

نشریه تابش و فناوری هسته‌ای، سال اول، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۳

کاربرد تابع توزیع ویبال در مطالعه توزیع عمقی سزیوم-۱۳۷

سهیل خوشبین فر^{۱*}، پوریا ناصری^۲

^۱ استادیار فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان

^۲ کارشناس ارشد فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۲/۲۰ - تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۵/۳۰)

چکیده

سزیوم-۱۳۷ به عنوان یکی از مهمترین آلاینده های هسته ای رهاسازی شده از سوانح رخ داده در تاسیسات هسته ای، همواره از منظر رادیو-اکولوژیک مورد توجه بوده است و اطلاعات کمی از نحوه توزیع عمقی در بازه های زمانی مختلف پس از نهبست سطحی اولیه، تاثیر مستقیمی بر الگوی پرتوگیری آتی ساکنین مناطق آلوده دارد. در کنار مدل های عددی دقیق و البته پیچیده، تمایل زیادی به استفاده از الگوهای تحلیلی جایگزین که حاوی مبانی اصلی ترابرد این هسته پرتوزا هستند نیز مشاهده می شود. تابع توزیع ویبال به دلیل انعطاف پذیری بیشتری که نسبت به تابع گاوسی دارد می تواند جایگزین مناسبی برای پاسخ معادله پخش-پهن رفت به شمار رود. در این تابع توزیع دو پارامتر کنترلی مقیاس و شکل وجود دارند که با استفاده از آنها، می توان الگوی توزیع عمقی تجربی با قله جایگزیده یا کشیدگی دنباله را برازش نمود. در این تحقیق با برازش داده های تجربی و شبیه سازی شده نشان داده شده است که تغییرات زمانی الگوی فضایی توزیع عمقی را می توان با تقریب خوبی به کمک این تابع توزیع بیان نمود.

واژه‌های کلیدی: سزیوم-۱۳۷، تابع توزیع ویبال، فرایند پخش و پهن رفت، سانحه چرنوبیل.

* مؤلف مسؤل: استان سمنان، دامغان، دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، کد پستی ۴۱۱۶۷-۳۶۷۱۶.

پست الکترونیکی: skhoshbinfar@du.ac.ir

۱. مقدمه

سزیم-۱۳۷ (^{137}Cs) به عنوان یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های پرتوزا که به شکل مصنوعی و توسط فعالیت‌های علمی، نظامی و یا در اثر حوادث غیرمترقبه‌ی هسته‌ای تولید می‌گردد، شناخته می‌شود. این هسته‌ی پرتوزا با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد و همچنین واپاشی گاما زای پراثری سهمی به سزا در پرتو دهی خارجی و داخلی موجودات زنده واقع در منطقه آلوده دارد. علاوه بر این در صنعت هسته‌ای و در زمینه‌ی نظامی تولید این هسته‌ی پرتوزا امری اجتناب ناپذیر به شمار می‌آید. در طی دهه‌های ۵۰-۴۰ میلادی قرن گذشته، به دلیل انجام آزمایش‌های جوی جنگ افزارهای هسته‌ای و همچنین سوانح هسته‌ای مثل سانحه‌ی نیروگاه چرنوبیل و اخیراً فوکوشیما-دایچی، حجم متناهی از هسته‌ی پرتوزا به محیط وارد شده است. همچنین در مقیاس‌های کوچک تر نیز ^{137}Cs به طور مستمر و نشت معمول از نیروگاه‌های هسته‌ای و همچنین در عملیات بازآوری سوخت هسته‌ای ممکن است که به محیط وارد شود. آنچه که این هسته‌ی پرتوزا را از لحاظ زیست‌شناختی دارای اهمیت زیادی می‌سازد، واپاشی‌های بتا و گاما زای آن می‌باشد که با توجه با نیمه عمر قابل توجه حدود ۳۰ سال و همچنین توانایی‌های این هسته پرتوزا در اتصال به ذرات منفی موجود در خاک مثل مواد ارگانیک و مواد رُسی و نیز پیوند جانشینی با پتاسیم که عنصری مغذی برای موجودات زنده است، می‌تواند به دو صورت داخلی و خارجی، این سلامت انسان را تحت تاثیر قرار دهد. توانایی جذب ^{137}Cs به ذرات با بار منفی در خاک موجب می‌شود که عمده‌ی موجودی آن در خاک، در لایه‌های بالاتر متمرکز شود. علاوه بر این، غلظت ^{137}Cs در اثر فرایندهای مختلفی مثل حذف توسط بارش باران،

حرکت عمودی و پخش به لایه‌های پایین تر خاک کاهش می‌یابد. نوع خاک، عمق خاک، درجه‌ی اسیدیته خاک، ظرفیت مبادله‌ی کاتیونی خاک و درصد مواد ارگانیک از جمله مواردی است که بر حرکت ^{137}Cs تاثیر مستقیم دارد [۳-۴].

