



## اسناد تاریخی کاغذی<sup>۱</sup>

وادیم پارفنوف<sup>۲</sup>، الکساندر گالوشکین<sup>۳</sup>، تاتیانا تکاچنکو<sup>۴</sup>، ولادیمیر آسف<sup>۵</sup>  
ترجمہ: سیدہ سمیہ محسنیان<sup>۶</sup>

تمیزکاری بالیزر،  
کاغذ، کتاب‌ها، اسناد  
آلودگی‌ها، مرمت،  
میراث فرهنگی

vapardenov@etu.ru

### ۳. شاخه سنت پترزبورگ

آرشیو آکادمی علوم روسیه،

سنت یتر زیورگ، روسیه

lkrd@rambler.ru

۴. شاخه سنت بتدویر

آرشیو آکادمی علوم روسیه،

سنة ١٩٨٨م

restlaser@gmail.com

[illegible]

دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران مرکزی

دانشگاه ملی تحقیقاتی

سنت پترزبورگ، روسیه

aseev@oi.ifmo.ru

۶. استادیار، پژوهشکده اسناد،

سازمان اسناد و کتابخانه ملی،

تهران، ایران

هدف این پژوهش، بررسی روش تمیزکاری کاغذهای تاریخی با استفاده از فناوری لیزر است. در این مطالعه، تأثیر تابش لیزر بر بازتاب نوری کاغذ، مقاومت در برابر شکست و میزان اسیدیته مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، زبری سطح کاغذ پیش و پس از تیمار لیزری (تمیزکاری) با بهره‌گیری از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی تحلیل شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد به‌کارگیری ترکیبی از روش «ریزماشین کاری لیزری چندپالس» با اسکن پرسرعت پرتوهای لیزر، می‌تواند ایمنی بالایی در فرایند تمیزکاری کاغذ فراهم کند. براساس یافته‌ها، پارامترهای مناسب تابش لیزر برای دستیابی به تمیزکاری مؤثر و ایمن شامل چگالی توان در حدود  $5 \times 10$  وات بر سانتی‌متر مربع، طول موج  $600 \pm 10$  نانومتر و نرخ تکرار پالس  $20$  کیلوهرتز است. همچنین سرعت اسکن پرتو لیزر در بازه  $200$  تا  $500$  میلی‌متر بر ثانیه قرار دارد. در پایان، روش تمیزکاری انتخابی با لیزر به‌عنوان رویکردی مناسب برای حفاظت و مرمت کتاب‌ها و اسناد تاریخی پیشنهاد می‌شود. این نوع تمیزکاری انتخابی از طریق کنترل دقیق مسیر حرکت پرتوهای لیزر امکان‌پذیر است.

استناد: پارفنوف، وی؛ گالوشکین، ا.؛ تکاچنکو، ت. و آسف، وی. (۱۴۰۴). تمیزکاری با لیزر، رویکردی نوین برای حفاظت از کتاب‌ها و اسناد تاریخی کاغذی. (سیده سمیه محسنیان، مترجم). *آرشیو ملی*، (۸) (۲)، ۱۱۵-۱۳۲.

## ۱. مقدمه

استفاده از فناوری لیزر در حوزه حفاظت از میراث فرهنگی، یک حوزه علمی و فنی نوظهور، اما به سرعت در حال توسعه است. لیزرها معمولاً برای تعیین ترکیب شیمیایی، تشخیص ساختاری و مستندسازی آثار هنری به کار می‌روند. این کاربردها بر پایه روش‌های «طیف‌سنجی لیزری»<sup>۱</sup>، تداخل‌سنجی<sup>۲</sup>، هولوگرافی<sup>۳</sup> و «اسکن سه‌بعدی»<sup>۴</sup> هستند (Fotakis, 2007; Cooper, 1998; Markov and Mironyuk, 1991; Anglos and ov, 1991). در حوزه مرمت، از فناوری تمیزکاری لیزری استفاده می‌شود. در تمیزکاری لیزری امکان حذف لایه‌های طبیعی و آلودگی‌ها از سطح اشیای میراث فرهنگی فراهم می‌شود. با این حال، با وجود اینکه لیزرها تقریباً پنجاه سال پیش برای اولین بار در مرمت به کار گرفته شدند، تا به امروز تنها فناوری پاکسازی سنگ توسعه یافته است.

کاربرد لیزر در مرمت سایر مواد، به‌ویژه مواد آلی، همچنان در مرحله تحقیقات قرار دارد (Markov and Mironyuk, 1991; Friberg et al. 1997; Kolar et al. 2000; Kolar et al. 2003; Pilch et al. 2005; Kautek and Pentzien, 2005; Strlic et al. 2005; Bilmes and Freisztaf and Cap, 2008; Arif and Kautek, 2015; Brandt et al. 2009; Ciofini et al. 2013; Zekou et al. 2017; Rosati et al. 2014; Balakhnina et al. 2018; Parfenov and Titov, 2019; Atanassova et al. 2019; Abdel-Mak-souda and Emamb and Ragab. 2020). دلیل اصلی این امر آن است که در فرایند تیمار لیزری، احتمال بروز آسیب‌های فیزیکی یا شیمیایی در سطح این مواد وجود دارد؛ آسیبی که براساس اصول بنیادین مرمت، امری غیرقابل قبول تلقی می‌شود.

این مقاله به توسعه فناوری تمیزکاری کتاب‌ها و اسناد کاغذی اختصاص دارد. تمیز کردن صفحات کاغذی از آلودگی‌ها یک فرایند ضروری و بسیار زمان‌بر در مرمت کتاب‌ها و اسناد محسوب می‌شود. از جمله آلودگی‌های رایج قابل مشاهده بر سطح کاغذ می‌توان به لکه‌های مومی، دوده و گردوغبار، لکه‌های زیستی، و نیز آلاینده‌هایی نظیر «خاکسترهای بادی»<sup>۵</sup> اشاره کرد که حذف آن‌ها برای حفظ خوانایی و پایداری اثر ضروری است.

با این حال، روش‌های سنتی تمیزکاری در مرمت همواره نتایج رضایت‌بخشی به همراه ندارند. به عنوان نمونه، تمیزکاری مکانیکی که مبتنی بر استفاده از پاک‌کن، ذرات لاستیکی یا کاغذ سنباده با دانه‌بندی ریز است، می‌تواند منجر به اختلال در یکتواختی سطح کاغذ و کاهش ضخامت صفحات شود؛ امری که در نهایت اثر نامطلوبی بر استحکام مکانیکی کاغذ برجای می‌گذارد. افزون بر این، بخشی از آلودگی‌های جدا شده به صورت ذرات گردوغبار در لایه‌های سطحی کاغذ آسیب‌دیده باقی می‌ماند. همچنین در بسیاری از موارد، وضعیت فیزیکی نامناسب کتاب‌ها، به‌ویژه فرسودگی و شکنندگی گوشه‌های پایینی صفحات، عملاً استفاده از روش‌های تمیزکاری مکانیکی را با محدودیت جدی یا عدم امکان مواجه می‌سازد.

البته گاهی از روش شستشو با آب و یا استفاده از مواد شیمیایی با حلال‌های آلی و آنزیم‌ها به عنوان جایگزینی برای تمیزکاری مکانیکی استفاده می‌شود. اگرچه این روش‌ها ممکن است مؤثر

1. laser spectroscopy
2. Interferometry
3. Holography
4. 3D scanning
5. Fly ash

باشند، اما نمی‌توان از آن‌ها برای تمیزکاری آثار کاغذی دست‌نویس و کتاب‌هایی که دارای جوهر چاپی ناپایدار هستند، استفاده کرد.

