

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره نوزدهم، شماره سه، پاییز ۹۶

## محاسبه ضرایب انتقال در سبزیجات ریشه‌ای برای سزیم ۱۳۷

عفت یاحقی<sup>۱\*</sup>

[yahaghi@sci.ikiu.ac.ir](mailto:yahaghi@sci.ikiu.ac.ir)

نجمه بهمن آبادی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۹

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۲۷

### چکیده

**زمینه و هدف:** یکی از مهم‌ترین رادیو نوکلئویدهایی که بر اثر حوادث هسته‌ای در محیط زیست منتشر می‌شود سزیم-۱۳۷ است. این فلز در لایه‌های بالایی خاک باقی مانده و با گذشت زمان به عمق‌های زیرین خاک نفوذ کرده و توسط ریشه گیاهان جذب می‌شود و به زنجیره غذایی انسان راه می‌یابد و روی آن تاثیر می‌گذارد. بنابراین پیش بینی مقدار سزیم جذبی در سبزیجاتی که ریشه خوراکی دارند، می‌تواند برای تامین سلامت انسان‌ها مفید باشد.

**روش بررسی:** در این تحقیق با استفاده از مدل چندبخشی، پارامترهای انتقال و جذب سزیم ۱۳۷ در اجزای مختلف سبزیجات ریشه‌ای به دست آمده است. برای محاسبه پارامترها از داده‌های اندازه‌گیری شده در سبزیجات بعد از حادثه فوکوشیما استفاده شده است. ورودی مدل چند بخشی، داده‌های به دست آمده از تجمع سزیم در سطح خاک و مقدار سزیم در اجزای مختلف گیاه به خصوص ریشه آن است. **یافته‌ها:** نتایج به دست آمده نشان می‌دهد از مدل سازی سبزیجات مختلف ریشه‌ای با استفاده از مدل چند بخشی و اطلاعات حاصل از داده های فوکوشیما، مقدار ضرایب انتقال در ریشه برای هویج و شلغم به ترتیب ۰/۰۳۹ و ۰/۰۳۱ برای ریشه و خاک بدست آمده که با مقادیر عملی اندازه‌گیری شده برای خاک لومی کشاورزی که ۰/۰۳۷ است، مطابقت دارد.

**بحث و نتیجه گیری:** ضرایب انتقال محاسبه شده با مقادیر توصیه شده در استاندارد کمیته بین المللی حفاظت در برابر اشعه مطابقت دارد و نتایج به دست آمده می‌تواند برای پیش بینی آلودگی پرتوزایی در صورت رخداد حادثه هسته‌ای استفاده شود.

**واژه های کلیدی:** سزیم ۱۳۷، حادثه هسته ای، ضرایب انتقال، مدل چند بخشی.

۱- دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران \* (مسوول مکاتبات).  
۲- کارشناس ارشد فیزیک هسته‌ای، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران.

## Calculation of transfer coefficients in root vegetables for Cesium-137

Effat Yahaghi<sup>1\*</sup>

[yahaghi@sci.ikiu.ac.ir](mailto:yahaghi@sci.ikiu.ac.ir)

Najmeh Bahman Abadi<sup>2</sup>

### Abstract

**Background and Objective:** Cesium-137 is one of the most important radioactive nuclides which are released into the environment during nuclear accidents. This metal remains in high layers of the soil and by the time diffuse to the lower depths of the soil and absorbed by plant roots and finally it will enter the human chain and effects directly on the human health. Therefore, the use of appropriate models for prediction of the Cs absorption in root vegetables can help on the human health.

**Method:** In this study, transfer coefficients and Cs-137 uptake in the root vegetables is investigated by compartmental model. Data of Fukushima accident were used for the calculation of parameters in the plants. Data of Cs concentration in soil and in root of vegetables are as inputs.

**Findings:** The result shows the calculated transfer coefficients for soil to root of vegetable is 0.031 for turnip and 0.039 for carrot, in the same order of reference 0.037 for the loam soil of agricultural and root vegetables.

**Discussion and Conclusion:** The calculated transfer coefficients are in a very good consistency to the recommended NCRP. This result can be used for predicting the nuclear contamination in the nuclear accident.

