از این‌رو بهتر است از لیزرهای با طول موج کوتاه مانند Nd-YAG استفاده شود. در جوشکاری با رویکرد حفره‌ی اصلی چون به توان بالاتری نیاز است استفاده از لیزر CO₂ توصیه می‌شود [۹].

۵.۵ سرعت جوشکاری

ضخامت نمونه، برای تعیین سرعت جوشکاری جهت ایجاد جوش عمیق مهم است. به طور کلی اگر ضخامت نمونه زیاد باشد باید سرعت جوشکاری کاهش یابد، ضمناً برای کاهش عمق نفوذ جوش باید سرعت جوشکاری افزایش یابد [۱۱]. هم‌چنین اگر پرتو دورتر از کانون روی سطح نمونه تنظیم شود برای ایجاد جوش عمیق باید انرژی فرودی لیزر افزایش یابد.

۶.۵ موقعیت کانون

میزان تمرکز پرتو روی سطح نمونه می‌تواند بر کیفیت اتصال (بازده اتصال جوش) و شکل آن تأثیرگذار باشد. اگر لازم است عمق حفره‌ی اصلی در جوشکاری زیاد باشد باید پرتو نزدیک به کانون، روی نمونه متمرکز شود [۹].

۷.۵ اندازه‌ی فاصله‌ی محل اتصال

در اتصال لبه‌ای باید فاصله‌ی بین دو قطعه از اندازه‌ی قطر پرتو کوچک‌تر باشد تا پرتو مستقیم از فضای خالی عبور نکند.

فاصله‌ی بین دو قطعه باید به طور تقریبی از نصف قطر پرتو کوچک‌تر باشد [۹]. به همین منظور قطعه را در خارج از کانون قرار می‌دهند که اندازه‌ی لکه بزرگ‌تر است و فاصله‌ی بین دو قطعه را کاملاً می‌پوشاند.

۶. روش انجام آزمایش

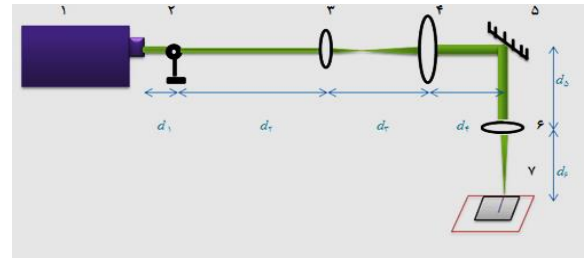
برای ساخت یک تراشه‌ی ساده‌ی آزمایشگاهی T- شکل، از پلی‌مر پلی‌متیل متا‌آکریلات استفاده شد. لیزر مورد استفاده در این آزمایش لیزر تپی CO₂ از نوع TEA با طول‌موج $10.6 \mu\text{m}$ ، بیشینه انرژی تپ ۳ ژول و طول تپ ۱۰۰ ns و انرژی‌های مورد استفاده در محدوده‌ی ۱۴٫۳ تا ۲۲٫۳ mJ است. روزنه‌ای به قطر ۰٫۶ cm به منظور انتخاب اندازه‌ی دلخواه لکه در مسیر تعبیه شد. قطعه روی میز متحرکی که با سرعت مشخص در یک بعد حرکت می‌کرد قرار داده شد و نمونه با شاریدگی‌ها و سرعت‌های پایش (سرعت میز متحرک وقتی قطعه روی آن قرار دارد و پرتو لیزر به آن تابیده می‌شود) مختلف در معرض تابش قرار گرفت. در مواردی که نیاز به شاریدگی‌های پایین‌تر بود، یک تضعیف‌کننده در مسیر پرتو قرار داده شد تا انرژی تپ کاهش یابد. اندازه‌ی قطر لکه‌ی CO₂ در کانون عدسی $194 \mu\text{m}$ بود. آهنگ‌های تکرار ۱، ۳ و ۵ Hz و سرعت‌های پایش ۵۰۰، ۲۴۷ و $115 \mu\text{m s}^{-1}$ برای ایجاد ریزکانال روی سطح پلی‌مر مورد استفاده قرار گرفت.

