

روش‌های دزیمتری UV: مروری جامع بر اصول، روش‌ها و کاربردها

فاطمه الماسی فرد^{*۱}

^۱ دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران.

*آذربایجان شرقی، تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده فیزیک، کد پستی: ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱.

پست الکترونیکی: f.almasifard@tabrizu.ac.ir

چکیده

دزیمتری تابش فرابنفش (UV) برای ارزیابی خطرات زیست‌شناختی ناشی از تابش محیطی، تابش‌گیری شغلی، درمان پزشکی و کاربردهای صنعتی بسیار حیاتی است. این مقاله، روش‌های مختلف دزیمتری شامل ابزارهای اسپکترورادایومتری، دزیمترهای زیست‌شناختی، ثبت‌کننده‌های داده الکترونیکی، دزیمترهای شیمیایی، تکنیک‌های ترمولومینسانس و مواد فتوکرومیک نوظهور را بررسی می‌کند. هر روش مزایا و محدودیت‌های متمایزی برای کاربردهای مختلف از پایش تابش‌گیری شخصی گرفته تا ارزیابی محیطی و کنترل دز درمانی ارائه می‌دهد. هر دزیمتر به صورت خلاصه بررسی شده و تا حد ممکن مزایا و معایب استفاده و همچنین برتری و محدودیت‌های آن ارائه شده است. همچنین کاربردهای مهم دزیمتری UV در این مقاله آورده شده است. دزیمتری UV به دلیل اثرات زیست‌شناختی و شیمیایی وابسته به طول‌موج پیچیدگی‌هایی دارد که نیازمند روش‌های اندازه‌گیری تخصصی با در نظر گرفتن حساسیت طیفی، عوامل زمانی و شرایط محیطی است. درک این روش‌ها برای کمی‌سازی دقیق تابش‌گیری با UV و توسعه روش‌های حفاظتی مناسب در حوزه‌های کاربردی متنوع ضروری است.

کلیدواژه‌گان: تابش فرابنفش (UV)، دزیمتری، تابش‌گیری، اسپکترورادایومتری، دزیمترهای زیستی، ترمولومینسانس، ثبت‌کننده‌های داده الکترونیکی، آشکارسازهای نیمه‌رسانا، دزیمتری شیمیایی، آشکارسازهای حرارتی.

۱. مقدمه

۱.۱. پیشینه و اهمیت

طبقه‌بندی کرد و آن را در زمره مهم‌ترین خطرات بهداشت محیطی قرار داد [۱]. این طبقه‌بندی بر اهمیت بسیار زیاد ارزیابی دقیق تابش‌گیری با UV از طریق روش‌های دزیمتری پیچیده تأکید می‌کند. اثرات زیست‌شناختی تابش UV فراتر از خطرات به‌خوبی شناخته شده مانند سوختگی پوست، پیری پوست (حاصل از

تابش فرابنفش که از طول موج‌های ۱۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر را شامل می‌شود، جزء مهمی از طیف الکترومغناطیسی با پیامدهای ژرف برای سلامت انسان، سیستم‌های محیطی و کاربردهای فناورانه محسوب می‌شود. آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC) در سال ۱۹۹۲ تابش UV را به‌عنوان سرطان‌زای گروه ۱

طوری که می‌تواند اندازه‌گیری‌هایی با وزن‌دهی طیفی و بدون تأخیر انجام دهد. تلاش‌های اولیه دزیمتری عمدتاً بر اکتینومتری شیمیایی و امولسیون‌های عکاسی متکی بود که اندازه‌گیری دز کلی را ارائه می‌داد؛ اما فاقد انتخاب‌پذیری طیفی و ارتباط زیستی بود. معرفی آشکارسازهای فوتوالکتریک در اواسط قرن بیستم اندازه‌گیری‌های بدون تأخیر را ممکن ساخت، این در حالی بود که توسعه طیف‌های عملکرد برای نقاط انتهایی (مراحل نهایی) زیستی مختلف، مدل‌های ریاضی برای دزیمتری با وزن‌دهی زیستی را فراهم کرد، به عبارت دیگر به جای اطلاع از تنها میزان پرتوی جذب شده، این دزیمترها میزان آسیب زیستی ایجاد شده در اثر جذب پرتو را مشخص می‌کنند که در زمینه‌های حفاظت و درمان بسیار حیاتی است [۴]. دزیمتری جدید UV رویکردهای فناورانه متنوعی را در بر می‌گیرد که هر کدام برای کاربردها و الزامات اندازه‌گیری خاص بهینه‌سازی شده‌اند. گسترش منابع UV مصنوعی در کاربردهای پزشکی، صنعتی و مصارف عمومی، سبب توسعه سیستم‌های دزیمتری تخصصی متناسب با این محیط‌ها شده است. هم‌زمان، آگاهی فزاینده از خطرات UV محیطی، پیشرفت‌هایی در فناوری‌های دزیمتری شخصی مناسب برای ارزیابی تابش‌گیری شغلی و تفریحی ایجاد کرده است.

۱.۴. چالش‌های دزیمتری

برخلاف دزیمتری نور مرئی یا تابش‌های یونیزان، در اندازه‌گیری‌های UV باید وابستگی‌های شدید طول موج در پاسخ‌های زیستی و ویژگی‌های عبوری متفاوت مواد و جو (اتم‌سفر) را در نظر بگیرند [۵]. اثرات ایجاد شده توسط تابش UV با وجود دز فیزیکی یکسان در گستره طول موج‌های متفاوت (UV-A, UV-B, UV-C) مختلف است، بنابراین یک راه این است که از آشکارسازهای اسپکترومتری و سپس وزن‌دهی ریاضی استفاده کرد، به این صورت که شدت پرتو در

نور) و سرطان‌زایی است. تابش UV بر سنتز ویتامین D، عملکرد سیستم ایمنی و تنظیم ریتم شبانه‌روزی تأثیر می‌گذارد و پروفایل پیچیده‌ای از سود-ضرر ایجاد می‌کند که نیازمند کمی‌سازی دقیق تابش‌گیری است. لایه ازن استراتوسفری که یک حفاظ طبیعی در برابر تابش مضر UV است، علی‌رغم تلاش‌های نظارتی بین‌المللی همچنان با چالش‌های تخریب مواجه است که منجر به افزایش میزان UV سطحی می‌شود و دزیمتری دقیق را حتی حیاتی‌تر می‌سازد [۲].

۱.۲. تقسیمات طیفی و ارتباط زیستی

تابش UV معمولاً بر اساس طول موج و فعالیت زیستی به سه ناحیه متمایز تقسیم می‌شود: UV-A (۴۰۰-۳۱۵ نانومتر)، UV-B (۳۱۵-۲۸۰ نانومتر) و UV-C (۲۸۰-۱۰۰ نانومتر) [۳]. هر ناحیه طیفی ویژگی‌های نفوذ منحصر به فردی در بافت‌های زیستی و جو از خود نشان می‌دهد که منجر به اثرات سلامتی و الزامات اندازه‌گیری کاملاً متفاوت برای هر ناحیه می‌شود. تابش UV-A، با وجود داشتن فوتون کم انرژی‌تر، عمیقاً به بافت‌های پوستی نفوذ می‌کند و به میزان قابل توجهی سبب پیری پوست (حاصل از نور) و آسیب غیرمستقیم DNA از طریق تولید گونه‌های اکسیژن فعال می‌شود. تابش UV-B، اگرچه تنها ۵٪ از UV خورشیدی رسیده به سطح زمین را تشکیل می‌دهد، مسئول اصلی آسیب مستقیم به DNA، سوختگی پوست و بیشتر سرطان‌های پوستی ناشی از UV است. تابش UV-C که در شرایط طبیعی کاملاً توسط ازن اتمسفری جذب می‌شود، عمدتاً در کاربردهای منابع مصنوعی شامل لامپ‌های ضد عفونی‌کننده و فناوری‌های نوظهور UV-LED اهمیت پیدا می‌کند.

۱.۳. تکامل روش‌های دزیمتری

دزیمتری در واقع اندازه‌گیری میزان پرتو جذب شده در یک ماده است. توسعه دزیمتری UV از پاسخ‌های ساده فیلم عکاسی به سوی سیستم‌های پیچیده الکترونیکی و زیستی حرکت کرده به

t: زمان تابش‌گیری است.

این معادله بنیادی زیربنای تمام اندازه‌گیری‌های UV با وزن‌دهی زیستی است، که از طریق محاسبه اسپکترومتریک و یا طراحی آشکارساز اجرایی می‌شود. منظور از وزن‌دهی زیستی این است که برای پرتوهای متفاوت با دوز فیزیکی یکسان، با توجه به اثرات زیستی متفاوت، ضرایب زیستی مناسب تعریف می‌شود.

