# پارامترهای موثر بر برش پارچه با لیزر

مریم ذوقی[۱*]، امیر حسن جعفریان دهکردی[۲]

[۱] دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، کدپستی ۴۳۵۶-۱۱۱۵۵

[۲] گروه مهندسی مکانیک و مکاترونیک، پردیس بین المللی کیش دانشگاه تهران، کیش، ایران، کدپستی ۵۵۶۶۵-۷۹۴۱۶

maryam.zoghi@ut.ac.ir

**چکیده**

در سال های اخیر ظهور فناوری لیزر در صنعت نساجی راه حل های ابتکاری جدیدی را در فرآیندهایی نظیر علامت گذاری و برش پارچه ایجاد کرده است که بسیاری از نقاط ضعف فناوری های مرسوم را با موفقیت پشت سر می‌گذارد. عوامل مختلفی بر پردازش لیزری مواد نساجی طبیعی و مصنوعی موثر هستند. در این مقاله، با هدف درک ماهیت فیزیکی این فرآیند و مهندسی بهتر آن، پارامترهای موثر در برش لیزری پارچه ارائه و تحلیل شده اند. در ادامه نتایج تجربی برش پارچه فاستونی با ترکیب ۴۵٪ پشم و ۵۵٪ پلی استر با استفاده از لیزر کربن دی اکسید پیوسته در طول موج $\mu m$ ۱۰/۶۴ مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایشات بر روی اثر تغییر توان، سرعت برش و اندازه قطر باریکه نشان می‌دهد که نور لیزر با کیفیت باریکه ۱/۵ و توان ۱۵ وات می تواند ۶ لایه روی هم از پارچه فاستونی را با سرعت mm/s ۳۰ با کیفیت مطلوب برش دهد.

**کلمات کلیدی :** برش لیزری پارچه، پارامترهای موثر، لیزر کربن دی اکسید، قطر باریکه، سرعت برش

# Effective Parameters for Laser Cutting of Fabrics

Maryam Zoghi [1*], Amir Hassan Jafarian Dehkordi [2]

[1] School of Engineering Science, University of Tehran, Tehran, Iran, postal code 11155-4356

[2] Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kish International Campus of Tehran University, Kish, Iran, postal code 79416-55665

maryam.zoghi@ut.ac.ir

**Abstract**

In recent years, the advent of laser technology in the textile industry has brought new innovative solutions to processes such as fabric marking and cutting, successfully overcoming many of the weaknesses of conventional technologies. Various factors influence the laser treatment of natural and synthetic textile materials. In this paper, the effective parameters of laser cutting of textiles are presented and analyzed to understand the physical nature of this process and improve its technique. In the following, the experimental results of cutting Fustian fabric with a combination of 45% wool and 55% polyester using a continuous carbon dioxide laser at a wavelength of 10.64 μm are investigated. Experiments on the effect of varying power, cutting speed, and size of beam diameter show that laser light with a beam quality of 1.5 and power of 15 watts can cut 6 layers of Fustian fabric at a speed of 30 mm/s with the desired quality.

**Keywords:** Laser cutting of fabric, Effective parameters, Carbon dioxide laser, Beam diameter, Cutting speed

**۱- مقدمه**

برش لیزری یک فرآیند جداسازی حرارتی بدون تماس با مواد است که از نور لیزر متمرکز با توان بالا استفاده می کند. لیزر ماده را تبخیر کرده و با حذف لایه به لایه آن یک شکاف برش بسیار نازک ایجاد می‌کند. این فناوری از زمان اولین کاربرد صنعتی آن برای برش تخته سه لا در سال ۱۹۷۲، به طرز فوق العاده ای تکامل یافته است[۱]. لیزر در صنعت نساجی در زمینه های مختلفی مانند علامت گذاری و حکاکی [۲و۳]، جوشکاری (دوخت)[۴]، بهبود خواص پارچه [۵ و۶]، اسکن سه بعدی [۷] و تمیز کردن منسوجات [۸ و۹] کاربرد پیدا کرده است. با این وجود استفاده از لیزر در برش پارچه، هنوز روش جدیدی محسوب می شود. روش متعارف در برش پارچه استفاده از عوامل مکانیکی مانند تیغه‌های صاف یا دوار و چاقوهای رفت و برگشتی است که اغلب نیاز به یک شخص کارور (اپراتور) با توجه کامل دارد. از این رو، بین حداکثر سرعت برش و دقت آن حد تعادلی برقرار است. روش های برش اتوماتیکCNC نیز در مقایسه با برش لیزری دارای مزایا و معایب خود هستند. در CNC، سری برش با مواد در تماس است و برش را توسط ابزار مته مانندی در طول و عرض و عمق مواد اجرا می کند. فرآیند برش لیزری مبتنی بر حرارت و کاملا غیر تماسی است. بدین معنا که پرتو لیزر پس از برخورد به سطح ماده در آن نفوذ کرده و انرژی گرمایی و دمای بسیار بالای آن سبب ذوب، جدا سازی و برش در آن ناحیه می شود. در برش مواد نازک، برش لیزری سرعت بیشتری دارد با این حال برای برش مواد با ضخامت زیاد، CNC می تواند کاربردی تر باشد. به دلیل امکان متمرکز کردن باریکه نور به مقدار بسیار کوچک، ضخامت برش در لیزر در حد صدم میلیمتر است اما درCNC ابعاد ظریف ترین مته ها با استحکام کافی، در کوچکترین حالت به ۱ میلی متر می رسد. تهیه تجهیزات CNC مقرون به صرفه تر از دستگاه های لیزری است اما به دلیل اینکه برش با لیزر یک فرآیند غیر تماسی است به مرور کند نمی‌شود و این در طول سالیان هزینه نگهداری را در مقایسه با ابزارهای مکانیکی CNC کاهش می دهد [۱۰]. از مزایای دیگر روش برش لیزری می-توان به عدم کشیده شدن پارچه و جلوگیری از برش نادرست، تمیز بودن لبه‌های برش، به حداقل رساندن هدررفت، امکان برش طرح های هندسی پیچیده و ظریف با دقت بالا به صورت تکرار پذیر اشاره کرد [۱۱]. در این مقاله پس از معرفی پارامترهای موثر بر برش لیزری منسوجات، نتایج آزمایش تجربی برش پارچه فاستونی با لیزرکربن دی اکسید ($CO_2$) ارائه و تحلیل خواهد شد.

