

## ساخت فیلم پلی وینیل کلرید آلاینده شده با کوئیناکرین دی هیدروکلرید و مطالعه ویژگی‌های دزیمتری آن

شهزاد فیضی<sup>۱\*</sup>، فرهود ضیایی<sup>۱</sup>، آرش آرمین<sup>۱</sup> و هادی فتح‌اللهی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج، ایران.

<sup>۲</sup> پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج، ایران.

\* کرج، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، مجتمع پژوهشی البرز، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کدپستی: ۳۱۵۴۸-۱۷۸۹۵

پست الکترونیکی: sfeizi@nrcam.org

### چکیده

تجزیه رنگ‌های آلی، القا شده با تابش‌های یونیزان<sup>۱</sup> مفهومی است که مکرراً برای توسعه ابزارهایی جهت اندازه‌گیری دز تابشی بهره‌برداری شده است. در این پژوهش با دلالت بر این مفهوم، آماده‌سازی فیلم‌های پلی‌وینیل‌کلرید آلاینده شده با مقادیر مختلفی از ترکیب کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید انجام و قابلیت‌های آن‌ها برای دزیمتری پرتوهای گاما در گستره دز ۰ تا ۶۰ کیلوگری ارزیابی شد. نتایج حاکی از این بود که فیلم‌های محتوی ۲٪ وزنی کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید دارای بهترین پاسخ در گستره دز مورد بررسی و نیز میزان محوشدگی ۳۳/۳٪ در مدت زمان ۶۰ روز بوده و از این رو برای دزیمتری دزهای بالا در صنعت پرتوآوری مناسب‌اند.

کلیدواژگان: کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید، پلی‌وینیل‌کلرید، دزیمتری، پرتو گاما.

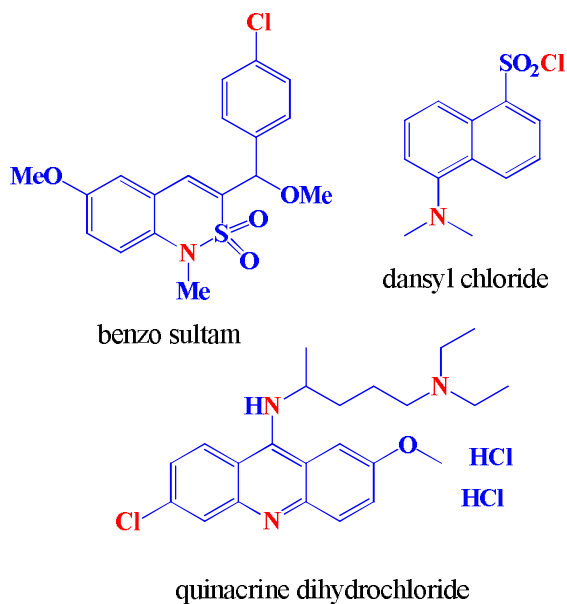
<sup>1</sup> Ionization radiation induced decomposition of dyes

### ۱. مقدمه

دلخواه ضروری است. با این حال بسیاری از دزیمترهایی که امروزه در دسترس هستند اغلب گران‌قیمت بوده و یا دارای کاستی‌هایی در طریقه استفاده و خوانش هستند. به عنوان مثال دزیمترهای مایع به دلیل حالت فیزیکی خاص پرتوفاقدار نیستند. بنابراین ضرورت توسعه دزیمترهای ارزان، منعطف و قابل اعتماد وجود دارد. فیلم دزیمترها اغلب نسبت به دزیمترهای مایع یا انواع دیگر دزیمترها ترجیح داده می‌شوند.

پرتوفاوری روشی مقرون به صرفه، سبز و انرژی بهینه برای توسعه محصولات و فناوری‌های برتر است [۱]. در سراسر جهان تجهیزات پرتودهی عظیم و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی فراوانی وجود دارد که در آن‌ها تابش پرتوفاوری برای مقاصد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تمامی برنامه‌های کاربرد پرتوها دزیمتری امری اجباری است زیرا اندازه‌گیری دقیق و آسان دزهای تابشی برای رسیدن به محصولاتی با خواص

۱ نشان داده شده است، با یک مقایسه منطقی به نظر می‌رسد این ترکیب مشابه دو ترکیب ذکر شده مستعد برهم‌کنش و رفتار قانونمند در برابر پرتو یونیزان گاما باشد.



