

## ویژگی‌ها و پیامدهای توریم برای انسان و محیط زیست

حجیه بسطامی<sup>۱\*</sup>، فاطمه اسدی<sup>۲</sup> و سیمین جانی تبار<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> تهران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، دانشکده فنی شریعتی

<sup>۲</sup> تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: [Hbastami@tvu.ac.ir](mailto:Hbastami@tvu.ac.ir)

### چکیده

توریم فلزی رادیواکتیو با نیمه عمر ۱۴ میلیارد سال از خانواده اکتینیدهای جدول تناوبی و تقریباً ۹۹٪ آن به صورت ایزوتوپ توریم-۲۳۲ است. این عنصر از گذشته تا امروز استفاده‌هایی به عنوان عامل کتراست در تصویربرداری (به صورت تورتراست)، ساخت سرامیک، کاربرد در صنایع هوا فضا داشته و اکنون به عنوان عنصر شرکت‌کننده در چرخه سوخت در تاسیسات هسته‌ای برخی کشورها مطرح است. توریم ساطع‌کننده پرتوهای آلفا، بتا و گاما است. بنابراین دانستن نکات بهداشتی و شناخت پیامدهای حاصل از تماس با این ماده رادیواکتیو لازم است. با توجه به تفاوت در مسیرهای ورود توریم به بدن یعنی استنشاق، بلع و جذب پوستی، جذب و توزیع و عوارض آن در بدن متفاوت است. توزیع ایزوتوپ‌های توریم به ترتیب در گره‌های لنفاوی نواحی برونشیل، ریه‌ها و استخوان‌ها بیشتر است؛ همچنین موها و ناخن‌ها از شاخص‌های مهم زیستی هستند که رادیواکتیویته موجود در آن‌ها ارتباط مستقیمی با میزان رادیواکتیویته دیگر اعضای بدن دارد. در این مقاله که با مرور ویژگی‌های توریم آغاز می‌شود، پس از بررسی مسیرهای ورود آن به بدن، نمونه‌هایی از پیامدهای ناشی از آن برای انسان، حیوانات و محیط زیست مطرح می‌شود.

**کلیدواژگان:** توریم، تورتراست، جذب، توزیع، پرتوهای رادیواکتیو

### مقدمه

اولیه، محصولات واپاشی آن و محصولات واپاشی بعدی آنها، یک سری از مواد جدید (شامل رادیوم و رادون)، آلفا (۹۰٪)، ذرات بتا (۱٪) و اشعه ی گاما (۹٪) تولید می‌کنند. ذرات آلفا قدرت کمی برای نفوذ به مواد دیگر دارند و البته نمی‌توانند در پوست انسان نفوذ کنند. تابش گاما می‌تواند خیلی بیشتر نفوذ کند و البته می‌تواند به راحتی در پوست انسان نیز نفوذ کند. واپاشی توریم-۲۳۲ بسیار کند اتفاق می‌افتد و در حقیقت نیمه عمر توریم-۲۳۲ حدوداً ۱۴ میلیارد سال است. به علت سرعت بسیار کم واپاشی، مقدار مجموع توریم طبیعی در زمین ثابت باقی می‌ماند؛ اما می‌تواند توسط طبیعت یا انسان از جایی به جای دیگر جابجا شود. مقادیر کمتری از ایزوتوپ‌های دیگر توریم معمولاً محصولات واپاشی اورانیوم-۲۳۸، اورانیوم-۲۳۵ و توریم-۲۳۲ بوده؛ محصولات واکنش‌های ناخواسته هسته‌ای هستند [۱]. توریم برای ساخت سرامیک‌ها، توریهای چراغ زنبوری و فلزاتی که در صنایع هوافضا کاربرد دارند و بویژه در تاسیسات هسته‌ای استفاده می‌شود.

توریم یک فلز طبیعی و یکی از پرچگالی‌ترین مواد موجود کره خاکی است که حدود ۲۰ میلیون برابر زغال‌سنگ انرژی دارد و می‌توان به عنوان یک منبع ایده‌آل انرژی از آن بهره گرفت. در تمامی سنگها، خاکها، آبهای زیرزمینی و روی زمین، در پیکر گیاهان و جانوران مقدار کمی توریم وجود دارد. همین مقادیر کم باعث می‌شود که همه‌ی مواد به صورت جزئی، تابش‌های رادیواکتیو داشته باشند. به طور میانگین خاک شامل ۶ ppm توریم است اما در برخی معادن زیر زمینی سنگهایی وجود دارند که به صورت متمرکزی حاوی توریم هستند. در طبیعت ۹۹٪ توریم طبیعی موجود ایزوتوپ توریم-۲۳۲ (Th-232) است. در کنار این ایزوتوپ طبیعی، بیش از ده ایزوتوپ دیگر وجود دارد که به صورت مصنوعی تولید می‌شوند. در طبیعت، توریم-۲۳۲ با مواد معدنی گوناگونی مانند سیلیکا ترکیب می‌شود. بیشتر ترکیبات توریمی موجود در طبیعت به راحتی در آب حل نشده و از خاک هم وارد هوا نمی‌شوند. توریم-۲۳۲ پایدار نیست و واپاشی آن اشعه آلفا و یک محصول ناپایدار دیگر تولید می‌کند و این عمل تا تشکیل یک محصول واپاشی پایدار ادامه می‌یابد. در حین این واپاشی‌ها، توریم-۲۳۲

حای توریم در هوا، تنفس شوند و یا انسان و جانوران، گیاهان رشد یافته در خاک آلوده به توریم را مصرف کنند. کودکانی که نزدیک مکان‌های انباشت زباله بازی می‌کنند در صورت خوردن خاک آلوده ممکن است توریم وارد بدن آنها شود. همچنین افراد شاغل در مراکز تحقیقاتی و یا صنعتی که محصولات توریم‌دار را آزمایش، استخراج و یا مصرف می‌کنند، ممکن است در معرض توریم قرار بگیرند. همچنین ممکن است به علت نشت تصادفی از نیروگاه‌هایی با مصرف توریم، مقداری بیش از حد معمول توریم وارد طبیعت شود. فقط مقدار بسیار کمی از توریمی که با تنفس و یا با خوردن آب و غذا داخل بدن می‌شود ممکن است وارد خون شود. یک مطالعه بر روی حیوانات نشان داد که اگر توریم بر روی پوست قرار گیرد، می‌تواند جذب شود. پس از تنفس هوای آلوده به ذرات معلق حاوی توریم، عکس العمل بدن عطسه خواهد بود. اما برخی از ترکیبات توریم می‌توانند به مدت زیادی در داخل ریه‌ها بمانند. اگرچه در بیشتر موارد، مقدار توریم اندکی که در ریه‌ها ذخیره شده، در چند روز از بدن دفع می‌شود. پس از اینکه توریم از طریق خوردن و آشامیدن وارد بدن شد، تقریباً همه‌ی آن توسط مدفوع از بدن دفع می‌شود. مقدار بسیار کمی که در بدن باقی می‌ماند، ممکن است از طریق خون وارد استخوانها شود و تا سالها در آن بماند. اصلی‌ترین راه ورود توریم به بدن تنفس گرد و خاک و هوای آلوده به توریم است.