**Key words:** Cesium 137, Nuclear Accident, Transfer Coefficients, Compartmental Model.

---

1- Associate Professor, Department of Physics, Imam Khomeini International University, Faculty of Science, Qazvin, Iran \*(Corresponding Author).

2- M.Sc. in Nuclear Physics, Department of Physics, Faculty of Science, Islamic Azad University West Tehran Branch, Tehran, Iran.

## مقدمه

میزان  $^{137}\text{Cs}$  در سطح خاک به شرایط آب و هوایی، میزان بارندگی و چگونگی توزیع آن بستگی دارد.  $^{137}\text{Cs}$  روی خاک نشست کرده و به مرور زمان به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند. برای اندازه‌گیری مقدار  $^{137}\text{Cs}$  در لایه‌های زیرین خاک یا باید از روش اندازه‌گیری مستقیم استفاده کرد و یا می‌توان معادله حاکم بر نحوه نفوذ سزیم در خاک را حل کرد. برای تعیین مقدار غلظت  $C(\text{Bq}/\text{cm}^2)$  در لایه‌های مختلف خاک می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد (۲):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial h^2} - v \frac{\partial C}{\partial h} - \lambda C \quad (1)$$

در این رابطه  $C$  میزان آلودگی برحسب  $(\text{Bq}/\text{cm}^2)$ ،  $v$  سرعت حرکت موثر سزیم پرتوزا بر حسب  $(\text{Cm}/\text{y})$ ،  $D$  ضریب پراکندگی برحسب  $(\text{Cm}^2/\text{y})$ ،  $\lambda$  ضریب واپاشی هسته پرتوزا بر حسب  $(\text{y}^{-1})$ ،  $t$  زمان تجمع برحسب  $(\text{y})$  و  $h$  عمق عمودی بر حسب  $(\text{Cm})$  است.  $D$  و  $v$  مقادیر ثابتی نبوده و برای انواع خاک مقادیر آن‌ها تغییر می‌کند. هر خاک بر اساس درصد وجود ماسه ۱، سیلت ۲ و رس ۳ طبقه‌بندی می‌شود. در اینجا  $D$  و  $v$  برای خاک کشاورزی در نظر گرفته شده است. معمولاً برای رویش گیاهان بهتر است خاک استفاده شده از نوع لوم ماسه ۴ باشد بر اساس مثلث بافت خاک اگر محدوده وجود ماسه مابین ۵۰ تا ۷۰٪ باشد و مقدار رس کم باشد می‌توان از آن به‌عنوان خاک کشاورزی استفاده کرد (۷-۹). رابطه (۱) را می‌توان با در نظر گرفتن مقدار غلظت سزیم در زمان‌های مختلف در روی خاک حل کرد و مقدار غلظت سزیم در لایه‌ها را برحسب زمان به دست آورد.

## ۲.۲ مدل چند بخشی

سزیم  $^{137}\text{Cs}$  عنصر پرتوزایی است که دارای نیمه عمر نسبتاً بالای ۳۰/۷ سال می‌باشد و در اثر حوادث هسته ای در محیط پخش می‌شود (۱-۳). به علت نیمه عمر بالای سزیم آلودگی آن تا مدت زیادی در محیط زیست باقی می‌ماند و می‌تواند به راحتی از طریق سبزیجات و حیوانات به زنجیره‌ی غذایی وارد شود. چون سزیم و پتاسیم از نظر شیمیایی مشابه هستند و مسیر سوخت و سازشان از برخی جهات یکسان است می‌توانند باعث بروز آلودگی پرتوزایی در بدن انسان شوند. جذب سزیم در سبزیجات معمولاً به علت نشست سزیم روی خاک و نفوذ تدریجی آن به لایه‌های زیرین خاک صورت می‌گیرد (۲،۴). سزیم نفوذی از طریق ریشه وارد گیاه شده و به سایر اجزای آن می‌رود. میزان جذب  $^{137}\text{Cs}$  در خاک به نوع آب و هوا، رطوبت خاک، سرعت حرکت آب در خاک و میزان نفوذ آن بستگی دارد. با استفاده از معادلات پخش مواد در خاک می‌توان چگونگی نفوذ و مقدار  $^{137}\text{Cs}$  در لایه‌های مختلف خاک را به دست آورد. در این معادله ضخامت خاک، ضریب نفوذ ماده پرتوزا در خاک، جنس خاک (تخلخل) و زمان در مقدار سزیم پرتوزای پخش شده در خاک تاثیر گذار است (۴-۶).

