

ایجاد نانوساختار روی سطح پلی استایرن با استفاده از لیزر اکسایمر ArF برای افزایش زیست سازگاری

شاداب باقری خولنجانی^۱حمید میرزاده^۲مرتضی دلیری^۳علیرضا زارع شحنه^۴

خلاصه

مقدمه: پرتودهی توسط لیزر یکی از روش‌های مناسب جهت اصلاح سطح پلیمر و ایجاد نانوساختار بر روی آن‌ها است. این نانوساختارهای ایجاد شده توسط پرتودهی لیزر تأثیر بسزایی در افزایش زیست سازگاری پلیمرها دارند.

روش بررسی: در این تحقیق سطح فیلم‌های پلی استایرن با استفاده از لیزر اکسایمر ArF با طول موج ۱۹۳ نانومتر و در تعداد پالس‌های متفاوت ۱، ۵ و ۱۰ اصلاح شد. تغییرات سطحی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، بازتاب کلی تضعیف شده^۱ تبدیل فوری^۲ مادون قرمز (ATR-FTIR) و اندازه‌گیری‌های زاویه^۳ تماس بررسی شد. جهت بررسی تغییرات زیست سازگاری سطح پلی استایرن بعد از تابش دهی توسط لیزر از کشت سلول‌های L929 استفاده شد.

یافته‌ها: تصاویر SEM و AFM حاکی از ایجاد نانو ساختارهایی بر روی سطح پلی استایرن بعد از تابش دهی بود. این تصاویر نشان داد با افزایش تعداد پالس‌ها اندازه^۴ ساختارهای ایجاد شده بیشتر شد. بررسی تغییرات آبدوستی و انرژی آزاد سطحی نمونه‌ها نشان داد، پس از اصلاح نمونه‌ها توسط لیزر با ۱ پالس ابتدا قطبیت سطح افزایش و پس از آن با افزایش تعداد پالس‌ها به ۵ و ۱۰ کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: بررسی تغییرات شیمیایی توسط طیف ATR-FTIR نشان‌دهنده^۵ تشکیل شدن گروه‌های قطبی مثل پراکسید و هیدروکسیل بر روی سطح پلی استایرن بعد از انجام پرتودهی با لیزر است. نتایج حاصل از کشت سلولی نشانگر افزایش زیست سازگاری پلی استایرن اصلاح شده با لیزر بود.

واژه‌های کلیدی: پلی استایرن، لیزر اکسایمر، نانوساختار، اصلاح سطح، زیست سازگاری

^۱ دکترای مهندسی پزشکی، دانشکده مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
^۲ استاد مهندسی پلیمر، دانشکده مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
^۳ استادیار ایمنی‌شناسی جنین، پژوهشگاه ملی ژنتیک
^۴ کارشناس ارشد الکترونیک، پژوهشگاه لیزر، سازمان انرژی اتمی

نویسنده پاسخگو: حمید میرزاده
آدرس: خیابان حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر
تلفن: ۶۴۵۴۲۴۲۰
نشانی الکترونیک: mirzadeh@aut.ac.ir

مقدمه

یکی از روش‌های کارآمد اصلاح سطح بیومتریال‌ها پرتودهی توسط لیزر است. تغییرات حاصل از پرتوی لیزر محدود به سطح بیومتریال‌ها می‌باشد و خسارات احتمالی به توده^۱ بیومتریال‌ها نسبت به پرتوهای دیگر مثل گاما و الکترونی به حداقل می‌رسد و خواص مکانیکی آن‌ها حفظ می‌شود [۱].

از مزایای عملیات لیزر می‌توان به سادگی آن، سهولت کنترل و ایمنی فرآیند اشاره نمود. علاوه بر این، استفاده از منبع نور تکفام در نورشیمی^۱ باعث می‌شود که تنها انتقال‌های نوری^۱ نتخابی در نمونه انجام شود. هنگام استفاده از لامپ‌های درخششی نوار پهن تعداد زیادی از ترازهای انرژی بسته به انرژی منبع نور جمعیت‌دار می‌شوند. این حالت‌های مختلف می‌توانند

میکروسکوپ الکترونی پویشی

برای بررسی تغییرات مورفولوژی سطح فیلم‌های پلی‌استایرن از میکروسکوپ الکترونی پویشی CAMBRIDGE مدل S360 استفاده گردید. سطح فیلم‌های پلی‌استایرن قبل از بررسی توسط میکروسکوپ الکترونی با طلا پوشش‌دهی شد.

میکروسکوپ نیروی اتمی

برای بررسی تغییرات مورفولوژی سطح در مقیاس نانومتر از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) در مد غیر تماسی (مدل auto probe ساخت شرکت Park Scientific Instrument کشور آمریکا) استفاده شد.