شکل (۱): ساختار مولکولی بنزو سالتام، دنسیل کلرید و کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید

در کار حاضر پلی‌وینیل کلرید که دارای حلالیت آسان، یکنواختی و شفافیت بالا، انعطاف‌پذیری مناسب و سهولت جداسازی از قالب مورد نظر بدون تغییر شکل است، به عنوان ماتریس انتخاب شد.

## ۲. تجربی

### ۱.۲. مواد

کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید و پودر پلی‌وینیل کلرید از شرکت سیگما آلدریج، اتانول و ایزوفورون از شرکت مرک خریداری شد و بدون خالص‌سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفت.

### ۲.۲. ساخت فیلم‌ها

از آنجا که ترکیب کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید دارای ویژگی‌های غیر آلی است در یک حلال آلی سبک حلالیت مطلوب ندارد. برای رفع این مانع استفاده از سیستم یک حلال

از جمله این دلایل سهولت بکارگیری و خوانش دز، استحکام، طول عمر بالا، پایداری پس از تابش، دردسترس بودن در ضخامت‌های مختلف و پوشش محدوده دز گسترده هستند. این دزیمترها عموماً برپایه یک ماتریس پلیمری شفاف و یک رنگینه ساخته می‌شوند. در اثر تابش، رنگینه ممکن است تغییر رنگ داده (جابجایی  $\lambda_{max}$ ) یا بر اثر تغییرات رادیولیتیک بر روی کروموفورها فقط کاهش میزان جذب اتفاق بیفتد. تجزیه رنگ‌ها و سایر ترکیبات آلی در اثر پرتو، به صورت شکست مرحله به مرحله پیوندها در اثر انرژی اعمال شده با پرتو، برهم‌کنش آن‌ها با گونه‌های فعال تولید شده در محیط (مانند رادیکال هیدروکسیل یا کلر) و یا تجزیه آن‌ها به گونه‌های کوچکتر توضیح داده می‌شود. در سال ۲۰۱۳ گزارشی از تهیه فیلم دزیمتر بر پایه پلی‌وینیل بوتیرال با استفاده از لوکوکریستال ویولت بعنوان رنگینه با گستره پاسخ خطی در محدوده ۰-۲۰ کیلوگری و پاسخ غیرخطی تا ۱۰۰ کیلوگری [۲] و در سال ۲۰۱۱ نیز گزارشی از ساخت فیلم دزیمتر پلی‌وینیل کلرید/ برموکروزول پرپل با گستره پاسخ خطی تا ۵۰ کیلوگری [۳] گزارش شده است. از سویی، ممکن است هر دزیمتری نسبت به متغیرهای محیطی که مهم‌ترین آن‌ها دما، رطوبت نسبی، نور محیط و نیز آهنگ دز جذبی هستند حساس باشد، برای اجتناب از انحراف در پاسخ و ایجاد خطای سیستماتیک، همواره باید تاثیر شرایط محیطی بر پاسخ دزیمتر مورد مطالعه قرار گیرد.

پیشتر توسط گروه تحقیقاتی حاضر، ساخت فیلم دزیمترهای پلی‌کربناتی با استفاده از ترکیب‌های دنسیل کلرید و بنزو-*O*-سالتام به عنوان رنگینه انجام شد و نتایج رضایت‌بخشی نیز حاصل شد [۴و۵]. از سویی کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید یک ساختار سه حلقه‌ای جوش خورده حاوی یک هتروسیکل نیتروژن دار است که در ساختار خود گروه‌های عاملی آمین نوع دوم، کلر و متوکسی متصل به حلقه آروماتیک را جای داده است. با توجه به ساختار این ترکیبات که در شکل