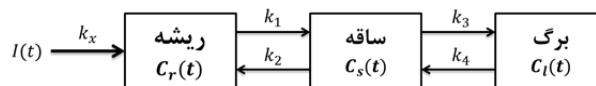
$^{137}\text{Cs}$  موجود در خاک توسط ریشه گیاه جذب شده و از راه ساقه به قسمت‌های مختلف مانند برگ و میوه می‌رود. مقدار انتقال ماده پرتوزا به هر قسمت توسط ضریب انتقال ماده پرتوزا در هر قسمت مشخص می‌شود (۸-۱۰). در این تحقیق برای محاسبه ضرایب انتقال  $^{137}\text{Cs}$  از مدل چند بخشی استفاده شده است. در این مدل سبزیجات ریشه‌ای به بخش‌های مختلفی تقسیم شده‌اند که با غشا و یا فیزیولوژی خاصی از هم جدا می‌شوند. ورودی مدل مقدار آلودگی خاک در زمان‌های مختلف و پرتوزایی اجزای مختلف گیاه است و هدف به دست آوردن مقدار ضرایب انتقال بین بخش‌های مختلف سبزیجات ریشه‌ای می‌باشد (۹،۱۲-۹،۲).

## روش‌ها

## ۱.۲ معادلات پخش مواد در خاک

- 1- sand
- 2- silt
- 3- clay
- 4- Sandy loam

وارد شده و نسبت به مدل ارایه شده از ریشه به برگ و یا از ریشه به ساقه و از ساقه به برگ یا راه‌های مختلف انتقال می‌یابد. شکل (۱) مدل سه بخشی گیاه برای بررسی ضرایب انتقال  $^{137}\text{Cs}$  را نشان می‌دهد.



شکل ۱- مدل سه بخشی گیاه برای بررسی ضرایب انتقال  $^{137}\text{Cs}$

Figure 1. The three-compartmental model for the  $^{137}\text{Cs}$  transfer coefficients

نظرگرفتن شرایط اولیه خاص به حل معادلات می‌پردازد. در روش اوایلر که خطا از مرتبه‌ی مجذور طول گام است، با افزایش طول گام و افزایش بازه‌ی مورد بررسی خطای قابل ملاحظه‌ای در محاسبات ایجاد می‌شود، اما در روش رانگ‌کوتا خطا از مرتبه‌ی توان چهارم طول گام است. در ادامه الگوریتم رانگ‌کوتا برای حل دسته معادلات (در این تحقیق برای سه معادله) توضیح داده شده است. با استفاده از روش رانگ‌کوتای مرتبه ۴ مجهولات چنین است:

$$\begin{cases} f_1 = f(c_{rn}, c_{sn}, c_{ln}) \\ g_1 = g(c_{rn}, c_{sn}, c_{ln}) \\ k_1 = k(c_{rn}, c_{sn}, c_{ln}) \end{cases} \quad (3)$$

$f_1$ ،  $g_1$  و  $k_1$  مقادیر توابع  $C_s$ ،  $C_r$  و  $C_l$  در شرایط اولیه‌ی پرتوزایی در ریشه، ساقه و برگ هستند. روابط بازگشتی به این ترتیب محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} f_2 = f\left(c_{rn} + \frac{1}{2}hf_1, c_{sn} + \frac{1}{2}hg_1, c_{ln} + \frac{1}{2}hk_1\right) \\ g_2 = g\left(c_{rn} + \frac{1}{2}hf_1, c_{sn} + \frac{1}{2}hg_1, c_{ln} + \frac{1}{2}hk_1\right) \\ k_2 = k\left(c_{rn} + \frac{1}{2}hf_1, c_{sn} + \frac{1}{2}hg_1, c_{ln} + \frac{1}{2}hk_1\right) \end{cases} \quad (4)$$

$f_2$ ،  $g_2$  و  $k_2$  مقادیر توابع  $C_r$ ،  $C_s$  و  $C_l$  در مرحله‌ی دوم و به ازای مجموع مقادیر شرایط اولیه و ضریبی از گام  $h$  چنین به دست می‌آیند:

بهترین مدل چند بخشی برای گیاهان تقسیم گیاه به بخش‌های اصلی یعنی ریشه، ساقه و برگ می‌باشد. در گیاهانی که بخشی نسبت به بخش‌های دیگر از اهمیت کمتری برخوردار است، می‌توان مدل را ساده‌تر در نظر گرفت و بخش کم‌اهمیت را حذف کرد. در هر دو مدل بخش اول ریشه در نظر گرفته می‌شود و سزیم پرتوزا جذب‌شده توسط خاک ابتدا به ریشه

در شکل (۱)،  $C_r(t)$ ،  $C_s(t)$  و  $C_l(t)$  به ترتیب پرتوزایی در ریشه، ساقه و برگ را نشان می‌دهد. ضرایب  $k$  نشان‌گر ضرایب انتقال بین بخش‌ها می‌باشد،  $k_1$  و  $k_2$  ضرایب انتقال بین ریشه و ساقه و  $k_3$  و  $k_4$  ضرایب بین ساقه و برگ می‌باشد.  $k_x$  میزان سزیم پرتوزایی را که از طریق خاک به ریشه انتقال می‌یابد، نشان می‌دهد.  $I(t)$  میزان  $^{137}\text{Cs}$  وارد شده از طریق خاک را در زمان‌های مختلف مشخص می‌کند. رابطه (۲) دستگاه معادلات حاکم بر مدل سه بخشی شکل، برای بررسی توزیع  $^{137}\text{Cs}$  در گیاه را نشان می‌دهد.

$$\begin{cases} \frac{dC_r}{dt} = k_x I(t) - k_1 C_r + k_2 C_s - \lambda_R C_r \\ \frac{dC_s}{dt} = k_1 C_r - (k_2 + k_3) C_s + k_4 C_l - \lambda_R C_s \\ \frac{dC_l}{dt} = k_3 C_s - k_4 C_l - \lambda_R C_l \end{cases} \quad (2)$$

$\lambda_R$  ضریب واپاشی  $^{137}\text{Cs}$  را نشان می‌دهد و سایر ضرایب در معادلات، قبلاً توضیح داده شده است. با توجه به این‌که داده‌های سزیم نشست کرده در سطح خاک موجود است،  $I(t)$  را می‌توان در لایه‌های مختلف خاک با توجه به بخش ۱-۲ به دست آورد. یکی از روش‌های عددی مفید برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل روش رانگ‌کوتا<sup>۱</sup> می‌باشد که با در

محاسبه شده است. نتایج شکل (۳) تغییرات غلظت سزیم در عمق‌های مختلف خاک را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که با افزایش عمق، غلظت سزیم کمتر شده است. برای محاسبه ضرایب انتقال، روابط (۲) برای مدل چند بخشی به ازای  $k$  های مختلف حل شده و با مقایسه منحنی‌های به دست آمده با داده‌های واقعی حاصل از چند گیاه ریشه‌ای، ضرایب انتقال بین بخش‌های مختلف محاسبه شد. برای حل معادلات دیفرانسیل از روش رانگ کوتای مرتبه ۴ استفاده گردید. تفاوت این روش نسبت به روش‌های عددی دیگر کمتر بودن خطای آن است. در این تحقیق با داشتن ورودی  $I(t)$  که غلظت سزیم در خاک است و تغییر پارامترهای ضرایب انتقال، بهترین منحنی بر داده‌های به دست آمده از گیاهان شلغم و هویج در روزهای حادثه فوکوشیما برآزش شد و ضرایب انتقال بین بخش‌های مختلف به دست آمد. در داده‌های موجود سزیم در قسمت خوراکی گیاه اندازه‌گیری شده بود و داده‌های ساقه و برگ‌ها در اطلاعات موجود نبود. بنابراین برآزش روی این داده‌ها انجام شد و ضرایب انتقال به دست آمد. نمونه‌ای از این داده‌های واقعی در شکل (۴) نشان داده شده است (۱۲). در جدول (۱) مقادیر محاسبه شده برای  $k$  های مختلف برای سبزیجات شلغم و هویج نشان داده شده است. نتایج بیان می‌کند که ضریب انتقال  $k_x$  که نشان دهنده ضریب انتقال سزیم از خاک به ریشه است، با ضریب  $C_r$  که همان نسبت غلظت سزیم پرتوزا خاک به گیاه برای خاک لومی و سبزیجات ریشه‌ای است، مطابقت دارد. باید دقت کرد که در این گیاهان ریشه همان میوه خوراکی گیاه است، بنابراین مقادیر به دست آمده ضریب انتقال در واقع مربوط به ضرایب انتقال سزیم به ریشه گیاه یا همان شلغم و هویج هستند. این مقدار مطابق استاندارد کمیته بین‌المللی حفاظت در برابر اشعه ۰/۰۳۷ می‌باشد (۱۴). اصلی‌ترین عاملی که باعث اختلاف در محاسبه ضریب انتقال نتایج می‌شود، نوع محصول، نوع خاک و طول زمان  $^{137}\text{Cs}$  در خاک، تنوع محصولات، عملیات کشاورزی (حاصلخیز کردن خاک و ...) و تفاوت آب و هوایی در طول فصل رشد هستند.