۲. فرآیند ترابرد ^{137}Cs نهشتی در خاک

ترابرد سزیم پرتوزا نهشتی در خاک را می‌توان توسط دو فرآیند فیزیکی پخش و پهن - رفت^۱ توصیف نمود. بنابراین این هسته‌ی پرتوزا با ورود به خاک توسط میدان سرعت شارش سیال به حرکت در آمده و در نتیجه‌ی تفاوت غلظت درگیر فرآیند پخش می‌گردد. بنابراین معادله‌ی ترابرد محلول که خود از قانون پایستگی به دست می‌آید را به صورت زیر می‌توان جهت توصیف این ترابرد استفاده نمود [۵-۶]:

$$\frac{\partial}{\partial t} C(z,t) + \frac{\partial}{\partial z} (V_w C(z,t)) = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_w \frac{\partial}{\partial z} C(z,t) \right) \quad (1)$$

که در آن z عمق هسته پرتوزا، $C(z,t)$ غلظت سزیم-۱۳۷ در محلول خاک، t زمان، D_w و V_w ضریب پخش آب در خاک و سرعت انتقال آب هستند. معادله (۱) را می‌توان به کمک حل عددی و اعمال شرایط مرزی و اولیه و تخمین مقادیر پارامترهای d و v حل نمود. با این حال، از آنجایی که اساساً به دلیل حضور گرانش، شارش عمده ماده حل شده در امتداد قائم رخ می‌دهد، به عنوان تقریب و ساده سازی می‌توان از انتشار در راستای افقی چشم پوشی نمود. در ضمن، در استخراج پاسخ تحلیلی، از ساده ترین فرض تبادلی فاز جامد-مایع یعنی تبادل خطی استفاده می‌شود که تا تقریب اول از آنچه در طبیعت رخ داده اعتبار دارد. با اعمال شرایط مرزی و اولیه $c(x,0) = c_0(x)$ و $J(0,t) = J_0(t)$ ، حل تحلیلی معادله (۱) با شرایط اولیه و مرزی اخیر به صورت معادله ۲ است [۷]:

1- Advection

خصوصیات ویژه منطقه، بارش متوسط سالیانه فراتر از mm ۱۰۰۰ و تغییرات نسبتاً سریع ارتفاع جلگه تا کوهستان می باشد. از موارد دیگر تنوع گسترده پوشش گیاهی و تمرکز بالای جمعیتی و پیشه غالب منطقه یعنی زراعت می باشند. از طرفی خاک منطقه نیز تنوع گسترده داشته و از خاک آبرفتی در جلگه تا خاک قهوه‌ای جنگلی در ارتفاعات متغیر است. در انجام عملیات نمونه برداری از خاک منطقه، اعمال ملاحظات استراتژی نمونه برداری و رعایت موارد خاص در مورد ^{137}Cs نظیر هموار بودن زمین، دست نخوردگی خاک حداقل به فاصله زمانی یک نیمه عمر ^{137}Cs ، دوری از مناطق مسکونی و صنعتی از عمده موارد مهم در این خصوص رعایت گردید [۱]. محدود زمانی عملیات نمونه برداری پس از پاییز ۱۳۸۸ انجام گرفت که مطابق شکل ۱ در دو ناحیه نمونه برداری خاک تا عمق ۳۰ cm صورت گرفت. نواحی نمونه برداری، بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج نقشه برداری تراز آلودگی پرتوی استان گیلان انتخاب گردیده اند [۸].

۴. نتایج تجربی

مطابق شبیه سازی های اعتبار سنجی شده نهشت ^{137}Cs ، گسترش ابر آلوده ناشی از سانحه هسته‌ای در نیروگاه چرنوبیل پس از گذشت چند روز به نواحی اطراف همراه با نهشت سطحی مواد پرتوزا بود [۱]. با توجه به وقوع سانحه در فصل بهار و همزمانی حرکت های جریان های جوی و بارش های رگباری، احتمال بروز لکه داغ در نواحی عبوری ابر آلوده افزایش یافت. مطابق بررسی تجربی، نواحی وسیعی از روسیه، بلاروس، اوکراین و شرق اروپا آلودگی شدید هسته‌ای ناشی از پاره‌های شکافت پیدا کردند که به‌طور اساسی تراز آلودگی به شکل مستقیم وابسته به وقوع و شدت نهشت تر ابر آلوده در آن نواحی بود. با شدت کمتر و وابسته به جهت تغییر مسیر و انتشار

$$C(z, t) = \int_0^\infty \left[\frac{1}{\sqrt{\pi D_{eff} \tau}} e^{-\frac{(z-V_{eff}\tau)^2}{4D_{eff}\tau}} - \frac{V_{eff}}{2D_{eff}} e^{\frac{zV_{eff}}{D_{eff}}} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z+V_{eff}\tau}{2\sqrt{D_{eff}\tau}} \right) \right) \right] f(0, t') e^{-\lambda t} dt' \quad (2)$$

