

## تخمین ضرایب انتقال در گیاهان خوراکی برای سزیم پرتوزا در حوادث هسته‌ای

سارا افتخاری<sup>۱</sup>، عفت یاحقی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دانشگاه بین المللی امام خمینی، گروه فیزیک، قزوین، ایران

۲- دانشیار دانشگاه بین المللی امام خمینی، گروه فیزیک، قزوین، ایران

\*ایمیل نویسنده مسئول: yahaghi@sci.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۹/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۰۳

### چکیده

هنگام حوادث هسته‌ای تخمین سریع مقدار سزیم وارد شده به گیاهان خوراکی برای حفظ سلامت انسان‌ها در مناطق حادثه دیده، اهمیت دارد و باید سریع تعیین شود. هر روشی که بتواند تخمین سریعی از مقدار ماده سزیم پرتوزا به گیاه داشته باشد مورد توجه است. در این تحقیق با استفاده از مدل دو و سه بخشی، ضرایب انتقال سزیم ۱۳۷ در اجزای چند گیاه غذایی بدست آمده است. برای محاسبه ضرایب از مدل دو و سه بخشی برای گیاهانی نظیر قارچ، کلم و اسفناج استفاده شده است. ورودی مدل اطلاعات سزیم در خاک منطقه فوکوشیما در ۸ ماه بعد از حادثه بوده است. نتایج بدست آمده از مدل سازی گیاهان خوراکی مختلف با مدل دو و سه بخشی و اطلاعات حاصل از داده های فوکوشیما برای این گیاهان، مقدار ضرایب انتقال برای بدنه قارچ، برگ اسفناج و کلم بروکلی به ترتیب ۰/۰۱۸، ۰/۰۸۰۸ و ۰/۰۹۰۸ بدست آمده که با مقادیر عملی اندازه گیری شده در گزارش فنی آژانس انرژی اتمی با شماره ۴۷۲ مطابقت دارد. ضرایب انتقال محاسبه شده با مقادیر توصیه شده در گزارش فنی آژانس انرژی اتمی مطابقت دارد و نتایج بدست آمده می تواند برای پیش بینی آلودگی پرتوزایی در صورت رخداد حادثه هسته‌ای استفاده شود.

### کلمات کلیدی

"سزیم ۱۳۷"، "حادثه هسته‌ای"، "ضرایب انتقال"، "مدل چند بخشی"، "گیاهان خوراکی"

## Estimation of transfer coefficients in Edible plants for Cs<sup>137</sup> in nuclear accidents

Sara Eftekhari<sup>1</sup>, Effat Yahaghi<sup>2\*</sup>

1. Student of Imam Khomeini International University, Department of Physics, Qazvin, Iran

\*2. Associate Professor, Imam Khomeini International University, Department of Physics, Qazvin, Iran

\*Email Address: yahaghi@sci.ikiu.ac.ir

### Abstract

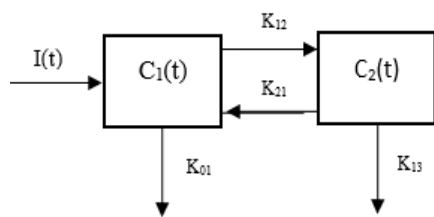
Estimation of the cesium is important because it enters the human food cycle during nuclear accidents. To prevent endangerment of human health, the level of radiation contamination in edible plants in the affected areas should be determined. In this research, using two- and three-compartmental models, transfer coefficients of <sup>137</sup>Cs have been obtained in the plant components. To calculate the transfer coefficients, two- and three-part models have been used for plants such as mushrooms, cabbage and spinach. The input of model was the cesium information in the soil of Fukushima for 8 months after the accident. The results obtained from modeling of the different edible plants with two- and three-part models and information of the Fukushima data for these plants show that the values of transfer coefficients for the body of mushrooms, spinach leaves and broccoli were 0.018, 0.0808 and 0.0908, respectively, which corresponds to the practical values measured in the Atomic Energy Agency Technical Report No. 472. The calculated transfer coefficients correspond to the values recommended in the technical report of the Atomic Energy Agency and the obtained results can be used to predict radioactive contamination in the nuclear accidents.