**۱-۱ عوامل موثر بر پردازش لیزری منسوجات**

عوامل موثر بر فرآیند پردازش لیزری را می توان در دو بخش اصلی دسته بندی کرد: ویژگی های وابسته به نوع ماده و ویژگی های وابسته به منبع لیزر و فرآیند فناوری. در این بخش به بررسی این ویژگی ها پرداخته می شود.

**۱-۱-۱ ویژگی های نوری ماده**

مواد حوزه نساجی پلیمرهایی هستند که منشا آلی دارند و سطح آنها با سطح مواد جامدی مثل فلزات کاملا متفاوت است. ساختار و چگالی این مواد بستگی به نوع درهمتنیدگی نخ هایشان دارد. از جمله مشخصاتی که برای پردازش لیزری پارچه ها باید مورد توجه قرار بگیرد خواص نوری آنهاست. خصوصیات نوری پارچه‌ها تا حد زیادی با خواص نوری الیاف و نخ هایی که از آن ساخته شده‌اند تعیین می‌شود اما عوامل دیگری مانند میزان ناهمواری سطح پارچه، ساختار، تراکم و ضخامت نیز تاثیر بسزایی دارند [۱۲]. تراکم بافت پارچه ارتباط مستقیمی با پر بودن پارچه دارد و تخلخل آن را تعیین می کند. بافت های فشرده تر تخلخل را کاهش داده و حجم هوای بین نخ ها را کم میکند. خواص نوری پارچه به طرز قابل توجهی تحت تأثیر تخلخل آن است. هرچه الیاف صاف تر باشند، براق تر به نظر می‌رسند. این دسته شامل نخ‌های چند رشته‌ای مصنوعی است. درخشندگی، نتیجه نور سفید زیادی است که به طور یکنواخت از سطح صاف الیاف منعکس می-شود. الیاف پنبه و پشم معمولاً مات و کدر هستند. آنها سطح زبرتری نسبت به الیاف مصنوعی چند رشته‌ای دارند و بنابراین نور را به صورت پراکنده منعکس می‌کنند[۱۳]. لازم به ذکر است که باید به قدرت پارگی یا حداکثر نیرویی که پارچه ممکن است قبل از شکافته شدن تحمل کند نیز توجه داشت. لیزر ممکن است بخشی از الیاف و یا نخ ها را از بین ببرد و این باعث کاهش استحکام پارچه در هنگام پوشیدن لباس شود. ویژگی‌های نوری بسیار مهم برای پردازش مواد نساجی مختلف با لیزر عبارتند از: بازتاب (R)، جذب (A) و عبور ($\delta$). ارتباط بین این ویژگی ها به صورت زیر است:

$$I_0 = I_R + I_A + I_\delta \qquad (۱)$$

$$1 = R + A + \delta \qquad (۲)$$

در رابطه (۱) $I_0$ شدت پرتو نور فرودی روی سطح، $I_R$ شدت نور بازتاب شده، $I_A$ شدت نور جذب شده و $I_\delta$ شدت نوری عبوری است. با تقسیم طرفین رابطه (۱) به شدت فرودی $I_0$، رابطه (۲) به دست می آید. عواملی که بر میزان R، A و $\delta$ در مواد نساجی تأثیر می‌گذارند عبارتند از: میزان ناهمواری سطح تحت تابش، $\lambda$ طول موج لیزر، $q_s$ چگالی توان تابش لیزر، دمای سطح، زاویه تابش و قطبش نور[۱۴]. بازتاب R تابعی از طول موج لیزر است یعنی $R=R(\lambda)$. مقدار جذب A نیز به طول موج وابسته است. افزایش طول موج باعث کاهش جذب می‌شود که در ناحیه فرا بنفش و مرئی تقریبا خطی است. برای ناحیه فروسرخ، نتایج تجربی مقدار جذب با فرمول هاگن-روبنس مطابقت دارد[۱۵]:

$$A = \sqrt{\frac{4c}{\lambda\sigma} \times 10^5} \qquad (۳)$$

که c سرعت نور بر حسب m/s و $\sigma$ رسانایی الکتریکی بر حسب S/m (زیمنس بر متر) است. اکثر مواد نساجی رسانایی الکتریکی ضعیفی دارند، اما در سال‌های اخیر محصولات نساجی رسانا با روش‌های مختلف و ترکیب‌های متنوع در طیف وسیعی از کاربردها ایجاد شده‌اند[۱۶]. هر چه میزان

جذب مواد بیشتر باشد، توان کمتری برای تحقق فرآیند لیزری مورد نیاز است. پلیمرهای نساجی در مقایسه با فلزات، نور را بسیار متفاوت جذب می‌کنند [۱۷]. جذب در ناحیه مرئی (از نزدیک به فرابنفش تا نزدیک به فروسرخ) بسیار کم است لذا پلیمرهای بدون رنگ شفافند. لیزرهای YAG با طول موج نزدیک به ناحیه فروسرخ برای پلیمرها مناسب نیستند. با این حال، لیزرهای $CO_2$ و اگزایمر برای پلیمرها قابل استفاده هستند زیرا پلیمرها نور در این طول موج را به خوبی جذب می کنند. رایج‌ترین لیزر برای پردازش پلیمرها لیزر $CO_2$ با طول موج $\mu m$ ۱۰/۶۴= λ است، در حالی که لیزر اگزایمر (مثلا ArF با طول موج $\mu m$۰/۱۹۳ = λ ) تنها در صورتی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و نتایج رضایت‌بخشی داشته باشد که دارای توان فرودی بالا، فاصله کانونی کم و همچنین شعاع نقطه کانونی بسیار کوچک باشد [۱۸].

