

## بررسی سمیت توریم در محیط زیست آبی

فاطمه اسدی<sup>1,2</sup>، سیمین جانی تبار درزی<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، دانشکده علوم پایه، تبریز، ایران.

<sup>2</sup>پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای، صندوق پستی: 14395-836 تهران ایران.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [sjanitabar@aeoi.org.ir](mailto:sjanitabar@aeoi.org.ir)

### چکیده

توریم، عنصری رادیو اکتیو با تابش‌های آلفا، بتا و گاما، از اکتینیدهای جدول تناوبی است. این عنصر در محیط‌های آبی حضور دارد و با تأثیر بر جانداران و گیاهان، زنجیره غذایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مقاله مروری به منظور بررسی آثار سمیت توریم در اکوسیستم‌های آبی، تحقیقات اخیر انجام شده بر روی جلبک سبز *Chlorella pyrenoidos* و دافنی ماگنا که هر دو از شاخص‌های زیستی آبی به شمار می‌آیند مورد بررسی قرار گرفت. توریم به خصوص در بالاترین غلظت عرضه شده به جلبک سبز، رشد، غلظت کلروفیل a، مورفولوژی و تغییرات فراساختارهای سلول‌های آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد و آثار سمیت آشکاری بر روی این گونه دارد. همچنین تأثیر سمیت توریم بر روی دافنی ماگنا به صورت آزمایش‌های سمیت حاد و سمیت مزمن با آثار سمیت سریم برای این گونه مقایسه گشت. بر این اساس توریم و سریم در بالاترین غلظتشان در سمیت حاد تعداد زیادی از جانداران دافنی ماگنا را کشتند. همچنین توریم در بالاترین غلظت موجب تأخیر در رهاسازی تخم‌های دافنی ماگنا شده که این اثر برای سریم مشاهده نگشت.

**واژگان کلیدی:** توریم، اکوسیستم آبی، جلبک سبز *Chlorella pyrenoidos*، دافنی ماگنا

## Evaluation of thorium toxicity in the aquatic environment

F. Asadi MSc<sup>1,2</sup> , S. Janitabar darzi\* PhD<sup>2</sup>

1. Azarbaijan Shahid Madani University, Faculty of Basic Science, Tabriz, Iran, Email: [f.asadi@azaruniv.ac.ir](mailto:f.asadi@azaruniv.ac.ir)

2. Nuclear Science & Technology Research Institute, Materials and Nuclear Fuel Research School, Tehran, Iran, 14395-836, Email: [sjanitabar@aeoi.org.ir](mailto:sjanitabar@aeoi.org.ir)

### Abstract

Thorium is a radioactive element with alpha, beta and gamma radiation from periodic table actinides. It is present in aquatic environments and affects the food chain by affecting organisms and plants. In this review article to investigate the effects of thorium toxicity on aquatic ecosystems, recent research on green algae *Chlorella pyrenoidos* and *Daphnia magna* both of which are aquatic biomarkers was investigated. Thorium affects the growth, chlorophyll a concentration, morphology and ultrastructures of its cells especially at the highest concentration supplied to the green algae and it has obvious toxic effects on this species. The effects of thorium toxicity on *Daphnia magna* with acute toxicity and chronic toxicity tests were compared with cerium toxicity effects. Accordingly thorium and cerium killed large numbers of *Daphnia magna* organisms at their highest concentration in acute toxicity. Also thorium at the highest concentration delayed the release of *Daphnia magna* eggs, but this effects was not observed for cerium.

**Keywords:** Thorium, Aquatic ecosystem, Green algae *Chlorella pyrenoidos*, *Daphnia magna*

مقدمه:

سمیت توریم 232 بر روی جلبک سبز *Chlorella pyrenoidosa* ساکن در آب پس از 24 ساعت دارای EC50<sup>2</sup> به مقدار 15/4 میکرومولار است و حضور کافئین سمیت توریم را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد [4]. جلبک‌ها از اولین تولیدکننده‌ها در سیستم‌های آبی محسوب می‌شوند که در همه قسمت‌های جهان حضور دارند. استفاده از جلبک‌های سبز به منظور بررسی سمیت شیمیایی محیط‌های آبی بسیار سودمند است، زیرا جلبک سبز به راحتی کشت داده می‌شود و به آلودگی حساس است [2].