مطالعات بر روی کارگرانی که با توریم سر و کار داشته‌اند، نشان می‌دهد که تنفس ذرات معلق توریم ممکن است به احتمال زیاد باعث بیماریهای بسیار پیشرفته و حتی سرطان ریه و لوزالمعده شود. همچنین تغییر در ساختمان ژنتیکی سلولهای بدن نیز مشاهده شده است. در افرادی که از راه پرتونگاری، توریم به بدن آنها تزریق شده است، بیماریهای کبدی و تاثیرات خونی یافت شده است. همچنین در افرادی که توریم در بدنشان تزریق شده، انواع مختلف سرطان رویت شده است. به دلیل رادیواکتیو بودن، توریم ممکن است در استخوانها به مدت طولانی بماند و سرطان مغز استخوان (برای افراد در معرض توریم) یک نگرانی بالقوه است. مطالعه بر روی حیوانات نشان داده است که تنفس توریم ممکن است منجر به آسیب‌های ریوی شود. مطالعات دیگر بر روی حیوانات نشان می‌دهد که آشامیدن (محلول

در صنعت هسته‌ای با توجه به محدودیت منابع اورانیومی در دسترس برای استخراج از معادن، ضرورت مطالعه بر روی سایر عناصر شکافت‌پذیر به عنوان منابع احتمالی سوخت جایگزین، اجتناب‌ناپذیر است. امروزه صنایع هسته‌ای برخی کشورها تمایل به استفاده از سوخت‌های بر پایه توریم دارند. برخی مزیت‌های استفاده از این سوخت در صنایع هسته‌ای نسبت به سوخت اورانیومی عبارت‌اند از: قیمت پایین‌تر تهیه سوخت، حجم کمتر پسماند، پایداری شیمیایی بالاتر  $ThO_2$  در مقایسه با  $UO_2$  و در نهایت سادگی دفن پسماندهای حاصل از چرخه سوخت توریم در مقایسه با اورانیوم به دلیل حلالت بسیار پایین  $ThO_2$  در آبهای زیرزمینی (۲). ۳۰ سال پیش، از توریم اکسید برای تهیه انواع خاصی از عکسهای X-Ray در بیمارستانها استفاده می‌شد. بنابراین بیماران و کادر پزشکی به‌طور جدی در مواجهه با توریم قرار داشتند.

توریم بدون بو و مزه است. پس انسان نمی‌تواند متوجه شود که در معرض توریم قرار گرفته است. اطلاعات کمی در مورد مقادیر آسیب‌رسان توریم در انسان و حیوان موجود است. امروزه با شناخت خطرات ناشی از این ماده رادیواکتیو، استفاده از توریم در مقاصد عکسبرداری پزشکی کنار گذاشته شده است. در برخورد پرتو به تمام بدن با شدت کمتر از حدود ۰/۲۵ گری ممکن است اثر بالینی مشاهده نشود و تنها با انجام آزمایش‌های اختصاصی از جمله بررسی‌های کروموزومی، آثار احتمالی قابل تشخیص است. از شدت حدود یک گری به بالا، فرد پرتودیده علائم بالینی از خود نشان می‌دهد که شامل بی‌اشتهایی، تهوع، استفراغ و اسهال است. پس از پرتوگیری حدود ۴ گری، علائمی چون سردرد، استفراغ، اسهال و تب بروز می‌کند و پس از چند روز جوش‌های کوچک در دهان و گلو مشاهده می‌شود که با کم شدن تدریجی وزن بدن همراه است.

معمولاً توریم بسیار کمی در برکه‌ها، رودها و اقیانوس‌ها وارد بدن ماهی‌ها و غذاهای دریایی مورد استفاده بشر می‌شود. دانشمندان مقدار میانگین توریم در غذا و آب را می‌دانند. مقادیری از توریم که در هوا وجود دارد، معمولاً بسیار کم بوده، قابل اغماض است. ممکن است در کنار سایت‌های پرخطر زباله که بدون کنترل وارد محیط زیست می‌شوند، مقدار توریم بیش از حد نرمال باشد. در نتیجه در جاهایی که دفع صحیح زباله صورت نمی‌گیرد، افراد ممکن است در معرض توریم بیشتری باشند. امکان دارد ذرات معلق پراکنده

ای از خطرات رادیواکتیو هستند که در بدن نفوذ و از هوا عبور می‌کنند. هر چند توریم معمولی اکتیویته گامای بسیار کمی دارد (با خطر تابش کمتر گاما) ولی محصولات دختری توریم ممکن است رادیواکتیویته گامای بیشتری داشته باشند. ذرات آلفای ساطع شده از آن هم نمی‌توانند در پوست نفوذ کنند ولی اگر در داخل بدن وارد شوند می‌توانند بسیار خطرناک باشند. وقتی توریم ذره آلفا تولید می‌کند، یعنی به رادیونوکلیدهای دختری دیگر مانند رادیوم-۲۲۶، رادون-۲۲۲ (از توریم-۲۳۰ در سری واپاشی اورانیوم-۲۳۸)، رادیوم-۲۲۸ و تورون (رادون-۲۲۰ از سری زنجیره‌ی توریم-۲۳۲) و سرانجام به سرب-۲۰۸ یا سرب-۲۰۶ که پایدارند، واپاشی می‌کند. سرعت واپاشی و یا اکتیویته عناصر رادیواکتیو، با واحد کوری (Ci) مشخص می‌شود.

مقادیر کم و زیاد رادیواکتیویته هر دو برای سلامتی خطرناک است و یکی از فرضیات محافظه‌کارانه این است که یک مرز آستانه‌ای وجود ندارد که مقادیر کمتر از آن احتمال سرطان را به صفر برساند. پرتوهای رادیواکتیو مستقیم و غیر مستقیم و زودرس و دیررس اثرات زیان‌باری بر انسان دارند که ممکن است حتی مدتها پس از پرتوگیری بروز کنند. در صورت تابش تقریباً یکنواخت به تمام بدن، بیشترین خطر سلامتی پرتوگیری بافتها و اعضای مخصوصی است که به آنها اعضای بحرانی گفته می‌شود. این اندام‌ها عبارت‌اند از: مغز، استخوان، لوله‌های گوارشی، ششها، غده تیروئید، کلیه‌ها، طحال، پانکراس، پروستات، بافت‌های ماهیچه‌ای و چربی، سلول‌های جنسی، بافت‌های لنفاوی و اپیدرم پوست. اگر تمام بدن تحت تاثیر پرتو با شدت بالا قرار گیرد، ممکن است اثرات آن بر هریک از اعضای بدن یکجا بروز کند. اثر عمومی پرتو روی اعضای مختلف بدن تقریباً متفاوت است و در برخی از اعضای بدن شدید و در برخی خفیف‌تر است. یک سوال این است که وقتی مردم به صورت مزمن در معرض تابش بسیار اندک قرار می‌گیرند، چقدر امکان ابتلا به سرطان وجود دارد؟ با توجه به اینکه به طور طبیعی ما همیشه اندکی در معرض تابش هستیم، کمترین مقدار تابش اضافی که ممکن آسیب‌های بهداشتی به وجود آورند، بدرستی مشخص نیست. سندی وجود دارد که بیشتر تاثیرات

در آب) مقدار بسیار زیاد توریم، موجب مرگ ناشی از "مسمومیت با فلز" شود.