از ویژگی های نوری مهم که بر پردازش لیزری تأثیر می گذارد، $\beta$ ضریب جذب ماده است. جذب منجر به کاهش شدت نور درون ماده می شود. شدت پرتو لیزر $I$ در عمق $l$ از ماده با قانون بیر-لامبرت داده می شود [۱۹]:

$$I = I_0 e^{-\beta l} \qquad (۴)$$

که $I_0$ شدت اولیه تابش در سطح و $I$ شدت تابش پس از عبور از لایه ای از ماده با ضخامت $l$ است. در پردازش لیزری مواد ضخیم، لازم است نور به درون ماده نفوذ کرده و انرژی به لایه های زیرین هم برسد. اگر مقدار جذب زیاد باشد، ماده بخش عمده انرژی را در همان لایه های بالایی جذب می کند و مقدار انرژی عبوری و رسیده به لایه های زیرین کم و کم تر خواهد شد (به طوریکه ممکن است برای انجام شدن عملیات لیزری مورد نظر کافی نباشد). لذا نور فقط تا عمق مشخصی می تواند وارد ماده شود. عمق نفوذ نور طبق تعریف برابر است با فاصله ای درون ماده از سطح، که شدت نور در آنجا به $\frac{1}{e}$ شدت نور تابیده به سطح می رسد. مطابق فرمول (۴)، این فاصله همان عکس ضریب جذب است. وابستگی ضریب جذب $\beta$ (با واحد $cm^{-1}$) به مشخصه های ماده به صورت زیر می-باشد:

$$\beta = \frac{4\pi k n}{\lambda} \qquad (۵)$$

در این رابطه λ طول موج، $n$ ضریب شکست و $k$ ضریب خاموشی ماده است. همچنین مقدار عبور δ در اغلب پارچه ها به دلیل ضخامت کم و تراکم پایین نباید نادیده گرفته شود. در مورد الیاف اطلاعاتی به طور جداگانه وجود دارد اما در مورد خواص نوری پارچه ها به طور کلی، اطلاعاتی در مقالات موجود نیست.

**۱-۱-۲ ویژگی های حرارتی ماده**

در طول فرآیند پردازش لیزری، حرارت ایجاد شده در اثر جذب نور باعث تغییراتی در ساختار میکرو و ماکروی ماده می شود. بنابراین مهم است که مشخصات گرمایشی ماده مانند ضریب رسانش گرمایی (k)، ظرفیت گرمایی ویژه (C) و

ضریب پخش حرارت ($\alpha$) در نظر گرفته شود. منسوجات مصنوعی به دلیل ترموپلاستیک بودن، هم برای علامت گذاری و حکاکی و هم برای برش، به خوبی توسط لیزر پردازش می-شوند اما پارچه‌های ارگانیک مانند پنبه، پشم و کتان در اثر حرارت پرتو لیزر ذوب نمی‌شوند [۱۷و۲۰]. زمانی که سطح پارچه ها با لیزر پردازش می‌شود، انتقال حرارت از لایه بالایی با دمای بیشتر به لایه زیری با دمای پایین تر اتفاق می افتد. این امر رسانش گرمایی نام دارد و شارش گرما تا زمانی که دمای لایه ها یکسان شود ادامه خواهد داشت. وابستگی دمایی k برای بهینه‌سازی فرآیندهای پردازش لیزری از طریق مدل‌های فیزیکی و ریاضی بسیار مهم است. در مطالعات تجربی مشخص شده است که با افزایش دما، ضریب رسانش گرمایی کاهش می یابد [۱۵]. از آنجا که الیاف ناهمسانگرد هستند، ضرایب رسانش گرمایی نیز ناهمسانگرد هستند، به طوریکه مقادیر طولی (در امتداد لیف) چندین مرتبه بزرگتر از مقادیر اندازه گیری شده در جهت عرضی (عمود بر امتداد لیف) می‌باشد. به طور معمول، در مقالات تمایل بر استفاده از مقادیر عرضی است. همچنین رسانش گرمایی می‌تواند تحت تأثیر جهت گیری مولکولی نیز قرار بگیرد[۲۱]. ظرفیت گرمایی ویژه (C) یک ثابت ماده است که مقدار گرمای جذب شده یا داده شده توسط یک کیلوگرم ماده را برای تغییر دمای آن به میزان ۱ کلوین تعیین می‌کند. ضریب پخش حرارت ($\alpha$) نیز نشان می‌دهد که دمای یک لایه از ماده با چه سرعتی یکنواخت (هم مقدار) می‌شود. ضریب پخش حرارت با معادله زیر، ضریب رسانش گرمایی (k)، ظرفیت گرمایی ویژه-در فشار ثابت- (C) و چگالی ماده ($\rho$) را به هم مربوط می‌کند [۲۲]:

$$\alpha = \frac{k}{\rho\, c} \qquad (۶)$$

ضریب رسانش گرمایی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب پخش حرارت برای مواد نساجی با بیشترین کاربرد، در جدول ۱ آورده شده است.

**جدول ۱. ویژگی های حرارتی الیاف پنبه، پشم و پلی استر**

| نوع ماده | ضریب رسانش گرمایی k * [24] $Wm^{-1}K^{-1}$ | ظرفیت گرمایی ویژه C [23] $kJ\ kg^{-1}K^{-1}$ | ضریب پخش حرارت $\alpha$ ($10^{-6}$) [23] $m^2 s^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| پنبه | 0.243 | 1.344 | 0.155 |
| پشم | 0.165 | 1.26 | 0.143 |
| پلی استر | 0.157 | 0.840 | 0.172 |

* ضریب رسانش گرمایی عرضی

**۱-۱-۳ منبع لیزر**

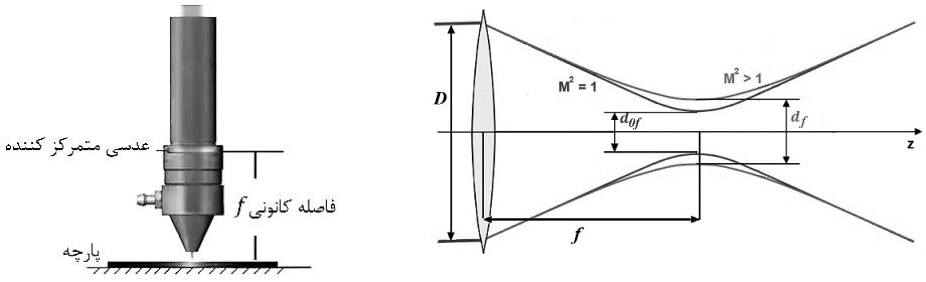
به طور کلی انجام عملیات لیزری بر روی پلیمرهای نساجی نسبت به پردازش فلزات، به انرژی پالس و چگالی توان کمتری نیاز دارد. طیف گسترده‌ای از منابع لیزر و سیستم های فناوری لیزری با ویژگی‌ها و کاربردهای متفاوت در بازار موجود است و می‌توان در هر مورد لیزر با کیفیت پرتو و طول موجی را