برای ایجاد ریزکانال با استفاده از لیزر Nd:YAG (Nd:YAG دو لیزر تپی Nd-YAG ($\lambda = 532 \text{ nm}$ و $\tau = 8 \text{ ns}$) استفاده شد. روزنه‌ای به قطر ۰٫۲ cm، به منظور انتخاب اندازه‌ی لکه با مقدار دلخواه در مسیر تعبیه شد. قطر پرتو توسط دو عدسی با فاصله‌های کانونی $f_1 = 27 \text{ cm}$ و $f_2 = 20 \text{ cm}$ بزرگ‌تر شد تا از صدمه دیدن آینه‌ای که با زاویه‌ی 45° برای منحرف کردن پرتو استفاده شده بود، جلوگیری شود. پرتو توسط عدسی سوم با $f = 16 \text{ cm}$ در کانون متمرکز شده و نمونه روی میز متحرک و در کانون عدسی قرار گرفت. انرژی‌های مورد استفاده ۶٫۵، ۸٫۵ و ۱۰ mJ بود. ترتیب آزمایشی در شکل ۴ نشان داده شده است. بعد از ایجاد ریزکانال، ابعاد و کیفیت داخلی آن‌ها با میکروسکوپ الکترونی بررسی شد.



پهنای کانال نسبت به عمق محسوس تر است. برای نرخ تکرار ۱ Hz در سرعت $63 \mu\text{m s}^{-1}$ برای هر دو شاریدگی عمق و پهنای کانال‌ها، نسبت به بقیه سرعت‌ها به یک‌دیگر نزدیک‌تراند. با افزایش سرعت، کاهش عمق بسیار چشمگیرتر از پهنای است. در سرعت‌های بالاتر، کانال‌ها در مقایسه با عمق پهنای بزرگ‌تری دارند اما در سرعت‌های پایین، عمق کانال‌ها بیش‌تر از پهنای آن‌ها است.

شکل ۷ ریزنگاره‌های میکروسکوپی الکترون پویشی (SEM) سطح مقطع دو نمونه ریزکانال ایجاد شده در شاریدگی 44.9 J/cm^2 ، سرعت پایش $115 \mu\text{m/s}$ و آهنگ تکرار ۱ Hz و ۳ Hz را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، افزایش آهنگ تکرار و در نتیجه افزایش مقدار انرژی تحویل شده به نمونه در نقطه‌ای مشخص باعث افزایش عمق ریزکانال شده است.



۱) لیزر Nd-YAG، ۲) روزنه، ۳) عدسی با $f_1 = 27 \text{ cm}$ ، ۴) عدسی با $f_2 = 20 \text{ cm}$ ، ۵) آیینه با روکش طلا، ۶) عدسی با $f = 16 \text{ cm}$ ، ۷) میز متحرک.

شکل ۸. ترتیب آزمایشی برای ساخت ریزکانال توسط لیزر Nd-YAG.

۷. یافته‌ها

جدول‌های ۱ و ۲ ابعاد و مشخصه‌های کانال‌های ایجاد شده با لیزر CO_2 را در شرایط مختلف تابش نشان می‌دهد. برای درک بهتر نحوه‌ی تغییرات هندسه‌ی کانال با شرایط تابش، تغییرات پهنای و عمق با سرعت پایش نظیر آهنگ‌های تکرار ۱ و ۳ Hz در دو شاریدگی مختلف در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با افزایش شاریدگی عمق و پهنای بیش‌تر شده و با افزایش سرعت عمق و پهنای کاهش می‌یابد. عمق کانال‌ها در مقایسه با پهنای ابعاد بزرگ‌تری دارند. اثر افزایش شاریدگی بر

