



## کاربرد لیزرهای Nd:YAG و CO<sub>2</sub> در پاکسازی خوردگی اشیاء برنزی و مسی تاریخی

شکوفه احمدی<sup>۱\*</sup>، فرناز فرنیاشلمانی<sup>۲</sup>، محمدهادی ملکی<sup>۱</sup>، رسول وطن‌دوست<sup>۲</sup>، مجید قاضیان<sup>۲</sup>، لیدا نیکزاد<sup>۱</sup>،  
علیرضا زارع<sup>۱</sup>، حسین رزاقی<sup>۱</sup>، فریدون سلطان مرادی<sup>۱</sup>  
۱. مرکز تحقیقات هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۲۴۸۶، تهران - ایران  
۲. دانشکده هنر و معماری دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، صندوق پستی: ۱۳-۷۶۸، تهران - ایران

**چکیده:** از آنجایی که در حوزه حفاظت و مرمت اشیای تاریخی پاکسازی نمکهای خورنده از روی سطوح فلزی تاریخی امری مهم به شمار می‌رود، کاربرد لیزر برای پاکسازی نمکهای خورنده از روی چند قطعه مفرغی و مسی مربوط به دوران باستان مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این پژوهش بررسی کارایی لیزر Nd:YAG و CO<sub>2</sub> با پالسها و انرژیهای مشخص و کاربرد روشهای پاکسازی به روشهای خشک و بخار بوده است. در این مطالعه روشهای شیمیایی و مکانیکی متداول نیز برای بررسی و مقایسه نتایج حاصل به‌کار گرفته شدند. مقایسه نتایج زدایش نمکها به وسیله لیزر نشان داد که لیزر CO<sub>2</sub> در طول موج «۱۰/۶μm» نتیجه مطلوبی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** مفرغ، مس، خورنده، پاکسازی لیزر به روش خشک، پاکسازی لیزر به روش بخار، لیزر Nd:YAG، لیزر CO<sub>2</sub>، روش‌های سنتی شیمیایی و مکانیکی، اشیاء تاریخی

## Application of Nd:YAG and CO<sub>2</sub> Lasers for Cleaning the Corrosion of Bronze and Copper Historical Objects

Sh. Ahmadi<sup>1\*</sup>, F. Farniashalmani<sup>2</sup>, M.H. Maleki<sup>1</sup>, R. Vatandoost<sup>2</sup>, M. Ghazian<sup>2</sup>, L. Nikzad<sup>1</sup>,  
A. Zare<sup>1</sup>, H. Razzaghi<sup>1</sup>, F. Soltanmoradi<sup>1</sup>

1. Nuclear Research Center, AEOI, P.O. Box: 11365-3486, Tehran - Iran  
2. Art and Architecture College of Islamic Azad University, Centre Unit of Tehran, P.O. Box: 13-768, Tehran - Iran

**Abstract:** As in restoration and conservation of historical objects removing the corrosive salts from historical metal surfaces is important, the application of two types of lasers for removing corrosive salts from several historical copper and bronze species has been investigated. The purpose of this research is to compare the results of Nd:YAG and CO<sub>2</sub> lasers application with defined pulses and energies in removing corrosive salts. Two mechanisms including dry laser and steam laser cleaning have been used. Also, the traditional methods (chemical and mechanical) have been used to compare the results of the cleaning. The applications of the applied lasers have been shown that CO<sub>2</sub> laser at 10.6μm gives the best results.