انتخاب کرد که به بهترین وجه توسط ماده مورد نظر جذب شود. ویژگی اصلی هر لیزر، λ طول موج آن است که توانایی متمرکز شدن پرتو لیزر را تعیین می‌کند. میزان جذب و بازتاب برای مواد مختلف به طول موج بستگی دارد. ضریب جذب و عمق نفوذ نیز به λ وابسته هستند.

برای بالا بردن چگالی توان روی ماده، پرتو لیزر باید توسط اپتیک مناسب (عدسی‌ها یا آینه‌ها) بر روی سطح مورد نظر در نقطه‌ای روی سطح، متمرکز (کانونی) شود. به علت وجود حد پراش، قطر باریکه نور را نمی توان به هر مقدار دلخواهی کوچک کرد. $d_f$ کمترین قطر لکه نور لیزر روی سطح ماده پس از متمرکز شدن، از رابطه زیر به دست می آید [۲۵]:

$$d_f = M^2 \frac{4\lambda f}{\pi D} \qquad (۷)$$

در این رابطه $D$ قطر باریکه لیزر قبل از کانونی شدن، $f$ فاصله کانونی عدسی و $M^2$ ضریب کیفیت باریکه است. هر چه $M^2$ به ۱ نزدیکتر باشد، کیفیت پرتو لیزر بهتر است و نشان از نزدیکتر بودن توزیع عرضی شدت نور باریکه به توزیع گاوسی دارد. شمایی از کانونی کردن نور لیزر روی پارچه و پارامترهای مربوط به آن در شکل ۱ نشان داده شده است. کوچکترین قطر ممکن باریکه کانونی، متعلق به توزیع شدت گاوسی با ضریب کیفیت $M^2 = ۱$ است و باریکه هایی با $M^2 > ۱$ همواره قطر کانونی بزرگتری خواهند داشت (به ترتیب $d_{0f}$ و $d_f$ در شکل ۱).




**شکل ۱- شمایی از لیزر و نور متمرکز شده بر روی پارچه. شکل سمت راست: پارامترهای مربوط به کانونی شدن نور**

توان متوسط لیزر$P$، برای کار با پارچه نباید زیاد باشد. بیشتر مواقع توان متوسطی بین ۱۰ تا ۵۰ وات کافی است. برخی از عملیات لیزری روی مواد نساجی، در حالت پالسی انجام می شود. پارامترهای مهم یک لیزر پالسی عبارتند از: توان قله پالس $P_p$، انرژی پالس $E_p$، مدت زمان پالس $\tau$ و فرکانس پالس ها $\nu$. وابستگی این پارامترها به هم در رابطه های (۸) تا (۱۰) ارائه شده است:

$$P_p = \frac{P}{\tau \nu} \quad (kW) \qquad (۸)$$

$$E_p = P_p \tau = \frac{P}{\nu} \quad (J) \qquad (۹)$$

$$q_s = \frac{P}{S} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (Wm^{-2}) \qquad (۱۰)$$

$S$ مساحت لکه لیزر روی سطح پارچه است که از روی $d$ قطر لکه تعیین می‌شود [۲۶].

همانطور که از رابطه (۱۰) دیده می شود چگالی توان سطحی ($q_s$) به طور مستقیم به توان متوسط منبع لیزر (P) وابسته است و با مساحت لکه لیزر نسبت معکوس دارد. میانگین توان و در نتیجه چگالی توان هر منبع لیزر در مشخصات فنی سازنده تعریف شده است و ممکن است تغییر نکند. بنابراین، بهینه سازی این پارامتر به اندازه دایره تشکیل شده توسط پرتو لیزر به نام نقطه کانونی بستگی دارد. تغییر در قطر نقطه کانونی باعث تغییر در چگالی سطح توان می‌شود. با یک توان متوسط ثابت هر چه پرتو در ناحیه کوچکتری متمرکز شود، $q_s$ مقدار بیشتری خواهد داشت. حداقل شعاع نقطه کانونی $r_f = \frac{d_f}{2}$ است. مشخصات برخی لیزرهای رایج در پردازش مواد آلی، در جدول ۲ آورده شده است.

سرعت حرکت باریکه لیزر روی پارچه نیز عامل تعیین کننده-ای در کیفیت پردازش است. در هر فرایند جداگانه، سرعت لیزر برای مواد مشابه متفاوت است. به عنوان مثال، سرعت علامت گذاری بیشتر از سرعت برش در همان ماده نساجی است. زمانی که سرعت بیشتر باشد، زمان برخورد پرتو لیزر کوتاهتر و انرژی جذب شده توسط ماده در ناحیه فرود کمتر است و بالعکس. از سوی دیگر، زمانی که سرعت پرتو لیزر بیشتر باشد، فناوری کارآمدتر است.