جدول ۱. مشخصه‌های ریزکانال‌های ایجاد شده در شاریدگی 44.9 J cm^{-2}

عمق (μm)	پهنای (μm)	سطح مقطع کانال (μm^2)	پهنای/عمق	قطر هیدرولیکی (μm)	آهنگ تکرار (Hz)	سرعت پایش ($\mu\text{m s}^{-1}$)
-	-	-	-	-	۱	۵۰۰
۶۷.۵	۴۱۰.۸	۱۷۷۹۰.۳	۰.۱۴	۷۸.۵	۱	۲۴۷
۲۱۰.۸	۴۵۹.۵	۵۲۱۱۴.۶	۰.۴۶	۱۸۳.۹	۱	۱۱۵
۴۸۳.۸	۵۲۹.۷	۱۲۴۰۵۶.۸	۰.۹۱	۲۹۶.۷	۱	۶۳
۱۸۳.۸	۴۱۶.۲	۴۱۷۸۲.۳	۰.۴۴	۱۷۰.۹	۳	۵۰۰
۳۱۷.۶	۵۱۳.۵	۸۹۷۶۲.۶	۰.۷۲	۲۵۵.۶	۳	۲۴۷
۷۰۰.۶	۵۳۰.۰	۱۹۰۹۲۰.۳	۱.۳۶	۳۶۳.۱	۳	۱۱۵
۱۰۷۲.۹	۵۲۹.۷	۲۸۴۱۸۱.۸	۲.۰۳	۳۹۴.۰	۳	۶۳

جدول ۲. ریزکانال‌های ایجاد شده در شاریدگی 48.4 J cm^{-2}

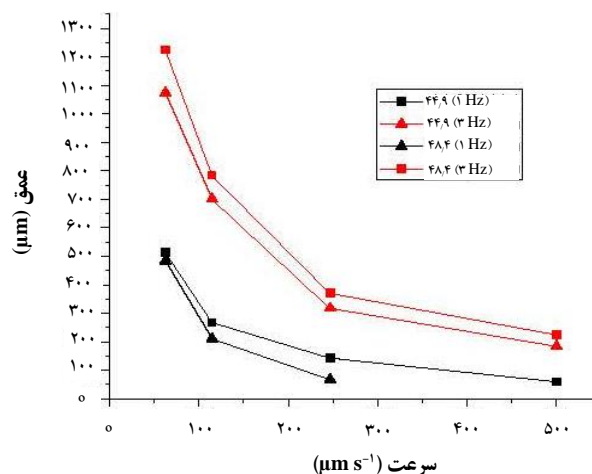
عمق (μm)	پهنای (μm)	سطح مقطع کانال (μm^2)	پهنای/عمق	قطر هیدرولیکی (μm)	آهنگ تکرار (Hz)	سرعت پایش ($\mu\text{m s}^{-1}$)
۵۹.۵	۳۹۴.۶	۱۶۲۷۴.۶	۰.۱۷	۷۹.۴	۱	۵۰۰
۱۴۲.۸	۴۵۵.۴	۶۱۳۸.۳	۰.۳۱	۵۸.۹	۱	۲۴۷
۲۶۷.۹	۴۹۵.۵	۱۳۰۸۱.۹	۰.۵۴	۱۰۱.۲	۱	۱۱۵
۵۱۳.۶	۵۴۹.۱	۲۵۱۴۳.۴	۰.۹۳	۱۴۴.۸	۱	۶۳
۲۲۴.۳	۴۹۷.۳	۶۶۶۱۴.۳	۰.۴۵	۲۲۴.۹	۳	۵۰۰
۳۷۰.۰	۵۴۳.۲	۹۵۷۰۴.۸	۰.۶۴	۲۶۶.۶	۳	۲۴۷
۷۸۴.۰	۵۶۰.۰	۲۳۵۸۷۲.۰	۱.۴	۴۱۴.۰	۳	۱۱۵
۱۲۲۴.۳	۶۱۰.۸	۳۴۳۰۱۶.۸	۲	۴۳۷.۳	۳	۶۳