اندازه‌گیری زاویه تماس و کشش سطحی

آب دوستی فیلم‌های پلی‌استایرن پس از پرتو دهی با استفاده از اندازه‌گیری زاویه تماس استاتیک قطره آب با سطح پلیمر با روش قطره چسبیده به کمک دستگاه کراس (KRUSS G10) انجام شد. زاویه‌های گزارش شده حاصل میانگین زاویه تماس قطره آب با ۵ نقطه مختلف از سطح پلیمر است. برای بررسی تغییرات کشش سطحی از حلال دی‌یدومتان نیز استفاده شد. زاویه تماس با دی‌یدومتان اندازه‌گیری شد و سپس با استفاده از روابط Owens و Wendt انرژی سطحی و بخش‌های قطبی و غیر قطبی آن اندازه‌گیری گردید.

طیف سنجی مادون قرمز

برای بررسی تغییرات شیمی سطح و گروه‌های عاملی ایجاد شده بر روی سطح دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (Bruker ساخت آلمان) به صورت بازتابندگی تضعیف شده افقی (ATR-FTIR) H-Attenuated Total Reflectance) با منشور ZnS مورد استفاده قرار گرفت.

بررسی زیست سازگاری

برای بررسی چسبندگی سلولی و بررسی میزان زیست‌سازگاری نمونه‌های پلی‌استایرن از کشت سلول استفاده شد. در این تحقیق از سلول‌های فیبروبلاست L929 که از بافت مخاطی موش تهیه می‌شود، استفاده شد. سلول‌ها در محیط کشت (PRMI-1640) حاوی پنی‌سیلین با غلظت IU/ml ۱۰۰ (۱۰۰ و استرپتوماسین با غلظت ۱۰۰ µg/ml قرار گرفتند. برای

به انواع حالت‌های شیمیایی گوناگون منجر شوند. ولی از لیزر می‌توان برای برانگیختن انتخابی یک جزء یک مخلوط شیمیایی استفاده کرد. معمولاً مزیت شدت زیاد و نور تکفام لیزرها می‌تواند با کارایی بیشتر از منابع متداول، واکنش نورشیمیایی انتخابی را انجام دهد [۵-۲]. با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه بهینه‌سازی فیلم‌های پلیمری با لیزر مشخص شده است که کندگی حاصل از پرتو دهی لیزری با تغییرات شیمیایی و فیزیکی سطح و ایجاد گروه‌های عاملی جدید همراه است و ساختار منظمی که در نواحی تابش دیده ایجاد می‌گردد، باعث بهبود زیست‌سازگاری پلیمر می‌شود [۷۶]. میرزاده و همکارانش در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار از لیزر به عنوان روشی برای اصلاح زیست‌سازگاری استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از لیزر CO₂ سطح EPR و پس از آن با استفاده از لیزر KrF و لیزر CO₂ سطح پلی‌اتیلن ترفتالات و نیز پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (PDMS) را اصلاح نمودند و زیست‌سازگاری و خون‌سازگاری آن‌ها را افزایش دادند [۵-۲].

پلی‌استایرن اصلاح سطح شده به صورت گسترده‌ای در کاربردهای پزشکی به عنوان ظروف کشت سلول به دلیل غیر سمی بودن، شفافیت بالا در طیف مرئی، قیمت تولید پایین و شکل‌پذیری آسان استفاده شده است [۱]. تاکنون از لیزرهای مختلفی جهت اصلاح سطح پلی‌استایرن استفاده شده است [۸ و ۹]. هدف از این تحقیق اصلاح خواص سطحی پلی‌استایرن، ایجاد نانو ساختارهای سطحی با استفاده از لیزر ArF و بررسی اثر آن بر روی زیست‌سازگاری پلی‌استایرن می‌باشد.

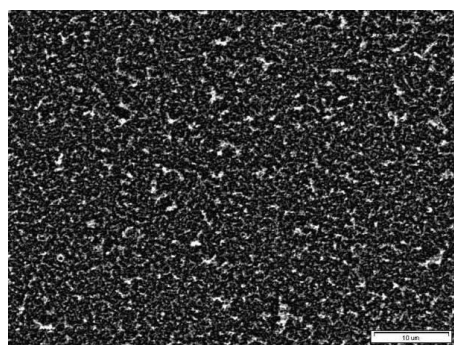
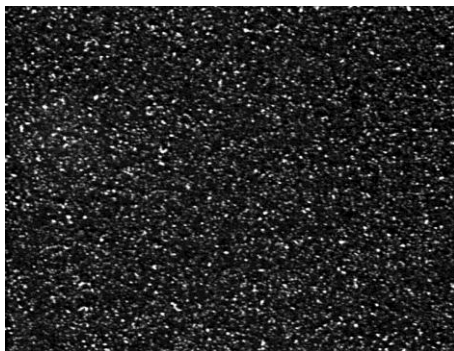
روش بررسی

اصلاح سطح توسط لیزر برای اصلاح سطح فیلم‌های پلی‌استایرن با لیزر از لیزر اکسایمر با طول موج ۱۹۳ نانومتر استفاده شد. لیزر یادشده ساخت شرکت LAMBDA PHYSIK مدل 210 LPX[®] است. پهنای پالس این لیزر ns ۲۰ و سرعت تکرار پالس آن ۱۰۰-۱ هرتز قابل تنظیم می‌باشد و متوسط انرژی آن ۴۰۰ mJ است. فیلم‌های پلی‌استایرن با استفاده از سیستم ذکر شده با انرژی (۴۳۰-۴۵۰ mJ) و فرکانس ثابت ۱ هرتز و تعداد پالس‌های متغیر (۱، ۵، ۱۰ پالس) اصلاح گردید.

