

## پاکسازی چسبها و پوشاننده‌های آثار آهنی با استفاده از لیزر Nd: YAG و TEA CO<sub>2</sub>

نویسنده: سوکوکو. وای<sup>(۱)</sup>

مترجم: معصومه تفرشی

### چکیده

پاکسازی دقیق و انتخابی پوشاننده‌ها و آلودگی‌های سطحی می‌تواند از طریق به‌کارگیری لیزرهایی با طول موج مناسب انجام گیرد. در این مطالعه، لیزرهای Nd: YAG و TEA CO<sub>2</sub> برای پاک کردن چسبها و پوشاننده‌های قدیمی آثار آهنی بررسی شده است. این تکنیک به طور گسترده‌ای می‌تواند به پاکسازی دقیق لایه‌های پوشاننده‌های قدیمی بدون آسیب‌رسانی به لایه‌های فلزی زیرین بپردازد. این تست روی نمونه‌های مختلف با استفاده از لیزر Nd: YAG با طول موج‌های ۵۳۲nm و ۱۰۶۴nm و لیزر TEA CO<sub>2</sub> با طول موج ۱۰۶۰۰nm انجام شد. نمونه‌های آزمایش با تعدادی از چسبها و پوشاننده‌های مورد استفاده در مرمت آماده شده و با استفاده از این سه لیزر تمیز شدند. نتایج با روش میکروبلاستینگ مقایسه شد. مقایسه سطح تمیز شده با لیزر نیز توسط میکروسکوپ نوری و رامان انجام گرفت. مطالعات نشان داد که بهترین نتیجه با لیزر TEA CO<sub>2</sub> بدون آسیب به لایه زیرین حاصل گردید. سطح اصلی زیرین حفظ شده و ذرات دوباره ته‌نشین شده به‌آسانی بعد از درمان با لیزر با بیستوری یا برس پاک شدند.

### ۱. مقدمه

خوردگی آثار فلزی باستانی به‌سرعت بعد از حفاری اتفاق می‌افتد به‌خاطر وجود رطوبت و اکسیژن در محیط با اجزاء موجود در آثار، واکنش شیمیایی انجام می‌گیرد. در طول این پروسه، محصولات خوردگی در داخل و بر سطح اشیا تشکیل می‌گردد. به‌دلیل این تغییرات، آثار شکننده و متخلخل می‌گردند. استفاده صحیح از یک شیوه مرمتی مناسب ضروری است تا هم مواد اصلی و هم اطلاعات ساختاری جزئی روی سطح آثار حفظ گردد. آثار آهنی باستانی معمولاً با یک واکس به‌عنوان بخشی از درمان حفاظتی پوشیده می‌شوند تا در مقابل رطوبت و گردوغبار محیط حفظ شوند. انواع مختلفی از چسبها استفاده می‌شوند تا بخش‌های شکسته شده را به هم بچسبانند. همچنین باید توجه داشت که درمان‌ها بدون مشکل نیستند. اگرچه پاک کردن چسبها و پوشاننده‌های قدیمی مشکل است اما بدون کاربرد این مواد، ممکن است بعضی ارزش‌های باستان‌شناسی‌شان از بین برود. پروسه گذر زمان، قابلیت حل آن مواد را در حلال‌های آلی تغییر می‌دهد که ممکن است تمیزکاری شیمیایی مشکل و یا غیرعملی شود. در چنین مواردی، روش‌های مکانیکی همچون میکرو بلاستینگ با شن یا دیگر ساینده‌ها استفاده می‌گردد. اما این روش می‌تواند منجر به آسیب یا تمیزکاری بیش از حد سطح گردد، چرا که کنترل روش میکرو بلاستینگ مشکل و با دقت کم است.

