



تأثیر پرتو لیزر اگزایمر ArF بر روی پلی‌مر آلایل دی‌گلیکول کربنات

بابک ژاله*^۱، رامین فضل‌علی^۲، عاطفه نصری^۱، مه‌ران طاهری^۳

۱. گروه فیزیک، دانشگاه بوعلی سینا، صندوق پستی: ۶۵۱۷۴، همدان - ایران

۲. گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، کد پستی: ۱۵۷۴۳-۶۵۱۸۱، همدان - ایران

۳. امور حفاظت در برابر اشعه‌ی کشور، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

چکیده: در این مقاله تأثیر پرتو فرابنفش لیزر اگزایمر ArF با طول موج ۱۹۳ نانومتر بر روی پلی‌مر آلایل دی‌گلیکول کربنات (CR-39) بررسی شده است. ابتدا پلی‌مرها به سه دسته تقسیم شدند. دسته‌ی اول، زیر آستانه‌ی نورکندگی و دسته‌ی دوم، بالای آستانه‌ی نورکندگی، با تعداد تپ‌های متفاوت لیزر ArF پرتو دهی شدند. دسته‌ی سوم ابتدا زیر آستانه‌ی نورکندگی با لیزر ArF و سپس با ذره‌های آلفای گسیلیده از ²⁴¹Am پرتو دهی و سپس به طور شیمیایی در محلول آبی سدیم هیدروکسید ۶٫۲۵ مولار سونیده شدند. برای بررسی تغییر در ریخت‌شناسی سطح پلی‌مر، از میکروسکوپی الکترون پویشی (SEM) و برای تحلیل و بررسی ردپاهای ذره‌های آلفای ثبت شده در پلی‌مر آلایل دی‌گلیکول کربنات از میکروسکوپ نوری استفاده شد. نتیجه‌ها نشان داد که ساختارهای کرم‌مانند و تعدادی مخروط بر اثر پرتو دهی لیزری روی سطح پلی‌مر ایجاد می‌شود. هم‌چنین مشاهده شد که قطر میانگین ردپاها کاهش می‌یابد. بنابراین لیزر باعث سخت شدن سطح آشکار ساز می‌شود.

کلیدواژه‌ها: لیزر اگزایمر ArF، پرتو دهی پلی‌مر آلایل دی‌گلیکول کربنات (CR-39)

Effect of ArF excimer laser irradiation on allyldiglycol carbonate (CR-39) polymer

B. Jaleh*¹, R. Fazl Ali², A. Nasri¹, M. Taheri³

1. Department of Physics, Bu-Ali Sina University, P.O.Box: 65174, Hamedan - Iran

2. Department of Physics, Islamic Azad University of Hamedan, Postcode: 15743-65181, Hamedan - Iran

3. National Radiation Protection Department, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

Abstract: In this paper, the effect of ArF excimer laser (193 nm) irradiation on CR-39 polymers was investigated. The polymers were divided into three sets. The first set of polymers was irradiated with ArF laser below the ablation threshold fluence and the second set was irradiated above the ablation threshold fluence with different number of pulses. The third set of polymers was irradiated with ArF laser (below the ablation threshold fluence) and then was exposed to alpha particles emitted from ²⁴¹Am. After that, the samples were chemically etched in a 6.25 N NaOH solution. The morphology of the samples was investigated by a scanning electron microscope (SEM) and the registered tracks of alpha particles were investigated using an optical microscope. The results showed that worm-like structures and several cones were formed on the polymer surfaces due to laser irradiation and also the tracks diameter was decreased. So, the surface of the polymer was hardened due to irradiation.

Keywords: ArF excimer laser, CR-39 irradiation



۱. مقدمه

ردپای هسته‌ای به دما، غلظت محلول سونش و مدت زمان سونش بستگی دارد [۱، ۷]. پژوهش‌های زیادی بر روی پلی‌مر آلیل دی‌گلیکول کربنات^(۱) با فرمول شیمیایی $C_{12}H_{18}O_7$ انجام و حساسیت این پلی‌مر در پاسخ به ذره‌های آلفا، الکترون، گاما، نوترون و شکافت-پاره‌ها بررسی شده است [۷-۱۷]. هم‌چنین تأثیر لیزر بر حساسیت آشکارساز CR-۳۹، توسط چندین پژوهش‌گر بررسی شده است [۱۸-۲۳]. نتیجه‌های آن‌ها به طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. در جدول ۱ پژوهش‌های دیگری که تأثیر لیزرهای فرابنفش بر روی CR-۳۹ را گزارش کرده‌اند، نیز آورده شده است. در شکل ۱ ساختار مونومری پلی‌مر CR-۳۹ نشان داده شده است. CR-۳۹ دارای مقاومت سایشی بالا و چگالی آن نصف چگالی شیشه است. ضریب شکست آن از شیشه کم‌تر و برابر ۱٫۴۹۸ است. از این پلی‌مر برای ساخت شیشه‌ی عینک و لنز عینک آفتابی استفاده می‌شود. CR-۳۹ دارای چگالی برابر با $۱٫۳ \text{ g cm}^{-۳}$ و در برابر بسیاری از حلال‌ها، مواد شیمیایی و تابش گاما مقاوم است [۱۷، ۲۴].

تابش لیزرهای اگزایمر بر سطح پلی‌مرها می‌تواند، موجب ایجاد فرایند نورکندگی شود. در این فرایند پیوندهای زنجیره‌ی پلی‌مری توسط فوتون‌های پراثرژی فرابنفش شکسته و قطعه‌های ایجاد شده به بیرون پرتاب می‌شوند. بر اثر فرایند نورکندگی، ریزساختارها، بر سطح پلی‌مر ایجاد می‌شوند [۱، ۲]. تشکیل ریزساختارهای مخروطی شکل بر سطح پلی‌مرها و علت ایجاد آن توجه زیادی را به خود جلب کرده است. برخی از نویسندگان علت ایجاد ساختارهای مخروطی شکل را وجود ناخالصی در سطح پلی‌مر دانسته‌اند [۲، ۳، ۴، ۵]. برخی دیگر افزایش کربن در سطح پلی‌مر و ایجاد فرایند اتصال‌های عرضی را عامل ایجاد این ساختارها دانسته‌اند [۵، ۶].