**Keywords:** bronze, copper, corrosive, dry laser cleaning, steam laser cleaning, Nd:YAG laser, CO<sub>2</sub> laser, traditional methods (chemical and mechanical), historical objects



تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۳/۸/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۴/۷/۱۲

\*email: sahmadi@aeoi.org.ir

**۱- مقدمه**

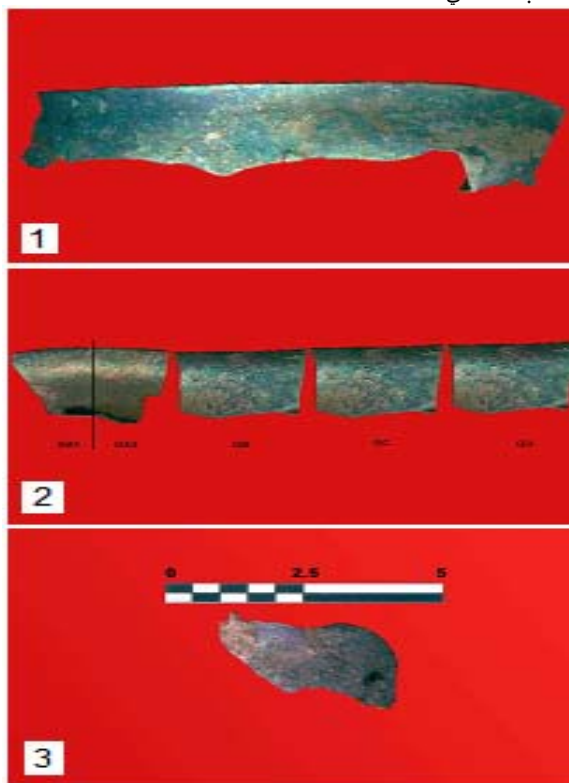
در مورد قدمت این قطعات، بر اساس مطالعات تطبیقی، قطعه RD2 (تاریخ منتسب به مفرغ‌های لرستان) تعلق دارد. در مورد اشیای منطقه بازگیر استان گلستان، باستان شناسان اتفاق نظر ندارند، گروهی از آنان اشیا را به هزاره اول قبل از میلاد و گروهی دیگر به اوایل دوران اسلامی نسبت می‌دهند.

مس و آلیاژهای آن به دلیل دارا بودن جلاي فلزي و مقاومت زیاد در برابر عوامل مخرب، بیش از ۴۵۰۰ سال قبل برای ساخت اشیا مورد توجه بوده‌اند. مس و آلیاژهای آن تحت تأثیر واکنشهای سطح با محیط اطراف قرار می‌گیرند که منجر به پدیده خوردگی می‌شود. برای مرمت آنها باید ماهیت و میزان خوردگی کاملاً بررسی شود و انتخاب شیوة مرمت برای حذف عوامل خوردگی و حفاظت اشیاء از آسیبهای بعدی آنها باشد. از روشهای متداول برای حذف عوامل خوردگی می‌توان به روشهای مکانیکی و شیمیایی اشاره کرد که هر کدام محدودیتهای خاصی دارند [۱]. لیزر به دلیل بی‌تأثیری، انتخاب‌پذیری، قابلیت کانونی شدن و قابلیت کنترل سریع، فصل جدیدی را در امر حفاظت و مرمت آثار باستانی گشوده است.

در سال ۱۹۷۲ نخستین بار جان آسموس<sup>(۱)</sup> با استفاده از لیزر یاقوت موفق به پاکسازی قسمتی از سطح یک مجسمه شد. در سال ۱۹۸۶ دیوید ایمونی<sup>(۲)</sup> از لیزر Nd:YAG برای پاکسازی سطوح سنگهای مرمر و آهنی استفاده کرد و این تحقیقات منجر به تشکیل یک مرکز تحقیقاتی برای پاکسازی با تکنیک لیزر شد [۲].

**۲- وسایل، مواد و روش کار****۱-۲ نمونه‌ها**

این تحقیق بر روی قطعات مختلفی انجام شده است: قطعه RD2 بطول ۲/۹ و بعرض ۱/۶ سانتی‌متر متعلق به یک ظرف مفرغی لرستان و یک لبة ظرف مسی G به طول ۱۷/۵ و عرض ۳/۷ سانتی‌متر متعلق به منطقه بازگیر استان گلستان. قطعه G به ۵ قطعه کوچکتر بریده شد و بترتیب به قطعات GA1، GA2، GB، GC و GD نامگذاری گردید. شکل‌های ۱ تا ۳ این قطعات را نشان می‌دهند.