استفاده از لیزر یکی از تکنیک‌هایی است که بر شمار وسیعی از مشکلات مرمت تست شده‌است و یکی از اولین مراحل عملیات، تبخیر یک ماده جاذب نوری به صورت انتخابی از یک سطح بازتابی است که پاک‌کن لیزری نامیده می‌شود. پاک‌کن لیزری در سال ۱۹۶۰ توسط آرتور اسپولو توسعه داده شد. در سال ۱۹۷۰ تمیزکاری سطح یک مجسمه مرمری با استفاده از لیزر توسط جان آسموس و محققان مرمتی انجام شد. پس از چنین آزمایش‌هایی بود که لیزرها برای مرمت و به‌منظور پاکسازی مواد مختلف استفاده شدند. هرچند تاکنون کاربردهای اندکی از تمیزکاری لیزر برای آثار فلزی

گزارش شده، اما لیزر دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی است؛ همچون توانایی تأثیر بیشتر نور لیزر، قابل پیش‌بینی بودن و تمیز کردن آثار ظریف فلزی با کمترین آسیب می‌باشد.  
مزیت لیزرها نسبت به روش‌های سنتی عبارت‌اند از:

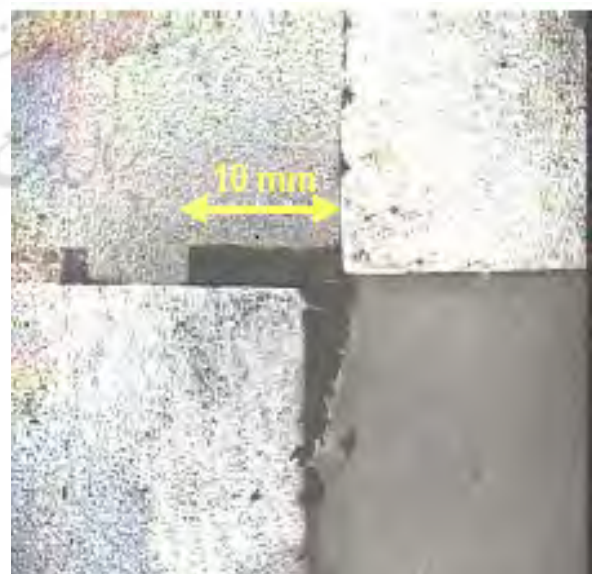
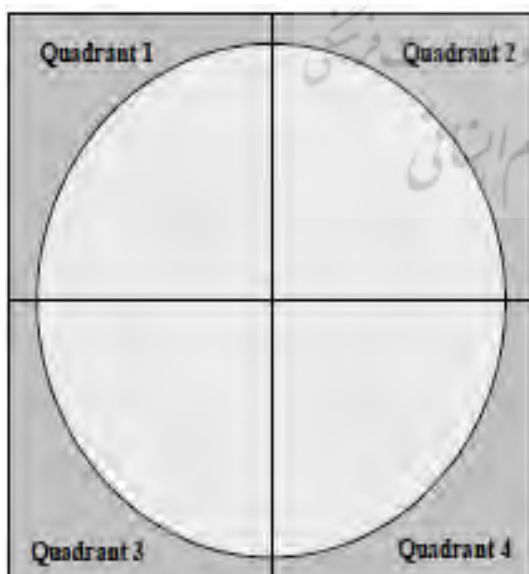
باقی نگذاشتن اثر شیمیایی بر اشیاء و محیط که برای مرمتگر هم ایمن می‌باشد.  
انرژی به صورت نور آزاد می‌شود و هیچگونه آسیب یا فرسودگی ایجاد نمی‌کند.  
پروسه پاکسازی تنها بر پوشاننده سطح انجام می‌شود در حالی که برجستگی‌های سطح حفظ می‌شوند.  
این تکنیک با تغییر شدت، طول موج و تمرکز قابل کنترل و انتخابی است.  
واقعیت این است که فلزات جذب کمی از نور لیزر مادون قرمز نشان می‌دهند که این ویژگی سبب می‌شود لیزر به وسیله‌ای مناسب برای تمیزکاری فلزات در طول مرمت تبدیل گردد.

## ۲. اقدامات آزمایشی

لیزرهای TEA CO<sub>2</sub> و Nd:YAG ابتدا روی صفحه‌های فولادی بدون خوردگی با چسب‌های مختلف مورد استفاده در مرمت، آماده شدند. این آزمایش‌ها اجازه می‌دهد تا انرژی دانسیته مطلوب برای هر چسب یا لیزر یافت شود. تأثیر این عمل بر لایه‌های زیرین نیز بررسی شد. داده‌ها و نتایج این مطالعات به‌عنوان مبنا برای بررسی‌های بعدی روی تأثیر پاکسازی اشیاء فلزی خورده شده‌ای که با انواع چسب‌ها و واکنش‌ها پوشیده شده بودند، توسط هر سه لیزر مورد استفاده قرار گرفت.