علاوه بر این، عبور پرتوهای یوننده از میان آشکارسازهای پلی‌مری، منجر به ایجاد ردپا می‌شود. سونش شیمیایی، روشی متداول برای آشکارسازی ردپاهای ایجاد شده است. زمانی که پلی‌مر با یک محلول سونش مناسب مثلاً هیدروکسیدهای قلیایی مانند محلول‌های آبی NaOH یا KOH سونیده می‌شود، این ردپاها آشکار می‌شوند. سرعت سونش کلی در آشکارسازهای

جدول ۱. اثرهای لیزرهای متفاوت بر روی آشکارسازهای ردپای هسته‌ای

نتیجه‌ها	تابش هسته‌ای	لیزر	پلی‌مر	نویسندگان
افزایش V_T و V_B ، تشکیل ریزساختارهای متخلخل نامنکن	شکافت-پاره	CO_2 (۶۰۰، ۱۰ نانومتر)	CR-۳۹	کوکرجا و همکاران [۹] (۱۹۸۷)
کاهش D ، فرایند نرم‌شدگی در دز کم‌تر از $۳۰ \text{ J cm}^{-۲}$ ، فرایند سخت‌شدگی در دزهای بالاتر از $۳۰ \text{ J cm}^{-۲}$ زیر آستانه‌ی نورکندگی	شکافت-پاره	$XeCl$ (۳۰۸ نانومتر)	CR-۳۹	آبوجاراد و همکاران [۱۱، ۱۰] (۱۹۹۱، ۱۹۹۲)
کاهش D ، فرایند اتصال‌های عرضی و اثر سخت‌شدگی سطحی، ساختار مخروطی شکل	آلفا	KrF (۲۴۸ نانومتر)	پلی‌کربنات	ژاله و همکاران [۱۲] (۲۰۰۴)
کاهش V_T و V_B برای نمونه‌های پیش‌پرتوده‌ی شده با دزهای بین ۴۰ تا $۶۰ \text{ J cm}^{-۲}$ برای نمونه‌های پیش‌پرتوده‌ی شده و پس‌پرتوده‌ی شده، کم‌تر از نمونه‌ی مرجع (تنها آلفا) است. V_B با پیشرفت فرایند سونش کاهش می‌یابد و این کاهش برای نمونه‌های پیش‌پرتوده‌ی شده بیش‌تر است. ایجاد فرایند اتصال‌های عرضی، سخت‌شدگی و قطع زنجیره و نرم‌شدگی	آلفا	UV-In: YAG (۲۶۶ نانومتر)	CR-۳۹	دوایکت و همکاران [۱۳، ۱۴] (۲۰۰۸، ۲۰۰۷)
اتصال‌های عرضی، قطع زنجیره، تشکیل ریزموج‌ها ^(۳) و نانوتپه‌ها ^(۳)	-	Ti: sapphire (۸۰۰ نانومتر)	CR-۳۹	بشیر و همکاران [۱۹، ۲۰] (۲۰۰۹، ۲۰۱۲)
قطع زنجیره، اتصال‌های عرضی و شکل‌گیری پیوندهای جدید، افزایش جذب غیرخطی CR-۳۹	-	Ti: sapphire (۸۰۰ نانومتر)	CR-۳۹	شهید رفیق و همکاران [۲۱] (۲۰۱۰)
کاهش V_B ، افزایش E_T برای نمونه‌های پیش‌پرتوده‌ی شده، تغییر ناچیز در E_B ، اتصال‌های عرضی و سخت‌شدگی	آلفا	لیزر زیرقرمز (۱۰۶۴ نانومتر)	CR-۳۹	صفارینی و همکاران [۱۵] (۲۰۱۲)
تشکیل ساختارهای مخروطی شکل به ازای ۵۰ تا $۶۰ \text{ mJ cm}^{-۲}$ افزایش چگالی ردپاها	آلفا	اگزایمر (۱۵۷ نانومتر)	CR-۳۹	ذکریا و اسکات [۱۷] (۲۰۱۰، ۲۰۱۳)
افزایش V_B با افزایش مدت زمان پرتوده‌ی با لیزر، نرم شدن سطح پلی‌مر و قطع زنجیره، کاهش گاف انرژی و جابه‌جایی آن به محدوده‌ی نیم‌رساناها	آلفا	نودیم-یاگ (۲۶۶ نانومتر)	CR-۳۹	فاروغ و همکاران [۲۲] (۲۰۱۳)
تشکیل ریزترازه ^(۴) و تشکیل ریزساختار پویشی ^(۵) در دزهای بسیار بالا	-	ArF (۱۹۳ نانومتر)	CR-۳۹	پروین و همکاران [۱۸] (۲۰۱۴)
تشکیل ریزساختارها در سطح پلی‌مر، تغییر ضریب شکست پلی‌مر با تغییر شاریدگی لیزر	-	KrF (۲۴۸ نانومتر)	CR-۳۹	کام و همکاران [۲۳] (۲۰۱۴)
کاهش V_B ، V_T ، D با افزایش تعداد تب لیزر، اتصال‌های عرضی، ساختارهای کرم‌مانند، ایجاد مخروط	آلفا	ArF (۱۹۳ نانومتر)	CR-۳۹	کار حاضر

V_B سرعت سونش توده‌ای، V_T سرعت سونش ردپا، V حساسیت، D قطر میانگین ردپاها، E_B انرژی فعال‌سازی سونش توده‌ای و E_T انرژی فعال‌سازی برای سونش ردپاها.

۸۰ و ۱۰۰ پرتو دهی شد. دسته‌ی دوم بالای آستانه‌ی نورکنندگی تحت تابش لیزری با شاریدگی 6.07 mJ cm^{-2} و انرژی 300 pulse^{-1} با تعداد تپ‌های متفاوت ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ قرار گرفتند. در دسته‌ی سوم تعدادی نمونه به عنوان نمونه‌ی مرجع، تنها با ذره‌های آلفا پرتو دهی شدند و سایر نمونه‌ها ابتدا با تعداد تپ‌های متفاوت ۶۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰، زیر آستانه‌ی نورکنندگی با تابش لیزر با شاریدگی 6.0 mJ cm^{-2} و سپس با ذره‌های آلفا به انرژی تقریباً 3 MeV پرتو دهی شدند. پرتو دهی لیزری به صورت عمود بر سطح نمونه و با نرخ تکرار ۱ هرتز به انجام رسید. برای آشکارسازی ردپاها، از روش سونش شیمیایی استفاده شد. نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در محلول آبی 6.25 مولار NaOH در دمای 85°C قرار گرفتند. پس از سونش، نمونه‌ها با آب یون‌زدایی شده شستشو داده شده و سپس در دمای اتاق خشک شدند. برای بررسی تغییر ریخت‌شناسی سطح پلی‌مرها از میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM) مدل وگا 2^{g} ، ساخت شرکت تی‌ای‌اسکن ایکس‌ام‌پو $^{(۱)}$ و برای شمارش و تحلیل ردپاهای ذره‌های آلفای ثبت شده از میکروسکوپ نوری استفاده شد. با استفاده از تصویرهای میکروسکوپ نوری قطر ردپاها اندازه‌گیری شد. ضخامت لایه‌ی سونیده شده قبل و بعد از سونش، با استفاده از ریزسنج رقمی اندازه‌گیری و سرعت سونش توده‌ای (V_B) از رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

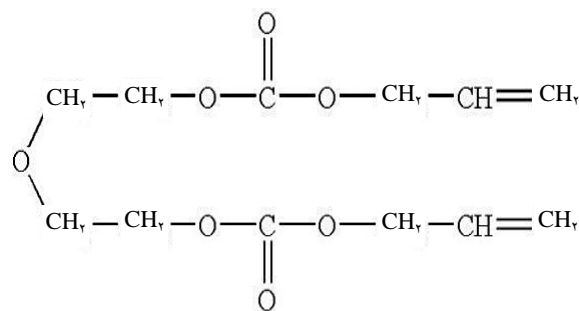
$$V_B = \frac{d_1 - d_2}{2t} \quad (1)$$

که در آن d_1 و d_2 به ترتیب، ضخامت (برحسب میکرومتر) قبل و بعد از سونش و t مدت زمان سونش (برحسب ساعت) است. سپس حساسیت (V) چنین محاسبه شد

$$V = \frac{h^2 + r^2}{h^2 - r^2} \quad (2)$$

که در آن، h مقدار ضخامت سونیده شده ($d_1 - d_2$) و r شعاع ردپاها است [۱۵].