$$\begin{cases} f_3 = f\left(c_{rn} + \frac{1}{2}hf_2, c_{sn} + \frac{1}{2}hg_2, c_{in} + \frac{1}{2}hk_2\right) \\ g_3 = g\left(c_{rn} + \frac{1}{2}hf_2, c_{sn} + \frac{1}{2}hg_2, c_{in} + \frac{1}{2}hk_2\right) \\ k_3 = k\left(c_{rn} + \frac{1}{2}hf_2, c_{sn} + \frac{1}{2}hg_2, c_{in} + \frac{1}{2}hk_2\right) \end{cases} \quad (5)$$

$f_3, g_3$  و  $k_3$  مقادیر توابع  $C_s, C_r$  و  $C_l$  در مرحله سوم و به ازای مجموع مقادیر شرایط اولیه و ضریبی از گام  $h$  به این ترتیب محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} f_4 = f(c_{rn} + hf_3, c_{sn} + hg_3, c_{in} + hk_3) \\ g_4 = g(c_{rn} + hf_3, c_{sn} + hg_3, c_{in} + hk_3) \\ k_4 = k(c_{rn} + hf_3, c_{sn} + hg_3, c_{in} + hk_3) \end{cases} \quad (6)$$

$C_{l(n+1)}, C_{s(n+1)}, C_{r(n+1)}$  مقادیر توابع  $C_s, C_r$  و  $C_l$  در مرحله چهارم و به ازای مجموع مقادیر شرایط اولیه و ضریبی از گام  $h$  به این ترتیب به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} c_{rn+1} = c_{rn} + \frac{1}{6}(f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4) \\ c_{sn+1} = c_{sn} + \frac{1}{6}(g_1 + 2g_2 + 2g_3 + g_4) \\ c_{in+1} = c_{in} + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \end{cases} \quad (7)$$

در نهایت  $C_{r(n+1)}, C_{s(n+1)}$  و  $C_{l(n+1)}$  جدیدی حاصل می‌شود که به ازای آن‌ها این مراحل تکرار می‌شود (۱۳). در این‌جا این الگوریتم با نرم‌افزار MATLAB اجرا شده و دستگاه معادلات حاکم بر مدل سه بخشی برای گیاهان ریشه‌ای حل شده‌است.

### نتایج

در این تحقیق با استفاده از مدل‌های چندبخشی ضرایب انتقال در سبزیجات ریشه‌ای برای  $^{137}\text{Cs}$  با استفاده از معادلات پخش سزیم در خاک و داده‌های به دست آمده از آلودگی سطحی خاک در حادثه فوکوشیما محاسبه شده است. در این بررسی ابتدا داده‌های  $^{137}\text{Cs}$  در خاک منطقه هیتاچی (شکل ۲) به‌عنوان ورودی رابطه (۱) در نظر گرفته شده و با حل آن برای خاک کشاورزی منطقه با  $v = 0.11(\text{cm y}^{-1})$  و  $D = 0.04(\text{cm y}^{-1})$  در عمق‌های مختلف غلظت سزیم