در شکل ۸ رابطه‌ی بین نسبت ابعادی و سرعت پایش در آهنگ‌های تکرار ۱ و ۳ هرگز نشان داده شده است. بیش‌ترین نسبت ابعادی در سرعت $63 \mu\text{m s}^{-1}$ و آهنگ تکرار ۳ Hz و کم‌ترین مقدار آن در سرعت $500 \mu\text{m s}^{-1}$ و نرخ تکرار ۱ Hz به دست آمده است.

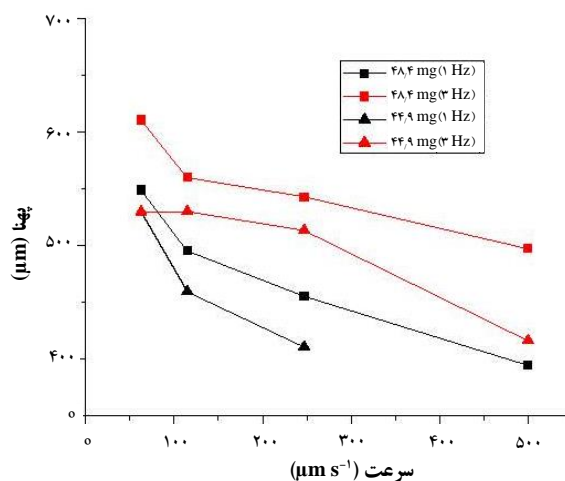
نسبت ابعادی یکی از مهم‌ترین پارامترهای ریزکانال‌های ایجاد شده است. این پارامتر در تعیین کاربرد کانال‌های ایجاد شده اهمیت فراوانی دارد. در بیش‌تر کاربردها کانال‌هایی با بیش‌ترین نسبت ابعادی مد نظر هستند. اما محاسبه‌ها نشان می‌دهد که مناسب‌ترین ریزکانال برای کاربرد در تراش‌های آزمایشگاهی باید دارای نسبت ابعادی کم‌تر از $0/3$ باشد تا پراکندگی محوری کاهش یابد. به‌طور کلی افزایش قطر هیدرولیکی منجر به افزایش حجم سیال و این موضوع باعث افزایش پراکندگی محوری می‌شود. افزایش پراکندگی محوری در نهایت به علت رقیق شدن محلول باعث می‌شود عملکرد سیال در خروجی کاهش یابد. پس باید از ریزکانال‌هایی با نسبت ابعادی بالا صرف‌نظر کرد. با توجه به جدول ۳ ریزکانال ایجاد شده در شاریدگی $48/4 \text{ J cm}^{-2}$ ، سرعت $247 \mu\text{m s}^{-1}$ و آهنگ تکرار ۱ Hz برای کاربردهای ریزسیال مناسب است.

پلی‌مر پلی‌متیل متاکریلات در طول موج 532 nm دارای جذب ناچیز (کم‌تر $0/1$) است. بنابراین تابش‌دهی با آهنگ‌های تکرار بالاتر انجام شد. جدول ۳ عمق کانال‌های ایجاد شده با لیزر Nd:YAG را در آهنگ‌های تکرار مختلف و شکل ۹ تصویرهای میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ای از کانال‌های ایجاد شده در شاریدگی $46/8 \text{ J cm}^{-2}$ ، سرعت پایش $18/4 \mu\text{m s}^{-1}$ و آهنگ‌های تکرار ۵ Hz و ۲۰ Hz و سطح مقطع آن‌ها را نشان می‌دهد.

