



استفاده از تکنیک لیزری برای ایجاد مستقیم ساختارهای منظم در سطح استیل ضد زنگ؛ رهیافتی برای تولید الگوهای متناوب در سطح فلزات

سپهر رازی^۱، محمود ملاحی^۲، خسرو معدنی پور^۳، سهیلا جوادیان^۴

^۱. گروه فیزیک اتمی مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران (دانشجوی دکتری)

^۲. گروه فیزیک اتمی مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران (استاد)

^۳. پژوهشکده اپتیک، لیزر و فوتونیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (دانشیار)

^۴. پژوهشکده اپتیک، لیزر و فوتونیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (دانشجوی دکتری)

چکیده

در این مقاله قابلیت تکنیک پیرایش لیزری برای الگودهی مستقیم سطوح فلزی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ورقه هایی از جنس استیل ضد زنگ ۳۱۶ L در اتمسفر هوا، در معرض پالس هایی متوالی از لیزر Nd:YAG با دوام پالس ۱۲ نانوثانیه، قرار گرفتند. میکروسکوپ الکترونی، SEM، بیناب نمایی EDX و تکنیک های پردازش تصویر سه بعدی برای ارزیابی تحولات شیمیایی، ساختاری و مورفولوژی القا شده در سطح بکار گرفته شدند. پس از بررسی تاثیر طول موج و شاریدگی لیزر فرودی، مشخص گردید که تکنیک لیزری، روشی توانمند برای ایجاد ساختارهای منظم در سطوح فلزی بوده و با کنترل پارامترهای لیزری، ایجاد میکروساختارهای متنوع و حتی ساختارهای متناوب خطی در سطح استیل امکان پذیر می باشد. در این مقاله ضمن معرفی چندین مورد از حالت های بهینه برای ایجاد میکروساختارهای سطحی، پیشنهاداتی نیز در مورد مکانیسم تشکیل آن ها ارائه گردیده است.

واژه های کلیدی: لیزر، سطح، مورفولوژی، پلوم پلاسمایی، امواج شوک، ناپایداری های هیدرودینامیکی

^۱. Sepehr.razi@gmail.com, s_razi@iust.ac.ir

مقدمه

ایجاد میکرو و نانوساختارهای سطحی در مواد مختلف دارای کاربردهای متعدد صنعتی و پزشکی همچون ساخت ادوات نانو الکترونیک یا اپتوالکترونیک، سیستم‌های ذخیره سازی اطلاعات، کنترل خواص مکانیکی و اپتیکی جامدات، مهندسی پزشکی و بهبود کیفیت ایمپلنت های اورتوپدی می‌باشند [۱-۳]. در بین روش های پردازش سطح، روش لیزری در حال حاضر از موفق ترین و انعطاف پذیرترین روش‌ها، برای میکرو و نانو ماشین کاری مواد مختلف می باشد. این تکنیک از مکانیسم های فیزیکی بهره مند می‌شود که در شرایط بهینه منجر به ایجاد ساختارهای دو و سه بعدی در سطح فلزات، نیمه رساناها، مواد شفاف اپتیکی و پلیمرهای تابش دیده با پرتوهای لیزری می‌گردد [۲، ۴]. با پیشرفت‌های تحقق یافته در مهندسی لیزر که منجر به تولید پالس های کوتاه نانو ثانیه و فوق کوتاه فمتو ثانیه و کیفیت پرتو با بازده اید آل شده است، توسعه تکنیک های میکرو و نانوماشین کاری لیزری مواد تشدید پیدا کرده است.

در این کار پژوهشی بر روی بررسی قابلیت تکنیک لیزری در کنترل ساختار و مورفولوژی سطح استیل ضد زنگ ۳۱۶ L تمرکز شده است. این نوع از استیل های ضد زنگ به دلیل خواص منحصر بفردی همچون مقاومت بسیار بالا در برابر خوردگی دارای کاربردهای متعدد صنعتی و پزشکی می‌باشند و در بسیاری از موارد موفقیت و یا شکست آنها در کاربردهای گوناگون ارتباط مستقیمی با ویژگی های سطحی از جمله مورفولوژی آنها دارد.