### Keywords

"Cesium 137", "Nuclear accident", "Transfer coefficients", "Multi-compartmental model", "Edible plants"

۱- مقدمه

رادیونوکلئیدها، مدل چندبخشی می‌باشد که می‌توان جهت بررسی سیستم‌های زیست محیطی از آن استفاده کرد (Gerald, 2003) و (Blomhoj, 2005). این مدل، سیستم مدنظر را به چند بخش تقسیم کرده و عملکرد بخش‌ها را که توصیف کننده مقدار جذب ماده پرتوزا است بررسی می‌کند. مدل چندبخشی با به کارگیری معادلات دیفرانسیل با ضرایب ثابت به توصیف سیستم می‌پردازد و ارتباط یک بخش با بخش‌های دیگر را تعیین می‌کند (Yahaghi, 2017) برای مثال، جهت بررسی نحوه توزیع و جذب سزیم ۱۳۷ در گیاهی مانند قارچ که سیستم ساقه مجزا ندارد می‌توان مدل دو بخشی را به کار برد که شامل قارچ و قسمت ریشه آن است و با یک معادله دیفرانسیل، ضرایب انتقال و جذب بین دو بخش را محاسبه می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱- مدل دو بخشی قارچ برای بررسی نحوه توزیع سزیم ۱۳۷

در شکل ۱،  $C_1(t)$  و  $C_2(t)$  به ترتیب، توابع غلظت سزیم ۱۳۷ در بخش‌های ۱ و ۲ هستند که میزان پرتوزایی لحظه‌ای را در هر بخش نشان می‌دهند. ضرایب  $K_{21}$  و  $K_{12}$  ضرایب انتقال بین دو بخش قارچ و ریشه آن است،  $I(t)$  تابع ورودی سزیم از خاک به ریشه قارچ است.  $K_{01}$  و  $K_{13}$  ضرایب خروج سزیم از بدنه و ریشه قارچ هستند.  $K_R$  آهنگ تغییرات پرتوزایی سزیم پرتوزاست. معادلات تغییرات غلظت سزیم در هر بخش به این ترتیب است:

$$\frac{dC_1}{dt} = I(t) - K_{12}C_1 + K_{21}C_2 - K_R C_1 - K_{01}C_1 \quad (1)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = K_{12}C_1 - K_{21}C_2 - K_R C_2 - K_{13}C_2 \quad (2)$$

با توجه به داده‌های بدست آمده از حادثه فوکوشیما، قارچ بررسی شده در این تحقیق لکسینوم<sup>۱</sup> است که مصرف خوراکی دارد و در بسیاری از غذاهای محلی استفاده می‌شود (شکل ۲). قسمت بدنه و کلاهک قارچ بخش  $C_2$  و قسمتی که در خاک است بخش  $C_1$  در نظر گرفته شده‌اند. ماده پرتوزا سزیم بین دو بخش همراه آب و مواد غذایی منتقل شده و قسمتی از آن مطابق فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه، متناسب با ضرایب  $K_{01}$  و  $K_{13}$  از آن خارج می‌شود.  $I(t)$  مقدار پرتوزایی سزیم در خاک در روزهای هنگام حادثه و بعد از آن است. دیده می‌شود که