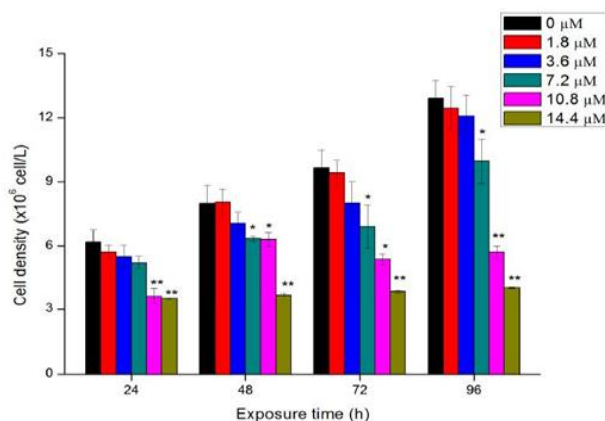
خانواده دافنی‌ها، یکی دیگر از موجودات بسیار سودمند در مطالعات سمیت شناختی و سنجش محیط زیست در سیستم‌های آبی به شمار می‌آیند. حساسیت بالای دافنی‌ها به سموم، کشت آسان و اینکه آنها یکی از اعضای مهم زوپلانکتون‌ها در بسیاری از دریاچه‌ها هستند، آنها را بدین منظور بسیار مناسب کرده است. زوپلانکتون‌ها از مهمترین بخش‌های زنجیره غذایی در اکوسیستم‌های آبی هستند و ناپدید شدن و کاهش جمعیت آنها، روابط زنجیره غذایی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطالعات بیولوژیکی که تا کنون انجام شده است حاکی از این است که دافنی‌ها به یون‌های فلزی واکنش نشان می‌دهند و مشاهده مرگ و میر در دافنی‌ها به علت آلودگی ناشی از فلزات، منجر به تعیین مقیاس‌های سمیت توسط این جانداران شده است. با وجود این تلاش‌ها هنوز مطالعات بسیار کمی در رابطه با حساسیت گونه‌های مختلف دافنی به فلزات مختلف انجام شده است. طبق تحقیقات انجام شده مناسب‌ترین pH برای رشد و تکثیر دافنی ماگنا در محدوده بیشتر از 4/55 و کمتر از 10/13 است و بهترین pH نیز عدد 7/9 تا 8/3 را نشان می‌دهد [5,6].

در رابطه با تأثیر توریم در اکوسیستم‌های آبی، تا کنون مطالعات بسیار کمی صورت گرفته است که به جرأت می‌توان گفت انگشت شمارند. در این مقاله مروری سعی بر آن است

توریم<sup>1</sup> (Th) از فراوان‌ترین اکتینیدهای جدول تناوبی در پوسته زمین به شمار می‌آید و عموماً یکی از ثابت‌ترین عناصر در محیط‌های آبی است [1]. توریم در حالت طبیعی یک عنصر رادیواکتیو بوده که عموماً به صورت ایزوتوپ توریم 232 و با نیمه عمر بسیار طولانی 14 میلیارد سال در محیط زیست وجود دارد. این عنصر غالباً در حالت 4 ظرفیتی در محیط دیده می‌شود و با فسفات‌ها، اکسیدهای ساده و چندگانه و سیلیکات‌ها ترکیب می‌شود. توریم در ساخت سرامیک، لنزهای دوربین و تلسکوپ، رنگ‌های مقاوم به حرارت، ساخت آجر و جوش زدن میله‌ها به هم و در صنایع هوا فضا استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از توریم به عنوان سوخت هسته‌ای توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در رابطه با تأثیرات و سمیت توریم در محیط زیست به خصوص در محیط‌های آبی تاکنون مطالعات بسیار کمی صورت گرفته است. انسان‌ها همیشه در معرض جذب مقدار کمی توریم از طریق تنفس، بلع و یا پوست قرار دارند زیرا توریم به طور طبیعی در هوا، آب، خاک و مواد بیولوژیکی وجود دارد. شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد تنفس ذرات توریم خطر ابتلا به سرطان‌های ریه و پانکراس را افزایش می‌دهد. همچنین جذب توریم به بدن، منجر به سرطان استخوان می‌شود زیرا توریم قادر به رسوب در استخوان‌ها می‌باشد. اخیراً مطالعاتی در رابطه با میزان سمیت توریم در سطح سلولی و مولکولی انجام شده است [2]. در سال 2014 الیویرا و همکاران اظهار داشتند که توریم در محدوده غلظت 0 تا 1 میلی مولار برای لئوسیت‌های انسان سمی نیست [3]. محیط زیست آبی آخرین مخزن ورود آلودگی‌ها می‌باشد اما تاکنون مطالعات بسیار محدودی در رابطه با سمیت توریم در محیط‌های آبی صورت گرفته است. از مدت‌ها پیش اثبات شده است که مهمترین فاکتور موثر بر سمیت فلزات سنگین در محیط‌های آبی، به گونه‌های شیمیایی آنها مربوط می‌شود. محققان روسی در یک بررسی به این نتیجه رسیدند که اثر

<sup>2</sup>- Half maximal effective concentration

<sup>1</sup>- Thorium



شکل 1- دیاگرام تراکم سلولی جلبک سبز *Chlorella pyrenoidosa* پس از قرار گرفتن در معرض غلظت‌های مختلف توریم در زمان‌های 24، 48، 72 و 96 ساعت پس از تیمار [2]

مقدار عددی  $EC_{50}$  در زمان‌های 24، 48، 72 و 96 ساعت پس از تیمار به ترتیب به صورت  $18/5$ ،  $16/7$ ،  $11/8$  و  $10/4$  میکرومولار می‌باشد که نشان‌دهنده این است که با افزایش زمان در معرض قرارگیری سلول‌های جلبک سبز در برابر توریم، کاهش رشد سلول‌های جلبک سبز بیشتر می‌شود. این نتایج با داده‌های دریافتی از تحقیقات پیشین برای عناصری مانند سرب و کادمیوم سازگار است.