**جدول ۲. مشخصه های چند لیزر رایج در پردازش مواد آلی [۲۳]**

| پارامتر | نوع لیزر | | | |
|---|---|---|---|---|
| | CuBr | Excimer(ArF) | | |
| | Fiber(YAG) | $CO_2$ | | |
| طول موج $\lambda\ (\mu m)$ | 0.511- 0.578 | 0.193 | 1.064 | 10.64 |
| توان متوسط P (W) | 10 | 24 | 10-40 | 50 |
| توان پالس $P_p$ (kW) | 17-34 | 1700 | 5.32-17.8 | 10 |
| انرژی پالس $E_p$ (mJ) | 0.50-1.02 | 24 | 0.16-1.33 | 0.20 |
| مدت زمان پالس $\tau$(ns) | 30 | 14 | 30 -250 | 20 |
| فرکانس پالس ها $\upsilon(kHz)$ | 1-20 | 1 | 20-30 | 0.20-50 |
| قطر کوچکترین لکه کانونی $d_f$ (mm) | 0.03 | 0.2 | 0.15 | 0.15 |
| ضریب کیفیت پرتو $M^2$ | 1.7 | 2 | 1.1 | 1.5-2 |

با در نظر گرفتن سایر عوامل که بر فرآیند تأثیر می‌گذارند، باید سرعت بهینه پرتو لیزر برای مواد مربوطه تعیین شود. ارتباط بین سرعت حرکت پرتو (سرعت فرآیند) v و انرژی جذب شده $E$ با رابطه (۱۱) داده می شود. $t$ مدت زمان تابش تا رسیدن ماده به دمای دلخواه $T$ را می‌توان با رابطه (۱۲) محاسبه کرد [۲۷]:

$$v = \frac{2r\,A\,P}{E} \qquad (۱۱)$$

$$t = \frac{\pi^3\,k^2\,r^4\,(T-T_0)^2}{4\,\alpha\,A^2\,P^2} \qquad (۱۲)$$

در معادله (۱۲) A جذب، P توان متوسط پرتو لیزر، r شعاع نقطه کار، $k$ ضریب رسانش گرمایی، $T_0$ دمای محیط و $\alpha$ ضریب پخش حرارت است. اگر منسوجات با توان بالا و سرعت پایین پردازش شوند، آسیب بیشتری به الیاف وارد می شود. بهتر است عملیات با توان کمتر و سرعت بالاتر انجام شده و سپس در صورت نیاز این عمل چندین بار تکرار شود. در مبحث پردازش مواد با لیزر، رایج است که چگالی خطی انرژی LDE (Linear Density of Energy) بیان شود. این عدد (بر حسب $\frac{J}{mm}$) مطابق رابطه (۱۳) به جذب ماده پردازش شده (A)، توان میانگین منبع لیزر (P) و سرعت فرآیند (v) بستگی دارد. برای لیزرهای پالسی، چگالی خطی پالس LPD (Linear Pulse Density) با رابطه (۱۴) تعیین می شود و به فرکانس تکرار پالس (υ) و سرعت بستگی دارد. انرژی موثر فرآیند، $E_{eff}$، از رابطه (۱۵) قابل محاسبه است [۲۶]:

$$LDE = \frac{A\,P}{v} \qquad (۱۳)$$

$$LPD = \frac{\upsilon}{v} \qquad (۱۴)$$

$$E_{eff} = \frac{A\,P\,\upsilon}{v^2} \qquad (۱۵)$$

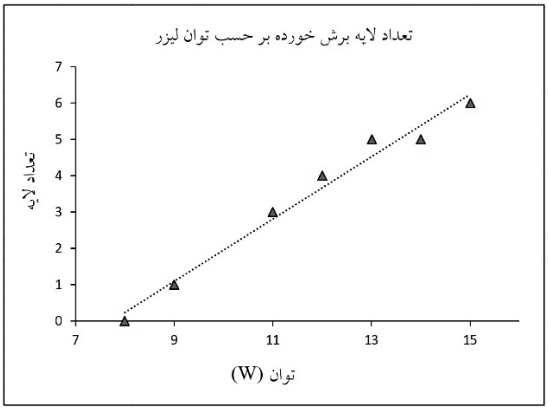
## ۲- تجربیات

### ۲-۱ روش آزمایش

در بخش تجربی تحقیق، برش پارچه فاستونی (۴۵٪ پشم و ۵۵٪ پلی استر) با لیزر $CO_2$ به طول موج ۱۰/۶۴ $\mu m$ در حالت پیوسته مورد آزمایش قرار گرفت. ضخامت هر لایه از پارچه ۰/۵ mm، تراکم تار و پود به ترتیب ۲۷ و ۲۲/۵ نخ در هر cm و وزن بر متر مربع پارچه ۳۵۵ گرم است. نیروی پارگی پارچه در راستای تار ۹۰۰ N و در راستای پود ۴۰۰ N، ازدیاد طول تا حد پارگی در راستای تار و پود به ترتیب ۱۵٪ و ۱۷٪ می باشد. یکنواختی بافت [۲۸] و درصد پشم [۲۹] بر روی خواص مکانیکی پارچه فاستونی تاثیرگذار است. ابتدا یک لایه از پارچه، تحت تابش با توان ۵ وات و اندازه قطر پرتو کانونی ۰/۱ mm قرار گرفت و باریکه لیزر با سرعت mm/s ۳۰ در امتداد مسیر مستقیم روی سطح حرکت داده شد. مشاهده شد که برش اتفاق نمی افتد. با افزایش توان تا مقدار آستانه ۸ وات، عدم برش ادامه یافت و پس از آن برش پارچه انجام شد. در مراحل مختلف آزمایش، با ثابت بودن یک پارامتر، اثر تغییر پارامترهای دیگر مورد بررسی قرار گرفت.

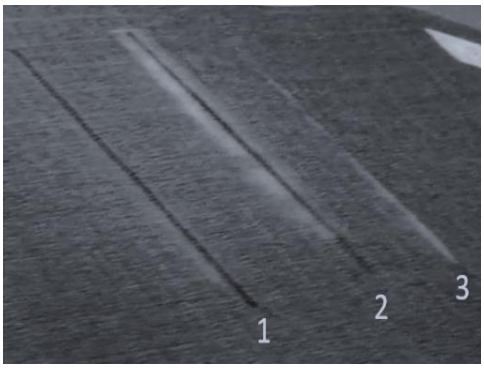
**۳- بحث و نتایج**

یکی از اهداف آزمایش، دستیابی به برش همزمان تعداد لایه های بیشتری از پارچه با لیزر است. برای این منظور، توان لیزر از ۸ وات که حد آستانه برای شروع برش بود به آهستگی افزایش داده شد و هر بار به تعداد لایه های پارچه اضافه گشت. مطابق شکل ۲، در توان های بالاتر با روندی تقریبا خطی به تعداد لایه های برش خورده افزوده شد. پس از برش لایه ۶ در توان ۱۵ وات، پارچه رویی شروع به سوختن کرد و آزمایش متوقف شد.



