

دزسنجی گذشته‌نگر با استفاده از ناخن در تأسیسات هسته‌ای (مقاله مروری)

عباس نوری¹ و فرهود ضیائی^{2*}

¹گروه فیزیک، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران.

²پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

*تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، صندوق پستی: 11365-3486

پست الکترونیکی: fziaie@aeoi.org.ir

چکیده

عموماً دزهای بیش از 2 Gy می‌تواند اثرهای زیست‌شناختی حادی در انسان ایجاد کند. به همین دلیل برای اندازه‌گیری و ثبت دز دریافتی جمعیتی به ویژه در پرتوکاران، نیاز به یک دزسنج همراه به شدت توسط پژوهشگران احساس شده است. هدف از این مطالعه، معرفی شیوه‌های دزسنجی گذشته‌نگر به ویژه بهره‌گیری از ناخن به عنوان یک ابزار طبیعی برای تعیین دز جذبی جمعیتی در بدن است. روش‌های سنتی دزسنجی بر اساس اثرات تابش روی مواد غیرآلی استوار است. بر خلاف روش‌های سنتی از ترکیبات آلی نیز برای دزسنجی استفاده می‌گردد که اثر تابش بر آن‌ها ایجاد رادیکال آزاد است. برای تعیین غلظت این رادیکال‌ها، از روش طیف‌سنجی EPR استفاده می‌شود. تاکنون مواد جامد گوناگونی مانند قندها، پلیمرها، کوارتز و استخوان برای گستره وسیعی از دز جذب شده (10^{-8} - 10^8 Gy) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به منظور توسعه دزهای قابل اندازه‌گیری در سطح پایین‌تر (1-5 Gy)، موادی که حساسیت بیشتری نسبت به تابش داشته باشند، مورد نیاز هستند. طیف‌سنجی EPR معمولاً در ناحیه x-band و در بسامد 9/5 GHz انجام می‌گردد. منحنی دز-پاسخ شکر برای تابش گاما در محدوده 0/5 - 100 Gy خطی است. منحنی دز-پاسخ برای بیشتر پلاستیک‌ها غیرخطی بوده و دارای سیگنال EPR با پایداری کم است. کتان که از یک زنجیر پلی‌ساکاریدی تشکیل شده، دارای منحنی دز-پاسخ خطی در محدوده 10^{-4} - 10^4 Gy بوده ولی به دلیل باقی ماندن مواد شوینده در آن، تفسیر سیگنال EPR آن کار آسانی نیست. شدت سیگنال EPR پشم ضعیف بوده و باز ترکیب رادیکال‌ها در آن به سرعت اتفاق می‌افتد. مینای دندان یک بافت خوب برای دزسنجی به روش EPR بوده و منحنی دز-پاسخ آن در محدوده 0/2 - 0/02 Gy است. حد آشکارسازی برای استخوان نیز در حدود چند کیلوگری بوده و در دزهای پایین دقت ندارد. سیگنال زمینه در مو بالا بوده و پایداری سیگنال آن کم است. همچنین سیگنال EPR ناخن حداقل به مدت چند روز پایدار است. عموماً موادی که در دزسنجی EPR مورد استفاده قرار می‌گیرند بایستی دارای ویژگی‌هایی همچون، همراه در همه جا، قابلیت نمونه‌گیری غیرتهاجمی، پایداری سیگنال و ارزیابی سریع و دقیق دز باشند. ناخن به دلیل دارا بودن همه این ویژگی‌ها در مقایسه با سایر مواد، در دزسنجی به روش EPR بسیار مورد توجه است.

کلیدواژگان: دزیمتری گذشته‌نگر، روش EPR، ناخن، حوادث پرتوی.

1. مقدمه

بر اساس گزارش مرکز کمک‌های اضطراری پرتوی/ واحد آموزش ثبت حوادث پرتوی¹ در طی سال‌های 1994-2004، حدود 421 سانحه پرتوی مهم در سراسر دنیا رخ داده است. همچنین احتمال زیادی برای حملات تروریستی یا استفاده از سلاح‌های هسته‌ای وجود دارد که در نتیجه افراد نظامی و غیرنظامی می‌توانند در معرض تابش قرار گیرند. در چنین رخدادهایی و مانند آن، استفاده از یک روش غیرتهاجمی²، سریع، و قابل اعتماد برای اندازه‌گیری دز ناشی از تابش ناخواسته، برای غربالگری³ پس از حوادث، بسیار مطلوب و ضروری است [1]. عموماً دزهای بیش از 2 Gy می‌تواند اثرهای زیست‌شناختی حاد در انسان‌ها ایجاد کند. به همین دلیل، افرادی که با پرتوهای یونساز سروکار دارند باید دزسنج مناسب به همراه داشته باشند تا دز دریافتی تجمعی آن‌ها اندازه‌گیری و ثبت شود. به منظور مدیریت صحیح در سوانح پرتوی، امداد رسانی هماهنگ تعداد زیادی از خدمات اورژانسی از قبیل: تیم ارزیابی دز جذبی، تیم اورژانس، واحدهای غربالگری پزشکی، پلیس و آتش‌نشانان مورد نیاز است. اصولاً در مدیریت سوانح، نجات زندگی و در مرحله بعد غربالگری آسیب‌دیدگان هدف اصلی را تشکیل داده و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

به دلیل محدود بودن منابع پزشکی برای مدیریت تعداد زیاد قربانیان، غربالگری در سوانح بر اساس تخمین دز صورت می‌گیرد و این امر باعث می‌شود افرادی که در معرض آسیب‌های حاد پرتوی قرار داشته و به مراقبت‌های فوری نیاز دارند شناسایی و وارد سیستم مراقبت بهداشتی شده و اقدامات صحیح درمانی برای ایشان انجام گردد. همچنین افراد بدون

آسیب‌های ترکیبی و دزهای غیر مهم کلینیکی (کمتر از 1/5گری) نیز از ابتدا شناسایی شده و وارد سیستم پرفشار مراقبتی بهداشتی نشده و خارج از مراکز درمانی خدمات دریافت می‌کنند.

غربالگری موثر و کارآمد، مستلزم روش‌های سریع ارزیابی دز جذب شده، در محل بروز سانحه می‌باشد. پرسنل تاسیسات هسته‌ای ملزم به استفاده از دزسنج‌های فردی در محل کار خود هستند ولی معمولاً بر اثر سهل‌انگاری و نبود آموزش کافی، دزسنج‌های فردی خود را به همراه ندارند و یا اینکه دز دریافتی خارج از محدوده قابل آشکارسازی دزسنج است. از طرفی در سوانح پرتوی، مردم عادی هیچ‌گونه دزسنج فردی به همراه ندارند. پس در چنین مواقعی برای تخمین دز افراد به منظور غربالگری، بهره‌گیری از روش‌های دزسنجی گذشته‌نگر مورد نیاز است. لذا در این خصوص مواردی همچون چگونگی تعیین دز میزان دریافتی افراد با دقت زیاد و در زمان مناسب، و نیز انتخاب بافت مناسب انسان برای نمونه‌برداری جهت تخمین میزان دز، بسیار حائز اهمیت می‌نماید.

1.1. روش‌های دزسنجی گذشته‌نگر

عموماً برای دزسنجی گذشته‌نگر در سوانح تابشی، از سه روش بازسازی الگوی دز (روش‌های محاسباتی)، اندازه‌گیری اثرات بیولوژیکی تابش (دزسنجی بیولوژیکی)، و اندازه‌گیری تغییرات فیزیکی ناشی از تابش (دزسنجی فیزیکی)، استفاده می‌شود.

روش محاسباتی روش بسیار دقیقی برای تخمین دز جذبی بوده اما بعید است به طور موثر و سریع قابل انجام باشد. علاوه بر پیچیدگی‌های تکنیکی، اطلاعات ورودی در این روش بر مبنای مصاحبه با افراد حادثه دیده است. استفاده از روش‌های بیولوژیکی در شرایط سانحه که افراد زیادی تحت تابش قرار گرفته‌اند نیز دارای محدودیت‌های قابل توجهی است و از همه

¹ Radiation Emergency Assistance Center/Training Site
Radiation Accident Registries

² Invasive

³ Triage

برخی مواد بیولوژیکی مثل دندان، مو، استخوان و ناخن، این رادیکال‌های آزاد به دام افتاده و مدت نسبتاً طولانی در ساختار ماده باقی می‌مانند. تعداد رادیکال‌های آزاد تولید شده در یک ماده، با میزان دز تابشی، رابطه مستقیم دارد. در روش دز سنجی EPR الکترون‌های جفت نشده (رادیکال‌ها) از طریق جذب تابش ماکروویو در یک میدان مغناطیسی قوی، آشکارسازی می‌شوند. در واقع این روش یک ابزار قدرتمند برای آشکارسازی رادیکال‌های آزاد تولید شده توسط تابش، در جامدات است.

2.1. معرفی روش دزسنجی EPR

تشدید پارامغناطیسی الکترون EPR یک روش بیناب‌نمایی آشکارکننده مواد دارای الکترون جفت نشده است. لذا غالباً ESR (تشدید اسپین الکترون) نیز نامیده می‌شود. آزمایش تشدید پارامغناطیسی الکترون EPR را می‌توان به صورت جذب تشدید انرژی ماکروویو در گونه‌های پارامغناطیس به وسیله گذار اسپین یک الکترون جفت نشده از یک تراز انرژی به تراز انرژی بعدی در حضور یک میدان مغناطیسی قوی تعریف کرد. اولین تجربه EPR به وسیله زاویسکی در سال 1945 انجام شد. بیناب‌نمایی EPR به دو روش پالسی و پیوسته انجام می‌شود که در اینجا روش پیوسته مورد توجه است. EPR یک روش تشدید مغناطیسی شبیه NMR یا تشدید مغناطیسی هسته است، با این تفاوت که به جای گذارهای هسته‌ای در نمونه، گذارهای الکترون جفت نشده را در میدان مغناطیسی مورد آشکارسازی قرار می‌دهد. به دلیل وجود ممان مغناطیسی، رفتار الکترون همانند یک میله آهنربای کوچک است. هنگام فراهم آمدن یک میدان مغناطیسی خارجی، الکترون‌های پارامغناطیس می‌توانند در یک راستای موازی به صورت هم جهت و خلاف جهت میدان مغناطیسی اعمالی قرار گیرند. بدین سبب دو سطح انرژی مجزا برای

مهم‌تر اینکه نتیجه این نوع دزسنجی ممکن است چندین روز به طول بیانجامد.