۲.۲. طیف‌های عملکرد و توابع وزن‌دهی

پاسخ‌های زیستی و فوتوشیمیایی به تابش UV وابستگی‌های طیفی قوی نشان می‌دهند که باید در اندازه‌گیری‌های دزیمتری گنجانده شوند. طیف عملکرد در واقع نموداری است که نشان می‌دهد برای هر اثر زیستی مشخص (نقطه انتهایی) کدام طول موج یا انرژی پرتو بیشترین کارایی را دارد. بنابراین برای هر اثر زیستی مشخص یک طیف عملکرد مخصوص به دست می‌آید. دو نوع طیف عملکرد وجود دارد که عبارتند از CIE¹ (کمسیون بین المللی روشنایی) و DIN² (مؤسسه استاندارد آلمان). CIE معمولاً برای هر اثر زیستی یک استاندارد یا گزارش فنی جداگانه منتشر می‌کند در حالی که DIN مانند یک مجموعه جامع عمل می‌کند، که در یک سند واحد، توابع وزنی را برای طیف وسیعی از اثرات بیولوژیکی تعریف می‌کند. طیف‌های CIE بیشتر در تحقیقات علمی، حفاظت پرتویی و فیزیک پزشکی استفاده می‌شود. طیف‌های DIN در کاربردهای صنعتی و ایمنی شغلی مورد توجه هستند. طیف عملکرد سوختگی پوست که توسط CIE استانداردسازی شده [۷] بیشترین حساسیت را در حدود ۲۹۷ نانومتر نشان می‌دهد که با حرکت به سمت طول موج‌های بلندتر چندین مرتبه بزرگی به صورت مؤثری کاهش می‌یابد. طیف‌های عملکرد اضافی برای نقاط انتهایی (حد نهایی) زیستی خاص شامل آسیب DNA، سنتز ویتامین D، فتوکراتیت (آسیب

هر طول‌موج خاص اندازه‌گیری شود و سپس آن شدت با طیف‌های عملکرد مربوط به هر طول موج مطابقت داده شود و در ضریب ریاضی موردنظر ضرب شود. روش دوم استفاده از آشکارسازهایی با پاسخ طیفی داخلی منطبق با طیف‌های عملکرد مرتبط است، این آشکارسازها طوری طراحی شده‌اند که حساسیت داخلی آن‌ها دقیقاً با اثر زیستی موردنظر منطبق است و بنابراین نیاز به محاسبات ریاضی پیچیده از بین می‌رود.

عوامل محیطی مانند شرایط جوی، بازتاب سطحی و ملاحظات هندسی که بر آهنگ‌های دز مطلق و توزیع‌های طیفی تأثیر می‌گذارند، به میزان قابل توجهی دزیمتری UV را پیچیده می‌کنند. بازتاب زمینی (آلبیدو) (آلبیدو به معنی درصد بازتاب نور از یک سطح است که می‌تواند از مقادیر صفر تا یک را شامل شود) می‌تواند به طور قابل توجهی تابش‌گیری شخصی را افزایش دهد، به ویژه در محیط‌های پوشیده از برف یا شنی، درحالی‌که پوشش ابری الگوهای پیچیده تقویت و تضعیف ایجاد می‌کند که رویکردهای ساده دزیمتری را به چالش می‌کشد [۶].

۲. اصول بنیادی دزیمتری UV

۲.۱. پایه ریاضی

اساس ریاضی دزیمتری UV بر پیچیدگی تابش طیفی با طیف‌های عملکرد مناسب متکی است. دز مؤثر زیستی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۵]:

$$H_{\text{eff}} = \int E_{\lambda}(\lambda) \times S(\lambda) \times d\lambda \times t \quad (1)$$

که در آن

H_{eff} : دز مؤثر

$E_{\lambda}(\lambda)$: تابش طیفی

$S(\lambda)$: طیف عملکرد

² Deutsches Institut für Normung

¹ Commission Internationale de l'Éclairage

۳.۲. اسپکترومترهای آرایه‌ای

اسپکترومترهای مبتنی بر آرایه فتودیود و CCD (یک آشکارساز نوری نیمه‌هادی و بسیار حساس) قابلیت‌های اندازه‌گیری سریع‌تری را و در مقابل با کاهش نسبی رزولوشن و دقت طیفی ارائه می‌دهند. این ابزارها از توری‌های پراش برای پخش تابش UV در سراسر آرایه‌های آشکارساز استفاده می‌کنند و اندازه‌گیری هم‌زمان کل طیف UV را بدون اسکن مکانیکی ممکن می‌سازند [۹]. در حالی که آشکارسازهای آرایه‌ای در مقایسه با سیستم‌های اسکنی دقت کمتری دارند، زمان‌های جمع‌آوری سریع آن‌ها برای مطالعه پدیده‌های گذرا و کاربردهای متحرک ارزشمند است.

۳.۳. اسپکتروفوتومترهای بروئر

اسپکتروفوتومترهای بروئر که در اصل برای اندازه‌گیری‌های مقدار کلی ازن موجود در ستون هوا طراحی شده‌اند، داده‌های طیفی UV ارزشمندی در محدوده ۲۹۰-۳۲۵ نانومتر ارائه می‌دهند. این ابزارهای زمینی دقت خوبی برای اندازه‌گیری‌های UV-B که تأثیرات زیستی و آسیب‌زایی زیادی دارد، ارائه می‌دهند، هرچند به دلیل ملاحظات نور سرگردان (ناخواسته) تابشی که در داخل دستگاه منحرف شده و به اشتباه اندازه‌گیری می‌شود در زیر ۳۱۰ نانومتر محدودیت‌هایی دارند [۶]. عملکرد دوگانه ابزارهای بروئر آن‌ها را برای مرتبط کردن تخریب لایه ازن با افزایش‌های UV سطحی بسیار ارزشمند می‌سازد، در واقع این دستگاه‌ها هم‌زمان مقدار ازن و شدت پرتو UV رسیده به سطح زمین را اندازه‌گیری می‌کنند و داده‌های هم‌زمان در مورد علت و معلول تغییرات ازن استراتوسفری را فراهم می‌کنند.

۴. سیستم‌های دزیمتری زیستی

۴.۱. دزیمترهای زیستی مبتنی بر DNA

دزیمترهای زیستی از سیستم‌های زنده یا مواد زیستی استفاده می‌کنند که به تابش UV به روش‌هایی پاسخ می‌دهند که با اثرات

چشمی ناشی از تابش یووی) و پاسخ‌های مختلف گیاهی توسعه یافته‌اند.

دز مؤثر زیست‌شناختی (BED) را برای نقاط انتهایی ویژه می‌توان با استفاده از توابع پاسخ ویژه موجودات زنده بیان کرد:

$$BED = -\ln(n/n_0) = \int E(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (۲)$$

که n/n_0 کسر بقا برای دزیمترهای زیستی را نشان می‌دهد [۱].

۳. روش‌های اسپکترومتری

۳.۱. اسپکترومترهای اسکنی

اسپکترومترهای دوبل-مونوکروماتور (تک رنگ کننده دوتایی) همچنان بهترین استاندارد برای دزیمتری UV برای مصارف تحقیقاتی باقی می‌مانند و اطلاعات طیفی کاملی که برای وزن‌دهی دقیق طیف عملکرد لازم است را فراهم می‌کنند؛ زیرا شدت پرتو را به تفکیک طول موج ثبت می‌کنند. این ابزارها تابش را در بازه‌های طول موجی بسیار کوچک در سراسر طیف UV تقسیم کرده و شدت هر جز را اندازه می‌گیرد و معمولاً دارای رزولوشن طیفی $0.1 - 1$ نانومتر با دقت کالیبره شده $10-20\%$ برای سیستم‌های تجاری موجود هستند [۸]. اجزای اساسی شامل اپتیک ورودی با پاسخ زاویه‌ای وزن‌دهی شده کسینوسی، سیستم‌های تک رنگ کننده (مونوکروماتور) با استفاده از پیکربندی‌های گریٹینگ دوگانه (توری دوتایی) برای ویژگی‌های نور سرگردان ورودی، و آشکارسازهای مناسب بهینه‌سازی شده برای حساسیت UV هستند. برتری مونوکروماتورهای گریٹینگ دوگانه (تک رنگ کننده‌های با توری دوتایی) برای اندازه‌گیری‌های UV از عدم پذیرش نور سرگردان (ناخواسته) استثنایی آن‌ها ناشی می‌شود که برای تشخیص طیف خورشیدی که در طول موج‌های کمتر از ۳۰۵ نانومتر به شدت تغییر می‌کند، ضروری است [۶]. ابزارهای مدرن شامل اسکن خودکار طول موج، تثبیت دما و سیستم‌های جمع‌آوری داده پیچیده، پایش بلندمدت بدون نظارت را ممکن می‌سازند.

نرخ بقا به e^{-1} تعریف می‌شود، که نشان دهنده مقدار دزی است که مقدار اسپورها را به $1/e$ مقدار اولیه کاهش می‌دهد. پاسخ طیفی این دزیمترها به خوبی با طیف‌های عملکرد آسیب DNA مطابقت دارد و آن‌ها را برای ارزیابی خطر زیستی و کاربردهای ضد عفونی کننده UV بسیار مناسب می‌سازد. آماده‌سازی و استانداردسازی دزیمترهای اسپور نیازمند توجه دقیق به غلظت اسپور، ترکیب ماتریکس حامل و شرایط ذخیره‌سازی است. پیشرفت‌های اخیر بیودزیمترهای تجاری مبتنی بر اسپور با ثبات و تکرارپذیری بهبود یافته تولید کرده است که برای اعتبارسنجی سیستم‌های ضد عفونی UV مناسب هستند.