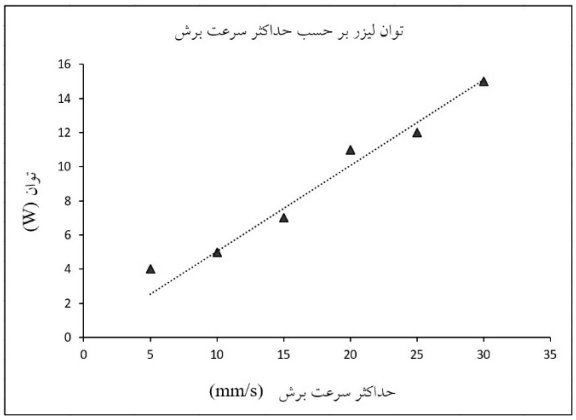

**شکل ۲- تعداد لایه برش خورده پارچه بر حسب توان لیزر با قطر پرتو کانونی ۰/۱ mm و سرعت برش ۳۰ mm/s.**

برای انجام برش، علاوه بر گذر از توان آستانه لازم، توان و سرعت حرکت باریکه روی پارچه باید طوری تنظیم شود که کیفیت لبه‌های برش انجام شده قابل قبول باشد. عدم تنظیم درست این پارامترها میتواند به رنگبری لبه های برش یا در توان های بالاتر به کربنیزه شدن (زرد شدن) لبه ها و نهایتا سوختن پارچه منجر شود. تصویری از سه پردازش انجام شده روی پارچه با توان و سرعت متفاوت که منجر به کیفیت های متفاوتی شده، در شکل ۳ نشان داده شده است.




**شکل ۳- خط شماره ۱: انجام برش با کیفیت قابل قبول. خط شماره ۲: انجام برش اما با رنگبری لبه ها. خط شماره ۳: عدم برش.**

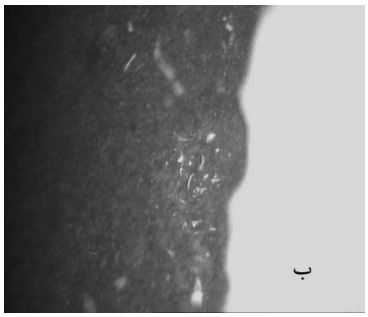
مطابق رابطه (۴) برای اینکه نور بتواند به لایه های زیری بیشتری نفوذ کرده و آنها را برش دهد لازم است شدت یا توان پرتو در لایه بالایی افزایش یابد. اگر سرعت برش (سرعت روبش پرتوی لیزر) کم باشد جذب طولانی مدت انرژی توسط ماده و گرمای حاصل از آن می تواند موجب سوختن پارچه شود. برای بررسی میزان توان مناسب لیزر و حداکثر سرعت برش ممکن به طوریکه برش به طور کامل انجام شود و در عین حال کیفیت لبه ها نیز مناسب باشد، با ثابت نگه داشتن قطر باریکه به اندازه ۰/۱ mm و تعداد لایه ها به اندازه ۶ لایه، با تغییر توان لیزر در گام های ۵ وات هر بار سرعت حرکت پرتو روی پارچه تغییر یافته و حداکثر سرعتی که برش مطلوب به ازای آن انجام می شد ثبت گردید. نتایج این مرحله از آزمایش در شکل ۴ آورده شده است.




**شکل ۴- توان لیزر بر حسب حداکثر سرعت ممکن برای برش مطلوب پارچه. اندازه قطر پرتو کانونی mm ۰/۱ و تعداد لایه هدف ۶ عدد.**

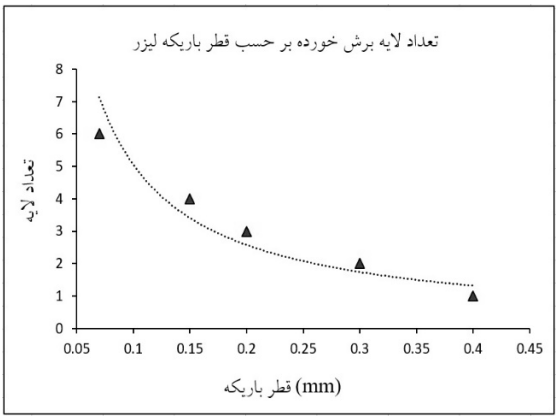
نمودار نشان می‌دهد که توان مناسب لیزر و حداکثر سرعت برش رابطه ای تقریبا خطی دارند. همانطور که دیده می شود بیشترین سرعت برش به ازای توان ۱۵ وات، مقدار mm/s ۳۰ است که به عنوان سرعت بهینه برای برش ۶ لایه در بخش های دیگر آزمایش در نظر گرفته شده است.

در شکل ۵ تصویر بزرگنمایی شده از لبه های پارچه برش خورده با لیزر، با برش آن به وسیله کاتر مقایسه شده است. از آنجا که برش لیزری یک فرآیند حرارتی است، لبه های پارچه در حین برش مقداری جمع شده و بدون ریش شدن، لبه ای نسبتا صاف و تمیز باقی می‌گذارد. چنانچه درصد الیاف مصنوعی پارچه بالا بوده و مدت تابش زیاد باشد، ذوب شدگی کناره لبه ها ممکن است به صورت جداره های سخت در بیاید که مطلوب نیست.




**شکل ۵- تصویر بزرگنمایی شده از الف: لبه پارچه در برش با کاتر. ب: لبه پارچه در برش لیزری.**

در بخش دیگری از آزمایش برای بررسی تاثیر اندازه باریکه لیزر روی تعداد لایه های برش، این بار با افزایش فاصله دهانه خروجی لیزر تا سطح پارچه، قطر باریکه نور روی پارچه به تدریج افزایش داده شد. همانطور که از رابطه (۱۰) انتظار می رود با افزایش قطر باریکه چگالی توان کم می شود. این بدان معناست که انرژی کمتری به واحد سطح پارچه می رسد و بنابراین عمق نفوذ نور و به تبع آن تعداد لایه برش خورده کاهش خواهد یافت. در این قسمت از آزمایش توان و سرعت برش به ترتیب در مقادیر ۱۵ وات و mm/s ۳۰ ثابت نگه داشته شده اند. شکل ۶ تغییرات تعداد لایه های برش خورده بر حسب قطر باریکه نور لیزر را نشان می دهد.