شکل ۱- قطعه G، شکل ۲- قطعه G که به قطعات GA1، GA2، GB، GC و GD بریده شد، شکل ۳- قطعه RD2.

**۲-۲ دستگامها**

برای تعیین جنس قطعات، نوع نمکهای خورنده، بررسی ساختار فلزی قطعات، نحوه پراکندگی نمکهای خورنده و پاکسازی آنها به شیوه‌های مختلف از جمله پاکسازی به شیوة مکانیکی به ترتیب از دستگامهای زیر استفاده شده است.



- SEM (Philips, XL30) ، XRD (Philips, pw1730) و EDX (ماکزیموم انرژی ۲۰ keV) (۲۵)
- استریو میکروسکوپ (Leica, wild M8) متصل به دوربین عکاسی (Leica wild MPS52)
- لیزر پالسی CO<sub>۲</sub> و لیزر پالسی Nd:YAG: (برای پاکسازی نمکهای خورنده)
- لیزر پالسی CO<sub>۲</sub> با بسامد تکرار پالس ۱ هرتز، طول موج ۱۰/۶ میکرومتر، انرژی ۱ ژول در هر پالس و پهنای پالس ۲۰۰ نانوثانیه و لیزر پالسی Nd:YAG با بسامد تکرار پالس ۱، ۵، ۱۰ هرتز، طول موج ۱/۰۶ میکرومتر، انرژی اسمی ۱۵۰ میلی ژول در هر پالس و پهنای پالس ۱۰ نانوثانیه





GB با محلول قلیایی نمک راشل طی ۳ روز و قطعه GC در محلول گلیسیرول قلیایی طی ۳ ساعت انجام شد.

ج) **روش لیزری:** پاکسازی با لیزر بر روی قطعات GA1، GD و RD2 انجام گرفت. برای این منظور، از سطوح پشت و روی قطعات عکسهای میکروسکوپی با بزرگنمایی ۱۰۰ گرفته شد تا با توجه به نحوه پراکندگی نمکهای خورنده و شرایط اعمال شده (تغییرات در انرژی پالس لیزر) پس از تهیه مجدد عکس از سطوح پاک شده، بهترین شرایط برای پاکسازی معین شوند. از لیزر Nd:YAG برای پاکسازی قطعه GD (پشت و روی نمونه) استفاده شد. از لیزر CO<sub>2</sub> برای پاکسازی قسمت پشت قطعه GD و GA1 که قسمتهایی از آن قبلاً به روش مکانیکی پاک شده بودند استفاده شد. پیش از استفاده از لیزرها قطرسنجی (کالیبره کردن) انجام شد تا مقدار انرژی پالسهای لیزر در حالت‌های مختلف مشخص شوند. این اطلاعات در جدولهای ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

- پوینده (اسکندر) برای حرکت دادن و قرار دادن قطعه در برابر پرتو لیزر  
- حلقه و تیغ جراحی متصل به ارتعاش‌کننده (برای پاکسازی نمکهای خورنده به روش مکانیکی)

### ۳-۲ مواد شیمیایی

- محلول نمک قلیایی راشل: محتوی ۵۰ گرم سود و ۱۵۰ گرم نمک راشل (تارتارات مضاعف سدیم و پتاسیوم) در یک لیتر آب  
- محلول گلیسیرول قلیایی: ۱۵۰ گرم سود و ۵۰ گرم گلیسیرول در یک لیتر آب  
- محلول ۵% کالگون (هگزامتافسفات سدیم)  
- پلی اتیلن گلیکول، اتانول و آب مقطر

### ۴-۲ روشهای پاکسازی

الف) **روش مکانیکی:** قطعه GA2 با استفاده از تیغ جراحی متصل به ارتعاش‌کننده در زیر حلقه پاکسازی شد.