در دزسنجی فیزیکی، اندازه‌گیری تغییرات فیزیکی ناشی از تابش بسته به روش به کار رفته، در زمانی بین 1 تا 48 ساعت انجام می‌گیرد. این دزسنجی بر خلاف روش‌های بیولوژیکی به پردازش و آماده‌سازی وسیع نمونه نیاز ندارد. روش‌های فیزیکی جایگزین بسیار مناسبی برای روش‌های بیولوژیکی در دزسنجی سوانح به شمار می‌رود. در دزسنجی فیزیکی از سه تکنیک برای تخمین میزان دز جذبی استفاده می‌شود:

1.1.1. فعال‌سازی هسته‌ای¹

اساس این روش، اندازه‌گیری اکتیویته ناشی از برخورد نوترون با بافت‌های بیولوژیکی بدن مثل خون، مو و ناخن و یا عناصر فلزی همراه فرد تابش دیده مثل سکه، جواهر و سگک کمر بند است.

2.1.1. ترمولومینسانس²

در این روش در اثر تابش، الکترون‌ها در نقایص شبکه‌ای ماده گیر می‌افتند. گرم کردن ماده تا دماهای بالا باعث می‌شود این الکترون‌ها به ترازهای بالاتر رفته و در بازگشت به تراز زمینه، نور مرئی گسیل کنند که میزان نور گسیل شده با میزان دز جذبی متناسب است.

3.1.1. تشدید پارامغناطیسی الکترون³

پرتوهای یون ساز باعث ایجاد تغییراتی در بدن انسان می‌شود که قابل اندازه‌گیری است. یکی از این تغییرات، تولید رادیکال‌های آزاد است. این رادیکال‌ها که معمولاً از طریق شکست پیوند کووالانسی به وجود می‌آیند در مایعات و بیشتر بافت‌های بیولوژیکی، دارای عمر کوتاهی در حد نانو ثانیه هستند و سریعاً باز ترکیب می‌شوند. اما در برخی مواد جامد و

¹ Nuclear Activation

² Thermoluminescence

³ Electron Paramagnetic Resonance (EPR)

3.1. ماده مناسب در دزسنجی EPR در سوانح تابشی

موادی که در دزسنجی EPR و به منظور غربالگری سریع به کار می‌روند بایستی دارای ویژگی‌هایی مانند: حضور در همه جا، نمونه‌گیری آسان، غیرتهاجمی بودن، وجود سیگنال پس از تابش، سیگنال زمینه ناچیز، دارا بودن منحنی دز- پاسخ خطی، حد پایین آشکارسازی و پایداری سیگنال پس از پرتو باشند [4-1]. مواد متعددی در شرایط سانحه به عنوان دزسنج مورد بررسی قرار گرفته‌اند که برخی از آن‌ها به هنگام سانحه همراه فرد یا در نزدیکی وی بوده‌اند مانند: پارچه لباس به خصوص پشم و کتان، شکر، شیشه، دکمه، موبایل و... و برخی دیگر بافت‌های بیولوژیکی بدن مانند مو، ناخن، استخوان، مینای دندان و... [5-19].

1.3.1. ساکاریدها

ساکاریدها مواد بلوری شکلی هستند که در مکان‌های مختلف مثل محیط‌های کاری یافت می‌شوند. به عنوان مثال منحنی دز- پاسخ شکر خالص برای تابش گاما در محدوده 0/5-100 گری خطی است، اما ساکاریدهایی که به صورت ترکیبی هستند گستره حساسیت متفاوتی را نشان می‌دهند [14].

2.3.1. پلاستیک‌ها

پلاستیک‌ها، پلیمرهایی با وزن مولکولی زیاد را تشکیل می‌دهند. اشیایی مانند تلفن همراه، ساعت، عینک، دکمه و ... که روزانه استفاده می‌شوند عمدتاً از مقادیری پلاستیک ساخته شده‌اند. دکمه‌های پلاستیکی در دزسنجی سوانح مورد استفاده قرار گرفته‌اند. طیف EPR بیشتر پلاستیک‌ها پس از تابش الگوهای متفاوت و پیچیده‌ای را از خود نشان می‌دهند. منحنی دز- پاسخ اغلب پلاستیک‌ها خطی نیست و سیگنال به وجود آمده پایداری کمی دارد. استفاده از پلاستیک‌ها در شرایط حادثه ممکن است تخمین درستی از میزان دز جذبی را نشان ندهد [15].

الکترون‌های جفت نشده به وجود می‌آید. با به کار بردن یک فرکانس ثابت از امواج ماکروویو تعدادی از الکترون‌های سطح انرژی پایین به سطح انرژی بالا برانگیخته می‌شوند. برای رخ دادن این گذار باید یک میدان مغناطیسی خارجی با توان خاص وجود داشته باشد، آن چنان که اختلاف سطح انرژی بین سطح پایینی و بالایی دقیقاً با فرکانس ماکروویو هماهنگ باشد. برای رسیدن به چنین شرایطی، مقادیر مختلف میدان مغناطیسی با ثابت نگاه داشتن فرکانس ماکروویو، جاروب می‌گردد. در شرایطی که میدان مغناطیسی و فرکانس موج ماکروویو کاملاً منطبق باشند، شرایط تشدید محقق می‌شود.

بیناب‌نمایی EPR یکی از مهم‌ترین روش‌های تحلیلی است که در بسیاری از زمینه‌های شیمی و بیوفیزیک به شمار می‌رود. دزسنجی به روش EPR برای اهداف متفاوتی در صنعت، پزشکی، زمین‌شناسی، و باستان‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربردهای پزشکی با اهمیت عبارتند از: دزسنجی حوادث پزشکی، رادیوتراپی، کنترل کیفی اشعه X. از دیگر کاربردهای مهم، استفاده از این روش در دزسنجی پرتوها است. این زمینه دربرگیرنده اندازه‌گیری دز تابشی به کار رفته در سترون‌سازی وسایل یک‌بار مصرف پزشکی و آشکار کردن مواد خوراکی پرتو دیده است.

دزسنج‌هایی شامل مواد حساس به تابش، دزسنج‌های کنش پذیر نامیده شده‌اند. مشهورترین دزسنج کنش‌پذیر، دزسنج ترمولومینسانس (TLD) است. یکی از اشکالات دزسنج ترمولومینسانس این است که پاسخ آن در هنگام خوانش از بین می‌رود. در دزسنج‌هایی که با شیوه EPR عمل می‌کنند، پاسخ دزسنج به هنگام خوانش دز، تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و دزسنج می‌تواند جهت ارزیابی دز و همچنین بهبود عملیات آماری به دفعات خوانش گردد.

3.3.1. پارچه لباس**1.3.3.1. کتان**

کتان رشته‌ای است که از زنجیرهای پلی‌ساکاریدی تشکیل شده است. از آنجا که کتان در بسیاری از لباس‌ها وجود دارد ویژگی‌های آن به‌عنوان دزسنج در سوانح پرتوی مورد بررسی قرار گرفته است. از طریق نمونه‌برداری از کتان در قسمت‌های مختلف بدن می‌توان به الگوی توزیع دز نیز پی برد. منحنی دز - پاسخ کتان در گستره 10-10000 گری خطی بوده و سرعت محوشدگی سیگنال EPR در کتان بالاست. تابش نور خورشید، باقی ماندن مواد شوینده داخل پارچه، وجود گرد و غبار و چربی و... ویژگی‌های مکانیکی کتان را تغییر داده و تفسیر سیگنال EPR آن را مشکل می‌سازد [18].

2.3.3.1. پشم

رشته‌های پشم از سلول‌های پوستی و پوشش مو تشکیل شده‌اند که توسط کمپلکس غشای سلول به یکدیگر متصل شده و تشکیل فیبر کراتین¹ می‌دهند. شدت سیگنال EPR ناشی از پرتو در پشم، ضعیف است و باز ترکیب رادیکال‌های تشکیل شده بسیار سریع اتفاق می‌افتد. استفاده از پشم به‌عنوان دزسنج در شرایط سانحه، مناسب گزارش نشده است [9].

4.3.1. مواد بیولوژیکی**1.4.3.1. بافتهای سخت بدن**

ماده اصلی تشکیل‌دهنده بافتهای سخت بدن انسان را هیدروکسی اپتایت با فرمول شیمیایی $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ تشکیل می‌دهد. تراکم هیدروکسی اپتایت در مینای دندان که معدنی‌ترین بافت موجود در بدن است، 97% و در استخوان حدود 70% است. تابش پرتوهای یون‌ساز باعث ایجاد رادیکال‌های آزاد پایدار CO_2^- در هیدروکسی اپتایت می‌شود.

تراکم این رادیکال‌ها توسط دستگاه طیف‌سنج EPR اندازه‌گیری شده و سپس دز جذبی تعیین می‌گردد. مینای دندان بافتی بسیار مناسب برای دزسنجی گذشته‌نگر است، زیرا این بافت در دوران کودکی به طور کامل شکل گرفته و تغییر نمی‌کند. در دمای $25^\circ C$ نیمه‌عمر رادیکال‌های به وجود آمده در مینای دندان فسیل به میزان 10^7 سال تعیین شده است. حد آشکارسازی مینای دندان در گستره 20-200mGy گزارش شده است و به دلیل حد دز پایین، از آن برای راستی آزمایشی در مطالعات استفاده می‌گردد. یکی از اشکالات دزسنجی مینای دندان، نمونه‌گیری تهاجمی آن است [6، 10 و 11]. همچنین به دلیل تراکم کمتر هیدروکسی اپتایت در بافت استخوان، سیگنال‌های تولیدشده پایداری کمتری دارند. حد آشکارسازی استخوان بر خلاف مینای دندان، در حدود چند گری است [7].