## 2- اثر سمیت توریم بر روی غلظت کلروفیل a

کلروفیل یکی از رنگیزه‌های فتوسنتزکننده و اساس فرآیند فتوسنتز در سلول‌های جلبک سبز می‌باشد. محتوای کلروفیلی سلول‌های جلبک سبز پس از قرار گرفتن در معرض توریم، نتایجی مشابه با الگوی رشد سلول‌های جلبک سبز پس از تیمار با توریم را نشان می‌دهند. با افزایش زمان در معرض قرارگیری و غلظت توریم، محتوای کلروفیل a به تدریج کاهش می‌یابد. با گذشت 96 ساعت، محتوای کلروفیل a در سلول‌های جلبک سبز که در معرض غلظت‌های  $10/8$  میکرومولار و  $14/4$  میکرومولار توریم بودند به ترتیب تا  $34/5$  درصد و  $58/6$  درصد در مقایسه با گروه کنترل، کاهش پیدا کردند. کاهش محتوای کلروفیلی پس از قرار گرفتن در معرض توریم حاکی از آن است که توانایی سلول‌ها برای سنتز

که تأثیر توریم بر روی جلبک سبز *Chlorella pyrenoidosa* و دافنی ماگنا ارزیابی گردد؛ گرچه با ارزیابی سمیت توریم بر روی تنها این دو شاخص زیستی به نتایج قطعی و کاملی نمی‌توان دست یافت، اما باید در نظر داشت که این دو گونه از شاخص‌های زیستی بسیار مهم و ارزشمند در اکوسیستم‌های آبی می‌باشند.

## تأثیر سمیت توریم بر روی جلبک سبز *Chlorella pyrenoidosa*

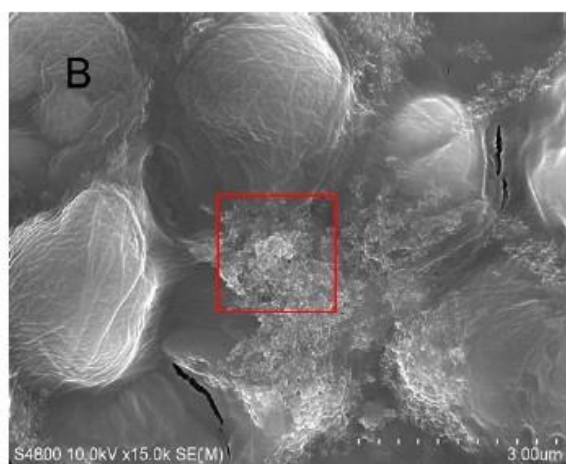
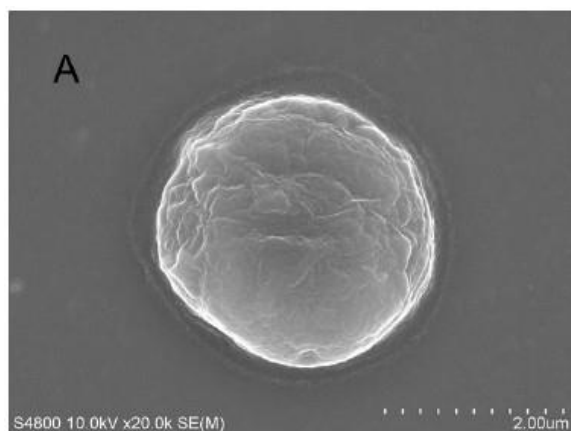
در یکی از تحقیقات انجام شده، سمیت توریم بر روی این جلبک سبز بر اساس گونه‌های شیمیایی توریم که در محیط کشت حاضر بودند، ارزیابی گردید. مقدار عددی  $EC_{50}$ ، غلظت کلروفیل a و سطح گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن<sup>3</sup> (ROS) در جلبک سبز مورد آزمایش که با توریم تیمار شده بود، تعیین گشت. همچنین تغییرات مورفولوژیکی جلبک سبز و میزان جذب توریم توسط میکروسکوپ الکترونی مورد ارزیابی قرار گرفت [2].

## 1- اثر سمیت توریم بر روی رشد جلبک سبز *Chlorella pyrenoidosa*

یون‌های  $Th^{4+}$  تمایل به تشکیل گونه‌های هیدرولیزه و یا رزیدوهای نامحلول در محیط‌های آبی دارند. هرچند تشکیل گونه‌های کلوئیدی این گونه عناصر در pH‌های پایین آغاز می‌گردد. اثرات وابسته به زمان و غلظت توریم بر روی جلبک سبز *Chlorella pyrenoidosa* در شکل 1- نشان داده شده است. توریم در غلظت‌های کمتر از  $7/2$  میکرومولار، اثری بر روی رشد جلبک سبز ندارد در حالی که در غلظت‌های بالاتر در زمان‌های تعیین شده، سمیت قابل توجهی مشاهده گشت [2].

<sup>3</sup>- Reactive oxygen species

جلوگیری از آسیب مستقیم نانوذرات CuO به دیواره سلولی و غشای سلول تشکیل می‌دهند [7].



