

آزمایشهای درزمینه برش و سوراخکاری با لیزر و مقایسه آن با تئوری

سیاوش مشفق همدانی، فریدون سلطان مرادی، محمد حسین مروستی، محمد تقی طینتی*

مرکز تحقیقات هستدای
سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

در این مقاله روشهای برش و سوراخکاری با لیزر، که برای اولین بار در ایران بصورت یک کاربرد صنعتی، مورد استفاده قرار گرفته است، به همراه یک مدل تئوری ساده جهت درک اصول فیزیکی زیربنایی این روشها ارائه شده است.

چگونگی استفاده از نتایج حاصل، در حل یک مسئله صنعتی مورد نیاز یکی از کارخانجات داخلی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج تجربی و محدودیت های روشها و وسایل موجود بررسی شده و ضمن نتبحدگیری کلی، چگونگی رفع مشکلات جهت حصول به نتایج مطلوبتر در آینده نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱- مقدمه

گروه لیزر مرکز تحقیقات هستدای، در سالیان اخیر فعالیت های قابل توجهی در زمینه گسترش تکنولوژی لیزر در صنایع داخلی کشور داشته است. این فعالیت ها مولود مراجعات متعددیست که در رابطه با انجام برش و سوراخکاری با لیزر از طرف مراکز مختلف دولتی و خصوصی به این گروه شده است. در بسیاری از موارد یک مورد بررسی قرار گرفته اند روشهای متداول قادر به حصول دقت مورد نیاز در ابعاد میکروسکوپی نبوده و حل مسئله مورد نظر فقط بکمک تکنیکهای اپتیکی و با استفاده از لیزر امکان پذیر است. مقاله حاضر حاصل پژوهشهای نظری و آزمایشهایی است که در این مورد صورت گرفته است.

یکی از امتیازات نور لیزر نسبت به نور عادی، همدوسی (Coherence) زمانی و فضایی آن می باشد. این خاصیت باعث می شود که بتوان پرتو موازی لیزر را به کمک

* آقای طینتی در طول مدت آزمایشات مربوط به این مقاله به صورت مامور از گروه تحقیقات و گسترش وزارت دفاع، به مرکز تحقیقات هستدای منتقل و با این گروه همکاری داشته اند.

عدسی مناسبی در نقطه کانونی در حجمی به ابعاد طول موج نور لیزر متمرکز نمود. شدت بدست آمده در شرایط مناسب قادر است درجه حرارت سطحی را که در نقطه کانونی قرار داده شده است، به مقدار قابل توجهی بالا ببرد و حتی به نقطه ذوب و تبخیر برساند. بدین ترتیب لحیم کاری، جوشکاری، سوراخکاری و برش انواع مواد در ابعاد میکروسکوپی امکان پذیر می گردد. آخرین پیشرفتهای در این تکنیک باعث شده است که بتوان مواد را با سرعتهای در حدود چند متر در ثانیه برش داد و جوشکاری و سوراخکاری قطعات را در چند هزارم ثانیه و با دقت میکرونی بانجام رسانید.

البته باید خاطرنشان ساخت که این روش، یعنی استفاده از نور بعنوان یک چشمه حرارتی کار جدیدی نیست. ارشمیدس در قرن سوم قبل از میلاد، سعی کرد با استفاده از آینه های مقعر بزرگ نور خورشید را بروی کشتی های رومی که به آتن هجوم آورده بودند متمرکز ساخته، آنها را به آتش بکشانند. همچنین همه می دانند که تمرکز نور خورشید بوسیله یک عدسی معمولی قادر است کاغذ یا کاه را در نقطه کانونی شعله ور سازد. اخیراً استفاده از انرژی خورشیدی توسط آئینه های بزرگ متمرکز کننده، جهت گرم کردن آب و دیگر مصارف، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (۱). لکن آنچه که باید مورد توجه قرار بگیرد آن است که یک لامپ روشنایی با قدرت ۲۰۰ وات هرگز قادر نخواهد بود فلزی را ذوب کند. در حالیکه پرتو لیزر با همان قدرت ۲۰۰ وات به آسانی قادر به ذوب و برش صفحات فلزی می باشد. دلیل این تفاوت همانطور که گفته شد در قابلیت تمرکز نور لیزر در حجم کوچک می باشد که در نتیجه شدت در واحد سطح زیادی را موجب می گردد. برهم کنش نور و ماده و چگونگی تمرکز نور بوسیله یک عدسی از نظر تئوری در قسمت دوم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. فرمولها و روابط حاکم بین مقادیر مورد نیاز مثل ضریب هدایت گرما، گرمای ویژه، چگالی جسم، قدرت، قطر پرتو لیزر و فاصله کانونی عدسی و چگونگی به حداقل رسانیدن ابیراهی (Aberration) اپتیکی در استفاده از عدسی در این قسمت ارائه شده اند. روش های تجربی که جهت حصول به نتایج مورد نظر عملاً مورد استفاده قرار گرفته است در قسمت سوم عرضه شده و در مورد اندازه سوراخها و برشها و همچنین کیفیت آن در سطح میکروسکوپی، نظیر گردی سوراخها و صافی جدارها در مواد مختلف از فولاد سخت گرفته تا پلاستیک و شیشه و غیره به تفصیل توضیح داده شده است. در این قسمت همچنین یک مسئله صنعتی مورد نیاز یکی از کارخانجات داخلی که بوسیله تکنیک سوراخکاری با لیزر یا قوت حل شده و به نتیجه مطلوب رسیده نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در قسمت چهارم نتایج بدست آمده با تئوری مقایسه شده و از نظر کمی و کیفی بررسی شده اند. همچنین در این قسمت یک نتیجه گیری کلی از تکنیکهای مورد بحث و کاربرد عملی آن و همچنین محدودیت روشها و دستگاههای موجود ارائه شده، در مورد چگونگی رفع نقایص و محدودیتهای جهت حصول به نتایج مطلوبتر در آینده پیشنهادهایی نیز ارائه شده است.

هنگامیکه پرتو لیزر بروی سطح یک قطعه کار می‌تابد، قسمتی از آن منعکس شده و قسمت دیگری در سطح قطعه جذب می‌گردد. انرژی جذب شده سطح را گرم کرده درجه حرارت آن را به سرعت بالا می‌برد تا به نقطه ذوب برسد. چنانچه تابش پرتو لیزر ادامه یابد مواد مذاب تبخیر شده از سطح قطعه کار جدا می‌شوند. در نتیجه در نقطه تابش سوراخی بروی قطعه ایجاد می‌شود یا چنانچه نقطه تابش یا سطح کار حرکت داده شود برش بسیار ظریفی ایجاد خواهد شد.

چگونگی ذوب مواد بدکمک پرتو لیزر به عوامل گوناگونی بستگی دارد. بعنوان مثال سرعت انتقال گرما در ماده مورد نظر بستگی به ضریب هدایت گرما (Coefficient of heat conductivity) دارد که با (K) نشان داده می‌شود. همچنین گرمای ویژه (C) جسم که سرعت تغییرات درجه حرارت را تعیین می‌کند یکی از عوامل بسیار مهم می‌باشد. درحقیقت سرعت گرم شدن جسم با مقدار گرمای ویژه (Heat Capacity) نسبت عکس دارد، و این مقدار مساویست با ρC که در آن ρ جگالی جسم است. بدین ترتیب می‌بینیم که عامل اصلی در تئوری مورد بحث مقدار $k/\rho C$ خواهد بود. K با واحد cm^2/sec اندازه‌گیری می‌شود که همان واحد ضریب پخش (Diffusion) یا انتقال می‌باشد. بدینجهت مقدار فوق را ضریب انتقال حرارتی جسم (k) می‌نامند. ضریب انتقال حرارتی در کلیه مسائل مربوط به جریان و تبادل گرما نقش مهمی را دارا است. این ضریب سرعت جذب و انتقال انرژی حرارتی را در جسم مورد نظر نشان می‌دهد. در جدول یک این ضریب برای برخی فلزات و آلیاژها داده شده است (۳ و ۲). باید توجه کرد که ضریب انتقال حرارتی آلیاژها غالباً از ضریب فلز اصلی آن کمتر است. فولاد ضد زنگ و آلیاژهای نیکل دارای ضرایب بسیار کوچکی هستند. این بدان معناست که نفوذ حرارت بداخل جسم مشکل می‌باشد و در نتیجه استفاده از لیزر در چنین فلزاتی برای لحیم‌کاری محدود است لیکن سوراخکاری در آنها بسهولت انجام می‌گیرد. زیرا گرما پخش نشده جهت ایجاد سوراخ مصرف می‌گردد.

عمق نفوذ گرما در زمان بصورت تقریبی از فرمول:

$$X = 2\sqrt{kt}$$

۱

بدست می‌آید (۲). در این رابطه t زمان تابش پرتو لیزر می‌باشد. بعنوان مثال اگر ضربان لیزر ۹۰ نانو ثانیه طول داشته باشد (مقدار متوسط ضربان یک لیزر Q - سوئیچ) و ضریب انتقال حرارتی $0.25/\text{cm}^2/\text{sec}$ باشد، عمق نفوذ فقط 3×10^{-4} سانتیمتر خواهد بود، در صورتیکه برای یک ضربان لیزر معمولی بطول زمانی ۱۰۰ میکروثانیه عمق نفوذ در حد ۰/۱ میلیمتر خواهد بود (بدین جهت است که عموماً "برای اینگونه کاربردهای صنعتی از لیزرهای Q - سوئیچ استفاده نمی‌شود).