ب) **روش شیمیایی:** پاکسازی قطعات GA1 با محلول ۵% کالگون طی ۱۰ روز،

جدول ۱ - انرژی پالس لیزر Nd:YAG در حالت‌های مختلف، چگالی سطحی انرژی و توان متوسط.

توان متوسط (W)	چگالی سطحی انرژی (J/cm <sup>2</sup> )	قطر پرتو خروجی (mm)	انرژی هر پالس (mJ)	بسامد (Hz)	طول موج خروجی (nm)	عرض پالس (ns)	فاصله شیء از منبع لیزر (cm)
۰/۱۳	۱/۳۰	۳/۶	۱۳۰	۱	۱۰۶۴	۱۰-۱۲	۹
۰/۶۳	۱/۳۰	۳/۵	۱۲۵	۵			
۱/۱۸	۱/۳۰	۳/۴	۱۱۷/۶	۱۰			
۰/۱۶	۱/۳۲	۴/۰	۱۶۵	۱	۱۰۶۴	۱۰-۱۲	۹
۰/۷۸	۱/۳۹	۳/۸	۱۵۷/۶	۵			
۱/۴۸	۱/۳۷	۳/۷	۱۴۷/۶	۱۰			
۰/۱۸	۱/۳۲	۴/۲	۱۸۱/۶	۱	۱۰۶۴	۱۰-۱۲	۹
۰/۸۸	۱/۵۷	۴/۰	۱۷۷	۵			
۱/۶۸	۱/۴	۳/۹	۱۶۸	۱۰			

جدول ۲ - انرژی پالس لیزر CO<sub>2</sub>، چگالی سطحی انرژی و توان متوسط.

توان متوسط (W)	چگالی سطحی انرژی (J/cm <sup>2</sup> )	انرژی پالس (J)	سطح مقطع پالس (mm <sup>2</sup> )	فاصله شیء (cm)	آهنگ تکرار (Hz)	عرض پالس (ns)	طول موج خروجی (μm)	ولتاژ (kV)
۱	۲/۵	۱	۸×۵	۶	۱	۲۰۰	۱۰/۶	۳۰

با توجه به این جدولها پارامترهایی مانند چگالی سطحی

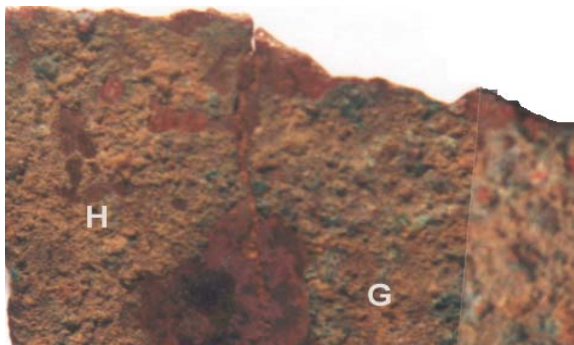


استفاده شود. زیرا بر خلاف آب که دارای کششهای شدید سطحی است و نمیتواند یک لایه پیوسته بر روی سطح ایجاد کند این مایع به صورت یک لایه پیوسته بر روی سطح باقی

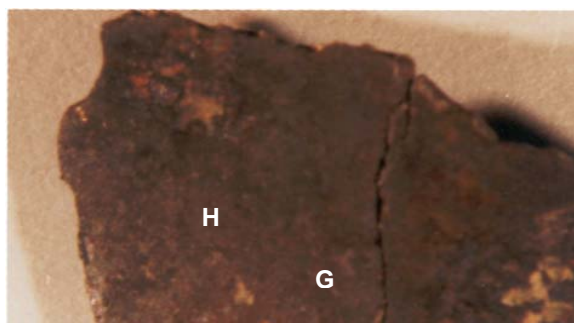
انرژی و توان متوسط لیزر به صورت زیر حساب میشوند.