2.4.3.1. مو

به دلیل غیرتهاجمی بودن نمونه‌برداری و همچنین جمع‌آوری آسان، مو را می‌توان به‌عنوان یک دزسنج مناسب معرفی کرد. با نمونه‌برداری مو از قسمت‌های مختلف بدن می‌توان به الگوی توزیع دز پی برد. مو به طور عمده از کراتین و ملانین² تشکیل شده است. به دلیل وجود مقادیر زیاد ملانین در مو، شدت سیگنال EPR زمینه در آن زیاد است. پایداری کم سیگنال و وجود سیگنال‌های تداخل‌کننده در طیف EPR از مشکلات مو در حوادث پرتوی تلقی می‌شود [17]. تحقیقات برای حل این محدودیت‌ها و معرفی مو به‌عنوان یک دزسنج خوب ادامه دارد.

3.4.3.1. ناخن

یک ابزار طبیعی برای تعیین دز جذبی تجمعی، ناخن انسان بوده که پیش از این پیشنهاد شده است [1-4]. تابش در ناخن رادیکال‌های آزاد ایجاد می‌کند که روزها ماندگار است. میزان

² Melanin¹ Keratin

میلی‌گری)، قرائت سریع دز، پایداری سیگنال پس از تابش و خطی بودن رابطه دز- پاسخ در یک گستره مناسب، اشاره نمود. هر قدر ماده‌ای بتواند تعداد بیشتری از شرایط ذکر شده را برآورده کند، دزسنج مناسب‌تری خواهد بود. دزسنجی EPR ناخن‌ها در سال‌های اخیر توسعه یافته است [1، 4، 20-22] اما هنوز برای به‌کارگیری موثر آن‌ها، مشکلاتی وجود دارد.

فرآیند مکانیکی بریدن ناخن‌ها، رادیکال‌های آزاد¹ (MIS) ایجاد می‌کند [3، 20 و 23]. همچنین سیگنال زمینه² (BKS) ویژگی‌هایی مانند سیگنال‌های ناشی از تابش³ (RIS) دارد. این تداخل‌ها چشم‌گیر است، به طوری که اندازه‌گیری دز جذبی را در گستره مطلوب (5گری) بسیار پیچیده می‌کند. نادیده انگاشتن این تداخل‌ها می‌تواند خطاهایی به بزرگی حدود ده گری ایجاد کند.

برای غلبه بر این مشکلات پیش از این راهکارهایی ارائه شده است [1، 3، 4، 20، 21 و 23]. افزون بر این تداخل‌ها، بیناب EPR ناخن به شدت به زمان و شیوه چیده شدن آن‌ها بستگی دارد [20]. اگر بتوان بر محدودیت‌های ذکر شده غلبه کرد می‌توان از ناخن‌ها به عنوان یک دزسنج همراه و دقیق بهره گرفت. در سال 2016 مقاله مروری مربوط به دزیمتری EPR در ناخن‌ها منتشر گردیده است [24]. این مقاله به ساختار شیمیایی ناخن و تفکیک MIS‌های مختلف پرداخته است. در حالی که در مقاله مروری حاضر، بیشتر به روش‌های دزسنجی گذشته‌نگر، موادی که در حوادث پرتوی مورد آزمایش قرار گرفته و همچنین تأثیر انواع مواد شیمیایی در تفکیک MIS و RIS و اثر تعداد قطعات بریده شده ناخن، پرداخته شده که آن را از مقاله مذکور متمایز می‌سازد.

دز با اندازه‌گیری چگالی این رادیکال‌ها با استفاده از روش EPR به دست می‌آید. بنابراین شدت سیگنال خروجی EPR با دز متناسب است و می‌توان آن را برحسب دز جذبی کالیبره کرد. نمونه‌گیری آسان و سریع، حساسیت بالا در محدوده دز 1-2 گری و اندازه‌گیری در محل وقوع حادثه از مزایای دزسنجی با ناخن است [20].

مهم‌ترین مزیت ناخن، نمونه‌گیری آسان و بدون درد و غیرتهاجمی بودن آن است. با اندازه‌گیری سیگنال‌های ناخن از انگشتان متفاوت دست و پا می‌توان میزان نایکنواختی و توزیع دز را نیز مشخص کرد. سیگنال‌های ناشی از پرتو در ناخن، حداقل به مدت چند روز پایدار بوده و اگر نمونه‌ها چند ساعت پس از سانحه جمع‌آوری و در دمای پایین نگه‌داری شوند، مدت زمان پایداری آن‌ها طولانی‌تر خواهد شد. اندازه‌گیری سیگنال EPR نمونه ناخن به پردازش چندانی نیاز نداشته و در مدت زمان 5 دقیقه طیف آن به دست می‌آید.

4.1. جمع‌بندی

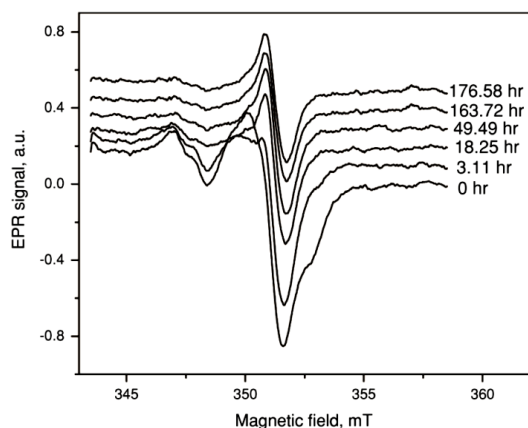
مطالعات علمی بسیاری روی مواد مختلف انجام شده تا قابلیت استفاده از آن‌ها را در دزسنجی به روش EPR در شرایط اورژانس پرتوی نشان دهد. با وجود اینکه تمامی مواد بررسی شده دارای سیگنال EPR ناشی از تابش هستند، ولی همه آن‌ها هنگام بروز سوانح، برای دزسنجی تعداد زیاد افراد تابش دیده، مناسب نیستند.

بعضی از این مواد ویژگی‌های مورد نیاز برای دزسنجی و غربالگری را ندارند که از آن قبیل می‌توان به مواردی چون حضور در همه جا، نمونه‌گیری آسان و غیرتهاجمی، سیگنال زمینه قابل صرف نظر، کمترین حد آشکارسازی (در حد چند

¹ Mechanical Induced Signal (MIS)

² Background Signal (BKS)

³ Radiation Induced Signal (RIS)



شکل (2): تغییر شکل زمانی طیف EPR در نمونه‌های ناخن تابش ندیده پس از چیدن قسمت‌های اضافی ناخن. اندازه‌گیری در دمای اتاق و در توان میکروموج 2 mW [20].

چنانچه ملاحظه می‌شود پس از سپری شدن زمان کوتاهی از چیده شدن ناخن، MIS با دو قله در طیف کلی غالب است، در حالی که پس از حدود 20 ساعت BKS تک قله‌ای غالب می‌شود. بنابراین برای مقایسه شکل ظاهری MIS و رفتار آن در نمونه‌های مختلف، اندازه‌گیری طیف EPR پس از مدت کوتاهی از چیده شدن ضروری است، در حالی که برای مقایسه BKS در نمونه‌ها بایستی حدود 20 ساعت پس از چیده شدن ناخن منتظر ماند.

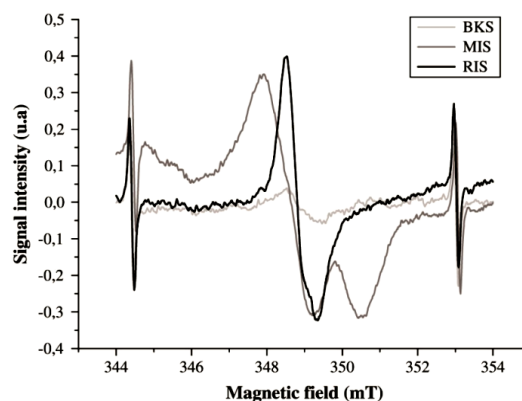
2.1.2. تفکیک مؤلفه‌های MIS و BKS بر اساس وابستگی

به توان میکروموج¹

مؤلفه‌های MIS و BKS، به دلیل وابستگی زمانی به توان میکروموج ورودی قابل ارزیابی است [20]. مطابق شکل 3، مؤلفه MIS در توان‌های میکروموج مختلف، اشباعی را نشان نمی‌دهد در حالی که BKS در توان میکروموج 2 mW اشباع می‌شود. این تفاوت در وابستگی مؤلفه‌های MIS و BKS به توان میکروموج ورودی، روش جایگزینی برای تفکیک این دو سیگنال ارائه می‌دهد و دیگر لازم نیست برای محوشدن

2. مروری بر مقالات

بر اساس مطالعات قبلی و همچنین مطابق شکل 1 مؤلفه‌های MIS و BKS با همپوشانی دارند [21]. بنابراین برای تعیین دقیق دز جذب، تخمین یا حذف سهم سیگنال‌های غیر تابشی، هنگام اندازه‌گیری شدت RIS الزامی است.



شکل (1): مؤلفه‌های مختلف سیگنال EPR پس از پرتودهی و چیده شدن [21].

1.1. تفکیک مؤلفه‌های MIS و BKS

به دلیل همپوشانی سیگنال‌های غیر تابشی با سیگنال مربوط به تابش، راهکارهایی جهت تفکیک این سیگنال‌ها مطالعه و پیشنهاد شده که در ادامه به شرح آن پرداخته شده است.

1.1.2. تفکیک مؤلفه‌های MIS و BKS بر اساس وابستگی

زمانی

مطابق شکل 2 تغییر قابل توجهی در شکل ظاهری طیف EPR با گذشت زمان وجود دارد [20]. طیف اولیه دارای دو قله است اما پس از گذشت تقریباً 20 ساعت طیف، تک قله‌ای خواهد شد که در مطالعات قبلی به عنوان MIS و BKS شناخته شده بودند. پس MIS و BKS به دلیل رفتار متفاوت‌شان نسبت به زمان می‌توانند تفکیک شوند.

¹ Microwave power

3.1.2. تفکیک مؤلفه‌های MIS و BKS با استفاده از محلول

شیمیایی

در سال 2007 مطالعه‌ای به منظور بررسی تأثیر قرار دادن ناخن در مواد شیمیایی مختلف بر پاسخ دزسنجی به روش EPR انجام گردید [1]. در این مطالعه استفاده از 7 ماده شیمیایی مختلف (جدول 1) که MIS را کاهش می‌دهد گزارش شده است. در این مطالعه به وابستگی پاسخ EPR در ناخن‌هایی که در محلول دی‌تیوتریتول¹ قرار گرفته‌اند، توجه ویژه‌ای شده است زیرا این محلول به طور عام به عنوان یک واکنش‌گر کاهش‌دهنده پروتئین‌ها و پپتایدها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول (1): معرفی محلول‌های شیمیایی برای قرار دادن نمونه‌ها [1].