که در آن $C(z,t)$ غلظت هسته پرتوزا بر حسب (Bq/cm^3) ، تابع تاریخچه نهشت، $\tau = t - t'$ ، λ ثابت فروپاشی هسته پرتوزا (^{137}Cs)، $\operatorname{erf}(x)$ تابع خطا، و ضرایب (cm^2/y) D_{eff} و V_{eff} ضرایب پخش موثر و سرعت موثر هستند. با توجه به سپری شدن مدت زمان نسبتاً طولانی (بیش از دو دهه) از وقوع سانحه، می توان چشمه آلاینده را با یک تپ که متناظر با یک تابع دلتای دیراک در زمان وقوع حادثه $J_0(t) = J_0 \times \delta(t)$ است، تقریب زد.

$$C(z, t) = j_0 \left[\frac{1}{\sqrt{\pi D_{eff} \tau}} e^{-\frac{(z-V_{eff}\tau)^2}{4D_{eff}\tau}} - \frac{V_{eff}}{2D_{eff}} e^{\frac{zV_{eff}}{D_{eff}}} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z+V_{eff}\tau}{2\sqrt{D_{eff}\tau}} \right) \right) \right] \quad (3)$$

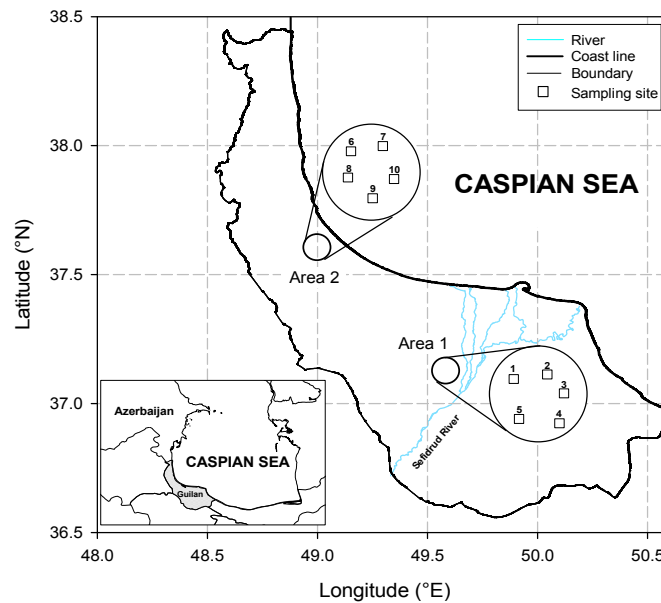
که در آن J_0 سهم نهشت اولیه در زمان $t=0$ است. توزیع عمقی ^{137}Cs در نقاط نمونه برداری عموماً به دو گروه کلی با رفتار اکیداً نزولی یا منحنی با بیشینه زیر سطحی دسته بندی می شود که در مورد اخیر محل این بیشینه در فاصله چندین سانتی متری از سطح خاک و در عمق ۱۰-۵ cm واقع شده است.

۳. منطقه نمونه برداری

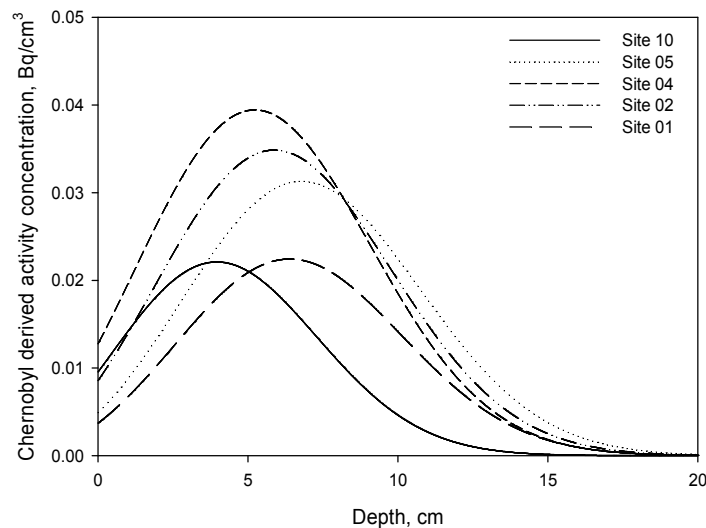
ناحیه مطالعاتی در نیمه غربی خزر در محدود استان گیلان واقع شده است که گستره جغرافیایی آن در محدود عرض های $36/59^\circ$ تا $38/45^\circ$ شمالی و طول های $48/54^\circ$ تا $50/61^\circ$ شرقی مساحتی بالغ بر 14000 km^2 را در بر می گیرد. از

استخراج شده توسط معادله (۳) به کمک مقادیر فعالیت عمقی سنجش شده سزیوم-۱۳۷ در شکل ۲ نشان داده شده است. در اینجا تنها نقاطی که در لایه زیر سطحی خاک دارای قله بیشینه انباشتگی فعالیت هستند، عرضه شده است.