### ۱-۲. آزمایش‌های نخستین - پاکسازی نمونه‌های بدون خوردگی

نمونه‌های بدون خوردگی با چند نوع چسب مختلف، چند روز قبل از پاکسازی پوشیده شدند. هر نمونه شامل صفحه‌های فولادی ۶۰×۶۰ میلی متری بود که با چسب‌ها به‌شکل دایره‌ای در مرکز صفحات پوشیده شد. نمونه‌ها به ۴ قسمت تقسیم شدند و هر قسمت با یک تکنیک درمان شد. ربع اول دایره با لیزر TEA CO<sub>2</sub>، ربع دوم با Nd:YAG ۵۳۲ و ربع سوم با Nd:YAG ۱۰۶۴ و ربع چهارم نیز با میکرو بلاستینگ پاکسازی شد.



**(a)** طرحی از صفحه‌های نمونه، ناحیه پوشیده شده از چسب - دایره مرکزی - و ۴ ربع دایره  
**(b)** یک نمونه صفحه تست شده که با چسب سیانواکریلات سیاه پوشیده و با ۴ روش تست شده است.

### ۱-۱-۲. پاکسازی نمونه‌های آزمایشی با لیزر TEA CO<sub>2</sub>

آزمایش‌های نخستین با لیزر TEA CO<sub>2</sub> نیاز به یافتن فاصله مناسب از نقطه کانونی پرتو و انرژی دانسیته مناسب را داشت که مجموعه‌ای از ۸ فاصله مختلف تست شد. فواصل تابشی نزدیک به کانون پرتو سبب ذوب جزئی سطح شد، بنابراین استفاده از پرتو نا متمرکز ضروری بود تا از صدمه دیدن مواد جلوگیری کند. فاصله ۶۰ میلی‌متر یا ۷۰ میلی‌متر از مرکز، نتایج مطلوبی در بر داشت. این که چسب‌ها با اولین پالس پاک شوند تقریباً غیرممکن است، بنابراین چندین پالس ضروری می باشد.

### ۲-۱-۲. پاکسازی نمونه‌های آزمایشی با لیزر Nd:YAG در دو طول موج

شیوه مشابهی برای یافتن فاصله کانونی و انرژی دانسیته مناسب برای لیزر Nd:YAG نیز استفاده شد. بی‌رنگ شدن سطح در زمانی که انرژی دانسیته یا تعدد تکرار پالس‌ها بالا بود، اتفاق افتاد. به ربع دوم و سوم دایره انرژی دانسیته مطلوب با لیزر Nd:YAG ۵۳۲nm (نور سبز) و Nd:YAG ۱۰۶۴nm (مادون قرمز) تابیده شد. ۶ نوع چسب استفاده شدند که به‌استثنای سیانوآکریلات سیاه، همه چسب‌ها در هر دو طول موج شفاف و نیمه‌شفاف بودند. چسب‌ها در همه موارد، پاک یا شکننده شده و به کمک دست پاک شدند. انرژی دانسیته مورد استفاده از ۵/۰-۲ j/cm بود چرا که بالاتر از این مقدار سبب ذوب سطح فلز می‌شود.

### ۲-۲. پاکسازی نمونه‌های دارای خوردگی و پوشش داده شده

انرژی دانسیته مطلوب برای هر پوشاننده توسط نمونه صفحه‌های فولادی پوشیده شده و دارای خوردگی آزمایشی مشخص شد و درجات مختلفی از پرتوهای نامتمرکز به‌وسیله تغییر فاصله و در نتیجه اندازه نقطه‌ای از متمرکز نمودن لنزها به دست آمد. برای لیزر TEA CO<sub>2</sub> فاصله مطلوب ۷۰+ میلی‌متر از مرکز و انرژی دانسیته در حدود ۷ j/cm می‌باشد.