۴.۳. ارزیابی آسیب DNA

دزیمترهای مبتنی بر آسیب DNA ناشی از UV، شامل سیستم‌هایی است که دیمرهای سیکلوتان پیریمیدین (CPDs) و فوتوپروداکت‌های (محصولات نوری) (۴-۶) را اندازه‌گیری می‌کنند (این‌ها اصلی‌ترین انواع آسیبی هستند که پرتو UV به ساختار DNA وارد می‌کند). این دزیمترها حساسیت بالایی دارند و ارتباط مستقیم و قوی با اثرات زیستی مخرب پرتو UV برقرار می‌کنند، [۱۱]. این نشانگرهای مولکولی اندازه‌گیری‌های کمی از اثرات ژنوتوکسیک (آسیب به ماده ژنتیکی) تابش UV فراهم می‌کنند، آن‌ها این کار را با تشکیل CPD که ارتباط قوی با سوختگی پوست و ریسک سرطان‌زایی دارد، انجام می‌دهد. با این حال، پیچیدگی تجزیه و تحلیل داده‌ها که نیازمند متخصصان و تجهیزات آزمایشگاهی تخصصی و گران قیمت است، کاربردهای عملی را به کاربردهای تحقیقاتی محدود می‌کند.

۵. دزیمتری ترمولومینسانس

۵.۱. اصول و سازوکارها

دزیمتری ترمولومینسانس (TLD) یکی از حساس‌ترین و چندمنظوره‌ترین رویکردها برای اندازه‌گیری تابش UV است.

زیستی مرتبط هستند. چهار نوع اصلی از دزیمترهای زیستی به طور گسترده مطالعه شده‌اند: فاز TV، لایه‌های نازک اوراسیل، دزیمترهای اسپور و سیستم‌های بیوفیلم DLR [۲]. این دزیمترها تابش UV فرودی را بر اساس ویژگی‌های پاسخ زیستی خود وزن‌دهی می‌کنند و ارتباط زیستی مستقیمی ارائه می‌دهند که وزن‌دهی ریاضی اندازه‌گیری‌های فیزیکی سعی در تخمین زدن آن دارد.

الگوی غیرفعال شدن باکتریوفاژها از سینتیک واپاشی نمایی پیروی می‌کند، دزیمتر فاز TV به‌عنوان نقطه انتهایی (مرحله انتهایی) غیرفعال‌سازی باکتریوفاژ به‌دست می‌آید. منظور از غیرفعال‌سازی از بین بردن توانایی تکثیر است. این سیستم حساسیت استثنایی به تابش UV-C (کوتاه‌ترین طول موج UV و مخرب‌ترین نوع آن) فراهم می‌کند و به طور گسترده با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های اسپکترومتری اعتبارسنجی شده است. دزیمترهای لایه نازک اوراسیل، دیمریزاسیون ایجاد شده توسط تابش UV مولکول‌های اوراسیل را تشخیص می‌دهند، در واقع کار این دزیمترها تشخیص یک واکنش شیمیایی است و با توجه به پاسخ‌های پایدار و قابل تکرار مناسب، برای پایش محیطی بلندمدت مناسب هستند.

۴.۲. دزیمترهای اسپور

دزیمترهای اسپور (هاگ) *Bacillus subtilis* از حساسیت UV اسپورهای باکتریایی در شکل خشک شده خود استفاده می‌کنند، اسپورها اشکال مقاوم باکتری هستند و غیرفعال‌سازی (کشتن) آن‌ها توسط UV، معیاری برای دوز پرتو محسوب می‌شود و این دزیمترها به‌عنوان شاخص‌های زیستی برای تابش UV-C عمل می‌کنند زیرا حساسیت به خوبی مشخص شده و قابل تکرار دارند، همچنین رابطه مشخص بین دز UV و آهنگ بقای آن‌ها وجود دارد [۱۰]. آهنگ واپاشی (مرگ) اسپورها از رابطه نمایی پیروی می‌کند، واحد دز در این سیستم‌ها اغلب به‌صورت کاهش

این منحنی درخشش چند قله‌ای نشان‌دهنده توزیع‌های گیراندازهای چندگانه است که برای کاربردهای دزیمتری مختلف، از خوانش فوری تا یکپارچه‌سازی اندازه‌گیری‌های دز بلندمدت مناسب است.

۵.۲.۲. مواد جدید بر پایه فسفات

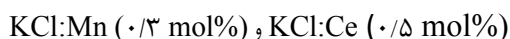
تحقیقات اخیر محدودده مواد TL حساس به UV را به سیستم‌های فسفات پیشرفته گسترش داده‌اند. $\text{Li}_2\text{PO}_4:\text{Dy}$ سنتز شده به روش پخش حالت جامد حساسیت قابل توجه UV-C با چهار قله TL مجزا در 374 K ، 426 K ، 536 K و 618 K نشان می‌دهد. این ماده پاسخ دز خطی از 10 ثانیه تا 250 ثانیه تابش UV-C نشان می‌دهد، گاف انرژی این ماده $2/8\text{ eV}$ است و در مقایسه با مواد استاندارد محوشدگی نسبتاً پایین ($25/35\%$ پس از 28 روز) را داراست [۱۶]. ساختار اورتورومبیک

$$(a = 6/105 \text{ \AA}, b = 10/462 \text{ \AA}, c = 4/193 \text{ \AA})$$

این ماده شبکه میزبان پایداری برای وارد کردن ناخالصی فراهم می‌کند.

۵.۲.۳. سیستم‌های هالید قلیایی

کلرید پتاسیم آلاییده با Mn و Ce، که با روش هم رسوبی سنتز شده، یک انتخاب کم‌هزینه مناسب برای دزیمتری UVC است



به ترتیب گاف‌های انرژی $4/16\text{ eV}$ و $4/34\text{ eV}$ نشان می‌دهند، دارای پاسخ خطی UVC تا 500 ثانیه برای نمونه‌های آلاییده با Mn و 100 ثانیه برای نمونه‌های آلاییده با Ce هستند [۱۷].

برازش منحنی درخشش هفت قله همپوشان برای نمونه‌های آلاییده با Mn نشان می‌دهد، با انرژی‌های فعال‌سازی از $0/75\text{ eV}$ تا $2/15\text{ eV}$. این مواد آهنگ‌های محوشدگی قابل

مواد TL انرژی حاصل از تابش یونیزان یا UV را در نقص‌های شبکه بلوری ذخیره می‌کنند و این انرژی را به صورت نور پس از گرمادهی کنترل شده آزاد می‌کنند [۱۲]. سازوکار پاسخ ترمولومینسانس شامل جذب فوتون UV، تولید جفت الکترون-حفره و گیراندازی بار در حالت‌های شبه پایدار درون شبکه بلوری است. پس از گرمادهی، بارهای به تله افتاده انرژی گرمایی کافی برای فرار از گیراندازهای خود به دست می‌آورند و با بارهای مخالف ترکیب می‌شوند و نور مشخصه‌ای متناسب با دز جذب شده گسیل می‌کنند.

برای کاربردهای UV، این تکنیک مزیت‌هایی دارد از جمله گستره کارکرد وسیع (برای مثال از میکرو گری تا کیلوگری)، معادل بافت بدن بودن برخی از مواد، وابستگی انرژی حداقلی در نواحی طیفی خاص (در محدوده‌های طیفی خاص، پاسخ این مواد به پرتو، کمتر به تغییرات انرژی پرتو (کیفیت پرتو) وابسته است)، و توانایی ارائه اندازه‌گیری‌های دز کل در دوره‌های زمانی طولانی [۱۳]. پیشرفت‌های اخیر نشان داده‌اند که حساسیت ترمولومینسانس مواد در مقیاس نانو افزایش یافته است برای مثال، نانوسیم‌های ژرمانیوم آلاییده با بور سنتز شده به روش CVD (رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار) با اندازه قطر $19-200$ نانومتر، پاسخ خطی UV تا 3 گری را نشان می‌دهند [۱۴].

۵.۲. مواد TL پیشرفته برای تشخیص UV

۵.۲.۱. سیستم‌های $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C,Mg}$

تحقیقات اخیر پتانسیل استثنایی اکسید آلومینیوم آلاییده شده با کربن و منیزیم ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C,Mg}$) را به عنوان دزیمتر ترمولومینسانس مؤثر UV نشان داده است. مطالعات Trindade و همکاران [۱۵] نشان داد که بلورهای $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C,Mg}$ پاسخ ترمولومینسانس شدیدی پس از تابش UV نشان می‌دهند، منحنی درخشش ترمولومینسانس این ماده دارای قله‌های متعدد در 320 K ، 350 K ، 375 K و یک قله اصلی در 456 K است.

قبول (۱۶/۲٪) برای قله اصلی پس از ۲۱ روز) و قابلیت تکرارپذیری خوب در چرخه‌های متعدد نشان می‌دهند.

۵.۲.۴. سیستم‌های بر پایه فلوراید

کلسیم فلوراید آلاینده شده با دو ناخالصی شامل عناصر خاکی کمیاب و فلزات قلیایی به‌عنوان دزیمتر UV کاربردی ظاهر شده است. $\text{CaF}_2:\text{Ce},\text{Li}$ که با روش احتراقی ساخته شده دو قله مشخص TL نشان می‌دهد در 465 K و 550 K برای تابش UV، و 446 K و 548 K برای تابش گاما [۱۸]. این ماده در غلظت بهینه ناخالصی 0.2% Ce و 0.6% Li بیش‌ترین مقدار حساسیت، و همچنین پاسخ خطی UV برای مدت ۵ ساعت تابش را نشان می‌دهد. این ماده دارای تکرارپذیری خوب (۴/۳۱٪ برای UV) و ویژگی‌های محوشدگی متوسط است.