مواد و روش تحقیق

در این مقاله بنا به کاربردهای گسترده صنعتی و پزشکی استیل های ضد زنگ، اندرکنش لیزر Nd:YAG با ورقه هایی از جنس استیل ضد زنگ ۳۱۶ L با ابعاد $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^2$ به منظور الگودهی تک مرحله ای و مستقیم سطوح آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. ترکیب و مشخصات عنصری مربوط به نمونه های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور دستیابی به شرایط اولیه معین و یکنواخت، نمونه ها بصورت مکانیکی تا زبری متوسط 341 nm پولیش کاری شدند. برای رهایی از آسیب های احتمالی سمباده زنی، از محیط آبی استفاده گردید. حضور آب علاوه بر خنک سازی نمونه و جلوگیری از آسیب های مکانیکی و حرارتی، باعث شستشوی نمونه ها و دور کردن ذرات و براده های ایجاد شده می‌گردد. در مرحله بعد نمونه ها در محیط استون به مدت ۲۰ دقیقه در حمام فراصوت مورد شستشو قرار داده شدند و در نهایت با آب دوبار یونیزه با PH خنثی آبکشی شدند .

به منظور تابش دهی نمونه ها از لیزر پر توان Nd:YAG با کلید زنی Q استفاده گردید. پارامترهای لیزری مورد استفاده در طول آزمایش بصورت خلاصه در جدول ۲ اشاره شده اند. شکل ۱ شماتیکی از چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده برای اندرکنش پرتو لیزر با نمونه ها را نشان می‌دهد. به منظور اسکن کردن کل سطح

نمونه، از جابجایگر سه بعدی با دقت میکرومتری استفاده شد و با جابجایی هایی به اندازه قطر لکه لیزر کل سطح جاروب گردید.

میکروسکوپ الکترونی روبشی، بیناب نمایی پرتو ایکس EDX و تکنیک های پردازش تصویر سه بعدی برای مطالعه هر چه دقیق تر تغییرات ایجاد شده در مورفولوژی و شیمی سطح نمونه های پردازش شده بکار گرفته شدند.

نتایج و بحث

پدیده های متعدد فیزیکی همچون تولید امواج شوک، افزایش فشار موضعی، پدیده های حرارتی و هیدرودینامیکی در اندرکنش لیزرهای نانو ثانیه با سطوح فلزی در گیر می باشند که علی رغم مطالعات بسیار گسترده تجربی و مدل بندی های ریاضی، جزئیات و شرایط واقعی بسیاری از آن ها هنوز مشخص نیست. هر یک از این پدیده ها تاثیر چشمگیری بر روی خواص سطح نمونه های پردازش شده با این تکنیک داشته و لذا کلیه عملکردهای مرتبط با سطح آن ها را می توانند تحت تاثیر قرار دهند. شکل ۲ تصاویر SEM سطح نمونه های استیل پیرایش شده با تعداد ۲۰۰۰ پالس متوالی از فوتون های فرو سرخ با طول موج 1064nm را نمایش می دهد. بنا به این نتایج، تابش دهی با شاریدگی های پایین تا حد 1 J/Cm^2 نیز باعث ایجاد میکروساختارهای سطحی بر روی نمونه ها گردیده است.

در مورد نحوه تشکیل این چنین ساختارهای سطحی به نظر می رسد که جذب انرژی تابش الکترومغناطیسی فرودی توسط الکترون های آزاد سطحی در فلز مورد مطالعه باعث افزایش انرژی جنبشی آن ها می گردد. این انرژی از طریق ارتعاش فونون ها و کوپلاژ الکترون - فونون از سطح به حجم ماده و کل شبکه منتقل گردیده و باعث افزایش درجه حرارت ماده تا روی دادن پدیده های ذوب سطحی می گردد. مدت زمان انتقال انرژی حرارتی به حجم در محدوده پیکوثانیه است [۲] که به مراتب بسیار کمتر از دوام پالس لیزری می باشد. از آنجاییکه استیل دارای رسانندگی حرارتی بالایی می باشند، انرژی دریافتی به سرعت از ناحیه تابش دیده منتقل گردیده و جامد شدن مجدد ناحیه ذوب شده تحقق پیدا می کند و ساختارهایی سطحی تثبیت می گردند.