در نهایت با توجه به نسبت $V = \frac{V_T}{V_B}$ ، سرعت سونش V_T ردپاها محاسبه شد.



شکل ۱. ساختار مونومری پلی‌مر CR-39.

در این بررسی ابتدا آشکارسازهای CR-39 با تعداد متفاوت تپ تابش لیزر اگزایمر ArF، در زیر آستانه‌ی نورکنندگی و بالای آستانه‌ی نورکنندگی پرتو دهی شدند. سپس یک دسته از آشکارسازهای پرتو دهی شده در زیر آستانه‌ی نورکنندگی، با ذره‌های آلفا به انرژی تقریباً 3 MeV پرتو دهی و با محلول 6.25 مولار NaOH سونیده شدند. تغییر در ریخت‌شناسی سطح پلی‌مر با استفاده از میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM) مشاهده شد. ردپاهای ذره‌های آلفای ثبت شده در پلی‌مر نیز با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین قطر میانگین ردپاها، سرعت سونش توده‌ای و سرعت سونش ردپاها محاسبه شد.

۲. روش کار

چندین قطعه آشکارساز CR-39 ($1 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$)، به ضخامت $500 \mu\text{m}$ و چگالی 1.3 g cm^{-3} ساخت شرکت اپتیکال آهایو ایالات متحده‌ی امریکا $^{(۶)}$ انتخاب شدند. از چشمه‌ی آلفا ^{241}Am پولکی شکل با پرتو زایی 5.77×10^4 بر دقیقه با دو دسته آلفا با انرژی‌های 5.443 MeV و 5.486 MeV با فراوانی نسبی به ترتیب، ۱۳ و ۱۸٪ استفاده شد. موازی‌ساز $^{(۷)}$ از جنس برنز در اندازه‌های مختلف ۵ تا 47 mm برای تغییر فاصله‌ی بین چشمه و آشکارساز استفاده شد. لیزر اگزایمر ArF، لاندافیزیک ال‌پی‌ایکس $i220^{\text{A}}$ با طول موج 193 nm و پهنای تپ ۱۵ نانوثانیه و نرخ تکرار ۱ تا ۱۰ هرتز به عنوان یک چشمه‌ی همدوس فرابنفش به کار گرفته شد.

ابتدا پلی‌مرهای CR-39 به سه دسته تقسیم شدند. دسته‌ی اول زیر آستانه‌ی نورکنندگی با تابش لیزری با شاریدگی 6.0 mJ cm^{-2} و انرژی 300 pulse^{-1} با تعداد تپ‌های ۴۰، ۲۰،



شکل ۲ ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون پویشی مربوط به نمونه‌هایی را نشان می‌دهد که با شاریدگی 60 mJ cm^{-2} پرتو دهی شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ریخت‌شناسی کویری این نمونه‌ها در مقیاس 500 نانومتر حاکی از تخریب سطح نمونه با افزایش تعداد تپ لیزر است، در حالی که کندگی رخ نداده است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی آن است که پرتو دهی زیر آستانه‌ی نور کندگی بوده است.

با توجه به ریزنگار میکروسکوپی الکترون پویشی سطح پلی مر (شکل ۳)، واضح است که پرتو دهی با 300 تپ لیزر در شاریدگی 607 mJ cm^{-2} موجب کندگی سطح پلی مر شده است. در شکل ۴، ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون پویشی مربوط به نمونه‌هایی که با شاریدگی 607 mJ cm^{-2} و با تعداد تپ متفاوت پرتو دهی شده‌اند، نمایش داده شده است. بر اثر پرتو دهی در بالای آستانه‌ی نور کندگی، تعدادی مخروط در امتداد راستای پرتو لیزر، بر روی سطح پلی مر رشد یافته‌اند که به طور واضح در ریزنگارها دیده می‌شوند. با توجه به ریزنگارها درمی‌یابیم که مخروط‌ها بیش‌تر در کناره‌های ناحیه‌ی پرتو دهی شده به وجود آمده‌اند و ارتفاع مخروط‌ها با افزایش تعداد تپ، افزایش یافته است. شکل ۵ تشکیل مخروط بر سطح پلی مر پرتو دهی شده با 300 تپ لیزر را نشان می‌دهد. از شکل‌ها دیده می‌شود که سطح دیواره‌ی مخروط‌ها، صاف و یکنواخت نیست. در سال ۲۰۱۴ تأثیر تابش لیزر اگزایمر ArF با انرژی 110 و $330 \text{ mJ pulse}^{-1}$ ، شاریدگی‌های متفاوت و تعداد تپ‌های بالا بر روی پلی مر CR-۳۹ توسط پروین و همکارانش بررسی شد [۱۸]. در این پژوهش، تشکیل ساختارهای مخروطی شکل مشاهده نشد. با توجه به این‌که این ساختارها در تمام ناحیه‌ی پرتو دهی شده رشد نیافته بودند، احتمالاً طبق مدل ارائه شده توسط دیبر در سال ۱۹۸۶ [۲]، ناخالصی‌ها و کاستی‌های موجود در سطح پلی مر عامل ایجاد مخروط‌ها بوده‌اند [۱۶]. علاوه بر این ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون پویشی نشان می‌دهند که در سطح زمینه‌ی پلی مر و در کناره‌ی مخروط‌ها، ساختارهای کرم‌مانندی تشکیل شده است. انحنای این ساختارها با افزایش تعداد تپ لیزر کم‌تر می‌شود (شکل ۶). پروین و همکاران نیز تشکیل ساختارهای کرم‌مانند در محدوده‌ی انرژی 500 mJ cm^{-2} را گزارش کرده‌اند. با افزایش تعداد تپ لیزر انحنای این ساختارها کم و به ازای 3000 تپ لیزر به خطوط صاف تبدیل شده‌اند [۱۸].