یافته‌ها

در بررسی تغییرات مورفولوژی پلی استایرن اصلاح شده با لیزر هنگامی که سطح پلیمر با پرتوهای UV با شاریدگی بالاتر از حدآستانه پرتودهی می‌شوند، کندگی بر روی سطح اتفاق می‌افتد و مورفولوژی سطح تغییر می‌کند. اندازه ساختار هم به طبیعت پلیمر (خصوصیاتی مثل ضریب جذب در طول موج به‌کار گرفته شده و استحکام پیوندها) و هم به خصوصیات پرتو (طول موج، شاریدگی، تعداد پالس‌ها، فرکانس و ...) بستگی دارد [۳].

در تصویر ۱، تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی (SEM) نمونه‌های اصلاح شده با لیزر مشاهده می‌شود. با مقایسه تصاویر ۱: الف و ۱: ب مشاهده می‌شود که مورفولوژی خاصی بر روی سطح پلی استایرن ایجاد شده است. تصویر ۲، تصویر AFM پلی استایرن اصلاح نشده و پلی استایرن اصلاح شده با لیزر ۱ پالس است. همان‌طور که در تصویر دیده می‌شود، ساختار ایجاد شده بر روی سطح، در حد نانومتر است. پهنای یک تپه و دره بین ۱۵۰-۱۴۰ نانومتر و عمق دره‌ها در حدود ۱۵-۱۲ نانومتر است.

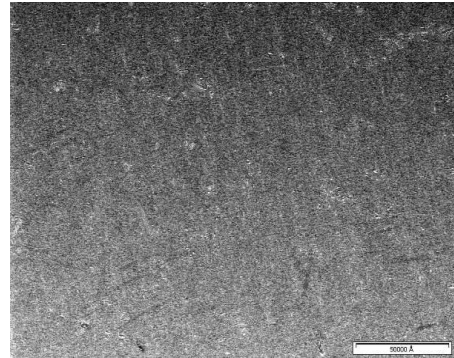
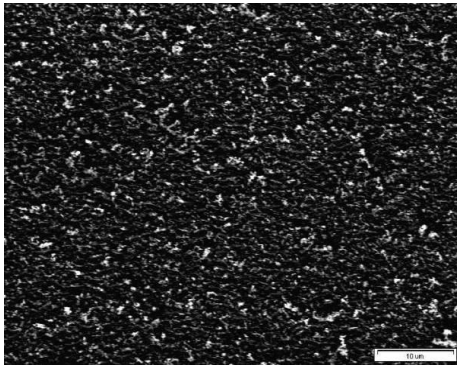


نگهداری رده سلولی از یک محیط کشت معمولی (subculture) استفاده شد. سلول‌هایی که در محیط کشت قرار داده شدند به مدت یک هفته در محیط مرطوب دارای CO₂ با غلظت ۵ درصد و دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد رشد داده شدند. سلول‌ها پس از رشد تک‌لایه^۲ توسط تریپسین برداشت شدند و سوسپانسیونی از سلول با غلظت ۴×۱۰^۵ سلول در میلی‌لیتر تهیه گردید.

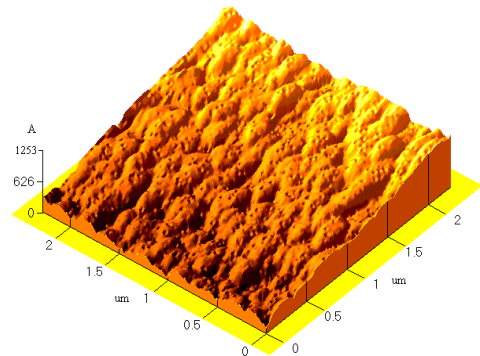
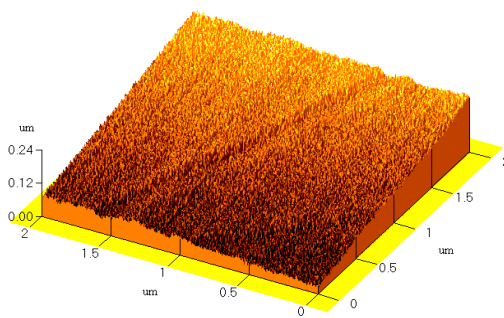
فیلم‌های پلی استایرن پس از شستشو در شرایط استریل در پتری دیش قرار داده شدند و ۵ میلی‌لیتر از سلول‌های سوسپانسیون شده روی آن‌ها ریخته شد و به مدت ۷ روز در انکوباتور نگهداری شدند. برای مشاهده سلول‌ها، نمونه‌ها پس از شستشو با محلول PBS در اتانول ۹۶ درصد به مدت ۵ دقیقه قرار داده شدند تا سلول‌ها تثبیت شوند و سپس با محلول آبی اتانول با غلظت‌های مختلف (۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد)