با افزایش شدت لیزر فرودی میزان انرژی منتقل شده به ماده افزایش یافته و لذا حجم بیشتری از ماده در اندرکنش در گیر خواهد بود و ساختارهایی به مراتب بزرگ تر برای شاریدگی های لیزری ۲ و 3 J/Cm^2 مشاهده گردیدند. به منظور درک بهتر الگوهای ساختاری ایجاد شده، از تکنیک های پردازش تصویر سه بعدی استفاده گردید که نتایج آن در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج به خوبی نحوه تغییرات مورفولوژی سطح و دانه بندی ها با افزایش شاریدگی فرودی از ۱ تا 3 J/Cm^2 را نمایش می دهند.

با تغییر طول موج از ناحیه فرو سرخ به ناحیه مرئی، 532nm ، الگوهای سطحی ایجاد گردیده بصورت چشمگیری تغییر یافتند. تصاویر SEM مربوط به اصلاح سطح با شاریدگی 1 J/Cm^2 ، نشانگر صاف شدن سطح نمونه می باشند، شکل ۴-A. الگوی سه بعدی با تفکیک پذیری بالای حاصل از پردازش تصویر نیز ضمن تایید افزایش یکنواختی و صاف شدگی سطح، عدم وجود ساختارهای مشخصی را نمایش می دهد، شکل ۵-A. با

افزایش شاریدگی لیزر فرودی از 1 J/Cm^2 تا 3 J/Cm^2 ، ساختارهای متناوب خطی بر روی سطح ملاحظه گردیدند که فاصله متوسط بین خطوط در شاریدگی 2 J/Cm^2 ، $15 \mu\text{m}$ و در شاریدگی 3 J/Cm^2 به $24 \mu\text{m}$ رسیدند. بنا به مطالعات ما، برخلاف لیزرهای فمتوثانیه پرتوان، ساختارهای متناوب خطی ارائه شده در این مقاله تا کنون در هیچ یک از پژوهش‌های قبلی تحقق یافته با استفاده از لیزرهای نانوثانیه گزارش نشده اند.

با توجه به اینکه جذب کلیه فلزات در ناحیه مرئی به مراتب بیشتر از ناحیه فرورسرخ می‌باشد [۵] در اندرکنش پرتوهای با طول موج 532nm با استیل، بخش بیشتری از انرژی به ماده منتقل می‌گردد. بنا به این مهم، به نظر می‌رسد که عمق حوضچه مذاب نسبت به پرتوهای فرورسرخ در شرایط یکسان بیشتر بوده است. دست یابی به سطح با یکنواختی بالا بعد از تابش دهی استیل با شاریدگی 1 J/Cm^2 در طول موج 532nm نشانگر ذوب شدن یکنواخت سطح و دوباره جامد شدن آن می‌باشد. ایجاد ساختارهای متناوب خطی در سطح نمونه‌های تابش دیده با شاریدگی‌های بالاتر 2 و 3 J/Cm^2 را می‌توان به افزایش فشار پلاسمایی در سطح و ناپایداری‌های هیدرودینامیکی ربط داد. با افزایش شاریدگی لیزر فرودی، پلوم پلاسمایی شدیدتری در سطح ایجاد می‌گردد که فشار حاصل از آن و حضور امواج شوک، بویژه در حوضچه‌های مذاب عمیق، باعث پس زنی مذاب به اطراف و ایجاد امواج سطحی، میکروبرآمدگی و نوارهای سطحی می‌گردد. در این مرحله دینامیک سیالات و ناپایداری‌هایی چون ناپایداری‌های کلونین - هلمهولتز و یا رایلی - تیلور در تعیین شکل نهایی ساختار سطحی نقش اصلی را بازی می‌کنند. بنا به مطالعات مورفولوژی تحقق یافته با میکروسکوپ SEM، هیچ گونه آسیب سطحی همچون ترک و یا حفره‌های سطحی در نتایج نهایی ملاحظه نگردید، که این به نوبه خود نشانگر کیفیت این روش می‌باشد.