در پی بروز حوادث هسته‌ای، مواد رادیواکتیو به محیط اطراف منتشر می‌شود که سبب خطرات جانی برای انسان‌ها خواهد شد. مواد پرتوزا علاوه بر آلوده کردن محیط اطراف تاسیسات به همراه وزش باد و بارش برف و باران، به مناطق دیگر نیز انتقال می‌یابد و وسعت بیشتری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین عناصر پرتوزا که در سطح زمین نشست می‌کنند، می‌توانند از طریق خاک به ریشه و ساقه و در نهایت میوه درختان و گیاهان نفوذ کنند. فرایند انتقال این مواد به گیاهان می‌تواند با ضرایب انتقال بیان شود که تجمع رادیونوکلئیدها را در گیاه نشان می‌دهد (Holzbcher, 2006). بعلاوه جذب مواد پرتوزا در گیاهان سبب آلودگی جانوران منطقه شده و در زنجیره غذایی تاثیرگذار است که سلامت انسان را تهدید می‌کند. برای بررسی رادیونوکلئیدهای انتشار یافته در محیط زیست، اطلاعاتی درباره طول نیمه عمر و نحوه انتقال عناصر پرتوزا در خاک و مواد دیگر، امری بسیار مهم تلقی می‌شود. آن دسته از عناصر پرتوزا که دارای نیمه عمر کوتاهی هستند، برای زنجیره غذایی تهدید محسوب نمی‌شوند ولی عناصری با نیمه عمر طولانی‌تر حائز اهمیت هستند. از جمله رادیویزوتوپ‌هایی که طی حادثه هسته‌ای به محیط اطراف انتشار می‌یابند،  $^{137}\text{Cs}$  و سزیم-۱۳۷ هستند که به ترتیب دارای نیمه عمر ۸ روز و ۳۰ سال می‌باشند (Radiol, 2007). با توجه به این که سزیم رادیوکتیو نیمه عمر طولانی‌تری دارد، می‌تواند مدت زمان بیشتری در محیط باقی بماند و نسبتاً سریع جذب گیاهان مختلف از جمله گیاهانی که مصرف خوراکی دارند شود و در ادامه فرایند وارد بدن انسان می‌شود. با ورود سزیم-۱۳۷ به بدن، سزیم در سراسر بافت نرم به طور یکنواخت توزیع می‌شود و روی سلامت انسان اثرات مخربی دارد. میزان آسیب بافت بر اثر مواد پرتوزا بسته به نوع رادیونوکلئید و میزان پرتوزایی متفاوت خواهد بود. پس لازم است تا میزان غلظت مواد رادیواکتیو در محیط، چگونگی انتقال رادیونوکلئیدها در بخش‌های مختلف از جمله خاک، گیاه و میوه و مقادیر ضرایب انتقال و جذب مربوط به هر بخش مورد بررسی قرار گرفته و تعیین شوند (Yahaghi, 2017) و Zhu, 2000). برای این کار باید مدل‌سازی مناسب صورت بگیرد تا با شبیه‌سازی حادثه هسته‌ای بتوان به مقادیر مطلوب دست یافت. همچنین می‌توان با مقایسه مقادیر به دست آمده با مقادیر واقعی، میزان دقت مدل سازی انجام شده را تشخیص داد. در این تحقیق از مدل چند بخشی برای مدسازی گیاهان مختلف استفاده شده است تا مقدار ضرایب انتقال آن‌ها محاسبه شود. گیاهان مورد نظر قارچ، اسفناج و کلم بوده‌اند و برای مدل‌سازی از اطلاعات حادثه فوکوشیما استفاده شده است (Blomhoj, 2000).

۲- روش انجام تحقیق

پس از حادثه هسته‌ای، نظارت بر محیط زیست، محصولات کشاورزی، جنگلداری و شیلات از عوامل مهم جهت حفظ سلامت انسان به حساب می‌آید. از جمله موارد پیشگیری کننده از آلودگی تعیین مقدار ماده پرتوزا در مواد غذایی مختلف است. هنگام حوادث هسته‌ای اختصاص امکانات و تجهیزات کافی برای تمام مناطق کار سختی است. راه ساده و سریع برای تعیین میزان آلودگی می‌تواند استفاده از شبیه‌سازی باشد. برای این منظور، ابتدا باید میزان غلظت آلودگی محیط زیست به مواد رادیواکتیو از جمله سزیم ۱۳۷ تعیین شود تا بتوان با مدل‌سازی مناسب، مقادیر ضرایب انتقال و جذب مربوط به خاک، گیاه و میوه را محاسبه کرد. بهترین مدل برای توصیف انتقال و جذب