شکل 2- تصاویر SEM از جلبک سبز *Chlorella pyrenoidosa* پس از 96 ساعت (A) گروه کنترل سلول‌های جلبک (B) سلول‌های جلبک تیمار شده با توریم 14/4 میکرو مولار [2]

#### 4- تغییرات فراساختاری

تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ TEM<sup>5</sup> نشان‌دهنده تفاوت‌های آشکار فراساختاری بین سلول‌های جلبک سبز در گروه کنترل و سلول‌های تیمار شده با توریم می‌باشند. در

کلروفیل و یا مراکز واکنش‌های فتوسنتتیک تحت تأثیر قرار می‌گیرد که این نتایج مشابه با داده‌های به دست آمده از تیمار سلول‌های جلبک سبز با سرب و کادمیوم است [2].

#### 3- تغییرات مورفولوژیکی

تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ SEM<sup>4</sup> نشان‌دهنده تفاوت آشکار در سلول‌های گروه کنترل و گروه تیمار شده با توریم می‌باشد. سلول نرمال جلبک سبز، سالم است و توسط دیواره سلولی سخت و محکم، محصور شده است. پس از انکوباسیون سلول‌های جلبک سبز با توریم 14/4 میکرومولار به مدت 96 ساعت، سلول‌ها با توده‌ای شدن، چروکیده شده و از بین می‌روند (شکل 2-). علاوه بر این، تعدادی از ذرات به سطح سلول‌های جلبک سبز متصل شدند که نشان‌دهنده تراکم شدیدی بین ذرات توریم و سلول‌ها است. همان طور که قبلاً گفته شد توریم در محیط آبی (در اینجا محیط کشت) به حالت  $\text{Th(OH)}_4$  تغییر حالت می‌دهد. بنابراین؛ ذرات جذب شده به سطح سلول‌های جلبک سبز، به احتمال زیاد  $\text{Th(OH)}_4$  است که فرصت بیشتری برای اتصال به سلول‌های جلبک خواهد داشت و در نهایت ارتباط آشکاری با سمیت ذرات توریم برای این سلول‌ها دارد. این سمیت ممکن است با اثر مستقیم و یا غیر مستقیم از جمله وارد شدن، آسیب فیزیکی، استرس اکسیداتیو و اثرات دیگر بر روی سلول‌های جلبک سبز القا شود. در این بررسی اجتماع ناهمگن بین ذرات  $\text{Th(OH)}_4$  ته نشین شده و سلول‌های جلبک سبز، ممکن است منجر به کاهش نور در دسترس سلول‌ها شود و در نتیجه محتوای کلروفیلی کاهش یابد [2]. این ممکن است یک مکانیسم دفاعی باشد که سلول‌های قرار گرفته در معرض توریم با هم تجمع تشکیل می‌دهند تا ارتباط فیزیکی کمتری با ذرات توریم داشته باشند. Zhao و همکاران در حین بررسی اثر نانوذرات مس بر روی جلبک سبز، گزارش کردند که سلول‌های جلبک سبز با مجتمع شدن، یک سد فیزیکی برای

<sup>5</sup>- Transition electron microscopy

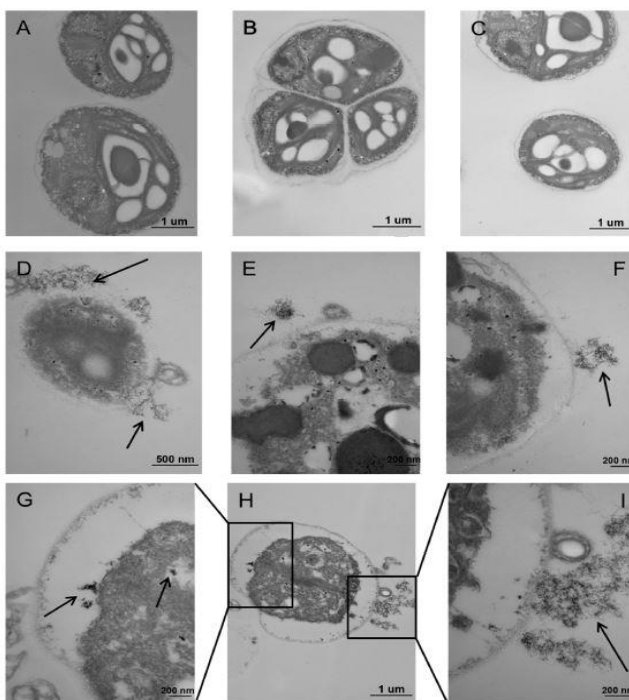
<sup>4</sup>- Scanning electron microscopy

رسوبات بی‌شکل متصل هستند (شکل-3 E,F,I پیکانهای سیاه) و این امر ممکن است باعث آسیب دیواره و غشای سلول شود (شکل-3 D). علاوه بر آن، ترکیبات توریم در داخل سلول‌ها نیز مشاهده شدند (شکل-3 G، پیکان‌های سیاه). با توجه به تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ SEM و TEM، توریم در حالت  $\text{Th(OH)}_4$  با داشتن اندازه نانو، قادر به ورود به سلول‌های جلبک سبز می‌باشد که ته‌نشین شدن این نانو ذرات توریم فرآیندهای معمول سلول‌های جلبک سبز را مختل می‌کند [2].