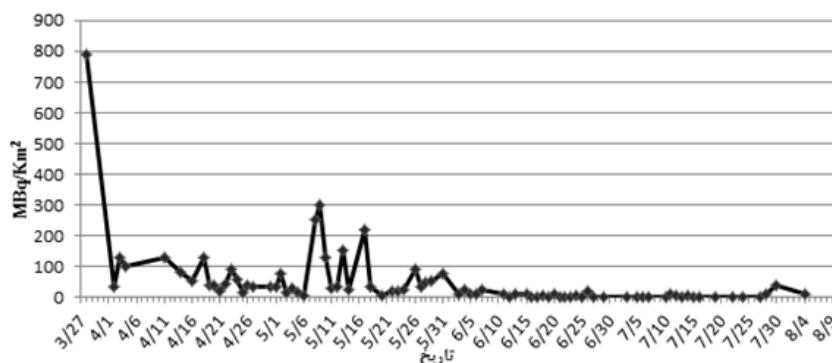
جدول ۱- ضرایب انتقال محاسبه شده برای  $^{137}\text{Cs}$ Table 1-The calculated transfer coefficient for  $^{137}\text{Cs}$ 

|      | $k_1$ | $k_r$  | $k_f$ | $k_f$ | $k_x$ |
|------|-------|--------|-------|-------|-------|
| شلغم | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۸۸  | ۰/۱۱۲ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۳۱ |
| هویج | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۷۷ | ۰/۰۹  | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۳۹ |

## نتیجه گیری

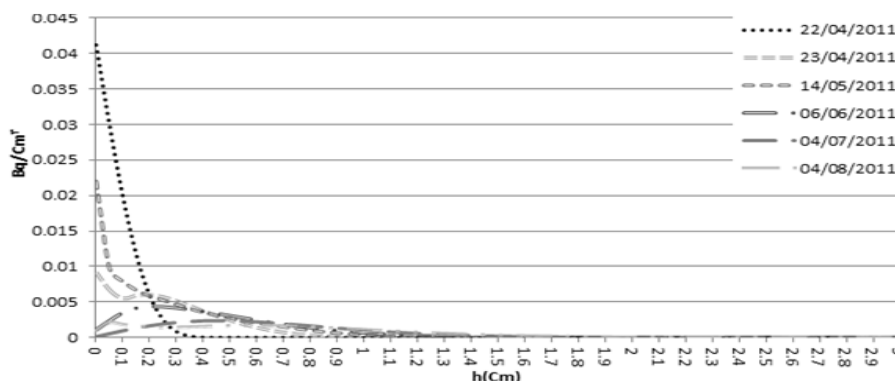
در بخش‌های مختلف به دست آمد. با استفاده از نتایج به دست آمده می‌توان در شرایط رخداد حادثه هسته‌ای، با توجه به داشتن مقدار آلودگی پخش شده  $^{137}\text{Cs}$ ، مقدار آلودگی در گیاه را به دست آورد. این الگوریتم می‌تواند به عنوان روشی برای پیش بینی آلودگی در سبزیجات در حین حادثه به کار رود.

در این تحقیق ضرایب انتقال  $^{137}\text{Cs}$  در بخش‌های مختلف سبزیجات ریشه‌ای مانند هویج با استفاده از مدل چند بخشی محاسبه شده است. برای به دست آوردن ضرایب انتقال، ابتدا غلظت  $^{137}\text{Cs}$  در عمق خاک با استفاده از غلظت آن در سطح خاک اندازه‌گیری شده است. سپس با استفاده از غلظت  $^{137}\text{Cs}$ ، مدل چند بخشی و داده‌های واقعی در گیاه مقدار ضرایب انتقال