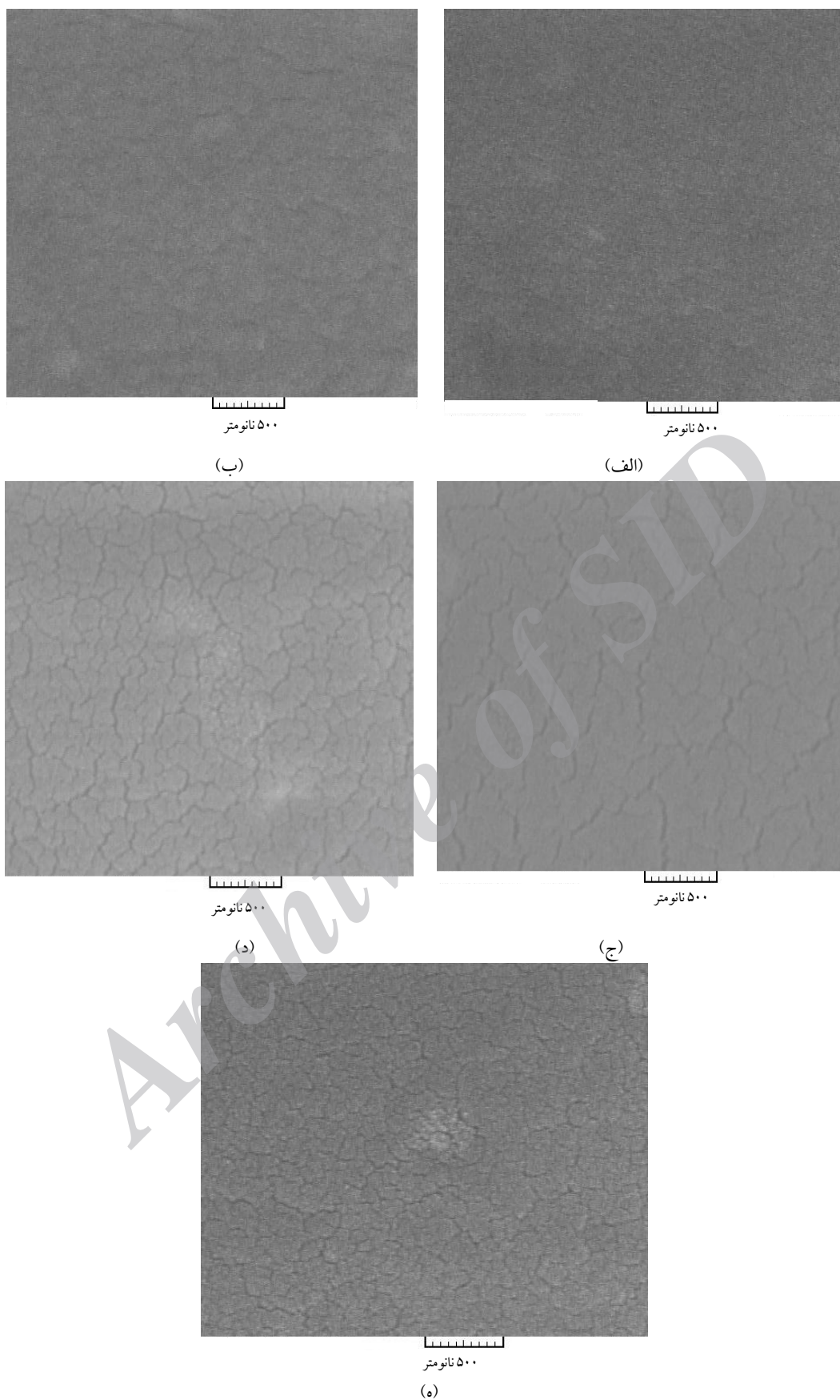
هم‌چنین ریزسختی نمونه‌هایی که با شاریدگی 60 mJ cm^{-2} زیر آستانه‌ی نور کندگی با تعداد تپ‌های متفاوت پرتو دهی شده بودند، به وسیله‌ی دستگاه ریزسختی سنج بوئلر^(۱۱) مدل 60044 ساخت کشور امریکا اندازه‌گیری شد.

۳. نتایج و بحث

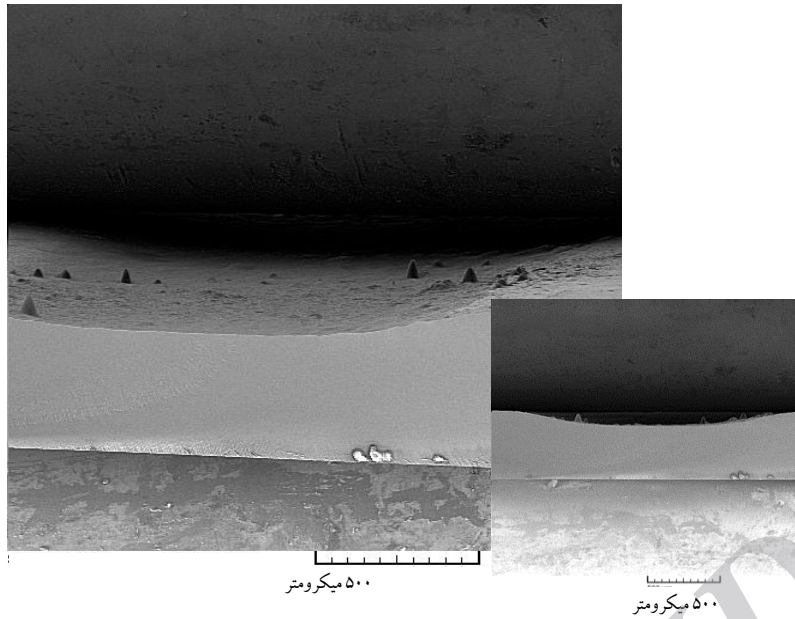
۱.۳ اثر پرتو لیزر روی آشکارساز CR-۳۹

پرتو دهی لیزری باعث تغییرهای ریخت‌شناختی در سطح پلی مرها می‌شود؛ این تغییرها وابسته به شاریدگی لیزر، طول موج لیزر و پلی مر است. براساس مطالعه‌های پیشین بر روی پلی مرهای مختلف، این تغییرها به دو بخش تقسیم می‌شوند: تغییرها برای حالتی که شاریدگی لیزر $\phi < \langle \phi_{th} \rangle$ باشد و تغییرهایی برای حالتی که شاریدگی لیزر $\phi > \langle \phi_{th} \rangle$ باشد. شاریدگی آستانه‌ی نور کندگی ϕ_{th} بالای شاریدگی آستانه‌ی نور کندگی باشد $\langle \phi_{th} \rangle$. اگر شاریدگی لیزر زیر شاریدگی آستانه‌ی نور کندگی باشد، ریخت‌شناسی سطح پلی مر مقدار اندکی دچار تغییر، و سطح پلی مر تخریب می‌شود. تخریب سطح پلی مر در این شاریدگی معمولاً مانند تخریب بر اثر پرتو دهی با لامپ فرابنفش است. اما اگر شاریدگی لیزر از شاریدگی آستانه‌ی نور کندگی بیش‌تر شود، فرایند کندگی لیزری رخ می‌دهد که معمولاً با تولید ریزساختارها همراه است [۱۲، ۲۵].