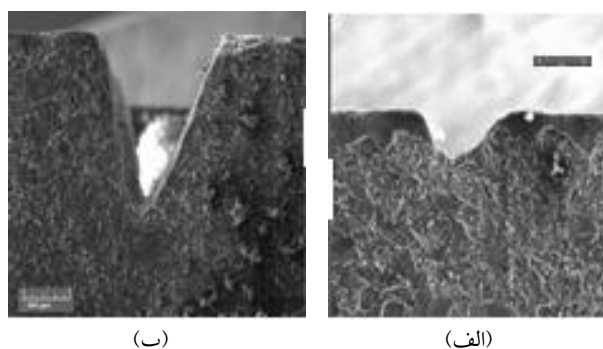
داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهد که کانال‌های با عمق‌های متفاوت را می‌توان با استفاده از هارمونیک دوم لیزر Nd:YAG در سرعت‌ها و آهنگ‌های تکرار متفاوت ایجاد کرد. از طرفی در شکل ۹ مشخص است که کیفیت کانال‌های ایجاد شده به خوبی کانال‌های ایجاد شده با لیزر CO_2 نیست این مسئله به دلیل ضریب جذب کم‌تر پلی‌مر در این مورد است. همین مسئله استفاده از سرعت‌های پایین‌تر را برای تحویل مقدار کافی انرژی به مکان مشخصی روی نمونه برای پردازش آن ضروری می‌سازد. لازم به ذکر است در این مورد به دلیل اثرهای گرمایی، اندازه‌گیری دقیق پهنای کانال و در نتیجه نسبت ابعادی مقدور نبود.



شکل ۵. رابطه‌ی بین عمق ریزکانال و سرعت پایش، در شاریدگی‌های متفاوت و آهنگ‌های تکرار ۱ Hz و ۳ Hz.



شکل ۶. رابطه‌ی بین پهنای ریزکانال و سرعت پایش در شاریدگی‌های متفاوت و آهنگ‌های تکرار ۱ Hz و ۳ Hz.



(ب)

(الف)

شکل ۷. ریزنگاره‌های میکروسکوپی الکترونی پوششی (SEM) ریزکانال ایجاد شده در شاریدگی $44/9 \text{ J cm}^{-2}$ ، سرعت پایش $115 \mu\text{m s}^{-1}$ و آهنگ تکرار ۱ Hz (الف) و ۳ Hz (ب). طول مقیاس روی تصویرها $200 \mu\text{m}$ است.



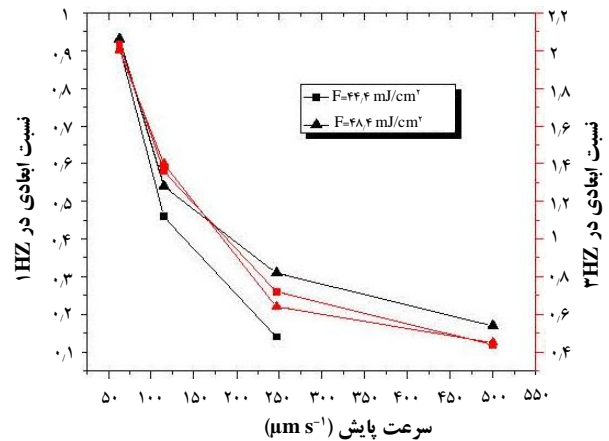
۱.۷ اتصال دو پلی‌مر پلی‌متیل متاکریلات برای ایجاد تراشه