به مدت ۵ دقیقه هیدراته شدند و با قراردادن آن‌ها در محلول رقیق شده گیمسا با PBS به نسبت (۱:۲۰) رنگ آمیزی شدند. پس از ۳۰ دقیقه قرار گرفتن در محلول گیمسا، نمونه‌ها خارج شده و رنگ اضافی با آب مقطر شسته شد و با قراردادن آن‌ها در محلول آبی اتانول با درجات مختلف (۹۶، ۸۰ و ۷۰ درصد) آگیری و در دمای اتاق خشک شدند. در این آزمایش از پلی استایرن ظروف کشت ساخت شرکت Falcon[®] به‌عنوان کنترل منفی استفاده گردید.

تعداد سلول‌هایی که به سطح چسبیده‌اند با به‌کار بردن میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ تعیین شد. این سلول‌ها در حداقل ۵ منطقه از فیلم که به‌طور اتفاقی در نواحی مرکزی و کناری فیلم انتخاب شدند، شمارش گردیدند. برای شمارش و تعیین مساحت سلول‌هایی که روی سطح چسبیده و پخش شده‌اند از نرم‌افزار (Image Pro Plus) استفاده شد و مقدار متوسط اطلاعات داده شده به‌همراه انحراف استاندارد گزارش گردید.



تصویر ۱: الف) تصویر SEM پلی استایرن اصلاح نشده، ب) اصلاح شده با لیزر ArF ۱۹۳ نانومتر با تعداد پالس ۱ (ج) ۵ (د) ۱۰. اندازه ساختار حاصل از لیزر ArF ۱۹۳ نانومتر تا اندازه زیادی به طول موج مورد استفاده بستگی دارد. هر چقدر اندازه طول موج پرتوی لیزر به کار رفته کمتر باشد، ساختار نیز ریزتر خواهد بود [۱۰].



تصویر ۲: الف) تصویر AFM پلی استایرن اصلاح نشده ب) اصلاح شده با لیزر ArF (۱۹۳ نانومتر) با پالس ۱ (ج) ۵ (د) ۱۰.

است [۱۲]. در این طول موج جذب پلی استایرن بالا می باشد و در نتیجه عمق کندگی ایجاد شده بسیار اندک است.

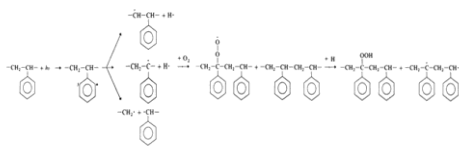
محققان دیگری نیز با استفاده از لیزر توانسته اند ساختارهایی در حد نانومتر بر روی سطح ایجاد کنند. Zhu و همکاران با استفاده از هارمونی سوم لیزر Nd:YAG با طول موج ۲۶۶ نانومتر را برای اصلاح و ایجاد نانو ساختار بر روی پلی استایرن استفاده نموده اند. پهنای یک تپه و دره ایجاد شده بر روی سطح ۲۵۰-۲۴۰ نانومتر و عمق دره ها ۶۰-۵۰ نانومتر بوده است [۱۳]. واحدی و همکاران نیز با استفاده از لیزر

عمق دره ها نیز با توجه به رابطه زیر به میزان جذب و شاریدگی به کار رفته در پرتو دهی بستگی دارد [۸ و ۱۰]:

$$l_F = \frac{1}{\alpha} \log \frac{F}{F_0} \quad (1)$$

که در آن l_F عمق کندگی، a ضریب جذب، F شاریدگی پرتوی لیزر و F_0 شاریدگی آستانه تحمل است. همان طور که در این رابطه مشخص است، هر چقدر میزان جذب بالاتر باشد، عمق کندگی نیز کمتر خواهد بود. جذب پلی استایرن در طول موج ۱۹۳ نانومتر مربوط به انتقال مجاز $\pi \rightarrow \pi^*$ حلقه بنزنی

در طول موج ۱۹۳ نانومتر جذب مربوط به حلقه بنزنی است [۱۲]. هنگامی که پرتوی لیزر به سطح پلی استایرن تابانیده می شود پرتو توسط حلقه بنزن جذب می شود و حلقه به حالت تهییج شده می رسد [۱۲، ۱۵ و ۱۶]. انرژی تهییج می تواند با انتقال انرژی به باندهای CH یا C-C منتقل شود و رادیکال های ایجاد شده با اکسیژن هوا واکنش می دهد و رادیکال های پراکسیدی بر روی سطح ایجاد می شود. رادیکال های پراکسی با جذب هیدروژن از زنجیره های دیگر، بر روی سطح پلی استایرن، هیدروپراکسید تشکیل می دهند (تصویر ۴).