وجود مقادیر بسیار زیاد توریم در محیط اطراف، انسان را در معرض محصولات حاصل از شکافت توریم مانند رادیوم قرار می‌دهد که بسیار خطرناک است. آنالیزهای چند مرحله‌ای نشان داده است که ذرات معلق توریم در هوا، از معادن نادر کشور چین نشأت گرفته است و ساکنان نزدیک به این معادن در معرض خطر جدی قرار دارند (۳). همچنین کشور عراق به خصوص مناطق نزدیک پایگاه‌های ایالات متحده به دلیل آلودگی‌های باز مانده از جنگ در معرض آلودگی بالای توریم قرار دارند. افزایش ناهنجاریهای مادرزادی نوزادان تازه متولد شده از سال ۲۰۰۳ در شهرهای بمباران شیمیایی شاهد بر این مدعا است (۴).

با در نظر گرفتن خطراتی که با ورود توریم در بدن ایجاد می‌شود، امروزه تحقیقات معدودی انجام شده تا بر مبنای آن، یون‌های توریم در سیستم‌های فیزیولوژیکی را با ترکیبات منتخبی بازآرایی کنند. آزمایش‌های همولیز القایی توسط توریم بر روی گلبول‌های قرمز نشان داد که ترکیباتی مانند تایرون<sup>۱</sup>، سیلیبین<sup>۲</sup> و فیتیک اسید<sup>۳</sup> در مقایسه با دی‌اتیلن‌تری‌آمین‌پنتااستیک‌اسید<sup>۴</sup> قابلیت بهتری دارند. همچنین این نتایج با آزمایش‌های دیگر انجام شده بازآرایی توریم که توسط مدل‌های سلولی انسان (گلبول قرمز و سلول کبدی) و یا مایع خون در شرایط قبل و پس از درمان تأیید شد (۵).

### ویژگی‌های توریم

توریم یک عنصر رادیواکتیو نسبتاً واکنش‌پذیر و یک فلز رادیواکتیو از گروه اکتینیدهای جدول تناوبی به شمار می‌آید که تابش رادیواکتیو ناشی از آن می‌تواند سلولها را تخریب کند. به علت رادیواکتیویته عنصر توریم، ارزیابی آثار مخرب مواجهه انسان با آن نیازمند به کارگیری روشهایی است که با روشهای شیمیایی اندکی تفاوت دارند.

از نظر جرمی، توریم-۲۳۰ و توریم-۲۳۲ عمده‌ترین نوع از ایزوتوپهای توریم در طبیعت‌اند. تعداد ذرات ساطع شده نسبت به نیمه عمر ایزوتوپ متغیر است. مثلاً نیمه عمر توریم-۲۳۲، ۱۴ میلیارد سال است. تابش‌های گاما نمونه

<sup>1</sup> Tiron

<sup>2</sup> Silibin (SLB)

<sup>3</sup> Phytic acid (PA)

<sup>4</sup> Diethylenetriaminepentaacetic acid

در سگهای مورد آزمایش نیز تأثیرات خونی از جمله: " فرم غیرعادی مونوسیت ها ، لنفوسیت‌ها و گرانولوسیت‌ها، هیپوپلازی مغز استخوان کاهش تعداد گلبولهای قرمز، ماکروسیتوز و افزایش گرانولوسیت های نارس " یافت شد (۱۰).

آثار کبدی: میزان آسپاراتات آمینوترانسفراز و بیلی روبین کل موجود در خون در یک گروه ۲۷۵ نفری از کارگران توریمی به میزان قابل توجهی بیشتر از افراد معمولی بود. میزان گلوبولین همراه با افزایش مواد سمی در بدن، چندان زیاد نبود! سطوح آنزیمی در حد نرمال بودند، همچنین در آلبومین، مجموع پروتئین‌ها و یا آلکالین فسفات تغییری دیده نشد.

در موش، خوکیچه هندی، خرگوش و سگ‌هایی که در معرض توریم قرار گرفتند ، هیچ آسیبی در کبد دیده نشده است (۹).

تأثیرات کلیوی: هیچ گزارشی راجع به تأثیرات کلیوی، در انسان پس از قرارگیری در معرض توریم از طریق استنشاق وجود ندارد. در حیوانات مذکور نیز اثری بر روی کلیه مشاهده نشده است.

تأثیرات بر روی سیستم ایمنی: در مورد انسانها مطالعه ای صورت نگرفته و در حیوانات مذکور اثری بر روی گره های لنفاوی مشاهده نشد.

تأثیرات ژنوتوکسیک: در سال ۱۹۸۳ یک مطالعه بر روی ۴۷ کارگر مرد توریمی انجام شد که انحراف کروموزومی را می‌سنجید. کارگران از نظر مواد رادیواکتیو موجود در بدن به سه گروه با در معرض قرارگیری کم ( $0.15 \text{ nCi/kg}$ )، متوسط ( $0.3 \text{ nCi/kg}$ ) و زیاد ( $0.15 \text{ nCi/kg}$ ) تقسیم بندی شدند. فراوانی ناهنجاری‌های کروموزومی در گروه با در معرض بودن زیاد (گروه دوم و سوم) مشاهده شد (۱۱).

سرطان: در یک گروه ۳۰۳۹ نفری از کارگران توریمی که به مدت یکسال یا بیشتر استخدام شده بودند آمار چشمگیری از افزایش مرگ ناشی از سرطان لوزالمعده مشاهده شد، (۶ مورد در مقایسه با ۱/۳ مورد پیش بینی شده) ولی این آمار در مورد کارگران با مدت استخدام کوتاهتر صادق نبود (۱۲).

در یک مطالعه دیگر با مقایسه نسبت مرگ و میر بین کارگران توریمی و مردم عادی مشخص شد که نسبت مرگ و میر به علت سرطان ریه و سرطان لوزالمعده بیشتر است. یک زیر گروه از کارگران که به خاطر کارشان به شدت در معرض

توریم ممکن است علل رادیولوژیک داشته باشند و نه شیمیایی. سازوکار این تأثیرات رادیواکتیو هنوز به خوبی مشخص نیست (۶).

### پیامدهای ورود توریم به بدن

#### مطالعه تأثیرات توریم وارد شده به بدن از طریق استنشاق

مرگ: دو تحقیق اپیدمیولوژی، مرگ و میر میان کارگران توریمی را مورد بررسی قرار دادند. در هیچ کدام از آنها، مرگ و میرها به صورت قابل توجه و غیرعادی، زیاد نبودند. نسبت استاندارد مرگ و میر<sup>۱</sup> (SMR) برای هر علت منجر به مرگ در یک گروه ۳۰۳۹ نفری از کارگران مرد در یک مرکز تولید توریم در مقایسه با مرگ و میر مردان معمولی ایالات متحده، ۱،۰۵ بود (۷).