کد نمونه	نوع ماده شیمیایی	جرم نمونه (mg)
Co	None	15/1
Cx0	Acetone	14/5
Cx1	0.1 Hydroxylamine	15/5
Cx2	0.1 D,L-dithiothreitol	17/6
Cx3	0.6 M Urea	14/7
Cx4	0.1 M sodium thioglycolate	14/7
Cx5	5% H ₂ O ₂	14/7
Cx5	5% H ₂ O ₂	14/7
Cx6	10% H ₂ O ₂	13/7

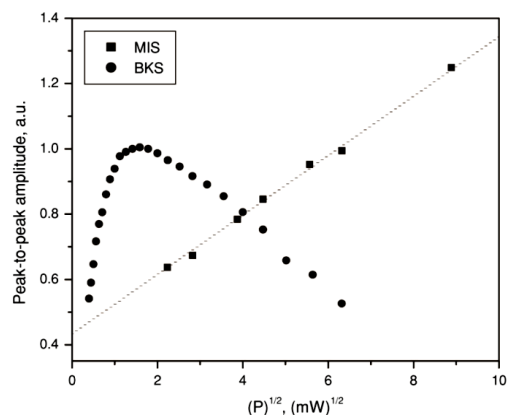
یادآور می‌شود که ناخن نیز از پروتئینی به نام کراتین تشکیل شده است. استفاده از مواد شیمیایی مختلف روی نمونه‌های ناخن همه‌ی اهداکننده‌ها نتایج مشابهی داشت.

بهترین نتیجه (کمترین MIS) قرارگیری نمونه‌ها در محلول دی‌تیوتریتول 0/1 M در مدت زمان 5 دقیقه بود که باعث کاهش 4 برابری MIS نسبت به نمونه شاهد² می‌شود (شکل 5) که به همین دلیل برای اندازه‌گیری‌های پاسخ دز در ناخن‌های تابش دیده از این محلول استفاده گردید.

¹ Dithiothreitol

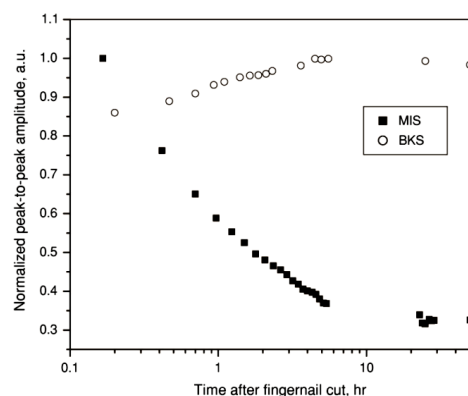
² Control

سیگنال MIS و اندازه‌گیری سیگنال BKS، 20 ساعت پس از چیده شدن زمان صرف کرد. شدت BKS در هر دو توان تقریباً یکسان است در حالی که شدت MIS در توان 16 mW تقریباً 2 برابر شدت آن در توان 1 mW است.



شکل (3): وابستگی سیگنال‌های MIS و BKS به توان میکروموج [20].

با بهره‌گیری از این دو روش تفکیک (زمانی و توان میکروموج) MIS و BKS می‌توان وابستگی زمانی دامنه قله تا قله اندازه‌گیری EPR را برای این دو مؤلفه به طور جداگانه به دست آورد (شکل 4). مطابق شکل 4، MIS با گذشت زمان کاهش می‌یابد در حالی که BKS با گذشت زمان افزایش می‌یابد تا همانند MIS به اشباع برسد، اما نکته جالب این است که زمان بیشترین کاهش در MIS و زمان بیشترین افزایش در BKS یکسان است.

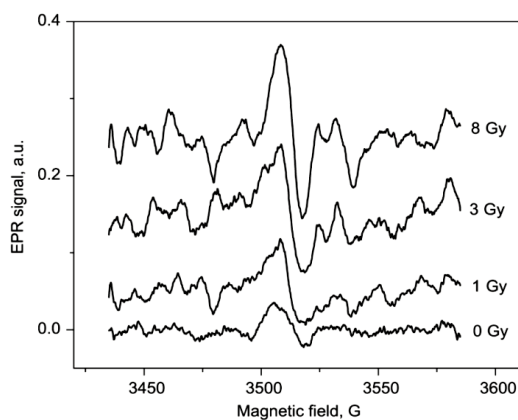


شکل (4): وابستگی زمانی شدت مؤلفه‌های MIS و BKS در نمونه‌های

ناخن تابش ندیده پس از چیدن. مؤلفه‌ها به وسیله وابستگی متفاوت

توان میکروموج از هم جدا شده‌اند [20].

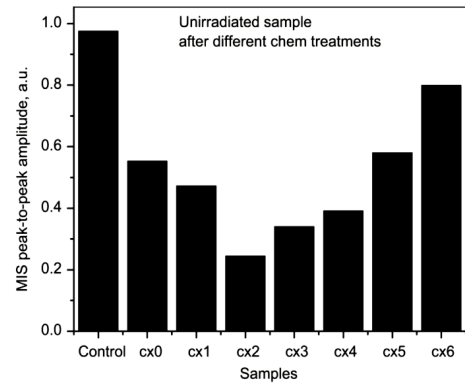
است قرارگیری نمونه‌ها در محلول شیمیایی مذکور باعث کاهش طیف EPR می‌شود. این طیف شامل MIS و BKS و RIS است اما نتایج به دست آمده از نمونه‌های تابش ندیده (شکل 5) گویای این موضوع است که به طور اصولی قرارگیری ناخن‌ها در محلول‌های شیمیایی مؤلفه‌های غیر تابشی را کاهش می‌دهد، اگر چه کاهش کمی در RIS نیز ممکن است اتفاق افتد. از شکل سیگنال EPR در دزهای مختلف (شکل 7) می‌توان به این نتیجه رسید که اگر از شیوه قرارگیری 20 دقیقه در محلول دی‌تیوتریتول 0/1 M استفاده شود، دزی به کوچکی 1 Gy نیز در ناخن‌ها قابل اندازه‌گیری است.



شکل (7): طیف‌های EPR نمونه‌های ناخن قرار داده شده به مدت 20 دقیقه در محلول دی‌تیوتریتول پس از دریافت دزهای تابش مختلف [1].

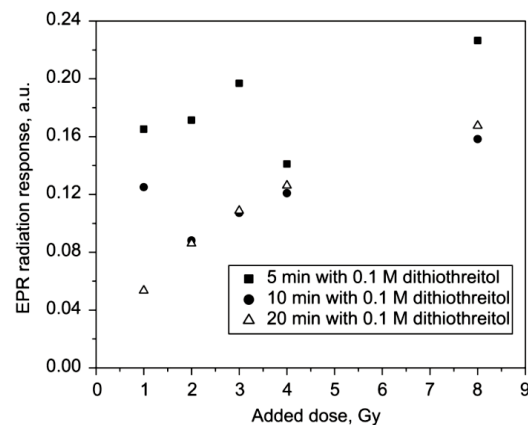
4.1.2. تفکیک مؤلفه‌های MIS و BKS با استفاده از آب

به منظور مطالعه دقیق تأثیر آب بر ناخن، آزمایش‌هایی روی نمونه‌های مختلف ناخن انجام گردیده است [20]. در این پژوهش ناخن‌ها به مدت 5 دقیقه در آب و سپس 5 دقیقه در هوای آزاد قرار داده شده‌اند و این عمل چندین مرتبه تکرار گردیده است. شکل 8 اثر قرارگیری متوالی 5 دقیقه‌ای نمونه‌ها در آب، بر روی دامنه قله تا قله طیف EPR نمونه تابش ندیده بلافاصله پس از چیده شدن را نشان می‌دهد.



شکل (5): اثر قرارگیری در محلول‌های شیمیایی مختلف بر MIS [1].

مطابق نتایج به دست آمده در شکل 6 برای نمونه‌های تابش دیده درمی‌یابیم که قراردادن نمونه‌ها به مدت 5 دقیقه در محلول انتخابی نمی‌تواند کاملاً MIS را کاهش دهد ولی اگر قرارگیری در محلول 5 دقیقه دیگر نیز تکرار گردد (جمعاً 10 دقیقه) کاهش قابل ملاحظه‌ای در دامنه قله تا قله همی نمونه‌ها (به جز نمونه‌ی پرتودهی شده در دز 1 Gy) مشاهده می‌شود.

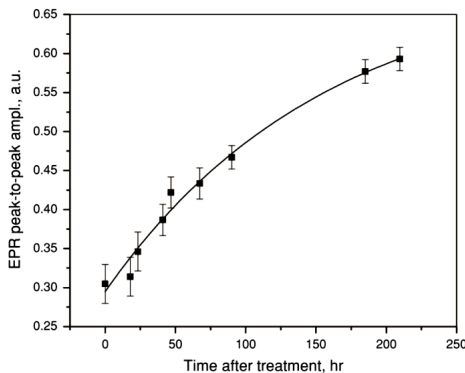


شکل (6): وابستگی سیگنال EPR به دز تابش با زمان‌های متفاوت قرارگیری در محلول دی‌تیوتریتول 0/1 M [1].