<sup>1</sup> Leccinum

$$\frac{dC_3}{dt} = K_{13}C_2 - K_{31}C_3 - K_R C_3 \quad (5)$$

در این تحقیق با حل معادلات چند بخشی با روش عددی رانگ کوتای مرتبه (Gerald, 2003) مقدار سزیم موجود در بخش‌های مختلف گیاه بدست آمده است. ورودی معادلات مقدار سزیم موجود در خاک در نظر گرفته شده است. با مقایسه دسته منحنی‌های بدست آمده با داده‌های واقعی می‌توان مقدار ضرایب انتقال در بخش‌های مختلف را بدست آورد. در اینجا با استفاده از دو مدل دو و سه بخشی و داشتن پرتوزایی خاک و گیاهان و با استفاده از داده‌های فوکوشیما ضرایب انتقال بین بخش‌ها را به دست آورد.

### ۳- نتایج

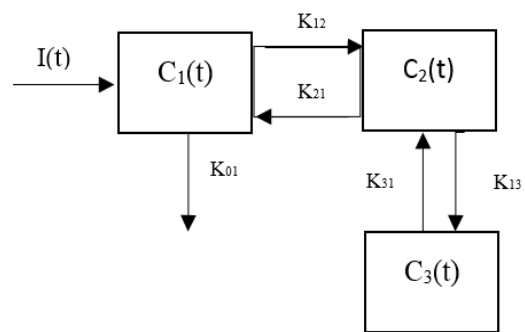
در این تحقیق برای بدست آوردن ضرایب انتقال ماده سزیم پرتوزا به گیاهان خوراکی از مدل دو و سه بخشی استفاده شده است. گیاهان مورد نظر قارچ، اسفناج و کلم بروکلی بوده‌اند که مصرف خوراکی دارند. برای بررسی و تخمین ضرایب انتقال با توجه به ساختار گیاهان از مدل‌های دو و سه بخشی استفاده شده است. برای ورودی شکل ۴ که تغییرات سزیم در خاک را نشان می‌دهد (نشانگر لوزی) (MEXTT, 2011، روابط (۳) تا (۵) به ازای K های مختلف حل شده و با مقایسه با داده‌های واقعی حاصل از داده‌های فوکوشیما برای قارچ، اسفناج و کلم بروکلی، ضرایب انتقال بین بخش‌های مختلف بدست آمده است. علت تغییرات سزیم در روزهای مختلف به تغییرات آب و هوایی مانند باد و باران و سایر عوامل محیطی بستگی دارد. برای حل معادلات دیفرانسیل از روش رانگ کوتای مرتبه ۴ که روش عددی پرکاربرد در حل دسته معادلات است در محیط برنامه نویسی (MATLAB 2016) استفاده شده است. نمونه‌ای از دسته منحنی‌های بدست آمده با تغییرات K در قسمت‌های مختلف گیاهان و داده‌های واقعی برای گیاه در شکل ۵ نشان داده شده است. با محاسبه تفاوت‌های بین منحنی‌های بدست آمده از معادلات و داده‌های واقعی (شکل ۵)، برای کمترین اختلاف مقادیر K ها تخمین زده شده است. در جدول ۱ مقادیر محاسبه شده برای K های مختلف برای قارچ، اسفناج و کلم بروکلی نشان داده شده است. برای قارچ بیشترین ضریب انتقال از ریشه به بدنه قارچ است که ۰/۵۶۰۸۸ که باعث تجمع سزیم در بدنه قارچ می‌شود. برای ارزیابی نتایج از استاندارد کمیته بین المللی حفاظت در برابر اشعه برای سزیم استفاده شده است (NCRP, 2008 Technical Reports SeriEs No. 472). در این استاندارد بر اساس نوع محصول، نوع خاک، نیمه عمر  $^{137}\text{Cs}$  و تنوع آب و هوایی مناطق مختلف محدوده‌هایی برای ضریب انتقال کل گیاهان مورد نظر داده شده است. محدوده پیشنهادی طبق این استاندارد برای قارچ لکسنیوم  $10^{-4}$  تا  $8 \times 10^{-4}$  در شرایط اندازه‌گیری برای گیاه خشک شده است. برای انجام آزمایشات و سنجش پرتوزایی با دستگاه، باید از نمونه‌های خشک خاک و گیاه استفاده کرد. زیرا اگر در نمونه‌ها رطوبتی وجود داشته باشد، در این صورت با تابش، هیدروژن موجود در آب نیز پرتوزا خواهد شد و در نتایج آزمایش و داده‌های نهایی اثرگذار خواهد بود. از این رو پرتوزایی به دست آمده، فراتر از میزانی که در واقع وجود دارد، نشان داده می‌شود. برای اسفناج و کلم مقادیر بصورت خاص در این استاندارد ذکر نشده و محدوده فقط برای گیاهان برگ‌دار آورده شده است که برای خاک معمولی و رسی محدوده تغییرات به