جدول (۱)

فاصله از مرکز	۷۰+ میلی متر انرژی دانسیته ۷ j/cm
پارالوئید (HMG)B72	چسب‌ها با ۱ یا ۲ پالس پاک شدند
نیترات سلولز (Karlssons glue)	چسب‌ها با ۱ یا ۲ پالس پاک شدند
اپوکسی (Araldite)	در مجموع چسب‌ها پاک نشده و سطح هم تیره شد
ژل سیانوآکریلات (Loctite 454)	چسب‌ها پوسته‌پوسته شده و پاک شدند
سیانوآکریلات (Loctite 407)	بعد از چندین پالس چسب‌ها پوسته‌پوسته شده ولی در کل پاک نشدند
سیانوآکریلات سیاه (Loctite 480)	چندین پالس لازم بود ولی در کل چسب‌ها پاک نشده و سطح تیره شد
واکس میکروکریستالین (Ter Hell 5495)	چسب‌ها با ۱ یا ۲ پالس پاک شدند
دی نیترو 4010 مایع	چسب‌ها با ۱ یا ۲ پالس پاک شدند
دی نیترو 29241 خمیر	چسب‌ها با ۱ یا ۲ پالس پاک شدند j/cm

جدول (۲)

۱.۹	j/cm	لیزر Nd:YAG (۵۳۲nm سبز)
	چسبها پاک شده، سطح فلز هم سیاه شده	پارالوئید (HMG)B72
	چسبها به راحتی پاک شده، همچنین سطح فلز سیاه شده	نیترات سلولر (Karlssons glue)
	چسبها پوسته پوسته شده، همچنین سطح فلز سیاه شده	اپوکسی (Araldite)
	چسبها پوسته پوسته شده، همچنین سطح فلز سیاه شده	ژل سیانواکریلات (Loctite 454)
	سطح شیء تیره شده	سیانواکریلات (Loctite 407)
	چسبها پاک شده، سطح فلز هم سیاه شده	سیانواکریلات سیاه (Loctite 480)
	سطح فلز تیره شده اما چسبها پاک نشدند	واکس میکرو کریستالین (Ter Hell 5495)
	سطح فلز تیره شده اما چسبها پاک نشدند	دی نیترو ل 4010 مایع
	سطح فلز تیره شده اما چسبها پاک نشدند j/cm	دی نیترو ل 29241 خمیر


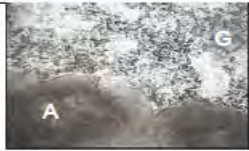

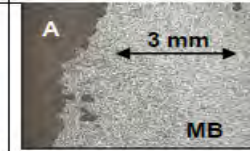
جدول (۳)

۰.۴-۲	j/cm	لیزر Nd:YAG (۱۰۶۴nm)
	چسب بی رنگ و مات شده، سطح فلز ذوب شده	پارالوئید (HMG)B72
	چسب بی رنگ و خشک شده	نیترات سلولر (Karlssons glue)
	چسب بی رنگ شده ولی پاک کردن آن مشکل بود	اپوکسی (Araldite)
	چسب بی رنگ شده و روی سطح باقی مانده، همچنین سطح ذوب شده	ژل سیانواکریلات (Loctite 454)
	چسب بی رنگ شده و روی سطح باقی مانده، همچنین سطح ذوب شده	سیانواکریلات (Loctite 407)
	چسب بی رنگ شده و به آرامی تقریباً پاک شده، ولی پوسته پوسته نشده	سیانواکریلات سیاه (Loctite 480)
۰.۵	j/cm در	واکس میکرو کریستالین (Ter Hell 5495)
۰.۴	j/cm در	دی نیترو ل 4010 مایع
۰.۵	j/cm در	دی نیترو ل 29241 خمیر
	چسب به آسانی پاک شده، به مقدار جزئی سطح تیره شده	