به همین دلیل، یافتن روش‌های جایگزین برای تمیزکاری کتاب‌ها و اسناد در حال حاضر از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از رویکردهای ممکن برای حل این مشکل، استفاده از فناوری تمیزکاری با لیزر است. نخستین پژوهش‌های تجربی در مورد استفاده از لیزر برای این منظور در اواخر دهه ۱۹۹۰ انجام شد (Friberg et al. 1997; Kolar et al. 2000). در حال حاضر نیز تحقیق در این حوزه توسط چند گروه علمی در اروپا ادامه دارد (Kautek and Pentzien, 2005; Strlic et al.). (Arif and Kautek, 2015; Brandt et al. 2009; Ciofini et al. 2013; Zekou et al. 2017; Rosati et al. 2014; Balakhnina et al. 2018; Parfenov and Titov, 2019; Atanassova et al. 2019). این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که امکان استفاده از لیزر برای تمیزکاری وجود دارد، اما این روش هنوز به‌طور گسترده مورد استفاده قرار نگرفته است. برای تحقق این امر، توسعه فناوری‌های مناسب و سیستم‌های لیزری تخصصی که برای طیف گسترده‌ای از آلودگی‌ها قابل استفاده باشند، ضروری است. بنابراین، هدف از این تحقیق، توسعه یک روش برای تمیزکاری لیزری کتاب‌ها و اسناد کاغذی است.

## ۲. آزمایش‌ها

در این پژوهش، نمونه‌های کاغذی با ترکیبات شیمیایی متفاوت، به همراه نمونه‌هایی از اسناد و کتاب‌های تاریخی متعلق به قرون شانزدهم تا نوزدهم میلادی، مورد آزمون قرار گرفتند (جدول ۱).

جدول ۱. فهرست نمونه‌های مورد مطالعه

| نمونه کاغذهای مرجع (الگو)                   |                                                                                      |           |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| کد نمونه‌های مرجع (الگو)                    | ترکیبات کاغذ                                                                         | تاریخ     |
| B-2                                         | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ سلولز سولفات                                                  | قرن بیستم |
| B-5                                         | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ سلولز سولفات، با پرکننده کائولن و محتوای خاکستر ۵٫۲٪          | قرن بیستم |
| B-6                                         | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ خمیر نیمه متراکم الیاف کتان                                   | قرن بیستم |
| B-19                                        | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ سلولز سولفات، با پرکننده کائولن و محتوای خاکستر ۴٫۶٪          | قرن بیستم |
| B-25                                        | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ خمیر نیمه متراکم پنبه، با پرکننده کائولن و محتوای خاکستر ۹٫۳٪ | قرن بیستم |
| کاغذ ساخته شده از پارچه (کتان، پنبه یا کنف) | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ الیاف کتان، با آهاردهی نشاسته                                 | قرن بیستم |

| کاغذ تاریخی          |                  |
|----------------------|------------------|
| کتاب تایپوگرافی روسی | اوایل قرن نوزدهم |
| کتاب خطی روسی        | قرن هفدهم        |
| کتاب خطی عربی        | اواخر قرن نوزدهم |
| کتاب خطی عربی        | قرون وسطی        |

برای تمیزکاری کاغذ از یک «لیزر فیبر نوری پالسی ایتريوم» ۱ با طول موج ۶ / ۰ ۱ میکرومتر استفاده شد. برای همه نمونه‌های کاغذ، طیف بازتاب اندازه‌گیری شد و میزان سفیدی، اسیدیته و مقاومت در برابر شکست آن‌ها تعیین گردید. این اندازه‌گیری‌ها در دو مرحله پیش و پس از تمیزکاری لیزری انجام شد. طیف بازتاب با استفاده از «طیف‌سنج LAMBDA ۹۰۰» در بازه طول موج ۳۰۰ تا ۲۵۰ نانومتر با گام اسکن ۱ نانومتر اندازه‌گیری شد. میزان سفیدی کاغذ با استفاده از فوتومتر مدل FMSH-56 M تعیین شد. همچنین برای بررسی ویژگی‌های سطحی کاغذ از «میکروسکوپ الکترونی روبشی JSM-35» استفاده شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. انتخاب نوع لیزر برای تمیزکاری کاغذ

تمیزکاری لیزری کاغذ براساس اثرات فیزیکی، به‌ویژه فوتوآبیلیشن، انجام می‌شود. فوتوآبیلیشن فرایندی است که در آن فوتون‌ها انرژی خود را به ذرات آلاینده منتقل کرده و موجب پرتاب و حذف این ذرات از سطح ماده می‌شوند. درواقع، جذب انرژی فوتون توسط مواد آلوده‌کننده، حذف انتخابی آلودگی‌ها را در طول فرایند تمیزکاری امکان‌پذیر می‌سازد. ایده استفاده از تابش لیزر برای حذف انتخابی آلودگی ناخواسته از سطح یک ماده دیگر که به‌صورت نوری جاذب است، برای نخستین بار در سال ۱۹۶۵ توسط آرتور شالو، یکی از مخترعان لیزر، مطرح شد. او موفق شد با استفاده از لیزر، رنگ‌دانه‌های مشکی جاذب جوهر چاپ را از روی ورق سفید با بازتاب بالا تبخیر کند (Schawlow, 1965). در ادامه، در سال ۱۹۷۲، جان آسموس برای نخستین بار تمیزکاری لیزری اشیای میراث فرهنگی را شرح داد (Lazzarini and Asmus and Marchesini, 1972). امروزه، اصول فیزیکی اساسی مربوط به تمیزکاری لیزری به‌خوبی شناخته شده و در منابع علمی به‌صورت مفصل توصیف شده است (برای مثال، به منابع 2002; Luk'yanchuk; 1998; Cooper, 2006; Kovalenko). نخستین گام در توسعه فناوری لیزر برای مرمت کاغذ، انتخاب پارامترهای مناسب تابش لیزر است که امکان تمیزکاری مؤثر و ایمن کتاب‌ها و اسناد را فراهم کند. بااین‌حال، پارامترهای خروجی

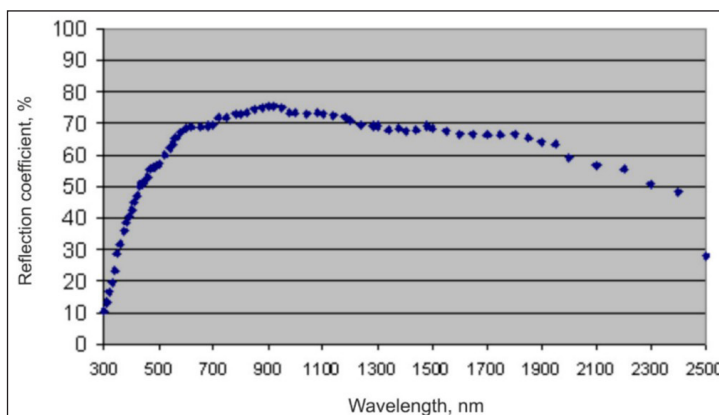
لیزر نباید موجب بروز اثرات منفی مانند کربنیزه شدن، تغییر رنگ، تغییر pH، تغییر تخلخل یا سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کاغذ شوند. در هنگام انتخاب نوع لیزر و مشخصات خروجی آن، باید در نظر داشت که کاغذ ماده‌ای بسیار شکننده و آسیب‌پذیر است. ساختار آن متخلخل بوده و شبکه‌ای از الیاف سلولزی به هم پیوسته را تشکیل می‌دهد. این الیاف در برابر حرارت، تنش‌های مکانیکی و مواد شیمیایی به راحتی آسیب می‌بینند.