### 5- استرس اکسیداتیو

طبق نتایج به دست آمده، در سلول‌های تیمار شده با ذرات توریم، سطح ROS سلولی بالا است. در 24 ساعت اول، در میزان ROS موجود در سلول‌های جلبک سبز، بین گروه کنترل و سلول‌های تیمار شده با  $1/8$ ،  $3/6$ ،  $7/2$  و  $10/8$  میکرومولار توریم، تفاوت ناچیزی وجود دارد؛ در حالی که در غلظت  $14/4$  میکرومولار توریم، سطح ROS سلولی در مقایسه با گروه کنترل تا میزان  $169/2$  درصد افزایش می‌یابد. در زمان‌های 48 و 72 ساعت نیز، ارتباط معنی‌دار مرتبط با دوز به در 4 غلظت اولیه یافت نشد، اما در غلظت  $14/4$  میکرومولار توریم تشکیل گونه‌های ROS به طور قابل توجهی افزایش یافت. در زمان 96 ساعت پس از تیمار با توریم، سطح گونه‌های ROS تقریباً در غلظت‌های  $10/8$  و  $14/4$  میکرومولار توریم به ترتیب 2 و 3 برابر بیشتر شد. سطح بالای ROS در داخل سلول، آسیب اکسیداتیو DNA و دیگر ماکرومولکول‌ها را در پی دارد که در نهایت مرگ سلول را موجب می‌شود [2].

گروه کنترل همه سلول‌های جلبک سبز از نظر ساختار دیواره سلولی متناسب بودند، هسته به وضوح دیده می‌شد و



شکل-3- تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ TEM از قطعات خیلی نازک جلبک سبز *Chlorella pyrenoidosa* پس از قرار گرفتن در معرض توریم به مدت 96 ساعت (A-C) سلول‌های گروه کنترل. (D-I) سلول‌های قرار گرفته در معرض توریم  $14/4$  میکرومولار. (G,I) نواحی نشان داده شده با جعبه سیاه در بخش H با بزرگنمایی بیشتر. پیکان‌های سیاه در تصاویر، نشان‌دهنده رسوب ذرات توریم است [2]

سیتوپلاسم توسط دیواره سلولی محصور شده بود (شکل-3 A-C). در مقابل، آن دسته از سلول‌های جلبک سبز که در معرض توریم  $14/4$  میکرومولار قرار گرفته بودند، طی پلاسمولیز و خیم، شکل خود را از دست داده بودند (شکل-3 E,F,H) که حاکی از سمیت بسیار زیاد توریم برای سلول‌های جلبک سبز هستند. با توجه به شکل-3 E بدیهی است که سیتوپلاسم قطعه قطعه شده و هسته سلول در مقایسه با سلول‌های سالم، نا مشخص به نظر می‌رسد که ممکن است منجر به از دست دادن عملکرد سلول‌ها شود، برای مثال سلول‌های جلبک سبز دیگر قادر به جذب مواد غذایی نخواهند بود و در نهایت می‌میرند. دیواره سلولی سلول‌های تیمار شده با توریم، نا منظم و بی قاعده به نظر می‌رسد و به تعدادی از



## تأثیر سمیت توریم بر روی دافنی ماگنا<sup>۶</sup>

## 1- تعیین میزان سمیت حاد<sup>۹</sup>

نوزادان دافنی ماگنا با عمر کمتر از 24 ساعت از سومین تا ششمین دوره تولد توسط تک والد ماده (بکرزایی) در محلول آزمایش قرار داده شدند. محلول حاوی هر فلز (توریم و سرب) در آب فوق خالص تهیه گشت و غلظت‌های مختلف آنها با رقیق کردن محلول به محیط کشت MRW اضافه شد. توریم در غلظت‌های 0، 0/43، 2/2، 4/3، 8/6، 21/6، 43/1 میکرومولار و سرب در غلظت‌های 0، 0/71، 3/6، 7/1، 14/3، 35/7 و 71/4 میکرومولار استفاده گشتند. ظرف آزمایش حاوی 50 میلی‌لیتر از محیط کشت و 8 عدد دافنی ماگنا بود و تیمار دافنی‌ها در هر غلظت تا 3 دفعه تکرار گشت. مقدار عددی EC50 برای توریم در زمان‌های 24 و 48 ساعت پس از تیمار به ترتیب 7/3 و 4/7 بود در حالی که مقدار EC50 برای سرب در زمان‌های 24 و 48 ساعت پس از تیمار به ترتیب اعداد 16/4 و 10/7 را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های به دست آمده از EC50، توریم نسبت به سرب اثر سمیت بیشتری بر روی دافنی‌ماگنا دارد. هر چند دسترس‌پذیری زیستی و مسیرهای جذب اشکال ذره‌ای فلزات با فرم‌های محلول فلزات در ارگانسیم‌های آبی مجموعه متفاوت است و مکانیسم‌های جذب آنها نیز در تحقیقات بعدی باید ارزیابی گردد. بنابراین؛ سمیت توریم ذره‌ای و سرب یونیزه بر روی دافنی‌ماگنا در چنین شرایطی به طور مستقیم نباید مقایسه شود [8].