در کاربرد لیزر در جوشکاری و لحیم‌کاری سعی در اینست که مقدار انرژی جذب شده

درجه حرارت جسم را در نقطه اتصال به نقطه ذوب برساند لیکن از آن تجاوز نکند. در این حالت چنانچه انرژی و قدرت لیزر یا طول زمانی آن به اندازه‌ای باشد که درجه حرارت از نقطه ذوب تجاوز کند سطح جسم تبخیر شده و بجای جوش دادن ایجاد سوراخ خواهد کرد. باین دلیل است که در این کاربرد پارامترهای مختلف آزمایش از قبیل قدرت لیزر و ابعاد نقطه جوش و عمق آن و همچنین ضرایب هدایت و انتقال و چگالی اجسام باید بدقت در نظر گرفته شوند. بدین ترتیب مشاهده می‌شود، جهت کاربرد لیزر در جوشکاری، حداکثر قدرت در واحد سطح نباید از مقدار معینی تجاوز کند. عبارت دیگر چنانچه انرژی کل در ضربه لیزر زیاد باشد باید طول زمانی آن را افزایش داد تا قدرت در واحد سطح از مقدار مذکور تجاوز نکند.

در مدل تئوری که جهت پیش‌بینی چگونگی تغییر جسم از جامد به بخار در برش و سوراخکاری مورد نظر قرار می‌گیرد، فرضیات اصلی زیر بکار گرفته می‌شود:

جدول ۱- ضرایب انتقال حرارتی برخی فلزات و آلیاژها (مأخذ ۲ و ۳) بر حسب cm^2/sec

۰۲۴	Pt	پلاس	۰۹۱	Al	آلومینیوم	۰۲۸	برنج (۷۰-۲۰٪)
۰۵۲	Si	سیلیس	۰۴۲	Be	بریلیوم	۰۲۱	نقره-برنز (۵٪ Sn)
۰۷۱	Ag	نقره	۰۲۰	Cr	کرم	۰۸۷	کبرونیکل (۲۰٪ Ni)
۰۲۲	Ta	تانتالوم	۰۱۴	Cu	مس	۰۲۹	بریلیوم-مس (۲٪ Be)
۰۲۸	Sn	قلع	۰۱۸	Au	طلا	۰۲۹	ایکونل (۷۶٪ Ni، ۱۶٪ Cr، ۸٪ Fe)
۰۸۲	Ti	تیتانیوم	۰۲۱	Fe	آهن	۰۴۱	فولاد ضد زنگ نوع ۳۰۴ (۱۹٪ Cr، ۱۰٪ Ni)
۰۶۲	W	تنگستن	۰۵۱	Mo	مولیبدن	۰۵۶	فولاد ضد زنگ نوع ۳۰۳
۰۲۱	Zn	روی	۰۲۴	Ni	نیکل	۰۲۴	پالادیوم (Pd)

۱- انرژی لیزر بصورت آنی در نقطه جذب تبدیل به گرما می‌شود. در حقیقت زمان متوسط این تبدیل در حدود $۱۰^{-۱۲}$ تا $۱۰^{-۱۴}$ ثانیه است. در این زمان برخورد الکترونی که فوتون لیزر را جذب کرده‌اند با الکترونهای دیگر و فونونهای شبکه بلوری باعث تحریک این شبکه می‌شود و در نتیجه انرژی نورانی به انرژی گرمایی تبدیل می‌گردد. از آنجا که کوتاهترین طول ضربان لیزر $۱۰^{-۹}$ ثانیه است، این فرض معقول و قابل قبول است. باین ترتیب نوعی تعادل حرارتی بین توان لحظه‌ای لیزر و مقدار لحظه‌ای گرما در طول زمان ضربان لیزر در جسم وجود دارد.

۲- برخی از مشخصات جسم مورد نظر از قبیل ضریب هدایت، گرمای ویژه و چگالی که در حقیقت تابعی از درجه حرارت هستند، ثابت فرض می‌شوند.

۳- از حرارتی که بصورت انرژی تشعشعی از جسم ساطع می‌گردد در مقابل شدت لیزر ($۱۰^۶$ تا $۱۰^۹$ وات بر cm^2) صرف نظر می‌شود. زیرا این تشعشع بین $۱۰^{-۳}$ تا $۱۰^{-۴}$ برابر انرژی لیزر است.

۴ - عمق نفوذ حرارت در جسم نسبت به قطر پرتو لیزر کوچک فرض می شود. بدین ترتیب گرمائی که درجهت موازی با سطح جسم از دست می رود قابل اغماض بوده و می توان مسئله را فقط در یک بعد (عمود بر سطح جسم) مورد توجه قرار داد.

۵ - شدت پرتو لیزر در نقاط سطح مقطع آن و همچنین در زمان ثابت است. بدین ترتیب حرارتی که بجسم داده می شود، نیز در فضا و زمان ثابت خواهد بود. همچنین فرض می شود که این شدت جهت تبخیر جسم کافیهست.

۶ - بخار بوجود آمده انرژی لیزر را جذب نمی کند.

با توجه به فرضیات فوق می توان پدیده سوراخکاری و برش با لیزر را بوسیله مدل فیزیکی زیر از نظر تئوری مورد تجزیه و تحلیل قرار داد (۳).
پرتو لیزر در نقطه $x=0$ به صورت عمود بر سطح جسم به آن می تابد. آغاز این تابش را در لحظه $t=0$ فرض می کنیم. در هر لحظه $t>0$ یک صفحه در نقطه $x=z(t)$ وجود دارد که منطقه بخار را از منطقه جامد جدا می کند. این سطح بسمت داخل جسم در حرکت می باشد. شکل ۱ مشخصات هندسی مدل مورد نظر را نشان می دهد.

چنانچه یک ورقه نازک dx از سطح جسم را مورد توجه قرار دهیم، بطوریکه پس از گذشت زمان dt کل آن در اثر جذب انرژی لیزر به صورت بخار درآمده باشد، می توان با اتکاء به اصل بقای انرژی سرعت پیشرفت سطح جسم را بسوی داخل حساب کرد.

لایه مورد نظر (باجرم dm) باید اول از درجه حرارت اولیه T_i به درجه حرارت تبخیر T_v رسانیده شود و سپس با تامین گرمای تبخیر (L_v) به صورت بخار درآید:

$$dE = dm \left[C(T_v - T_i) + L_v \right] \quad 2$$

این انرژی باید بوسیله لیزر تامین شود:

$$dE = I A dt \quad 3$$

در این رابطه I شدت پرتوی لیزر بر واحد سطح و A سطح مقطع پرتوی لیزر می باشد. از آنجا که $dm = \rho dV = \rho A dx$ که در آن ρ چگالی جسم می باشد تساوی ۲ و ۳ سرعت پیشرفت را مشخص می کند:

$$I A dt = \rho A dx \left[C(T_v - T_i) + L \right] \quad 4$$

از این رابطه سرعت پیشرفت یعنی dz/dt مشخص می شود.

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dx}{dt} = \frac{I}{\rho(L_V + C T_V)} \quad 5$$

که در آن از درجه حرارت محیط در برابر درجه حرارت تبخیر صرفنظر شده است: $T_V \gg T_i$ (در استفاده از فرمول فوق باید توجه داشت که L_V و $C T_V$ معمولاً بر حسب کالری بر گرم داده می شوند در حالیکه I بر حسب ژول بر ثانیه بر سانتیمتر مربع است و ضریب ۱ کالری = ۴/۱۸ ژول باید در نظر گرفته شود) بدین ترتیب عمق سوراخ از رابطه زیر بدست می آید:

$$d = \frac{dz}{dt} \cdot T \quad 6$$

که در آن T طول زمانی ضربه لیزر است. در حالت کلی که I ثابت نیست بلکه بصورت $I = I(t)$ می باشد. اگر فرض شود که سرعت پیشرفت سطح $x = z$ در هر لحظه خود را با مقدار داده شده در رابطه ۵ تطبیق می دهد آنگاه می توان عمق سوراخ را بصورت زیر محاسبه کرد:

$$d = \int_0^{\infty} \frac{dz}{dt} dt = \frac{1}{\rho(L_V + C T_V)} \int_0^{\infty} I(t) dt \quad 7$$

در جدول دوم عمق تئوری و اندازه گیری عملی عمق سوراخهای بوجود آمده (۳)، برای فلزات مختلف با پرتوی لیزر نئودیمیم $Q = 7/4 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ — سوئیچ به قدرت $I = 7/4 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ و طول زمانی حدود ۲۰۰ نانو ثانیه مقایسه شده است. چنانچه مشاهده می شود، نتایج اندازه گیری عملی بین ۱۰ تا ۵۰ درصد از پیش بینی تئوری که از رابطه ۷ بدست آمده است کمتر می باشد. دلیل این تفاوت در اینست که مدل فوق حرارت از دست رفته بوسیله جداره سوراخ را در نظر نمی گیرد. همچنین مقداری از انرژی لیزر از سطح فلز منعکس می گردد.

جدول ۲ — مقایسه عمق سوراخها از نظر تئوری رابطه ۷ و عملی ماءخذ (۳).