### ۳.۲. تابش دهی فیلم‌های پلی وینیل کلرید / کوئیناکرین

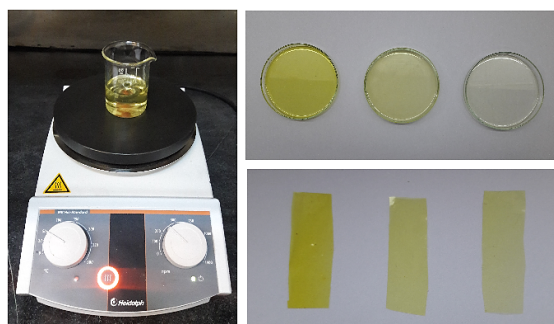
#### دی هیدروکلرید

فیلم‌های پلیمری رنگینه دار شده به وسیله تجهیزات پرتو دهی گامای دارای یک چشمه  $^{60}\text{Co}$ ، مدل PX-30، ساخت کشور روسیه، تحت تابش دهی قرار گرفتند. آهنگ دز  $2/65 \text{ kGy/h}$  به صورت ثابت به وسیله سیستم دزیمتری استاندارد مرجع فریک مورد پایش قرار گرفت. تصحیح برای فروپاشی و به تبع آن کاهش آهنگ دز رادیونوکلید چشمه  $^{60}\text{Co}$  انجام شد. دزیمتر فریک مورد استفاده بر اساس استاندارد  $\text{EASTM} 1026$  آژانس بین المللی انرژی اتمی ساخته شد. مجموع خطاهای سیستماتیک و غیرسیستماتیک در پرتو دهی کمتر از ۵٪ گزارش شده است. برای رسیدن به تعادل الکترونی در طول تابش دهی، مجموعه‌ای از سه دزیمتر پلی وینیل کلریدی برای هر سطح دز تابش دهی در یک سیلندر پلی استایرنی با ضخامت ۴ میلی‌متر قرار داده شد. از آنجا که پلی استایرن دارای دانسیته  $1/046 \text{ g/cm}^3$  که تقریباً برابر با دانسیته آب است مقادیر دز حاصل شده قابل مقایسه با آب است. نمونه‌ها تحت مقادیر دز ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلوگری در دمای اتاق و در هوا تابش دهی شدند. فیلم‌های تابش داده شده و فیلم‌های تابش داده نشده قبل از انجام آنالیزهای اسپکتروفوتومتری در شرایط بدون نور، دمای اتاق و فشار محیط نگهداری شدند.

### ۴.۲. اسپکتروفوتومتری مرئی-فرا بنفش

طیف جذبی و مقادیر جذب فیلم‌های پلی وینیل کلرید / کوئیناکرین دی هیدروکلرید، تابش داده شده و تابش داده نشده، با استفاده از یک دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل Beckman DU 640 ساخت کشور امریکا ثبت شد. ضخامت فیلم‌ها با استفاده از یک گیج دیجیتالی با دقت ۱ میکرومتر اندازه‌گیری شد.

آلی سنگین تر مانند ایزوفورون انتخاب شد. ابتدا ۰/۱۰۸ گرم پودر پلی وینیل کلرید در ۵ میلی لیتر ایزوفورون در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد حل شد. مقادیر ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۳ گرم کوئیناکرین دی هیدروکلرید به ترتیب برای تهیه فیلم‌هایی با درصد وزنی ۱، ۲ و ۳٪ در ۲ میلی‌لیتر اتانول حل شد. سپس به آن ۳ میلی‌لیتر ایزوفورون افزوده و به شدت هم‌زده شد. محلول حاوی کوئیناکرین دی هیدروکلرید به محلول پلی وینیل کلرید افزوده شد. پس از امتزاج کامل قالب‌گیری در یک پتری دیش به قطر ۵/۷ سانتی‌متر که بر روی گرمکنی با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد، انجام شد و به مدت ۳۰ دقیقه در این حالت قرار گرفت. سپس پتری دیش جهت خروج کامل ذرات باقیمانده حلال، در دمای اتاق قرار داده شد. فیلم‌های حاصل که از این پس PVC/Q نامیده می‌شود، به رنگ زرد بوده و شدت رنگ با افزایش درصد کوئیناکرین دی هیدروکلرید موجود در فیلم‌ها افزایش می‌یابد. فیلم‌های آماده شده به صورت قطعاتی با ابعاد  $1 \times 3 \text{ cm}^2$  برش داده شد و در محیطی تاریک و خشک در دمای اتاق قرار گرفت. در شکل ۲ تصویری از مراحل ساخت و فیلم‌های نهایی ارائه شده است.