ابر آلوده نواحی بسیار دوردست از جمله نواحی جنوبی خزر و شمال غرب ایران نیز در معرض آلودگی قرار گرفت. مطابق برآورد ها، ابر آلوده در بازه زمانی بین ۳ مه تا ۱۰ مه ۱۹۸۶ میلادی در منطقه حاضر بود و این مدت مقارن با ریزش‌های جوی گردید [۱]. نتایج حاصل از سهم نهشت چرنوبیل



شکل ۱. نقاط نمونه برداری خاک در گستره استان گیلان



شکل ۲. نتایج منحنی برازش سهم چرنوبیل به کمک داده‌های سنجش ^{137}Cs خاک [۹]

۵. مدل سازی

۱۳۷ فراتر از مقدار پیش بینی شده توسط معادله پخش-انتشار است [۱۴-۱۲]. از دلایل مطرح به اختلاف مدل و تجربه می توان به تغییرات پارامترهای ترائردی با گذشت زمان اشاره نمود. در فاز نخست نفوذ عمقی سزیوم-۱۳۷ که مقارن با بارش های جوی است، به دلیل نفوذ سریع محلول خاک تا عمق چند سانتی متری خاک تغییرات سرعت پهن رفت موثر با مدل انطباق خوبی ندارد. در ضمن، مشاهده شده است که با گذشت سالیان متوالی، ضریب پخش موثر تغییر می کند. لذا، به دلیل حضور دنباله کشیده توزیع عمقی به لایه های عمیق تر خاک و شکست تقارن فضایی اطراف قله زیر سطحی، استفاده از تابع توزیع گاوسی برای برازش داده های تجربی با چالشی جدی مواجه می باشد.

در چند سال گذشته، استفاده از تابع توزیع ویبال معرفی و مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد که با کمک پارامترهای تنظیمی خود، قادر به توصیف مناسب روند تغییرات عمقی فعالیت سزیوم-۱۳۷ می باشد. این تابع توزیع بر پارامتر x بر اساس توزیع ویبال^۱ با ۴ پارامتر متغیر به صورت زیر می باشد [۱۵]:

$$C(z, t) = a \left(\frac{c-1}{c} \right)^{\frac{1-c}{c}} \left| \frac{x-x_0}{b} \left(\frac{c-1}{c} \right)^{\frac{1}{c}} \right|^{c-1} \cdot e^{- \left| \frac{x-x_0}{b} + \left(\frac{c-1}{c} \right)^{\frac{1}{c}} \right| + \frac{c-1}{c}} \quad (۴)$$

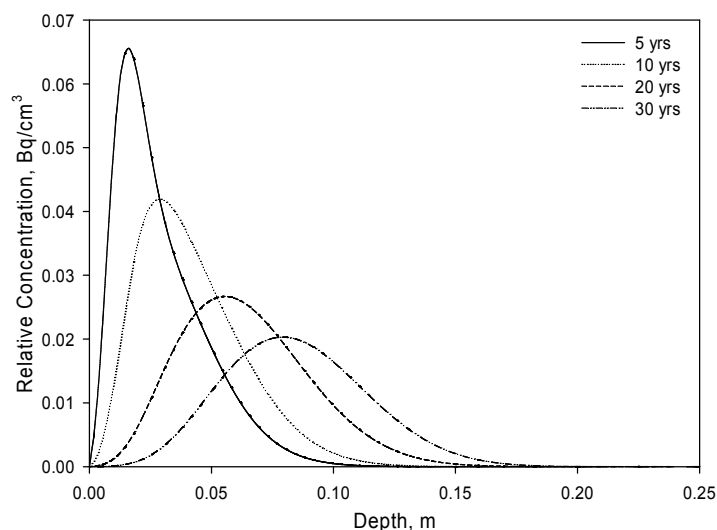
که در آن پارامتر b عبارت از مقدار پخش شدگی و x_0 بیان کننده مکان قله نمودار است. در واقع، در عملیات برازش داده های تجربی با مدل های تحلیلی، تنها از برش عرضی از تابع