تصویر ۴- مکانیزم تشکیل گروه های پراکسید بر روی سطح پلی استایرن در اثر پرتودهی با لیزر.

علاوه بر گروه های پراکسید و هیدروکسیل، تشکیل گروه های عاملی قطبی دیگر از جمله کربونیل، استر [۱۵ و ۱۶]، ترکیبات نیترون دار (-C=N- و -C≡N-) [۱۷ و ۱۸] نیز گزارش شده است. اما احتمالاً به دلیل غلظت پایین این گروه ها و گستردگی محدوده آنالیز ATR-IR (۵-۱۹ μm) این گروه ها در طیف ATR-IR شناسایی نشده اند.

برای بررسی تغییرات آبدوستی نمونه ها بعد از عملیات لیزر از اندازه گیری زاویه تماس با قطره آب استفاده شد. نتایج حاصل از اندازه گیری زاویه تماس برای نمونه های اصلاح شده با لیزر بر حسب تعداد پالس در جدول ۱ نشان داده شده است. این نتایج نشان داد زاویه تماس قطره آب با سطح پلی استایرن پس از عملیات لیزر با ۱ پالس کاهش و پس از آن با افزایش تعداد پالس دوباره افزایش می یابد.

در جدول ۱ تغییرات انرژی آزاد سطحی که با استفاده از روش Owens و Wendt به دست آمده است برای نمونه های اصلاح شده با لیزر مشاهده می شود. براساس داده های به دست آمده، قطبیت سطح نیز ابتدا با استفاده از ۱ پالس افزایش یافته است و بعد از آن با افزایش تعداد پالس کاهش یافته است. نکته جالب توجه این است که با استفاده از پرتودهی توسط لیزر در طول موج فرابنفش ۱۹۳ نانومتر می توان هم به سطوح

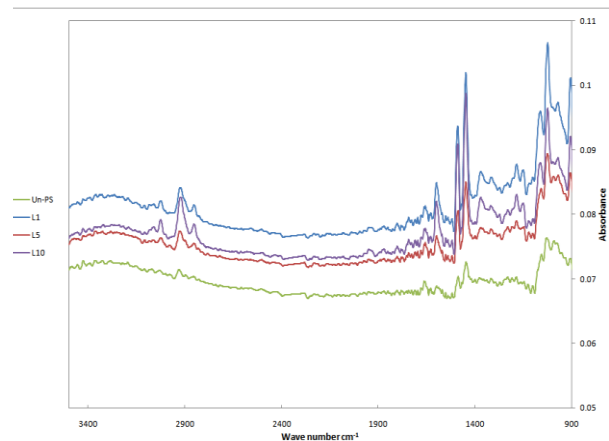
اکسایمر K₁F با طول موج ۲۴۸ نانومتر توانسته اند نانوساختار سطحی بر روی پلی اتیلن ترفتالات ایجاد کنند [۱۰].

تأثیر افزایش تعداد پالس بر روی مورفولوژی سطح را می توان در تصویر ۱ مشاهده نمود. با افزایش تعداد پالس اندازه ساختارهای ایجاد شده بر روی سطح بیشتر شده است. فاصله متوسط بین تپه ها $\langle D \rangle$ تابعی از لگاریتم تعداد ضربان است [۱۴].

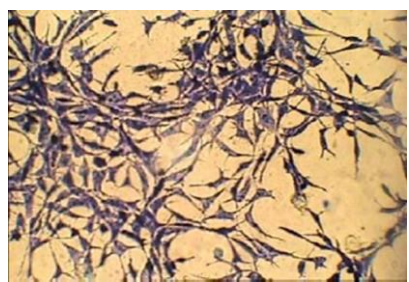
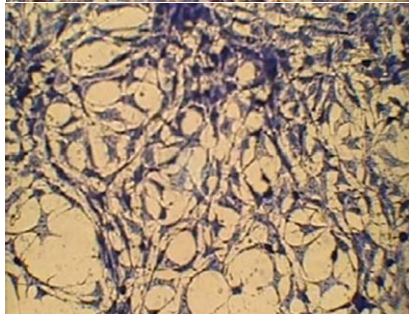
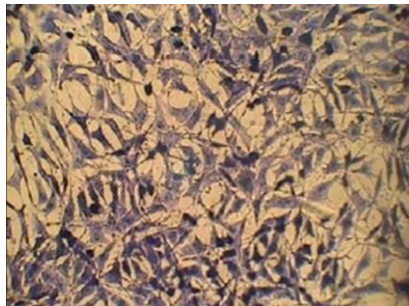
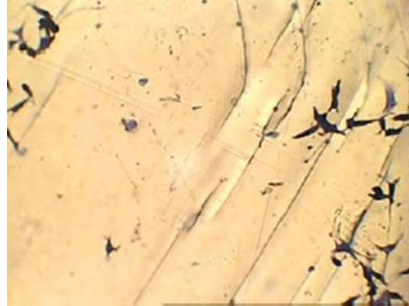
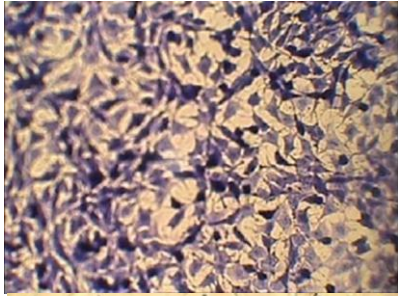
$$\langle D \rangle = k_1 \log N_p + K_2 \quad (2)$$