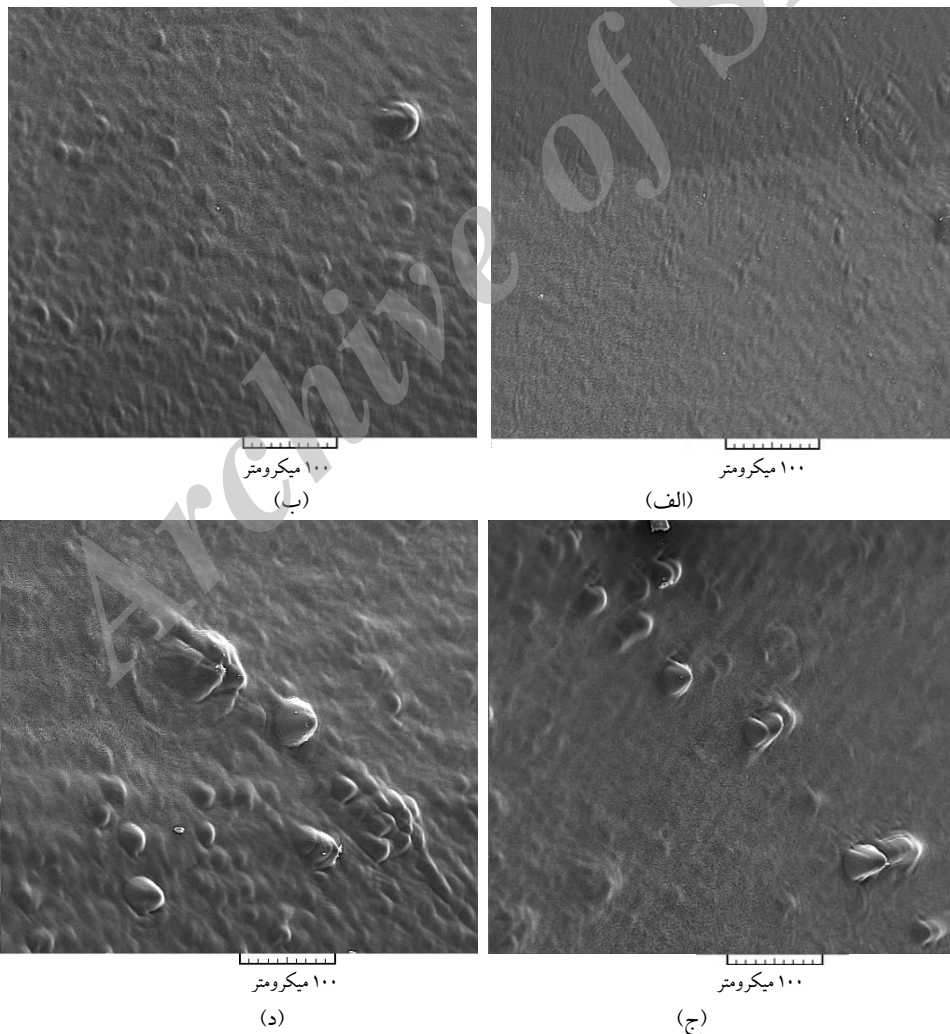
در این پژوهش، پلی مرهای CR-۳۹ تحت تابش پرتو لیزر اگزایمر ArF با طول موج 193 نانومتر و انرژی 85 mJ pulse^{-1} در دو شاریدگی و دزهای متفاوت قرار گرفتند. پرتو لیزر به طور عمود بر سطح پلی مر تابیده شد. بر اثر پرتو دهی لیزری با شاریدگی 35 تا 70 mJ cm^{-2} ، به ازای 100 تپ لیزری، فرایند نور کندگی مشاهده نشده و تنها سطح پلی مر دچار تخریب شد. با مشاهده‌هایی که از پرتو دهی لیزری در شاریدگی‌های مختلف داشتیم، دریافتیم که آستانه‌ی نور کندگی بالاتر از 70 mJ cm^{-2} است. با توجه به این‌که آستانه‌ی نور کندگی لیزر F_2 با طول موج 157 نانومتر در پژوهش پیشین [۱۷]، 60 mJ cm^{-2} ذکر شده است و با توجه به این‌که آستانه‌ی نور کندگی در طول موج‌های بلندتر (193 نانومتر) بیش‌تر است [۲۶، ۲۷]، شاریدگی 60 mJ cm^{-2} برای پرتو دهی با لیزر ArF با طول موج 193 نانومتر قطعاً زیر آستانه‌ی نور کندگی برای پلی مر CR-۳۹ قرار دارد. بنابراین، این شاریدگی برای پرتو دهی با لیزر ArF زیر آستانه‌ی نور کندگی و هم‌چنین شاریدگی 607 mJ cm^{-2} برای پرتو دهی بالای آستانه‌ی نور کندگی انتخاب شد.



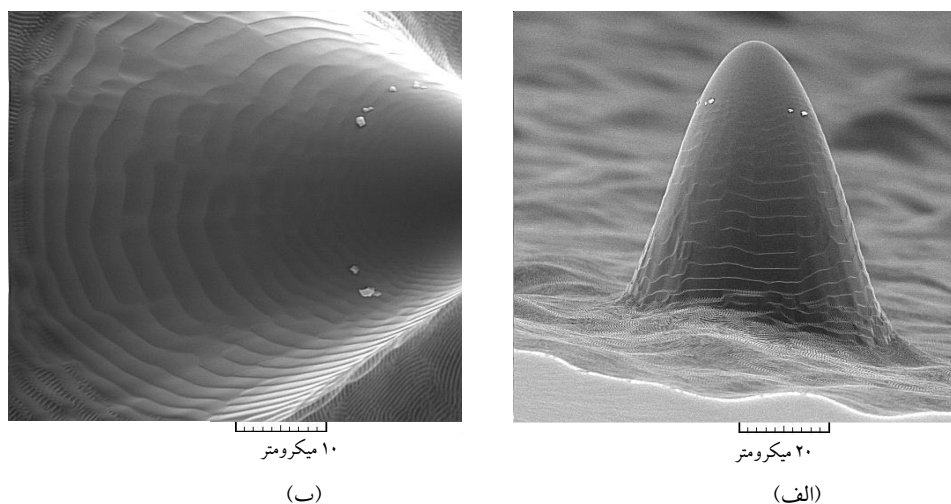
شکل ۲. ریزنگارهای میکروسکوپ الکترون پویشی مربوط به نمونه‌های پرتودهی شده با لیزر اگرایمر ArF، با طول موج ۱۹۳ نانومتر و شاریدگی $۶۰ \text{ mJ cm}^{-۲}$. (الف) نمونه‌ی مرجع؛ (ب) ۲۰ تب لیزر؛ (ج) ۴۰ تب لیزر؛ (د) ۸۰ تب لیزر؛ (ه) ۱۰۰ تب لیزر.