با توجه به اینکه، نهشت اولیه سزیوم-۱۳۷ بر روی سطح خاک اتفاق می افتد، توزیع عمقی برای چند سال نخست پس از آن غالباً به راحتی با کمک یک تابع نمایی توصیف می گردد. با گذشت زمان و پر رنگ شدن نقش آفرینی اثرات پهن رفت به همراه فرایند پخش مولکولی در خاک های رسی که حاوی ترکیبات شیمیایی تثبیتی هستند، به تدریج قله ای به نسبت تیز و با پهنای ناچیز در عمق چند سانتی ایجاد می کند. هر چه زمان بیشتر سپری می شود، مکان قله زیر سطحی به عمق های بیشتر جابجا شده و در اثر فرایند پخش مولکولی توزیع عمقی نیز پهنای بیشتری می یابد. در کنار تحول زمانی و مکانی اخیر، عامل حذف فیزیکی ناشی از فروپاشی هسته های سزیوم-۱۳۷ نیز منجر به کاهش محتوی نهشتی و در نتیجه سطح زیر منحنی فعالیت ویژه-عمق خواهد شد. از این رو، در سالهای بعدی از توابع توزیعی که توانایی انطباق مناسبتری دارند باید استفاده می شود. از جمله تابع پیشنهادی تابع نمایی تعمیم یافته، تابع توزیع گاوسی، تابع توزیع گاوسی بازتابی، تابع توزیع لگاریتمی هستند. در بسیاری از موارد مطالعات تجربی-نظری ترجیح داده می شود که از تابع گاوسی (نرمال) استفاده گردد. شاید پیچیدگی فرایند های مرتبط با جابجایی عمودی سزیوم-۱۳۷ در عمق خاک و در حالت کلی، به دلیل عدم اطمینان از درجه تاثیر گذاری مستقیم هر یک، از دلایل عمده استفاده از این تابع قلمداد گردد. یکی از توابع توزیع دیگر با انعطاف پذیری بالا در برازش داده های تجربی، تابع توزیع ویبال^۲ می باشد که در بسیاری از مواقع با تابع توزیع گاوسی همخوانی خوبی دارد [۱۰-۱۱]. این تابع توزیع دارای دو متغیر کنترلی اصلی پارامتر شکل و مقیاسی است. یکی از اثرات تجربی مشاهده شده در توزیع عمقی سزیوم-۱۳۷، موجودی سزیوم-

2- Weibull distribution

در شکل ۳، به وضوح اثرات ناشی از تاثیر فرایند پخش مولکولی با گذشت زمان در لایه زیرین خاک مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با گذشت زمان نقش آفرینی فرایند پهن رفت و فروپاشی فیزیکی نمایان می‌گردند. انتظار می‌رود پس از گذشت چند نیمه عمر سزیوم-۱۳۷، اثرات تعادلی با بروز تابع توزیعی عمقی متمایل به گاوسی ظاهر گردد. در ادامه به منظور ارزیابی کیفیت استفاده از تابع توزیع ویبال در برازش داده‌های تجربی سنجش سزیوم-۱۳۷، از منحنی توزیع عمقی استخراج شده از شبیه سازی عددی استفاده شده است. همانگونه مشاهده می‌شود مطابق جدول (۱)، نتایج برازش منحنی شکل ۳ با تابع توزیع ویبال برای توزیع عمقی سزیوم-۱۳۷ پس از گذشت یک نیمه عمر فیزیکی نشان می‌دهد که این تابع توزیع از انعطاف پذیری بالایی در توصیف توزیع عمقی سزیوم-۱۳۷ نهشتی برخوردار می‌باشد. مطابق مقادیر خطای R^2 گزارش شده می‌توان اینگونه استنباط نمود که در حالت ایده آل می‌توان در یک بازه زمانی طولانی تر با توجه استخراج تابعیت تحول زمانی پارامترهای شکل و مقیاس تابع توزیع ویبال، اقدام به پیش بینی توزیع عمقی در خاک منطقه مورد مطالعه در سالیان بعد نمود.

توزیع عمقی در زمان اندازه گیری سنجش استفاده می‌شود و امکان ارزیابی دقیق تناسب تابع توزیع ویبال برای توصیف توزیع عمقی سزیوم در زمان های مختلف پس از نهشت اولیه مهیا نمی‌باشد. به طور مثال، نخستین بار پس از معرفی به کارگیری این تابع توزیع برای توصیف توزیع عمقی سزیوم-۱۳۷ قریب به ۱۵ سال از وقوع سانحه چرنوبیل سپری شده بود [۱۲]. لذا، پیش از ارزیابی کیفیت برازش آن با داده تجربی سنجش سزیوم-۱۳۷ در استان گیلان، این موضوع را مورد تحلیل نظری قرار می‌دهیم. در این راستا، ابتدا با حل دستگاه معادله شارش سیال و تراژد آلاینده محلول در خاک به ازای شرایط اولیه و مرزی مناسب و اعتبار سنجی نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی موجود، توصیف دقیقی از تحول زمانی توزیع عمقی سزیوم-۱۳۷ ارائه می‌گردد [۲]. به منظور ارزیابی نتایج تجربی با مدل تحلیلی پخش-انتشار و حل عددی ۲- بعدی، در ابتدا بُرشی عمقی از تغییرات غلظت پیش بینی شده توسط شبیه سازی عددی صورت گرفته است و مطابق شکل ۳، توزیع عمقی غلظت نسبی سزیوم-۱۳۷ در زمان های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سال پس از نهشت اولیه نمایش داده شده است.