اگر زمان قرارگیری در محلول 10 دقیقه دیگر هم ادامه یابد (جمعاً 20 دقیقه) فقط نمونه‌ی با دز 1 Gy این کاهش قابل ملاحظه‌ای در دامنه قله تا قله را خواهد داشت ولی بقیه نمونه‌ها تغییری نخواهند داشت. چنانچه در شکل 6 مشخص

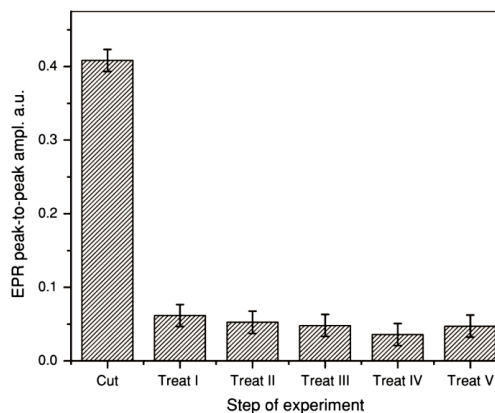
منجر به کاهش دامنه قله تا قله‌ی، 8 الی 9 برابر کمتر از MIS اصلی دارد، در حالی که در دمای اتاق و پس از 176 ساعت BKS باقی‌مانده فقط با ضریبی از مرتبه 3 کاهش می‌یابد. تکرار عمل قرار دادن در آب (شکل 8) باعث کاهش ناچیزی در دامنه قله تا قله BKS می‌گردد که با ضریبی از مرتبه 10 کمتر از سیگنال اصلی، مربوط به نمونه پس از چیده شدن است. بر اساس نتایج تجربی به دست آمده، زمان بهینه قرار دادن نمونه‌ها در آب بین 10 تا 15 دقیقه به دست آمده است [5] که خیلی نزدیک به زمان بهینه برای قرار دادن در محلول‌های شیمیایی است [1]. نتیجه جالب دیگر رشد قابل توجه مؤلفه BKS در زمان تأخیر بین قرار دادن در آب و اندازه‌گیری طیف EPR است (شکل 9).

چنانچه در شکل 9 نشان داده شده است این مؤلفه 220 ساعت پس از قرار دادن نمونه در آب تقریباً 2 برابر دامنه قله تا قله اولیه‌اش افزایش می‌یابد. با برآزش یک منحنی به نتایج آزمایش، مقدار اشباع برای BKS به میزان 0/7 و ضریب رشد زمانی آن (آهنگ رشد سیگنال) 2/33 به دست می‌آید که با ناخن‌های در آب قرار نگرفته پس از گذشت 176 ساعت پس از چیده شدن (شکل 2) تفاوت چندانی ندارد. در واقع این مؤلفه با زمان افزایش می‌یابد و با تکرار قرار دادن نمونه‌های ناخن در آب می‌توان آن را به مقدار اولیه‌اش کاهش داد و این شیوه بارها می‌تواند تکرار شود.



شکل (9): رشد مؤلفه BKS با زمان پس از قرارگیری ناخن در آب

[20]

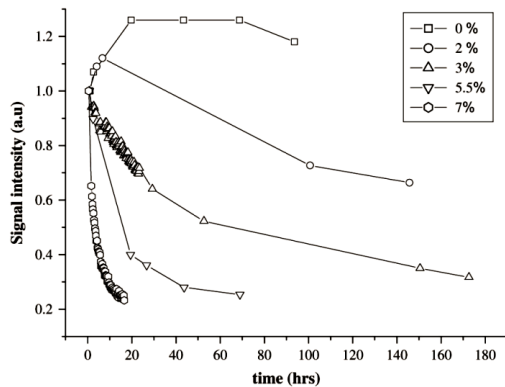


شکل (8): تغییرات دامنه قله تا قله سیگنال EPR در ناخن‌های تابش ندیده پس از سپری شده زمان کوتاهی از چیده شدن [20].

چنانچه ملاحظه می‌شود نتیجه اندازه‌گیری EPR بلافاصله پس از چیده شدن (2 تا 3 دقیقه)، یک سیگنال MIS قوی را نشان می‌دهد که شکل ظاهری آن شبیه سیگنال نمایش داده شده مربوط به زمان صفر در شکل 2 (طیف نمونه بلافاصله پس از چیدن) است. پس از اولین قرارگیری در آب به مدت 5 دقیقه شکل سیگنال و دامنه قله تا قله به طور قابل توجهی تغییر می‌کند، به طوری که دامنه قله تا قله با ضریبی از مرتبه 9 کاهش می‌یابد و شکل سیگنال آن شبیه به نمونه در آب قرار نگرفته‌ای است که 200 ساعت از چیده شدن آن سپری شده است (شکل 2). نتایج در مقایسه با مطابق مطالعه قبلی [1] (شکل 5) نشان می‌دهد که قرارگیری در محلول شیمیایی آب دار باعث کاهش 4 برابری MIS نسبت به نمونه شاهد شده بود حال آنکه در این مطالعه [20] قرارگیری در آب در مدت زمان مشابه، باعث کاهش 9 برابری MIS نسبت به نمونه شاهد شده است.

بنابراین قرار دادن ناخن در آب باعث تغییر شکل سریع طیف از یک MIS به یک BKS غالب می‌شود، همان گونه که پس از نگهداری ناخن‌ها در هوای آزاد مشاهده شده بود. تنها اختلاف کاهش قابل ملاحظه شدت BKS در مقایسه با حالتی است که نمونه‌ها 200 ساعت در هوای آزاد قرار داشتند. معمولاً BKS باقی‌مانده پس از قرارگیری 5 دقیقه در آب،

یک فرض این است که فرآیند افت پس از نمونه‌گیری، به دلیل خشک شدن طبیعی ناخن به کندی صورت پذیرد. با در نظر گرفتن اینکه قرار دادن ناخن در آب باعث حذف MIS شده و همچنین رادیکال‌های ایجاد شده به خاطر بریدن ناخن احتمالاً در لبه‌های بریده شده قرار دارند، در حالی که رادیکال‌های ناشی از تابش (RIS) به طور همگن در کل ناخن توزیع شده‌اند، آزمایشی انجام شد. در این آزمایش به وسیله یک برس نقاشی، لبه‌های بریده شده ناخن مرطوب شدند. مطابق نتایج به دست آمده از این آزمایش ساده، MIS تا شدتی معادل BKS کاهش یافت در حالی که شدت RIS فقط کمتر از 6% کاهش پیدا کرد.



شکل (11): وابستگی زمانی RIS بر حسب میزان رطوبت ناخن‌ها (ناخن‌های تازه) [22].

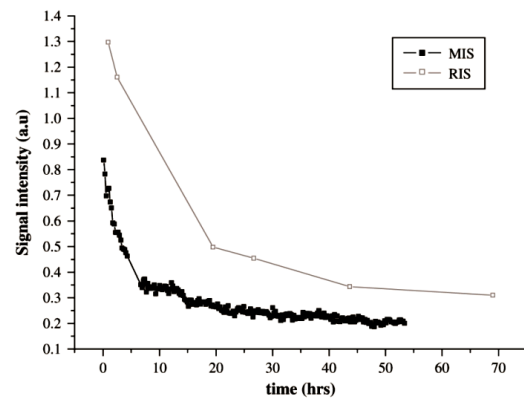
شکل 11 محوشدگی سیگنال RIS بر حسب درصد رطوبت‌های مختلف را نشان می‌دهد. وزن ناخن‌های تازه چیده شده در چند ساعت اولیه پس از چیده شدن به طور قابل ملاحظه‌ای (تا 20%) کاهش می‌یابد که دلیل آن خشک شدن سریع ناخن‌ها در هوا و در دمای اتاق است. این موضوع پیشنهاد می‌کند که اختلاف در افت RIS ناخن‌های تازه چیده شده و ناخن‌های نگهداری شده به مدت طولانی می‌تواند به وسیله اختلاف میزان آب شرح داده شود.

میزان آب ناخن‌ها با مقایسه وزن نمونه‌های کاملاً خشک شده (3 دقیقه در دمای 40 درجه) با نمونه‌های تازه چیده شده

2.2. تأثیر میزان رطوبت و دما بر مؤلفه‌های MIS و

RIS

در نمونه‌های ناخن تازه چیده شده، آهنگ افت شدت MIS مطابق شکل 10 کمی سریع‌تر از آهنگ افت RIS می‌باشد [22]. این اختلاف در ناخن‌هایی که درصد آب آن‌ها کمتر است، بیشتر خواهد بود. در نمونه‌های با درصد آب کمتر، MIS پس از چند ساعت افت می‌کند در حالی که افت RIS چند روز طول می‌کشد.



شکل (10): مقایسه افت MIS و RIS برای ناخن‌ها با افزایش 7 درصدی میزان آب در دمای اتاق [22].

اگر نمونه‌ها در آب مقطر قرار گیرند شدت MIS به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این صورت، منحنی دو قله‌ای کاملاً از بین می‌رود، در حالی که منحنی تک قله‌ای به صورت کامل از بین نمی‌رود. این سیگنال باقی‌مانده که منشأ آن ناشناخته است، سیگنال زمینه، نامیده می‌شود. افت منحنی دو قله‌ای و تک قله‌ای در ناخن‌های تازه چیده شده نسبت به ناخن‌های خشک سریعتر است که این موضوع به وابستگی آهنگ افت با درصد آب در ناخن‌ها اشاره دارد. طبق نتایج حاصله از شکل 10، زمان سپری شده بین نمونه‌گیری و شروع اندازه‌گیری EPR در یک حادثه واقعی ممکن است برای افت کامل MIS کافی باشد، اما در رطوبت هوای معمولی (40-60 درصد) شدت MIS هرگز به طور کامل افت نمی‌کند تا به میزان شدت BKS نمونه‌های در آب قرار گرفته برسد.

مطابق شکل 12 اگر نمونه‌های تازه چیده نشده پس از پرتودهی در دمای 4 درجه و حداقل به مدت دو هفته نگهداری شوند، محو شدن سیگنال به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در ناخن‌های تازه چیده شده، در کمتر از 24 ساعت و در دمای 20 درجه، افت سیگنال 50 درصدی قابل مشاهده است که با مطالعه سیمون در سال 1995 است مطابقت دارد. اگر نمونه‌ها به سرعت جمع‌آوری گردند (چند ساعت پس از پرتودهی) و پس از زمان کوتاهی در دمای پایین نگهداری شوند، امکان تخمین دز دریافتی ناخن‌ها با استفاده از ضریب تصحیح داده شده در رابطه 1 که بر روی RIS اعمال می‌شود، وجود خواهد داشت [21]:

$$F(T, t, H) = \exp \left[-e^{\left(\frac{C_1}{kT} \right)} \cdot t \cdot e^{(C_2 \cdot H)} \right] \quad (1)$$

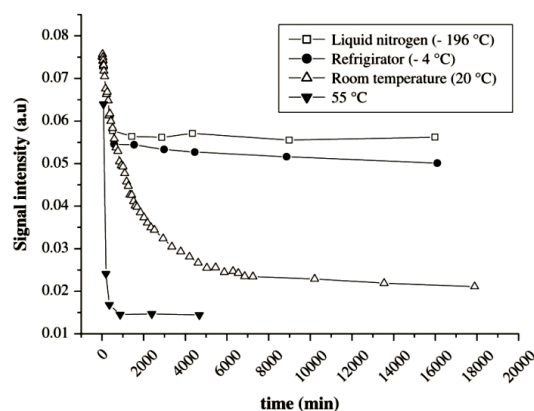
که در آن T دمای نگهداری، t زمان بین تابش‌دهی و اندازه‌گیری، H میزان رطوبت، و C₁ و C₂ ضرایب ثابت را تشکیل می‌دهند.