$$\text{انرژی هر پالس (J)} = \frac{\text{مساحت ایجاد شده حاصل از تابش لیزر بر روی شیء (cm}^2\text{)}}{\text{سطحی انرژی (J/cm}^2\text{)}} = \text{چگالی}$$

$$\text{پالس} = \text{توان متوسط (W)} \times \text{انرژی هر پالس (J)}$$



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی از گوشه قطعه RD2 پیش از پاکسازی با لیزر Nd:YAG.



شکل ۵- تصویر میکروسکوپی از گوشه قطعه RD2 پس از پاکسازی با لیزر Nd:YAG.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی از ناحیه ای از قطعه GD پیش از پاکسازی با لیزر CO<sub>2</sub>.

با افزایش چگالی سطحی انرژی و توان متوسط لیزر، اثر کندی روی سطح سریعتر اتفاق می افتد. شکل های ۴ تا ۷ قسمتی از قطعات RD2 و GD را قبل و بعد از پاکسازی با لیزر Nd:YAG و CO<sub>2</sub> نمایش می دهند.

با توجه به نوع نمکهای خورنده و تراکم آنها، از روش لیزر بخار و خشک استفاده شد. در مورد روش لیزر بخار، در هر نوبت تابش دهی سطح نمونه با آب، اتانول و پلی اتیلن گلیکول پوشش داده شد.

نتایج بدست آمده از پاکسازی لیزر بصورت جدول های ۳ و ۴ ارائه شده اند.

نتیجه کار هنگامی مطلوب است که پس از عمل پاکسازی، نمکهای خورنده از روی سطح فلز حذف شده باشند و هیچ اثر تخریبی بر روی سطح فلز مشاهده نشود. در غیر این صورت نتیجه کار مطلوب نخواهد بود.

نتایج مندرج در جدول های ۳ و ۴ نشان می دهند که سرعت پاک شدن سطوح، با استفاده از آب، الکل و پلی اتیلن گلیکول به شرح زیر است:

الکل > آب > پلی اتیلن گلیکول  
مزیت آب نسبت به الکل این است که الکل به دلیل کشش سطحی اندکی که دارد سریعتر از آب بخار می شود. بنابراین، اثر پاکسازی الکل در مقایسه با آب ضعیفتر است. آب به دلیل داشتن ظرفیت گرمایی بالا قادر به تولید فشار جزئی است. این فشار جزئی از عوامل مؤثر در پاکسازی سطح است [۳].

بنابراین، تصمیم گرفته شد از پلی اتیلن گلیکول برای پوشش دهی سطح



نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل XRD بر روی نمکهای خورنده قطعات در جدول ۶ درج شده‌اند. بررسی تصاویر میکروسکوپی (شکل ۴ و ۶) نشان می‌دهد که پراکندگی و تراکم نمکهای خورنده یکنواخت نیست و پاکسازی مناطق متراکمتر در همه روش‌های پاکسازی مشکلتر است. نتایج تجزیه و تحلیل عنصری مغز فلزی به وسیله EDX، مقدار مس را در قطعه RD2 ۸۶/۹۰ و مقدار قلع را ۱۰/۴۵ و در قطعه G مقدار مس را صد درصد وزنی شناسایی می‌کند.

نتایج پاکسازی به روش شیمیایی نشان داد که زمان لازم برای انحلال نمکهای قلیایی کربنات مس (مالاکیت و آزوریت) در گلیسرول قلیایی ۳ ساعت، در محلول قلیایی راشل ۳ روز و در کالگن ۱۰ روز است. جدول ۵- مقایسه اثر لیزر CO<sub>۲</sub> و Nd:YAG بر روی نمکهای متراکم قطعه GD.