نوع فلز	تئوری (میکرون)	عملی (میکرون)
Cu	۲۱/۴	۱۶
Al	۳۱/۲	۲۰
W	۱۲/۴	۱۰
Pt	۱۶/۹	۹
Ni	۱۶/۰	۱۴
Si	۳۷/۴	۲۶

اکنون که اندازه عمق سوراخ را از نظر تئوری بدست آوردیم لازم است نکاتی را در مورد قطر سوراخ نیز مورد توجه قرار دهیم. برای پرتو لیزری با مد TEM_{00} با سطح مقطع گوسی (Gaussian) شدت نور در جهت عمود بر محور پرتو روی آینه خروجی لیزر که در اینجا مسطح فرض می شود به صورت زیر می باشد (۴۳).

$$I(r) = I_0 \exp \left[-2 \left(\frac{r}{w} \right)^2 \right] \quad ۸$$

در رابطه بالا w شعاع پرتو لیزر و r فاصله از محور است. در این صورت زاویه واگرائی پرتو (angular beam divergence) با رابطه

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w} \quad ۹$$

محاسبه می گردد (۴). اکنون اگر یک عدسی همگرا با فاصله کانونی f با فاصله d_1 از آینه سطح خروجی قرار دهیم، شعاع پرتو مینیموم (Waist) بعد از عدسی با شعاع پرتو حداقل لیزر (در اینجا w) با رابطه زیر قابل محاسبه می گردد (۳).

$$\frac{1}{w_1^2} = \frac{1}{w^2} \left(1 - \frac{d_1}{f} \right)^2 + \frac{1}{(f\theta)^2} \quad ۱۰$$

که w_1 شعاع پرتو حداقل بعد از عدسی می باشد. در رابطه ۱۰ نظر بداینکه جمله اول بسبب جمله دوم خیلی کوچک است بنابراین شعاع پرتو حداقل بعد از عدسی با تقریب بسیار مناسبی همواره از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$w_1 = f\theta \quad ۱۱$$

و با نظر پرتو در نقطه کانونی با رابطه زیر محاسبه می شود.

$$a = 2w_1 = 2f\theta = 2f \frac{\lambda}{\pi w} \quad ۱۲$$

نمودار داریم که جای θ از رابطه ۹ استفاده گردید. در صورتیکه لیزر در مد TEM_{00} باشد سطح مقطع آن به شکل گوسی نبوده و زاویه واگرائی آن بیشتر از مقدار داده شده مد رابطه ۹ می باشد، لیکن در این مورد نیز همواره رابطه ۱۱ صادق است و می توان زاویه واگرائی را عملاً اندازه گرفت. از رابطه ۱۲ می توان نتیجه گرفت که:

اولاً" برای طول موج λ ، قطر نقطه کانونی با کم کردن f/w و یا f-number عدسی کم می شود .

ثانیا " نقطه کانونی برای طول موجهای کوچکتر کمتر است .

در عمل تغییر شعاع پرتو لیزر غیرممکن است زیرا این شعاع توسط ابعاد هندسی و مشخصات دستگاه لیزر تعیین می شود . لیکن قبل از برخورد به عدسی متمرکز کننده ، می توان با استفاده از دو عدسی دیگر که بصورت تلسکوپ سوار شده باشد (یعنی فاصله بین آنها مساوی مجموع جبری فواصل کانونی باشد) شعاع پرتو را با اندازه نسبت بین دو فاصله کانونی زیاد کرد :

$$w' = \frac{f_2}{f_1} w \quad 13$$

در رابطه بالا w' شعاع پرتو حداقل بعد از تلسکوپ بوده که چون $f_2 > f_1$ است مقدار آن همواره بزرگتر از شعاع پرتو خروجی لیزر می باشد . اکنون اگر زاویه واگرایی پرتو را بعد از تلسکوپ بخواهیم محاسبه کنیم به آسانی با توجه با رابطه ۹ می توان نوشت که :

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w} \frac{f_1}{f_2} \quad 14$$

یعنی زاویه واگرایی به اندازه معکوس بزرگنمایی تلسکوپ کوچک خواهد شد . در نتیجه قطر نقطه کانونی نیز در تمرکز با عدسی با فاصله کانونی f بهمان نسبت کوچک می گردد .

یکی دیگر از مقادیری که از نظر تئوری باید به آن توجه داشت عمق تمرکز (Depth of Focus) می باشد . عمق تمرکز در اپتیک به فاصله بین دو نقطه در طرفین کانون عدسی اطلاق می شود که در آن تصویر وضوح خود را حفظ می کند . در برش و سوراخکاری مقدار عمق تمرکز از آنجهت حائز اهمیت است که موازی بودن دولبده برش یا استوانه ای بودن سوراخ را تعیین می کند . چنانچه عمق تمرکز در اینگونه کاربردها را باین ترتیب تعریف کنیم که فاصله ایست که در آن قطر نقطه کانونی با اندازه ۵٪ بیشتر می شود می توان مقدار آن را از رابطه زیر بدست آورد (۵۳) .

$$Z = \pm \frac{0.081 a^2}{\lambda} \approx 0.6 a^2 / \lambda \quad 15$$

چنانچه مشاهده می شود عمق تمرکز با توان دوم قطر نقطه کانونی نسبت مستقیم دارد . با این ترتیب جهت دستیابی به یک نقطه کانونی کوچک و در نتیجه شدت بر واحد سطح بیشتر ، اختیار یک عمق تمرکز کمتر الزامیست . بعکس چنانچه جهت دستیابی به سوراخهای

استوانه‌ای یا برش موازی احتیاج به عمق تمرکز بیشتری باشد (در حدود ضخامت قطعه مورد نظر) باید قطر نقطه کانونی و در نتیجه شدت بر واحد سطح کمتری را اختیار نمود. این روابط در شکل دو نشان داده شده است (۶).

آخرین مسئله‌ای که از نظر تئوری به آن می‌پردازیم مسئله ابیراهی اپتیکی (Optical Aberration) است که توسط عدسی متمرکز کننده در شکل هندسی نقطه کانونی ایجاد می‌شود. در اینجا تنها ابیراهی کروی (Spherical Aberration) را باید در نظر گرفت زیرا سایر ابیراهی‌ها نظیر استیگماتیسم (Astigmatism) و کوما (Coma) همواره کوچکتر از آن می‌باشند. همچنین ابیراهی رنگی (Chromatic) در این مورد وجود ندارد زیرا نور لیزر تکفام می‌باشد. بطور کلی ابیراهی کروی به شعاع انحنای دو سطح عدسی بستگی داشته و توسط سازه‌شکلی (Shape Factor) که با رابطه:

$$q = \frac{R_1 + R_2}{R_2 - R_1} \quad ۱۶$$

تعریف می‌گردد بدست می‌آید. در نتیجه جهت به حداقل رسانیدن آن عدسی مورد نظر باید بشکل خاصی طراحی شود. بطور کلی می‌توان گفت که استفاده از یک عدسی همگرا با یک سطح مسطح و یک سطح کوژ (Convex) بصورتیکه طرف کوژ آن بسوی پرتوی لیزر باشد ($q = +1$) در اکثر موارد قابل قبول خواهد بود (۷). در حالت کلی، ابیراهی زمانی به حداقل می‌رسد که رابطه زیر صادق باشد (۵).

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{2n^2 + n}{2n^2 - n - 4} \quad ۱۷$$

که در آن n ضریب شکست عدسی در طول موج مورد نظر می‌باشد. برای $n < ۱/۶۹$ مقدار فوق منفی است و عدسی مورد نظر دارای دو سطح کوژ است لکن برای $n > ۱/۶۹$ (بعنوان مثال عدسی ژرمانیوم که در طول موج لیزر گاز کربنیک $\lambda = ۱۰/۶$ میکرون دارای $n = ۴$ می‌باشد) مقدار فوق مثبت شده عدسی مورد نظر بصورت هلالی (Meniscus) یعنی با یک سطح کاو (Concave) و یک سطح کور خواهد بود. البته باید در نظر داشت که شکل عدسی با فاصله کانونی آن نیز در رابطه است. زیرا R_1 و R_2 فاصله کانونی را از طریق فرمول عدسی گوسی:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad ۱۸$$

تعیین می‌نمایند. در نتیجه عدسی مورد نظر باید با در نظر گرفتن کلیه شرایط بالا

بصورت همزمان انتخاب شود.

۳- روش کسار

در این آزمایشات از چهار نوع مختلف لیزر جهت برش و سوراخکاری استفاده شده است :

۱- لیزر گاز کربنیک با پرتو مداوم بقدرت ۱۰۰ وات : این لیزر که انحصاراً "جهت انجام برش توسط این گروه طرح و ساخته شده است ، از نوع مداوم با تخلیه الکتریکی طولی می باشد . جزئیات طرح و ساختمان آن در مقاله دیگری خواهد آمد . پرتوی خروجی آن بقدرت ۱۰۰ وات و قطر ۱ سانتیمتر توسط یک عدسی ژرمانیم هلالی بفاصله کانوسی ۲۵ میلیمتر بروی سطح کار متمرکز می گردد . به کمک یک موتور الکتریکی با سرعت دورانی قابل تنظیم و سیستم مکانیکی مربوطه که حرکت دورانی را به انتقالی تبدیل می کند سطح کار با سرعت مناسب برش داده می شود . طول کل این لیزر ۳ متر می باشد .

۲- لیزر کازکربنیک ضربانی . این لیزر نیز که در همین گروه طرح و ساخته شده است از نوع ضربانی با تخلیه عرضی در فشار یک اتمسفر می باشد .

(Transverse Excited Atmospheric=TEA) پرتو خروجی آن بقطر ۳ سانتیمتر و انرژی کل در هر ضربه ۴ ژول است که در ضربانی بطول زمانی یک میکروثانیه ساطع می گردد . این دستگاه قادر است ۲۰ ضربه در دقیقه ارائه دهد و طول آن ۱۶۰ سانتیمتر است .