**شکل ۶- تعداد لایه برش خورده بر حسب قطر باریکه لیزر.**

**توان ۱۵ وات و سرعت برش ۳۰ mm/s.**

نمونه ای از فرآیند برش با تغییر توان لیزر روی پارچه فاستونی با ۲۰٪ پشم و ۸۰٪ پلی استر نیز انجام شد که تاثیر درصد ترکیبی الیاف پارچه در نتایج آزمایش را نشان می دهد. همانطور که در بخش ۲ گفته شد، خواص حرارتی ماده از عوامل تاثیرگذار بر برش لیزری است. حد بالای ضریب رسانش گرمایی موثر در پارچه ای متشکل از ترکیب دو لیف $x$ و y را می توان با رابطه:

$$k_{eff} = p_x k_x + (1 - p_x) k_y$$

تقریب زد. در این رابطه $k_x$ و $k_y$ به ترتیب رسانش گرمایی لیف $x$ و y، و $p_x$ نسبت مقدار لیف $x$ در کل پارچه است. رابطه مشابهی برای تقریب گرمای ویژه ترکیبی برقرار است[۳۰]. به این ترتیب برای پارچه فاستونی ۴۵٪ پشم و ۵۵٪ پلی استر

$k_{eff\,(45/55)} = ۱/۶۰ \text{Wm}^{-1}\,\text{K}^{-1}$

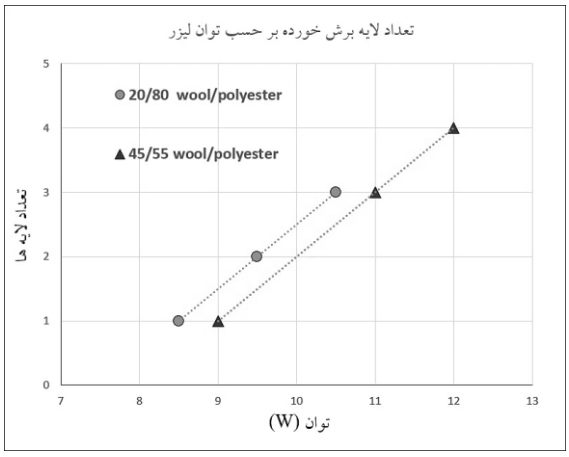
$C_{eff\,(45/55)} = ۱/۰۷\ \text{KJ kg}^{-1}\,\text{K}^{-1}$

همچنین برای پارچه فاستونی ۲۰٪ پشم و ۸۰٪ پلی استر

$k_{eff\,(20/80)} = ۱/۵۸ \text{Wm}^{-1}\,\text{K}^{-1}$

$C_{eff\,(20/80)} = ۰/۹۴ \text{KJ kg}^{-1}\,\text{K}^{-1}$

رسانش گرمایی دو پارچه تفاوت قابل توجهی با یکدیگر ندارند اما با توجه به ظرفیت گرمایی کمتر در فاستونی ۲۰-۸۰، انتظار میرود که شروع برش لیزر برای این پارچه با صرف توان کمتری ممکن باشد. نتایج آزمایش که تا سه لایه از پارچه ۲۰-۸۰ انجام شده با پیش‌بینی نظری همخوانی دارد (شکل ۷).




**شکل ۷- مقایسه تعداد لایه برش خورده پارچه بر حسب توان لیزر برای دو پارچه با ترکیب ۲۰٪ پشم -۸۰-٪ پلی استر و ۴۵٪ پشم- ۵۵٪ پلی استر. قطر پرتو کانونی ۰/۱ mm و سرعت برش ۳۰ mm/s.**

## ۴ - نتیجه گیری

عوامل مختلفی بر پردازش لیزری مواد نساجی موثر هستند. شناخت این عوامل و به کارگیری ترکیب صحیح از آن ها در

دستیابی به نتایج بهینه اهمیت زیادی دارد. پارچه های مصنوعی هم برای علامت گذاری و حکاکی، و هم برای برش و دوخت، به خوبی توسط لیزر پرداخت می شوند. الیاف طبیعی مانند پنبه، پشم و کتان، در اثر حرارت پرتو لیزر ذوب نمی شوند و استفاده از لیزر ممکن است منجر به کربنیزاسیون و تغییر رنگ نامطلوب شود. برای هر پارچه با جنس معین، توان لیزر، سرعت و اندازه باریکه نور روی سطح پارچه از مهمترین پارامترها برای کنترل فرآیند برش هستند. پس از بررسی دقیق روابط حاکم بر پارامترهای تاثیرگذار، پارچه فاستونی با ترکیب ۴۵٪ پشم و ۵۵٪ پلی استر تحت آزمایش برش با لیزر $CO_2$ پیوسته در طول موج $۱۰/۶۴\mu m$ (محدوده فروسرخ) قرار گرفت. در حالت کمینه قطر باریکه روی سطح، برش یک لایه از پارچه به ضخامت ۰/۵ mm به توانی بالاتر از ۸ وات نیاز دارد. با افزایش تعداد لایه های برش، کربنیزاسیون پارچه، توان و سرعت برش ممکن را محدود می کند. به طوریکه حداکثر ۶ لایه روی هم از پارچه را میتوان با توان ۱۵ وات و سرعت ۳۰ mm/s برش داد. استفاده از لیزرهایی با کیفیت باریکه بهتر و پمپاژ هوا به عنوان خنک کننده میتواند منجر به بهبود نتیجه شود[۳۱]. با این حال به نظر می رسد برای برش پارچه های پشمی در مقیاس انبوه، در حال حاضر هنوز برش با کاتر بازدهی بالاتری دارد. همچنین هنگامی که از پارچه با درصد پشم بیشتری استفاده شود، توان مورد نیاز برای برش افزایش می یابد که در انتخاب سرعت و اندازه باریکه کانونی مناسب تاثیرگذار خواهد بود. آزمایش برای لیزرهایی با طول موج متفاوت و یا در حالت پالسی قابل توسعه است. نتایج تحقیق می‌تواند مرجعی برای استفاده از لیزر در برش و طراحی پارچه ها در صنعت پوشاک باشد.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، مراتب تشکر خود را از کمک ها و همفکری های قبلی دکتر رضا نصوحی و مهندس رسول ترکش اصفهانی اعلام می نمایند.