شکل (۲): مراحل ساخت و فیلم‌های نهایی PVC/Q.

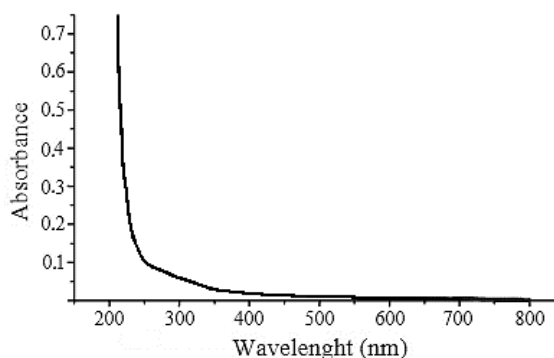
لازم به توضیح است هرکدام از آزمایش‌های شرح داده شده، به جهت بررسی صحت و نیز حذف خطای احتمالی، حداقل ۲ بار تکرار شده‌اند.

## ۳. بحث و نتایج

## ۱.۳. طیف جذبی فیلم‌ها و پلی‌وینیل‌کلرید تابش داده

نشده

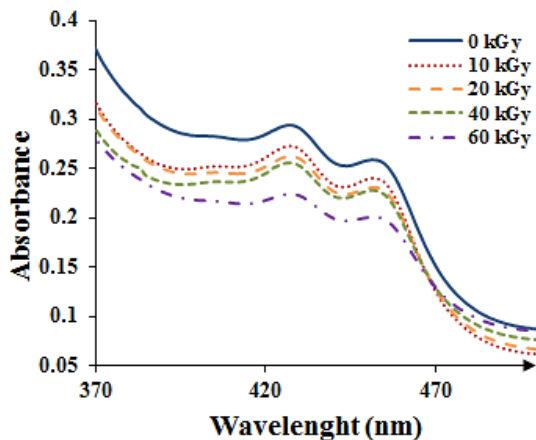
طیف جذبی فیلم‌های پلی‌وینیل‌کلرید خالص و پلی‌وینیل‌کلرید / کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید و همچنین محلول کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید در اتانول با استفاده از یک سیستم اسپکتروفوتومتر تابش UV در گستره طول موج ۲۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر ثبت شد. در این گستره طول موج هیچ پیک جذبی‌ای که وابسته به ماتریس پلی‌وینیل‌کلرید باشد مشاهده نشد. دو پیک در طول موج‌های ۴۲۸ و ۴۵۱ نانومتر مشاهده شد که مربوط به کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید است. طیف پلی‌وینیل‌کلرید در طول موج‌های بالاتر از ۲۲۵ نانومتر تنها شامل خط زمینه بوده و جذبی ندارد (شکل ۳) [۶].



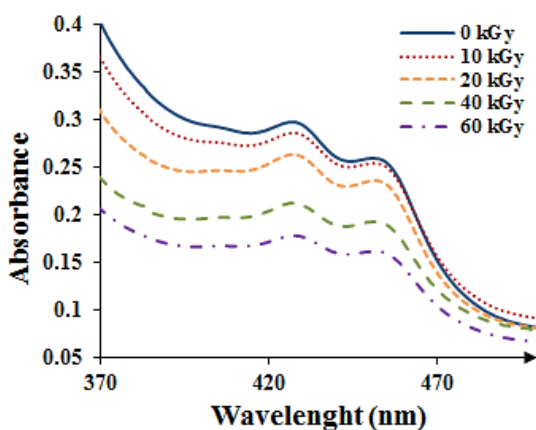
شکل (۳): طیف جذبی مرئی ماوراء بنفش پلی‌وینیل‌کلرید [۶].