۳- لیزر نئودیمیوم - یاک . (Neodimium- YAG) ماده فعال این لیزر یک کریستال استوانه ای نئودیمیوم یاک است که در یکی از کانونهای یک محفظه بیضی شکل قرار دارد . در کانون دیگر یک لامپ فلاش از نوع خطی قرار دارد که با ولتاژ ۱۰۰۰ ولت تا ۱۰ بار در ثانیه تحریک می گردد . انرژی خروجی هر ضربه در حدود ۲/۵ ژول است . طول این لیزر از ۳۰ سانتیمتر تجاوز نمی کند . این لیزر نیم تجارتي بوده که با ایجاد تغییراتی بروی آن جهت تحقیقات حاضر مورد استفاده قرار گرفته است .

۴- لیزر یاقوت . در این لیزر تجارتي ماده فعال از یک بلور استوانه ای یاقوت مصنوعی تشکیل شده است . این لیزر قادر است ضربانی با انرژی ۱ ژول با تواتر ۴ بار در دقیقه ارائه دهد . طول این لیزر نیز در حدود ۵۰ سانتیمتر است و توسط یک فلاش ماریجی که به دور کریستال یاقوت قرار دارد با ولتاژ ۴۰۰۰ ولت تحریک می گردد .

شکل ۲ این چهار نوع لیزر و نمودای از خروجی هر کدام را نشان می دهد .

شکلک لیزرهای فوق آزمایشهای متعددی در شرایط مختلف عملی انجام گرفت که مهمترین آنها شرح زیر می باشد :

۳-۱ آزمایش با لیزر کازکربنیک مداوم

در این آزمایشها ابتدا اثرات مستقیم اشعه لیزر بقدرت ۶ وات بروی کاغذ و چوب و ورقه

پلکسی کلاس و آجر سوز مورد بررسی قرار گرفت. کلیه این مواد حتی در این قدرت پائین و بدون استفاده از عدسی متمرکز کننده ذوب یا تپخیر یا برش داده می شوند. در پلکسی کلاس بد ضخامت ۱ سانتیمتر اشعه لیزر در زمانی بطول تقریبی ۵ ثانیه سوراخی مخروط شکل ایجاد کرده از سمت مقابل خارج می شود. قاعده مخروط در جهت تابش پرتو و بقطر ۱ سانتیمتر و راس آن در جهت مقابل و بقطر ۱ میلیمتر است. مخروطی بودن سوراخ نشان می دهد که توزیع انرژی در سطح مقطع اشعه لیزر بصورت تابع گوسی (Gaussian) می باشد زیرا شدت پرتو در مرکز بیشتر بوده در نتیجه سرعت پیشرفت نقطه مرکزی بیشتر می باشد و سوراخ را بشکل قیف در می آورد.

با استفاده از یک عدسی با آئینه متمرکز کننده اثرات پرتو مورد نظر بروی مسوا، محلیت مورد بررسی قرار گرفت. در مورد فلزاتی چون مس، آلومینیوم، قلع و سرب اثر حدانی مشاهده شد زیرا ضریب بازتاب نور لیزر بطول موج ۱۰/۶ میکرون در این فلزات بسیار زیاد بوده انرژی کمی در سطح فلز جذب می شود. اثر گرمائی پرتوی منعکس شده از سطح کار در این موارد بسیار محسوس بوده قادر است حتی چوب یا کاغذ را بسوزاند. بدسبب استفاده از عینکهای مخصوص جهت حفاظت در برابر پرتوی انعکاسی الزامیست و باید توجه کرد که این پرتو بروی لباس آزمایشگران ننهد زیرا در غیر اینصورت سرعت آنرا سوراخ کرده یا می سوزاند.

در مورد آزمایش با قلع مشاهده شد که چنانچه نقطه تابش با مقدار کمی کربن یا دوده پوشانیده شود سطح کار شروع بد سوختن کرده ولی پس از مدت زمانی متوقف می شود. این پدیده نمودار استفاده از انرژی شیمیایی سوخت کربن می باشد بدین ترتیب که انرژی لیزر باعث رادیکالیزاسیون واکنش شیمیایی $C + O_2 \rightarrow CO_2$ شده انرژی بدست آمده بد پرتوی لیزر جهت ذوب فلز مورد نظر کمک می کند. از این پدیده در برش فلزات مخلف با لیزر بکمک گاز اکسیژن استفاده می شود. بدین ترتیب که ضمن تمرکز دادن پرتوی لیزر بروی سطح کار گاز اکسیژن نیز از همان جهت عدسی با سرعت زیاد بروی سطح کار متمرکز می شود. در بسیاری از آلهای شامل مقدار کمی کربن یا فلزاتی مثل تیتانیوم این پدیده برش را بمقدار قابل توجهی تسهیل می نماید. در آزمایش دیگری با استفاده از دو آند مسی که اولی واکرا با فاصله کانونی ۱۵ سانتیمتر (شعاع انحنای ۳۰ سانتیمتر) و دومی همکرا با فاصله کانونی ۴۵ سانتیمتر (شعاع انحنای ۹۰ سانتیمتر) بوده و بفاصله ۳۰ سانتیمتر از یکدیگر قرار داشتند، قطر اشعه لیزر از یک سانتیمتر بد ۳ سانتیمتر رسانده شد و سپس با استفاده از یک آئینه مقعر دیگر اشعه بروی سطح کار تمرکز داده شد. در این شرایط مشاهده شد که شدت بر واحد سطح بروی سطح کار مطابق با رابطه (۱۳) بد چند برابر افزایش یافته است و در نقطه کانونی می توان بد سهولت قلع را بد ضخامت چند میلیمتر و سرب را بد ضخامت ۲-۳ میلیمتر و آلومینیوم را بد ضخامت ۱۵-۲۰ میلیمتر

سوراخ و برش داد.

جهت ادامه این آزمایشها در سطح انرژی بالاتر دو لیزر گاز کربنیک دیگر اولی با قدرت مداوم حدود ۴۰ وات و دومی با قدرت حدود ۱۰۰ وات ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایشها متوجه شدیم که آئیندهای لیزر در این سطح توان بالا پس از مدت بسیار کوتاهی در اثر جذب درصد کمی از انرژی داخلی لیزر سرعت گرم شده توازی بین خود و عمود بودن بر محور لیزر را از دست می دهند. بدین ترتیب انرژی خروجی لیزر هر بار پس از تنظیم مجدد آئیندها از حداکثر شروع شده در مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه به صفر می رسد. باید توجه کرد که ضریب جذب آئیندها (در این مورد یک آئینه با ضریب انعکاس ۱۰۰٪ از جنس پیرکس با پوشش طلا و یک آئینه با ضریب انعکاس ۷۰٪ از جنس ژرمانیوم) در اثر بالا رفتن درجه حرارت افزایش می یابد و بدین ترتیب مقدار بیشتری انرژی جذب می شود و درجه حرارت بالاتر می رود و چنانچه این پدیده زنجیره ای ادامه یابد آئینه سرعت خراب شده از بین می رود. در نتیجه لازم است درجه حرارت آئیندها در یک حد معین ثابت نگهداشته شود. به این جهت یک سیستم خنک کننده طرح و ساخته شد که با گردش آب در اطراف آئینه و جذب و انتقال انرژی حرارتی بخارج از خراب شدن آئینه جلوگیری کند. سیستم خنک کننده مشابهی نیز برای عدسی ژرمانیم که جهت تمرکز اشعه بروی سطح کار مورد استفاده قرار می گیرد ساخته شد. در مرحله دوم این سیستم خنک کننده به یک دماغه قیفی جهت استفاده همزمان از گاز اکسیژن و دیگر گازها ضمن برش مجهز شد. یکمک این دستگاه مواد مختلف اعم از آلی و معدنی و فلزی با سرعتهای مختلف برش داده شد. قطر نقطه کانونی ۱/۰ میلی متر و قدرت بر واحد سطح بدست آمده ۱۰^۶ وات بر سانتیمتر مربع می باشد. در جدول ۳ نتایج بدست آمده نشان داده شده است. برش فلزاتی چون آلومینیم، برنج و مس بدلیل ضریب انعکاس زیاد این فلزات مقدور نگشت. آزمایشاتی نیز در زمینه جوشکاری با این لیزر انجام شد که بدلیل قدرت کم و اکسیده شدن منطقه جوش نتایج رضایت بخش نبود. ولی نتایج برشکاری بطور کلی نشان می دهد که برش کربن و فولاد کم آلیاژ و انواع آلیاژهای تیتانیوم با سرعت زیاد و به سهولت انجام پذیر می باشد در حالیکه برش فولاد ضد زنگ و آلیاژهای نیکل تا اندازه ای مشکلتر و کندتر است.