مطالعات علمی نشان داده که انواع مختلفی از لیزرها برای تمیزکاری کاغذ مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از جمله:

الف) لیزرهای اکسایمر، به‌ویژه لیزر XeCl با طول موج  $3 \times 8$  نانومتر و لیزر KrF با طول موج  $248$  نانومتر؛

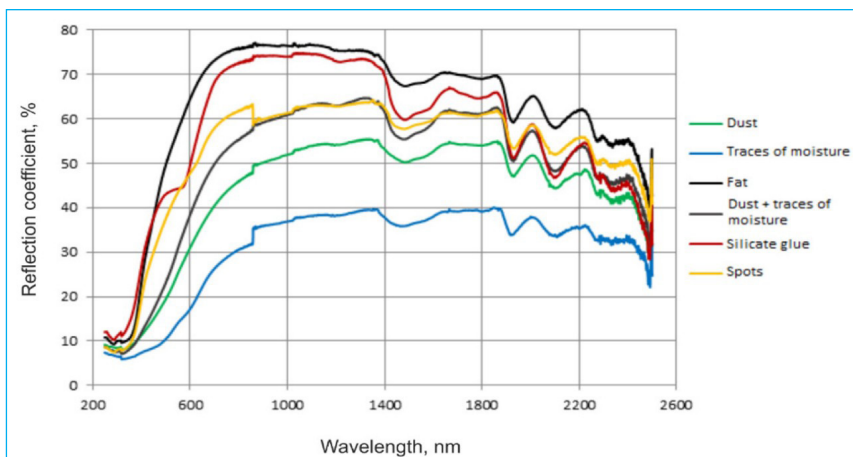
ب) لیزرهای حالت جامد Nd:YAG که می‌توانند در طول موج اصلی خود یا در طول موج‌های دوم، سوم و چهارم هماهنگ عمل کنند؛ به‌ترتیب با طول موج‌های  $1064$  نانومتر،  $532$  نانومتر،  $355$  نانومتر و  $266$  نانومتر [۲، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳].

در همه این مطالعات، از تابش لیزر پالسی استفاده شده است. به‌ویژه در هنگام کار با لیزر Nd:YAG، معمولاً از حالت Q-switched با مدت زمان پالس  $10$  تا  $30$  نانوثانیه بهره گرفته می‌شود. همچنین، فرکانس تکرار پالس‌ها معمولاً در بازه  $100$  تا  $1000$  هرتز و در شرایط حداکثری تا  $1$  کیلوهرتز تنظیم می‌گردد. برای انتخاب طول موج لیزر مناسب جهت تمیزکاری مؤثر و ایمن کتاب‌ها و اسناد، ویژگی‌های طیفی کاغذ در مرحله اولیه کار اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری طیف بازتاب، اطلاعاتی درباره باندهای طیفی که کاغذ بیشترین جذب نور را در آن‌ها دارد فراهم می‌کند. از آنجاکه کاغذ یک محیط پراکنده‌کننده نور است، برای سنجش نور از «گروه نورسنجی» استفاده شد. نتایج این اندازه‌گیری‌ها در شکل ۱ ارائه شده است.



■ شکل ۱. ضریب بازتاب کاغذ در برابر طول موج تابش لیزر (نمونه‌ای از صفحه یک کتاب چاپی روسی مربوط به اوایل قرن نوزدهم، ساخته شده از خمیر چوب)

پس از آن، بازتاب صفحات کاغذی مربوط به کتاب‌ها و اسناد تاریخی اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از طیف‌سنج نوری مدل LAMBDA ۹۰۰ انجام شد. برای تعیین ناحیه اندازه‌گیری، از یک دیافراگم با قطر ۱ میلی‌متر استفاده شد. این ناحیه شامل آلودگی‌های رایج کاغذ مانند لکه‌های چسب سیلیکاتی، زنگ‌زدگی، گردوغبار، لکه‌های چربی، رطوبت و سایر آلاینده‌ها بود. طیف‌های بازتاب به‌دست‌آمده در شکل ۲ ارائه شده است.



■ شکل ۲. ضریب بازتاب آلودگی‌های موجود بر سطح کاغذ در برابر طول موج تابش لیزری

از تحلیل شکل‌های ۱ و ۲ مشخص است که تمام طیف‌های بازتاب ثبت‌شده، ساختاری مشابه دارند و تفاوت‌ها عمدتاً در مقادیر مطلق ضریب بازتاب است که به نوع خاص آلودگی سطحی بستگی دارد. مهم‌ترین نتیجه این است که کاغذ در ناحیه فرابنفش دارای کمترین مقادیر بازتاب است. بنابراین، استفاده از لیزرهای کوتاه‌موج برای تمیزکاری کتاب‌ها و اسناد می‌تواند خطرناک باشد؛ زیرا انرژی تابش زیادی توسط کاغذ جذب می‌شود. در این راستا، برخی پژوهشگران (Kolar et al. ۲۰۰۰) گزارش کرده‌اند که هنگام تمیزکاری کاغذ با لیزر اکسایمر با طول موج ۳۰۸ نانومتر، آسیب‌هایی به ساختار کاغذ وارد شده است. همچنین، همان‌طور که از شکل ۱ مشهود است، حداکثر ضریب بازتاب کاغذ در بازه طول موج ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر رخ می‌دهد. از این رو، استفاده از لیزرهایی با طول موج تابش در این محدوده طیفی منطقی است. بهترین گزینه‌ها در این زمینه عبارت‌اند از لیزرهای نئودیمیم حالت جامد و لیزرهای فیبر نوری ایتربیوم با طول موج حدود ۱ میکرومتر. در چنین شرایطی، اثر تابش بر سطح کاغذ تمیزشده از آلودگی‌ها ناچیز خواهد بود و حفاظت فیزیکی و شیمیایی کاغذ در حین فرایند تمیزکاری تضمین می‌شود.

با توجه به نمونه‌های دارای آلودگی سطحی، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، نمونه‌های آلوده به گردوغبار دارای ضریب بازتاب کمتر (حدود ۳۵ - ۶۰٪) نسبت به نمونه‌هایی

هستند که لکه‌های چربی، چسب سیلیکاتی یا سایر آلودگی‌های ناشناخته را دارند (حدود ۶۰-۷۰٪). در این میان، بیشترین مقدار ضریب بازتاب (حدود ۸۰٪) مربوط به نمونه‌هایی با لکه‌های چربی است. واضح است که با استفاده از لیزرهایی با طول موج حدود ۱ میکرومتر و شدت تابش مناسب، می‌توان این آلودگی‌ها را به‌طور مؤثر و ایمن از سطح کاغذ حذف کرد.