تأثیرات تنفسی اگرچه نسبت تأثیرات تنفسی در کارگران نسبت به افراد معمولی، ۱،۳۱ بود، اما این آمار را می‌شود احتمالاً به سیگار کشیدن کارگران هم نسبت داد. سیروزهای پیشرفته ی ریوی در یک مطالعه استنشاق subchronic در موشها دیده شد. موشها به مدت ۹-۶ ماه در معرض یک آئروسول بی اثر قرار گرفتند که با توریم دی اکسید ۱۰٪، توریم دی اکسید ۴۹٪ و توریم دی اکسید خالص (۱۰۰٪) غنی سازی شده بود. شدت سیروز ریوی دقیقاً مربوط به شدت تابشی و مقدار توریم دی اکسید بود. در گروه ۱۰۰٪ توریم دی اکسید، سیروز ریوی بین ۳-۶ ماه ظاهر شد. در گروه ۴۹٪ توریم دی اکسید بین ۱۲-۹ ماه و در گروه ۱۰٪ بین ۱۵-۱۲ و در گروه آئروسول بی اثر بین ۲۴-۱۸ ماه بود. در ریه هایی که تا  $150 \text{ rad}$  در معرض تابش قرار گرفته بودند، رتیکولوسارکوما (نوعی سرطان) مشاهده شد. بین  $100-270 \text{ rad}$  تومورهای سرطانی غده ای مشاهده شد. علت اصلی تومورها ممکن است توریم دی اکسید باشد. مقدار دقیق توریم به طور واضح در گزارش موجود نبود (۸). تأثیرات خونی: در یک گروه ۲۷۳ نفری از کارگران شاغل در یک کارگاه تصفیه موناژیت ، با آزمایش خون معلوم شد کارگرانی که به مدت طولانی تری در معرض توریم بودند، میزان توریم بیشتری در خون داشتند. (اما به دلیل تأثیر نیکوتین در کارگران سیگاری و حضور مواد رادیواکتیو احتمالی دیگر در محل ، نمی توان با اطمینان آثار سمی و رادیواکتیو را فقط به توریم نسبت داد) (۹).

<sup>1</sup> Standard Mortality Ratio

آنژیوگرافی مغزی و آرتریوگرافی از اعضای بدن بین سالهای ۱۹۲۸-۱۹۵۵ استفاده می‌شد. پیش‌بینی می‌شود که در سراسر جهان حدود ۵۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ بیمار، توروتراست مصرف کرده‌اند. گزارش شده است که توریم-۲۳۲ موجود در توروتراست، اکتیویته‌ای معادل  $24/2 \text{ nCi/ml}$  دارد. بنابراین در ازای تزریق مقدار  $1-75 \text{ mL}$ ، اکتیویته مساوی  $5-3/26 \text{ nCi/kg}$  body weight می‌باشد.

از آثار منفی توروتراست، تشکیل "گرانولوما" و یا "thorotrastomas" در محل تزریق است که عموماً حدود ۴-۶ سال پس از ورود این ماده به بدن "گرانولوما" در محل تزریق مشاهده می‌شود.

اختلالات خونی (کم‌خونی همولیتیک و آپلاستیک، میلو فیبروزیس / سرطان مغز استخوان نادر، سرطان خون) ۲۰ سال پس از تزریق ظاهر شدند و همچنین همانژیوسارکوما (نوعی سرطان) در کبد پس از ۳۰-۲۵ سال از تزریق توروتراست مشاهده شد. کم‌خونی همولیتیک نوعی کم‌خونی ناشی از تخریب سلولهای قرمز است و کم‌خونی آپلاستیک نوعی کم‌خونی است که در آن مغز استخوان، گلبولهای قرمز و سایر محصولات خونی را تولید نمی‌کند.

در سال ۱۹۸۳ نیز یک ارتباط میان مقدار توروتراست تزریقی و پیدایش تومورهای کبدی یافت شد. با مشخص شدن پتانسیل سمیت توروتراست، استفاده از آن متوقف شد [۱۵ و ۱۶]. در سال ۱۹۷۲ یک محقق گزارش کرد که در برون‌دهی قلب، نبض، فشار یا حجم بطن چپ و یا زمان لخته شدن خون در سگهایی که تزریق داخل وریدی تا  $1 \text{ mL}$  توروتراست داشتند، تغییرات قابل توجهی ملاحظه نشده است (۱۷).

تحقیقات در ارتباط با اثرات کبدی مصرف این ماده نشان داد که سیروز شدید کبدی یکی از اولین اثرات سیستمی پس از تزریق توروتراست در انسان است. در موشهایی که با یک شدت مخصوص از توروتراست آزمایش شدند، اجازه داده شد تا ۱۵ ماه زنده بمانند، تغییرات مخرب کبدی شامل نکروز (مجموعه‌ای از سلولها یا بافت‌های مرده در یک قسمت از بدن)، فیروز و سیروز دیده شد. فیروز در بافت‌ها با افزایش مقدار رسوب توریم و مدت زمانی که توریم در آن باقی می‌ماند بیشتر می‌شود. فرآیند فیروز شدن ممکن است

پرتو بودند، نسبت مرگ و میر (SMR) برای سرطان ریه  $1/68$  و برای سرطان لوزالمعده (پانکراس)  $4/3$  برابر بود (۱۳). در سال ۱۹۷۰ یک مقدار چشمگیر وقوع سرطان در بافت‌های لنفاوی و خونساز در کارگران آسیاب اورانیوم مشاهده شد. (یک گروه ۶۶۲ نفری از مردان) و مشخص شد که رادیواکتیویته‌ی درون غدد لنفاوی برونشیا (نای) کارگران، در درجه‌ی اول ناشی از تابش آلفا از توریم-۲۳۰ است و نه از اورانیوم-۲۳۴ یا اورانیوم-۲۳۸. در سال ۱۹۷۶ در یک آزمایش، موشها در معرض غلظت‌های مختلفی از توریم دی‌اکسید به مدت ۹-۶ ماه قرار گرفتند. نویسندگان نتیجه‌گیری کردند که نوع بروز و نوع بافت تومورهای پیشرفته‌ی ریوی، تابعی از شدت تابشی به ریه‌ها بود (۶).