## ۲.۳. طیف جذبی فیلم‌های تابش داده شده

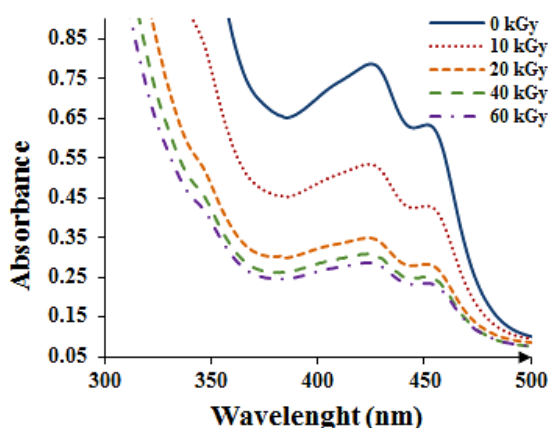
شکل‌های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب طیف جذبی فیلم‌های پلی‌وینیل‌کلرید / کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید ۱، ۲ و ۳٪ که با دزهای مختلف پرتوهای گاما تابش داده شدند را نشان می‌دهند. تمامی محاسبات بر روی میزان جذب خالص فیلم‌ها  $\Delta A = (A_0 - A)$ ، و در هر دو طول موج ۴۲۸ و ۴۵۱ نانومتر انجام گردید. در این معادله  $A_0$  و  $A$  به ترتیب جذب فیلم تابش داده شده و فیلم تابش نشده است.



شکل (۴): طیف جذبی فیلم‌های ۱٪w PVC/Q تابش داده شده با دزهای مختلف پرتوهای گاما.



شکل (۵): طیف جذبی فیلم‌های ۲٪w PVC/Q تابش داده شده با دزهای مختلف پرتوهای گاما.



شکل (۶): طیف جذبی فیلم‌های ۳٪w PVC/Q تابش داده شده با دزهای مختلف پرتوهای گاما.

## ۳.۳. تجزیه پرتوالقایی کوئیناکرین دی هیدروکلرید

طیف جذبی فیلم‌های پلی وینیل کلرید/ کوئیناکرین دی هیدروکلرید ۱، ۲ و ۳٪ قبل و بعد از پرتو دهی با پرتوهای گاما در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. در طیف‌ها دو ناحیه ویژه قابل مشاهده است. این نواحی شامل دو باند جذبی در طول موج‌های ۴۲۸ نانومتر و ۴۵۱ نانومتر هستند. با افزایش دز پرتو شدت هر دوی این باندها کاهش یافته و شاخصی برای اندازه گیری دز به دست می‌دهد. انرژی پرتوهای گاما باعث شکست مرحله به مرحله کوئیناکرین دی هیدروکلرید شده و بنابراین غلظت این ترکیب در فیلم کاهش یافته و شدت جذب نیز کاهش می‌یابد. ساختارهای حاصل از این شکست‌ها عموماً در نواحی دارای انرژی بالاتر و طول موج‌های پایین‌تر (گستره طول موج ۲۰۰-۳۰۰ نانومتر) دارای جذب بوده و با توجه به اینکه جذب ذاتی پلی وینیل کلرید نیز در این نواحی قرار می‌گیرد پیک‌های جدید حاصل شده با پیک پلیمر همپوشانی داشته و قابل مشاهده نخواهد بود. استدلال فوق با مشاهده یک پیک رشدکننده در طول موج ۳۳۰ نانومتر در طیف‌های مربوط به فیلم‌های پلی کربنات/ دنسیل کلرید تعمیم داده می‌شود [۴].

## ۴.۳. منحنی دز-پاسخ (کالیبراسیون)

ضریب خالص  $\Delta A$  برای فیلم‌ها در هر مقدار دز محاسبه و با اعمال ضخامت فیلم، که در معادله با  $T$  نمایش داده می‌شود، نرمالیزه شد ( $\Delta A/T$ ). منحنی پاسخ فیلم‌های PVC/Q با درصد وزنی‌های ۱، ۲ و ۳٪ از ترکیب رنگینه به عنوان تابعی از دز تابشی رسم شد (شکل ۷ و ۸). رابطه وابستگی دز در هر منحنی با یک تابع خطی طبق معادله ۱ قابل توصیف است.

$$D(kGy) = C_1 \times \frac{\Delta A}{T} + C_2 \quad (1)$$

$C_1$  و  $C_2$  مقادیر ثابت خط هستند. مقادیر ضریب

همبستگی خطوط  $R^2$  که نشان‌دهنده میزان هماهنگی بین نقاط

و خط رسم شده است، برای هر منحنی دز-پاسخ در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به این مقادیر به روشنی قابل درک است که از میان نمونه‌های مورد بررسی نمودار دز-پاسخ فیلم‌های PVC/Q ۲٪w در هر دو طول موج از دیدگاه خطی بودن بیشترین مطابقت را از خود نشان می‌دهند. علاوه بر استناد به مقادیر  $R^2$  می‌توان حساسیت و گستره خطی پاسخ‌دهی را نیز برای انتخاب فیلمی با بهترین عملکرد منظور داشت.