یکی از عوامل مهم در تیمار لیزری مواد، نرخ تکرار پالس است. از آنجاکه در یک سطح ثابت با توان میانگین خروجی معین، افزایش فرکانس پالس‌ها منجر به کاهش چگالی انرژی هر پالس واحد می‌شود، این امر امکان تیمار دقیق‌تر کاغذ را فراهم می‌کند؛ زیرا انرژی حرارتی تولیدشده ناشی از جذب تابش لیزری توسط کاغذ کاهش می‌یابد. بر همین اساس، برخلاف سایر پژوهشگران فعال در حوزه تمیزکاری کاغذ با لیزر، نویسندگان این مقاله تصمیم گرفتند امکان استفاده از نرخ تکرار پالس‌های لیزری بالاتر (در محدوده ده‌ها کیلوهرتز) را بررسی کنند. با در نظر گرفتن تمام پارامترهای فوق، تأثیر لیزر بر کاغذ مشابه تیمار «ریزمایشین کاری لیزری چندپالسی» [۲] است که در صنعت مواد به‌طور گسترده به‌کار می‌رود. شایان ذکر است که ایده استفاده از این رویکرد در مرمت کاغذ برای اولین بار توسط یکی از نویسندگان این مقاله در سال ۲۰۰۷ مطرح شد (Mokrushin and Parfenov, 2008). با این حال، برای اطمینان از حفاظت حداکثری کاغذ هنگام تمیزکاری با لیزر، تنها کاهش چگالی انرژی پالس کافی نیست؛ بلکه باید تأثیر تمرکز حرارتی تابش لیزری نیز کنترل شود. در صورت تابش طولانی مدت به یک نقطه خاص از سطح کاغذ، افزایش دمای نقطه‌ای ممکن است رخ دهد. اثرات نامطلوب این افزایش دما شامل تغییر رنگ و حتی سوختن کاغذ است. برای جلوگیری از این مشکل، لازم است حرکت پرتو لیزر بر روی سطح کاغذ با سرعت بالا و به‌صورت یکنواخت انجام شود. این هدف می‌تواند با استفاده از سیستم‌های اسکن پرتو لیزر با سرعت بالا محقق شود. برای مثال، می‌توان از «اسکنرهای دوبعدی مبتنی بر آینه‌های گالوانومتر» که در لیزرهای صنعتی برای علامت‌گذاری و حکاکی به‌کار می‌روند، بهره گرفت. در این روش، هر بار که پرتو لیزر از روی سطح کاغذ عبور می‌کند، لایه‌های بسیار نازکی از آلودگی‌ها پاک می‌شوند. در صورتی که میزان تمیزکاری کافی نباشد، این مرحله می‌تواند با تابش مجدد لیزر بر کل صفحه یا بخش‌های خاص آن ادامه یابد. براساس توضیحات فوق، در آزمایش‌ها از لیزر پالسی فیبر نوری ایتربیوم در حالت جامد برای تمیزکاری کاغذ استفاده شد. ویژگی‌های خروجی این لیزر به شرح زیر است:

الف) طول موج تابش: ۱۰۶۰ میکرومتر

ب) توان میانگین حداکثر: ۱۰ وات

ج) مدت زمان پالس: ۱۰ نانوثانیه

د) حداکثر نرخ تکرار پالس: ۱۰۰ کیلوهرتز

### ۳-۲. خواص کاغذ قبل و بعد از تمیزکاری با لیزر

نمودار تنظیمات آزمایش در تصویر ۳ (a) نشان داده شده است. ابتدا پرتو لیزر بر روی سطح کاغذ

تنظیم و متمرکز شد و سپس نمونه اسکن گردید. قطر نقطه پرتو لیزر متمرکز حدود ۵۰ میکرومتر بود. نمای کلی تنظیمات آزمایش در حین فرایند تمیزکاری کاغذ با لیزر در تصویر ۳ (b) ارائه شده است. پارامترهای تیمار لیزری به گونه‌ای انتخاب شدند که حذف آلودگی‌ها از سطح کاغذ به صورت ایمن و کارآمد انجام شود. منظور از تمیزکاری ایمن، عدم ایجاد پیامدهای آسیب‌زننده به کاغذ مانند سوختگی (کربونیزاسیون)، تغییر رنگ، تغییر ضخامت یا زبری سطح کاغذ است. حداکثر کارایی حذف آلودگی‌ها بدون آسیب به کاغذ در توان میانگین ۴ وات به دست آمد.

سایر تنظیمات دستگاه شامل موارد زیر است:

الف) نرخ تکرار پالس: ۲۰ کیلوهرتز

ب) چگالی توان در نقطه: حدود  $2 \times 5 \times 1$  وات بر سانتی‌متر مربع

ج) سرعت اسکن پرتو: در بازه ۰.۰۲ میلی‌متر بر ثانیه تا ۰.۰۵ میلی‌متر بر ثانیه

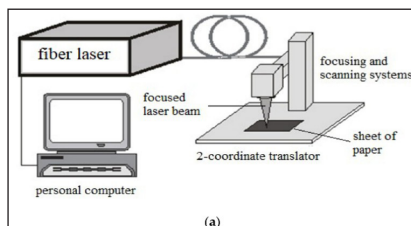
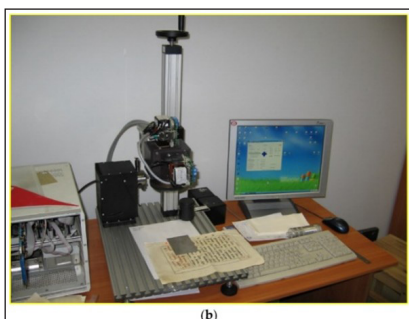
د) ناحیه تیمار لیزری:  $4 \times 6$  سانتی‌متر مربع

در مرحله اول، تأثیر تیمار لیزری (تمیزکاری) بر خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی کاغذ و مقاومت آن در برابر سایش مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی این خواص، پارامترهای مقاومت در برابر شکست کاغذ، مقدار pH و میزان سفیدی مورد آزمون قرار گرفتند. در حوزه مرمت کتاب، این پارامترها معیارهای مهمی برای تعیین ایمنی هرگونه فرایند درمانی در جریان مرمت محسوب می‌شوند. علاوه بر این، برای بررسی تأثیر تیمار لیزری بر مقاومت کاغذ در شرایط فرسودگی، از فرایند پیرسازی مصنوعی حرارتی استفاده شد (در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت). به منظور کاهش اثر حرارتی تابش لیزر بر سطح کاغذ، اسکن پرتو با سرعت بالا و در دو جهت عمود بر یکدیگر انجام گرفت. نمونه‌های کاغذ از هر دو طرف با لیزر تیمار شدند. مقادیر شاخص مقاومت در برابر تخریب نمونه‌های کاغذ با ترکیبات مختلف پس از تیمار سطحی (از هر دو طرف) در جدول ۲ ارائه شده است.

بیشترین تأثیر تمیزکاری با لیزر بر استحکام مکانیکی کاغذ در نمونه‌های B-2 (کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ خمیر سلولز سولفات) و B-6 (کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ خمیر نیمه متراکم الیاف کتان) مشاهده شد. در این نمونه‌ها، میانگین تعداد تا خوردگی‌های (چین خوردگی‌های) دوگانه بین ۱۲ تا ۲۰٪ کاهش یافت و کاهش مقاومت در برابر شکست، تنها در جهت طولی رخ داد. برای سایر انواع کاغذ، شامل B-25، B-19، B-5 و کاغذ ساخته شده از کهنه پارچه، شاخص مقاومت در برابر شکست پس از تیمار لیزری تغییر نکرد. همچنین، افزایش اندکی در مقدار ndk در جهت عرضی مشاهده شد. ماهیت مقاومت در برابر شکست در دو جهت عمود بر هم متفاوت است؛ در جهت طولی، این مقاومت به استحکام و انعطاف‌پذیری الیاف بستگی دارد، درحالی‌که در جهت عرضی، به استحکام پیوندهای بین‌الیافی مرتبط است. افزایش دما تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد موجب دهیدراسیون (کم‌آبی) الیاف سلولزی شده و باعث کاهش انعطاف‌پذیری کاغذ و در نتیجه کاهش مقاومت در برابر پارگی می‌گردد. این موضوع با کاهش جزئی وزن ناشی از دهیدراسیون



الیاف سلولزی، در آنالیز DSC نمونه‌ها تأیید شده است (Vilesova et al. 1997). در عین حال، حذف «رطوبت کاغذ» منجر به تقویت پیوندهای هیدروژنی می‌شود که سهم اصلی را در انرژی پیوندهای بین‌الیافی کاغذ دارند. قرار گرفتن کاغذ در معرض تابش لیزر باعث گرم شدن آن شده و فرایندهای مشابه، از جمله کاهش انعطاف پذیری و تغییر جزئی در مقاومت مکانیکی، در این شرایط قابل مشاهده است.