## 2- تعیین میزان سمیت مزمن<sup>۱۰</sup>

محیط کشت MRW در این بخش نیز استفاده گشت. طریقه استفاده از موجودات دافنی ماگنا طبق آزمایشات مربوط به سمیت حاد انجام شد. اساس کار این بخش لزوماً به گونه‌ای بود که ماکسیمم غلظت مورد استفاده از فلزات توریم و سرب باید به اندازه کمتر از عدد LC50<sup>۱۱</sup> سمیت حاد باشد. از این رو غلظت‌های تعیین شده برای توریم شامل 0، 0/043، 0/086،

دافنی ماگنا که در رده آبشش‌پایان، 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 یکی از معدود تحقیقات انجام شده در رابطه با سمیت توریم در محیط زیست آبی، اثر توریم و سرب بر روی رشد، تولید مثل دافنی ماگنا مقایسه شد. در این تحقیق، توریم و سرب (از لانتنیدهای جدول تناوبی) در حالت  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  با خلوص 99 درصد مورد استفاده قرار گرفتند. در این بررسی از محیط کشت آب بازسازی شده (RW)<sup>۷</sup> و محیط کشت آب بازسازی شده اصلاح شده (MRW)<sup>۸</sup> استفاده گشت. در محیط RW از ترکیبات  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ،  $\text{KCl}$ ،  $\text{NaHCO}_3$  در آب فوق خالص استفاده گشت و pH آن بر روی 7/8 تنظیم شد. اما به دلیل اینکه در این محیط تشکیل ذرات نامحلول توریم و سرب القا می‌شد،  $\text{NaHCO}_3$  را با  $\text{NaOH}$  جایگزین کردند و به این محیط نام MRW اطلاق شد. در این آزمایش اثر سمیت حاد و مزمن توریم در مقایسه با سرب بر روی دافنی ماگنا مورد بررسی قرار گرفت [8].



شکل-4- تصویر به دست آمده از دافنی ماگنا [8]

<sup>۹</sup>- Acute toxicity

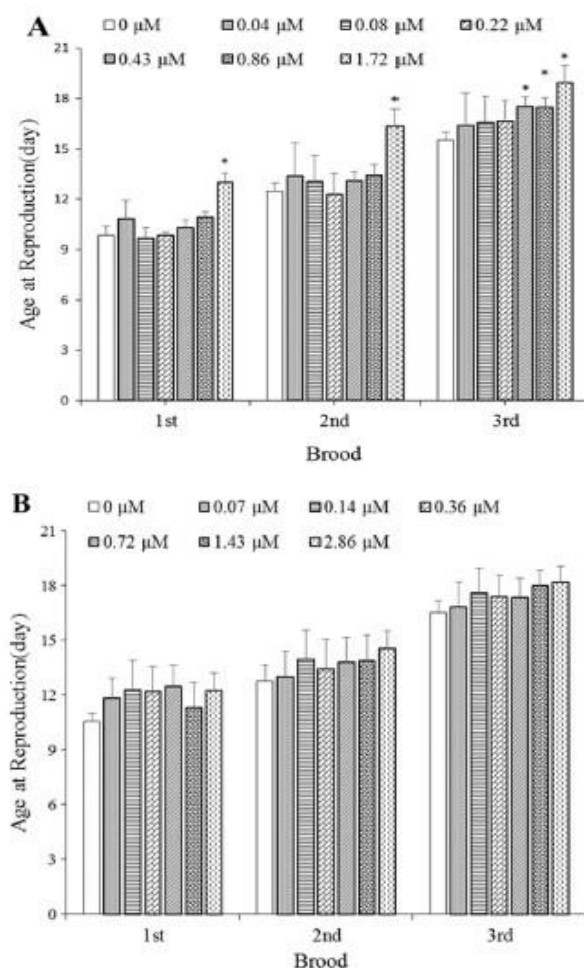
<sup>۱۰</sup>- Chronic toxicity

<sup>۱۱</sup>- Lethal concentration

<sup>۶</sup>- *Daphnia magna*

<sup>۷</sup>- Reconstituted water

<sup>۸</sup>- Modified reconstituted water



شکل 4- اثر توریم (A) و سربیم (B) بر روی زمان رهاسازی نوزادان دافنی ماگنا که در هر گروه مقدار تفاوت قابل توجه با علامت "ستاره" مشخص شده است [8]

طبق داده‌های ارزشمند به دست آمده، میزان مرگ و میر دافنی ماگنا افزایش یافت درحالی‌که میزان ماکسیمم تولید مثل در این جانداران با کاهش همراه بود. باید در نظر داشت که حضور سربیم به صورت یون‌های محلول است، اما توریم در اشکال نامحلول در محیط کشت عرضه می‌شود. بنابراین به طور کلی مکانیسم سمیت  $Ce^{3+}$  محلول و  $ThO_2$  نامحلول بر روی موجودات زنده متفاوت است. سربیم ممکن است با القای جایگزینی و یا تعویض کلسیم، تداخل در چرخه پوست اندازی دافنی ماگنا را سبب شود؛ اما توریم به عنوان یک عنصر