پیشتر گروه‌های پژوهشی متعددی [۶-۸] ایجاد چنین نانو ساختارهای متناوب خطی را با استفاده از لیزرهای فمتوثانیه گزارش کرده‌اند. در اغلب موارد دلیل اصلی تشکیل این چنین ساختارهایی، تداخل بین امواج فرودی و امواج و پلاسمون‌های سطحی موجود اشاره شده‌اند که در برخی از شرایط بهینه، ساختارهای با تناوب کمتر از طول موج لیزر فرودی نیز گزارش گردیده‌اند. برخی از این پژوهشگران [۸] ایجاد این چنین ساختارهایی را در شاریدگی‌های متوسط و پایین لیزری امکان‌پذیر دانسته و این پدیده را به دینامیک سیالات ربط داده‌اند. در اینجا با توجه به اینکه فاصله بین خطوط ایجاد گردیده در محدوده 20 میکرومتری بوده و با عنایت به وجود تفاوتی جدی در مکانیسم اندرکنش لیزرهای نانوثانیه با فمتوثانیه، به نظر می‌رسد که دینامیک سیالات نقش غالب در تعیین ساختارهای نهایی را ایفا می‌کند.

تغییر رنگ ملاحظه شده بعد از تابش دهی نمونه‌های استیل می‌تواند نشانه‌ای از تغییرات تحقق یافته در شیمی سطح نمونه‌ها باشد. برای مطالعه هرچه دقیق‌تر تحولات روی داده از بیناب نمایی پرتو ایکس EDXs استفاده گردید که نتایج آن برای نمونه پیرایش شده با شاریدگی لیزری 2 J/Cm^2 و تعداد 2000 پالس متوالی در شکل ۶ نمایش داده شده است. نتایج نشانگر افزایش چشمگیر میزان اکسیژن روی سطح، بعد از تابش دهی می‌باشند، بطوریکه قبل از تابش دهی هیچ پیک اکسیژنی در سطح ماده مشاهده نشد ولی بعد از تابش دهی، درصد اتمی

اکسیژن به ۴۱/۳۷٪ رسید. افزایش میزان اکسیژن سطحی در هر دو طول موج لیزری مورد مطالعه ملاحظه گردید. اینچنین افزایش چشمگیر اکسیژن را می‌توان به ذوب سطحی نمونه در حین تابش دهی و پخش اکسیژن محیطی در مذاب ربط داد. مشخص گردیده است که تغییرات در میزان اکسیژن سطح فلزات در بسیاری از خواص آن از جمله خوردگی، مقاومت سایشی و ترشوندگی آن‌ها تاثیر چشمگیری داشته و بطور کلی سطوح با میزان اکسیژن بالاتر آبدوست تر می‌باشند [۹].

نتیجه‌گیری

تغییرات القاشده در مورفولوژی سطح استیل ضد زنگ ۳۱۶L توسط پالس‌های متوالی از لیزر Nd:YAG مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشانگر وابستگی شدید مورفولوژی سطحی ایجاد شده به طول موج و شدت لیزر فرودی می‌باشند. در تابش دهی نمونه‌ها با طول موج فرسرخ ۱۰۶۴ nm میکروساختارهایی در سطح نمونه‌ها مشاهده گردیدند که با افزایش انرژی و شدت لیزر فرودی ابعاد آن‌ها افزایش یافتند. ذوب شدن سطح در اثر انتقال انرژی لیزر و دوباره جامد شدن سریع آن دلیل اصلی تشکیل اینچنین ساختارهایی عنوان گردید. در تابش دهی نمونه‌ها با استفاده از طول موج ۵۳۲ nm، ساختار و مورفولوژی کاملاً متفاوتی نسبت به شرایط مشابه در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر ملاحظه گردید. در شاریدگی 1 J/Cm^2 سطحی صاف و بدون هیچ ساختار مشخصی حاصل شد و با افزایش شدت لیزر فرودی ساختارهای متناوب خطی در سطح نمونه‌ها مشاهده گردیدند. برخلاف لیزرهای فمتوثانیه پرتوان، ساختارهای متناوب خطی ارائه شده در این مقاله تا کنون در هیچ یک از پژوهش‌های قبلی تحقق یافته با استفاده از لیزرهای نانوثانیه گزارش نشده‌اند.