■ شکل ۳. (a) تنظیمات آزمایشی برای آماده‌سازی دستگاه لیزر برای تمیزکاری کاغذ؛ (b) تنظیمات آزمایشی؛ نمای کلی

■ جدول ۲. تأثیر تیمار لیزری (تمیزکاری) بر خواص فیزیکی و مکانیکی کاغذ (شاخص مقاومت در برابر شکست)

| مقاومت در برابر شکست، تعداد ناخوردگی‌های (چین خوردگی‌ها) دوتایی مجاز |                                                                              |                   |          |             |                    |          |             |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------|-------------|--------------------|----------|-------------|
| کد نمونه                                                             | ترکیبات کاغذ                                                                 | نمونه مرجع (الگو) |          |             | بعد از لیزر درمانی |          |             |
|                                                                      |                                                                              | جهت طولی          | جهت عرضی | مقدار متوسط | جهت طولی           | جهت عرضی | مقدار متوسط |
| B-2                                                                  | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ سلولز سولفات                                          | ۲۰۸               | ۱۶۰      | ۱۸۴         | ۱۷۴                | ۱۵۰      | ۱۶۲         |
| B-5                                                                  | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ سلولز سولفات، با پرکننده کاتولین و محتوای خاکستر ۵/۲٪ | ۱۴                | ۳۱       | ۲۲          | ۳۶                 | ۱۳       | ۲۴          |
| B-6                                                                  | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ خمیر نیمه متمرکم الیاف کتان                           | ۶۳۰               | ۲۷۴      | ۴۵۲         | ۲۸۴                | ۴۶۹      | ۳۷۶         |
| B-19                                                                 | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ سلولز سولفات، با پرکننده کاتولین و محتوای خاکستر ۴/۶٪ | ۱۳۴               | ۹۲       | ۱۱۳         | ۹۷                 | ۱۷۰      | ۱۳۴         |

|   |    |   |   |   |    |                                                                                     |                                             |
|---|----|---|---|---|----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| ۹ | ۱۰ | ۸ | ۸ | ۷ | ۱۰ | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ خمیر نیمه متراکم پنبه، با پرکننده کاتولن و ۹۳٪ محتوای خاکستر | B-25                                        |
| ۹ | ۹  |   | ۹ | ۹ | ۹  | کاغذ ساخته شده از ۱۰۰٪ الیاف کتان، با آهاردهی نشاسته                                | کاغذ ساخته شده از پارچه (کتان، پنبه یا کنف) |

مقادیر شاخص سفیدی و اسیدیته نمونه‌های کاغذ، قبل و بعد از تیمار لیزری (تمیزکاری)، در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که این تیمار، تأثیری بر خواص کاغذ ازجمله میزان سفیدی و pH آن نداشته است.

■ جدول ۳. تأثیر تیمار لیزری (تمیزکاری) بر میزان سفیدی کاغذ و مقدار اسیدیته (pH)

| پس از لیزر درمانی |          | نمونه مرجع (الگو) |          | کد نمونه                                    |
|-------------------|----------|-------------------|----------|---------------------------------------------|
| pH                | سفیدی، % | pH                | سفیدی، % |                                             |
| ۴٫۸               | ۷۲       | ۵٫۱               | ۷۳       | B-5                                         |
| ۷                 | ۷۲       | ۷٫۲               | ۷۲       | B-19                                        |
| ۷٫۶               | ۸۲       | ۷٫۳               | ۸۳       | B-25                                        |
| 4.9               | 58       | 4.9               | 58       | کاغذ ساخته شده از پارچه (کتان، پنبه یا کنف) |

با تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از پیرسازی مصنوعی حرارتی نمونه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که تیمار لیزری تأثیری بر کاهش مقاومت کاغذ ندارد. تغییرات مقاومت در برابر شکست، روشنایی و مقادیر pH در نمونه‌های تیمار شده با لیزر، مشابه نمونه‌های کاغذ الگو بوده است (به جدول ۴ مراجعه کنید).

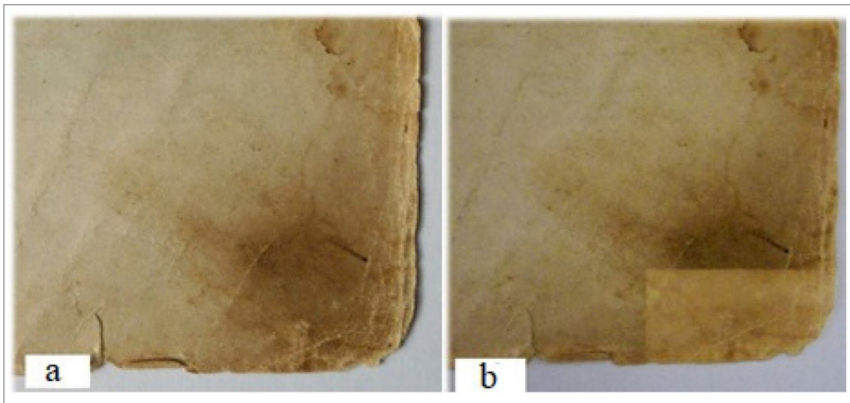
■ جدول ۴. تغییرات فیزیکی، مکانیکی، نوری و شیمیایی نمونه‌های کاغذ الگو و نمونه‌های کاغذ تیمارشده با لیزر پس از پیرسازی مصنوعی حرارتی (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۷۲ ساعت)

| پیرسازی مصنوعی حرارتی                       |                   |          |             |         |     |                  |          |             |         |     |
|---------------------------------------------|-------------------|----------|-------------|---------|-----|------------------|----------|-------------|---------|-----|
| کد نمونه‌ها                                 | نمونه مرجع (الگو) |          |             |         |     | پس از لیزردرمانی |          |             |         |     |
|                                             | مقاومت (n.p.k.)   |          |             | سفیدی % | pH  | مقاومت (n.p.k.)  |          |             | سفیدی % | pH  |
|                                             | جهت طولی          | جهت عرضی | مقدار متوسط |         |     | جهت طولی         | جهت عرضی | مقدار متوسط |         |     |
| B-5                                         | ۹                 | ۲۰       | ۱۴          | ۶۹      | ۴٫۹ | ۷                | ۲۲       | ۱۴          | ۶۹      | ۴٫۸ |
| B-19                                        | ۱۶۸               | ۱۱۶      | ۱۴۲         | ۷۰      | ۶٫۹ | ۱۹۲              | ۱۱۳      | ۱۵۲         | ۶۹      | ۷   |
| B-25                                        | ۱۰                | ۸        | ۹           | ۸۲      | ۷٫۶ | ۱۰               | ۷        | ۸           | ۸۱      | ۷٫۴ |
| کاغذ ساخته‌شده از پارچه (کتان، پنبه یا کنف) | ۴                 | ۵        | ۴           | ۵۵      | ۴٫۵ | ۴                | ۶        | ۵           | ۵۵      | ۴٫۵ |

مشاهده ظاهری نواحی تمیزشده با استفاده از «میکروسکوپ استریو نوری» نشان داد که پس از یک بار تیمار لیزری (تمیزکاری)، بخش عمده‌ای از آلودگی‌ها بدون ایجاد آسیب یا تغییرات میکروسکوپی در سطح و رنگ کاغذ حذف شده است.