بیشترین مقدار سزیم در خاک در روزهای اولیه حادثه است و بعد از آن با فرآیندهای طبیعی مانند باران و شستشوی خاک و همچنین پرتوزایی سزیم، مقدار آن بتدریج کاهش پیدا می‌کند. برای بررسی گیاهانی مانند اسفناج و کلم بروکلی که می‌توان آنها را به سه بخش برگ، ساقه و ریشه تقسیم کرد و با استفاده از مدل سه بخشی می‌توان ضرایب انتقال بین بخش‌ها را به دست آورد.



شکل ۲- قارچ از نوع لکسنیوم

در شکل ۳، مدل سه بخشی نشان داده شده است. سه بخش برگ، ساقه و ریشه به ترتیب  $C_1(t)$ ،  $C_2(t)$ ،  $C_3(t)$  هستند که توابع غلظت سزیم ۱۳۷ را نشان می‌دهند. ضرایب  $K_{12}$  و  $K_{21}$  ضرایب انتقال بین دو بخش ساقه و ریشه،  $K_{13}$  و  $K_{31}$  ضرایب انتقال بین ساقه و برگ هستند.  $I(t)$  تابع ورودی سزیم از خاک به ریشه گیاه است.  $K_{01}$  ضریب خروج سزیم از ریشه گیاه به خاک است.  $K_R$  آهنگ تغییرات پرتوزایی سزیم پرتوزاست.

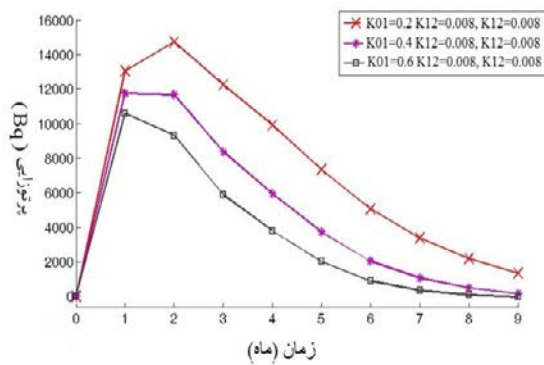


شکل ۳- مدل سه بخشی گیاهان برای بررسی نحوه توزیع سزیم-۱۳۷

معادلات تغییرات غلظت سزیم در هر بخش به این ترتیب است:

$$\frac{dC_1}{dt} = I(t) - K_{12}C_1 + K_{21}C_2 - K_R C_1 - K_{01}C_1 \quad (3)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = K_{12}C_1 - K_{21}C_2 - K_R C_2 - K_{13}C_2 + K_{31}C_3 \quad (4)$$