3.2. بررسی اثر آب روی RIS

به دلیل تأثیر قوی آب روی مؤلفه‌های MIS و BKS، بررسی اثر آب روی مؤلفه RIS نیز موضوعی دارای اهمیت است. از مطالعات قبلی معلوم شده است که قرار دادن ناخن‌ها در آب باعث کاهش در این مؤلفه خواهد شد. همچنین وابستگی دز به مؤلفه RIS در ناخن‌های در آب قرار نگرفته تا حدود 100 گری خطی است، در حالی که برای ناخن‌هایی که در محلول شیمیایی قرار گرفتند این وابستگی غیرخطی با اشیاعی در حدود 8 گری (شکل 13) خواهد بود [1].

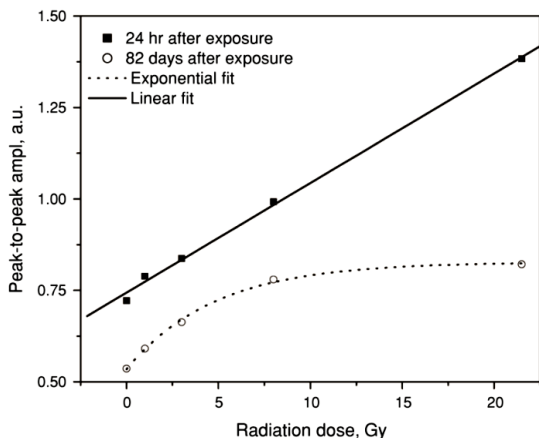
وابستگی دز به دامنه قله تا قله‌ی سیگنال EPR در ناخن‌های قرار گرفته در آب غیرخطی (شکل 14) با اشیاعی در حدود 8-10 گری است [20]. این نتیجه مشابه حالتی است که نمونه‌ها پس از قرارگیری در محلول‌های شیمیایی از خود بروز می‌دادند (شکل 13).

با نمونه‌های در آب قرار گرفته، تعیین می‌گردد. مطابق این روش میزان آب ناخن‌های تازه چیده شده بین 5 تا 8 درصد وزن ناخن (در نمونه‌های مطالعه شده) متغیر است. اگر ناخن‌ها با میزان آب 7%، کمتر از 20 ساعت در دمای اتاق نگهداری شوند، کاهش 5 برابری در شدت RIS قابل مشاهده است (شکل 11) و تقریباً هیچ تغییر شدتی در ناخن‌های کاملاً خشک شده پس از 30 ساعت وجود ندارد (نمونه صفر در شکل 11). برای ناخن‌های کاملاً خشک شده (نمونه صفر درصد)، افزایش ناچیزی در شدت RIS در ساعات اولیه پس از پرتودهی وجود دارد که احتمالاً ناشی از اثر رادیکال‌های با طول عمر کوتاه در مقدار فاکتور g بالاتر است. با در نظر گرفتن اثر قوی رطوبت روی نرخ افت RIS، برآورد نیمه عمر رادیکال‌های تولید شده داخل بدن توسط تابش مشکل است. تناقض اطلاعات گزارش شده در چندین مقاله که به RIS اختصاص دارد ممکن است بر اساس نقش رطوبت شرح داده شود. این موضوع در مواد پشمی هم که شامل کراتین هستند نیز شرح داده شده است [9]. ولی در مطالعات Symon [3] در سال 1995 و Wu [25] در سال 1998 و Dalgarno [2] در سال 1989 هیچ توجه‌ای به پارامتر رطوبت نشده است. اثر رطوبت می‌تواند استفاده از RIS را برای دزسنجی محدود کرده و منجر به خطای قابل ملاحظه در تخمین دز گردد.



شکل (12): محو شدن مؤلفه RIS در دماهای نگهداری متفاوت برای ناخن‌های پرتودهی شده در دز 50 گری (ناخن‌های غیر تازه) [21].

که در آن A پاسخ EPR، I_{max} بیشینه پاسخ EPR (سطح اشباع)، D_E دزی است که باید تعیین گردد و D_0 دز اشباع ویژه است. با برازش منحنی روی اطلاعات تجربی (شکل 13) مقدار $D_E(Gy) = (0/30 \pm 0/05)$ و $D_0(Gy) = (3/9 \pm 0/1)$ آمد. بنابراین فرآیند استفاده شده در قرارگیری ناخن‌ها در محلول شیمیایی، انحراف دز ناشی از MIS و BKS را از 5-10 گری به 0/3 گری کاهش می‌دهد.

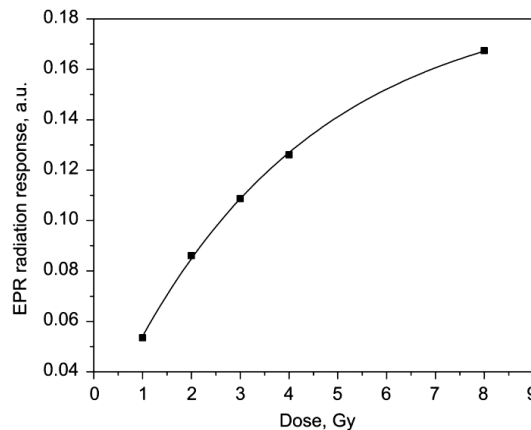


شکل (15): وابستگی دز به دامنه قله تا قله‌ی سیگنال EPR مؤلفه RIS در ناخن‌های قرار نگرفته در آب در زمان‌های متفاوت [20].

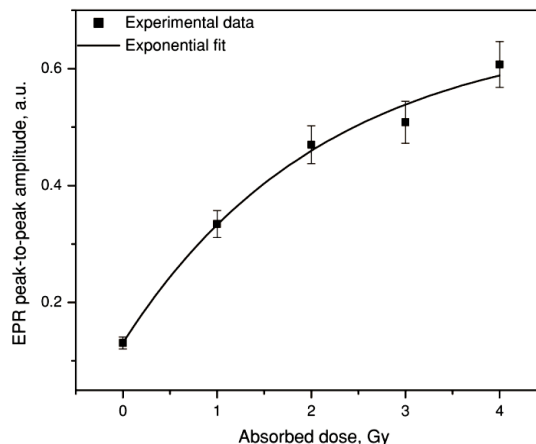
4.2. رابطه شدت MIS با تعداد چیده‌شدن‌های اضافی

و همچنین اندازه تکه‌های ناخن

طیف EPR نمونه‌های 2 و 4 و 8 قسمتی در توان میکروموج 1 mW، یک بار بلافاصله پس از چیده‌شدن برای تعیین MIS و یک بار هم پس از 24 ساعت، جهت از بین رفتن کامل مؤلفه MIS، به منظور اندازه‌گیری BKS ثبت گردید [20]. شکل‌های 16 و 17 نشان می‌دهند که با افزایش تعداد تکه‌های نمونه، افزایش قابل توجه‌ای در شدت MIS و BKS به وجود می‌آید. تعداد چیده‌شدن در یک نمونه می‌تواند به طور مستقیم با درجه تنش مکانیکی نمونه مرتبط باشد. از طرفی تعداد چیده‌شدن‌های ناخن با غلظت رادیکال‌هایی که به طور مکانیکی ایجاد می‌شود ارتباط دارد. وقتی که یک نمونه ناخن



شکل (13): منحنی دز- پاسخ برای نمونه‌های قرار گرفته در محلول دی‌تیوتریتول به مدت 20 دقیقه [1].



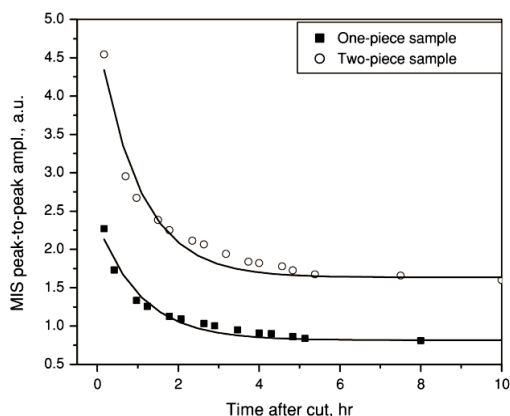
شکل (14): منحنی دز- پاسخ برای نمونه‌های ناخن قرار گرفته در آب [20].

منحنی دز- پاسخ برای ناخن‌های تازه چیده‌شده‌ی در آب قرار نگرفته، پس از گذشت 24 ساعت خطی است، در حالی که برای نمونه‌هایی که 82 روز در دمای 20 درجه قرار داشتند به صورت نمایی بوده و در حدود 10-12 گری اشباع می‌گردد (شکل 15). این وابستگی خیلی شبیه وابستگی دز به دست آمده در نمونه‌های در آب قرار گرفته است که در شکل 14 نشان داده شد [20].

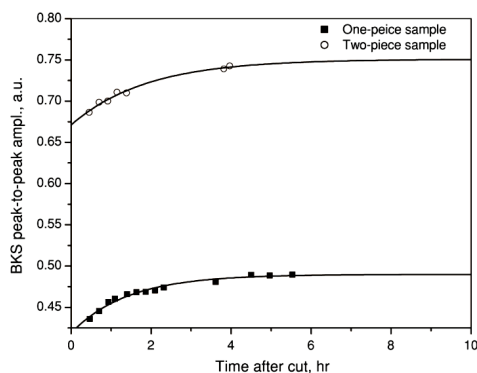
در مطالعه مینای دندان در سال 1996 رابطه 2 برای توصیف رفتار وابستگی دز- پاسخ غیرخطی پیشنهاد گردید:

$$A = I_{max} (1 - \exp(-(D + D_E) / D_0)) \quad (2)$$

رشد BKS با افزایش تعداد تکه‌های نمونه تغییر نمی‌کند، و این موضوع ممکن است بازتابی از ویژگی‌های منحصر به فرد ناخن‌ها در ابعاد میکروسکوپی باشد.