۳-۲ سوراخکاری با لیزرهای ضربانی

چنانچه قبلاً متذکر شدیم، از سه نوع مختلف لیزرهای ضربانی گاز کربنیک، نئودیمیم و یا قوتی جهت آزمایشهای سوراخکاری استفاده شده است. از این میان لیزر گاز کربنیک دارای انرژی بیشتری می باشد. لیکن گرانی گاز هلیوم که حدود ۸۰٪ مصرف گاز این لیزر را تشکیل می دهد باعث شد که استفاده از آن در تحقیقات مربوط به سوراخکاری به صورت

محدودتری انجام گیرد. نکته دیگری که در این رابطه باید در نظر گرفته شود اینست که قدرت زیاد این لیزر باعث می شود که پرتو لیزر پس از برخورد با عدسی به هنگام تمرکز بروی قطعه کار و قبل از رسیدن به سطح آن هوا را یونیزه کرده و ایجاد پلازما نماید. این

نوع نمونه	ضخامت (میلیمتر)	سرعت (سانتیمتر بر ثانیه)	نوع گاز کمک
چوب - پلاستیک - پلکسی - گلاس	۲۵	۱	ازت - اکسیژن - هلیوم
شیشه - کوارتز - سرامیک	۱	۰٫۳	ازت - اکسیژن - هلیوم
تیتانیوم (بدون تمرکز - با عدسی)	۰٫۲۵	۵	اکسیژن
انواع فلزات	۰٫۵	۱۰ تا ۱۰۰	اکسیژن
فولاد ضد زنگ	۱	۰٫۳	اکسیژن

جدول ۳ - نمونه های برش مواد بکمک لیزر گاز کربنیک بقدرت ۱۰۰ وات با
تمرکز بوسیله عدسی ژرمانیوم

پلازما خود پرتوی لیزر را جذب کرده مانع از اصابت آن به سطح هدف و در نتیجه ایجاد سوراخ می شود. بدین جهت است که استفاده از این لیزر در سوراخکاری ملزم استفاده از محفظه خلاء جهت قطعه کار و عدسی می باشد تا شدت پرتو نتواند در هوا ایجاد پلازما کند و این خود محدودیت دیگریست که استفاده از این لیزر را مشکل می سازد. لیزر نئودیمیم - یاک نیز که در برخی از این آزمایشها از آن استفاده شده است با وجود مزایای قابل توجه نظیر توانر زیاد (تا ۱۰ بار در ثانیه) و حجم کم، بخاطر در دسترس نبودن آئیندهای مناسب دارای زاویه واگرائی زیاد از یکسو و ناهمگنی شدت اپتیکی در سطح مقطع از سوی دیگر می باشد. این دو عامل باعث می شود که سوراخ ایجاد شده کاملاً "دایردای نبوده و کیفیت آن در سطح مطلوب نباشد. بدین جهت در اکثر موارد مورد بحث در این مقاله از لیزر یاقوتی استفاده شده است. این لیزر دارای پرتوی بسیار همگن و قدرت متوسط یک ژول در هر ضربه با توانر چهار بار در دقیقه می باشد که جهت آزمایشهای تحقیقاتی مناسب، لکن برای کاربردهای صنعتی بسیار کند می باشد.

در جدول ۴ انواع نمونه‌های سوراخ شده با لیزر نئودیمیم داده شده است :

مشخصات نمونه	ضخامت (میلیمتر)	تعداد ضربه‌ان لیزر
واشر فلزی	۱٫۵	۲
تیغ فولادی	۰٫۵	۱
واشر فلزی	۱	۲
سیم فلزی	۱	۲
پلکسی گلاس	۳	۱۵
سکه یک ریالی	۱	۱
واشر برنجی	۱٫۲۵	۲
واشر برنجی	۱	۲
واشر برنجی	۳	۱۰
مفتول مسی	۲	۴
ورقه مسی	۰٫۵	۲
فولاد ضد زنگ	۱	۳
فولاد ضد زنگ	۱٫۵	۱۶
فولاد ضد زنگ	۲٫۵	۲۲
فولاد ضد زنگ	۳	۴۳

جدول ۴ - نمونه‌های سوراخکاری با لیزر نئودیمیم

در آزمایش‌های فوق حداقل قطر سوراخ بدست آمده در حدود ۵۰ میکرون می‌باشد. بمنظور مطالعه بیشتر در مورد کیفیت سوراخهای بدست آمده و شکل هندسی آنها آزمایش‌های گوناگون با عدسیهای مختلف و همچنین تغییر دقیق فاصله عدسی از سطح یک ورقه فولاد ضد زنگ بضامت ۱ میلیمتر انجام گرفت. قطر منافذ ورودی و خروجی سوراخهای بدست آمده بوسیله میکروسکپ دقیقاً "اندازه‌گیری و کیفیت جداره‌های سوراخ مورد مطالعه قرار گرفت.

در مقایسه سوراخهای بدست آمده با دو عدسی همگرا با فواصل کانونی ۳۰ و ۲۵۰ میلیمتر و با قرار دادن سطح کار در نقطه کانونی نتایج زیر بدست آمده است :

۱ - در سوراخ ورودی همواره مقداری مواد مذاب بصورت قطرات ریز و مدور در کنار لبه‌های سوراخ وجود دارند. مقدار این قطرات به فاصله کانونی عدسی و تعداد ضربه‌ان

لیزر بستگی دارد و فواصل کانونی کوچکتر و تعداد ضربان کمتر از اینجهت برتری دارند .
۲- شکل سوراخ از نظر دایره‌ای بودن بستگی به دقت تنظیم آئینه‌های لیزر دارد و برای دستیابی به سوراخهای کاملاً " گرد این تنظیم باید با دقت زیاد انجام گرفته و مرتباً " کنترل شود .

۳- برای جلوگیری از اصابت مواد مذاب که از سطح کار جدا شده بطرف عدسی فوران می‌کند استفاده از یک سطح شفاف (پلاستیکی، نایلونی یا شیشه‌ای) در مقابل عدسی الزامیست زیرا در غیر اینصورت عدسی بسرعت خراب می‌شود. سطح مذکور باید دارای خواص اپتیکی خوبی باشد تا در ابعاد و شکل نقطه کانونی ایجاد انحراف و ابیراهی نکند . در این آزمایشها از یک ورقه نازک و شفاف میکا در برابر عدسی استفاده شد که پس از هر صد ضربه لیزر تعویض می‌گردید .

کنترل دقیق قطر سوراخ بوسیله تغییر فاصله عدسی و سطح کار انجام میگردد . در این رابطه آزمایشاتی با عدسی با فاصله کانونی ۳۰ میلیمتر بروی ورقه فولاد ضد زنگ بضامت ۱ میلیمتر بشرح زیر انجام گرفت :

- ۱- فاصله عدسی و سطح کار در یک منطقه بطول $\Delta x = 3/5$ میلیمتر در اطراف نقطه کانونی با فواصل ۵ رة میلیمتر تغییر داده شد (x منفی : نقطه کانونی بطرف قطعه ، $x = 0$: نقطه کانونی بروی سطح کار ، x مثبت : نقطه کانونی بیرون از قطعه)
- ۲- در هر فاصله اصابت ضربان لیزر آنقدر ادامه داده شد تا سوراخ تکمیل گردد .
- ۳- قطر سوراخ های ورودی و خروجی بدست آمده بامیکروسکپ اندازه‌گیری شد .
- ۴- زاویه راس سوراخ با توجه به رابطه $\alpha = \frac{a-b}{2d}$ که در آن a قطر بزرگتر و b قطر کوچکتر و d ضخامت قطعه (۱ میلیمتر) است محاسبه شد .

نتایج بدست آمده در جدول ۵ آمده است :

x (میلیمتر)	قطر ورودی (میکرون)	قطر خروجی (میکرون)	تعداد ضربان لیزر	زاویه راس (درجه)
-۲	۴۱۰	۵۰	۲۴	۲۱
-۱٫۵	۳۸۰	۷۵	۸	۷۵
-۱	۲۸۰	۸۵	۶	۱۱٫۲
۰٫۵	۲۷۵	۷۵	۴	۱۱٫۵
۰	۲۵۰	۱۵۰	۳	۵٫۷
۰٫۵	۲۲۵	۱۵۰	۴	۴٫۳
۱	۳۰۰	۱۷۰	۸	۷٫۴
۱٫۵	۳۸۰	۳۰۰	۲۰	۴٫۶

جدول ۵- تغییر اندازه و مشخصات سوراخ با فاصله عدسی تا سطح کار

از نتایج بدست آمده مشاهده می شود که اندازه سوراخ با تنظیم دقیق فاصله عدسی تا سطح کار قابل تغییر است و بدین ترتیب می توان سوراخ را با اندازه دلخواه بروی سطح کار تعبیه کرد. البته باید توجه داشت که عمق سوراخ (یا ضخامت قطعه) باید در حدود عمق تمرکز (رابطه ۱۵) باشد زیرا در غیر این صورت زاویه راس سوراخ از مقدار قابل قبول تجاوز خواهد کرد.

شکل ۶ دقت روش سوراخکاری با لیزر را بروی جداره یک سوزن بقطر ۰۶ میلیمتر نشان می دهد.