## ۳. نتایج

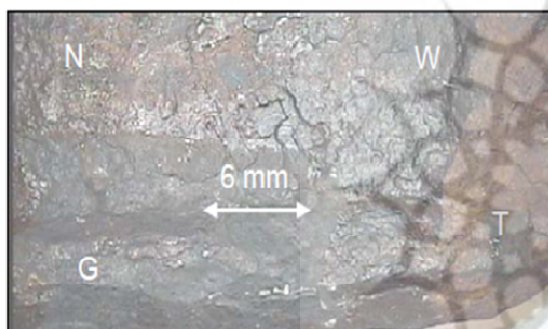
پاکسازی با لیزر TEA CO<sub>2</sub> بهترین نتایج را در برداشت. سطح نمونه های آزمایشی بعد از پاکسازی تمیز و درخشان بود اما به مقدار جزئی بی رنگ شدگی با حالتی رنگین کمانی مشاهده شد. این امر به خاطر تشکیل یک لایه شفاف و خیلی نازک اکسید بود که سبب تداخل نوری می گردد. رنگ های مشابه رنگین کمان بر سطح فلزاتی که اشعه به آنها تابیده نشده هم مشاهده شده است.

پاکسازی چسبها از نمونه‌های آهنی خورده شده با استفاده از لیزر Nd:YAG، نتایجی مشابه با نمونه‌های آزمایشی خورده نشده داشت. چسبها بی‌رنگ و پوسته‌پوسته شدند. سطوح اکسید شده به مقدار جزئی در انرژی دانسیته بالا و یا بعد از چندین پالس تیره شدند. امکان استفاده از پالس‌های نزدیک مادون قرمز و نورمرئی سبز لیزر Nd:YAG برای تمیز کردن سطوح فلزی اکسید شده و درخشان، به نظر می‌رسد به‌خاطر خطر ذوب و نیز تیره شدن سطح به‌واسطه تغییرات دمایی و فتوشیمیایی همچنین تأثیرات دی‌هیدراته شدن محدود شده‌اند.

a. TEA CO <sub>2</sub> laser	b. Nd:YAG Green laser	c. Nd:YAG Infrared laser	d. Micro blast
			
O. Original metal surface T. Cleaned by TEA CO <sub>2</sub> laser	G. Cleaned by Nd:YAG laser 532 nm (green) A. Remains of araldite after cleaning	A. Remains of araldite after cleaning N. Cleaned by Nd:YAG laser 1064 nm	A. Remains of araldite after cleaning MB. Cleaned by Micro Blast

نمونه‌های آزمایشی پوشش داده شده با آرالدیت

قسمت شکسته شده از ظرف چدنی قدیمی، با واکس میکروکریستالین پوشیده شده



N- لیزر Nd:YAG در طول موج ۱۰۶۴ nm

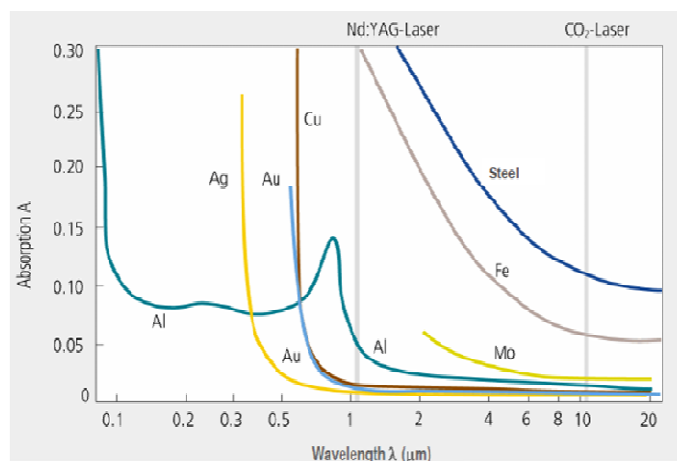
G- لیزر Nd:YAG در طول موج ۵۳۲nm

W- بخش پوشیده شده با واکس میکروکریستالین

T- لیزر TEA CO<sub>2</sub>

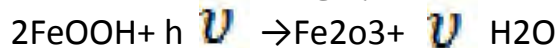
#### ۴. بحث

لیزر TEA CO<sub>2</sub> (AlltecAllmark 870) با اشعه ساطع شده در طول موج ۱۰۶۰۰nm در پالس‌های کوتاه، در طول ۱۰۰۰-۱۰۰ نانو ثانیه و با انرژی ۲-۴ ژول در تکرار سرعت ۲۰HZ استفاده گردید. در تصویر زیر می‌توان دید که در طول موج ۱۰۶۰۰ اغلب فلزات جذب کمی داشتند هرچند مواد پوشاننده‌ی ارگانیک، جذب بالایی در این طول موج نشان می‌دهند. به همین دلیل، لیزر TEA CO<sub>2</sub> مناسب‌ترین شیوه برای پاکسازی آثار فلزی است.