N_p تعداد ضربان لیزر و K_1 و K_2 اعداد ثابت هستند. K_1 به انرژی لیزر بستگی زیادی ندارد ولی نسبت به خصوصیات پلیمر مانند بلورینگی، میدان کشش داخلی، نسبت کشش و میزان جذب حساس است و K_2 عدد ثابتی است که ابعاد مورفولوژیکی فیلم را بعد از اولین ضربه لیزر نشان می دهد [۱۴]. همانطور که در این رابطه نیز دیده می شود فاصله متوسط بین تپه ها با افزایش تعداد پالس به صورت لگاریتمی زیاد می شود.

طیف ATR-IR پلی استایرن اصلاح شده با لیزر با تعداد پالس های مختلف در تصویر ۳ مشاهده می شود. در طیف ATR-IR پیک هایی در محدوده 1188 cm^{-1} و 1365 cm^{-1} که مربوط به گروه عاملی پراکسید است، مشاهده می شود. علاوه بر این پیک هایی نیز در حدود 1600 cm^{-1} و 3284 cm^{-1} مشاهده می شود که مربوط به گروه عاملی هیدروکسیل است.



تصویر ۳- طیف ATR-IR پلی استایرن اصلاح نشده (Un-PS)، اصلاح شده با لیزر ۱ پالس (L1)، ۵ پالس (L5) و ۱۰ پالس (L10)



تصویر ۵: الف) تصاویر میکروسکوپ نوری سلول‌های

آبدوست و هم به سطوح آبریز رسید که این خود نوعی مزیت پرتودهی با لیزر در مقایسه با منابع نوری دیگر است. نتایج مشابهی نیز توسط میرزاده و همکارانش بر روی فیلم‌های PET در اثر پرتودهی با لیزر KrF با طول موج ۲۴۸ نانومتر گزارش شده است [۱۹].

کاهش زاویه تماس قطره آب با سطح پلیمر در ۱ پالس می‌تواند به علت شکل‌گیری گروه‌های قطبی بر روی سطح و تغییر ساختار شیمیایی آن باشد. با افزایش تعداد پالس به دلیل تجزیه پراکسیدهای روی سطح، ایجاد تخلخل و حباب‌های هوا در اثر کندگی با لیزر، آبدوستی سطح کاهش می‌یابد [۲۰].

بررسی زیست‌سازگاری نمونه‌های اصلاح شده با لیزر

بررسی زیست‌سازگاری چسبندگی و رشد سلول‌های فیبروبلاست بر روی فیلم‌های پلی‌استایرن اصلاح نشده و اصلاح شده با لیزر و نیز کنترل منفی (پلی‌استایرن کشت سلولی) با استفاده از کشت سلول‌های فیبروبلاست L-929 انجام گرفت. رفتار سلولی بر روی یک ماده زیست‌سازگار، فاکتور مهمی جهت تعیین میزان زیست‌سازگاری آن است. فرآیند چسبندگی و پهن شدن سلول‌ها بعد از تماس با مواد زیست‌سازگار شامل چسبیدن سلول^۴ رشد پاهای کاذب، به دور تنیدن تارهای سیتوپلاسمی و مسطح شدن جرم سلول می‌باشد که به صورت متوالی پیشرفت می‌کند [۲۱].

تصویر ۵، تصاویر میکروسکوپ نوری سلول‌های فیبروبلاست L-929 رنگ‌آمیزی شده بر روی فیلم‌های پلی‌استایرن اصلاح شده توسط لیزر را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، سلول‌های اندکی بر روی سطح PS اصلاح نشده رشد کرده‌اند و سلول‌ها حالت جمع‌شدگی دارند در حالی که در نمونه‌های اصلاح شده با لیزر، دانسیته سلول‌های چسبیده به سطح قابل مقایسه با کنترل منفی است. همچنین میزان پهن‌شدگی آن‌ها افزایش یافته است.