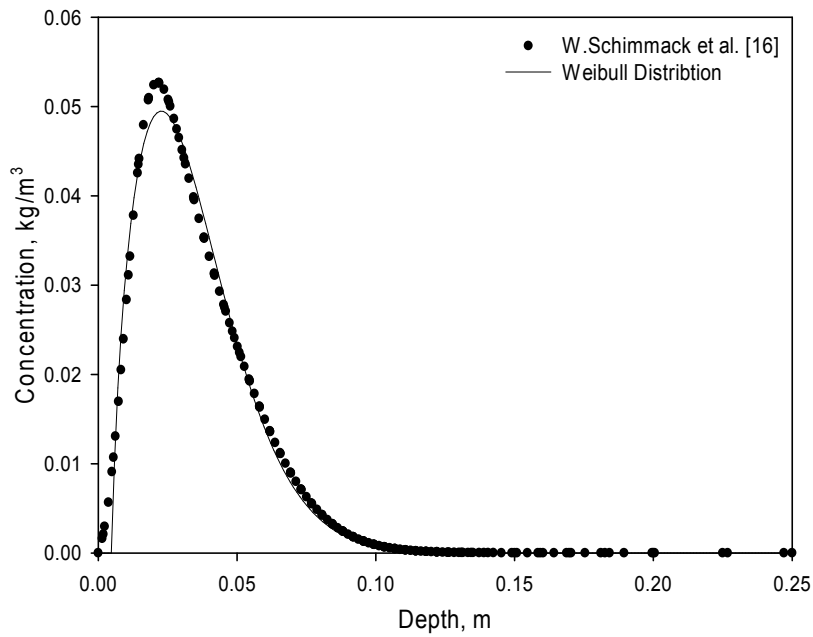
شکل ۳. شبیه سازی نمودار غلظت ^{137}Cs بر حسب عمق سانحه چرنوبیل [۲]

در این ناحیه به دلیل شباهت زیستی سزیوم-۱۳۷ و تبادل مواد مغذی خاک با ریشه گیاهان، تحول زمانی تغییرات عمقی دستخوش انحرافات از پیش بینی مدل‌ها می‌گردد. اما در اعماق بیشتر و کاهش اثرات ذکر شده اختلاف میان مدل-داده‌های تجربی کمتر می‌گردد. به عنوان نمونه ای دیگر، می‌توان در مطالعه ای که در خاک های جنگلی استان گیلان به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۵، پس از گذشت ۲۱ از نهشت چرنوبیل انجام گرفته است. همانگونه که مشاهده می‌شود در این نمودار، پس از سپری شدن بیش از دو دهه از وقوع سانحه و قرار گیری قله زیر سطحی در عمق بیشتری از خاک، شاهد انحراف بسیار ناچیزی تنها در ۱cm سطحی خاک هستیم. بدین ترتیب مشاهده می‌شود که به کارگیری تابع توزیع ویبال در توصیف کمی توزیع عمقی سزیوم بسیار مفید بوده و نتایج قابل قبولی ارائه می‌کند.

پس از موفقیت اولیه در به کارگیری تابع توزیع ویبال در توصیف توزیع عمقی سزیوم-۱۳۷، در گام بعدی، مستقیماً به سراغ داده‌های تجربی می‌رویم. بدین منظور، دو نمونه از خاک های نمونه برداری شده جنگلی و همچنین علفزار در این ارزیابی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در مطالعه ای که در ۱۰ نمونه از خاک های علفزار های کشور آلمان و پس از گذشت هفت سال از سانحه چرنوبیل صورت گرفته، قسمت عمده ی ^{137}Cs در لایه دوم و در حد فاصل بین ۲ الی ۴ سانتی متری خاک قرار دارد [۱۶]. مطابق شکل ۴، مدل سازی توزیع عمقی گزارش شده با تابع توزیع ویبال نشان می‌دهد که پس از برازش داده‌ها، مکان قله در ۲/۲۷ سانتی متر و پخش شدگی برابر با ۳/۲۳ سانتی متر به دست می‌آیند. در مطالعه توزیع عمقی ۱۰cm سطحی خاک ناحیه ریشه^۱ اطلاق می‌گردد.