۳-۳ کاربرد سوراخکاری با لیزر در یکی از کارخانجات صنعتی داخلی

یکی از کاربردهای سوراخکاری با لیزر در ایجاد سوراخهای مناسب بروی صفحات دوش مانند کارخانجات تولید الیاف مصنوعی (پلی اکریل - پلی استر یا پشم شیشه) می باشد. مشخصات فنی قطعه مورد نیاز که در کارخانجات پلی اکریل ایران مورد استفاده قرار می گیرد در شکل ۴ آمده است. صفحات مورد نظر از فولاد ضد زنگ استنیتیک (Austenitic) نوع L 304 یا 321 با حدود ۱۸% کرم و ۱۰% نیکل می باشد (۸). این صفحات پس از برش و تراشکاری با وسایل مکانیکی معمولی جهت انجام سوراخکاری در اختیار این گروه گذاشته شد. در مرحله اول، جهت ایجاد قسمت قطور سوراخ بضامت ۱۶ میلیمتر و زاویه راس ۶۰ درجه، از متدهای مکانیکی استفاده شد، بطوری که ۱۵ میلیمتر از ضخامت صفحه جهت ایجاد سوراخ لیزری باقی گذاشته شد، در مرحله دوم سوراخهای لیزری به قطر ۳۸۰ میکرون در مرکز سوراخ قبلی به کمک لیزر یا قوت ایجاد گردید. از آنجا که سوراخ لیزری باید در عمق استوانه‌ای به عمق حدوداً ۹ میلیمتر و دهانه ۱۶ میلیمتر تعبیه گردد و قطر پرتو ورودی لیزر یا قوت حدوداً ۱۰ میلیمتر می باشد، فاصله کانونی عدسی مورد نیاز باید از ۸ سانتیمتر بیشتر باشد. در عمل پس از در نظر گرفتن عدسیهای مختلف از یک عدسی از جنس شیشه اپتیکی BK-7 با فاصله کانونی ۱۰۰ میلیمتر و قطر ۱۵ میلیمتر که جهت تمرکز اشعه لیزر یا قوت و به حداقل رسانیدن ابیراهی کروی در این طول موج طرح شده است (۷) استفاده شد. جهت ایجاد سوراخ با قطر مورد نظر ابتداء یک ورقه فولاد ضد زنگ از جنس مشابه و به ضخامت ۱۵ میلیمتر در برابر عدسی و در جهت عمود بر پرتوی لیزر قرار داده می شود و با تغییر فاصله آن نسبت به عدسی فاصله لازم برای ایجاد سوراخ بقطر ۳۸۰ میکرون بدست می آید. سپس یک میکروسکپ با بزرگنمایی ۵۰ در پشت قطعه قرار داده و آنرا بطوری تنظیم می کنیم که تصویر سطح پشتی صفحه بوضوح در میکروسکپ دیده شود. کلیه قطعات اپتیکی و لیزر و عدسی و جایگاه قطعه کار و میکروسکپ همگی بروی ریلهای اپتیکی بطریقی محکم می شوند که تکان نخورده فواصل مذکور که با دقت زیاد تنظیم می شوند در طول زمان تغییر نکنند. سپس بکمک یک لیزر هلیوم نئون که کاملاً "منطبق بر پرتوی لیزر

یا قوت تنظیم شده است نقطه تمرکز عدسی را در مرکز سوراخ متهای (قطر ۰.۱ میلیمتر) تنظیم و لیزر یا قوت را براه میاندازیم. پس از حدود ۱۰ ضربه لیزر سوراخ تکمیل می‌گردد و می‌توان به کمک میکروسکپ کیفیت آن را مورد مطالعه قرار داد. سپس قطعه کار را به صورت موازی با سطح خود جابجا می‌کنیم تا سوراخ بعدی در محل مورد نظر قرار گیرد. مجدداً فاصله آن با عدسی (که بوسیله وضوح تصویر سطح پشتی در میکروسکپ تعیین می‌گردد) و عمود بودن سطح آن نسبت به پرتو لیزر (که به کمک یک لیزر هلیوم نئون کمکی دیگر مشخص می‌شود) کنترل می‌شود. سپس لیزر یا قوت را مجدداً براه می‌اندازیم. بدین ترتیب ۸ صفحه ۳۴ سوراخه با سرعت متوسط ۲۰ دقیقه برای هر سوراخ (۱۰ دقیقه برای سوراخ متهای) ساخته شد و در اختیار کارخانه مذکور قرار داده شده است.

لازم به تذکر است که طول زمان قید شده اولاً "مولود دقت بسیار زیاد است که برای انجام موفقیت‌آمیز طرح مورد نظر لازم است و ثانیاً" بستگی به دستگاه مورد استفاده دارد. دستگاه لیزر یا قوت که برای انجام این منظور مورد استفاده قرار گرفت یک دستگاه تحقیقاتی می‌باشد و چنانچه در قسمت ۴ نیز بدان اشاره خواهیم کرد استفاده گسترده از آن در کاربردهای صنعتی غیرممکن می‌باشد.

در شکل (۵) تابع توزیع قطرهای ۳۴ سوراخ یکی از قطعات ساخته شده و همچنین انحراف از گرد بودن بصورت مقدار تفاوت بین قطر بزرگ و کوچک هر سوراخ (۸) نشان داده شده است. میانگین قطر سوراخها ۳۷۵ میکرون و انحراف معیار (Standard Deviation) آن ۳۰ میکرون می‌باشد. قطر ۷۵ درصد سوراخها بین ۳۵۰ تا ۴۰۰ میکرون است. همچنین برای ۸۰٪ سوراخها $p < 30$ می‌باشد در نتیجه می‌توان گفت که از نظر آماری دقت روشهای عملی بکار گرفته شده $9\% \approx 30/375$ است.

۴- مقایسه با تئوری و نتیجه‌گیری

در این قسمت پاره‌ای از نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفته با تئوری قسمت ۲ مقایسه می‌گردد و سپس یک نتیجه‌گیری کلی نیز ارائه می‌گردد.

۱-۴ مقایسه با تئوری

قطر پرتوی لیزر یا قوت قبل از اصابت به عدسی در حدود $b = 9$ میلیمتر می‌باشد. این قطر در فاصله $L = 75$ متری در حدود $D = 14$ میلیمتر اندازه‌گیری شده است. در نتیجه می‌توان زاویه واگرایی را بطریق زیر محاسبه نمود (۳):

$$\theta = \frac{D-b}{2L} = \frac{14-9}{2 \times 7500} = 3/2 \times 10^{-4} \text{ رادیان}$$

با استفاده از عدسی با فاصله کانونی $f = 100$ میلیمتر و رابطه (۱۲) می‌توان قطر نقطه

کانونی را حساب نمود :

$$a = 2f\theta = 200 \times 3/4 \times 10^{-4} = 66 \text{ میکرون}$$

چنانچه سطح کار را آنقدر عقب ببریم که قطر پرتو لیزر بروی آن به حدود مقدار دلخواه ($a \approx 400$ میکرون) برسد، سطح مورد نظر عبارتست از :

$$A = \frac{\pi a^2}{4} = 1/25 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

اکنون با استفاده از رابطه (۷) می توان عمق سوراخ را از نظر تئوری تخمین زد : ضرایب فیزیکی فولاد ضد زنگ نوع ۳۰۴ به قرار زیر می باشد :

چگالی $\rho = 7.9 \text{ gr/cm}^3$. گرمای ویژه $C = 0.11 \text{ Cal/gr } ^\circ\text{C}$
 درجه تبخیر $T_v = 2700 \text{ } ^\circ\text{C}$ گرمای نهان تبخیر $L_v = 50 \text{ Cal/gr}$
 در استفاده از رابطه (۷) باید توجه داشت که $\int_0^\infty I(t) dt = \frac{E}{A}$ که در آن E کل انرژی لیزر در یک ضربه می باشد. در نتیجه

$$d = \frac{E}{A \rho (L_v + CT_v)} = 0.7 \text{ میلیمتر}$$

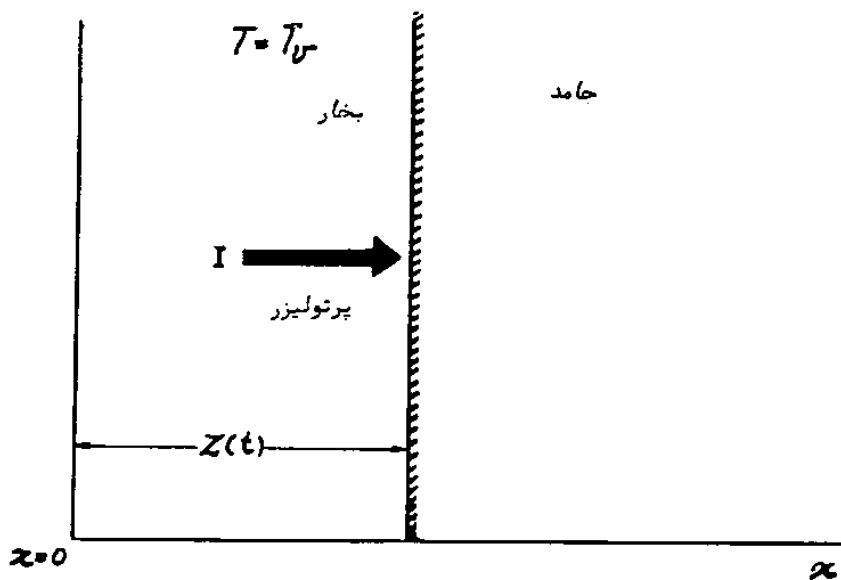
بنابراین در هر ضربه لیزر به انرژی ۱ ژول سوراخی به عمق ۰.۷ میلیمتر ایجاد می گردد و برای تکمیل سوراخ به عمق ۱.۵ میلیمتر حدوداً ۳ ضربه لیزر (از نظر تئوری) لازم است. در عمل ضخامت مذکور با ۷ الی ۱۰ ضربه لیزر سوراخ می شود. تفاوت مذکور ناشی از محدودیتهای مدل تئوری می باشد و جهت نیل به نتایج دقیقتر باید یک مدل دو بعدی که انتقال گرما از جداره های سوراخ را نیز شامل شود و همچنین مقدار انرژی انعکاسی از سطح فلز در نظر گرفته شود.