۵.۲.۵. نانوفسفرهای سیلیکات روی

نانوفسفرهای $\text{Zn}_2\text{SiO}_4/\text{SiO}_2:\text{Mn}$ که در شرایط آزمایشگاهی کنترل شده سنتز شده اند، حساسیت استثنایی UV با چهار قله TL مجزا در 380 K ، 424 K ، 534 K و 613 K نشان می‌دهند [۱۹]. این ماده گاف انرژی پایدار 2.8 eV را علی‌رغم آلیش با Mn حفظ می‌کند و پاسخ دز خطی برای تابش UV-C از ۲ تا 250 nm نشان می‌دهد. تحلیل XRD اندازه شبکه 30 nm نانومتر با ساختار اورتورومبیک (راست لوزی) را تأیید می‌کند. این نانوفسفر ۲۴٪ محوشدگی در ۲۸ روز و تکرارپذیری عالی در چرخه‌های متعدد گرمادهی-تابش-خوانش نشان می‌دهد.

۵.۲.۶. مواد TL سنتی مناسب برای UV دزیمتری

مواد ترمولومینسانس سنتی مانند $\text{LiF}:\text{Mg},\text{Ti}$ (TLD-۱۰۰) و $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ برای دزیمتری UV پذیرفته شده‌اند، هرچند معمولاً نیاز به یک پیش‌تابش با تابش یونیزان دارند تا حساسیت UV را از طریق مکانیسم‌های ترمولومینسانس فوتوانتقالی (PTTL)

افزایش دهند [۲۰]. در این روش ابتدا نمونه موردنظر در معرض تابش یونیزان قرار می‌گیرد (مرحله پیش تابش)، تابش یونیزان الکترون‌ها یا حفره‌های زیادی را از نوار ظرفیت به گیراندازهای عمیق منتقل کرده و در آنجا به دام می‌اندازد. سپس نمونه توسط تابش UV پرتودهی می‌شود و انرژی این تابش بارهای به دام افتاده در ترازهای عمیق را به ترازهای کم عمق منتقل می‌کند. سپس نمونه گرمادهی و خوانش می‌شود. تحت خوانش ترمولومینسانس، ترازهای کم عمق که مستقیماً با دز UV متناسب هستند تخلیه می‌شوند و یک منحنی درخشش ترمولومینسانس ایجاد می‌شود.

۵.۳. ملاحظات اجرایی کاربردی

توسعه مواد TLD حساس به UV نیازمند انتخاب دقیق بلورهای میزبان و ناخالصی‌ها برای بهینه‌سازی پاسخ در محدوده ۴۰۰-۲۸۰ نانومتر با حفظ ویژگی‌های پاسخ پایدار و محوشدگی حداقلی است. فلورید کلسیم آلاینده با لیتیوم طبیعی ($\text{CaF}_2:\text{Li}$) و مواد بورات لیتیوم حساسیت به تابش UV نشان داده‌اند، هرچند ویژگی‌های پاسخ طیفی نیازمند کالیبراسیون دقیق در برابر منابع UV استاندارد هستند [۱۳].

چالش‌های اصلی در عملی کردن دزیمتری TL برای کاربردهای UV شامل دستیابی به حساسیت کافی در محدوده UV با حفظ ویژگی‌های پاسخ پایدار، ایجاد پروتکل‌های کالیبراسیون که وابستگی‌های طیفی را در نظر می‌گیرند (پروتکل‌های کالیبراسیون باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که وابستگی‌های طیفی را در نظر بگیرند و دز اندازه‌گیری شده دقیقاً معادل دز فیزیکی یا زیستی هدف باشد)، و توسعه رویه‌های خوانش که اثرات خاموشی حرارتی (پدیده‌ای که با افزایش دما در حین خوانش میزان نوردهی ماده کاهش می‌یابد) را به حداقل می‌رسانند. تحقیقات اخیر ترکیبات جدیدی را که به‌طور خاص برای کاربردهای دزیمتری UV طراحی شده‌اند، با هدف ارائه

پاسخ دز خطی، ویژگی‌های ذخیره‌سازی پایدار و حساسیت طیفی منطبق با طیف‌های عملکرد زیستی، بررسی کرده‌اند.

۶. دزیمترهای ثبت اطلاعات الکترونیکی

۶.۱. سیستم‌های الکترونیکی پیشرفته

دزیمترهای الکترونیکی جدید پیشرفت قابل توجهی در پایش تابش‌گیری شخصی UV مطرح می‌کنند و فناوری‌های پیچیده سنسور را با پردازش سیگنال دیجیتال و قابلیت‌های مدیریت داده ترکیب می‌کنند. این دستگاه‌ها معمولاً از سنسورهای جداگانه برای نواحی UV-A و UV-B/C استفاده می‌کنند، همچنین دارای فیلترهای داخلی هستند که پاسخ الکتریکی سنسور را جوری تنظیم می‌کنند که با طیف عملکرد سوختگی پوست مطابقت داشته باشد [۱]. مدل‌های پیشرفته شامل شتاب‌سنج‌ها برای تشخیص حرکت هستند که کنترل کیفیت را از طریق تحلیل همبستگی فعالیت ممکن می‌سازند، به این معنی که بین حرکت فرد و دوز جذبی UV رابطه معنادار ایجاد می‌کند و نشان می‌دهد چگونه رفتار فرد (مانند مدت زمان توقف در آفتاب یا سرعت حرکت) بر میزان کلی مواجهه با UV تأثیر می‌گذارد.

سیستم GENESIS-UV نمونه‌ای از فناوری فعلی است که اندازه‌گیری‌هایی با رزولوشن یک ثانیه با ذخیره‌سازی داده یکپارچه برای دوره‌های پایش طولانی و قابلیت‌های انتقال بی‌سیم برای دسترسی بدون تأخیر به داده فراهم می‌کند. این سیستم‌ها مزایای قابل توجهی نسبت به دزیمترهای سنتی مبتنی بر فیلم از نظر رزولوشن زمانی، دسترسی فوری به داده و توانایی همبستگی تابش‌گیری با عوامل محیطی و رفتاری ارائه می‌دهند.

۶.۲. آشکارسازهای نیمه‌هادی UV

فوتودیودهای (دیودهای نوری) کاربید سیلیکون (SiC) و نیتريد گالیوم (GaN) به‌عنوان آشکارسازهای حالت جامد UV امیدوارکننده ظاهر شده‌اند به دلیل حساسیت ذاتی UV و عدم

حساسیت نسبی به نور مرئی که نیاز به سیستم‌های فیلترینگ پیچیده را حذف می‌کند [۲۱]. این نیمه‌هادی‌های با گاف انرژی پهن نسبت‌های عدم پذیرش UV به نور مرئی عالی، زمان‌های پاسخ سریع و عملکرد پایدار در شرایط محیطی سخت فراهم می‌کنند.

فتوآشکارسازهای مبتنی بر AlGaIn پاسخ طیفی قابل تنظیم از طریق مهندسی گاف انرژی ارائه می‌دهند و توسعه آشکارسازهایی منطبق با طیف‌های عملکرد خاص بدون فیلترهای خارجی را ممکن می‌سازند. پیشرفت‌های اخیر در روش‌های رشد اپیتاکسیال (روشنانی) فتوآشکارسازهای UV با بازده کوانتومی بیش از ۸۰٪ در نواحی طیفی هدف با حفظ عملکرد کور-مرئی تولید کرده است. بدین معنی که آشکارساز به نور مرئی حساس نیست و فقط به پرتو UV (طول موج‌های خاص) واکنش نشان می‌دهد [۲۲].

۶.۳. دزیمترهای MOSFET و مدار مجتمع

آشکارسازهای ترانزیستور اثر میدانی نیمه رسانای اکسید فلزی (MOSFET) مناسب برای دزیمتری UV مزایایی شامل اندازه کوچک، خوانش فوری و توانایی عملکرد بی‌سیم ارائه می‌دهند [۲۳]. این دستگاه‌ها تغییرات ولتاژ آستانه القا شده توسط UV متناسب با دز جذب شده را اندازه‌گیری می‌کنند و ذخیره‌سازی دز را به‌صورت غیرفرار در حین تابش‌گیری فراهم می‌کنند، به این معنی که این کار را بدون نیاز به برق یا باتری انجام می‌دهند. میزان دزی که توسط دزیمترهای MOSFET می‌توان اندازه گرفت به عواملی مانند ضخامت اکسید، طراحی دزیمتر و طول موج UV بستگی دارد. به‌طور کلی بازه قابل اندازه‌گیری برای دزیمترهای MOSFET از حدود چند میلی ژول بر سانتی‌متر مربع (mJ/cm^2) تا چند ژول بر سانتی‌متر مربع (J/cm^2) است. با این حال، حساسیت UV آن‌ها به‌طور کلی

این دزیمترها می‌توانند برای محدوده‌های حساسیت مختلف از طریق تغییر پارامترهای حکاکی و طول موج‌های اندازه‌گیری کالیبره شوند و در نتیجه کاربردهای متنوعی را ارائه دهند. سپس دز UV جذب شده را می‌توان از طریق سنجش میزان جذب نور توسط پلاستیک و یا شمارش تعداد و اندازه مسیرهای خوردگی روی پلاستیک تعیین کرد.