افزایش چشمگیر ضریب جذب ماده در طول موج‌های مرئی نسبت به ناحیه فرسرخ دلیل عمده این تفاوت عنوان گردید. نتایج بخوبی نشان دادند که پدیده‌های هیدرودینامیکی همچون ناپایداری‌های رایلی-تیلور و کلون-هلمهولتز نقش مهمی را در تعیین مورفولوژی نهایی سطوح پیرایش شده با طول موج مرئی دارا می‌باشند و با افزایش شاریدگی لیزر فرودی، پلوم پلاسمایی شدیدتری در سطح ایجاد می‌گردد که فشار حاصل از آن و حضور امواج شوک، بویژه در حوضچه‌های مذاب عمیق ایجاد شده در طول موج مرئی، باعث پس زنی مذاب به اطراف و ایجاد امواج سطحی، میکرو برآمدگی و نوارهای سطحی می‌گردد. در این مرحله دینامیک سیالات و ناپایداری‌های هیدرودینامیکی در تعیین شکل نهایی ساختار سطحی نقش اصلی را بازی می‌کنند.

در کنار تحولات مورفولوژی سطح، بنا به گذار از فاز جامد به مایع و جذب اکسیژن محیطی، افزایش چشمگیری در میزان اکسیژن سطحی نمونه‌های پیرایش شده با هر دو طول موج مورد مطالعه ملاحظه گردید که به نوبه خود قادر است بر روی ویژگی‌های خوردگی، سایشی و ترشوندگی نمونه‌ها تاثیر گذار باشد. بنابراین روش پیرایش لیزری بر پایه لیزرهای نانوثانیه پالسی، روشی توانمند و تک مرحله‌ای برای دستیابی به تغییراتی در شیمی سطح، کنترل اندازه دانه بندی‌ها، ایجاد میکروساختارهای منظم و یا حتی الگوهای متناوب خطی بر روی استیل ضد زنگ، بدون هیچ گونه آسیب‌های مکانیکی همچون حفره‌ها و یا ترک‌های سطحی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بدین وسیله از حمایت های جناب آقای دکتر رسول اژنیان، مدیریت محترم آزمایشگاه لایه نازک دانشگاه علم و صنعت ایران کمال تشکر و قدردانی را دارا می باشند.