برای ایجاد تراشه‌ی T شکل بعد از ایجاد دو ریز کانال عمود برهم و به شکل T، از لیزر CO₂ استفاده شد [۱۴]. بدین منظور پلی‌مری به ابعاد پلی‌مر قبلی که ریز کانال T شکل روی آن ایجاد شده بود، بریده شده و روی یک‌دیگر قرار داده شد. سپس لبه‌ی دو پلی‌مر که توسط گیره به یک‌دیگر متصل شده بود در فاصله‌ی ۸٫۶ cm از عدسی با فاصله‌ی کانونی ۱۰ cm روی میز متحرک قرار داده شد. در این حالت پرتو به اندازه‌ی ۱٫۴ cm در بالای کانون و اندازه‌ی قطر پرتو در این فاصله ۱۵ mm بود، به گونه‌ای که فاصله‌ی بین دو پلی‌مر را پوشش می‌داد. تابش‌دهی از بالا و بر روی فصل مشترک دو پلی‌مر انجام شد [۱۴]. اثر شاریدگی، آهنگ تکرار و سرعت پایش روی اتصال مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مربوط به اتصال با لیزر تپی در جدول ۴ درج شده است. برای مشخص کردن عمق جوش دو پلی‌مر بعد از اتصال از هم جدا شده و عمق جوش اندازه‌گیری شد.

در جدول ۴ مشخص است که با افزایش سرعت پایش، عمق و پهنای جوش کاهش می‌یابد. هم‌چنین پهنای جوش با کاهش شاریدگی نیز کم‌تر شده است. میزان کاهش عمق بیش‌تر از پهنای جوش است به عبارتی عمق جوش با شیب بیش‌تری کاهش می‌یابد. افزایش آهنگ تکرار به ۵ Hz باعث عمیق‌تر شدن جوش شده و با کاهش سرعت پایش و افزایش شاریدگی، عمق جوش از پهنای آن بیش‌تر می‌شود. بهترین اتصال در شاریدگی ۶۳ μm s⁻¹ و آهنگ تکرار ۳ Hz و سرعت پایش ۶۳ μm s⁻¹ به‌دست آمد.

جدول ۴. داده‌های مربوط به اتصال با لیزر تپی

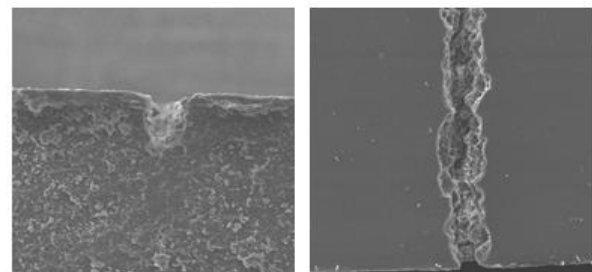
آهنگ تکرار Hz	شاریدگی (mJ cm ⁻²)	سرعت پایش (μm s ⁻¹)	عمق (mm)	پهنای (mm)
۳	۸٫۰۹	۶۳	۰٫۹۱	۱٫۰۱
۳	۸٫۰۹	۱۱۵	۰٫۸۳	۰٫۸۶
۳	۸٫۰۹	۲۴۷	۰٫۳۱	۰٫۸۴
۵	۸٫۰۹	۶۳	۱٫۸۹	۱٫۰۸
۵	۸٫۰۹	۱۱۵	۰٫۹۵	۱٫۰۳
۵	۸٫۰۹	۲۴۷	۰٫۷۶	۰٫۹۲
۳	۹٫۵	۶۳	۱٫۰۶	۱٫۰۹
۳	۹٫۵	۱۱۵	۰٫۸۵	۰٫۹۵
۳	۹٫۵	۲۴۷	۰٫۴۳	۰٫۸۷



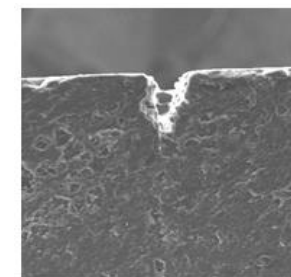
شکل ۸. رابطه‌ی بین نسبت ابعادی و سرعت پایش در آهنگ‌های تکرار ۱ و ۳ هر تزی.