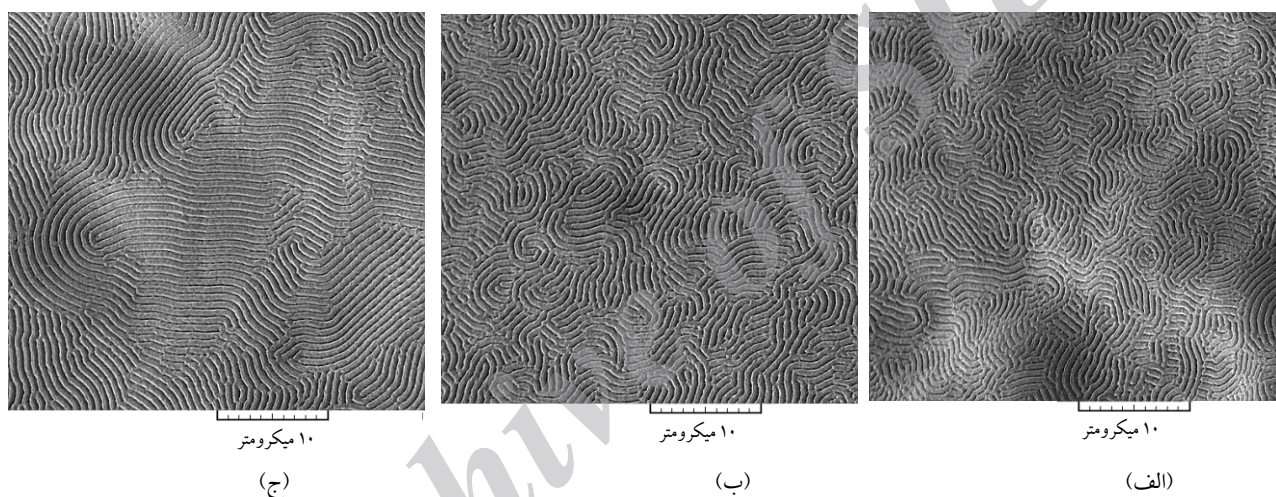
شکل ۳. ریزنگار میکروسکوپی الکترون پوشی مربوط به سطح پلی مر CR-۳۹ پرتو دهی شده با ۳۰۰ تپ لیزر اگزایمر ArF، با طول موج ۱۹۳ نانومتر در شاریدگی $۶۰۷ \text{ mJ cm}^{-۲}$.



شکل ۴. ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون پوشی مربوط به نمونه‌های پرتو دهی شده با تعداد متفاوت تپ لیزر اگزایمر ArF، با طول موج ۱۹۳ نانومتر در شاریدگی $۶۰۷ \text{ mJ cm}^{-۲}$. (الف) ۲۰ تپ لیزر؛ (ب) ۶۰ تپ لیزر؛ (ج) ۱۰۰ تپ لیزر و (د) ۳۰۰ تپ لیزر.



شکل ۵. ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون پوششی که تشکیل مخروط بر روی سطح پلی‌مر CR-۳۹ بر اثر پرتودهی با ۳۰۰ تپ لیزر ArF با شاریدگی 607 mJ cm^{-2} را نشان می‌دهد. (الف) تصویر گرفته شده از کنار مخروط؛ (ب) تصویر گرفته شده از بالای مخروط.

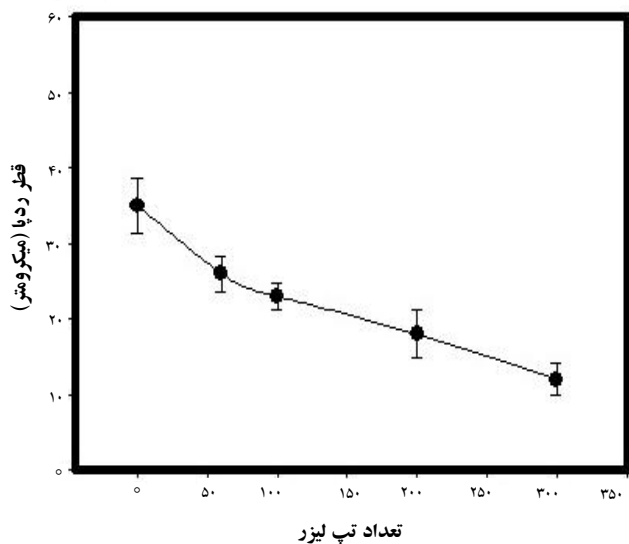


شکل ۶. ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون پوششی مربوط به ساختارهای کرم‌مانند، در اطراف ساختارهای مخروطی شکل. (الف) برای ۶۰ تپ، (ب) برای ۱۰۰ تپ و (ج) برای ۳۰۰ تپ لیزر.

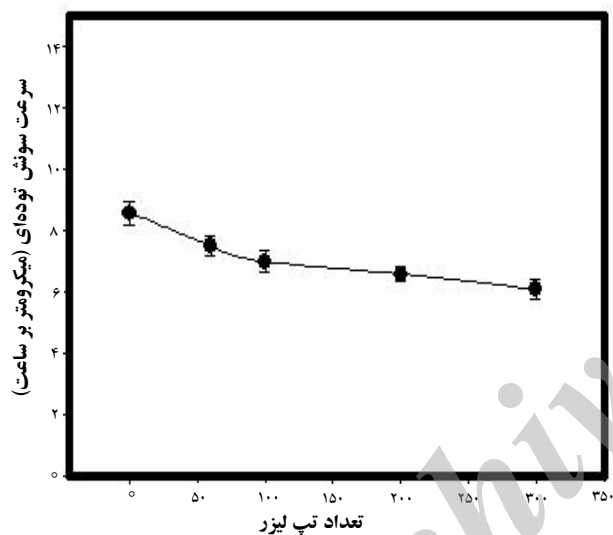
برحسب تعداد تپ‌های لیزر در شکل ۸ داده شده است. با محاسبه‌ی سرعت سونش توده‌ای (V_B) و هم‌چنین سرعت سونش ردپاها (V_T)، مشخص شد که با افزایش تعداد تپ لیزر، سرعت سونش توده‌ای و سرعت سونش ردپاها (V_T) کاهش می‌یابد. نمودار کاهش V_B و V_T با تعداد تپ لیزر به ترتیب، در شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده است. حساسیت پلی‌مر V (شکل ۱۱) نیز به میزان کمی کاهش یافته است. کاهش V_B و V_T به معنی ایجاد فرایند اتصال‌های عرضی و سخت شدن سطح پلی‌مر ناشی از پرتودهی لیزری است [۱۰-۱۴].