مجموعه‌ای از آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های کاغذ الگو، ایمنی لیزر انتخابی و ویژگی‌های خروجی آن بر روی کاغذ را تأیید نمود. تیمار لیزری که بر روی اسناد تاریخی انجام شد، شامل یک صفحه از نسخه خطی قرن هفدهم و یک صفحه از کتاب چاپی روسی اوایل قرن نوزدهم بود که هر دو دارای انواع معمول آلودگی‌ها بودند. نتایج نشان داد که آلودگی سطحی در هر دو مورد به‌طور مؤثر حذف شد. وضعیت کاغذ قبل و بعد از تیمار لیزری (تمیزکاری)، هم در نمونه‌های الگو و هم در اسناد تاریخی، با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شد و علاوه بر آن، از «میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)» نیز بهره گرفته شد.

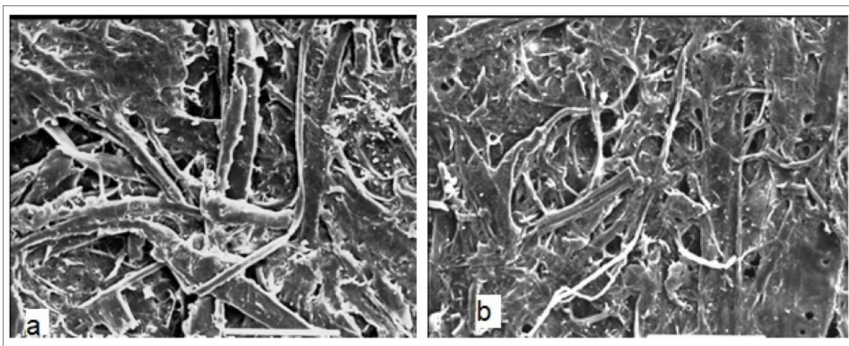
تصاویر میکروسکوپی نوری و SEM ارائه‌شده در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان می‌دهند که تیمار لیزری هیچ‌گونه آسیبی به مورفولوژی (ریخت‌شناسی) سطح یا ساختار الیاف سلولزی کاغذ وارد نکرده و تغییر رنگی در نمونه‌ها مشاهده نشد. این نتایج از طریق اندازه‌گیری‌های رنگ‌سنجی، ازجمله روش اصلی شرح داده‌شده در یکی از مطالعات اخیر (Parfenov and Titov, 2019) نیز تأیید شده است.



■ شکل ۴. صفحه اول یک کتاب چاپی روسی اوایل قرن نوزدهم با آلودگی‌های سطحی مشخص:  
(a) قبل از تیمار لیزری؛ (b) پس از تمیزکاری با لیزر (مستطیل زرد روشن در قسمت پایین سمت راست صفحه)



■ شکل ۵. صفحه‌ای از یک نسخه دست‌نویس روسی قرن هفدهم با آلودگی‌های سطحی مشخص:  
(a) وضعیت اولیه؛ (b) گوشه پایین سمت راست صفحه، با مداد علامت‌گذاری‌شده. ناحیه مورد تیمار لیزری؛  
(c) همان ناحیه پس از تمیزکاری با لیزر



■ شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سطح یک صفحه از کتاب خطی: (a) وضعیت اولیه؛ (b) پس از تمیزکاری با لیزر

باید توجه داشت که «طیف سنجی FTIR» امکان بررسی تغییرات شیمیایی کاغذ پس از تیمار لیزری در سطح مولکولی را فراهم می‌آورد. با این حال، در این مطالعه این آزمایش‌ها انجام نشد؛ زیرا براساس ادبیات موجود (Brandt et al. 2009) مشخص است که با انتخاب مناسب پارامترهای تابش لیزر می‌توان از بروز پیامدهای منفی جلوگیری کرد. نتایج آزمایش‌ها کارایی و ایمنی بالای تمیزکاری کاغذ با روش لیزری را تأیید نمود.

### ۳.۳. انتخاب تیمار (تمیزکاری) با روش لیزر

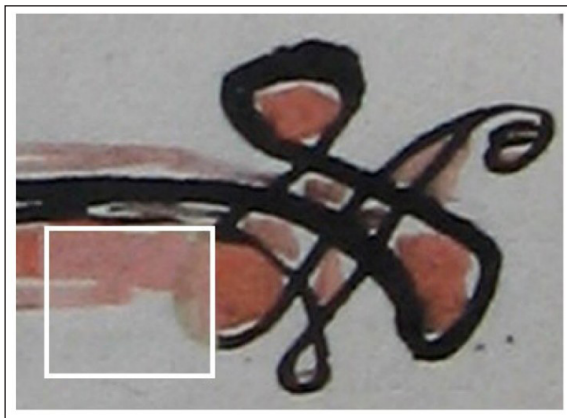
در انتخاب تیمار لیزری، ایمنی و سلامت کل صفحه کاغذ، شامل نوشته‌ها و تصاویر، مورد توجه قرار گرفت. از آنجا که میزان جذب جوهر و مرکب با جذب کاغذ تفاوت دارد، ضروری است تأثیر تیمار لیزری بر این موارد به دقت بررسی شود.

آزمایش‌های مقدماتی بر روی یک برگ کاغذ جدید مقاوم روسی «نوع ۱۰۰۰» که حاوی نوشته‌ای با جوهر مشکی بود، نشان داد که تمیزکاری با لیزر قادر است متن نوشته را بدون آسیب رساندن به کاغذ، همراه با آلودگی‌های سطحی پاک کند. سپس آلودگی‌های سطحی بخشی از صفحه یک کتاب دست‌نویس عربی مربوط به قرون وسطی، دارای نوشته‌هایی با جوهرهای چند رنگ (قرمز و سیاه)، تمیزکاری شد. در این بررسی، نوشته‌های با جوهر قرمز هیچ تغییر رنگی نشان ندادند؛ اما حذف آلودگی‌های سطحی از کاغذ موجب کم‌رنگ شدن جزئی نوشته‌های با جوهر سیاه شد (شکل ۷).



■ شکل ۷. تصاویر یک برگ از کتاب دست‌نویس عربی مربوط به قرون وسطی: (a) نمای کلی صفحه؛ (b) ناحیه‌ای که با لیزر پردازش و تمیز شده است (مستطیل روشن در وسط بالا)

در یک نسخه دست‌نویس عربی دیگر متعلق به قرن نوزدهم، جوهرهای سیاه و قرمز نیز به‌طور جزئی بر اثر تیمار لیزری کمرنگ شدند (به شکل ۸ مراجعه کنید). این موضوع نشان می‌دهد که در صورت استفاده از روش لیزردرمانی برای تمیزکاری نوشته‌های مدادی، «جوهرهای حاوی آهن» و یا «جوهر دوده»، باید اقدامات حفاظتی ویژه‌ای در نظر گرفته شود؛ زیرا امکان کمرنگ یا بی‌رنگ شدن نوشته‌ها وجود دارد. با این حال، در نوشته‌هایی که از «جوهر آنیلین» استفاده شده است، نیازی به اقدامات حفاظتی خاص نیست.



■ شکل ۸. بخشی از برگ یک کتاب دست‌نویس عربی پس از لیزردرمانی برای تمیزکاری (مستطیل سفید ناحیه تیمار لیزردرمانی را نشان می‌دهد)

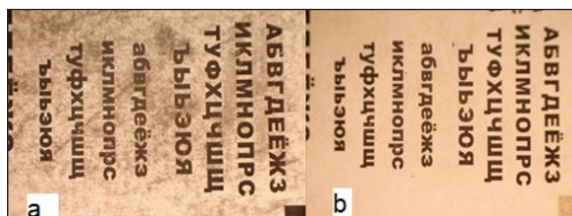
برای اطمینان از ایمنی آثار کاغذی، لازم است از لیزردرمانی برای تمیزکاری مستقیم نوشته‌ها و تصاویر خودداری شود. بنابراین، در مرمت کتاب‌ها و اسناد، تمیزکاری لیزری باید به صورت انتخابی و تنها در بخش‌هایی که ضرورت دارد، اعمال شود.