مراجع

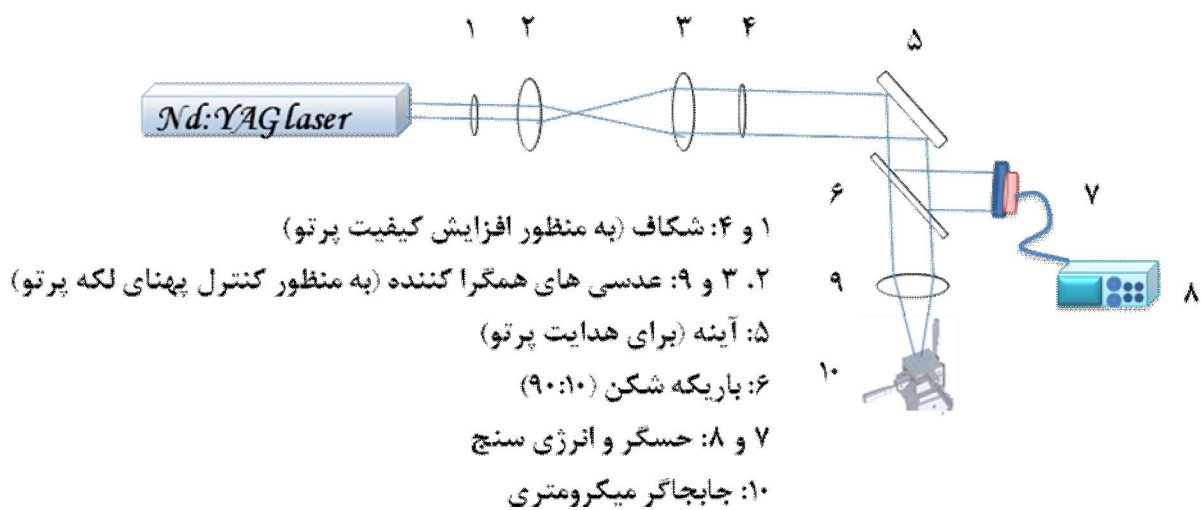
۱. Kabashin A.V., Delaporte Ph., Pereira A., Grojo D., Torres R., Sarnet Th., Sentis M, "Nanofabrication with Pulsed Lasers", Nanoscale Research Letters, ۵, ۲۰۱۰, ۴۵۴-۴۶۳
۲. I.N. Zvestovskaya, "Laser nanostructuring of materials surfaces", Quantum Electronics ۴۰, ۲۰۱۰, ۹۴۲-۹۵۴
۳. Jorge Lehr, Anne-Marie Kietzig, "Production of homogenous micro-structures by femtosecond laser micro-machining", Optics and Lasers in Engineering, ۵۷, ۲۰۱۴, ۱۲۱-۱۲۹
۴. M.S. Trtica, B.M. Gakovic, B.B. Radak, D. Batani, T. Desai, M. Bussoli, "Periodic surface structures on crystalline silicon created by ۵۳۲ nm picosecond Nd:YAG laser pulses", Applied Surface Science, ۲۵۴, ۲۰۰۷, ۱۳۷۷-۱۳۸۱
۵. L. Quintino, A. Costa, R. Miranda, D. Yapp, V. Kumar and C. J. Kong, "Welding with High Power Fiber Lasers – A Preliminary Study", Materials & Design, ۲۸, ۲۰۰۷, ۱۲۳۱-۱۲۳۷
۶. Shuangshuang Hou, Yanyan Huo, Pingxin Xiong, Yi Zhang, "Formation of long- and short-periodic nanoripples on stainless steel irradiated by femtosecond laser pulses", J. Phys. D: Appl. Phys. ۴۴, ۲۰۱۱, ۵۰۵۴۰۱-۴۰۷
۷. J. Vincenc Obona, V. Ocelík, J.Z.P. Skolski, V.S. Mitko, "On the surface topography of ultrashort laser pulse treated steel surfaces", Applied Surface Science, ۲۵۸, ۲۰۱۱, ۱۵۵۵-۱۵۶۰
۸. A.Y. Vorobyev, Chunlei Guo, "Femtosecond laser nanostructuring of metals", Optics Express, ۱۴, ۲۰۰۶, ۲۱۶۴
۹. L. Hao, J. Lawrence, L. Li, "The wettability modification of bio-grade stainless steel in contact with simulated physiological liquids by the means of laser irradiation", Applied Surface Science, ۲۴۷, ۲۰۰۵, ۴۵۳-۴۵۷

جدول ۱: ترکیب عنصری استیل ضد زنگ مورد مطالعه

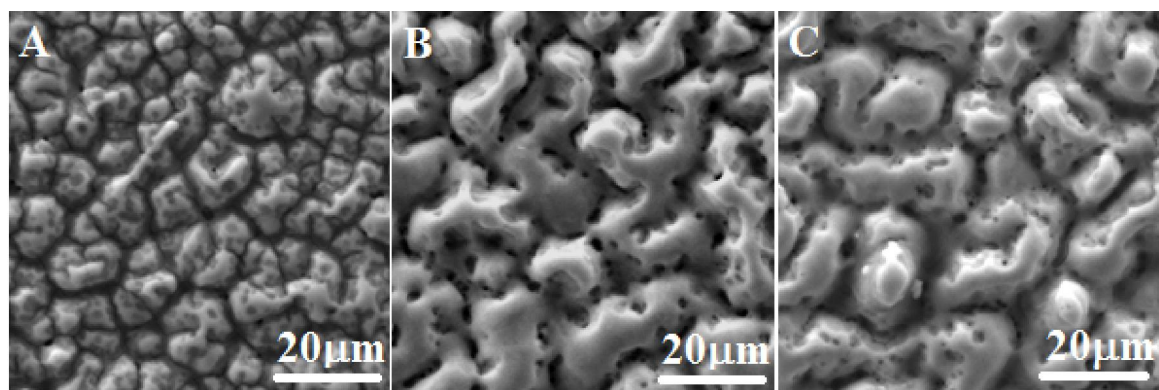
۳۱۶L SS											
Element	Cr	Ni	Mo	Si	Co	S	P	C	N	Mn	Fe
Wt%	۱۶.۸۲	۱۰.۱۴	۲.۰۳	۰.۵۵	۰.۰۸	۰.۰۳	۰.۰۳	۰.۰۲	۰.۰۶۱	۱.۵۱	۶۸.۷۲