غلظت‌ها به صورت 0، 0/43، 0/86 و 1/72 میکرومولار و برای سربیم 0، 0/071، 0/36، 0/71، 1/43 و 2/86 میکرومولار بود و تیمار با هر غلظت از این فلزات تا 8 دفعه تکرار گشت. در هر ظرف آزمایش حاوی 25 میلی‌لیتر از محلول آزمایش، یک نوزاد دافنی ماگنا با عمر کمتر از 24 ساعت پرورش یافت. سپس جانداران به محیط کشت تازه‌تر منتقل شده و علاوه بر آن، جلبک ( $10^5$  سلول بر میلی‌لیتر) نیز به محیط آنها اضافه گشت. آزمایش تا جایی خاتمه یافت که والدهای ماده تحت کنترل سومین نسل از نوزادان خود را تولید کردند. سربیم مشابه با شرایط سمیت حاد، در حالت یون‌های محلول حضور داشت در حالی‌که توریم در پایین‌ترین و بالاترین غلظت در سمیت مزمن به صورت کریستال‌های  $ThO_2$  در محیط کشت MRW دیده می‌شد. همچنین توریم و سربیم در بالاترین غلظت‌شان هر دو منجر به مرگ و میر قابل توجهی در موجودات دافنی ماگنا شدند به طوری که در پایان آزمایش در هر گروه تنها سه عدد از موجودات دافنی ماگنا باقی مانده بودند. توریم در غلظت‌های کمتر از 0/22 میکرومولار، تأثیری بر میانگین اندازه نوزادان هر والد نداشت. هرچند در غلظت‌های 0/86 و 1/72 میکرومولار توریم، میانگین تعداد نوزادان سه مرحله زایش، به طور قابل توجهی کاهش یافت. همچنین جمعیت سومین نسل در غلظت 0/43 میکرومولار توریم به طور قابل مشاهده‌ای کاهش یافت. سربیم نیز در بالاترین غلظت خود اثر ممانعتی مشابهی را در زاد و ولد دافنی دارا بود. زمان رهاسازی نوزادان از کیسه‌های تخم دافنی ماگنا در هر سه زایش در غلظت 1/72 میکرومولار توریم به طور قابل توجهی به تأخیر افتاد که این زمان در مقایسه با گروه کنترل بیشتر از سه روز بود. علاوه بر آن غلظت‌های 0/43 و 0/86 میکرومولار توریم نرخ رها سازی نوزادان را در سومین دوره زاد و ولد کاهش دادند. در مقابل اثر قابل توجهی در زمان رها سازی نوزادان دافنی ماگنا در غلظت‌های مختلف سربیم مشاهده نشد (شکل 4 A,B). همچنین اثر قابل توجهی در بالاترین غلظت‌های توریم و سربیم بر روی رشد این موجودات مشاهده نشد [8].



تأثیر این عنصر بر روی جانداران آبی اهمیت بسزایی دارد. همان‌طور که می‌دانیم توریم فلزی رادیواکتیو با نیمه عمر 14 میلیارد سال است که دارای پرتوهای آلفا، بتا و گاما است و از خانواده اکتینیدهای جدول تناوبی به شمار می‌آید. اما تحقیقات کمی در رابطه با آثار سمیت توریم بر روی جانداران شاخص اکوسیستم‌های آبی انجام شده که از آن جمله جلبک سبز و جانور دافنی ماگنا از زیر شاخه سخت‌پوستان را می‌توان نام برد. توریم در محیط‌های کشت آبی به شکل گونه‌های نامحلول  $TH(OH)_4$  و  $THO_2$  عرضه گشت. اثر توریم بر روی جلبک سبز *Chlorella pyrenoidosa* به صورت عدد  $EC_{50}$  و با اثر ممانعتی بر روی رشد جلبک سبز، کاهش غلظت کلروفیل a، تغییرات مورفولوژیکی و فراساختاری همراه بود و این تغییرات در غلظت‌های مختلف و زمان‌های ارائه شده، آثار شدتی متفاوتی را به دنبال داشت. همچنین شواهد به دست آمده از بررسی آثار سمیت توریم بر روی دافنی ماگنا نشان داد که ذرات توریم نامحلول در مقایسه با یون‌های محلول سریم آثار سمیت حاد بیشتری بر روی جانداران دافنی ماگنا دارند. همچنین طی مرحله بررسی سمیت مزمن که از غلظت‌های کمتر توریم و سریم نسبت به سمیت حاد استفاده گشت، هر دو عنصر در بالاترین غلظتشان مرگ و میر بالایی از جانداران دافنی ماگنا را رقم زدند. همچنین توریم در غلظت‌های بالا در آزمایش سمیت مزمن، زمان رهاسازی نوزادان از تخم را در مقایسه با گروه کنترل بیشتر از سه روز به تأخیر انداخت که این اثر برای سریم مشاهده نگشت. طبق نتایج ارائه شده آشکار است که آثار سمیت توریم نسبت به سریم، جاندار دافنی ماگنا را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد اما به دلیل متفاوت بودن حلالیت و در نتیجه دسترس‌پذیری متفاوت این دو عنصر تحقیقات خیلی بیشتری برای مقایسه مستقیم توریم و سریم مورد نیاز است. در حال حاضر مسأله مهم این است که طبق نتایج مورد انتظار، توریم رادیواکتیو با این درصد فراوانی، گونه‌های آبی را تحت تأثیر قرار داده است و هنوز مکانیسم‌های دقیق سمیت و تأثیر آن بر گونه‌های دیگر

رادیواکتیو با نیمه عمر بالا به طور طبیعی پرتوهای آلفا، بتا و گاما از خود ساطع می‌کند که آثار سمی برای دافنی ماگنا همراه دارد. 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 جانداران دافنی ماگنا تولید شود [8].