#### مطالعه تاثیرات توریم وارد شده به بدن از طریق بلع

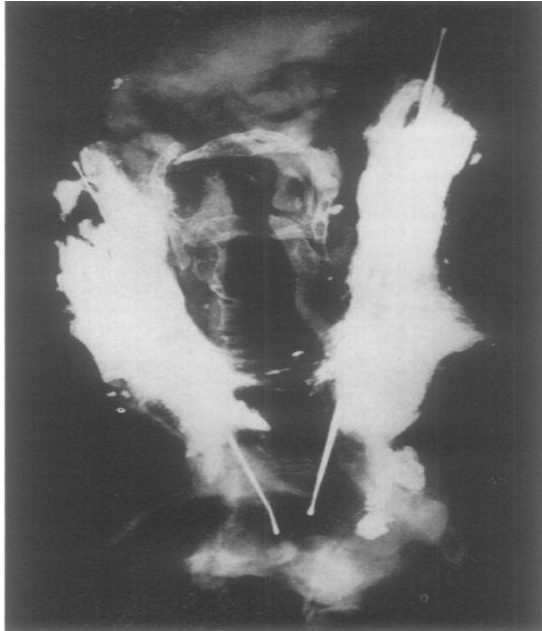
در یک مورد آزمایش (۱۹۴۸) بلع  $1000 \text{ mg}$  توریم نیترات به ازای یک کیلوگرم از وزن در روز در موش‌ها از راه دهان، منجر به مرگ آنها شد. در حالی‌که ورود  $760 \text{ mg}$  منجر به هیچ مرگ و میری نشد. در بررسی‌های کالبدشکافی خون ریزی‌های گاه به گاه گزارش شده است، اما در احتمالاً خونریزی باعث مرگ موشها شده است یا خیر گزارشی وجود ندارد. در همین آزمایش گروه دیگری از موشها در طی ۴ ماه که در معرض  $123 \text{ mg}$  به ازای یک کیلوگرم وزن توریم نیترات محلول در آب بودند، ۵۰٪ موشهای تحت آزمایش و ۱۰٪ موشهای معمولی تحت کنترل مردند. در هردو آزمایش (شدید و در طی ۴ ماه) هیچ علت مرگی گزارش نشد. اما این مرگ و میرها ممکن است به علت سوء تغذیه باشد. زیرا موشهای مورد آزمایش غذای بسیار کمی می‌خوردند و وزن بدنشان به شدت کاهش می‌یافت (۱۴).

#### مطالعه تاثیرات

##### توریم وارد شده به بدن با تزریق توروتراست (Thorotrast)

یکی دیگر از راه‌های ورود توریم به بدن با تزریق توروتراست و اغلب تاثیرات سرطانی مربوط به توریم حاصل از تزریق توروتراست است. توروتراست، توریم دی‌اکسید به صورت سوسپانسیون کلئیدی و شامل تقریباً ۲۰٪ توریم-۲۳۲ است که توسط دکستران تثبیت می‌شود. توروتراست به‌عنوان عامل کنتراست رادیوگرافی بیشتر جهت

موش‌ها در رابطه با توروتراست نشان داد که ارتباط مستقیمی بین میزان تزریق و تعداد سلول‌های توموری کبد و طحال وجود دارد (۶، ۱۸).

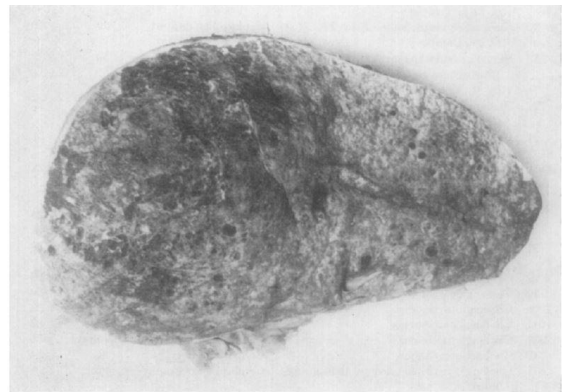


**شکل ۲-** گرانولومای گردنی در دو طرف گردن. رادیوگراف‌های به دست آمده از نمونه‌های کالبدشکافی شده که مرگ به علت خفگی حاصل از بزرگ شدن توده گرانولومایی در دو طرف گردن رخ داده است. پروب در تصویر در کنار سرخرگ کاروتید قرار دارد (۱۸).

### میزان جذب توریم وارد شده به بدن از طرق مختلف

بررسی میزان جذب توریم از طریق استنشاق نشان داد که میزان جذب توریم از طریق ریه‌ها به ماهیت شیمیایی ایزوتوپ آن و اندازه ذرات معلق آن در هوا بستگی دارد. با افزایش اندازه ذرات (بیشتر از ۲ میکرومتر) رسوب آنها در مسیرهای تنفسی موش افزایش می‌یابد به جز نواحی آلوئولی که با افزایش اندازه ذرات، رسوب آنها در این نواحی کاهش می‌یابد. همچنین بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده، میزان جذب ذرات معلق توریم-۲۳۲ با میزان ته نشین شدن آنها در نواحی آلوئولی متناسب است و ارتباط خطی بین آنها وجود دارد. سطح توریم-۲۳۰ و ۲۳۲ در ریه‌ها برای افرادی که در مکانهایی همچون معادن فعالیت می‌کنند به طور قابل توجهی نسبت به افراد دیگر بالاتر است و طی شواهد به دست آمده می‌توان اثبات کرد که مسیر عمده و اصلی قرار گرفتن در معرض توریم، از طریق استنشاق است (۲۰).

در اثر هیالورونیزه شدن، تغییرات فیبرینوئیدی و کلسیفیه شدن بافت ایجاد شود.

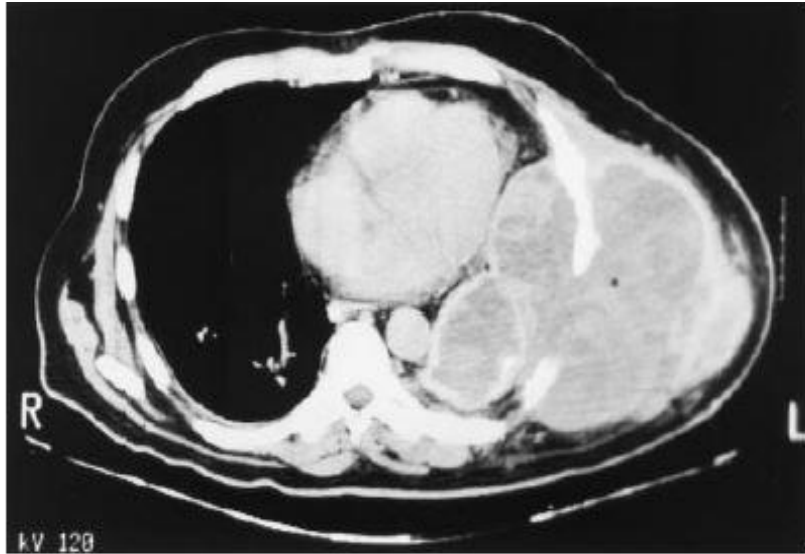


**شکل ۱-** تصویر ماکروسکوپی از همانژیواندوتلیوم کبدی، ۳۱ سال پس از تزریق توروتراست به بدن (۱۸).

تصاویر میکروسکوپی حاصل از این وضعیت (شکل ۱) نشان داد که تومورهای جامدی در کنار سینوس‌ها رشد کرده است که از نظر ظاهری شبیه همان اندوتلیوم هستند که نواحی را تشکیل داده‌اند که سفتی و سختی آن به دلیل فضا‌های مویرگی که با بزرگنمایی تشخیص داده می‌شد نسبت به تصویر ماکروسکوپی آشکارتر بود.