جدول ۲: پارامترهای لیزری بکار گرفته شده برای پیرایش نمونه ها

Parameter	Value
Wavelength (nm)	۱۰۶۴، ۵۳۲
Operation mode	TEM۰۰
Pulse width (ns)	۱۲
Pulse repetition rate (HZ)	۵
Spot size (mm)	۳
Laser fluency (J/Cm^2)	۱ - ۳
Pulses per spot	۲۰۰۰

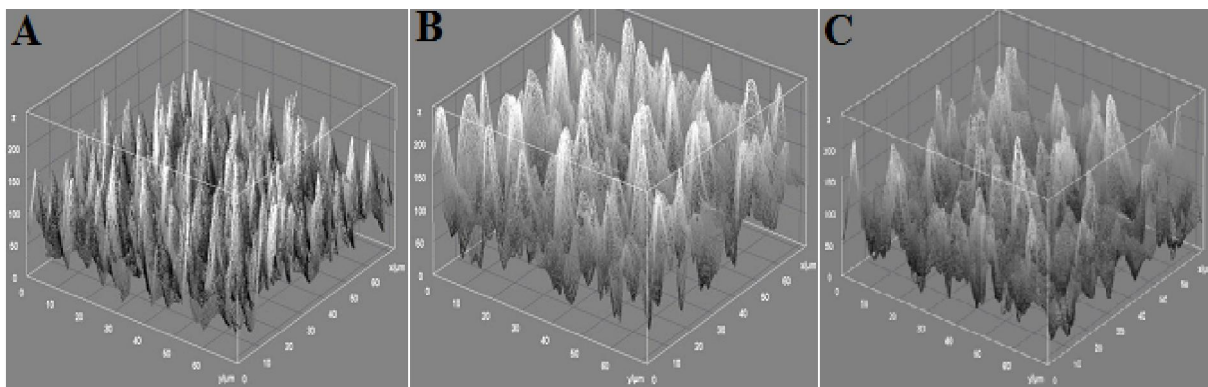


شکل ۱: شماتیک چیدمان آزمایشگاهی بکار گرفته شده برای پیرایش لیزری نمونه ها

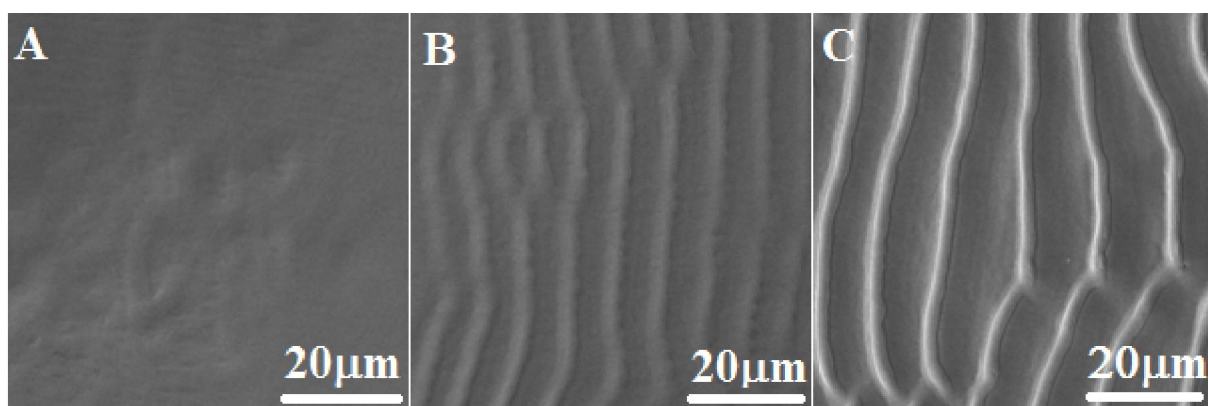


شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ SEM مربوط به سطح نمونه های پیرایش شده با شاریدگی لیزری (A) ۱ (B) ۲ و (C)