۷.۳. مواد فوتوکرومیک پیشرفته

پیشرفت‌های اخیر در چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs) دزیمترهای فوتوکرومیک جدیدی را معرفی کرده‌اند که قادر به تشخیص تابش‌های UV و یونیزان هستند. لو و همکاران [۲۴] یک نانوخوشه برپایه توربوم

$[Th_6(OH)_4(O)_4(h_2O)_6]_8(HCOO)_4$ گزارش دادند که خاصیت فوتوکرومیک (نوررنگی) دوماژوله نشان می‌دهد و تحت تابش UV، پرتو بتا یا گاما از بنفش به زرد تغییر رنگ می‌دهد. این ماده پاسخ رنگ‌سنجی مرئی در محدوده دز وسیع (۱-۸۰ کیلوگری) با مزیت قابلیت خوانش مستقیم بصری بدون نیاز به ابزار خارجی نشان می‌دهد.

فیلم‌های رادیوکرومیک مواجهه با تابش را از طریق تغییرات رنگ دائمی نمایش می‌دهند، این مسئله آن‌ها را برای کاربردهای دزیمتری UV که بازخورد بصری فوری مفید است، ارزشمند می‌سازند. این سیستم‌ها از طریق پلیمریزاسیون القا شده توسط تابش یا واکنش‌های شیمیایی که محصولات رنگی متناسب با دز جذب شده تولید می‌کنند عمل می‌کنند [۲۵].

۸. ابزارهای پهن باند

۸.۱. آشکارسازهای حرارتی

آشکارسازهای حرارتی پاسخ طیفی یکنواخت در سراسر طیف UV فراهم می‌کنند و به‌عنوان ابزارهای کالیبراسیون مهم برای دزیمتری UV عمل می‌کنند. ترموپیل‌ها که بر اساس اثر

کمتر از مواد تخصصی حساس به UV است و استفاده را به کاربردهای دز بالاتر مانند پایش UV درمانی محدود می‌کند.

۷. دزیمتری شیمیایی و فوتوکرومیک

۷.۱. دزیمترهای فیلم پلی‌سولفون

دزیمترهای فیلم پلی‌سولفون به‌طور گسترده برای پایش UV شخصی و محیطی به دلیل هزینه پایین، سهولت استفاده و شبیه بودن تقریبی پاسخ زیستی این فیلم‌ها به طیف عملکردی سوختگی پوست پذیرفته شده‌اند. این فیلم‌ها در اثر تابش UV دچار یک واکنش فوتوشیمیایی می‌شوند که باعث تغییر ساختار شیمیایی آن‌ها می‌شود و در نتیجه باعث افزایش جذب فیلم‌ها به‌ویژه در طول موج‌های زیر ۳۳۰ نانومتر می‌شود. با اندازه‌گیری تغییرات جذب در طول موج‌های مشخص می‌توان میزان دز جذبی UV با وزن‌دهی زیستی را مشخص کرد [۶]. فیلم‌هایی با ضخامت ۱ میکرومتر ویژگی‌های پاسخ طیفی نزدیک به طیف عملکرد سوختگی پوست در محدوده ۳۱۵-۳۰۰ نانومتر نشان می‌دهند، هرچند در طول موج‌های بلندتر پاسخ شیمیایی فیلم دقیقاً منطبق بر پاسخ زیستی پوست نیست و نیازمند فاکتورهای تصحیح ریاضی است.

۷.۲. دزیمترهای پلاستیک CR-۳۹

دزیمترهای پلاستیک CR-۳۹ (آلیل دی‌گلیکول کربنات) رویکرد شیمیایی دیگری برای اندازه‌گیری UV فراهم می‌کنند. این دزیمترها این کار را از طریق شکست زنجیره پلیمری در اثر تابش UV انجام می‌دهند که، این شکست‌ها باعث می‌شود مناطقی که تحت تابش UV بوده‌اند بیشتر دچار آسیب شیمیایی شوند. پس از تابش‌گیری UV، پلاستیک نیازمند حکاکی شیمیایی در محلول کاستیک (سوزاننده) غلیظ در دماهای بالا است. این فرآیند باعث می‌شود مناطق آسیب‌دیده با سرعت بیشتری خورده شوند و مسیرهای قابل مشاهده‌ای ایجاد کنند [۶].

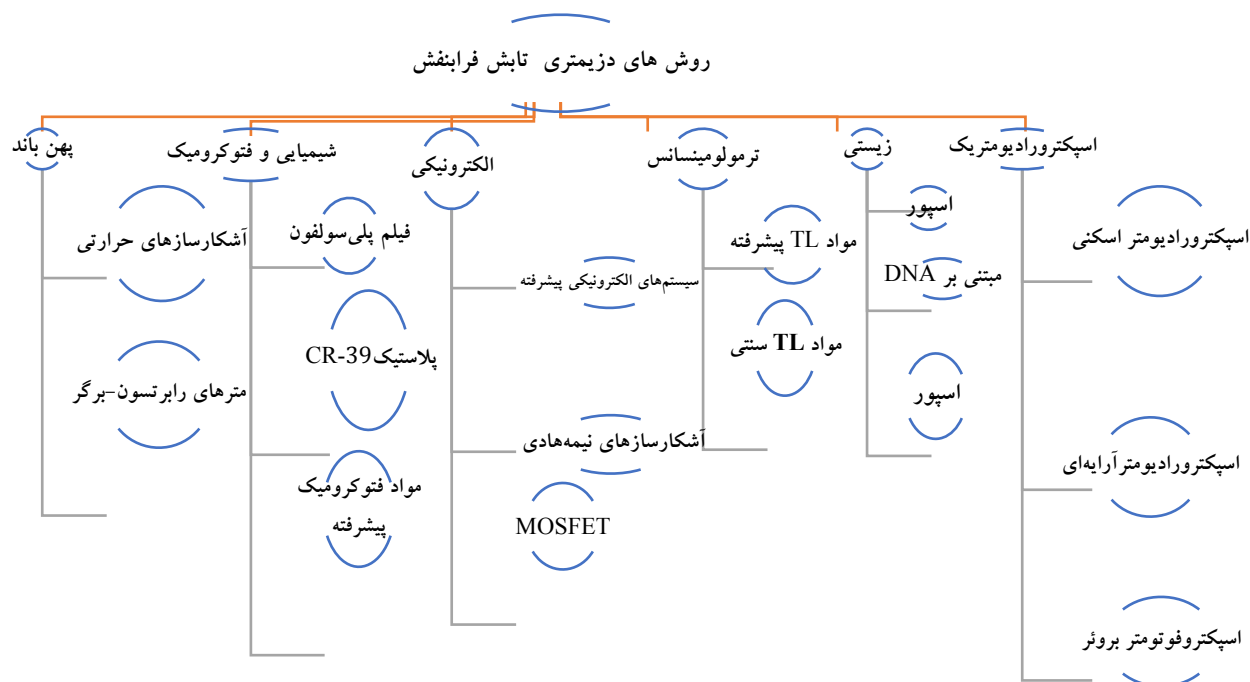
عملکردی سوختگی پوست ترکیب می‌کنند. این ابزارها از فیلترهای شیشه‌ای عبوردهنده UV برای حذف تابش مرئی و مادون قرمز، فسفرتنگستات منیزیم برای تغییر طول موج UV به نور مرئی قابل تشخیص توسط فوتودیوهای معمولی، و الکترونیک جبران‌شده دمایی برای حفظ ثبات کالیبراسیون استفاده می‌کنند [۶]. فسرها و فوتودیوهای داخلی به‌طور ذاتی به تغییرات دما حساس هستند و بنابراین در کاربردهای دقیق نیازمند تصحیح هستند که معمولاً از طریق سنسورهای دمایی مجتمع (داخلی) و الگوریتم‌های جبران‌سازی مبتنی بر ریزپردازنده اجرایی می‌شوند. به این ترتیب، خطای ناشی از دما به صورت دیجیتالی از خوانش دوز نهایی کسر می‌گردد تا دقت نهایی حفظ شود.

شکل ۱، نمودار طبقه بندی روش‌های مختلف دزیمتری تابش فرابنفش را نشان می‌دهد.

سیبک (تولید ولتاژ در نتیجه اختلاف دما بین دو رسانای مختلف) عمل می‌کنند، اختلاف دمای القا شده توسط تابش جذب شده را اندازه‌گیری می‌کنند، در حالی که آشکارسازهای پیروالکترونیک از تغییرات قطبش وابسته به دما در مواد فروالکترونیک استفاده می‌کنند. هر دو نوع آشکارساز اساساً پاسخ طیفی یکنواخت از ۱۸۰ نانومتر تا ۳/۴ میکرومتر ارائه می‌دهند و آن‌ها را به‌عنوان استانداردهای مطلق ارزشمند می‌سازد [۶]. این ابزارها معمولاً تا سطوح تابش 2000 W/m^2 به‌طور مؤثر عمل می‌کنند که برای مشخص‌سازی منابع مصنوعی با شدت بالا مناسب است.

۸.۲. مترهای رابرتسون-برگر

مترهای رابرتسون-برگر (R-B) پرکاربردترین دزیمترهای فوتوالکترونیک UV برای پایش محیطی هستند و سیستم‌های فیلترینگ و فسفر (ماده) تخصصی را برای تقریب پاسخ طیف



شکل (۱): طبقه بندی روش‌های مختلف دزیمتری تابش فرابنفش.