مطالعه تأثیرات توروتراست بر سیستم ایمنی مشخص کرد که فیروز گره‌های لنفاوی دارند که موجب انسداد رگ‌های لنفاوی است. همچنین در بیمارانی که مقادیر نامشخصی تزریق داخل وریدی توروتراست داشتند، فیروز طحال یافت شد. در رابطه با تأثیرات توروتراست بر روی سیستم عصبی و یا رفتارهای تولیدمثلی رشد مطالعات دقیقی صورت نگرفته است. اما در ارتباط با اثرات ژنوتوکسیک مشخص شده است که تزریق داخل وریدی توروتراست منجر به ناهنجاری‌های کروموزومی از طریق تابش در بیماران می‌شود و یک رابطه‌ی مستقیم میان ناهنجاری‌های کروموزومی و مقدار توروتراست تزریقی وجود دارد.

محققان نشان دادند که تأثیرات سمی (توکسیک) توروتراست بیشتر از تابش‌های آلفا ناشی می‌شود تا خواص شیمیایی یا کلونیدی. درباره‌ی اثر شدت، میان مقدار توروتراست و وقوع تومورهای کبدی در انسان رابطه‌ای دیده می‌شود. طی یک آزمایش که توروتراست غنی شده با توریم-۲۳۰ را به موشها تزریق کردند، یک رابطه‌ی خطی میان سطوح تابشی و وقوع تومور یافت شد. همچنین مطالعات انجام شده بر روی



شکل ۳- توموگرافی کامپیوتری سینه نشان‌دهنده توده بزرگی در دیواره سینه است که با افزایش وازکولاریته (حالت عروقی) و کلسیفیه شدن، فضای زیادی را اشغال کرده است (۱۹).

همچنین از تاثیر حلالیت و اندازه ذرات در جذب آنها اطلاعاتی به دست آمده است. طبق این نتایج، میزان جذب توریم-EDTA از راه گوارشی، ۶۰ مرتبه بیشتر از جذب آن به صورت توریم دی اکسید است. میزان جذب توریم نیترات هم ۴ مرتبه بیشتر از جذب توریم دی اکسید و میزان جذب توریم کلراید ۱۰ یا ۲۰ مرتبه بیشتر از جذب توریم دی اکسید گزارش شده است که این نتایج به غلظت آن وابسته است. متفاوت بودن مقدار جذب نیز به حلالیت شکل‌های متنوع شیمیایی این عناصر مربوط می‌شود (۲۱).

#### میزان توزیع توریم وارد شده به بدن از طرق مختلف

در یک مطالعه غلظت‌های متوسط توریم-۲۳۲، توریم-۲۳۰ و توریم-۲۲۸ در استخوان و دیگر بافت‌های نرم موجود در نمونه‌های تشریح شده از جمعیت‌های کنترل از مناطق grand junction, Colorado و واشنگتون بررسی شد. بیشترین غلظت از هر سه ایزوتوپ توریم در گره‌های لنفاوی نواحی برونشیل و ریه‌ها و استخوان‌ها یافت شد که به ترتیب دارای بیشترین اکتیویته از ایزوتوپ‌های توریم بودند. وجود بیشترین اکتیویته در گره‌های لنفاوی حاکی از این است که مقداری از توریم موجود در ریه‌ها به وسیله سیستم لنفاوی پاکسازی شده و در گره‌های لنفاوی رسوب می‌کنند. یک

توضیح ممکن برای اکتیویته بیشتر توریم-۲۲۸ نسبت به توریم-۲۳۲ در استخوان این است که بخش عمده توریم-۲۲۸ ممکن است از طریق جذب رادیوم-۲۲۸ باشد (رادیوم نسبت به توریم به مقدار بیشتری از مسیرهای گوارشی جذب می‌شود). رادیوم-۲۲۸ در استخوان تغلیظ می‌شود و به توریم-۲۲۸ تنزل می‌یابد. همچنین مطالعه‌ای در موش‌ها نشان داد که بیشترین مقدار توریم-۲۲۷ پس از تزریق از ناحیه داخل صفاقی به استخوان مربوط می‌شود. بنابراین؛ این توضیح دیگری برای توجیه سطح بالاتر توریم-۲۲۸ نسبت به توریم-۲۳۲ در استخوان است. بیشتر توریم-۲۳۲ نسبت به توریم-۲۳۰ در ریه‌ها و گره‌های لنفاوی باقی می‌ماند که دلالت بر این دارد که توریم-۲۳۰ نسبت به توریم-۲۳۲ با سرعت بیشتری در ریه‌ها به حالت محلول در می‌آید که می‌تواند به این دلیل باشد که توریم-۲۳۰ با اندازه ذرات کوچکتری نسبت به توریم-۲۳۲ از مسیر استنشاقی جذب می‌شود. توریم-۲۳۰ با سرعت بیشتری از ریه‌ها پاکسازی می‌شود و به استخوان منتقل می‌شود. پایین بودن مقدار توریم در سیستم رتیکولاندوتلیال (کبد، طحال و مغز استخوان) با مقدار توروتراست (ThO<sub>2</sub> coloid) پس از تزریق داخل وریدی مغایرت دارد که ناشی از وجود ماکروفاژها در سیستم رتیکولاندوتلیال است که توریم به وسیله آنها در دام می‌افتد. مقدار شدت توریم جذب شده از محیط در اندام‌های

<sup>1</sup> Ethylenediaminetetraacetic acid

جنوب شرقی برزیل دارای ۱۴۰۰-۸۰۰ میکروگرم بر لیتر توریم هستند [۲۶]. توریم یک عنصر چربی دوست است و از نظر رفتارهای ژئوشیمیایی بسیار شبیه لانتانیدها (به خصوص سریوم) عمل می‌کند. استخراج توریم از منابع معدنی حاوی آن و استفاده رو به رشد آن در صنعت موجب افزایش غلظت این عنصر در محیط زیست به خصوص در آبها شده است. محققان برزیلی تغییرات بیوشیمیایی و سائیتونیک گربه ماهی نقره‌ای را هنگام قرارگیری در معرض توریم بررسی کردند. تغییر در پارامترهای اکسیداتیو آشش‌های گربه ماهی نقره‌ای مربوط به تجمع توریم در این اندام بود. در واقع با کاهش آنزیم گلوکوتاتیون-S- ترانسفراز و افزایش پراکسیداسون لیپیدها در غلظت ۷۴۲/۲ میکروگرم بر لیتر توریم در آشش‌های گربه ماهی نقره‌ای، آسیب اکسیداتیو در این اندام رخ داده بود. سمیت شیمیایی توریم ممکن است مشابه آنالوگ‌های شیمیایی پایدار آن یعنی سریوم باشد اما فعالیت یونیزاسیونی آن در ارتباط با تنزل رادیواکتیویته توریم-۲۳۲ است که منجر به اثرات سمی در اندام می‌شود. حلالیت و دسترسی زیستی عناصری مانند توریم و سریوم تحت تأثیر فاکتورهای مهمی مانند pH، غلظت و لیگاندها مورد استفاده و دما قرار دارد. یون‌های  $Th^{4+}$  تمایل به تشکیل گونه‌های هیدرولیزه و ترکیبات نامحلول در محیط‌های آبی دارند.