نوع لیزر	Nd:YAG	CO <sub>۲</sub>
مدت زمان (شرایط ثابت) (s)	۵۰۰	۱۵۰
توان متوسط (W)	۰/۱۳	۱
نتیجه کار	سطح مس سوخته شد	هیچ اثر تخریبی ایجاد نشد

جدول ۶- نتایج شناسایی نوع نمکهای خورنده قطعات G و RD2 به روش XRD.

نمک	قطعه
مالاکیت (نمک سبز) Cu <sub>۲</sub> CO <sub>۳</sub> (OH) <sub>۲</sub> آزوریت (نمک آبی) Cu (CO <sub>۳</sub> ) <sub>۲</sub> Cu(OH) <sub>۲</sub>	G
مالاکیت (نمک سبز) Cu <sub>۲</sub> CO <sub>۳</sub> (OH) <sub>۲</sub> بروشانتیت (نمک سبز) Cu <sub>۴</sub> SO <sub>۴</sub> (OH) <sub>۲</sub> کوپریت (نمک قرمز) Cu <sub>۲</sub> O	RD2

هدف از انتخاب قطعه GA2 برای پاکسازی به روش مکانیکی، در واقع مقایسه سرعت عمل و نتیجه کار با روشهای دیگر پاکسازی بوده است. نتیجه حاصل نشان داد که گرچه این روش کاملاً انتخابی است، اما بسیار وقتگیر می‌باشد و با کمترین بی



شکل ۷- تصویر میکروسکوپی از ناحیه‌ای از قطعه GD پس از پاکسازی با لیزر CO<sub>۲</sub>. جدول ۳- زمان حذف نمکهای خورنده با تراکم کمتر، از روی قطعه GD با استفاده از لیزر Nd:YAG در شرایط ثابت به روش بخار و خشک.

شرایط	خشک	بخار	
		آب	آب
زمان (s)	۱۰	۶	۴

جدول ۴- زمان حذف نمکهای خورنده متراکم، از روی قطعه GD با استفاده از لیزر Nd:YAG به روش بخار و تغییر آهنگ تکرار.

مایع به کار رفته	آب	آب	پلی اتیلن گلیکول
آهنگ تکرار (Hz)	۵	۱۰	۱
چگالی سطحی انرژی (J/cm <sup>۲</sup> )	۱/۳	۱/۳	۱/۳
توان متوسط (W)	۰/۶۳	۱/۱۸	۰/۱۳
زمان (s)	۱۰	۳۶	۴۰
نتیجه کار	نامطلوب	مطلوب	مطلوب

می‌ماند، همچنین برخلاف الکل که به سرعت تبخیر می‌شود، به دلیل جرم مولکولی زیادی که دارد، نقطه تبخیر آن نسبت به آب و الکل بالاتر است، بنابراین گرما را در خود نگهداشته و بعد به طور ناگهانی تبخیر می‌شود و این امر باعث جدا شدن (کنده شدن) نمکهای خورنده از روی سطح فلز می‌گردد. نتایج مندرج در جدول ۵ نشان می‌دهند که لیزر پالسی CO<sub>۲</sub> با توان ۱ وات بر خلاف لیزر پالسی Nd:YAG با توان متوسط ۰/۱۳ وات، هیچ اثر تخریبی بر روی سطح فلز ندارد. شایان ذکر است بر روی این قطعه قبل از پاکسازی لیزری هیچگونه پاکسازی به روش متداول انجام نشده است.



برای مهار کردن فرایند پاکسازی استفاده از اشیای حساس مطلوبتر است.

- پاکسازی به روش مکانیکی، بسیار وقتگیر بوده و لازم است که فرد مرمّنگر مهارت و تسلط کافی در کاربرد وسایل مکانیکی داشته باشد، هنگام کاربرد وسایل مکانیکی، به دلیل فشارهای وارد بر سطح، با کمترین بی‌دقتی ممکن است خسارتهای جبران‌ناپذیری در شیء ایجاد شود.