از شکل ۷ و با مقایسه شیب منحنی‌ها به روشنی قابل درک است که هر سه نوع فیلم PVC/Q ۱٪w، PVC/Q ۲٪w و PVC/Q ۳٪w در طول موج ۴۲۸ نانومتر حساسیت بالاتری را نسبت به طول موج ۴۵۱ نانومتر، به پرتو نشان می‌دهند. شیب منحنی دز-پاسخ فیلم‌های PVC/Q ۱٪w، نسبت به دو نوع فیلم دیگر کوچکتر است. بنابراین حساسیت آن به دز پرتوهای گاما، کمتر است.

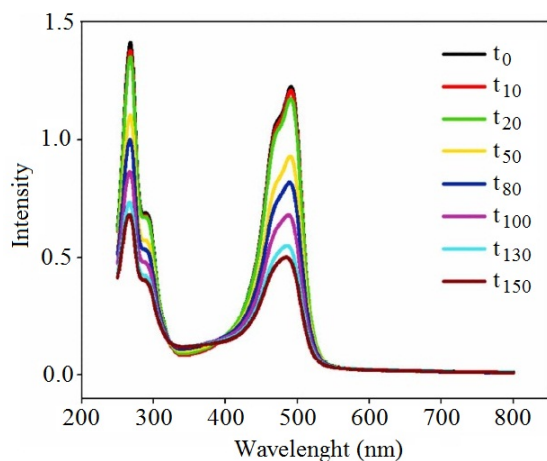
از سویی پاسخ‌دهی فیلم‌های PVC/Q ۳٪w، شامل دو ناحیه است. این فیلم‌ها در گستره دز ۵-۲۰ کیلوگری پاسخ‌دهی خطی و حساسیت بالا نسبت به پرتو گاما دارد، اما با افزایش دز پرتو شیب نمودار و به تبع آن حساسیت به سرعت کاهش می‌یابد.

جدول (۱): مقادیر  $R^2$  منحنی‌های خطی پاسخ به دز فیلم‌های ۱٪w PVC/Q، PVC/Q ۲٪w و PVC/Q ۳٪w در دو طول موج ۴۲۸ و ۴۵۱ نانومتر طبق معادله ۱.

فیلم	$\lambda_{max}$	$R^2$
PVC/Q ۱٪ w	۴۲۸	۰/۹۳۱۹
PVC/Q ۲٪ w	۴۲۸	۰/۹۹۰۵
PVC/Q ۳٪ w	۴۲۸	۰/۶۷
PVC/Q ۱٪w	۴۵۱	۰/۹۰۰۶
PVC/Q ۲٪w	۴۵۱	۰/۹۹۳۸
PVC/Q ۳٪w	۴۵۱	۰/۶۷۹۲

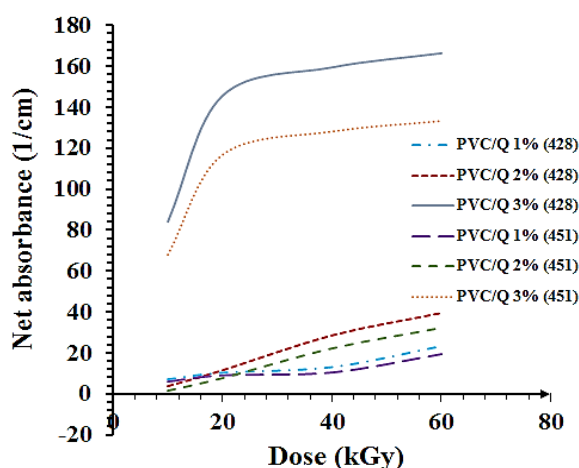
تأمین می‌کند. بدین ترتیب گونه‌های جدید حاصل خواهد شد که در ناحیه طول موج‌های پایین تر طیف مرئی ماوراء بنفش جذب دارند. همپوشانی پیک‌های حاصل از این گونه‌ها با پیک‌های مربوط به ماتریس پلی‌وینیل کلرید مانع از مشاهده آن‌ها می‌شود.