شایان ذکر است که مفهوم تمیزکاری انتخابی، پیش‌تر در مقاله کائوتیک (۲۰۲۲) توضیح داده شده است. برای تمیزکاری لیزری نمونه اولیه در «مؤسسه فدرال تحقیقات و آزمایش مواد برلین، آلمان» (طراحی شده توسط کائوتیک)، از لیزر Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ یا ۵۳۲ نانومتر، حداکثر نرخ تکرار ۱ کیلوهرتز و چگالی انرژی حدود ۱ ژول بر سانتی‌متر مربع استفاده شد. درحالی‌که چگالی انرژی ۱۰ ژول بر سانتی‌متر مربع حفظ گردید، نرخ تکرار به ۳۵ کیلوهرتز افزایش یافت. این تغییر باعث کاهش انرژی هر پالس و جلوگیری از گرم شدن کاغذ شد. در نتیجه ایمنی بیشتری برای آثار کاغذی فراهم آورد.

روش تمیزکاری انتخابی به صورت ناحیه‌ای بر روی نمونه‌های الگو انجام شد. نمونه‌های الگو شامل صفحات کاغذ اداری جدید با نوشته‌های چاپ‌شده با لیزر بودند. برای شبیه‌سازی آلودگی، سطح کاغذ با «گردوغبار زغال سنگ» پوشانده شد.

برای جلوگیری از تمیزکاری نواحی حاوی نوشته، تصویربرداری معکوس آن‌ها (تصویر ماسک) به برنامه کنترل سیستم اسکن ارسال شد. تصویر ماسک از طریق برش تصویر اصلی نوشته و تبدیل آن ایجاد شد. در این فرایند از نرم‌افزار طراحی گِزل استفاده شد.

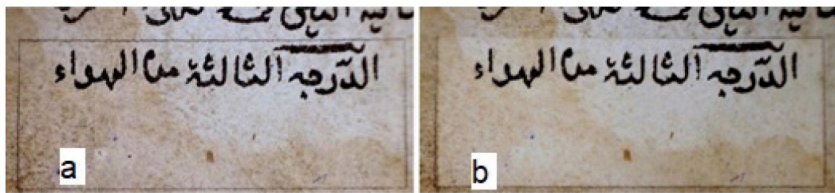
در تمیزکاری لیزری، اطمینان از تراز دقیق ناحیه تیمار صفحه با میدان اسکن لیزر ضروری است تا از آسیب دیدگی نوشته‌ها و داده‌های گرافیکی جلوگیری شود. برای این منظور، از ترکیبی از نشانه‌های ویژه که قبلاً بر روی ناحیه تیمار شده اعمال شده و یک قاب مرجع کلی استفاده شد. نشانه‌های مرجع روی سطح کاغذ اعمال می‌شوند تا هم‌راستایی کامل با ناحیه کار لیزر تضمین شود. در طول آزمایش‌ها، یک صفحه کاغذ آغشته به آلودگی مصنوعی با پرتو لیزر متمرکز تمیزکاری شد. نتایج تیمار لیزری نمونه کاغذ الگو در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود (سمت چپ: وضعیت اولیه، سمت راست: پس از تمیزکاری لیزری)، آلودگی‌ها به‌طور موفقیت‌آمیز حذف شدند و نوشته‌های تایپوگرافی بدون تغییر باقی ماندند. این نتایج مؤثر بودن راه حل فنی پیشنهادی را تأیید می‌کنند.



■ شکل ۹. شبیه‌سازی آلودگی‌ها روی سطح نمونه کاغذ الگو: (a) قبل از تمیزکاری؛ (b) پس از تمیزکاری با لیزر (لیزدرمانی)

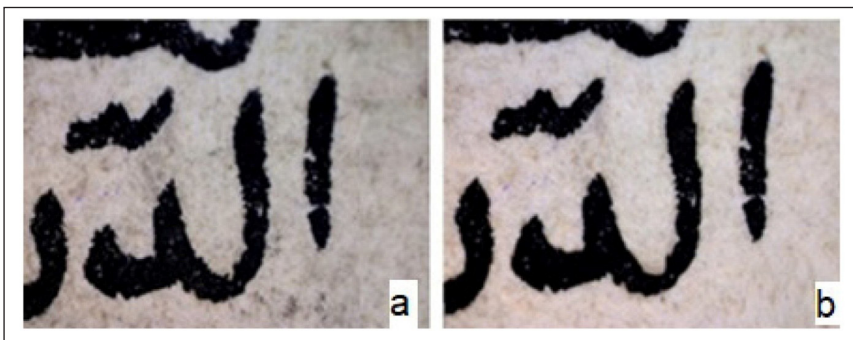


در مرحله نهایی کار، آزمایش‌هایی برای تمیزکاری انتخابی اسناد تاریخی انجام شد. به‌طور خاص، یک صفحه از کتاب دست‌نویس عربی اوایل قرن بیستم مورد بررسی قرار گرفت و یک ناحیه کوچک از متن برای تیمار انتخاب شد. پس از تکمیل مراحل آماده‌سازی فناوری (جزئیات بیشتر در مقاله پارفنوف و تی‌تو ۲۰۱۹) شرح داده شده است)، لازم بود ناحیه تیمار انتخابی بر روی صفحه کتاب به‌دقت با ناحیه کاری لیزر تطبیق یابد. بخشی که قرار بود از طریق لیزردرمانی تمیز شود، با یک مستطیل مدادی مشخص گردید (به شکل ۱۰ مراجعه کنید).



■ شکل ۱۰. بخشی از یک کتاب دست‌نویس عربی قدیمی: (a) قبل از تمیزکاری؛ (b) پس از تمیزکاری با لیزر (لیزردرمانی)

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، تمیزکاری بخش انتخابی با موفقیت انجام شد. صفحه کتاب از آلودگی‌های سطحی پاک شد و نوشته‌ها در ناحیه تیمار لیزری بدون کم‌رنگ یا بی‌رنگ شدن حفظ شد. تجزیه و تحلیل ناحیه تمیزکاری به‌صورت بصری نیز صورت گرفت. شکل ۱۱ تصویری از بخش کوچکی از صفحه کتاب، قبل و بعد از تمیزکاری لیزری را نشان می‌دهد. این تصویر به‌وضوح نشان می‌دهد یکپارچگی و قابلیت خواندن حروف و کلمات در طول فرایند لیزردرمانی به‌خوبی حفظ شده است.



■ شکل ۱۱. بخشی از یک کتاب دست‌نویس عربی قدیمی: (a) قبل از تمیزکاری؛ (b) پس از لیزردرمانی (تمیزکاری)



#### ۴. نتیجه‌گیری

براساس آزمایش‌ها می‌توان به نتایج اصلی زیر رسید:

۱. تمیزکاری لیزری کاغذ با استفاده از لیزر پالس IR با طول موج حدود ۱ میکرومتر، کارایی و ایمنی بالایی در حذف آلودگی از کتاب‌ها و اسناد تاریخی فراهم می‌آورد.
۲. استفاده از روش ترکیبی ریزماشین‌کاری لیزری چندپالسی و اسکن سریع پرتو لیزر، ایمنی بالایی هنگام تمیزکاری کاغذ ایجاد می‌کند. پارامترهای بهینه برای تمیزکاری لیزری کاغذ عبارتند از: مدت زمان پالس: حدود ۱۰ نانوثانیه؛ توان متوسط: حدود ۴ وات (چگالی توان حدود  $2 \times 10^5$  وات/سانتی‌متر مربع)؛ نرخ تکرار پالس: حدود ۲ کیلوهرتز؛ سرعت اسکن: ۲۰۰ میلی‌متر بر ثانیه تا ۵۰۰ میلی‌متر بر ثانیه.
۳. برای حفاظت از کتاب‌ها و اسناد هنگام تمیزکاری لیزری، ضروری است از تأثیر نامطلوب تابش لیزر بر نوشته‌ها و نقوش جلوگیری شود تا هیچ آسیبی به آن‌ها وارد نشود. این هدف با استفاده از سیستم اسکن پرتو لیزر با دقت بالا، که امکان نمایش نوشته‌های تایپوگرافی و داده‌های گرافیکی ناحیه تیمار شده را فراهم می‌کند، قابل دستیابی است.