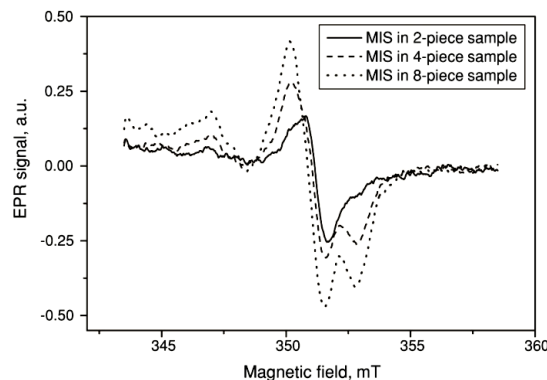
شکل (18): وابستگی شدت MIS به زمان پس از چیده شدن برای یک نمونه تابش ندیده یکسان، قبل و بعد از چیدن اضافی [20].



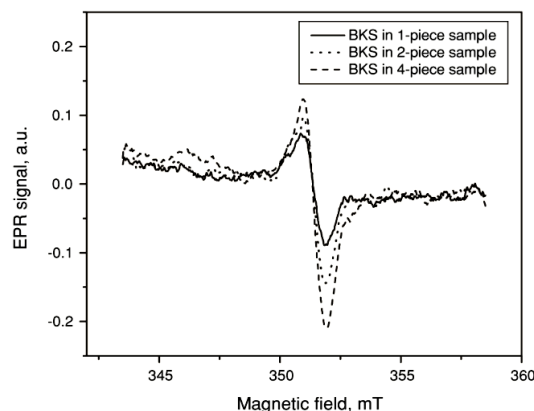
شکل (19): وابستگی شدت BKS به زمان پس از چیده شدن برای یک نمونه تابش ندیده یکسان، قبل و بعد از چیدن اضافی [20].

رفتار نمایی افت MIS و رشد BKS در ناخن‌های افراد دیگر نیز مشاهده گردیده ولی ثابت‌های زمانی به طور قابل توجهی از حدود 1 الی 4 ساعت متغیر است. این موضوع می‌تواند برای توصیف ویژگی‌های مکانیکی یک نمونه مورد استفاده قرارگیرد. مطابق شکل 20 شدت MIS با عکس اندازه نمونه‌ها متناسب است. شدت MIS به دست آمده از افراد مختلف تا 5 برابر می‌تواند تغییر داشته باشد [21]. به هنگام ارزیابی شدت RIS برای کم کردن سهم MIS توصیه می‌شود که تعداد چیدن‌ها را کاهش داد.

شامل تکه‌هایی با ابعاد تقریباً مساوی باشد بین شدت‌های MIS و BKS و عکس تعداد تکه‌های نمونه رابطه خطی وجود دارد.



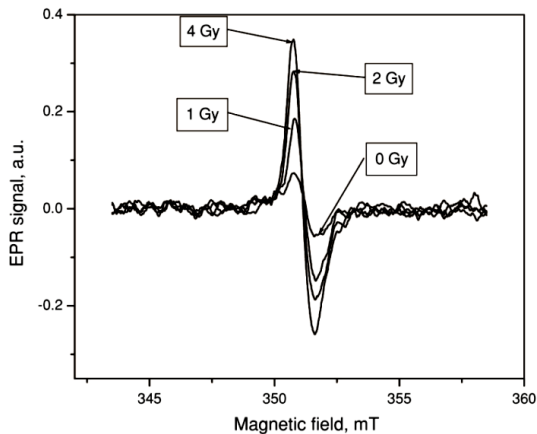
شکل (16): MIS ثبت شده در نمونه یکسان تابش ندیده پس از چیده شدن‌های اضافی [20].



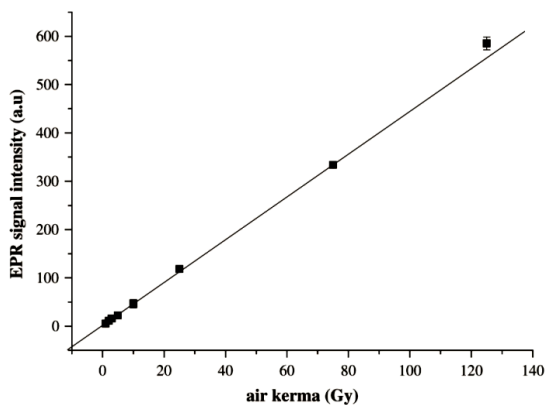
شکل (17): BKS ثبت شده در نمونه یکسان تابش ندیده 24 ساعت پس از هر چیده شدن‌های اضافی و محوشدن MIS [20].

مطابق شکل‌های 18 و 19 تکه کردن نمونه به دو قسمت تقریباً مساوی باعث افزایشی در شدت MIS و BKS می‌شود که اغلب این افزایش شدت، 2 برابری است. این نتایج با نتایج قبلی که بیان می‌کرد بین عکس تعداد چیده شدن در نمونه و شدت MIS و BKS رابطه خطی وجود دارد سازگار است. ثابت زمانی افت MIS و رشد BKS خیلی به هم نزدیک بوده و با استفاده از شکل‌های 18 و 19 این ثابت زمانی برابر یک ساعت برآورد شده که با نتایج شکل 4 سازگار است. شکل‌های اخیر نشان می‌دهند که ثابت‌های زمانی افت MIS و

تخمین حد پایین آشکار سازی به دلایل، محو شدن سیگنال، شدت سیگنال زمینه و حساسیت دز هر نمونه، کار مشکلی است.

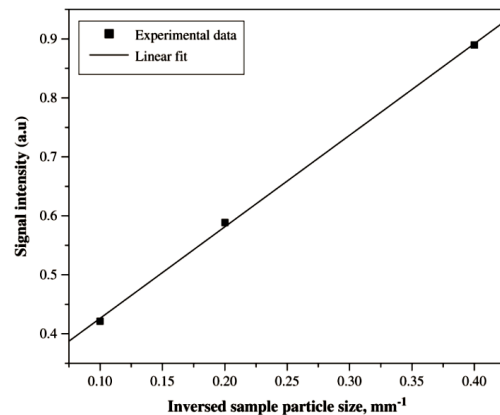


شکل (20): طیف‌های ناخن‌های تابش دیده و در آب قرار گرفته [20].



شکل (21): تغییرات شدت RIS بر حسب دز [22].

با دانش اکنون ما درباره دزسنجی ناخن، اولین پروتکل اندازه‌گیری در سال 2007 توسط یک پژوهشگر پیشنهاد گردید [4]. آزمایش‌های نه چندان دقیق اولیه‌ی او با استفاده از RIS نشان داد که اندازه‌گیری دز ناخن‌ها چند ساعت پس از پرتودهی با خطایی کمتر از 30% در محدوده چند گری تا چند ده گری امکان‌پذیر است. این شیوه، اندازه‌گیری دز را در محل‌هایی از ناخن فراهم می‌کند. حال اگر پرتودهی غیریکنواخت باشد بهتر است که اندازه‌گیری‌ها در هر دو دست و همچنین بعضی مواقع در هر دو پا انجام گیرد. بازخوردها از موارد اخیر حوادث تابشی مطالعه شده در شیلی و بلژیک به



شکل (22): تغییرات شدت MIS بر حسب اندازه تکه‌های ناخن [21].

5.2. حد پایین آشکار سازی در دزسنجی با استفاده از

ناخن

از شکل سیگنال EPR در دزهای مختلف (شکل 7) می‌توان به این نتیجه رسید که اگر از شیوه قرارگیری 20 دقیقه در محلول دی‌تیوتریتول 0/1 M استفاده شود، دزی به کوچکی 1 گری هم در ناخن‌ها قابل اندازه‌گیری است [1]. به منظور بررسی این موضوع، ناخن‌های تازه چیده شده‌ای که مدت 5 دقیقه در آب قرار گرفته و سپس خشک شده بودند با دزهای متفاوتی از صفر تا 4 گری با گام‌های 1 گری پرتودهی شدند و در طول یک روز طیف EPR آن‌ها ثبت گردید [20].

مطابق شکل 21 اختلاف قابل توجه‌ای بین طیف نمونه پرتودهی شده در صفر گری و یک گری وجود دارد که به امکان آشکار سازی دز زیر یک گری اشاره می‌کند. تغییرات RIS بر حسب دز داده شده در شکل 22 آورده شده است [21]. MIS نمونه‌ها با قرار دادن آن‌ها در آب قبل از پرتودهی حذف شد. شدت سیگنال زمینه قبل از پرتودهی اندازه‌گیری و از شدت قله اصلی کسر گردید تا شدت RIS برآورد گردد. پاسخ دز RIS بین 1 تا 125 گری به صورت خطی به دست آمد. همچنین مطابق شکل 21 تحت شرایط بهینه، دزهای نزدیک 1 گری در ناخن‌ها قابل اندازه‌گیری است. در شرایط واقعی کمترین دز قابل آشکار سازی بیشتر از 1 گری است.

این زنجیرها توسط پیوندهای S-S (گوگرد-گوگرد) به هم متصل شده و استحکام پیدا کرده‌اند. پیوندهای S-S باعث سختی و استحکام ناخن‌ها می‌شوند. سیگنال دو قله‌ای MIS با فشار و تنش اعمال شده به پیوندهای S-S بین زنجیرها بوجود می‌آید، در حالی که BKS با فشار و تنش اعمالی به زنجیرهای به شکل مارپیچ درآمده مرتبط است.

پیوندهای S-S از محکم‌ترین پیوندها در ساختار کراتین هستند که باعث سختی ناخن می‌شوند، بنابراین فشار و تنش اعمال شده به آن‌ها باعث تغییر شکل الاستیک می‌گردد که برای کمتر از چندین ساعت طول می‌کشد. این تغییر شکل الاستیک به انرژی اضافه‌ای جهت بازگرداندن شکل اولیه ناخن نیاز ندارد ولی در عوض زنجیرهای به شکل مارپیچ درآمده چون ثبات بیشتری دارند تنش اعمالی نمی‌تواند باعث جابه‌جایی زیاد چگالی اسپین الکترون در زنجیر شود. در این نوع تغییر شکل، انرژی کمی (در این مطالعه از فشار سطحی آب) برای بازگرداندن شکل اولیه نمونه‌ها مورد نیاز است و این موضوع با تغییر شکل پلاستیک ناخن‌ها مرتبط است.