مشاهده گزارشی از شکست فوتوکاتالیستی آکریدین نارنجی در حضور اکسید آنتیموان میکروساختار که در آن با گذشت زمان شدت پیک مربوط به ترکیب آکریدین نارنجی که در طیف مرئی ماوراء بنفش در طول موج ۴۹۱ نانومتر ظاهر می‌شود کاهش یافته و پیکی در محدوده طول موج ۲۵۰ تا ۳۰۰ نانومتر به آرامی رشد می‌کند مویید این استدلال است (شکل ۹) [۷].



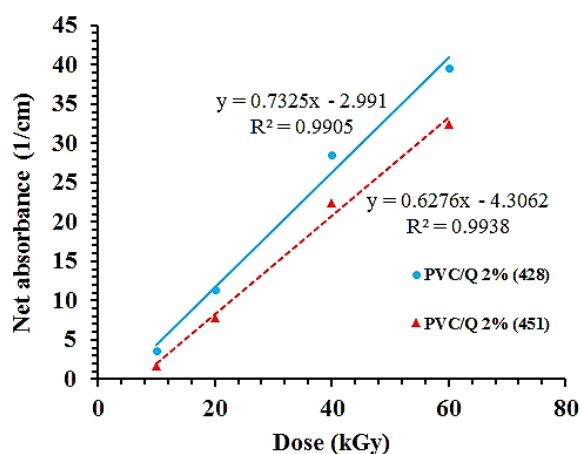
شکل (۹): طیف مرئی-ماوراء بنفش مخلوط واکنش در شکست فوتوکاتالیستی آکریدین نارنجی در حضور کاتالیزور اکسید آنتیموان میکروساختار [۷].

همچنین، گزارش مشابهی نیز از شکست فوتوکاتالیستی آکریدین نارنجی در حضور کاتالیزور  $\text{NaBiO}_3$  منتشر شده است که در آن‌ها با انفصال یک، دو یا سه گروه متیل به ترتیب گونه‌های تری، دی و مونومتیل دار آکریدین نارنجی حاصل شده است [۸].



شکل (۷): نمودار دز-پاسخ فیلم‌های PVC/Q ۱٪w، PVC/Q ۲٪w، PVC/Q ۳٪w در دو طول موج ۴۲۸ و ۴۵۱ نانومتر.

نمودار دز- پاسخ فیلم‌های PVC/Q ۲٪w در تمام گستره دز مورد آزمایش خطی هستند و حساسیت قابل قبول دارند. نمودار دز- پاسخ مربوط به این فیلم‌ها بطور مجزا در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل (۸): نمودار دز-پاسخ فیلم‌های PVC/Q ۲٪w در دو طول موج ۴۲۸ و ۴۵۱ نانومتر.

درحقیقت طیف جذبی مرئی-ماوراء بنفش ترکیب کوئیناکرین دی‌هیدروکلرید نشان‌دهنده برآیند خواص الکترونی زیرگروه‌های تشکیل‌دهنده این ماده است. جذب انرژی از پرتوی گاما سد انرژی شکست برخی پیوندها در این ترکیب را

نتایج نشان می‌دهد که تغییرات جذب برای فیلم نگهداری شده در حضور نور برای سه نوع فیلم PVC/Q ۱٪w، PVC/Q ۲٪w و PVC/Q ۳٪w به ترتیب برابر ۱/۸۹، ۳/۳۳ و ۲/۰۶٪ است. افزایش جذب را می‌توان ناشی از وابسته به کدر شدن پلیمر به مرور زمان، دانست. این میزان تغییرات پس از دو ماه در مقایسه با خطای قابل قبول در دزیمترهای عادی<sup>۲</sup> مورد استفاده در صنعت پرتوآوری (۰.۶٪) قابل اغماض می‌نماید.