دافنی ماگنا گه در رده آشش‌پایان، شاخه بندپایان و زیرشاخه سخت‌پوستان است، از شاخص‌های زیستی در ارزیابی میزان سمیت فلزات در محیط‌های آبی محسوب می‌شود زیرا برخی از ویژگی‌های آن مانند رشد سریع و نرخ باروری بالا این گونه را در سنجش تغییرات محیط آبی به عنوان یک شاخص مناسب مطرح کرده است. در مطالعات سم‌شناسی دافنی ماگنا در پاسخ به سموم آلی، معدنی و آلاینده‌ها بررسی شده است. در یکی از تحقیقات انجام شده در رابطه با اثر توریم و سریوم بر روی دافنی ماگنا از محیط کشت آبی اصلاح شده گه دارای مقادیر مشخصی از پتاسیم کلراید، منیزیم سولفات و... در pH ۷/۸ بود استفاده گشت. طبق نتایج اثر سمیت حاد توریم و سریوم قابل مقایسه‌اند، اثر این عناصر بر روی دافنی ماگنا (شکل ۴) که به صورت

متفاوت انسان شامل گره‌های لفاوی، استخوان، ریه‌ها، کبد و کلیه‌ها به ترتیب ۴/۵-۲/۲، ۰/۴۴-۰/۴۱، ۰/۲۳-۰/۱۹، ۰/۰۷۱-۰/۰۷۱ و ۰/۰۷۱-۰/۰۷۱ mrad/year می‌باشد. مقدار شدت جذبی در اندام‌های موجودات زنده‌ای که در مجاورت انتهای معادن اورانیوم هستند، بیشتر می‌شود و حتی مقدار جذب در اندام‌های افرادی که در معادن کار می‌کنند بالاتر نیز می‌رود (۴/۱۰-۸/۵ mrad/year در گره‌های لفاوی و ۲/۵-۱/۱ mrad/year در ریه‌ها) (۲۲، ۲۳).

در یک تحقیق در ارتباط با توزیع توریم جذب شده از مسیر دهانی اطلاعات حاصل از کالبدشکافی افرادی که در معرض توریم موجود در محیط قرار گرفته بودند، نشان داد که گره‌های لفاوی مربوط به نواحی ریوی دارای مقدار بیشتری توریم بودند (به طور متوسط ۵۳/۴ میکروگرم بر کیلوگرم) و پس از آن ریه‌ها و استخوان‌ها بودند (۲۴). در این تحقیق تخمین زده شد که مقدار توریمی که به طور روزانه از طریق غذا، آب و استنشاق وارد بدن می‌شود ۲/۹۲ میکروگرم در روز است، با در نظر گرفتن اینکه سهم عمده آن یعنی ۲/۲۷ میکروگرم در روز از طریق خوردن غذا و آب می‌باشد. همچنین امروزه تحقیقاتی انجام شده است که نشان می‌دهد موها و ناخن‌ها شاخص‌های زیستی عمومی هستند که در معرض قرارگیری بدن در برابر مواد رادیواکتیو مشخصی را به مدت طولانی (ماه‌ها و حتی سال‌ها) نشان می‌دهند. بر اساس تحقیقاتی که در شهر نیسکا بانجا<sup>۱</sup> از نواحی کشور صربستان انجام شده است، این شهر به طور طبیعی در معرض عناصر رادیواکتیو مشخصی از جمله توریم و اورانیوم است که منشأ آن به دریاچه‌ای در جنوب صربستان برمی‌گردد. میزان این عناصر در موها و ناخن‌ها اغلب، منعکس‌کننده میزان این عناصر در دیگر بافت‌های بدن است. در این تحقیق میدانی موها و ناخن‌های ۲۶ داوطلب (۱۹ زن و ۷ مرد) جمع‌آوری شد که همه آنها از اهالی این شهر بودند. طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق، ارتباط معنی‌دار قابل توجهی بین این عناصر در موها و ناخن‌ها وجود دارد که مستلزم انجام تحقیقات بیشتری است (۲۵).

#### پیامدهای توریم برای محیط زیست آبی

آبهای سطحی و زیرزمینی غلظت پایینی از توریم حدود ۰/۲-۰۰۰۹/۹ میکروگرم بر لیتر دارند و آبهای آلوده در

<sup>1</sup> Niska Banja  
<sup>2</sup> Daphnia magna  
<sup>3</sup> Modified reconstituted water



دافنی ماگنا متفاوت است. با توجه به این که این بررسی از اولین تحقیقات انجام شده در رابطه با سمیت توریم در محیط‌های آبی است، تحقیقات بیشتری در این زمینه باید انجام گیرد (۱).

### نتیجه‌گیری

با پیشرفت سریع تکنولوژی در جهان، کاربرد مواد رادیواکتیو و استفاده از پرتوهای یون‌ساز پیشرفت قابل توجهی داشته است و استفاده از منابع پرتوزا به ویژه جهت مقاصد صنعتی، پزشکی و حرفه ای رو به گسترش است. توریم یکی از فراوان‌ترین فلزات موجود در طبیعت است که با داشتن پرتوهای آلفا، بتا و گاما، انرژی‌هایی ساطع می‌کند که در صورت برخورد با آن، نگرانی‌هایی در رابطه با پیامدهای آن وجود دارد. این فلز رادیواکتیو و نامحلول از راه‌های مختلفی مانند استنشاق، دهان و یا جذب پوستی وارد بدن شده و میزان جذب و توزیع آن بر حسب مسیر ورودی آن در بدن متفاوت است. پیامدهایی همچون مرگ، سرطان، فیبروزهای کبدی، گرانولوما و اختلالات خونی برای افرادی که در مواجهه با این ماده بوده اند دیده شده است. البته بسیاری از این پیامدها به دلیل استفاده از توریم در حوزه پزشکی و در تصویربرداری بوده است که بدین منظور توریم دی‌اکسید به فرم کلوئیدی با نام تجاری توروتراست به عنوان عامل کنتراست به کار برده شده بود. چندین سال بعد، پس از اثبات آثار زیانبار این ماده، استفاده از آن متوقف گشت. اما چون تزریق توروتراست تنها راه ورود توریم به بدن نیست نگرانی‌ها در این مسئله همچنان وجود دارد و با توجه به ناکافی بودن تحقیقات در این امر، در بسیاری از پیامدهای ناشی از آن نظر قطعی نمی‌توان داد. به دلیل اهمیت نقش اکسیستم‌ها به خصوص در محیط آبی، آثار سمیت توریم برای جانداران شاخص در این محیط‌ها نیز باید بیشتر ارزیابی شود.

### تشکر و قدردانی

از حمایت‌های دانشگاه شهید مدنی آذربایجان و پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای و دانشگاه فنی و حرفه ای در تدوین این مقاله صمیمانه تقدیر می‌شود.