۹. کالیبراسیون، استانداردسازی و کنترل کیفیت

۹.۱. استانداردهای اولیه و قابلیت ردیابی

کالیبراسیون دزیمتری UV براساس استانداردهای اولیه پایه گذاری شده توسط مؤسسات ملی اندازه‌شناسی متکی است که معمولاً بر اساس استانداردهای آشکارساز کالیبره شده در برابر منابع تابش سینکروترون یا لامپ‌های قوسی دوتریوم و زنون مشخص شده هستند. این استانداردها تضمین می‌کنند که هر اندازه‌گیری UV در سطح جهان قابل ردیابی به این مراجع اولیه باشد. این امر به حفظ یکنواختی و اعتبار داده‌های علمی کمک می‌کند، با عدم قطعیت‌هایی که معمولاً از ۱-۳٪ برای استانداردهای تابش طیفی متغیر است [۲۶]. رادیاتورهای جسم سیاه استاندارد اولیه که در دماهای بالای ۳۰۰۰ K عمل می‌کنند، تابش طیفی‌ای تولید می‌کنند که کاملاً قابل محاسبه و مبتنی بر اصول فیزیک است، هرچند استفاده از آن‌ها به دلیل خروجی UV پایین به طول موج‌های بالای ۲۵۰ نانومتر محدود است (در طول موج‌های کوتاه‌تر یعنی محدوده UVC نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد).

۹.۲. استانداردهای انتقالی (برای انتقال مقیاس اندازه‌گیری از

استاندارد اولیه به ثانویه) و مراجع کاری

استانداردهای اولیه (مانند منابع سینکروترون) گران و پیچیده هستند و فقط در مؤسسات ملی استفاده می‌شوند. استانداردهای ثانویه و کاری (که شامل فوتودیودهای مشخص شده و ترموپیل‌ها هستند) ابزارهای قابل حمل و عملی‌تر برای کالیبره کردن ابزارهای میدانی فراهم می‌کنند در حالی که قابلیت ردیابی را در حد استانداردهای اولیه حفظ می‌کنند. فوتودیودهای سیلیکونی با پاسخ طیفی مشخص شده به‌عنوان استانداردهای انتقالی مناسب عمل می‌کنند، هرچند حساسیت دمایی و ویژگی‌های کهنگی (عملکرد فوتودیودها با گذشت زمان و

مواجهه مکرر با UV تغییر می‌کند) آن‌ها نیازمند کالیبراسیون مجدد منظم است [۲۷]. ثبات و ویژگی‌های طیفی استانداردهای انتقال مستقیماً بر دقت اندازه‌گیری‌های معمول UV تأثیر می‌گذارد و نیازمند یک عدم قطعیت جامع است که تمام منابع خطا را در نظر می‌گیرد.

۹.۳. اعتبارسنجی و مقایسه متقابل

مقایسه‌های متقابل منظم بین سیستم‌های اندازه‌گیری مختلف به شناسایی خطاهای سیستماتیک و حفظ استانداردهای کیفیت اندازه‌گیری در آزمایشگاه‌ها و شبکه‌های پایش کمک می‌کند. دزیمترهای زیستی نیازمند اعتبارسنجی از طریق مقایسه با اندازه‌گیری‌های اسپکترورادیمتریک، دزهای زیستی دیگر و کمی‌سازی نقطه انتهایی مولکولی مانند تشکیل CPD هستند. مطالعات، همبستگی خوبی بین خوانش‌های دزیمتر زیستی و داده‌های اسپکترورادیمتر وزن‌دهی شده زمانی هنگامی که رویه‌های کالیبراسیون مناسب و طیف‌های عملکرد مناسب اعمال می‌شوند، نشان داده‌اند [۲].

۱۰. ملاحظات محیطی و جوی

۱۰.۱. اثرات جوی بر اندازه‌گیری‌های UV

در اندازه‌گیری‌های تابش UV باید تضعیف و تغییر قابل توجه جوی را، به‌ویژه در نواحی UV-B و UV-C که جذب ازن وابستگی‌های طیفی قوی ایجاد می‌کند (در طول موج‌های کوتاه‌تر جذب UV توسط مولکول‌های ازن بیشتر است)، در نظر بگیرند. عبور مؤثر تابش UV از میان جو به طور چشمگیری با زاویه زینت خورشیدی (زاویه خورشید نسبت به بالای سر، که بر طول مسیری که پرتو باید از اتمسفر طی کند، تأثیر می‌گذارد)، چگالی ستون ازن (مقدار کلی ازن که تابش باید از آن عبور کند)، مقدار ذرات معلق کوچک موجود در هوا مانند گرد و غبار، پوشش ابری و ارتفاع تغییر می‌کند [۲۸]. این عوامل تغییرات

۱۱. کاربردها و پیاده‌سازی

۱۱.۱. کاربردهای پزشکی و درمانی

دزیمتری UV در فوتوتراپی نیازمند کنترل دقیق دز برای متعادل کردن منافع درمانی در برابر آسیب احتمالی است. درمان UV-B باند باریک (با گاف انرژی باریک) برای پسونیازیس معمولاً نیازمند دزهای $3-0.5 \text{ J/cm}^2$ با قله‌های طیفی در ۳۱۳-۳۱۱ نانومتر دارد که نیازمند دزیمترهایی با پاسخ طیفی مناسب است. فوتوشیمی درمانی UV-A (PUVA)، تابش‌گیری UV موج بلند را با سورالن‌های حساس‌کننده به نور ترکیب می‌کند و نیازمند سیستم‌های دزیمتری است که بتوانند تابش‌هایی با طول موج‌های ۳۲۰-۴۰۰ نانومتر با دزهای درمانی معمول $2-10 \text{ cm}^2$ را اندازه‌گیری کنند [۲۹]. کاربردهای ضد میکروبی UV-C برای ضد عفونی هوا و سطح نیازمند دزیمترهایی هستند که توانایی اندازه‌گیری اثربخشی ضد عفونی‌کنندگی در ۲۵۴ نانومتر، با دزهای معمول $20-200 \text{ mJ/cm}^2$ برای غیرفعال‌سازی باکتریایی و دزهای بالاتر برای پاتوژن‌های ویروسی را دارند. ظهور UV-LEDها با خروجی‌های طیفی متنوع نیازمند سیستم‌های دزیمتری است که قادر باشند منابع UV جدید را تشخیص دهند.

۱۱.۲. پایش شغلی و محیطی

دزیمتری شخصی UV کاربردهای حیاتی در بهداشت حرفه‌ای برای کارگران در فضای باز دارد، مطالعاتی که در این زمینه انجام شده نشان می‌دهند کارگران ساختمان، کارگران کشاورزی و پرسنل دریایی مقادیری از دزهای UV دریافت می‌کنند که از حدود توصیه شده با ضرایب ۱۰-۲ فراتر می‌رود [۱]. رویکردهای اندازه‌گیری مختلف متناسب با زمینه‌های شغلی متفاوت هستند، برای مثال ثبت کننده‌های اطلاعات الکترونیکی برای ثبت کردن دقیق تابش‌گیری و فیلم‌های دزیمتری برای برنامه‌های نظارت در مقیاس بزرگ مناسب هستند.

زمانی و مکانی پیچیده‌ای هم در سطوح مطلق UV و هم توزیع‌های طیفی ایجاد می‌کنند.

پدیده پراکندگی رایلی باعث پراکندگی نور توسط مولکول‌های هوا می‌شود و متناسب با (معکوس توان چهارم طول موج λ^{-4}) است، بدین معنی که طول موج‌های UV کوتاه‌تر را بسیار شدیدتر پراکنده می‌کند. به همین دلیل تابش UV دارای اجزای پراکنده شده قابل توجهی است که باید در اندازه‌گیری‌های دزیمتری در نظر گرفته شوند. ذرات آئروسول (گرد و غبار معلق در هوا) نیز پرتو UV را جذب و پراکنده می‌کنند. تأثیر آن‌ها بسیار پیچیده‌تر است و به عواملی مانند ترکیبات شیمیایی آئروسول، اندازه ذرات و توزیع عمودی آن‌ها بستگی دارد. این فرآیند میدان تابش UV را حتی بیشتر از پراکندگی رایلی تغییر می‌دهد.

۱۰.۲. عوامل محیطی و تصحیحات اندازه‌گیری

بازتاب زمینی (آلبیدو) می‌تواند به طور قابل توجهی تابش‌گیری شخصی UV را از طریق تابش پراکنده رو به بالا افزایش دهد، با برف تازه که تا ۹۰٪، شن ۳۰-۱۵٪ و سطوح آب ۲۰-۵٪ UV فرودی را بازتاب می‌دهد [۶]. نسبت تابش‌گیری به تابش محیطی (ERTA) معیار مفیدی برای مقایسه تابش‌گیری‌های شخصی در شرایط محیطی مختلف فراهم می‌کند، مقادیر میانگین سالیانه ERTA معمولاً ۳-۵٪ تا ۳۰٪ که مربوط به فعالیت در فضای باز است تغییر می‌کند [۱]. دما و رطوبت به طور قابل توجهی بر بسیاری از سیستم‌های دزیمتری UV تأثیر می‌گذارند، مواد ترمولومینسانس که حساسیت وابسته به دما نشان می‌دهند و آشکارسازهای الکترونیکی که نیازمند جبران دما هستند، از این نمونه‌اند. رطوبت بر پاسخ آشکارساز و عبور UV تأثیر می‌گذارد [۹].