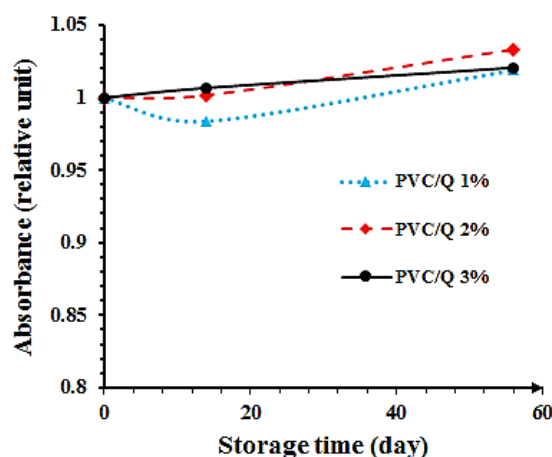
#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش فیلم‌های پلی وینیل کلرید آلاینده شده با ۱، ۲ و ۳٪ وزنی از کوئیناکرین که در این گزارش به اختصار به صورت PVC/Q یاد شده است ساخته شد. قابلیت کاربرد آنها به عنوان یک دزیمتر دز بالا برای اهداف پرتوآوری مورد بررسی قرار گرفت. پاسخ فیلم‌های PVC/Q ۲٪w به دز تابشی در محدوده تابش ۰ تا ۶۰ کیلوگری خطی و حساسیت آنها به دز قابل قبول است. پایداری پاسخ این فیلم دزیمترها در محیط بدون نور، مناسب و بیش از ۲ ماه است.

<sup>2</sup> Routine dosimeters

#### ۵.۳. بررسی پایداری پس از تابش

برای بررسی اثر محوشدگی پاسخ با گذشت زمان هر سه نوع فیلم PVC/Q ۱٪w، PVC/Q ۲٪w و PVC/Q ۳٪w که با ۲۰ کیلوگری پرتوهای گاما تابش داده شده بود به مدت دو ماه در دمای اتاق در عدم حضور نور نگهداری و طیف‌مرئی ماوراءبنفش آنها در فواصل زمانی مشخصی مجدداً قرائت شد. نمودار تغییرات جذب آنها در طول موج ۴۲۸ نانومتر در شکل ۱۰ رسم شده است.



شکل (۱۰): نمودار تغییرات جذب فیلم‌های PVC/Q ۱٪ W.

در شرایط دمایی اتاق و عدم حضور نور در مدت زمان دو ماه. PVC/Q ۳٪w و PVC/Q ۲٪w تابش داده شده با دز ۲۰ کیلوگری در

#### ۵. مراجع

- [1] S. K. Suman, K. A. Dubey, B. B. Mishra, Y. K. Bhardwaj, R. K. Mondal, M. Seshadri, V. Natarajan, L. Varshney. Synthesis of a flexible poly (chloroprene)/methyl red film dosimeter using an environment-benign shear compounding method. *Applied Radiation and Isotopes*, 98 (2015) 60–65.
- [2] Y. S. Soliman, A. A. Abdel-Fattah. Leuco crystal violet/poly (vinyl butyral) thin film as a high-dose dosimeter. *Radiation Measurements*, 49 (2013) 1–6.
- [3] M. Kattan, H. AlKassiri, Y. Daher. Using polyvinyl chloride dyed with bromocresol purple in radiation dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes*, 69 (2011) 377–380.
- [4] S. Feizi, F. Ziaie, M. Ghandi. Using polycarbonate dyed with dansyl chloride for dosimetry in radiation processing. *Radiochim. Acta*, 103 (2015) 605–612.
- [5] S. Feizi, F. Ziaie, M. Ghandi. Polycarbonate-based benzo- $\delta$ -sultam films for high-dose dosimetry in radiation processing. *Radiochim. Acta*, 103 (2015) 149–156.
- [6] A. de Campos, S. M. M. Franchett. Biotreatment effects in films and blends of PVC/PCL previously treated with heat. *Braz. arch. biol. technol.* 48 (2005) 235–243.
- [7] A. Jamal, M. M. Rahman, M. Faisal, S. B. Khan. Studies on photocatalytic degradation of acridine orange and chloroform sensing using as grown

antimony oxide microstructures. *Materials Sciences and Applications*, 2 (2011) 676-683.  
[8] C. S. Lu, C. C. Chen, L. K. Huang, P. A. Tsai,

H. F. Lai. Photocatalytic degradation of acridine orange over NaBiO<sub>3</sub> driven by visible light irradiation. *Catalysts*, 3 (2013) 501-516.