- برای زدودن نمکهای خورنده، کاربرد دو نوع لیزر Nd:YAG در طول موج  $10/6 \mu\text{m}$  و CO<sub>2</sub> در طول موج  $10/6 \mu\text{m}$  بررسی شد. نتایج حاصل نشان دادند که لایه کوپریت در طول موج  $10/6 \mu\text{m}$  لیزر CO<sub>2</sub> هیچگونه جذبی ندارد.

- سازوکار پاکسازی لیزر خشک و بخار با استفاده از سه مایع آب، اتانول و پلی‌اتیلن گلیکول مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان دادند سرعت پاکسازی، در صورت استفاده از این مواد، به صورت زیر کاهش می‌یابد.  
خشک > اتانول > آب > پلی‌اتیلن گلیکول

- بررسی تغییر آهنگ تکرار پالس لیزر نشان داد که با افزایش آهنگ تکرار، گرچه چگالی سطحی انرژی در حالت‌های مختلف ثابت می‌ماند ولی به دلیل افزایش توان متوسط، پاکسازی سطح در زمان کوتاهیتری انجام می‌گیرد.

- توانایی یک لیزر برای کندن مواد، با طول موج آن نسبت مستقیم دارد. اگر پالس لیزر به طور کامل توسط یک ماده جذب شود هر قدر پهنای پالس آن کوتاهتر باشد قدرت کندی آن بیشتر می‌شود. برای دو نوع لیزر در شرایط مساوی (از نظر انرژی و پهنای پالس)، لیزری که میزان جذب بالاتری توسط ماده داشته باشد (نمود اثرهای فیزیکی از قبیل سیاه شدن، کندی و مواردی که با چشم دیده می‌شوند) دارای قدرت بالاتری است.

- به دلیل متفاوت بودن پهنای لایه

دقتی و اعمال نیروی اضافی بر روی شیء، اثرهای جبران‌ناپذیری ایجاد خواهد شد. بنابراین توصیه می‌شود این روش فقط توسط افراد با تجربه و صلاحیت‌دار بکار رود.

### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

حذف نمکهای خورنده با استفاده از لیزر CO<sub>2</sub>، نسبت به Nd:YAG دارای برتری است، زیرا فلزات خوردگی‌ناپذیر عموماً در تابش‌های IR دور، جذب ندارند [۴] و بطوری که مشاهده شده است لایه کوپریت Cu<sub>2</sub>O در این طول موج هیچ‌گونه جذبی ندارد و بی‌تأثیر باقی می‌ماند. حرارت دادن جزئی به سطوح فلزی با لیزر CO<sub>2</sub> قابل اندازه‌گیری است [۵]. به هنگام استفاده از لیزر Nd:YAG دلیل سوخته شدن لایه کوپریت و تغییر رنگ آن از قهوه‌ای تیره با اکسایش Cu<sub>2</sub>O به CuO قابل توجیه است [۳].

نمکهای خورنده اغلب به صورت نمکهای همتافته‌اند. این نوع نمکها دارای تعدادی ترازهای انرژی ارتعاشی هستند و تنها در IR دور جذب دارند. بر این اساس می‌توان فرایند تبخیر و کنده شدن مولکول نمکهای خورنده توسط لیزر را توجیه کرد [۶]؛ جذب شدید آب در طول موج  $10/6 \mu\text{m}$  نیز به اثبات رسیده است [۷]؛ به یاری این پدیده می‌توان موضوع حذف نمکهای همتافته را مورد بررسی قرار داد. چون اکثر ترکیبات خورنده دارای آب و یا عامل OH هستند، انتظار می‌رود که این نوع مولکولها خاصیت جذب قوی داشته باشند. توانایی پیوند C-O و C-C در جذب پرتو  $10/6 \mu\text{m}$  لیزر CO<sub>2</sub> نیز گزارش شده است [۸].