عدد  $EC_{50}$  گزارش می‌شود در طی زمان ۲۴ ساعت برای توریم  $7/3$  میکرومولار و برای سربوم  $16/4$  میکرومولار و در طی زمان ۴۸ ساعت برای توریم  $4/7$  میکرومولار و برای سربوم  $10/7$  میکرومولار بوده است که بر این اساس توریم در غلظت‌های پایین‌تر برای دافنی ماگنا آثار سمی بیشتری دارد؛ گرچه هر دو این عناصر موجب کشته شدن تعداد زیادی از جانداران دافنی ماگنا در غلظت‌های بالا شدند به طوری که در پایان آزمایش فقط سه عدد از جانداران دافنی ماگنا در هر گروه زنده ماندند. توریم در غلظت‌های کمتر از  $0/22$  میکرومولار تأثیری در اندازه میانگین نوزادان هر والد نداشت. سربوم ممکن است با القای جایگزینی و یا تعویض کلسیم موجب تداخل در چرخه پوست اندازی دافنی ماگنا شود؛ اما توریم به عنوان یک عنصر رادیواکتیو با نیمه عمر بالا به طور طبیعی پرتوهای آلفا، بتا و گاما ساطع می‌کند که آثار سمی بر روی دافنی ماگنا اعمال می‌کند. انرژی پرتوهای یونیزه کننده توریم موجب یونیزاسیون مولکول‌های آب و تولید رادیکال‌های آزاد می‌شود که ممکن است با افزایش آثار مخرب توریم، محصولات دختر حاصل از زوال توریم در جاندار دافنی ماگنا تولید شود. هرچند سربوم به صورت یون‌های محلول در آب و توریم به کار برده شده به صورت ذرات نامحلول در فرم  $ThO_2$  در محیط دافنی ماگنا قرار داده شد.



شکل ۴- تصویر دافنی ماگنا، جاندار آبی از زیرشاخه سخت‌پوستان به طور کلی با در نظر گرفتن تفاوت در اشکال شیمیایی و دسترس پذیری زیستی، اثرهای سمیتی  $Ce^{3+}$  و  $ThO_2$  بر روی

<sup>1</sup> Half maximal effective concentration

## منابع

1. Ma, Y., et al., (2016) Toxicity of cerium and thorium on *Daphnia magna*. *Ecotoxicology and environmental safety*, 134: p. 226-232.
2. Janitabar Darzi, S., S. Abdolmohammadi, and M.H. Latifi, (2020) Green Removal of Toxic Th (IV) by Amino-Functionalized Mesoporous TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> Nanocomposite. *Iran. J. Chem. Chem. Eng. Research Article Vol*, 39(2).
3. Wang, L., et al., (2016) Atmospheric thorium pollution and inhalation exposure in the largest rare earth mining and smelting area in China. *Science of the Total Environment*, 572: p. 1-8.
4. Savabieasfahani, M., F.B. Ahamadani, and A.M. Damghani, (2020) Living near an active US military base in Iraq is associated with significantly higher hair thorium and increased likelihood of congenital anomalies in infants and children. *Environmental Pollution*, 256: p. 113070.
5. Ali, M., et al., (2019) Thorium decorporation efficacy of rationally-selected biocompatible compounds with relevance to human application. *Journal of Hazardous Materials*, 365: p. 952-961.
6. Atlanta, G., (1993) Agency for Toxic Substances and Disease Registry, US Public Health Service. Toxicological profile of lead: US Department of Health and Human Services. Public Health Services.
7. Polednak, A.P. and D.T. Janerich, (1983) Uses of available record systems in epidemiologic studies of reproductive toxicology. *American journal of industrial medicine*, 4(1-2): p. 329-348.
8. Likhachev, V., M. Myshlyayev, and G. Vladimirova, (1973) Temperature aftereffect in metals. *Strength of Materials*, 5(6): p. 663-670.
9. Farid, I. and S.A. Conibear, (1983) Hepatic function in previously exposed thorium refinery workers as compared to normal controls from the health and nutrition survey. *Health physics*, 44: p. 221-230.
10. Hall, E., (1951) The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1951. 64(9): p. 747.
11. Hoegerman, S.F. and H.T. Cummins, (1983) Chromosome damage in peripheral lymphocytes from American thorium workers. *Health physics*, 44: p. 365-371.
12. Stehney, A., et al., (1980) Health Status and body radioactivity of thorium workers. *Interim Report*.
13. Polednak, A. and D. Janerich, (1983) Characteristics of first pregnancy in relation to early breast cancer. A case-control study. *The Journal of reproductive medicine*, 28(5): p. 314-318.
14. Patrick, S., (1948) Some effects of the administration of thorium nitrate to mice. *Canadian Journal of Research*, 26(6): p. 303-316.
15. Van, G.K., et al., (1983) Recent results of the German Thorotrast study--epidemiological results and dose effect relationships in Thorotrast patients. *Health physics*, 44: p. 299-306.
16. Wesch, H., et al., (1983) Recent results of the German Thorotrast study--statistical evaluation of animal experiments with regard to the nonradiation effects in human thorotrastosis. *Health physics*, 44: p. 317-321.
17. Lipchik, E.O., M. Webb-Peploe, and R.E. Steiner, (1972) Angiocardiographic Analysis of Diastolic Inflow into the Left Ventricle: A Sign of Ventricular Function. *Investigative radiology*, 7(4): p. 323-329.
18. Da Silva Horta, J., L.C. Da Motta, and M.H. Tavares, (1974) Thorium dioxide effects in man: epidemiological, clinical, and pathological studies (experience in Portugal). *Environmental research*, 8(2): p. 131-159.
19. Maziak, D.E., et al., (1999) Angiosarcoma of the chest wall. *The Annals of thoracic surgery*, 67(3): p. 839-841.
20. Moores, D., L. Golden, and D. Sampson, (1980) Ionisation from the 3p and 3d sublevels of highly charged ions. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 13(2): p. 385.
21. Johnson, J. and E. Lamothe, (1989) A review of the dietary uptake of Th. *Health physics*, 56(2): p. 165-168.
22. Ibrahim, A., E. Roberts, and A. Murdoch, (1983) Viability of lettuce seeds: II. Survival and oxygen uptake in osmotically controlled storage. *Journal of Experimental Botany*, 34(5): p. 631-640.
23. Wrenn, R.W., et al., (1981) Inhibition by phenothiazine antipsychotic drugs of calcium-dependent phosphorylation of cerebral cortex proteins regulated by phospholipid or calmodulin. *Life sciences*, 29(7): p. 725-733.
24. Sunta, C., H. Dang, and D. Jaiswal, (1987) Thorium in man and environment uptake and clearance. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 115(1): p. 149-158.
25. Sahoo, S.K., et al., (2015) Distribution of uranium, thorium and some stable trace and toxic elements in human hair and nails in Niška Banja Town, a high natural background radiation area of Serbia (Balkan Region, South-East Europe). *Journal of environmental radioactivity*, 145: p. 66-77.
26. Veado, M., et al., (2006) Metal pollution in the environment of Minas Gerais State--Brazil. *Environmental monitoring and assessment*, 117(1-3): p. 157-172.