## ۶- مراجع

[1] Kevorkian A., Textile materials sciences and tests. 1st edition, Technical University of Sofia, Bulgaria, 1977.

[2] Shterev Y., Dolchinkov N., Lilianova St. et al., Examining the possibility of marking and engraving of textile using $CO_2$ laser, Mach Technol Mater, 12(12), 491–493, 2018.

[3] Kan, C., Yuen, C., & Cheng, C., Technical study of the effect of CO2 laser surface engraving on the colour properties of denim fabric, Coloration Technology, 126, 365–371, 2010.

[4] Jones I., Hänsch D., Perelli L. et al., Automated Laser Welding for Textiles, Conference on internationales Forum für innovative Bekleidungstextilien, Avantex, Frankfurt, 2007.

[5] Kamel M., Raslan W. M., Helmy H. M. et al., Improving properties of polyester and cellulose

acetate fabrics using laser irradiation, J Text Sci Eng., 2, 1–6, 2012.

[6] Hung O., Chan C.K., Kan C.W. et al., Effect of the CO2 laser treatment on properties of 100% cotton knitted fabrics, Cellulose, 24, 1915–1925, 2017.

[7] Lerch T., Macgillivary M. and Domina T., 3D laser scanning: a model of multidisciplinary research, JTATM, 5, 1–22, 2007.

[8] Dolchinkov N. T., Lazov L., Shterev Ivanov J. et al., Use of $CO_2$ laser for marking and clearing of textile materials for manufacture of military equipment, Environment Technology Resources Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 3, 32, 2019.

[9] Belli, R., Miotello, A., Mosaner, P., & Toniutti, L., Laser cleaning of ancient textiles, Applied Surface Science, 247, 369–372, 2005.

[10] CNC vs Laser Cutter: Differences Explained, https://mellowpine.com/cnc/cnc-vs-laser-cutter/ (Last visited 7 February 2023).

[11] Vilumsone-Nemes I., Industrial cutting of textile materials, 2nd edition, Woodhead Publishing, Cambridge, USA, 2018.

[12] Zhang H., Hu T. and Zhang J., Transmittance of infrared radiation through fabric in the range 8–14 μm., Text Res J, 80(15), 1516–1521, 2016.

[13] Wisniowski M., Optical properties of fiber materials, http://artquill.blogspot.com/2013/03/optical-properties-of-fibermaterials-1.html (Last visited 13 January 2023).

[14] Nayak, R., R.Padhye, The use of laser in garment manufacturing: an overview, Fash Text, 3, 2016.

[15] Angelov N., Optimization of the process of laser marking of samples of tool steel., PhD Thesis, Technical University of Gabrovo, Bulgaria, 2011.

[16] Šafářová V., Grégr J., Electrical conductivity measurement of fibers and yarns, 7th International Conference– TEXSCI, Liberec, Czech Republic, 2010.

[17] Esterves F., Alonso H., Effect of CO2 laser radiation on surface properties of synthethic fibres, Research Journal of Textile and Apparel, 11, 2, 2007.

[18] Tsai, H-Y., Yang, C-C., Hsiao, W-T. et al., Analysis of fabric materials cut using ultraviolet laser ablation, Appl. Phys. A, 122, 304, 2016.

[19] Bisht P.B., An Introduction to Photonics and Laser Physics with Applications, IOP Publishing, Bristol, UK, 2022.

[20] Ferrero F, Testore F and Tonin C. Surface degradation of linen textiles induced by laser treatment: comparison with electron beam and heat source, AUTEX Res J, 2(3), 109–114, 2002.

[21] S. M. Burkinshaw, Physico-chemical Aspects of Textile Coloration, 1th ed., Chapter 1, Wiley, United Kingdom, 2016.

[22] Weidenfellerr B., Höfer M. and Schillin F., Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle filled polypropylene, Compos Appl Sci Manuf, 35(4), 423–429, 2004.

[23] Angelova YP. Investigation the laser marking of industrial materials. PhD Thesis, Technical University of Gabrovo, Bulgaria, 2017.

[24] Hearle J. W.S., Morton W. E., Physical properties of textile fibres, fourth edition, Woodhead Publisher, Cambridge, England 2008.

[25] Saleh Bahaa E. A., Teich M. C., Fundamentals of Photonics, 3rd edition, Wiley, United Kingdom, 2019.

[26] Yilbas B. S., The Laser Cutting Process; Analysis and Applications, 1st edition, Elsevier, 2018.

[27] Lazov L., Angelov N., Influence of some factors on the process of laser marking of articles of metals and alloys, Conference of MBC Unitech, Technical University of Gabrovo, Bulgaria, 2011.

[۲۸] عبقری ر.، بررسی ارتباط شاخصهای نایکنواختی طولی و ضریب نرخ تغییرات جرمی با آزمایشهای سایرو فست پارچه های فاستونی، علوم و فناوری نساجی و پوشاک، ۸، ۲۷-۱۵، ۱۳۹۸.

[۲۹] نمیرانیان ب.، مدرسی و.، بررسی تاثیر خصوصیات مکانیکی بر رفتار قالب پذیری پارچه فاستونی، علوم و فناوری نساجی و پوشاک، ۲، ۱۴-۹، ۱۳۹۰.

[30] Militký J. and Křemenáková D., Thermal conductivity of wool/pet weaves, 16th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Pretoria, South Africa, 2008.

[۳۱] جعفریان دهکردی ا.، بهبود برش چند لایه پارچه فاستونی با فایبر لیزر در قیاس با لیزر $CO_2$. پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، ۱۳۹۷.