- در مورد پاکسازی شیمیایی، سه محلول: گلیسرول قلیایی، راشل قلیایی و کالگن استفاده شد. سرعت پاکسازی کالگن > محلول راشل قلیایی > گلیسرول قلیایی است. زیرا سرعت پاکسازی با کالگن بسیار کندتر است؛





### تشکر و قدردانی

از اساتید ارجمند، سرکار خانم دکتر ماهرخ دادستان که راهنمائی‌های اولیه را در خصوص این پژوهش به عهده داشتند، جناب آقای دکتر حمید میرزاده سرپرست محترم آزمایشگاه لیزر پلیمر که در نهایت خلوص آزمایشگاه مذکور را در اختیار ما قرار دادند، نهایت تشکر را داریم.

از جناب آقای مهندس شاپور لاهوتی سرپرست محترم آزمایشگاه SEM مرکز تحقیقات هسته‌ای کرج، جناب آقای مهندس محمدرضا کتابداری سرپرست محترم آزمایشگاه XRD واحد اکتشاف سازمان انرژی اتمی، جناب آقای مهندس محمود قاسمی کارشناس محترم متالوگرافی آزمایشگاه متالوگرافی پژوهشکده حفاظت و مرمت، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

### پی‌نوشت‌ها:

۱- J. Asmus

۲- D. Emony

خورنده در نواحی که ضخامت و تراکم نمکها بیشتر است، مشاهده شد که حذف این نوع نمکها با هریک از روشهای شیمیایی، مکانیکی و لیزر به سختی انجام میشود. تجربه نشان می‌دهد اگر سطح قبل از تابش پالس لیزر بر روی آن به روش مکانیکی، تا اندازه‌ای یک دست شود، پاکسازی کامل سطح را می‌توان خیلی سریعتر انجام داد.

از آنجاییکه معمولاً ترکیبات اکسید و کلراید، دارای مولکولهای ساده‌ای هستند، یعنی ترازهایی ارتعاشی کمتری دارند، این امر باعث میشود که این نوع مواد نسبت به طیف گسترده‌ای از تابش IR شفاف باشند. این نوع ترکیبات تمایل دارند در تماس مستقیم با سطح فلز روی آن باقی بمانند و نزدیکی محصولات خورنده به پوسته حرارتی فلز ممکن است منجر به کاهش بازده عملیات حرارتی از طریق هدایت گرما به توده فلز شود. برای تکمیل عملیات پاکسازی و حذف این نوع ترکیبات، روشهای شیمیایی نیز پیشنهاد میشود.

### References:

1. هارولد. ج. پلندرلیت، "حفاظت، نگهداری و مرمت آثار هنری و تاریخی"، (ترجمه دکتر رسول وطن دوست). تهران: انتشارات دانشگاه هنر. (تاریخ انتشار به زبان اصلی ۱۹۱۲)، (۱۳۷۶).
2. M. Cooper, "Laser cleaning in conservation," Butter-Worth-Heinemann, 7 (1998).
3. A.C. Tam, W.P. Leung, W. Zapka, W. Ziemlich, "Laser cleaning techniques for removal of surface particulate," J, Appl. Phys, 71(7) (1992).
4. A.M. Prokhorov, V.I. Konov, I. Ursu, I.N. Mihailescu, "Laser heating of metals," Adam Hilger. Bristol, 18 (1990).
5. J.F. Ready, "Effects of high-power laser radiation," London: Academic Press, 73 (1965).
6. K. Nakamota, "Infrared spectra of inorganic and coordination compounds," John Wiley & Sons, 67 (1963).
7. W.W. Dudely, "CO2 laser: effects and applications," London: Academic Press, 345 (1970).
8. E. Grunwald, D.F. Dever, F. Kean, "In high-power infrared laser chemistry," Russian translation Moscow, 45 (1981).