ویژگی جذب فلزات مختلف در طول موج‌های مورد استفاده، در این تصویر نشان داده شده‌اند. از آنجایی که آنها دارای جذب کمی در سطح فلز هستند، لیزرهای با طول موج بلند، در این مورد TEA CO<sub>2</sub> - احتمال آسیب کمتری به آثار فلزی دیده می‌شود. به عبارت دیگر، ترکیبات آلی جذب بالایی در دور از مادون قرمز دارند اما در نور مرئی و نزدیک به مادون قرمز نیمه شفاف یا انتقال یافته هستند.

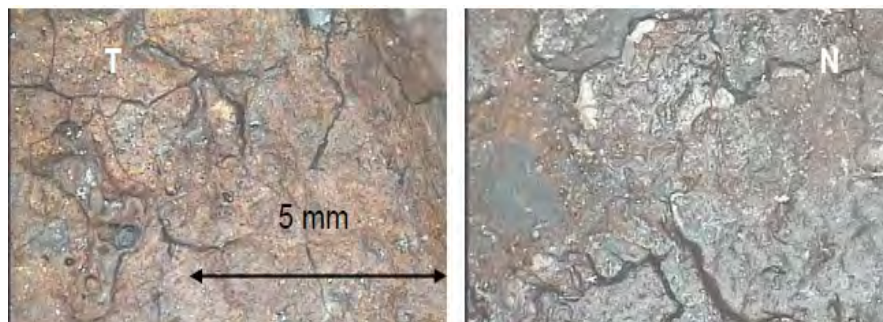
جذب اشعه در ترکیبات آلی به دلیل واکنش فوتون‌ها با رادیکال‌های مختلف می‌باشد. فوتون‌های لیزر TEA CO<sub>2</sub> با انرژی  $eV = h \nu = 0/116$  رادیکال‌های  $\text{OH}, -\text{CH}, -\text{CN}$  را تحریک کرده و سبب گرم شدن و تبخیر ترکیبات می‌شوند. اگر انرژی دانسیته خیلی بالا باشد، حتی سطوح با جذب پائین هم تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. این حالت در بعضی از تست‌ها مشاهده شد. اشعه می‌تواند سبب سیاه‌شدگی بر سطوح خورده شده، گردد؛ اما فقط با تکرار پالس‌ها و دانسیته بالا. مکانیزم واکنش با دی هیدراته شدن زنگ قرمز - قهوه ای توضیح داده شده است:



در دانسیته‌های بالاتر، اکسیدهای آهن متفاوتی تشکیل شده که دمای ذوب‌شان پائین‌تر از دمای آهن فلزی است، که ذوب شوند. با این اتفاق، شکل کوچک گوی‌مانندی می‌تواند روی سطح تشکیل گردد. که چنین وضعیتی غیر ممکن نیست. لیزر TEA CO<sub>2</sub> حساسیت کمتری نسبت به خطاهای اپراتور در هنگام حفاظت و تمیزکاری آثار آهنی دارد. تجزیه شیمیایی و گرمایی‌ای که ممکن است اتفاق افتد، سبب آسیب جبران‌ناپذیر سطح می‌شود. برای همه لیزرهای تست شده، این مورد صادق است اما به احتمال زیاد در طول موج‌های کوتاه اتفاق می‌افتد.