۱۲. روش‌های دزیمتری مناسب برای اقلیم‌های مختلف ایران

برای انتخاب بهترین روش دزیمتری فرابنفش (UV) در ایران، باید توجه داشت که ایران کشوری با تنوع اقلیمی بالا و متنوع و همچنین شاخص UV بالا (به‌ویژه در مناطق مرتفع و کویری) است. ابتدا یک دسته بندی کلی راجع به اقلیم‌های مختلف کشور ایران معرفی می‌کنیم:

❖ اقلیم گرم و خشک (مرکز، جنوب شرق)

این مناطق دارای شدت بالای UV، دمای بالا و تابش مستقیم و طولانی مدت خورشید هستند.

❖ اقلیم گرم و مرطوب (جنوب)

ویژگی بارز این مناطق رطوبت بالاست که باعث خوردگی و آسیب به تجهیزات می‌شود، همچنین ابرناکی متغیر از دیگر ویژگی‌های این مناطق است.

❖ اقلیم معتدل و مرطوب (شمال)

این مناطق دارای رطوبت دائمی، ابرناکی زیاد و پراکندگی بالای تابش هستند.

❖ اقلیم سرد و کوهستانی (غرب و شمال غرب)

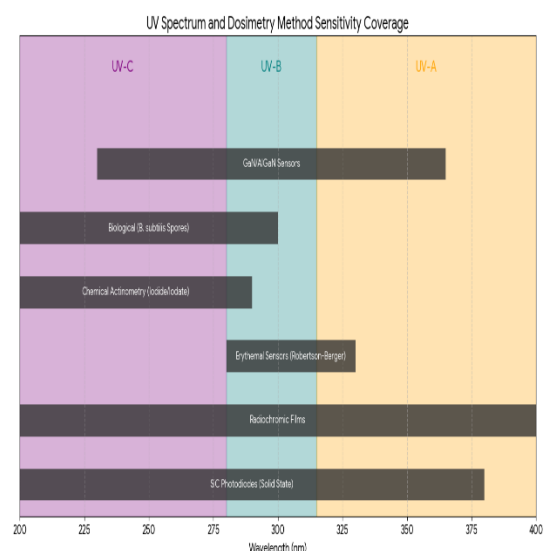
در این مناطق دمای هوا پایین است و تابش فرابنفش به علت ارتفاع زیاد این مناطق بالاست. ویژگی دیگر این مناطق داشتن بازتاب برف است.

با توجه به تقسیم بندی‌های اقلیمی به صورت کلی می‌توان روش‌های دزیمتری مناسب برای هر منطقه را پیشنهاد داد، البته باید این نکته را مدنظر داشت که برای کاربردهای عملی و واقعی، مطالعات دقیق‌تر و گسترده‌تری لازم خواهد بود. دزیمترهای شیمیایی و زیستی حساسیت بسیار بالایی به رطوبت و دما دارند بنابراین در مناطقی که رطوبت بسیار بالا و دما بسیار بالا یا پایین است این دزیمترها نمی‌توانند گزینه‌های مناسبی باشند. به نظر می‌رسد دزیمترهای الکترونیکی با پوشش‌های ضد

شبکه‌های پایش محیطی از دزیمتری UV برای دنبال کردن اثرات تخریب لایه ازن، اعتبارسنجی اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای و ارائه پیش‌بینی‌های شاخص UV عمومی استفاده می‌کنند. این کاربردها نیازمند ثبات بلندمدت، عملکرد خودکار و رویه‌های تضمین کیفیت برای اطمینان از تداوم داده در سری‌های زمانی چند دهه‌ای هستند [۲].

۱۱.۳. کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی

تولید پلیمرها، چسب‌ها و پوشش‌ها با استفاده از UV نیازمند دزیمترهایی است که بتوانند منابع UV با شدت بالا (معمولاً $100-5000 \text{ mW/cm}^2$) همچنین با رزولوشن زمانی خوب برای اطمینان از پلیمریزاسیون مناسب را اندازه‌گیری کنند. کاربردهای فوتولیتوگرافی در ساخت نیمه‌هادی‌ها نیازمند کنترل دز دقیق در طول موج‌های خاص با الزامات یکنواختی پرتو در سراسر سطح ویفر (صفحه سیلیکونی) که اغلب از $\pm 2\%$ در سطوح ویفر فراتر می‌رود، است [۹]. شکل ۲، یک نمودار مفهومی از نواحی مختلف طیف UV و روش‌های مناسب دزیمتری برای هر ناحیه را نشان می‌دهد.



شکل (۲): دسته بندی نواحی مختلف طیف تابش فرابنفش و روش‌های دزیمتری مناسب هر ناحیه (نمودار با استفاده از هوش مصنوعی به دست آمده است).

۱۴.۲. یکپارچه‌سازی بی‌سیم و اینترنت اشیا (IoT)

یکپارچه‌سازی دزیترهای UV با پروتکل‌های ارتباطی بی‌سیم و پلتفرم‌های اینترنت اشیا (IoT) پایش تابش‌گیری بدون تأخیر و تحقیقات اپیدمیولوژیک در مقیاس بزرگ UV را ممکن می‌سازد. فناوری‌های بلوتوث کم مصرف (انرژی پایین) و ارتباط میدان نزدیک امکان یکپارچه‌سازی با گوشی هوشمند را فراهم می‌کنند و رابط‌های کاربری برای تجسم تابش‌گیری و اصلاح رفتاری ارائه می‌دهند. جمع‌آوری داده‌های مبتنی بر ابر از شبکه‌های سنسور توزیع شده می‌تواند نقشه‌های تابش‌گیری UV با رزولوشن بالا و ارزیابی‌های ریسک شخصی‌سازی شده فراهم کند [۱].

۱۴.۳. آشکارسازها و منابع UV-LED

دیودهای نورافشان UV حالت جامد که در بایاس معکوس به‌عنوان آشکارساز استفاده می‌شوند، پیشرفت امیدوارکننده‌ای را نشان می‌دهند و سنسورهایی فشرده و مقاوم با انتخاب‌پذیری طیفی تعیین شده توسط گاف انرژی نیمه‌هادی ارائه می‌دهند. سیستم‌های مواد مشابه AIGaN مورد استفاده برای منابع UV-LED می‌توانند به‌عنوان آشکارسازهای انتخابی طول موج عمل کنند و ماژول‌های یکپارچه منبع-آشکارساز برای ابزارهای تحلیلی قابل حمل باشند [۲۲].

۱۴.۴. یادگیری ماشین و مدل‌سازی پیش‌بینی

کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در داده‌های دزیتری UV، تشخیص الگو، تشخیص ناهنجاری و مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده خطرات تابش‌گیری را ممکن می‌سازد. شبکه‌های عصبی بر اساس داده‌های دزیتری قدیمی ترکیب شده با پارامترهای هواشناسی می‌توانند پیش‌بینی‌های دقیق UV و تابش‌گیری شخصی‌سازی شده بر اساس الگوهای رفتاری فردی و شرایط محیطی فراهم کنند.

حرارتی و همچنین دزیترهای حالت جامد و TLD ها می‌توانند در شرایط اقلیمی ایران مورد استفاده قرار گیرند.

۱۳. مقایسه بین سرعت، دقت و هزینه روش‌های

مختلف دزیتری UV

در این مورد باید توجه داشت که هیچ روشی کامل نیست و سعی می‌شود با توجه به اولویت‌های مدنظر در دزیتری بهترین ترکیب از سرعت، دقت و هزینه دزیترها انتخاب شود. در جدول ۱، به‌صورت خلاصه روش‌های مختلف دزیتری UV با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول (۱): مقایسه بین دقت، سرعت و هزینه در روش‌های مختلف

دزیتری UV.

| روش دزیتری | دقت | سرعت پاسخ‌دهی | هزینه |
|----------------------|------------|---------------|------------------------|
| اسپکترورادیومتر | بسیار عالی | بسیار بالا | بسیار زیاد |
| رادیومترهای پهن باند | خوب | بسیار بالا | متوسط تا زیاد |
| TLDها | متوسط | کم | اولیه زیاد در ادامه کم |
| زیستی | متوسط | بسیار کند | زیاد |
| شیمیایی | عالی | کند | متوسط تا زیاد |
| الکترونیکی | عالی | بسیار بالا | نسبتاً زیاد |

۱۴. فناوری‌های نوظهور و جهت‌گیری‌های آینده

۱۴.۱. نانو تکنولوژی و نقاط کوانتومی

پیشرفت‌ها در نانومواد امکانات جدیدی برای دزیتری UV ارائه می‌دهند، این امکانات از طریق نقاط کوانتومی که خواص نوری قابل تنظیم با اندازه و بازده کوانتومی بالا دارند ایجاد می‌شود. نانوبلورهای نیمه‌هادی می‌توانند برای لبه‌های جذب UV خاص و گسیل فلورسانس مهندسی شوند و توسعه دزیترهای نسبت‌سنجی که قابلیت خود تصحیحی برای عوامل محیطی دارند را ممکن می‌سازند. نانوذرات کربن و نقاط کوانتومی گرافن برای سنسورهای UV کم‌هزینه و سازگار با بدن مناسب برای کاربردهای پوشیدنی، بسیار پرامید هستند.