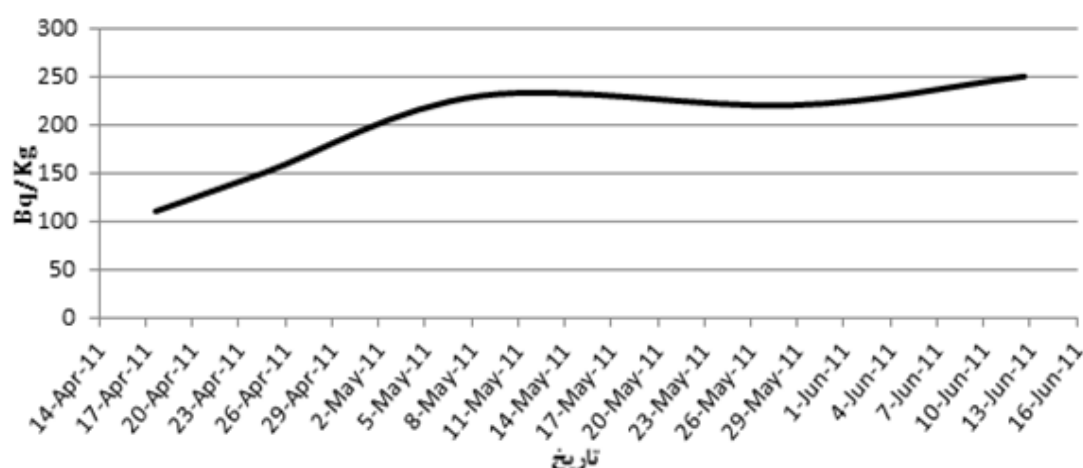
شکل ۲- پرتوزایی اندازه‌گیری شده سطح خاک در منطقه هیتاچی (۱۲)

Figure 2. The measured activity in the soil of Hitachi region(12)



شکل ۳- تغییرات غلظت سزیم بر حسب عمق (۱۲)

Figure 3. The variation of  $^{137}\text{Cs}$  concentration vs. depth (12)



شکل ۴- پرتوزایی <sup>137</sup>Cs اندازه گیری شده در گیاه شلغم (۱۲)

Figure 4. The measured activity <sup>137</sup>Cs in turnip (12)

#### منابع

- agricultural soils, journal of Environmental Radioactivity 65, 2003, 131-145.
- Carini, F. and E. Lombi, Foliar and soil uptake of <sup>134</sup>Cs and <sup>85</sup>Sr by grape vines, Sci. Total Environ, 1997. 207(2-3): p. 157-64.
- von Firck Y., Rosen K., and Sennerby-Forsse L., Uptake and distribution of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in salix viminalis plants, J Environ Radioact, 2002, 63(1): p. 1-14.
- Blomhoj M., Kjeldsen T.H., and Ottesen J., Compartment models, 2005.
- Karadeniza O, Yaprak G. Dynamic equilibrium of radiocesium with stable cesium within the soil-mushroom system in Turkish pine forest, Environmental Pollution, 2007(148): 316-324
- Golikov V, Logacheva I, Bruk G, Shutova V, Shutova M, Strand P, Borghuis S, Howard B, Wright S. Modelling of long-term behavior of caesium and strontium radionuclides in the Arctic environment and human
- Korobova E, Romanov S. Experience of mapping spatial structure of Cs-137 in natural landscape and patterns of its distribution in soil toposequence, Journal of Geochemical Exploration, 2011 ;( 109): 139-145.
- Timms D.N, Smith J.T., Cross M.A, Kudelsky A.V., Horton G., Mortlock R. A new method to account for the depth distribution of Cs-137 in soils in the calculation of external radiation dose-rate, Journal of Environmental Radioactivity 2004; 72: 323-334
- Radiol J. Cesium-137 in the Environment: Radioecology and approaches to assessment and management. Journal of radiology protection, 2007; 27: 375-377
- Almgren S. Studies on the Gamma Radiation Environment in Sweden with Special Reference to <sup>137</sup>Cs. Department of Radiation Physics University of Gothenburg, Sweden Göteborg 2008
- Aslani M. A., Aytas S., Akyil S., Yaprak G., Yener G., Eral M. Activity concentration of caesium-137 in

۱۳. مهري بهمن، ۱۳۸۷، محاسبات عددی، جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیر کبیر.

14. NCRP Report No. 154, Cesium-137 in the Environment: Radioecology and Approaches to Assessment and Management Radiation Protection. Journal of Radiological Protection, 2007: p. 415.

exposure. Journal of Environmental Radioactivity, 2004; (74): 159–169

11. Choi Y, Muk Lim K, Jun I, Kwon Keum D, Hee Han M, Gyu Kim I. Transport behavior and rice uptake of radiostrontium and radiocesium in flooded paddy soils contaminated in two contrasting ways, Science of the Total Environment, 2011; 248–256
12. MEXT, 2011. Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan (MEXT). Monitoring Information of Environmental Radioactivity Level. <http://radioactivity.mext.go.jp/en/>.