۴-۲ نتیجه گیری

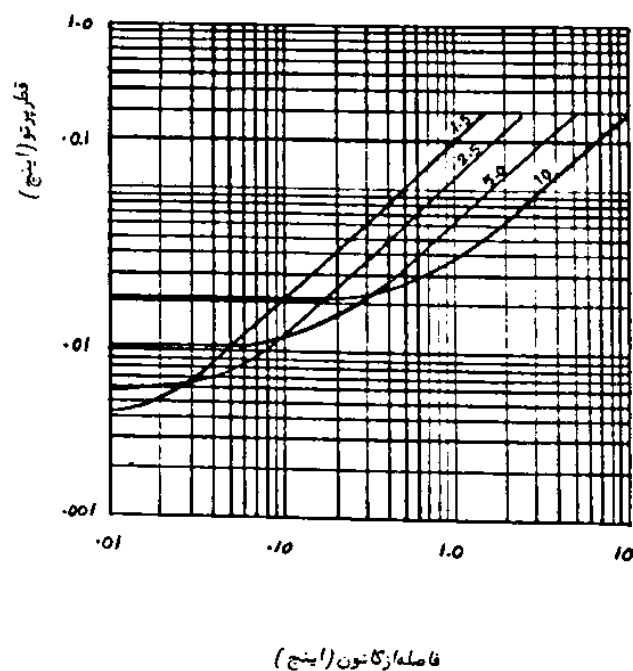
بطور خلاصه در این مقاله برای اولین بار در ایران روشهای تجربی برش و سوراخکاری با لیزر مورد مطالعه قرار گرفته و یک مدل تئوری ساده جهت درک اصول فیزیکی زیربنایی این تکنیکها نیز ارائه شده است. نتایج تحقیقاتی بدست آمده عملاً در ساخت نمونه های اولیه قطعاتی که جهت تولید الیاف مصنوعی در کارخانجات پلی اکریل اصفهان مورد استفاده قرار می گیرند، بکار گرفته شده است. این نتایج نشان می دهد که در بسیاری از موارد، استفاده از برش و سوراخکاری با لیزر الزامیست زیرا هیچیک از روشهای مکانیکی

- معمول قادر به حصول بد نتایج مورد نیاز نمی باشند .
- تکبکهای لیزری در مقایسه با روشهای دیگر برش و سوراخکاری یا جوشکاری از مزایای زیر برخوردار می باشد :
- ۱- در اکثریت قریب به اتفاق موارد ، کار در هوای معمولی و در فشار اتمسفر انجام می گیرد و احتیاجی به خلأ نیست در حالیکه بعنوان مثال در جوشکاری یا اشعه الکترود احتیاج به خلأ می باشد .
 - ۲- نقطه کار با هیچکوند ابزاری تماس حاصل نمی کند و مسائلی چون شدن اره یا شکست متد و از بین رفتن الکترودهای جوشکاری وجود ندارد .
 - ۳- مواد سخت و شکننده مثل سرامیکها براحتی با لیزر برش داده یا سوراخ می شوند - همجنس لیزر قادر است برخی فلزات که بخاطر خواص گرمائی مختلف بهم جوش نمی خورند را به یکدیگر متصل سازد .
 - ۴- ابعاد سوراخهای بدست آمده بسیار کوچک می باشند .
 - ۵- عملیات سرعت انجام می گیر د ، طول زمانی متوسط کار با هر قطعه در حدود یک هزارم ثانیه است .
 - ۶- استفاده از لیزر انجام عملیات بصورت اتوماتیک و در نتیجه دستیابی به سرعت های بیشتر را ممکن می سازد .
 - ۷- نقاط بسیار دقیق و غیرقابل دسترسی را می توان با لیزر به آسانی سوراخ کرد .
 - ۸- شدت بر واحد سطح که با این روش بدست می آید از هر روش دیگری بیشتر است .
- روش برش و سوراخکاری با لیزر همچنین دارای عیوب و محدودیتهای زیر می باشد :
- ۱- عمق نفوذ هر ضربه لیزر محدود است ، هرچند با تکرار ضربه می توان به عمق دلخواه دست یافت .
 - ۲- مواد مذاب بروی جداره های داخلی و لبه سوراخ بصورت قطرات ریز منجمد شده ایجاد ماهمواری می کند .
 - ۳- سطح مقطع سوراخ کاملاً " گرد نیست و غالباً " سوراخ در سطح ورودی از سطح خروجی بزرگتر است . کنترل اندازه و دقت سوراخها مشکل می باشد .
 - ۴- در جوشکاری با لیزر مقادیر فیزیکی مختلف باید بدقت کنترل شوند تا از تبخیر سطوح جلوگیری بعمل آید .
 - ۵- از نظر اقتصادی ، روش لیزر غالباً " گرانتر از تکنیکهای دیگر است .
- در هر کاربرد بخصوص باید با توجه به مزایا و محدودیتهای بالا نسبت به انتخاب روش مطلوب اتخاذ تصمیم نمود .
- تجربیات مشروح در این مقاله نشان می دهد که دستگاههای موجود قادر به جوابگوئی مسائل برش و سوراخکاری با لیزر در یک بعد صنعتی نمی باشند . چنانچه قبلاً " نیز متذکر

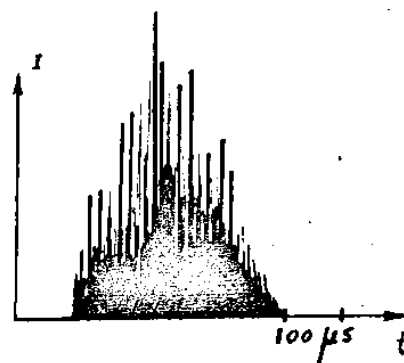
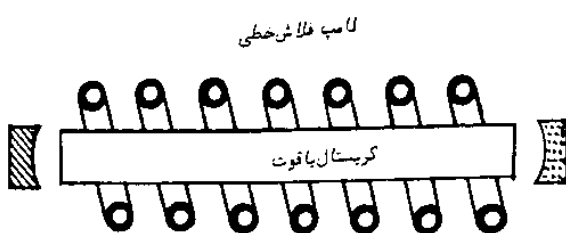
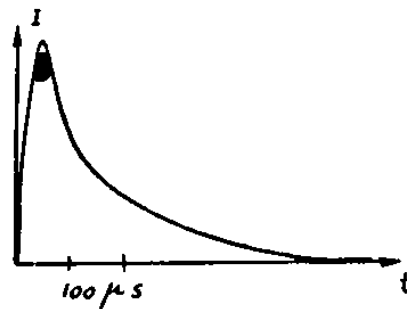
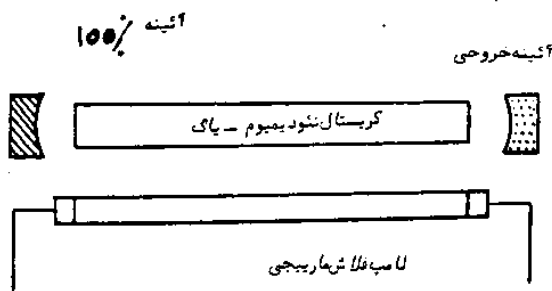
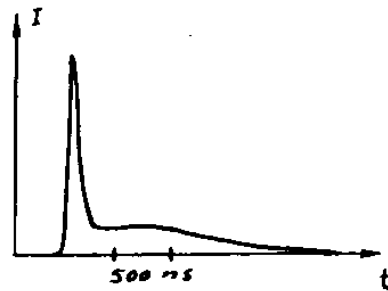
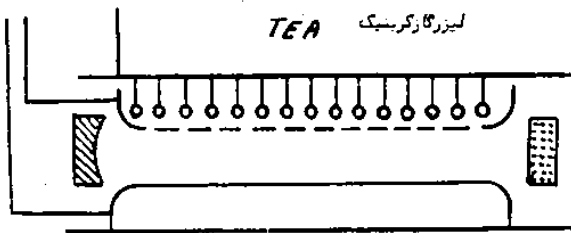
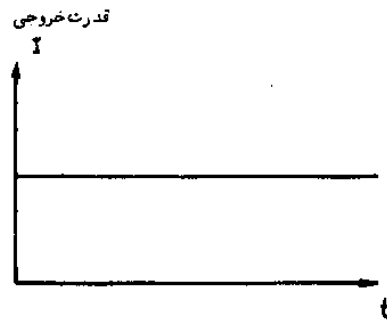
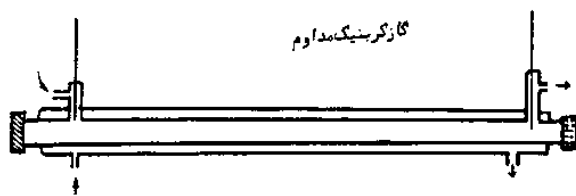
شدیم این دستگاهها تحقیقاتی بوده جهت مصارف صنعتی ساخته نشده‌اند . لذا استفاده از آنها در اینگونه مصارف کاربردی مستلزم صرف وقت بسیار زیاد است که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد . گسترش همه جانبه تکنولوژی لیزر در مصارف صنعتی مستلزم ساخت یا خرید دستگاههای لیزر مناسب که بتوانند جوابگوی حجم زیاد کار باشند می‌باشد . بعنوان مثال شرکت پلی‌اکریل ایران به تنهایی خواستار انجام ۱۷۰۰۰۰ سوراخ در مرحله اول و ۲۵۰۰۰۰ در مرحله دوم و احتمالاً " تعداد بیشتری در مراحل بعدی می‌باشد و این تعداد تنها مربوط به یکی از کارخانجات تولید الیاف مصنوعی در ایران می‌باشد . دوالی سه کارخانه دیگر نیز احتمالاً " خواستار حجم مشابه یا بیشتری می‌باشند . بهر حال این حجم کار هر سه الی چهار سال بعلت فرسودگی و از بین رفتن صفحات تکرار می‌شود . در خاتمه باید یادآوری کرد که کاربرد مذکور فقط یکی از کاربردهای سوراخکاری با لیزر بوده در صنایع دیگر نیز گسترش این تکنولوژی جهت نیل به خودکفائی صنعتی مورد نیاز می‌باشد .