۱۵. نتیجه‌گیری

عملیاتی و ویژگی‌های منبع UV خاص بستگی دارد. عوامل محیطی، الزامات کالیبراسیون و نیازهای مدیریت داده بیشتر بر انتخاب سیستم‌های دزیمتری تأثیر می‌گذارند. همان‌طور که درک ما از اثرات زیستی UV همچنان تکامل می‌یابد و فناوری‌های UV جدید ظاهر می‌شوند، تقاضاها از سیستم‌های دزیمتری همچنان افزایش خواهد یافت.

پیشرفت‌های آینده در دزیمتری UV احتمالاً بر مبنای تئوری‌سازی (کوچک‌سازی)، قابلیت بی‌سیم، تطابق پاسخ طیفی بهبود یافته با طیف‌های عملکرد زیستی و یکپارچه‌سازی با سیستم‌های پایش سلامت شخصی متمرکز خواهد بود. همگرایی نانو تکنولوژی، الکترونیک انعطاف‌پذیر و هوش مصنوعی فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای پیشرفت قابلیت‌های دزیمتری UV ارائه می‌دهد. پیشرفت مداوم در فناوری دزیمتری UV توانایی ما را برای ارزیابی و کاهش خطرات تابش UV در زمینه‌های تابش‌گیری شغلی، محیطی، پزشکی و تفریحی افزایش خواهد داد و در نهایت به نتایج بهبود یافته سلامت عمومی و استفاده ایمن‌تر از فناوری UV کمک خواهد کرد.

دزیمتری UV طیف قابل توجهی از تکنیک‌های اندازه‌گیری را در بر می‌گیرد که هر کدام برای کاربردها و الزامات خاص بهینه‌سازی شده‌اند. روش‌های اسپکترورادیمتریک اطلاعات طیفی دقیقی برای کاربردهای تحقیقاتی و کالیبراسیون اولیه فراهم می‌کنند، در حالی که دزیمترهای زیستی ارتباط زیستی مستقیم برای ارزیابی خطر ارائه می‌دهند. ثبت کننده‌های اطلاعات الکترونیکی پایش تابش‌گیری شخصی آسان با رزولوشن زمانی بالا را ممکن می‌سازند، و دزیمترهای شیمیایی راه‌حل‌های مقرون به‌صرفه برای برنامه‌های پایش در مقیاس بزرگ فراهم می‌کنند. دزیمتری ترمولومینسانس، به‌ویژه با مواد پیشرفته مانند $Al_2O_3:C,Mg$ ، حساسیت استثنایی و محدوده دینامیکی وسیع مناسب برای کاربردهای تحقیقاتی و عملی ارائه می‌دهد. توسعه مواد فوتوکرومیک جدید و چارچوب‌های فلزی-آلی جعبه ابزار موجود برای تشخیص UV را گسترش می‌دهد، در حالی که پیشرفت‌ها در فناوری نیمه‌هادی انتخاب‌پذیری طیفی بهبود یافته و قابلیت‌های یکپارچه‌سازی را وعده می‌دهد.

انتخاب روش‌های دزیمتری مناسب اساساً به اهداف اندازه‌گیری، دقت مورد نیاز، ملاحظات هزینه، محدودیت‌های

۱۶. مراجع

1. T. Heepenstrick, C. Strehl, M. Wittlich. Probing different approaches in ultraviolet radiation personal dosimetry - Ball sports and visiting parks. *Front. Public Health* 10 (2022) 868853.
2. A. Berces, A. Fekete, S. Gaspar, P. Grof, P. Rettberg, G. Horneck, G. Ronto. Biological UV dosimeters in the assessment of the biological hazard from environmental radiation. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.* 53 (1999) 36-43.
3. CIE. Photobiological safety of lamps and lamp systems (CIE S 009/E:2002). Commission Internationale de l'Eclairage, 2002.
4. DIN 5031-10. Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 10: Photobiologically effective radiation, quantities, symbols and action spectra. Deutsches Institut für Normung, 2003.
5. L. Endres, R. Breit, W. Jordan, W. Halbritter. UV radiation, irradiation, and dosimetry. In: *Dermatological Phototherapy and Photodiagnostic Methods*. Springer (2009) 3-59.
6. C. M. H. Driscoll. Dosimetry methods for UV radiation. *Radiat. Protect. Dosimetry* 72 (3-4) (1997) 217-222.
7. ISO 17166. Erythema reference action spectrum and standard erythema dose (CIE S007/E). International Organization for Standardization, 1999.
8. G. Seckmeyer, A. Bais, G. Bernhard, M. Blumthaler, C.R. Booth, P. Disterhoft, P. Eriksen, R. L. McKenzie, M. Miyauchi, C. Roy. Instruments to measure solar ultraviolet radiation. Part 1: Spectral instruments, 2001.

9. A. R. Webb, H. Slaper, P. Koepke, A. W. Schmalwieser. Know your standard: Clarifying the CIE erythema action spectrum. *Photochem. Photobiol.* (2006) 87 (2) 483-486.
10. W. L. Nicholson, B. Galeano. UV resistance of *Bacillus anthracis* spores revisited: Validation of *Bacillus subtilis* spores as UV surrogates for spores of *B. anthracis* Sterne. *Appl. Environ. Microbiol.* (2003) 69 (2) 1327-1330.
11. D. L. Mitchell, D. Karentz. The induction and repair of DNA photodamage in the environment. *Environ. UV Photobiol.* (1993) 345-377.
12. S. W. S. McKeever. *Thermoluminescence of Solids*. Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
13. Y. S. Horowitz. *Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry (Vols. 1-3)*. CRC Press, 1984.
14. M. Zahedifar, F. Hosseinmardi, L. Eshraghi, B. Ganjipour. Synthesis and thermoluminescence of boron-doped germanium nanowires. *Radiat. Phys. Chem.* 80 (2011) 324-327.
15. N. M. Trindade, M. C. F. Magalhães, M. R. Nunes, E.M. Yoshimura. Thermoluminescence of UV-irradiated α -Al₂O₃:C, Mg. *J. Luminescence* 223 (2020) 117195.
16. M. Jena, D. Sen, M. Zulfequar, K. Asokan, A. Pandey. Study of the thermoluminescence properties of γ and UV-C irradiated Li₃PO₄: Dy synthesized by solid state diffusion method. *J. Alloys Compounds* 955 (2023) 170077.
17. M. Talebi, M. Zahedifar, E. Sadeghi. UVC dosimetry properties of Mn and Ce doped KCl thermoluminescent phosphor produced by co-precipitation method. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 458 (2019) 97-104.
18. J. Mosqueira-Yauri, R. R. Mollohuanca-Acquepucho, J. S. Ayala-Arenas, N. F. Cano. Thermoluminescence response in gamma and UV irradiated CaF₂: Ce, Li phosphor. *Proc. ISSSD* 2 (2022) 261-273.
19. M. Naderi, E. Sadeghi, M. Zahedifar. Fabrication and investigation of thermoluminescence properties of Zn₂SiO₄/SiO₂ nanophosphor with manganese impurity. *Radiat. Phys. Chem.* 225 (2024) 112126.
20. L. Oster, D. Weiss, N. Kristianpoller. Photostimulated thermoluminescence of X-ray-irradiated CaF₂: Dy. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 27 (8) (1994) 1732-1736.
21. M. Razeghi. Short-wavelength solar-blind detectors-status, prospects, and markets. *Proc. IEEE* 90 (6) (2002) 1006-1014.
22. A. Khan, K. Balakrishnan, T. Katona. Ultraviolet light-emitting diodes based on group three nitrides. *Nature Photonics* 2 (2) (2020) 77-84.
23. A. B. Rosenfeld. MOSFET dosimetry on modern radiation oncology modalities. *Radiat. Protect. Dosimetry* 101 (1-4) (2002) 393-398.
24. H. Lu, J. Xie, X.Y. Wang, Y. Wang, Z J. Li, K. Diefenbach, Q. Pan, Y. Qian, J. Q. Wang, S. Wang, J. Lin. Visible colorimetric dosimetry of UV and ionizing radiations by a dual-module photochromic nanocluster. *Nature Communications* 12 (1) (2021) 2798.
25. M. J. Butson, P. K. N. Yu, T. Cheung, P. E. Metcalfe. Radiochromic film for medical radiation dosimetry. *Mater. Sci. Eng.: R: Reports* 41 (3-5) (2003) 61-120.
26. P. Sperfeld, J. Metzendorf, S. Nawo, K. Müller, K. M. Stock. Spectral irradiance scale based on radiometric black-body temperature measurements. *Metrologia* 37 (5) (2000) 373.
27. U. Köhler, S. Nevas, K. McConkey, R. Evans. Comparison of methods for the reduction of stray light in diode array spectroradiometers. *Appl. Optics* 34 (22) (1995) 4963-4968.
28. S. Madronich. UV radiation in the natural and perturbed atmosphere. In *UV-B radiation and ozone depletion: effects on humans, animals, plants, microorganisms, and materials*. *Lewis Pub.* (1993) 17-69.
29. B. L. Diffey. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods* 28 (1) (2002) 4-13.