جدول ۱. میزان پخش شدگی و مکان قله ی توزیع ^{137}Cs در سال های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ پس از نهشت چرنوبیل

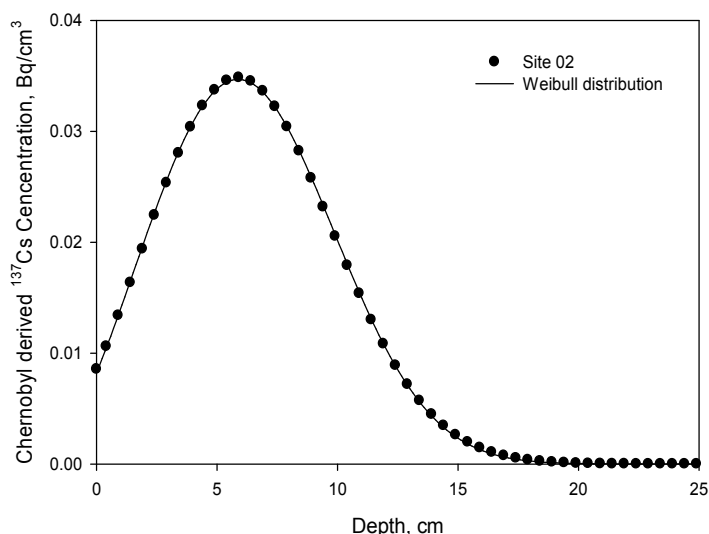
سال	پخش شدگی (cm)	مکان قله (cm)	R^2
۵	۲/۶۳	۱/۵۶	۰/۹۸۱۷
۱۰	۳/۹۲	۳/۰۵	۰/۹۹۵۸
۲۰	۶/۰۷	۵/۶۴	۰/۹۹۸۹
۳۰	۶/۶۷	۸/۰۱	۰/۹۹۹۳



شکل ۴. برازش غلظت سزیم-۱۳۷ نهشتی چرنوبیل مرجع [۱۶] با تابع توزیع ویبال

جدول ۲. میزان پخش شدگی و مکان قله‌ی توزیع ^{137}Cs نهشتی چرنوبیل از منبع [۹]

R^2	مکان قله (cm)	پخش شدگی (cm)	محل نمونه برداری
۰/۹۹	$۶/۳۹۳ \pm ۰/۰۰۴$	$۹/۹۲۹ \pm ۰/۰۲۳$	۰۱
۰/۹۹	$۵/۸۷۱ \pm ۰/۰۰۳$	$۹/۹۱۹ \pm ۰/۰۰۲$	۰۲
۰/۹۹	$۵/۲۱۱ \pm ۰/۰۰۲$	$۹/۵۱۸ \pm ۰/۰۱۷$	۰۴
۰/۹۹	$۶/۷۹۹ \pm ۰/۰۰۴$	$۱۰/۴۶۰ \pm ۰/۰۲۵$	۰۵
۰/۹۹	$۳/۹۳۹ \pm ۰/۰۰۲$	$۸/۰۴۲ \pm ۰/۰۱۲$	۱۰



شکل ۵. برازش غلظت سزیموم-۱۳۷ نهشتی چرنوبیل مرجع [۹] با تابع توزیع ویبال

۶. نتیجه گیری

علی رغم تمهیدات در نظر گرفته شده در تاسیسات هسته‌ای، یکی از پیامدهای ناخواسته در آنها سوانح می باشد که در اثر آن مقادیر متناهی از مواد پرتوزا با نیمه عمرهای متفاوت به محیط زیست تزریق می گردد. با توجه به ماهیت ذاتی، قسمت اعظم آنها در روزهای نخست تا چند سال اول به دلیل فروپاشی فیزیکی حذف می گردند. با این وجود هسته‌های پرتوزای با نیمه عمر نسبتاً طولانی تر به ویژه سزیموم-۱۳۷ که به علت گسیل پرتوهای گاما از لحاظ پرتوگیری داخلی و خارجی از اهمیت بسزایی برخوردارند. عموماً، مقصد اولیه سزیموم-۱۳۷ پس از رها سازی جو بوده که توسط توده‌های اصلی جوی با مناطق دور و نزدیک محل سانحه منتقل می گردند که همراهی این رویداد با ریزش های جوی موجب نهشت سطحی بر روی سطح زمین می گردد. آگاهی از توزیع عمقی سزیموم-۱۳۷ نهشتی و همچنین امکان پیش بینی آن در آینده بسیار حیاتی است چراکه نفوذ عمقی اندک در بازه زمان طولانی به معنی اقامت طولانی مدت در منطقه ریشه و آلودگی پوشش گیاهی سطحی و در مقابل نفوذ عمقی زیاد در

زمان کوتاه به معنی آلودگی منابع آبی زیر زمینی خواهد بود. از آنجایی که خاک خواستگاه نهایی این مواد پرتوزا است خصوصیات خاک منطقه نهشتی مستقیماً بر سرنوشت تراژد اثرگذار است. از این رو همواره تلاش شده است تا درک نظری مناسبی از روند تغییرات مکانی و زمانی بدست آید. یکی از موفق ترین مدل های نظری مدل پخش - پهن رفت است که قادر به توصیف الگوی توزیع عمقی سزیموم نهشتی است. با این وجود استفاده از توابع توزیع تحلیلی نظیر نمایی، گاوسی، لگاریتمی و اخیراً ویبال توانسته اند نقش جایگزین ساده و توانمندی از خود نشان دهند. از خصوصیات ویژه تابع توزیع ویبال انعطاف پذیری بالای نهفته در آن برای برازش داده‌های تجربی سنجش شده غلظت سزیموم-۱۳۷ است که در کیفیت برازش بهتری نسبت به هم‌تای گاوسی و لگاریتمی خود در بازه زمانی یک نیمه عمر سزیموم-۱۳۷ نمایش می دهد.