^۳ spreading

^۴ attachment

مورفولوژی سطح در اثر پرتوی لیزر باشد. با افزایش زبری سطح، مکان‌های مناسب برای لنگراندازی سلول‌ها بر روی سطح بیشتر می‌شود و در نتیجه هم دانسیته سلول‌های چسبیده به سطح و هم مساحت آن‌ها بر روی سطوح زبر بیشتر از سطوح صاف خواهد شد [۲۱].

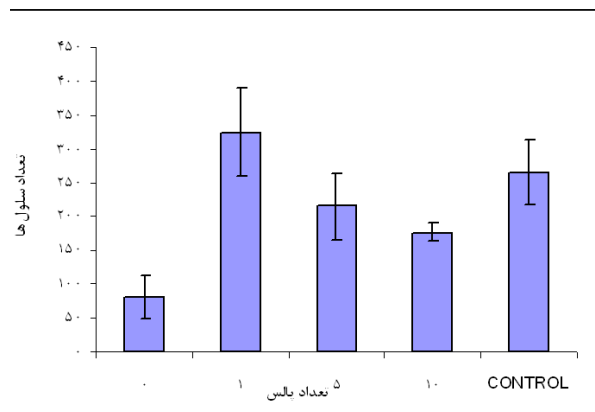
نتیجه گیری

اصلاح سطح پلی استایرن توسط لیزر باعث ایجاد مورفولوژی خاصی در ابعاد نانومتر بر روی سطح آن شده است. این مسئله می‌تواند به دلیل طول موج پائین لیزر ArF ۱۹۳ نانومتر باشد. با افزایش تعداد پالس لیزر، اندازه ساختارهای ایجاد شده بر روی سطح پلی استایرن افزایش یافته است. بررسی طیف ATR-IR نمونه‌های اصلاح شده با لیزر نشان دهنده تشکیل گروه‌های پراکسید و هیدروکسیل بر روی سطح پلی استایرن بوده است. بررسی تغییرات زاویه تماس و انرژی آزاد سطحی نمونه‌های اصلاح شده با لیزر نشان داد که با افزایش تعداد پالس، آبدوستی سطح ابتدا افزایش و سپس با افزایش آن به ۵ و ۱۰ پالس کاهش یافته است.

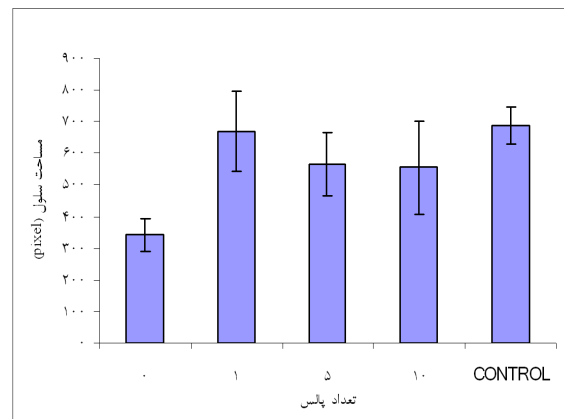
داده‌های حاصل از کشت سلولی حاکی از افزایش زیست‌سازگاری سطح نمونه‌های اصلاح شده با لیزر است. بیشترین تعداد و مساحت سلول‌های چسبیده به سطح متعلق به نمونه اصلاح شده با ۱ پالس بوده است. میزان رشد سلول‌ها بر روی این نمونه از کنترل منفی نیز بهتر بوده است. در نمونه اصلاح شده با ۵ و ۱۰ پالس با وجود آبدوستی کمتر از نمونه اصلاح نشده، تعداد و مساحت سلول‌های چسبیده به سطح بیشتر بوده است که این می‌تواند به دلیل غلبه تأثیر پارامتر مورفولوژی سطح بر پارامتر آبدوستی سطح باشد به عبارت دیگر به علت تغییرات مورفولوژی ایجاد شده بر روی سطح در اثر پرتوی لیزر، توانایی چسبندگی سلول‌ها به این سطوح بالا رفته است و زیست‌سازگاری آن‌ها بهتر از نمونه اصلاح نشده است.

فیبروبلاست L-929 رنگ آمیزی شده بر روی سطح پلی استایرن اصلاح نشده، (ب) اصلاح شده با لیزر ۱ پالس، (ج) ۵ پالس، (د) ۱۰ پالس و (ه) کنترل منفی (TCPS).

در تصاویر ۶ و ۷ اثر تعداد پالس لیزر بر روی تعداد و مساحت سلول‌های چسبیده به سطح نشان داده شده است. با مقایسه داده‌های جدول ۱ و تصاویر ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که میزان دانسیته سلول‌ها بر روی سطح پلی استایرن با افزایش زاویه تماس و قطبیت سطح افزایش و با کاهش آن کاهش می‌یابد.