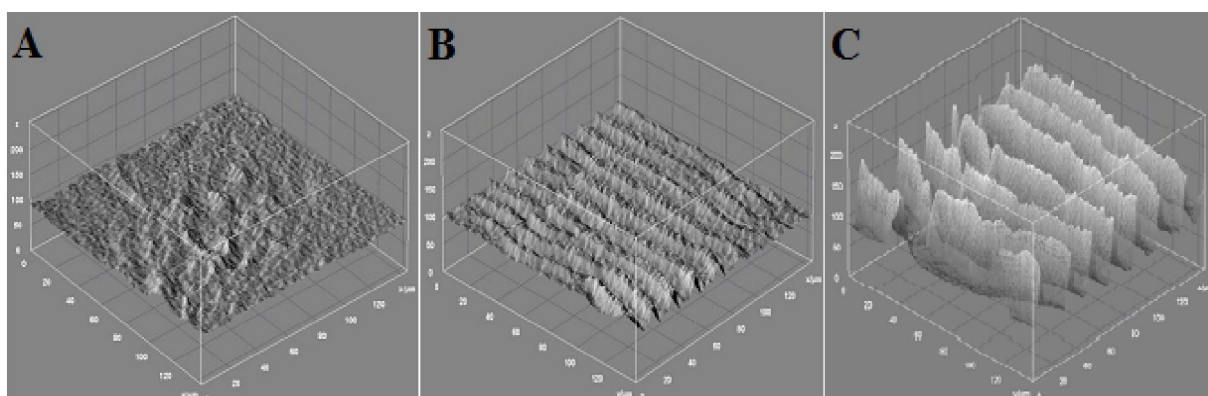
۳ J/Cm^2 و تعداد ۲۰۰۰ پالس متوالی ($\lambda = 1064 \text{ nm}$)



شکل ۳: تصاویر حاصل از پردازش سه بعدی تصویر الگوهای ایجاد گردیده بر روی نمونه های پیرایش شده با شاریدگی لیزری ۱(A) ۲ و (B) ۳ و تعداد ۲۰۰۰ پالس متوالی ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) (C) 3 J/Cm^2

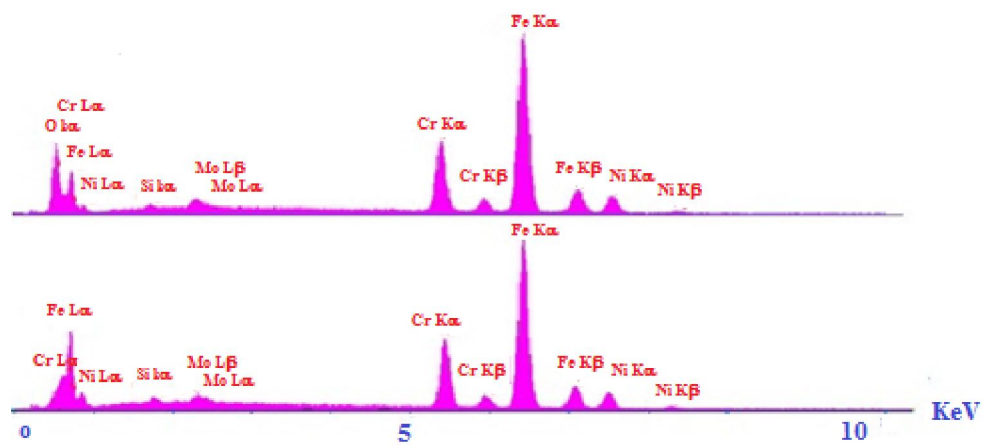


شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ SEM مربوط به سطح نمونه های پیرایش شده با شاریدگی لیزری ۱(A) ۲ و (B) ۳ و تعداد ۲۰۰۰ پالس متوالی ($\lambda = 532 \text{ nm}$) (C) 3 J/Cm^2



شکل ۵: تصاویر حاصل از پردازش سه بعدی تصویر الگوهای ایجاد گردیده بر روی نمونه های پیرایش شده با شاریدگی لیزری ۱(A) ۲ و (B) ۳ و تعداد ۲۰۰۰ پالس متوالی ($\lambda = 532 \text{ nm}$) (C) 3 J/Cm^2

پانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۶: آنالیز EDXs سطح نمونه های استیل قبل (نمودار پایین) و بعد از پیرایش توسط شاریدگی لیزی 2 J/Cm^2 و ۲۰۰۰ تعداد پالس متوالی در طول موج 532 nm (نمودار بالایی)