مراجع

- [9] MV. Moghaddam, S. Khoshbinfar, Vertical migration of ^{137}Cs in the South Caspian soil, *Radioprotection*, 47 (04), 561-573, 2012.
- [10] J. I. McCool, Using the Weibull Distribution: Reliability, Modeling, and Inference, Wiley Series in Probability and Statistics, 73-97, 2012.
- [11] H. Pahl, Springer Handbook of Engineering Statistics, Springer-Verlag London, 63-79, 2006.
- [12] H. Dahm, J. Niemeyer, D. Schröder, Application of the Weibull distribution to describe the vertical distribution of cesium-137 on a slope under permanent pasture in Luxembourg, *J Environ Radioact*, 63(3), 207-219, 2002.
- [13] M. A. Sigurgeirsson, O. Arnalds, S. E. Palsson, B. J. Howard, K. Gudnason, Radiocaesium fallout behavior in volcanic soils in Iceland, *J Environ Radioact*, 79(1), 39-53, 2005.
- [14] X. Lu, Application of the Weibull extrapolation to ^{137}Cs geochronology in Tokyo Bay and Ise Bay, Japan, *J Environ Radioact*, 73(2), 169-181, 2004.
- [15] SYSTAT, Statistical and Graphical Software, www.systat.com, accessed 1 March, 2014.
- [1] W. Schimmack, H. Flessa, K. Bunzl, Vertical Migration of Chernobyl-Derived Radiocesium in Bavarian Grassland Soils, *Naturwissenschaften*, 84, 204-207, 1997.
- [۱] س. خوشبین فر، بررسی توزیع عمقی سزیموم-۱۳۷ در خاک ناحیه جنوب غربی دریای خزر، رساله دکتری فیزیک هسته‌ای، دانشگاه گیلان، ۱۳۸۹.
- [۲] پ. ناصری، مدل سازی عددی فرایند پخش-انتشار ^{137}Cs نهشتی در خاک، پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای، دانشگاه دامغان، ۱۳۹۲.
- [3] NCRP Report. Cesium-137 in The Environment Radiocology and Approaches to Assessment and Management, National Council on Radiation Protection and Measurements, 2006.
- [4] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR Report, 2000.
- [5] E. Holzbecher, Environmental Modeling Using Matlab, London: Springer, 2012.
- [6] D. Krstic, D. Nikezic, N. Stevanovic, M. Jelic, Vertical profile of ^{137}Cs in soil, *Appl Radiat Isot*, 61, 1487-1492, 2004.
- [7] P. Bossew, G. Kirchner, Modelling the vertical distribution of radionuclides in soil. Part 1: the convection-dispersion equation revisited, *J Environ Radioact*, 73, 127-150, 2004.
- [8] S. Khoshbinfar, MV. Moghaddam, Spatial variability of soil ^{137}Cs in the South Caspian region, *Environ Monit Asses*, 184 (5), 3053-3062, 2012.

Application of the Weibull distribution function in Cs-137 vertical migration modelling

S. Khoshbinfar^{1*}, P. Nasser²

1. Assistant professor, Department of physics, Faculty of science, Damghan University, Semnan

2. M.Sc, Department of physics, Faculty of science, Damghan University, Semnan

* Corresponding author's E-mail: skhoshbinfar@du.ac.ir

(Received: 10/5/2014 - Accepted: 21/8/2014)

ABSTRACT

Radiocesium, as one of the most important radioactive released material from accident happening in nuclear installations, make a global attraction in radioecology community. Quantitative insight of its depth profile since the initial ground deposition has a direct impact on the future exposure pattern of the inhabitant living in contaminated areas. Among the available sophisticated and precise numerical models, there still exists a global interest to invoke a robust analytical counterpart including the main physico-chemical basis of radioactive species transport. Because of the more flexibility inherent in the Weibull distribution function, it can be adopted as a suitable alternative choice of the Gaussian distribution function for the analytical solution of the advection-dispersion equation. It has two adjustable parameters of the shape and scale which with them, we can manage reasonably the interpolation quality of the measured Cs-137 depth profile showing a local subsurface peak or a prolongation tail. In this research, using the measured Cs-137 depth profile data and numerical simulation results, we have shown that the Weibull distribution stay at trustable level to describe the time evolution of experimental Cs-137 depth profile.

Keywords: *Cs-137, Weibull distribution function, Advection-dispersion model, Chernobyl accident*