#### یادداشت‌های مترجم

۱. آلودگی ناشی از خاکستر بادی (fly ash)، به ذرات بسیار ریز خاکستر گفته می‌شود که بر اثر احتراق سوخت‌های فسیلی (به‌ویژه زغال‌سنگ) ایجاد شده و به‌صورت معلق در هوا جابه‌جا می‌شود. این ذرات توسط باد از محیط اطراف به محل نگهداری آثار کاغذی منتقل شده و می‌توانند تأثیرات مخربی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کاغذ بگذارند (Grau-Bové et al. 2016).
۲. ریزماشین‌کاری لیزری چندپالسی (Multi-pulse micromachining)، روشی پیشرفته برای تیمار مواد در مقیاس میکرو و نانو است که در آن، به‌جای یک پالس تکی، از چندین پالس لیزری برای تیمار استفاده می‌شود. این روش دقت، کنترل و بازدهی فرایند را بهبود می‌بخشد و برای تیمار مواد حساس و پیچیده مناسب است (Neelova et al. 2022).

#### References

1. Abdel-Maksouda, G., Emamb, H., & Ragab, N. M. (2020). From traditional to laser cleaning techniques of parchment manuscripts: A review. *Advanced Research in Conservation Science*, 1, 52–76.
2. Arif, S., & Kautek, W. (2015). Laser cleaning of paper: Cleaning efficiency and irradiation dose. *Studies in Conservation*, 60 (Suppl. 1), S97–S105.
3. Atanassova, V., Yankov, G., Zahariev, P., & Grozeva, M. (2019). Laser treatment of contaminations on paper: A preliminary study. *Proceedings of the Conference "Applicazioni Laser nel Restauro (APLAR)"*, 433–445.
4. Balakhnina, I. A., Brandt, N. N., Chikishev, A. Y., & Shpachenko, I. G. (2018). Single-pulse two-threshold laser ablation of historical paper. *Laser Physics Letters*, 15, 065605.
5. Bilmes, G. M., Freisztav, C. M., & Cap, N. (2008). Laser cleaning of 19th century papers

- and manuscripts assisted by digital image processing. M. Castillejo, P. Moreno, M. Oujja, R. Radvan, & J. Ruiz (Eds.). *Lasers in the conservation of artworks*. Taylor & Francis Group.
6. Brandt, N. N., Chikishev, A. Y., Itoh, K., & Rebrikova, N. L. (2009). ATR-FTIR and FT Raman spectroscopy and laser cleaning of old paper samples with foxings. *Laser Physics*, 19, 483–492.
  7. Ciofini, D., Osticioli, I., Micheli, S., Montalbano, L., & Siano, S. (2013). Laser removal of mold and foxing stains from paper artifacts: Preliminary investigation. *Fundamentals of laser-assisted micro- and nanotechnologies 2013*. SPIE Proceedings.
  8. Cooper, M. (1998). *Laser cleaning in conservation: An introduction*. Butterworth-Heinemann.
  9. Fotakis, C., Anglos, D., Zafiropulos, V., Georgiou, S., & Tornari, V. (2007). *Lasers in the preservation of cultural heritage: Principles and applications*. CRC Press.
  10. Friberg, T. R., Zafiropulos, V., Petrakis, Y., & Fotakis, C. (1997). Removal of fungi and stains from paper substrates using laser cleaning strategies. W. Kautek & E. König (Eds.), *Lasers in the conservation of artworks (LACONA I)* (pp. 79–82). Mayer & Comp.
  11. Kautek, W. (n.d.). *Laser cleaning of paper and other organic materials*. Retrieved June 27, 2022, from <http://www.science4heritage.org/COSTG7/booklet/chapters/org.htm>
  12. Kautek, W., & Pentzien, S. (2005). Laser cleaning system for automated paper and parchment cleaning. *Springer Proceedings in Physics*, 100, 403–410.
  13. Kolar, J., Strlic, M., Müller-Hess, D., Gruber, A., Troschke, K., Pentzien, S., & Kautek, W. (2003). Laser cleaning of paper using Nd:YAG laser running at 532 nm. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 185–187.
  14. Kolar, J., Strlic, M., Pentzien, S., & Kautek, W. (2000). Near-UV, visible and IR pulsed laser light interaction with cellulose. *Applied Physics A*, 71, 87–90.
  15. Kovalenko, V. S. (2006). Laser micro- and nanoprocessing. *International Journal of Nanotechnology*, 1, 173–180.
  16. Lazzarini, L., Asmus, J., & Marchesini, M. L. (1972). Laser for cleaning of statuary: Initial results and potentialities. *Proceedings of the 1st International Symposium on the Deterioration of Building Stone*, 89–94.
  17. Luk'yanchuk, B. S. (2002). *Laser cleaning*. World Scientific Publishing Company.
  18. Markov, V. B., & Mironyuk, G. I. (1991). Holography in museums of the Ukraine. *Three-dimensional holography: Science, culture, education*, Vol. 123, pp. 340–347. SPIE.
  19. Mokrushin, Y. M., & Parfenov, V. A. (2008). Use of copper-vapor laser for restoration of artworks. *Journal of Optical Technology*, 75, 476–477.
  20. Parfenov, V. A., & Titov, S. V. (2019). Technical and technological aspects of laser cleaning for books and documents. In *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 903–906.
  21. Pilch, E., Pentzien, S., Madebach, H., & Kautek, W. (2005). Anti-fungal laser treatment of paper: A model study with a laser wavelength of 532 nm. *Lasers in the conservation of artworks. Springer Proceedings in Physics*, 100, 19–27.
  22. Rosati, C., Ciofini, D., Osticioli, I., Giorgi, R., Tegli, S., & Siano, S. (2014). Laser removal of mold growth from paper. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 117, 253–259.
  23. Schawlow, A. L. (1965). Lasers. *Science*, 149, 13–22.
  24. Strlic, M., Selih, V., Kolar, J., & Kocar, D. (2005). Optimisation and on-line acoustic monitoring of laser cleaning of soiled paper. *Applied Physics A*, 81, 943–951.
  25. Vilesova, M. S., Lazareva, C. Y., Saprykina, N. P., Tkachev, B. I., Levashova, L. G., & Khalizova, E. M. (1997). Study of thermal transformations of paper. *Proceedings of the International Conference "Library of Academy of Sciences: Ten Years after Fire"*, 135–139.
  26. Zekou, E., Tsilikas, I., Chatzitheodoridis, E., & Serafetinides, A. (2017). Laser paper cleaning:



The method of cleaning historical books. *Proceedings of the 19th International Conference and School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications* (Vol. 10226). SPIE.

#### منابع مترجم

1. Grau-Bové, J., Budič, B., Cigić, I. K., Thickett, D., Signorello, S., & Strlič, M. (2016). The effect of particulate matter on paper degradation. *Heritage Science*, 4, 2. <https://doi.org/10.1186/s40494-016-0071-8>
2. Neelova A.D., Vasilieva A.V., Rongonen S.L., Vasiliev O.S., Safronov D.V., Parfenov V.A. (2022). Laser Cleaning of Paper. *Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 1134–1137.