#### ۱-۴. لیزر Nd:YAG در طول موج IR و Green

لیزر Nd:YAG در مدت زمان کوتاه ۱۰ نانوثانیه، پالس‌هایی با انرژی ۰.۵ ژول در طول موج مادون قرمز ۱۰۶۴ و ۰.۲۵ ژول در طول موج سبز ۵۳۲ نانومتر ساطع شد. سرعت تکرار پالس بالاتر از ۱۰ HZ بود. انرژی فوتون پرتوهای IR و به ترتیب در حدود  $eV 2/36$  و  $eV 1/18$  است و واکنش نور سبز و نزدیک مادون قرمز با فلزات و پوشاننده‌های آلی کاملاً با تابش لیزر TEA CO<sub>2</sub> متفاوت است. هر دو نور نزدیک مادون قرمز و نور مرئی از کل سطح پوشش شده عبور کرده - به استثنای سیانواکریلات سیاه - و توسط سطح فلز جذب شده است. همچنین پالس‌های لیزر با سطح فلز برخورد می‌کنند، میزان کوچکی از سطح ذوب و بخار شده، فشار بخار تولید شده، منجر به ایجاد پدیده‌ای به نام جدایش می‌شود. (ورقه‌ورقه شدن یا خرد شدن پوشاننده‌های روی سطح فلز). این پروسه منجر به ذوب لایه‌ی خیلی نازک سطح حتی در انرژی دانسیته پائین می‌گردد. در بعضی موارد، پوشاننده‌ها ممکن است ترک خورده اما معمولاً با استفاده از روش‌های دستی پاک می‌شوند.



سطح یک شیء چدنی قدیمی که توسط واکس میکروکریستالین پوشش داده شده که با لیزر TEA CO<sub>2</sub> طول موج ۱۰۶۰۰ و پالس لیزر Nd:YAG طول موج ۱۰۶۰ به ترتیب پاک شده است. تیره شدن سطح اثر، بیشتر در طول موج

کوتاه لیزر Nd:YAG به دلیل دی هیدراته شدن گرما و فوتوشیمیایی  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  و تشکیل FeO است. در موارد مشابه، پاکسازی پوشش‌ها با لیزر Nd:YAG نسبت به اشعه لیزر TEA CO<sub>2</sub> تأثیر کمتری دارد. سطح توسط تجزیه ترموشیمیایی  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  وجود آمده، معمولاً با لیزر Nd:YAG بیشتر مشاهده شد. بنابراین در این پروسه وقتی لیزر Nd:YAG کار برده می‌شود، حساسیت و دقت عمل و عملکرد اپراتور برای تمیزکاری مورد توجه است. تغییرات فوتوشیمیایی در سطوح پوشش داده شده ارگانیک نیمه‌شفاف همچون چسب‌ها نیز رخ می‌دهد. چسب سیانواکریلات سیاه نور لیزر Nd:YAG را به‌خاطر این که شامل ذرات کرین جاذب در طول موج‌های Nd:YAG است، جذب می‌کند. به‌همین دلیل سیانواکریلات سیاه تنها چسبی است که مستقیماً از سطح فلز با نور لیزر Nd:YAG برداشته می‌شود.