جدول ۳. ریز کانال‌های ایجاد شده با هارمونیک دوم لیزر Nd:YAG در شرایط مختلف تابش

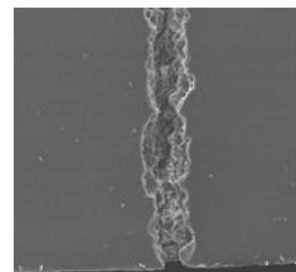
شاریدگی J cm ⁻²	سرعت پایش μm s ⁻¹	عمق (μm)		
		۲۰ Hz	۱۰ Hz	۵ Hz
۴۶٫۸	۳۵٫۳	۴۲۵٫۶	۳۷۴٫۴	۱۴۳٫۵
۴۶٫۸	۱۸٫۴	۴۴۵٫۲	۸۲۳٫۶	۳۸۱٫۱
۴۶٫۸	۶٫۱	۱۱۸۰٫۸	۱۶۵۶٫۸	۱۱۵۶٫۱
۳۹٫۷	۳۵٫۳	۳۹۳٫۴	۲۸۳٫۲	۱۷۵٫۸
۳۹٫۷	۱۸٫۴	۱۲۱۱٫۹	۳۸۰٫۸	۳۳۲٫۱
۳۹٫۷	۶٫۱	۱۶۳۴٫۳	۱۶۵۶٫۸	۸۷۹٫۸
۳۰٫۴	۳۵٫۳	۱۸۰٫۲	۲۲۱٫۴	۸۰٫۸
۳۰٫۴	۱۸٫۴	۳۷۴٫۴	۵۳۳٫۸	۱۱۳٫۹
۳۰٫۴	۶٫۱	۷۱۱٫۹	۵۷۶٫۵	۱۹۵٫۴



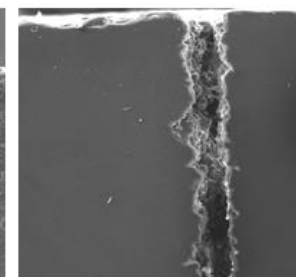
(ب)



(ب)



(الف)



(الف)

شکل ۹. (الف) تصویرهای میکروسکوپ الکترونی کانال‌های ایجاد شده و (ب) سطح مقطع آن‌ها در شاریدگی ۴۶٫۸ J cm⁻² در سرعت پایش ۱۸٫۴ μm s⁻¹ و آهنگ‌های تکرار ۵ Hz (شکل بالایی) و ۲۰ Hz (شکل پایینی). طول مقیاس روی شکل ۲۰۰ μm است.

**پی‌نوشت‌ها**

1. Epching
2. Gas Chromatography
3. Manz
4. Harrison
5. Ramsey
6. Mathies
7. Computer-Aided Design (CAD)
8. Skin Depth
9. Weld Pool
10. Aspect Ratio
11. Keyhole

مرجع‌ها

- [1] S.C. Terry, J.H. Jerman, J.B. Angell, A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer, IEEE Trans. Electron Devices, ed., 26 (1979) 1880–1886.
- [2] D.J. Harrison, K. Fluri, K. Seiler, Z. Fan, C.S. Effenhauser, A. Manz, Micromachining a miniaturized capillary electrophoresis-based chemical analysis system on a chip, Science, 261 (1993) 895–897.
- [3] M.U. Kopp, A.J. De Mello, A. Manz, Chemical amplification: continuous-flow PCR on a chip, Science, 280 (1998) 1046–1048.
- [4] A. Manz, H. Becker, Parallel capillaries for high throughput in electrophoretic separations and electroosmotic drug discovery systems, Transducers 97, Int. Conf. Solid-State Sens. Actuators, 2 (1997) 915–918.
- [5] N. Chiem, D.J. Harrison, Microchip-based capillary electrophoresis for immunoassays: analysis of monoclonal antibodies and theophylline, Anal. Chem., 69 (1997) 373–378.
- [6] S.P. Shirmardi, M. Gandomkar, M.G. Maragheh, M. Shamsaei, Preclinical Evaluation of a New Bombesin Analog for Imaging of Gastrin-Releasing Peptide Receptors, Cancer biotherapy and radiopharmaceuticals, 26, 3 (2011) 309-316.
- [7] J.D. Majumdar, Underwater welding-present status and future scope, Journal of Naval Architecture and Marine Engineering., 3, 1 (2006) 38-47.