تصویر ۶- نمودار تعداد سلول‌های چسبیده به سطح پلی استایرن اصلاح شده با لیزر بر حسب تعداد پالس



تصویر ۷: نمودار مساحت سلول‌های چسبیده به سطح پلی استایرن اصلاح شده با لیزر بر حسب تعداد پالس البته میزان سلول‌های چسبیده به سطح پلی استایرن اصلاح شده با لیزر ۵ و ۱۰ پالس با وجود آبدوستی کمتر از نمونه اصلاح نشده بیشتر است. این مسئله می‌تواند مربوط به تغییرات

References

1. Mirzadeh H, Bagheri Sh. Comparison of the Effect of Excimer Laser and RF Plasma on Polystyrene Surface, *Adhesion Physics and Chemistry* 2007; 76: 1435-40.
2. Mirzadeh H, Khorasani M, Sammes P, PDMS Surface Modification by Laser Irradiation: A Novel Technique for the Preparation of Blood Compatible Polymers, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology* 1995; 8: 77-86.
3. Mirzadeh H, Dadsetan M. Influence of Laser Modifying of Polyethylene Terephthalate On Fibroblast Cell Adhesion, *Radiation Physics and Chemistry* 2003; 67:381-5.
4. Dadsetan M, Mirzadeh H, Sharifi-Sanjani N. IR Laser Surface Modification of Polyethylene Terephthalate as a Biomaterial, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology* 2000; 9(4): 203-9.
5. Khorasani MT, Mirzadeh H. Laser Surface Modification of Silicon Rubber to Reduce Platelet Adhesion in vitro, *J. Biomater. Sci. Polym. Edn* 2004; 15(1): 59-72.
6. Heitz J, Voelcker N, Chaloupka A, Yakunin S, Hook AL, Anglin E. Photonic nanostructures for potential applications in cell biology, *Transparent Optical Networks (ICTON)*, 12th International Conference on , June 27 2010-July 1 2010; doi: 10.1109/ICTON.2010.5548992.
7. Licht M, Straub M, König K, Afshar M, Feili D, Seidel H. Three-dimensional polymer nanostructures for applications in cell biology generated by high-repetition rate sub-15 fs near-infrared laser pulses", *Proc. SPIE* 7908, 79080M (2011); doi:10.1117/12.873581 .
8. Lu HW, Lu QH, Chen WT. Cell Culturing on Nanogrooved Polystyrene Petri dish Induced by Ultra Violet Laser Irradiation, *Materials Letters* 2003; 58, 29-32.
9. Mirzadeh H, VahediMoghadam E, Mivehchi H, Laser-modified nanostructures of PET films and cell behavior, *Journal of Biomedical Materials Research Part A* 2011; 98A(1) 63-71.
10. Rebollar E, Frischauf I, Olbrich M, Peterbauer T, Hering S, PreinerJ, Hinterdorfer P, Romanin C, Johannes H. Proliferation of aligned mammalian cells on laser-nanostructured polystyrene, *Biomaterials* 2008; 29; (12): 1796-806.
11. Hong MH, Huang LM, Hukyanchuk MS. Laser Assisted Surface Nanopatterning, *Sensor And Actuators A* 2003; 108: 69-74.
12. Jan FR, *Polymer Photodegradation; Mechanisms and Experimental Methods*, Chapman & Hall, 1995.
13. Zhu Bangshang, Zhang Qiqiao, Lu Qinghuan. Nanotopographical Guidance of C6 Glioma Cell Alignment and Oriented Growth, *Biomaterials* 2004; 25: 4215-23.
14. Dadsetan M. study the effect of CO2 and Excimer laser on biocompatibility of Polyethylene terephthalate, Tehran University, 1999.
15. Lopez G, Hartmut G, Schimmel T, Vacuum Ultraviolet Photochemically Initiated Modification of Polystyrene Surfaces: Chemical Change, *Photochemistry and Photobiology* 2005; 81: 777-82.
16. Guruvenket S, Komath M, Lakshmi V. Wettability Enhancement of Polystyrene with Electron Cyclotron Resonance Plasma with Argon, *J. Applied Polymer Science* 2003; 98: 1618-23.
17. Guruvenket S, Rao GM, Komath Monof K, Plasma Surface Modification of Polystyrene and Polyethylene, *Applied Surface Science* 2004; 236: 278-84.
18. Bangshang Z, Qinhua L, Jie Y. Effect of Laser Modified Polystyrene Substrate on CHO Cell Growth and Alignment, *J. Biomed. Mater. Res. Part B: Appl. Biomater* 2004; 70b: 43-8.
19. Grainger WD, Kevin GE. *Biomaterial Surface Analysis, Handbook of Biomaterials Evaluations*, Taylor & Francis, 1999.
20. Dadsetan M, Mirzadeh H, Sharifi Sanjani N, Cell Behavior on Laser Surface Modified Polyethylene Terephthalate in vitro, 2001.
21. Khorasani MT, Mirzadeh H, Bkh Cell Behavior on Laser Treated Poly Dimethyl Siloxane Surface, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 2004; 35: 67-71.