## ۲-۴- ارزیابی توسط رامان

FTIR و Raman به‌منظور آنالیز و شناسایی مواد آلی و ترکیبات معدنی مختلف همچون پوشاننده‌های سطح در اثر حاضر به کار برده شده است. رامان ابزاری اصلی است که در این بررسی مورد استفاده است. وسیله به کار برده شده یک میکروسکوپ Raman، RENISHAW 200 با لیزر یون آرگون در  $514\text{nm}$  و بزرگنمایی  $20\times-50\times$  بود. میزان لایه آرا‌لدیت روی سطح آهنی که اشعه بر آن تابیده نشده، در حدود  $3071\text{ CM}^{-1}$  و  $2910\text{ cm}^{-1}$  است. آرا‌لدیت بر سطحی که توسط لیزر Nd:YAG تابیده شده، بسیار کم باقی مانده است. بعد از تابش، ترکیبات تغییر کردند و رامان شیفت پیدا کرده و به عدد موج‌های  $3077\text{ CM}^{-1}$  و  $2924\text{ CM}^{-1}$  تغییر کرده است. این به‌خاطر تغییرات کم فوتو و ترموشیمیایی در ترکیبات آرا‌لدیت است. روی نمونه‌های آزمایشی فولاد تابیده شده با لیزر TEA CO<sub>2</sub> باقی‌مانده آرا‌لدیت مشاهده نشده است. بر چدن قدیمی پوشیده شده با واکس میکرو کریستالین، خطوط طیفی واکس به‌طور واضح در تعداد موج‌های  $2849\text{ CM}^{-1}$  و  $2881\text{ CM}^{-1}$  تشخیص داده شد. در سطح مشابه، به‌دنبال تابش لیزر TEA CO<sub>2</sub> هیچ اثری از واکس پوشش نشان داده نشد. اگرچه خطوط طیفی جدید به‌ترتیب در حدود  $1580\text{ CM}^{-1}$  و  $1340$  و  $868$  و  $389\text{ CM}^{-1}$  ظاهر شدند. این‌ها به‌خاطر اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن می‌باشد. چسب تجاری دی نیترو که به‌عنوان پوشش سطح محافظ آثار آهنی استفاده شده، خطوط طیفی به‌ترتیب  $2181\text{ CM}^{-1}$  و  $2843\text{ CM}^{-1}$  دارد. روی سطوح تابیده شده با لیزر TEA CO<sub>2</sub> هیچ اثری از دی نیترو نشان داده نشد. خطوط طیفی جدید بین  $1591\text{ CM}^{-1}$  و  $275\text{ CM}^{-1}$ ، به‌خاطر وجود اکسیدهای آهن و هیدروکسیدهای آهن هستند. لیزر Nd:YAG منجر به تیرگی سطح نمونه‌ها شد و این بیشتر در طول موج کوتاه‌تر آشکار گردید. طیف‌سنجی همچنین اثرات باقی‌مانده از دی نیترو بر سطح نمونه را آشکار نمود. بنابراین نتیجه می‌شود که پالس‌های لیزر Nd:YAG در طول موج‌های نزدیک مادون قرمز و نور مرئی برای پاکسازی پوشش‌های سطح آثار آهنی قدیمی چندان مناسب نیستند، در صورتی که به‌کارگیری دقیق یک لیزر TEA CO<sub>2</sub> برای پاکسازی موفقیت‌آمیز است.

## ۵. نتیجه‌گیری

هنگام انتخاب یک لیزر برای پاکسازی آثار باستانی خورده شده، شرایط فیزیکی و شیمیایی مواد می‌بایست بررسی شوند. لیزرهای به کار برده شده در این آزمایش، TEA CO<sub>2</sub> و Nd:YAG به‌ترتیب از نور مرئی، نزدیک و دور از مادون قرمز می‌باشند. یک ویژگی مهم فلزات، جذب ضعیفشان در دور از مادون قرمز است. هرچند حتی پالس‌های لیزر TEA CO<sub>2</sub> که دور از مادون قرمز هستند، اگر در دانسیته‌متجاوز از حدود استفاده شوند، می‌توانند سبب آسیب سطح گردند. تغییرات فیزیکی و شیمیایی به‌خاطر فرسودگی مواد ارگانیک می‌تواند قابلیت جذب اشعه را در طول موج معین

تغییر دهد. مؤثرترین دانسیته برای تمیزکاری، به ضخامت پوششی که قرار است پاک شود، بستگی دارد. فاکتورهای دیگری که بر میزان تمیزکاری اثر می‌گذارند، برای مثال: رنگ سطح، اکسیداسیون، تخلخل و زبری سطح می‌باشند. تأثیر تمیزکاری یک لیزر معین روی مواد مختلف می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای مورد نظر باشد. اکسیدهای سطحی، انرژی لیزر را بیشتر از سطوح فلزی تمیز جذب می‌کنند. به همین دلیل، باید مراقب بود زیرا حتی با لیزرهای TEA CO<sub>2</sub> دی هیدراته شدن و بی‌رنگ شدن خوردگی اجتناب‌ناپذیر است. البته از بروز چنین مشکلاتی می‌تواند در هنگام تمیزکاری به- واسطه بررسی دقیق و تعیین حدود دانسیته‌ها برای مواد خاص جلوگیری کرد.

پی نوشت

1. SookKoh Y.,(2006). Removal of adhesives and coatings from iron artifacts using pulsed TEACo<sub>2</sub> and Nd: YAG-lasers. Laser cleaning as a conservation technique for corroded metal artifacts 5:61-74.