شکل ۵ سه نمونه از منحنی خروجی در مدل دو بخشی با ضرایب انتقال مختلف

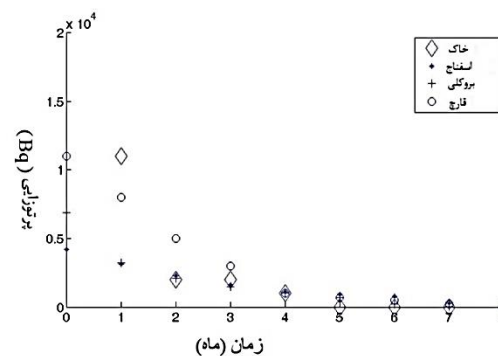
#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق ضرایب انتقال  $^{137}\text{Cs}$  در بخش‌های مختلف گیاهان خوراکی از جمله قارچ، اسفناج و کلم بروکلی با استفاده از مدل دو و سه بخشی محاسبه شده است. در این شبیه سازی که با نرم افزار MATLAB انجام شده، هدف، محاسبه ضرایب انتقال است که در موارد ضروری بتوان با آنها از روی میزان تراکم آلودگی پرتوی در خاک، مقدار آلودگی گیاهان خوراکی را در موارد حادثه هسته‌ای به سرعت محاسبه کرد. با مقایسه مقادیر بدست آمده و مقادیر واقعی که در گزارش فنی آژانس انرژی اتمی آمده است، می‌توان همخوانی اعداد و ارقام حاصل شده و مقادیر موجود در مراجع را به ملاحظه کرد. به کارگیری این ضرایب در روزهای اولیه حوادث هسته‌ای که امکانات لازم برای اندازه‌گیری دقیق آلودگی در گیاهان خوراکی وجود ندارد بسیار سودمند خواهد بود.

ترتیب  $10^{-1}$  تا  $10^{-2}$  و  $10^{-1}$  تا  $10^{-2}$  ذکر شده است. مقایسه نتایج جدول ۱ با محدوده‌های استاندارد ذکر شده نشان می‌دهد که ضرایب انتقال محاسبه شده برای قسمت‌های مختلف گیاهان موردنظر در محدوده پیشنهاد شده در این استاندارد هستند.

جدول ۱- ضرایب انتقال محاسبه شده برای Cs137

	قارچ	اسفناج	کلم بروکلی
K <sub>01</sub>	۰/۱۸	۰/۸۰۸	۰/۹۰۸
K <sub>12</sub>	۰/۵۶۰۸۸	۰/۹۲۰۸۸	۰/۷۴۰۸۸
K <sub>21</sub>	۰/۱۲۰۸۸	۰/۱۲۰۸۸	۰/۱۲۰۸۸
K <sub>13</sub>	۰/۰۱۸	۰/۰۸۰۸	۰/۰۹۰۸
K <sub>31</sub>	—	۰/۰۴۰۴	۰/۰۴۵۴



شکل ۴ پرتوایی خاک و گیاهان مختلف برحسب فرایندهای طبیعی و زمان- داده های فوکوشیما (MEXTT, 2011)

#### منابع

- Blomhoj M., Kjeldsen T.H., eaching mathematical modelling through project work, April 2006ZDM: the international journal on mathematics education 38(2):163-177, DOI: 10.1007/BF02655887
- Holzbcher, E. 2006. Environmental Modeling Using MATLAB, Springer, P. 47-62.
- Gerald, C., Wheatley, P. 2003. Applied Numerical Analysis, Pearson, P. 340-347.
- MEXT. 2011. Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan (MEXT).
- Radiol, J. 2007. Cesium-137 in the Environment: Radioecology and Approaches to Assessment and Management. JOURNAL OF RADIOLOGICAL PROTECTION, P. 27: 375-377.
- NCRP Report No. 154. 2007. Cesium-137 in the Environment: Radioecology and Approaches to Assessment and Management Radiation Protection. Journal of Radiological Protection, p. 415.
- Technical Reports SeriEs No. 472, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, International atomic energy agency.
- Yahaghi, E., Bahman Abadi, N. 2017. Calculation of transfer coefficients in root vegetables for Cesium-137, Journal of Environmental Science and Technology (JEST), P. 74:29-36, DOI: 10.22034/jest.2017.11067.
- Zhu Y.G., Smolders E. 2000. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application, Journal of Experimental Botany, Vol. 51, Issue. 351, P. 1635-1645, https://doi.org/10.1093/jexbot/51.351.1635.