۲.۳ پیش پرتودهی با لیزر و پیش پرتودهی با آلفا

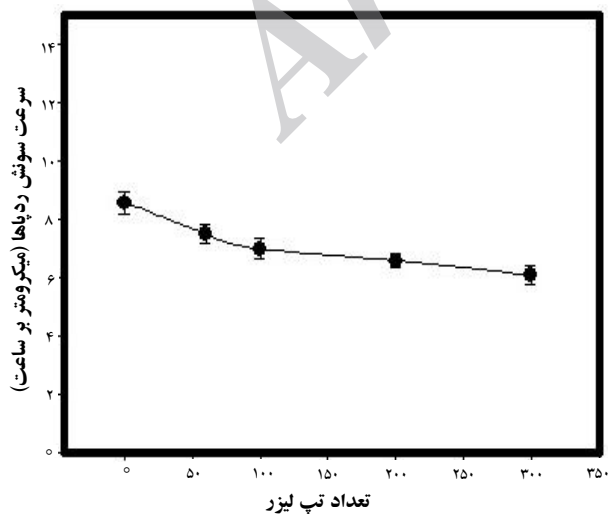
سطح پلی‌مرهای CR-۳۹ ابتدا با تعداد تپ‌های متفاوت پرتو لیزر به انرژی 85 mJ pulse^{-1} و شاریدگی 60 mJ cm^{-1} و سپس با ذره‌های آلفا به انرژی معین پرتودهی شد. ریزنگارهای میکروسکوپ نوری مربوط به نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، قطر ردپاها با افزایش تعداد تپ لیزر، نسبت به نمونه‌ی مرجع کاهش یافته است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که سطح پلی‌مر با افزایش تعداد تپ لیزر تخریب شده است. کاهش قطر میانگین ردپاها نشان‌دهنده‌ی آن است که سطح پلی‌مر سخت شده است. نمودار کاهش قطر



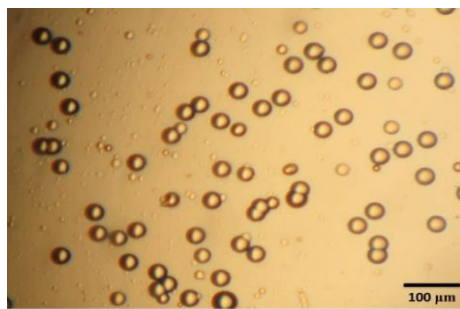
شکل ۸. رابطه‌ی بین قطر میانگین ردپاها و تعداد تپ لیزر.



شکل ۹. تغییر سرعت سونش توده‌ای با تعداد تپ لیزر.



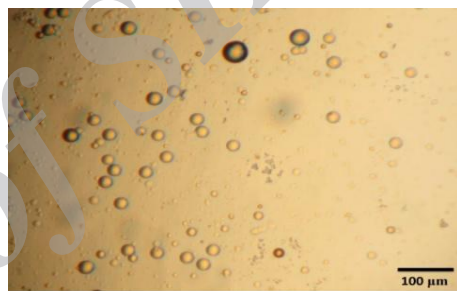
شکل ۱۰. تغییر سرعت سونش ردپاها با تعداد تپ لیزر.



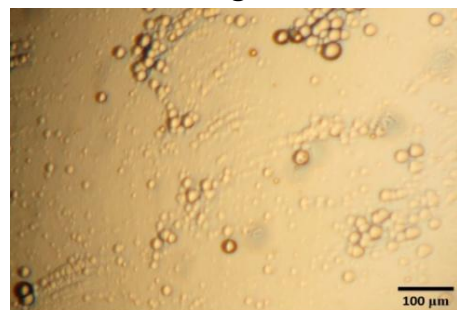
(الف)



(ب)



(ج)

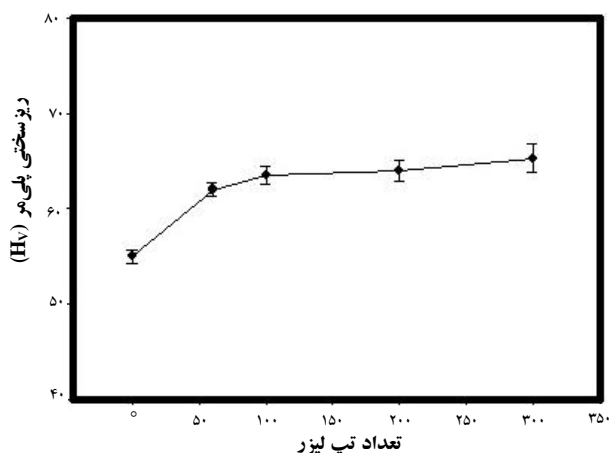


(د)

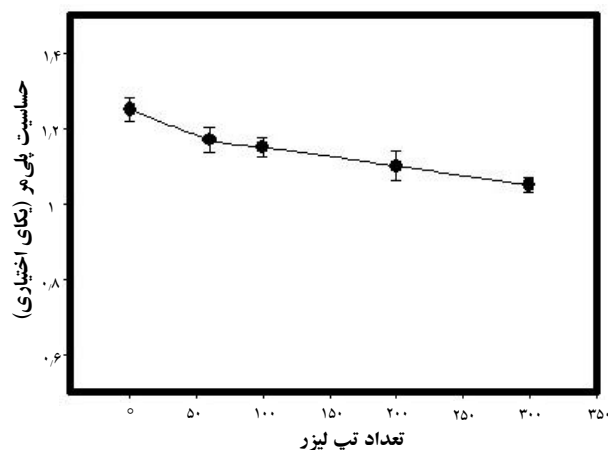


(ه)

شکل ۷. ریزنگارهای میکروسکوپ نوری مربوط به نمونه‌هایی که ابتدا توسط لیزر با شاریدگی 60 mJ cm^{-2} و سپس به وسیله‌ی ذره‌های آلفا پرتودهی شده‌اند. (الف) نمونه‌ی مرجع (تنها با آلفا)؛ (ب) ۶۰ تپ لیزر؛ (ج) ۱۰۰ تپ لیزر؛ (د) ۲۰۰ تپ لیزر؛ (ه) ۳۰۰ تپ لیزر.



شکل ۱۲. رابطه بین ریزسختی پلی‌مر و تعداد تپ لیزر.



شکل ۱۱. حساسیت پلی‌مر به صورت تابعی از تعداد تپ لیزر.

پی‌نوشت‌ها

1. Allyldiglycol carbonate (CR-39) polymer
2. Ripples
3. Nanohillocks
4. Micro contours
5. Lining microstructures
6. PPG Optical Ohio USA
7. Collimator
8. Lambda physikTM, LPX 220i
9. Vega2
10. TEScan XMU
11. Buehler
12. Vickers

به منظور بررسی سخت شدن پلی‌مر پرتودهی شده با لیزر ArF در شاریدگی 60 mJ cm^{-2} ، ریزسختی نمونه‌ها با استفاده از روش ویکرز^(۱۲) اندازه‌گیری شد. ابتدا نمونه‌ها پس از چسباندن بر روی یک قالب کاملاً صاف و مسطح، برای مدت ۱۵ ثانیه تحت تأثیر نیروی ۵۰۰ گرمی قرار گرفتند. در شکل ۱۲ ریزسختی نمونه‌ها برحسب تعداد تپ لیزر در شاریدگی 60 mJ cm^{-2} نشان داده شده است. ریزسختی نمونه‌ها از ۵۵ برای نمونه‌ی مرجع (بدون پرتودهی و سونش شیمیایی) به ۶۵/۳ برای نمونه‌ی پرتودهی شده با ۳۰۰ تپ لیزر رسیده است. این افزایش به معنی سخت‌تر شدن سطح پلی‌مر است. بنابراین پرتودهی با لیزر در طول موج ۱۹۳ نانومتر موجب سخت شدن سطح پلی‌مر می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