روش اتصال با لیزر پیوسته مانند جوشکاری با لیزر تپی است. به وضوح با افزایش سرعت پایش، عمق جوش کاهش می‌یابد. از طرفی یافته‌ها نشان می‌دهد که محل اتصال در جوشکاری با لیزر پیوسته بسیار تمیزتر از جوش با لیزر تپی است [۱۴]. هم‌چنین میزان انرژی انتقالی توسط لیزر پیوسته بیش‌تر از لیزر تپی است در نتیجه برای اتصال باید از سرعت‌های بالاتر استفاده شود زیرا در سرعت‌های پایین عمق بسیار افزایش می‌یابد.

۸. نتیجه‌گیری

داده‌ها نشان می‌دهند که امکان ایجاد ریزکانال با استفاده از هارمونیک دوم لیزر Nd:YAG و در آهنگ‌های تکرار چند ده هرتز وجود دارد. با وجود این، کانال‌های ایجاد شده با هارمونیک دوم لیزر Nd:YAG نسبت به کانال‌های ایجاد شده توسط لیزر CO₂ کیفیت پایین‌تری دارند. این مسأله در انتخاب طول‌موج تابش برای ایجاد ریزکانال با توجه به کاربرد آن حایز اهمیت است.

با بررسی ریزکانال‌های ایجاد شده با لیزر CO₂ نتیجه‌های زیر به دست آمد: (۱) با افزایش سرعت پایش، پهنا و عمق ریزکانال کاهش می‌یابد؛ (۲) با افزایش شاریدگی، پهنا و عمق افزایش می‌یابد؛ (۳) در آهنگ تکرار ۱ Hz، عمق کانال‌ها بین حدود ۵۰ تا ۵۰۰ μm و پهنای کانال‌ها بین حدود ۴۰۰ تا ۵۵۰ μm متغیر است. در آهنگ تکرار ۳ Hz، پهنای کانال‌ها بین حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ μm و عمق کانال‌ها بین حدود ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ μm میکرومتر تغییر می‌کند.

با توجه به این‌که انتقال گرما توسط لیزر پیوسته در ماده بیش‌تر است برای اتصال نیاز به استفاده از سرعت‌های بالاتر پایش است. در اتصال با لیزر پیوسته با افزایش سرعت پایش پهنای جوش بیش‌تر می‌شود اما عمق جوش کاهش می‌یابد. هم‌چنین کیفیت ظاهری اتصال با لیزر پیوسته بهتر از اتصال با لیزر تپی است.



- [8] J. Aubin, L. Prat, C. Xuereb, C. Ourdon, Effect of microchannel aspect ratio on residence time distributions and the axial dispersion coefficient, Elsevier, 48, 1 (2008) 554-559.
- [9] B. Choondal, V. Suresh Garimella, Microscale Thermophysical Engineering, 5 (2001) 293–311.
- [10] J. Mazumder, Laser Welding, in Laser Material Processing, North-Holland, Amsterdam, (1983) 113-200.
- [11] W.M Steen, Laser material processing—an overview, Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 5, 4 (2003) S3-S7.
- [12] D. Lee, J. Mazumder, Effects of laser beam spatial distribution on laser-material interaction, Journal of Laser Applications, 28, 3 (2016) 032003-16.
- [13] Y.P. Raizer, Breakdown and heating of gases under the influence of a laser beam, Sov. Phys. Usp.8, (1966) 650–673.
- [14] H. Pazokian, S. Safaei, M. Mollabashi, H. Amiri, Microfluidic chip fabrication with laser micromachining, Journal of atomic and molecular Physics, 24 (1394).