لذا همانند اسفنج‌ها راه موثر برای بازگرداندن تغییر شکل الاستیک و پلاستیک ناخن‌ها قرار دادن آن‌ها در آب است. همان گونه که نشان داده شده قرارگیری در آب یک راه مؤثر برای کاهش مؤلفه‌های MIS و BKS است. همچنین این موضوع دلیل اینکه چرا هیچ اختلافی بین قرارگیری در محلول‌های شیمیایی آب‌دار مختلف وجود ندارد را نیز تشریح می‌کند. رشد مشاهده شده در مؤلفه BKS پس از قرارگیری در آب به وسیله افزایش در تغییر شکل پلاستیک ساختار اسفنجی ناخن‌ها هنگام خشک شدن توضیح داده می‌شود. کاهش شدید مؤلفه RIS ناخن‌های چیده شده پس از قرارگیری آن‌ها در آب توسط مدل اسفنجی قابل توضیح و تفسیر است. قرار دادن در آب ساختار ناخن تحت تنش را سریعاً به حالت اولیه

ترتیب در سال‌های 2005 و 2006 [26 و 27] نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های ترکیبی دزسنجی موجود (فیزیکی و بیولوژیکی) برای به دست آوردن اطلاعات دز، پیشرفت‌هایی در دقت تعیین دز به وجود آورده است. کار برای توسعه دزسنجی ناخن در آینده در حال پیشرفت است.

3. بحث و نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر تعداد چیده شدن ناخن بر MIS و BKS، به وضوح ارتباط مستقیمی بین شدت این دو سیگنال و درجه تنش مکانیکی در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر هر دو مؤلفه از تنش مکانیکی اعمال شده به ناخن‌ها ایجاد می‌گردد، لذا BKS محصولی از MIS است. این نتیجه از این جهت حائز اهمیت است که اگر دزسنجی EPR داخل بدنی¹ در ناخن‌ها توسعه پیدا کند (در بعضی مطالعات برای مینای دندان و استخوان انگشت انجام شده است) مشکلی بابت همپوشانی سیگنال‌ها که معمولاً پاسخ تابش را مبهم می‌کنند وجود نخواهد داشت [20].

ساختار میکروسکوپی ناخن‌ها همانند اسفنج، دارای خلل و فرج بسیاری است. از طرفی رفتار تناوبی جذب آب در ناخن‌ها شبیه جذب آب در یک اسفنج است، و لذا برای برگرداندن شکل اولیه یک اسفنج فقط نیاز به قرار دادن آن در آب است. اثر قرار دادن نمونه‌ها در آب روی مؤلفه‌های MIS و BKS از منظر رفتار اسفنجی شکل پیشنهاد شده برای ناخن‌ها، قابل درک است. آب و همه محلول‌های شیمیایی آب‌دار به آسانی خلل و فرج ناخن‌های چیده شده (تحت تنش) را پر کرده و آن‌ها را به حالت اولیه (قبل از چیده شدن) بر می‌گرداند. ماده اصلی تشکیل‌دهنده ناخن پروتئین آلفا-کراتین است. این پروتئین از 3 زنجیر α -helical-peptide تشکیل شده که این زنجیرها به صورت یک سیم پیچ چپ پیچ است.

¹ In vivo

EPR با استفاده از ناخن، در نمونه‌های تحت تنش به‌دست آمده است که بایستی توجه کرد این نتایج با ویژگی‌های واقعی دزسنجی همخوان نخواهد بود و یک مطالعه موشکافانه و تفصیلی در این زمینه مورد نیاز است.

بازمی‌گرداند و این فرآیندی است که به طور طبیعی اغلب رادیکال‌های آزاد ناشی از تابش را از بین می‌برد. در اندازه‌گیری داخل بدنی چون ناخن‌ها تحت تنش قرار ندارند، بنابراین قرارگیری در آب باعث کاهش در مؤلفه RIS نخواهد شد. تمامی نتایج منتشر شده قبلی، بر اساس دزسنجی

4. مراجع

- [1] A. Romanyukha, F. Trompier, B. LeBlanc, C. Calas, I. Clairand, C.A. Mitchell, J.G. Smirniotopoulos and H.M. Swartz. EPR dosimetry in chemically treated fingernails, *Radiation measurements*, 42(4-6) (2007) 1110–1113.
- [2] B.G. Dalgarno and J.D. McClymont. Evaluation of ESR as a radiation accident dosimetry technique, *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes*, 40(10-12) (1989) 1013–1020.
- [3] M. Symons, H. Chandra and J. Wyatt. Electron paramagnetic resonance spectra of irradiated finger-nails: a possible measure of accidental exposure, *Radiation protection dosimetry*, 58(1) (1995) 11–15.
- [4] F. Trompier, L. Kornak, C. Calas, A. Romanyukha, B. LeBlanc, C. Mitchell, H. Swartz and I. Clairand. Protocol for emergency EPR dosimetry in fingernails, *Radiation measurements*, 42(6-7) (2007) 1085–1088.
- [5] K. Wu, C. Sun and Y. Shi. Dosimetric properties of watch glass: a potential practical ESR dosimeter for nuclear accidents, *Radiation protection dosimetry*, 59(3) (1995) 223–225.
- [6] S. Egersdörfer, A. Wieser and A. Müller. Tooth enamel as a detector material for retrospective EPR dosimetry, *Applied radiation and isotopes*, 47(11-12) (1996) 1299–1303.
- [7] F. Ziaie, W. Stachowicz, G. Strzelczak and S. Al-Osaimi. Using bone powder for dosimetric system EPR response under the action of γ irradiation, *Nukleonika*, 44(4) (1999) 603–608.
- [8] M. Miyake, K.J. Liu, T.M. Walczak and H.M. Swartz. In vivo EPR dosimetry of accidental exposures to radiation: experimental results indicating the feasibility of practical use in human subjects, *Applied Radiation and Isotopes*, 52(5) (2000) 1031–1038.
- [9] H. Wang, R. Liu, T. Tu, L. Xie, K. Sheng, Y. Chen and X. Tang. Properties of radicals formed by the irradiation of wool fibers, *Journal of radiation research*, 45(1) (2004) 77–81.
- [10] A. Güttler and A. Wieser. EPR-dosimetry with tooth enamel for low doses, *Radiation Measurements*, 43(2-6) (2008) 819–822.
- [11] H. Lanjanian, F. Ziaie, M. Modarresi, M. Nikzad, A. Shahvar and S. Durrani. A technique to measure the absorbed dose in human tooth enamel using EPR method, *Radiation Measurements*, 43(1) (2008) S648–S650.
- [12] M.I. Teixeira, Z.M. Da Costa, C.R. Da Costa, W.M. Pontuschka and L.V. Caldas. Study of the gamma radiation response of watch glasses, *Radiation Measurements*, 43(2-6) (2008) 480–482.
- [13] C. Bassinet, F. Trompier and I. Clairand. Radiation accident dosimetry on glass by TL and EPR spectrometry, *Health physics*, 98(2) (2010) 400–405.
- [14] A. Kinoshita, F.A. José and O. Baffa. An attempt to use sweeteners as a material for accident dosimetry, *Health physics*, 98(2) (2010) 406–411.
- [15] F. Trompier, C. Bassinet and I. Clairand. Radiation accident dosimetry on plastics by EPR spectrometry, *Health physics*, 98(2) (2010) 388–394.
- [16] F. Trompier, C. Bassinet, S. Della Monaca, A. Romanyukha, R. Reyes and I. Clairand. Overview of physical and biophysical techniques for accident dosimetry, *Radiation protection dosimetry*, 144(1-4) (2010) 571–574.
- [17] Ş. Çolak and T. Özbey. An ESR study on biological dosimeters: Human hair, *Radiation Measurements*, 46(5) (2011) 465–472.
- [18] D. Viscomi, C. De Angelis and P. Fattibene. Cotton as fortuitous dosimeter in radiological emergency: An EPR preliminary study, *Radiation Measurements*, 46(9) (2011) 978–983.
- [19] مزدارانی، حسین. دزیمترهای بیولوژیکی (زیست‌نشانگرها و روش‌ها)، انتشارات طب نوین، تهران، (1382).
- [20] R.A. Reyes, A. Romanyukha, F. Trompier, C.A. Mitchell, I. Clairand, T. De, L.A. Benevides and H.M. Swartz. Electron paramagnetic resonance in human fingernails: the sponge model implication, *Radiation and environmental biophysics*, 47(4) (2008) 515–526.
- [21] F. Trompier, A. Romanyukha, L. Kornak, C. Calas, B. LeBlanc, C. Mitchell, H. Swartz and I. Clairand. Electron paramagnetic resonance

- radiation dosimetry in fingernails, *Radiation Measurements*, 44(1) (2009) 6–10.
- [22] R.A. Reyes, A. Romanyukha, C. Olsen, F. Trompier and L.A. Benevides. Electron paramagnetic resonance in irradiated fingernails: variability of dose dependence and possibilities of initial dose assessment, *Radiation and environmental biophysics*, 48(3) (2009) 295–310.
- [23] H. Chandra and M.C. Symons. Sulphur radicals formed by cutting α -keratin, *Nature*, 328 (1987) 833–834.
- [24] A. Marciniak and B. Ciesielski. EPR dosimetry in nails—A review, *Applied Spectroscopy Reviews*, 51(1) (2016) 73–92.
- [25] K. Wu, L. Guo, J. Cong, C. Sun, J. Hu, Z. Zhou, S. Wang, Y. Zhang, X. Zhang and Y. Shi. Researches and applications of ESR dosimetry for radiation accident dose assessment, *Radiation protection dosimetry*, 77(1-2) (1998) 65–67.
- [26] C. Huet, I. Clairand, F. Trompier, J. Bottollier-Depois and E. Bey. Monte Carlo dose reconstruction in case of a radiological accident: application to the accident in Chile in December 2005, *Radioprotection*, 42(4) (2007) 489–500.
- [27] C. Huet, F. Trompier, I. Clairand, F. Queinnec and J. Bottollier-Depois. Physical dosimetric reconstruction of a radiological accident at Fleurus (Belgium) on 11 March 2006, *Radiation Measurements*, 43(2-6) (2008) 845–848.