مکانیسم سمیت توریم بر روی گونه‌های آبی هنوز ناشناخته است. طبق اطلاعات رسیده از تحقیقات پیشین، آلودگی‌های رایج ناشی از فلزات سنگین مانند کادمیوم، سرب و جیوه تاکنون میل ترکیبی بالایی به بیومولکول‌های حاوی گروه عاملی تیول مانند  $GSH^{12}$  و پروتئین‌های سولفیدریل نشان داده‌اند که به عنوان کاتالیزست عمل کرده و در نهایت آسیب‌های اکسیداتیو را سبب می‌شوند [9]. به دلیل اینکه توریم به صورت گونه‌های نامحلول  $TH(OH)_4$  و  $THO_2$  در محیط کشت حضور دارد، رفتار بیولوژیکی آن به احتمال زیاد از فلزات سنگین ذکر شده متفاوت خواهد بود. در رابطه با تأثیر توریم بر روی جلبک سبز سه مکانیسم برای سمیت توریم پیشنهاد شده است: 1- اثر بر روی تضعیف فرآیند فتوسنتز به وسیله کاهش نور به سلول‌های جلب سبز 2- اجتماع ناهمگن فیزیکی نانو ذرات توریم و سلول‌ها منجر به ورود نانو ذرات به داخل سلول‌های جلبک سبز شده و با آسیب غشای سلول، محتویات سلول به بیرون می‌ریزد. 3- نفوذ و ورود نانو ذرات توریم به داخل سلول‌های جلبک سبز، منجر به افزایش سطح گونه‌های ROS داخل سلول شده و پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی را سبب می‌شود [10،11].

### نتیجه‌گیری

اکوسیستم‌های آبی یکی از مهمترین بخش‌های حیات در کره‌زمین به شمار می‌آیند و نقش کلیدی در زنجیره‌های غذایی انسان و جانوران ایفا می‌کنند. با توجه به اینکه توریم از فراوان‌ترین عناصر پوسته زمین بوده و یکی از عناصر ثابت در محیط زیست آبی به شمار می‌آید لزوم بررسی و تحلیل

<sup>12</sup>. Glutathione

growth and reproduction rates of the crustacean, *Daphnia magna*. *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, **2011**, *5*, 1-10.

[6] Tomasiks, P., & Warren, D. M. The use of *Daphnia* in studies of metal pollution of aquatic systems. *Environmental Reviews*, **1996**, *4*(1), 25-64.

[7] Zhao, J., Cao, X., Liu, X., Wang, Z., Zhang, C., White, J. C., & Xing, B. Interactions of CuO nanoparticles with the algae *Chlorella pyrenoidosa*: adhesion, uptake, and toxicity. *Nanotoxicology*, **2016**, *10*(9), 1297-1305.

[8] Ma, Y., Wang, J., Peng, C., Ding, Y., He, X., Zhang, P & Sun, F. Toxicity of cerium and thorium on *Daphnia magna*. *Ecotoxicology and environmental safety*, **2016**, *134*, 226-232.

[9] Dong, W., Liu, J., Wei, L., Jingfeng, Y., Chernick, M., & Hinton, D. E. Developmental toxicity from exposure to various forms of mercury compounds in medaka fish (*Oryzias latipes*) embryos. *PeerJ*, **2016**, *4*, e2282.

[10] Ma, S., Zhou, K., Yang, K., & Lin, D. Heteroagglomeration of oxide nanoparticles with algal cells: effects of particle type, ionic strength and pH. *Environmental science & technology*, **2015**, *49*(2), 932-939.

[11] Lei, C., Zhang, L., Yang, K., Zhu, L., & Lin, D. Toxicity of iron-based nanoparticles to green algae: Effects of particle size, crystal phase, oxidation state and environmental aging. *Environmental Pollution*, **2016**, *218*, 505-512.

ناشناخته است و اکنون الزام عملی برای انجام این تحقیقات، بسیار احساس می‌شود.

### تشکر و قدردانی

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

### منابع

[1] Nisbet, H., Migdisov, A. A., Williams-Jones, A. E., Xu, H., van Hinsberg, V. J., & Roback, R. Challenging the thorium-immobility paradigm. *Scientific reports*, **2019**, *9*(1), 1-6.

[2] Peng, C., Ma, Y., Ding, Y., He, X., Zhang, P., Lan, T & Zhang, Z. Influence of speciation of thorium on toxic effects to green algae *Chlorella pyrenoidosa*. *International journal of molecular sciences*, **2017**, *18*(4), 795.

[3] Oliveira, M. S., Duarte, I. M., Paiva, A. V., Yunes, S. N., Almeida, C. E., Mattos, R. C., & Sarcinelli, P. N. The role of chemical interactions between thorium, cerium, and lanthanum in lymphocyte toxicity. *Archives of environmental & occupational health*, **2014**, *69*(1), 40-45.

[4] Evseeva, T., Geras'Kin, S., Majstrenko, T., Brown, J., & Belykh, E. Comparative estimation of <sup>232</sup>Th and stable Ce (III) toxicity and detoxification pathways in freshwater alga *Chlorella vulgaris*. *Chemosphere*, **2010**, *81*(10), 1320-1327.

[5] Ghazy, M. M. E., Habashy, M. M., & Mohammady, E. Y. Effects of pH on survival,