تابش لیزر ArF با طول موج ۱۹۳ نانومتر با شاریدگی 60 mJ cm^{-2} موجب تخریب سطح پلی‌مر CR-۳۹ و با شاریدگی 607 mJ cm^{-2} موجب ایجاد ساختارهای کرم‌مانند و مخروط‌هایی بر سطح پلی‌مر شده است. پدیده‌ی غالب، تشکیل ساختارهای کرم‌مانند است. تعداد مخروط‌ها محدود بوده و در تمام سطح پلی‌مر وجود ندارند. ایجاد مخروط‌ها احتمالاً به دلیل وجود کاستی‌ها و ناخالصی‌های موجود در سطح CR-۳۹ است. هم‌چنین پرتودهی لیزری با شاریدگی 60 mJ cm^{-2} موجب کاهش قطر میانگین ردپاهای ثبت شده‌ی ذره‌های آلفا و نیز کاهش سرعت سونش توده‌ای، سرعت سونش ردپاها و حساسیت پلی‌مر شده است. کاهش سرعت سونش توده‌ای و سرعت سونش ردپاها احتمالاً به دلیل ایجاد فرایندهای اتصال‌های عرضی در سطح پلی‌مر است که تطابق خوبی با نتیجه‌های آزمایش ریزسختی دارد.



- [1] B. Jaleh, Effect of UV excimer laser (XeF, KrF, ArF) third and fourth harmonic Nd: YAG laser on solid state nuclear track detector (SSNTD), Ph.D Thesis in Physics, Amirkabir University, (1383).
- [2] P.E. Dyer, S.D. Jenkins, J. Sidhu, Development and origin of conical structures on XeCl laser ablated polyimide, *Applied Physics Letters*, 49 (1986) 453-455.
- [3] B. Hopp, Z.S. Bor, E. Homolya, E. Mihalik, Investigation of conical structures created by ArF excimer laser irradiation of polycarbonate, *Applied Surface Science*, 109/110 (1997) 232-235.
- [4] P.E. Dyer, C.D. Walton, R. Zakaria, Interference effects in 157 nm laser ablated cones in polycarbonate and application to spatial coherence measurement, *Applied Physics A*, 95 (2009) 319-323.
- [5] V. Oliveira, R. Vilar, KrF pulsed laser ablation of polyimide, *Applied Physics A*, 92 (2008) 957-961.
- [6] D.J. Krajnovich, J.E. Vazquez, Formation of intrinsic surface defects during 248nm photoablation of polyimide, *Applied Physics*, 73 (1993) 3001-3008.
- [7] Thaer M. Salman, Abdul R.H. Subber, Alaa Y. AL-Ahmad, The measurements of laser beam transmission through exposed/etched CR-39 and CN-85 detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 694 (2012) 251-254.
- [8] M.F. Zaki, Y.H. El-Shaer, Particularization of alpha contamination using CR-39 tracks detectors, *PRAMANA-Journal of Physics*, 69 (2007) 567-574.
- [9] L.M. Kukreja, V.B. Joshi, A.M. Bhagwata, U.K. Chatterjee, D.D. Bhawalkara, Investigations on enhancement in track revelation sensitivity of allyldiglycol carbonate (CR-39) due to laser treatment, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 28 (1987) 369-376.
- [10] F. Abu-Jarad, M.A. Islam, I. Abu-Abdounand, M.A. Khan, Ultraviolet and laser-irradiation effect on various batches of CR-39, *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 19 (1991) 135-138.
- [11] F. Abu-Jarad, M.A. Islam, I. Abu-Abdounand, M.A. Khan, Effect of UV light, solar radiation, XeCl laser and Xenon arc lamp on the nuclear track recording properties of CR-39, *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 20 (1992) 531-541.
- [12] B. Jaleh, P. Parvin, K. Mirabaszadeh, M. Katouzi, KrF laser irradiation effects on nuclear track recording properties of polycarbonate, *Radiation Measurements*, 38 (2004) 173-183.
- [13] NidalDwaikat, Toshiyuki Iida, Fuminobu Sato, Yushi Kato, Ippei Ishikawa, WataruKada, AtsuyaKishi, Makoto Sakai, Yohei Ihara, Study etching characteristics of a track detector CR-39 with ultraviolet laser irradiation, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 572 (2007) 826-830.
- [14] NidalDwaikat, Fuminobu Sato, Yushi Kato, Toshiyuki Iida, The effect of two ultraviolet sources on the etching properties of a solid-state nuclear track detector CR-39, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 584 (2008) 353-357.
- [15] G. Saffarini, NidalDwaikat, Mousa El-Hasan, Fuminobu Sato, Yushi Kato, Toshiyuki Iida, The effect of infrared laser on the activation energy of CR-39 polymeric detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 680 (2012) 82-85.
- [16] R. Zakaria, P.E. Dyer, Cone evolution on VUV laser ablated polymers, *Applied Physics A*, 101 (2010) 13-18.
- [17] R. Zakaria, R.M. Scott, Interaction of 157nm excimer laser on pristine and radiation exposed CR-39 polymer, *Applied Surface Science*, 247 (2013) 53-59.
- [18] P. Parvin, M. Refahizadeh, S.Z. Mortazavi, K. Silakhori, A. Mahdiloo, P. Aghaii, Regular self-microstructuring on CR-39 using high UV laser dose, *Applied Surface Science*, 292 (2014) 247-255.
- [19] ShaziaBashir, M. ShahidRafique, Wolfgang Husinsky, Alison Hobro, Bernhard Lendl, Atomic force microscopy and raman scattering studies of femtosecond laser-induced nanohillocks on CR-39, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 267 (2009) 3606-3610.



- [20] ShaziaBashir, M. ShahidRafique, Wolfgang Husinsky, Femtosecond laser-induced subwavelength ripples on Al, Si, CaF₂ and CR-39, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 275 (2012) 1-6.
- [21] M. ShahidRafique, ShaziaBashir, Ali Ajami, Wolfgang Husinsky, Nonlinear absorption properties correlated with the surface and structural changes of ultra short pulse laser irradiated CR-39, Applied Physics A, 100 (2010) 1183-1189.
- [22] W.A. Farooq, M.R. Baig, A. Fatehmulla, M.S. Al-Salhi, S.S. Al-Ghamdi, F. Yakuphanoglu, Controlling of optical band gap of allyldiglycol carbonate polymer with ultraviolet laser radiation, Acta Physica Polonica A, 123 (2013) 106-110.
- [23] W. Kam, Y.S. Ong, W.H. Lim, R. Zakaria, Laser ablation and waveguide fabrication using CR-39 polymer, Optics and Lasers in Engineering, 55 (2014) 1-4.
- [24] G. Croce, P. D'Agaro, F.D. Mora, Numerical simulation of glass fogging and defogging, International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, Norway, (2004).
- [25] D. Bauerle, Laser processing and chemistry, Springer Series in Material Sciences, Vol. 1. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, (1996).
- [26] F. Rabek Jan, Photodegradation of polymer, Springer, Berlin, Heidelberg, (1996).
- [27] H.G. Rubahn, Laser applications in surface science and technology, Wiley, New York (1999).

Archive of SID