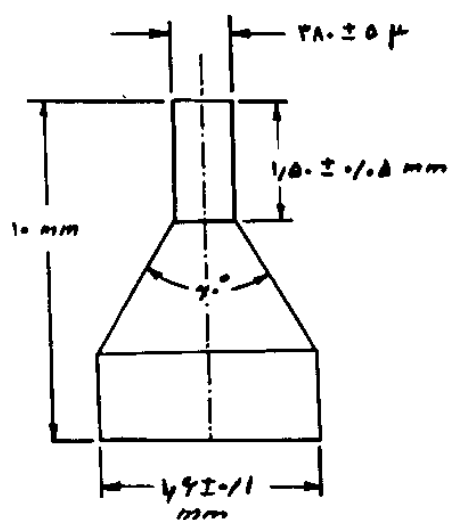
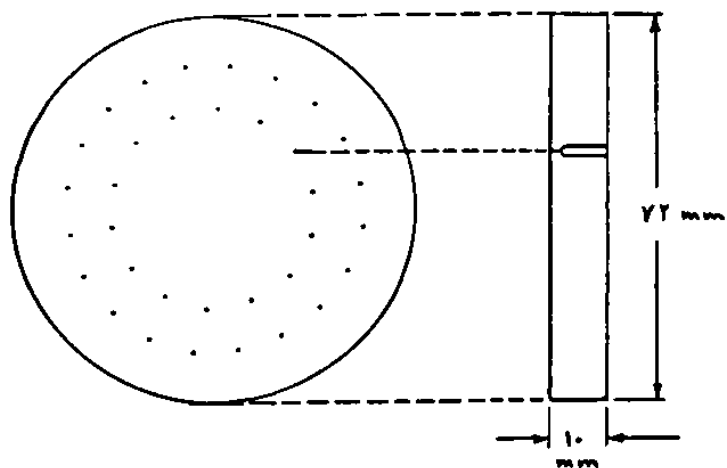
شکل ۱ - مشخصات هندسی مدل تئوری فیزیکی جهت بررسی برش و سوراخکاری با پرتوی لیزر.



شکل ۲ - قطر پرتوی لیزر در تمرکز بوسیله عدسی با فاصله کانونی ۱۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ اینچ بر حسب فاصله از کانون عدسی. رابطه بین عمق تمرکز و قطر نقطه کانونی در این شکل نشان داده شده است (مأخذ ۵).

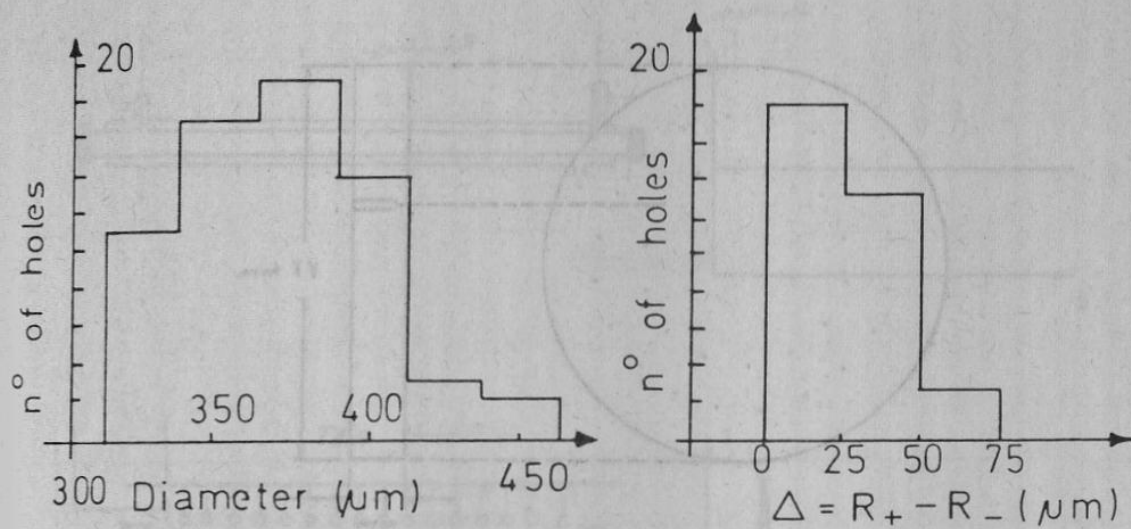


شکل ۳- چهارنوع مختلف لیزر که در مقاله حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نمودای از خروجی هر کدام (سمت راست) به ترتیب از بالا به پائین: لیزر گاز کریستیک مداوم - لیزر گاز کریستیک ضربانی TEA با تخلیه عرضی - لیزر نشودیموم یاک - لیزر یاقوت.

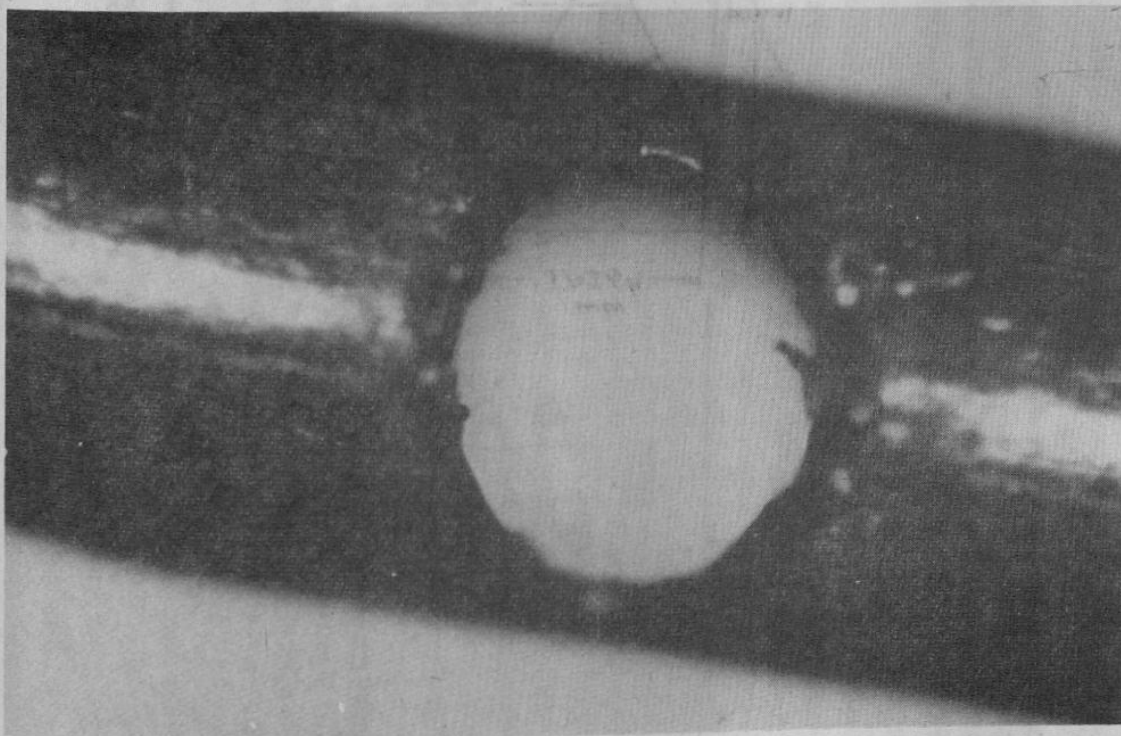


شکل ۴

شکل ۴- مشخصات هندسی قطعه کار مورد نیاز یکی از کارخانجات داخلی که با استفاده از تکنولوژی سوراخکاری با لیزر ساخته شده است.



شکل ۵- تابع توزیع قطرهای ۳۴ سوراخ یکی از قطعات ساخته شده و انحراف از گردی بصورت مقدار تفاوت Δ بین قطر بزرگ و کوچک هر سوراخ.



شکل ۶- نمونه سوراخکاری بروی سوزن به قطر ۰.۲ میلیمتر. قطر سوراخ: ۲۰+۴۱۰ میکرون

1. مرکز تحقیقات هسته‌ای - سمینار انرژی‌های نو - ۱۳۶۱ و ۱۳۶۲
2. Industrial Applications of Lasers, J.F. Ready, Academic Press, 1978.
3. Lasers in Industry, S.S. Charschan (editor), Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
4. An Introduction to Lasers and Masers, A.E. Siegman, McGraw-Hill, 1971.
5. Industrial Lasers and Their Applications, J.E. Harry, McGraw & Hill, 1974.
6. Lasers, Operation, Equipment, Application and Design, Coherent Inc. Staff, McGraw and Hill, 1980.
7. Optics Guide, Melles Griot Company, 1975.
8. An Introduction to Stainless Steel, J.G. Parr and A. Hanson, American Society of Metals, 1971.

LASER CUTTING AND DRILLING: THEORY AND EXPERIMENTS

S.M.Hamadani, F.Soltanmoradi, M.H.Marvasti
M.T.Tinati

Nuclear Research Center
Atomic Energy Organization of Iran
P.O.Box 3327 Tehran-Iran

Abstract

The Laser Group of Nuclear Research Center has had considerable activity in the area of applications of laser technology in industry. This activity is the result of numerous industrial applications presented to this division concerning precise cutting and drilling with lasers. In many cases considered, classical techniques were not able to satisfy the precise microscopic tolerances. Optical and laser techniques were therefore suggested to solve these problems. In the present paper, after a general introduction and theoretical considerations presented in sections 1 and 2, experimental techniques and results are given in section 3, together with a case study of a laser application in a local industry that has been successfully undertaken and solved by this group. In section 4 an analysis of the experimental results with reference to theory, general conclusions on the limitations of the technique, and methods to overcome these limitations in future are presented.